

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2022

**MATĚJ
TYC**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Tyc** Jméno: **Matěj** Osobní číslo: **482631**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Využití aditivní výroby kovů pro solné reaktory

Název bakalářské práce anglicky:

The Use of Additive Manufacturing Technologies for Molten Salt Reactors

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši solných reaktorů
- 2) Zpracujte přehled současných aktivit výzkumu a vývoje solných reaktorů
- 3) Seznamte se s aditivní výrobou kovů a popište vybrané typy
- 4) Připravte a proveďte vybrané statické korozní testy konstrukčních materiálů v soli NaF-NaBF₄
- 5) Proveďte analýzu testovaných vzorků
- 6) Porovnejte klasické materiály s materiály získanými aditivní výrobou
- 7) Diskutujte výsledky
- 8) Vše přehledně zpracujte do bakalářské práce

Seznam doporučené literatury:

T.J. Dolan: Molten Salt Reactors and Thorium Energy. 2017
S. Cooke et al.: Metal additive manufacturing: Technology, metallurgy and modelling. 2020. Journal of Manufacturing Processes, 57, 978-1003

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Michal Cihlář ústav energetiky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **21.04.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **03.06.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2023**

Ing. Michal Cihlář
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma „Využití aditivní výroby kovů pro solné reaktory“ vypracoval samostatně a s použitím uvedené literatury a odborných konzultací.

V Praze dne 1. 6. 2022

.....

Matěj Tyc

Anotační list

Jméno autora	Matěj Tyc
Název bakalářské práce	Využití aditivní výroby kovů pro solné reaktory
Anglický název	The Use of Additive Manufacturing Technologies for Molten Salt Reactors
Akademický rok	2021/2022
Ústav/obor	Ústav energetiky
Vedoucí bakalářské práce	Ing. Michal Cihlář
Bibliografické údaje	Počet stran: 64 Počet tabulek: 7 Počet obrázků: 25 Počet příloh: 3
Klíčová slova	Solné reaktory, aditivní technologie, AISI 316L, Inconel 718, koroze
Keywords	Molten salt reactors, additive technologies, AISI 316L, Inconel 718, corrosion
Anotace	<p>Teoretická část této bakalářské práce se zaměřuje na popis aktuálního výzkumu v oblasti solných reaktorů. Druhá polovina teoretické části pak shrnuje kovové aditivní metody. V praktické části se korozně porovnávají materiály konvenčně získané AISI 316L a Inconel 718 s aditivně získanými v prostředí tekuté soli NaF-NaBF₄. V závěru práce je shrnutí rozdílů korozního chování mezi jednotlivými materiály, v závislosti na teplotě, relativním úbytku Cr a hmotnostním úbytku.</p>

Abstract

Theoretical part of this bachelor's thesis focuses on current research in area of molten salt reactors. Second half of the theoretical part sums up metal additive manufacturing methods. In practical section, the corrosion behavior of additively manufactured materials AISI 316L and Inconel 718 and conventionally manufactured materials are compared in molten salt NaF-NaBF₄ environment. In the conclusion of the thesis, summary of corrosion behavior of those materials is stated in relation to temperature, relative depletion of Cr and mass depletion of those materials.

Poděkování

V této části bych rád poděkoval svému vedoucímu, panu Ing. Michalovi Cihláři, za veškerou pomoc s vypracováním této bakalářské práce, včetně nesčetných rad a vedení, bez kterých bych tuto práci nenapsal. Dále bych rád poděkoval své mamce za psychickou podporu a pomoc při jazykové korektuře. V neposlední řadě bych rád poděkoval Centru výzkumu Řež, za možnost provedení a následné vyhodnocení experimentů.

Obsah

Seznam zkratk	9
Seznam obrázků	11
1. Úvod	13
2. Současný výzkum reaktorů chlazených tekutými solemi	16
2.1 SINAP	16
2.2 Univerzity	19
2.2.1 University of Wisconsin – Madison	19
2.2.2 University of California, Berkeley	23
2.2.3 Massachusetts Institute of Technology	27
3. Aditivní technologie	29
3.1 Úvod	29
3.2 Powder bed fusion systems	30
3.2.1 Metoda SLM	31
3.2.2 Metoda EBM	31
3.3 Powder fed fusion systems	32
3.3.1 Metoda DED	32
3.3.2 Binder jetting	34
4. Analýza koroze u vybraných materiálů	35
4.1 Úvod	35
4.2 Experiment	36
4.2.1 Příprava vzorků	36
4.2.2 Příprava experimentu	36
4.2.3 Očištění vzorků	37
4.2.4 Analýza vzorků	38
4.2.4.1 Energiově Disperzní Rentgenová Spektroskopie	38

5. Výsledky.....	39
5.1 Zpracování dat.....	39
5.2 S-S 316L.....	41
5.3 Inconel 718.....	44
6. Závěr.....	48
Bibliografie.....	50
Příloha 1 – Tabulky	57
Příloha 2 – Grafy	61
Příloha 3 – Obrázky.....	63

Seznam zkratek

AM	Materiál získaný aditivními technologiemi
BJ	Aditivní technologie, <i>Binder Jetting</i>
C-C	Kompozit Karbon-Karbon, <i>Carbon-Carbon</i>
DMLS	Aditivní technologie PBF, <i>Direct Metal Laser Sintering</i>
DOE	Americké ministerstvo energetiky, <i>US Department of Energy</i>
EURATOM	Evropské společenství pro atomovou energii, <i>European Atomic Energy Community</i>
EVOL	Evropský typ solného reaktoru, <i>Evaluation and Viability of liquid Fuel Salt Reactor System</i>
FHR	Vysoko teplotní fluoridovou solí chlazený reaktor, <i>Fluoride-salt-cooled High temperature Reactor</i>
FLiBe	Označení tekuté soli $2\text{LiF}\cdot\text{BeF}_2$
FLiNaK	Označení tekuté soli $\text{LiF}\cdot\text{NaF}\cdot\text{KF}$
GIF	Mezinárodní fórum reaktorů generace IV, <i>The Generation IV International Forum</i>
IRP	Integrovaný výzkumný projekt. <i>Integrated Research Project</i>
LFR	Olovem chlazený rychlý reaktor, <i>Lead-Cooled Fast Reactor</i>
LWR	Lehkovodní reaktor, <i>Light Water Reactor</i>
MIT	Massachusettský Technologický Institut, <i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MITR	Reaktor Massachusettského technologického institutu, <i>Massachusetts Institute of Technology Reactor</i>
Mk1 PB FHR	První certifikovaný model oblázkového reaktoru typu FHR, <i>Mark 1 Pebble Bed Fluoride-salt-cooled High temperature Reactor</i>
MOSART	Ruský typ solného reaktoru, <i>Molten Salt Actinide Recycler and Transmuter</i>
MSFR	Rychlý solný reaktor, <i>Molten Salt Fast Reactor</i>
MSR	Solný reaktor, <i>Molten Salt Reactor</i>
N	Materiál získaný konvenčními technologiemi
ORNL	Národní laboratoř Oak Ridge, <i>Oak Ridge National Laboratory</i>
PB FHR	Oblázkový typ reaktoru FHR, <i>Pebble Bed Fluoride-salt-cooled High temperature Reactor</i>
PBF	Aditivní technologie, <i>Powder Bed Fusion</i>
PFF	Aditivní technologie, <i>Powder Fed Fusion</i>
SEM	Rastrovací elektronový mikroskop, <i>Scanning Electron Microscope</i>
SINAP	Šanghajský institut aplikované fyziky, <i>Shanghai Institute of Applied Physics</i>
SLM	Aditivní technologie, <i>Selective Laser Melting</i>
SLS	Aditivní technologie, <i>Selective Laser Sintering</i>
S-S 316L	Nerezová ocel AISI 316L
TMSR	Solný reaktor s thoriovým palivovým cyklem, <i>Thorium-Based MoltenSalt Reactor</i>

TMSR-LF	Solný reaktor s thoriovým palivovým cyklem pracující s tekutým palivem, <i>Thorium-Based MoltenSalt Reactor – Liquid Fuel</i>
TMSR-SF	Solný reaktor s thoriovým palivovým cyklem pracující s tuhým palivem, <i>Thorium-Based MoltenSalt Reactor – Solid Fuel</i>
UCB	Kalifornská univerzita v Berkeley, <i>University of California, Berkeley</i>
UW	Wisconsinová univerzita v Madison, <i>University of Wisconsin, Madison</i>
VHTR	Vysoko teplotní reaktor, <i>Very-High-Temperature Reactor</i>

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Schéma reaktoru TMSR-SF o tepelném výkonu 10 MW [8]	17
Obrázek 2 – Schéma systému PRHRS [8]	18
Obrázek 3 – Fotografie kampusu University of Wisconsin, Madison [19]	19
Obrázek 4 – Porovnání distribuce tepla v trubce při teplotě $T_w = 700$ °C, průměru $D = 0,02$ m a emisivitě $\varepsilon = 0,3$ pod nucenou konvekcí (nalevo), přispívající smíšenou (uprostřed) a odporující smíšenou (napravo) [20]	20
Obrázek 5 - Schémata pozic v aktivní zóně pro soubor u FS-2 (nalevo) a pro soubor u FS-3 v pohledu řezu (napravo) [23].....	21
Obrázek 6 – Porovnání slitin obsahující Cr v tekuté soli FLiNaK obsahující příměs EuF_3 [24]	22
Obrázek 7 – Fotografie kampusu University of California, Berkeley [29].....	23
Obrázek 8 – Schématický diagram použité triádní metody v experimentu [30].....	24
Obrázek 9 – Porovnání normalizovaného neutronového spektrálního toku v čistých a kontaminovaných solích: absolutní hodnota (nahore) a relativní rozdíl (dole) [31].....	25
Obrázek 10 – Graf závislosti rozštěpení zpožděných fotoneutronů na vyhoření u „unit-cell“ modelu [32]	26
Obrázek 11 – Fotografie kampusu Massachusetts Institute of Technology [36].....	27
Obrázek 12 – Rozdělení odpadů z MSR [37]	27
Obrázek 13 – Systémové uspořádání subkritického zařízení poháněném MIT reaktorem [13]	28
Obrázek 14 – Ukázka modelu sestaveném aditivními technologiemi [39].....	29
Obrázek 15 – Schéma metody SLM [42].....	31
Obrázek 16 – Schéma metody EBM [42]	32
Obrázek 17 – Schéma metody DED, [41].....	33
Obrázek 18 – Schéma metody BJ [50].....	34
Obrázek 19 – Fotografie váhy Precisa 125A [10].....	36

Obrázek 20 – Fotky z přípravy měření: a) Záchytný grafitový kelímek s čtyřmi grafitovými kapsulemi obsahující vzorky s zalité tekutou solí NaF-NaBF ₄ ; b) Rukavicový box [10].....	37
Obrázek 21 – Fotografie očištěných vzorků.....	37
Obrázek 22 - Snímky z mikroskopu materiálů S-S 316L N (nalevo) a S-S 316L AM (napravo) před experimenty.....	40
Obrázek 23 – Snímky z mikroskopu materiálů Inconel 718 N (nalevo) a Inconel 718 AM před experimenty.....	40
Obrázek 24 – Snímky z mikroskopu materiálu S-S 316L N po vystavení teplotě 550 °C v tekuté soli NaF-NaBF ₄ po dobu 720 h.....	42
Obrázek 25 – Snímky z mikroskopu materiálu Inconel 718 N po vystavení teplotě 550 °C v tekuté soli NaF-NaBF ₄ po dobu 720 h.....	46

1. Úvod

V 21. století jsme čím dál závislejší na elektronických přístrojích, které nám pomáhají v každodenním životě, ať je to život pracovní či odpočinkový. Tyto přístroje jsou pro nás někdy i nezbytné pro přežití, například v nemocnicích. Nicméně přístroje samotné nezmůžou nic bez elektrické energie, kterou jim musíme dodat. Výroba elektrické energie se jak ve světě, tak u nás v České republice, v průběhu let měnila a stále mění. V minulém století byly k tomuto účelu využívány v naprosté většině uhelné elektrárny, které mají největší zastoupení i dnes. Tyto elektrárny dominují svou jednoduchostí, stabilitou výroby a dodávky elektrické energie či relativně levným palivem (černé či hnědé uhlí). Mezi jejich oponenty patří jaderné elektrárny, které pracují na podobných principech získávání elektrické energie, ale teplo získávají štěpením atomu radioaktivního materiálu, namísto pálení uhlí. Jaderné elektrárny jsou mnohem složitější a vyžadují mnohem vyšší důraz na bezpečnost provozu. K jejich výhodám však patří vysoký a stabilní odběr energie z mnohem nižšího množství paliva a bezemisivita a je tak velice probíranou možností, která je více a více využívána po celém světě. [1, 2]

Vývoj tohoto odvětví probíhá od roku 1942, kdy byl sestaven první jaderný reaktor s názvem „Chicago Pile-1“, který vznikl v rámci projektu Manhattan, v té době hlavně pro výzkum štěpení a extrahování plutonia. O pár let později vznikla mezinárodní organizace International Atomic Energy Agency, která se dodnes zabývá problematikou jaderné energetiky, jako je její bezpečnost či výzkum nových technologií v této oblasti. Výzkum reaktorů v průběhu let můžeme rozdělit do 4 generací [3, 4]:

1) I. Generace

- Reaktory vyvíjené přibližně v letech 1950-1970, které sloužily spíše na výzkum jednotlivých technologií

2) II. Generace

- Výzkum reaktorů probíhající v letech 1970-1995, kde se jednalo hlavně o středně velké komerční jaderné reaktory, hlavně reaktory LWR, které jsou dodnes nejrozšířenějším typem jaderných reaktorů

3) III./III.+ Generace

- Reaktory, které jsou z převážné většiny evolučním nástupcem LWR a měly by být v provozu a dále vyvíjeny přibližně do roku 2030, kdy se počítá provozuschopnost většiny reaktorů IV. Generace

4) IV. Generace

- Nepřímými nástupci reaktorů III./III.+ generace jsou reaktory IV. Generace, často nazývané „revoluční“, kvůli jejich rozdílnosti od klasických LWR

Cílem reaktorů IV. Generace je zajistit čistý stabilní příjem energie, co se životního prostředí i ekonomického dopadu týče. Dále je zde kladen velký důraz na bezpečnost – reaktory musí být schopné odolat nežádoucím únikům radioaktivního materiálu a obecná šance na poškození aktivní zóny by měla být co nejnižší. Poslední ale neméně důležitou částí reaktorů tohoto typu je vysoké využití jejich paliva, jehož produkty by nemělo být možné využít k výrobě zbraní hromadného ničení. Tyto podmínky pro vývoj jaderných reaktorů byly sepsány na mezinárodním fóru GIF. [5]

Výsledkem těchto vysokých podmínek je vývoj 6 typů reaktorů, mezi které patří například VHTR nebo LFR. Každý koncept má své výhody a nevýhody vůči zmíněným základním podmínkám vývoje. Například z pohledu využívaného paliva či stabilního chlazení tohoto paliva při vysokých teplotách. V tomto ohledu zde vynikají reaktory typu MSR, v češtině překládané jako solné reaktory. [5, 6]

Výzkum reaktorů typu MSR začal již ve čtyřicátých letech minulého století, primárně v instituci ORNL, která se snažila vytvořit jaderný reaktor využitelný v leteckém průmyslu. Výzkum se částečně zastavil v sedmdesátých letech z finančních důvodů, avšak v menším měřítku pokračoval dál v instituci ORNL, a i v jiných zemích (např. výzkum typu MOSART v Rusku). Jedním z hlavních důvodů opětovného výzkumu ve větším měřítku bylo zapsání na zmíněný list šesti typů reaktorů v roce 2002. Argumentů pro zapsání bylo hned několik – vysoká bezpečnost daná vysokou stabilitou paliva, vysoká termodynamická účinnost díky vysokým teplotám, kterých jsme schopni dosáhnout u roztavených solí (bez potřeby vysokých tlaků k zabránění sublimace chladiva) či vyšší využití potenciálu paliva. Samozřejmě má daná technologie i své nevýhody, kde je jednou z hlavních otázka potřebných materiálů, které musí odolávat negativním vlivům při dlouhodobém vystavení tekutým solím. [7, 8]

K hlavním vlastnostem těchto konstrukčních materiálů, oproti materiálům využívaných v reaktorech předchozích generací, tak musí patřit korozivzdornost vůči použitým solím. S tím souvisí i technologie, kterými jsou tyto materiály připraveny. Tyto technologie se mohou měnit pro jednotlivé části, vzhledem k jejich velikostem a složitosti tvarů. V tomto ohledu by bylo možné využít aditivních technologií, které nabízí tvorbu velice komplexních výrobků a jejichž výroba může probíhat rychleji oproti konvenčním metodám. Stejně jako u konvenčních

materiálů je zde tak otázka korozivzdornosti aditivně získaných materiálů vůči tekutým solím v MSR a její porovnání s korozivzdorností konvenčních materiálů. Právě na tuto otázku se zaměřuje tato práce, která v rešeršní části shrnuje nedávné výzkumy v oblasti MSR a základní rozdělení aditivních technologií. Praktická část se pak snaží zodpovědět korozní chování aditivně získaných materiálů Nerezové oceli AISI 316L a Inconel 718 oproti jejich konvenčně získaným variantám v tekuté soli NaF-NaBF₄, která by se měla používat jako sekundární chladivo u reaktorů MSR. [9,10]

2. Současný výzkum reaktorů chlazených tekutými solemi

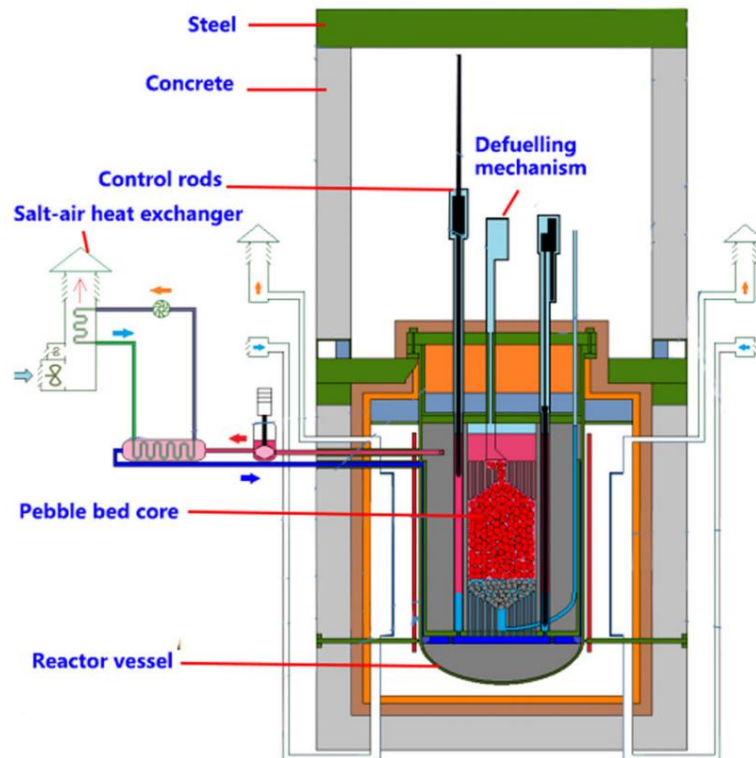
Jak už bylo výše zmíněno, výzkum reaktorů chlazených tekutými solemi probíhá již od 40. let minulého století. Novodobý vývoj přišel až okolo roku 2002, kdy byly reaktory MSR zapsány na seznam reaktorů Generace IV. Po celém světě vzniklo mnoho konceptů a projektů, například již zmíněný MOSART v Rusku či MSFR navržený v projektu EVOL od EURATOM. Typ reaktoru chlazený tekutou solí, využívající tuhé palivo, je známý pod názvem FHR. Na vývoji FHR reaktoru se nejvíce podílí USA a Čína, proto zde jsou zmíněny právě jejich projekty. [8, 11]

2.1 SINAP

Šanghajský institut byl založen v 60. letech minulého století a od roku 2003 se oficiálně jmenuje Šanghajský Institut Aplikované Fyziky SINAP. Mezi hlavní výzkumy této instituce patří vývoj reaktoru chlazeného tekutými solemi s thoriovým palivovým cyklem, aplikování jaderných technologií v ochraně životního prostředí, zlepšení materiálů využívaných v jaderné energetice či v efektivním ukládání energie. Samotný institut je rozdělen do dvou kampusů, na kterých pracuje okolo 500 vědců a přibližně stejný počet studentů magisterských a doktorandských oborů, mezi které patří například studium jaderné fyziky, biofyziky či informačního procesování. Během svého provozu získal SINAP mnoho vědeckých úspěchů, některé byly oceněny především čínskou vládou, za například malý cyklotronový hmotnostní spektrometr či pokrok v syntéze nukleotidů. [12]

K hlavním projektům na Šanghajském institutu v oblasti MSR patří čínský TMSR projekt. Mezi cíle tohoto národního projektu patří například zajištění efektivního využití thoria v palivovém cyklu či výroba vodíku v jaderné energetice. Těchto a dalších cílů by chtěl SINAP dosáhnout v časovém rozmezí 20 až 30 let od začátku projektu v roce 2011. Projekt jako takový je zaměřen na vývoj TMSR reaktorů s tuhým (TMSR-SF) i tekutým (TMSR-LF) palivem a jejich blízkou výstavbou. Zatímco je TMSR-LF lákavější variantou reaktoru, vyžaduje též více příprav a výzkumu, proto je jako první funkční reaktor plánován TMSR-SF, jehož experimentální prototyp měl být dostavěn do roku 2020. TMSR-SF vychází z konceptu reaktoru PB FHR, z kalifornské univerzity UCB. Původně byl tento reaktor koncipován na tepelný výkon o hodnotě 2 MW, který ale SINAP v roce 2013 upravil na koncept o tepelném výkonu 10 MW. Schéma tohoto upraveného reaktoru je na obr. 1. Reaktor jako takový je cylindrického designu a palivo je zde ve formě obléžků, náhodně uspořádaných v aktivní

zóně. Primární chladivo, zde tekutá sůl, odebírá v aktivní zóně vyprodukované teplo a předává ho ve výměníku sekundárnímu médiu, zde vzduchu. [8]

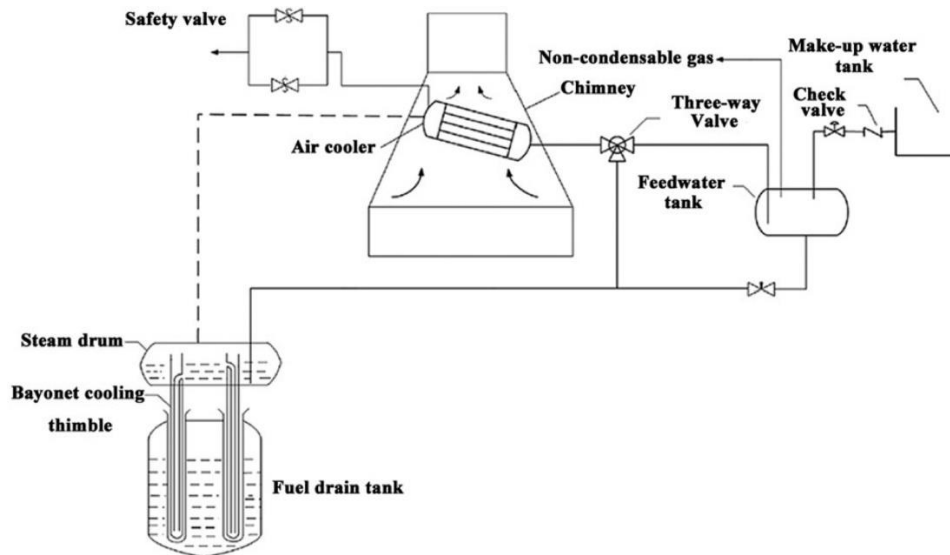


Obrázek 1 – Schéma reaktoru TMSR-SF o tepelném výkonu 10 MW [8]

K výzkumu přenosu tepla a koroznímu chování mezi tekutou solí FLiNaK a palivovými obložkami byla postavena průmyslová solná smyčka pro tekutou sůl FLiNaK. Oproti předchozí solné smyčce, která využívala nitridové médium, byly přidány přídavné hořáky do každé části solné smyčky, včetně hořáků po délce jednotlivých trubek. Tyto hořáky byly přidány pro zajištění stejné teploty v celé solné smyčce a předešlo se tak fenoménu zamrznání tekuté soli („Molten salt freezing phenomenon“). Při tomto fenoménu dochází k zastavení oběhu a mohlo by dojít k závažnému poškození zařízení. Jako testovaný konstrukční materiál zde sloužila nerezová ocel 316, která zde není tak častým konstrukčním materiálem, jako Hastelloy nebo Inconel 600. Pro určení ideálního konstrukčního materiálu jsou tyto korozní testy nezbytné. [8]

Kromě zkoumání těchto potřebných materiálů či výrobě paliva a chladiva, instituce SINAP se též zabývá systémem na odvádění přebytečného tepla s názvem PRHRS. Tyto systémy mají zvýšit celkovou bezpečnost MSR reaktoru, hlavně při případné havárii reaktoru. Tento systém se skládá ze 3 smyček s přirozenou cirkulací, které jsou postupně propojeny.

První smyčka se skládá z dvoufázové smyčky odvádějící zbytkové teplo do druhé dvoufázové smyčky, nacházející se mezi chladičem vzduchu a parogenerátorem. Ve třetí, otevřené smyčce, se kondenzuje voda díky proudění vzduchu v komíně. Experimenty ukazují, že by tyto přírodní smyčky dokázaly odstraňovat přebytečné teplo v případě nehody, zvláště smyčky ze slitin draslíku a sodíku. Pro lepší představu je níže schéma tohoto systému (obr. 2). [8]



Obrázek 2 – Schéma systému PRHRS [8]

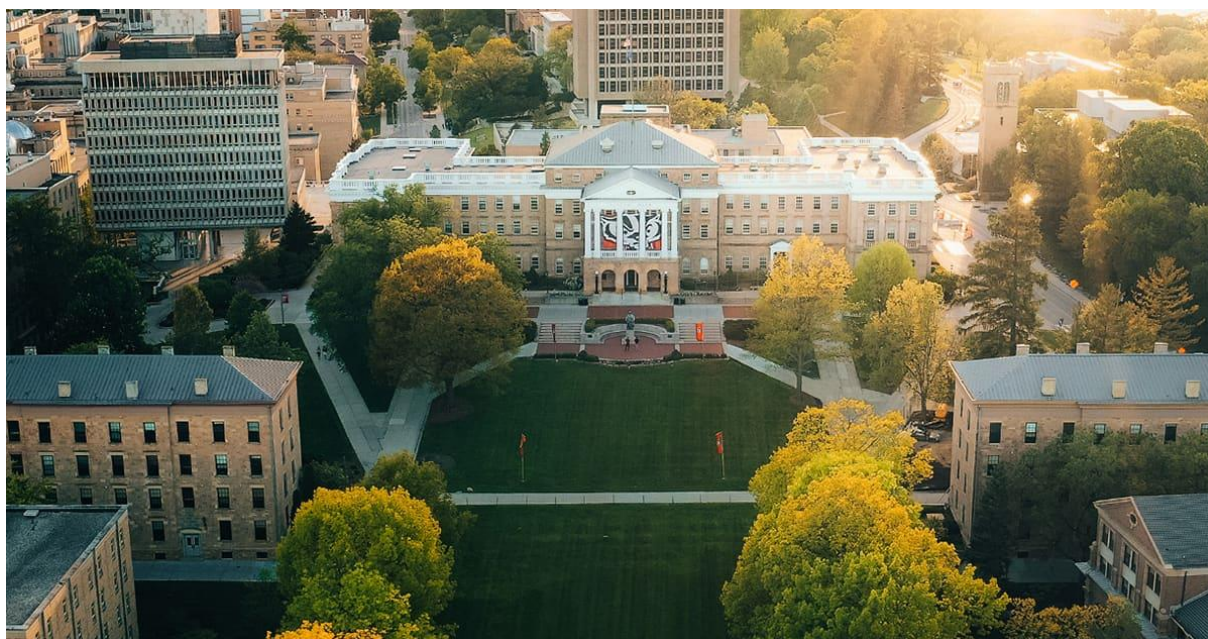
Na zmíněné experimenty a dosažené výsledky by chtěl SINAP dále navazovat, případně prohlubovat znalosti. Je například potřeba navržení, zkonstruování a následného otestování pracovních komponent, jako jsou solná čerpadla či výměníky tepla, které dokážou odolávat nepříznivým vlivům tekutých solí při vysokých teplotách. Základem všech těchto komponent je tak materiál, který má příznivé neutronové a korozní vlastnosti vůči tekuté soli. [8]

2.2 Univerzity

V roce 2012, americké ministerstvo pro energetiku DOE založilo projekt IRP, který měl za úkol vytvořit funkční komerční FHR reaktor. Tento dotovaný projekt probíhá převážně na univerzitách University of Wisconsin, Madison, University of California, Berkeley a Massachusetts Institute of Technology. Každá z těchto univerzit pracuje na určitých projektech v rámci MSR/FHR, proto jsou zde zmíněny jen jejich nedávno dokončené výzkumy v této problematice. [13]

2.2.1 University of Wisconsin – Madison

Veřejná univerzita ve městě Madison ve státu Wisconsin, vznikla stejného roku, jako bylo oficiálně založen sám stát Wisconsin, v roce 1848. Tato vědecká univerzita (na obr. 3) drží mnoho úspěchů a její absolventi mezi sebou drží celkem 41 Pulitzerových cen. Hlavními cíli je zajištění co nejvyššího vzdělání a možného výzkumu v kampusu školy, na což sama univerzita vynakládá 1,3 miliardy dolarů ročně. Sama univerzita (na obr. 3 níže) byla založena na mottu, že vzdělání by mělo ovlivňovat a zlepšovat lidské životy za hranice školní třídy. [14, 15, 16, 17, 18]

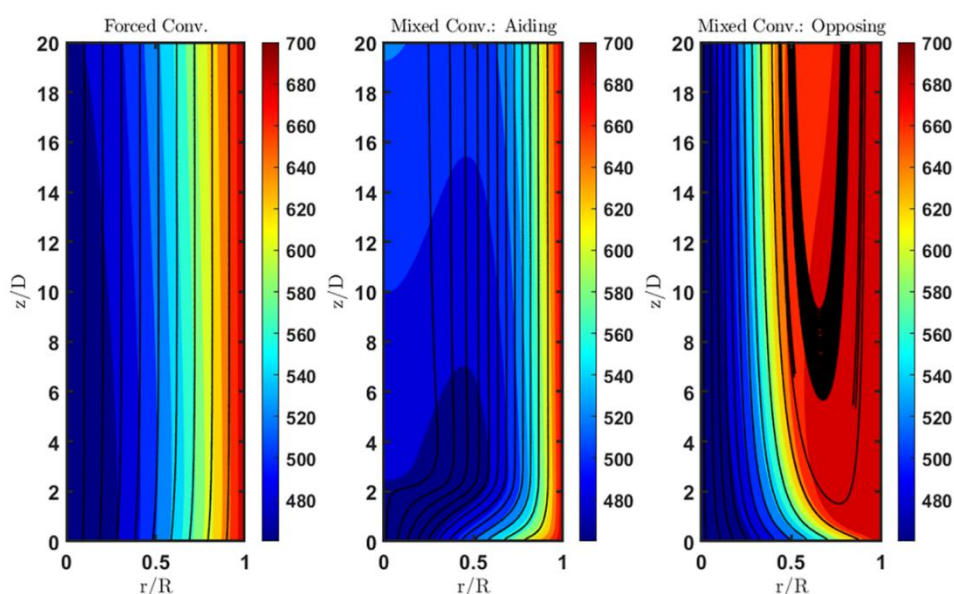


Obrázek 3 – Fotografie kampusu University of Wisconsin, Madison [19]

Mezi nedávno dokončené výzkumy patří studie sálání v tekuté soli ve vertikální vyhřívané trubici. Jak už bylo zmíněno výše, tekutou sůl je potřeba udržet ve vysokých teplotách ve všech částech trubice, kterými proudí. Daný výzkum se tak zaměřil na tuto

problematiku při laminárním proudění s tím, že tento výzkum položí základy pro studování tekutých solí při proudění turbulentním. Tekutou solí zde byla zmíněná FLiBe. [20]

Jako pokusné parametry pro trubky brali výzkumníci sekundární trubice u reaktoru Mk1 PB-FHR vyvinutý univerzitou UCB. Hlavním faktorem, na který se tato práce zaměřila byla tzv. “Optická tloušťka” (τ_D) – geometrická tloušťka násobená indexem lomu. Experimentálně se tak zjišťovaly hodnoty optické tloušťky, při kterých docházelo k maximálnímu přenosu tepla a srovnávaly se pak se stavem při nulové radiaci, při kterém dochází k nejnižšímu zvýšení průměrné objemové teploty a přenosu tepla. Na obr. 4 je zobrazené porovnání distribuce tepla v trubkách pod nucenou a smíšenou konvekcí. [20]



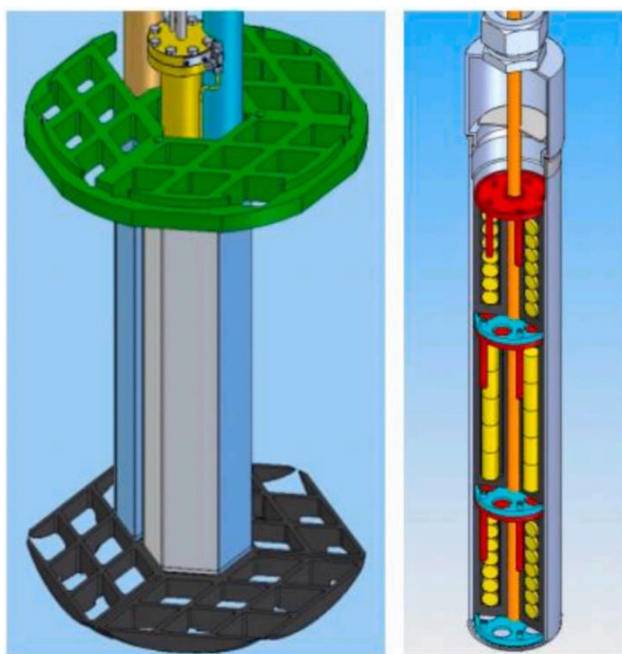
Obrázek 4 – Porovnání distribuce tepla v trubce při teplotě $T_w = 700$ °C, průměru $D = 0,02$ m a emisivitě $\varepsilon = 0,3$ pod nucenou konvekcí (nalevo), přispívající smíšenou (uprostřed) a odporující smíšenou (napravo) [20]

Z naměřených hodnot vychází, že nejvyšší efekt přenosu tepla sáláním nastal při hodnotě optické tloušťky $\tau_D = 4$ a při stejné hodnotě nastala i nejvyšší vodivá hustota tepelného toku přes stěnu. Při této optické tloušťce tak poskytuje optimální podmínky pro přenosu tepla sáláním. Tato práce však upozorňuje na potřebu dalšího výzkumu absorptivity soli FLiBe a určení, jestli je tak zmiňovaná tekutá sůl ideální pro výsledné použití. [20]

Jedna z obecných nevýhod jaderných reaktorů je únik radioaktivních materiálů, mezi které patří i tritium. Tritium je radioaktivním izotopem vodíku s celkem dlouhým poločasem rozpadu 12,3 roku. Tento izotop vyzařuje jemné beta záření, které může být odstíněno kůží. Nebezpečí však nastává při požití či vdechnutí většího množství tritia, které následně vytváří tritiovou vodu v zaživacím traktu a ta může poškodit okolní buňky. Tritium jako takové se

nachází v přírodní formě a klasické lehkovodní reaktory vytváří zanedbatelné množství. Ale v případě reaktorů FHR dochází k celkem velkému generování tritia při chlazení tekutými solemi, vzhledem k tomu, že vzniká při absorbování neutronu ${}^6\text{Li}$, které je součástí těchto solí. [21, 22]

Zachycování tohoto přebytečného tritia je otázkou mnoha studií, jednou z nich byla i studie z roku 2021 z UW, zaměřená především na zachycování grafitovými prvky. Studie vycházela z iradiačních experimentů na MITR, hlavně z druhého (FS-2) a třetího (FS-3) experimentu. V experimentu FS-3 vyšla poměrně vysoká odchylka mezi vypočteným generovaným tritiem a celkovým uniklým tritiem $22 \pm 10 \%$, daná práce z UW se tak zaměřila na určení zachyceného tritia v grafitových komponentech v FS-2 a porovnání této hodnoty se zmíněnou odchylkou v FS-3. Zkoumalo se zde celkem 95 grafitových a C-C kompozitových vzorků o různých velikostech, rozdělených do dvou hlavních typů – IG-110U a grafit s ARB maticí. Uspořádání souborů pro FS-2 a FS-3 zobrazeno v obr. 5 níže. [23]

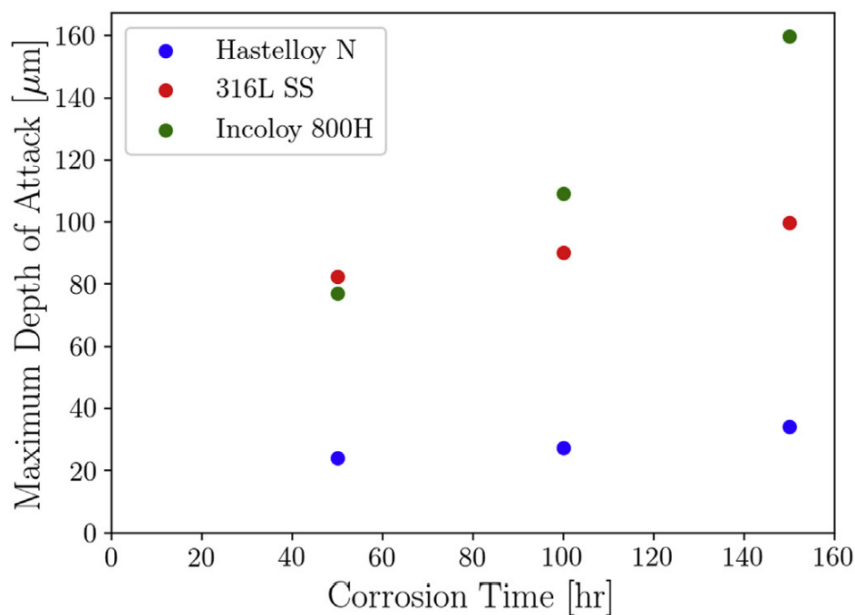


Obrázek 5 - Schémata pozic v aktivní zóně pro soubor u FS-2 (nalevo) a pro soubor u FS-3 v pohledu řezu (napravo) [23]

Vzorky byly jednotlivě ponořeny do tekuté soli a vystavené vysokým teplotám v desorpční peci. K maximu desorpce tritia došlo převážně při dvou teplotách – $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $950\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výsledné hodnoty pak ukázaly, že grafitové komponenty zachytily $25 \pm 2,6 \%$ z celkového množství generovaného tritia. Studie tak ukázala vyšší zachycení tritia do grafitu oproti druhému experimentu, ale vzhledem k délce jednotlivých experimentů (300 h pro FS-2 a 960 h pro FS-3), daná studie uvádí, že zachycovací schopnost grafitu celkem odpovídala

experimentu FS-2. Dalšími poznatky z dané studie byla forma uniklého tritia, které bylo z 80 % nerozpustné. Pravděpodobně ve formě HT nebo T₂. [23]

V posledním zde zmiňovaném výzkumu z UW, který byl publikován v roce 2020 v časopise Journal of Nuclear Materials, se zabývali korozí možných konstrukčních materiálů pod vlivem tekuté soli FLiNaK, obsahující určité příměsi. Všechny použité soli obsahovaly příměs EuF₃ pro nahrazení radioaktivního paliva. První sůl obsahovala jen zmíněnou příměs EuF₃, zatímco druhá dále obsahovala NiTe pro bližší určení účinku Te na korozí. Poslední, třetí tekutá sůl, pak obsahovala EuF₃ a zároveň štěpné prvky v relativně malých koncentracích pro určení vlivu těchto prvků na výslednou korozí. Celkem 4 zkoumané materiály (Hastelloy N, Incoloy 800H, Nerezová ocel 316L a Ni-201) byly vystaveny jednotlivým solím po dobu 50, 100 či 150 h. Porovnání třech ze čtyř zkoumaných materiálů v první soli je zobrazeno na obr. 6 níže. [24]



Obrázek 6 – Porovnání slitin obsahující Cr v tekuté soli FLiNaK obsahující příměs EuF₃ [24]

Z provedených experimentů vyšlo, že každý z materiálů korodoval při jiném korozním mechanismu, načež Ni-201 nekorodovalo téměř vůbec. Například Nerezová ocel 316L korodovala převážně na mezi krystalovou korozí, zatímco Hastelloy N na trans granulární korozí. Poslední slitina, Incoloy 800H, korodovala na kombinaci obou zmíněných typů mechanismů koroze. [24]

Největším zdrojem zvýšené koroze zde vyšla příměs EuF₃. To signalizuje důležitost kontroly redoxního potenciálu u MSR reaktorů. Na zde nejpříznivějším materiálu, Ni-201,

nebyla zaznamenána žádná koroze. Je zde tak otázka využití povlaku z Ni-201 na konstrukčním materiálu na reaktorech s tuhým i tekutým palivem. Vysokoteplotní zkoumání konstrukčních materiálů s vrstvou Ni-201 je tak otázkou budoucích výzkumů na UW. Dalším závěrem dané studie bylo, že čím měla slitina vyšší původní obsah Cr, tím došlo k větší korozi. [24, 25]

Ačkoliv zde poslední zmíněný výzkum nebyl přímý výzkum FHR, zahrnuji ho zde vzhledem k similaritě se zaměřením samotné bakalářské práce a pro možné porovnání.

2.2.2 University of California, Berkeley

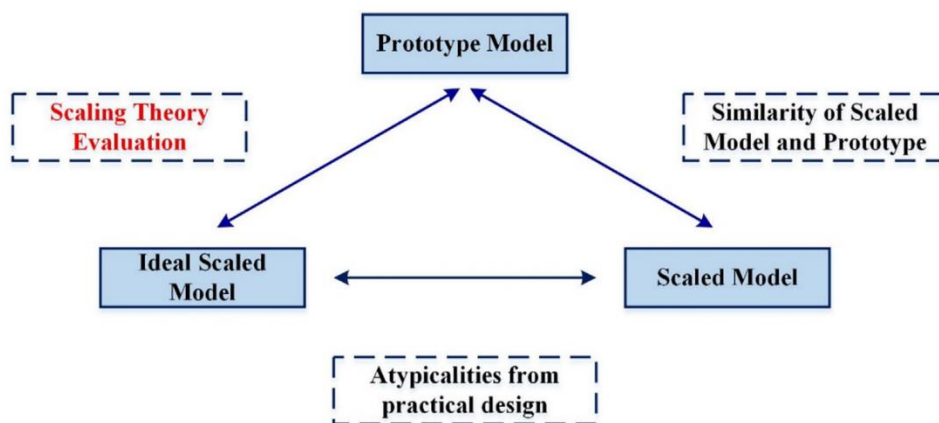
Druhá univerzita v projektu IRP, Kalifornská univerzita v Berkeley, patří mezi nejprestižnější veřejné univerzity na světě. Od svého vzniku v roce 1868, její studenti a absolventi získali mnoho ocenění, včetně 207 olympijských medailí a 32 Nobelových cen. Domov (viz obr. 7) pro přibližně 42 tisíc studentů nabízí přes 350 studijních programů a řídí se mottem „přispět ke slávě a štěstí budoucích generací více než kalifornské zlato“. V této univerzitě též vznikl jeden z prvních designů reaktoru FHR, pod názvem Mk1 PB-FHR. Jedná se o oblázkový reaktor, z jehož konceptu vychází již zmíněný reaktor v instituci SINAP. Nejnovější verze designu tohoto reaktoru byla dokončena v roce 2014 o tepelném výkonu 236 MW, který má sloužit k dalšímu výzkumu a pomoci tak k dosažení cílů výzkumného střediska UCB. Mezi tyto cíle patří integrace Joule-Braytonova vzduchového cyklu či vytvoření modulárního typu FHR. [26, 27, 28]



Obrázek 7 – Fotografie kampusu University of California, Berkeley [29]

Mezi nynější práce z této univerzity patří výzkum rozměrové analýzy, publikovaný v dokumentu Applied Thermal Engineering v roce 2020. Pracovníci UCB rozebírali rozměrovou analýzu, respektive zkreslování výsledků ze zmenšených modelů a jejich rozdíly oproti výsledkům z přirozených solných smyček o reálné velikosti v FHR. Testování na menších modelech je celkem časté, ale nepředstavují stejné podmínky, jako prototypy o reálné velikosti. Například menší trubka má vyšší poměr plochy povrchu k objemu, což vede k vyšším ztrátám tepla. Toto může na zmenšených testovacích zařízeních způsobit nižší teplotu média či nižší systémový tlak. Triádní metoda, kterou použili při zkoumání dané problematiky, je zobrazena na obr. 8. [30]

V této studii tak zkoumali zachování rozměrového kritéria, k čemuž využívali analýzu RELAP5-3D. K porovnání sloužila prototypní solná smyčka pracující s dvěma různými médii – Downtherm A a FLiBe. Pro každé médium bylo připraveno více modelů, ze kterých byly důležité převážně 2. Model R-R, kde byla zmenšená výška i celková kontrolovaná oblast. A model F-R, u kterého zůstala výška stejná, ale celková oblast byla zmenšená. [30]

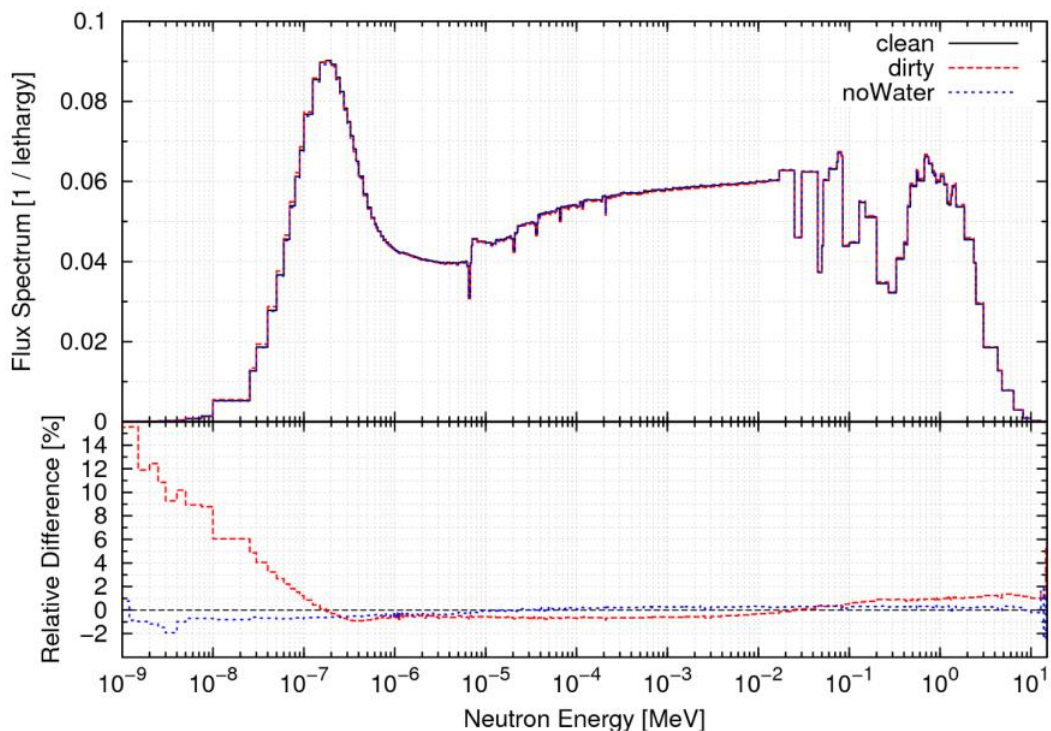


Obrázek 8 – Schématický diagram použité triádní metody v experimentu [30]

Výsledky studie ukázaly, že narozdíl od častěji zkoumané tekuté soli FLiBe, simulační olej Downtherm A vykázal minimální odchylky v dynamickém chování média (<0,1 %) v modelu R-R. Model F-R u soli FLiBe měl též celkem nízké odchylky chování v solné smyčce (6-8 %), ale čistě zmenšený model R-R vykazoval odchylku až 40 %, což je třeba brát v úvahu při dalším zkoumání. [30]

Další nedávná studie z UCB se zabývala vlivem nečistot v soli FLiBe, které se v ní mohou již vyskytovat nebo do ní vniknout z okolních konstrukčních materiálů. Jako konstrukční materiály se zde použily Hastelloy N a Nerezová ocel 316L (S-S 316L). U jednotlivých nečistot se zkoumal jejich vliv reaktivity vzhledem k předpovídanému množství dané látky v soli. Při

zkoumání efektu na přebytečnou radioaktivitu byl získán obr. 9 níže, kde je zobrazeno porovnání čisté a kontaminované soli. [31]



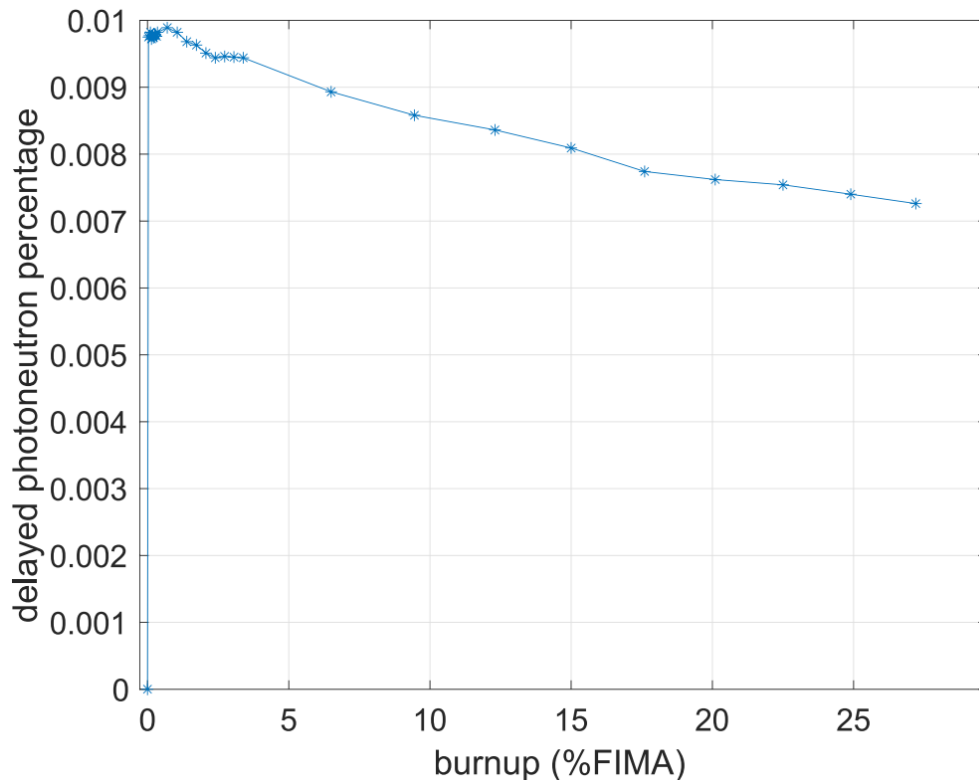
Obrázek 9 – Porovnání normalizovaného neutronového spektrálního toku v čistých a kontaminovaných solích: absolutní hodnota (nahore) a relativní rozdíl (dole) [31]

Ze závěrů dané studie vychází, že prvky s největšími absorpčními schopnostmi, měly největší efekt na výslednou reaktivitu, převážně B, Cd, Eu či Gd. Z těchto závěrů je zřejmé, že právě těmto prvkům je vhodné se vyhnout, či je extrahovat z používané soli, pro zajištění nejvyšší bezpečnosti systému. Dalším studovaným kritériem byl vliv na neutronové záření ze soli, kde figurovaly hlavně prvky Cl, K a Na, či již zmíněné, B, Cd a Gd. [31]

V klasických tlakovodních reaktorech hrají zpožděné neutrony velkou roli v řízení samotného reaktoru. U reaktorů FHR se počítá s vyšší produkcí zpožděných fotoneutronů, vzhledem k charakteristikám soli FLiBe – obsah beryllia v chladivu může vést k produkci izotopu B-9, který má dostatečně nízkou střední energii na využití v reaktoru. Produkci a charakterizováním těchto fotoneutronů se zabývala zde poslední uvedená studie z UCB, vydána v roce 2020 v časopise Nuclear Engineering and Design. [32]

V dané studii vytvořili potřebnou metodologii pro kvantifikování neutronových parametrů a srovnávali je s parametry z těžkovodních reaktorů CANDU. Použily se zde dva typy modelů pro srovnání. Prvním byl tzv. „unit-cell“ model, ve kterém byly jednotlivé obložky

ponořené do soli FLiBe a u kterých bylo zajištěné oddělení jeden o druhého. Druhý typem byl model „full-core“, který koncepčně vycházel z prototypu KP-1. Koncept KP-1 je velice podobný konceptu typu Mk1 PB-FHR z UCB. Jedním z důvodů pro toto rozdělení bylo měření efektu úniku, který se v modelu „unit-cell“ vypouští pro zjednodušení výpočtů. Dalším rozdílem je například vyšší obohacení v modelu „unit-cell“ pro produkci variace štěpných materiálů ze spalování UO_2 . Jedním z výsledných grafů je například níže zobrazený graf (obr. 10), kde je zobrazeno rozštěpení zpožděných neutronů jako funkce vyhoření. [32]



Obrázek 10 – Graf závislosti rozštěpení zpožděných fotoneutronů na vyhoření u „unit-cell“ modelu [32]

Model „unit-cell“ celkem přesně popsal fotoneutronické chování, které nastává ve skutečné aktivní zóně. Výsledky z této práce by měly sloužit ke kalkulacím dynamického chování aktivní zóny, ale sama studie uvádí, že jsou potřeba další studie na ověření jejich závěrů. [32]

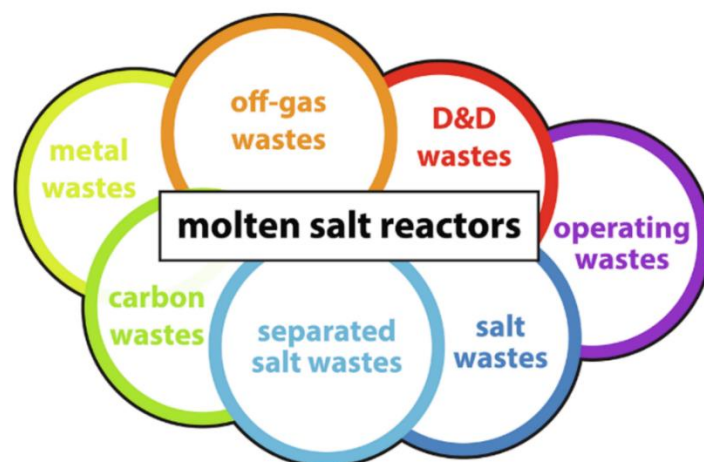
2.2.3 Massachusetts Institute of Technology

Jedna z nejnámějších technických univerzit je zde poslední zmiňovanou z projektu IRP. Massachusettský Technologický Institut byl založen v roce 1865 v Cambridge a hlavní myšlenkou při tomto zakládání bylo učení a výzkum aktuálních témat tak, že by se studenti učili k přímé aplikaci. Tímto mottem „mind and hand“ se dodnes řídí a snaží se dodat studentům pečlivé základy a zároveň vyvolat touhu po poznání. [33, 34, 35]



Obrázek 11 – Fotografie kampusu Massachusetts Institute of Technology [36]

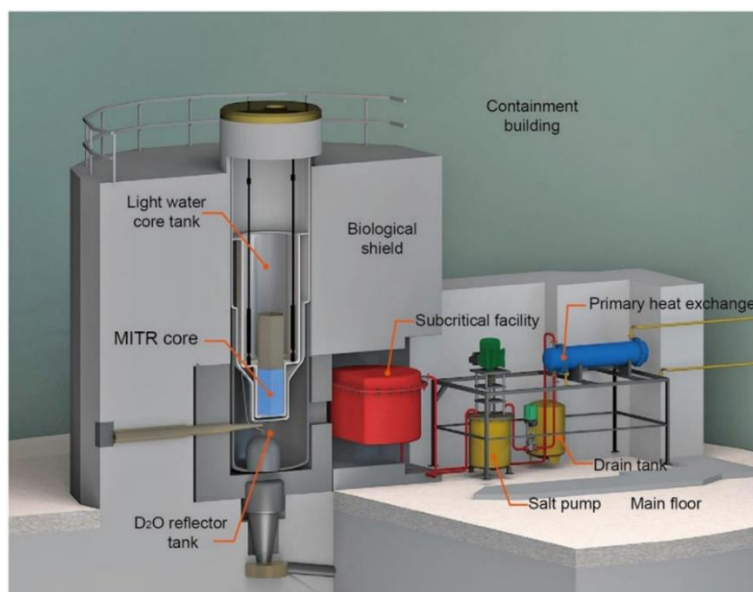
Práce s radioaktivními odpady z tlakovodních reaktorů je celkem dobře popsána, včetně strategie a jejich možné využití. Na radioaktivní odpady z MSR reaktorů se zaměřila studie z MIT z roku 2019. Odpady z MSR se dají rozdělit do celkem 7 kategorií (viz. 3), kde jednu z největších skupin zastupují tzv. „off-gas waste“ – odpadní plyny. [37]



Obrázek 12 – Rozdělení odpadů z MSR [37]

Tato studie má sloužit k sepsání jednotlivých technologií zachycování různých odpadů a jejich následné uskladnění. Například u zmíněných odpadních plynů je sepsáno zachycení a uskladnění tritia a ušlechtilých plynů. Tritium je například zachycováno z nízko-objemového či vysoko-objemového vodního proudu v podobě $^3\text{H}_2\text{O}$ a následně uskladňováno ve vysoko celistvých kontejnerech. Dalším velice významným prvkem v řízení reaktoru je Xe patřící do ušlechtilých plynů. Ten se zachycuje kryogenickou destilací a je uskladňován jako stlačený plyn. Zachycování a uskladňování těchto a dalších prvků bylo popsáno v dané studii, která uvádí, že ačkoliv různé odpady vyžadují různé zpracování, pro všechny v této studii zmíněné materiály existuje prověřená strategie managementu. [37]

K větším projektům na MIT patří připravovaný projekt subkritického zařízení poháněného reaktorem MITR pro výzkum FHR. Tento koncept představili pracovníci z MIT v roce 2016. Externí reaktor je zde pro zajištění reálných podmínek při 60 % kapacity komerčního FHR reaktoru, což by mělo pomoci k přesnějším studiím v dané problematice. Schéma tohoto subkritického zařízení je zobrazeno níže, na obr. 13. [13]



Obrázek 13 – Systémové uspořádání subkritického zařízení poháněném MIT reaktorem [13]

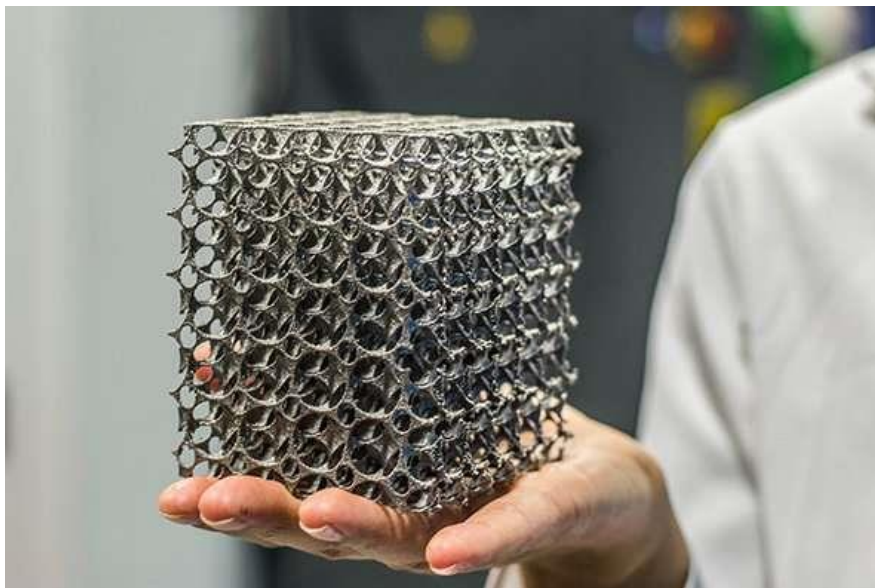
Tento experimentální komplex by měl být vystaven na základě předešlého laboratorního zařízení na MIT, které bylo licencováno a využíváno po mnoho let (MIT Nuclear Reactor Laboratory). Hlavním reaktorem by zde měl být lehkovodní reaktor MITR-II, kterému byl v roce 2011 navýšen tepelný výkon na 6 MW. Výsledné zařízení by mělo sloužit k výzkumu neutronových vlastností, termo hydraulickým pokusům, včetně vývoji materiálů a designu jednotlivých systém. [13]

3. Aditivní technologie

3.1 Úvod

Aditivní technologie, v širší společnosti známé jako „3D tisk“, jsou podle ISO/ASTM 52900 definovány jako procesy spojování materiálu pro vytvoření produktu podle 3D modelu. Oproti klasické výrobě je zde možné dosáhnout mnohem komplexnějších modelů, které by běžnými technologiemi nebyly možné. Kromě složitějších tvarů přináší aditivní technologie i poměrně nižší náklady při malovýrobě a záleží na použité technologii i případné post-produkční úpravě. Ukázka možného kovového výrobku získaného aditivními technologiemi je zobrazena na obr. 14 níže. [38]

Ačkoliv jsou z aditivních technologií nejznámější malé 3D tiskárny na plast, aditivními technologiemi je možné zpracovávat materiály v tekuté, pevné, či prašné formě. Kromě zmíněných polymerů je tu možnost tisku keramiky, kompozitů, kovů a dalších. Využití v průmyslu je tak široké. Zvláště u výzkumu celkem moderních technologií, jako je MSR, kde by mohly komplexnější součásti nabídnout více možností pro finální design. [38]



Obrázek 14 – Ukázka modelu sestaveném aditivními technologiemi [39]

AM lze rozdělit do mnoha kategorií, ale vzhledem k cílům této práce jsou zde zmíněny jen hlavní AM pracující s kovy, kde jsou zahrnuty systémy PBF, PFF a Binder Jetting. [38, 40]

3.2 Powder bed fusion systems

Systemy PBF, v češtině též jako systémy na principu spékání práškové vrstvy, patří dnes mezi nejpoužívanější AM technologie na trhu. Nabízí poměrně vysokou přesnost, vytvoření vnitřních kanálů a kontrolu dimenzí, což se u konvenčních metod v takovémto provedení nenachází. Základem je uzavřená komora či místnost s udrženou atmosférou a zdrojem tepla, kterým může být laser či elektronový paprsek. PBF systémy nanasou malou vrstvu kovového prášku na platformu o tloušťce 20 až 100 μm a připraví se na tisk. Stavěcí platforma zde musí dodat dostatečnou mechanickou i tepelnou oporu, což přispívá k výsledné kvalitě výrobku. Laserový či elektronový sken poté přejede přes danou vrstvu prášku po vytyčené trase, roztaví kov, čímž ho připojí na předchozí vrstvu a po nanesení další vrstvy kovového prášku se proces opakuje. PBF systémy jsou tak celkem jednoduché, avšak mezi jejich nevýhody patří dlouhý čas zpracování a vysoké náklady na výrobu. [41, 42, 9]

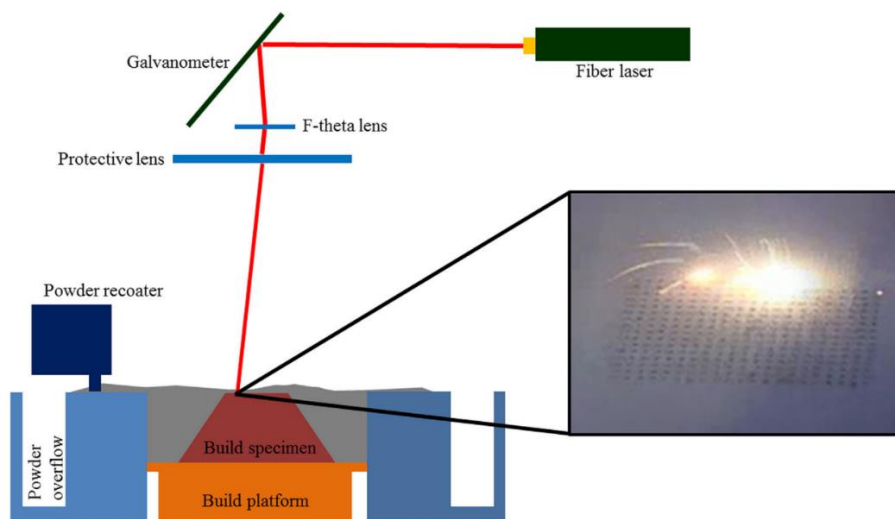
PBF systémy se dají rozdělit na dvě hlavní skupiny podle zdroje tepla – na již zmíněný laserový nebo elektronový paprsek. Každá nabízí trochu jiné vlastnosti a též vyžaduje i jiné pracovní prostředí, například použitou atmosféru či systém koncentrace paprsku. [41]

U použití laseru jako zdroje je tepla je zapotřebí zrcadlový systém k soustředění laseru do požadovaného místa, zatímco je v komoře udržena inertní atmosféra. Pro zamezení odchylek při tavení materiálu a výslednou kvalitu produktu je zapotřebí zahřátí stavěcí platformy na přehřívací teplotu, redukuje se tak teplotní gradient mezi roztaveným kovem a substrátem. Mezi hlavní metody patří SLM a DMLS, které pracují s kovy. Obdobou pro DMLS je metoda pracující s polymery, SLS. [41, 42]

Druhý typ PBF, který využívá elektronový paprsek jako zdroj tepla, je v mnoha ohledech velice podobný typu prvnímu. Ale pro dosažení stabilního elektronového toku je potřeba vakua v uzavřené komoře. Samotný princip práce s elektronovým paprskem je obdobný jako v elektronovém mikroskopu SEM, kde jsou elektrony extrahovány z kovového filamentu pomocí vysokého elektrostatického potenciálu nebo akcelerovaným napětím a soustředěné magnetickými cívkami. [41, 42]

3.2.1 Metoda SLM

Metoda SLM využívá, stejně jako metoda DMLS, laser o vysoké hustotě energie, který taví kovový prášek (viz. obr. 15). Zbylý prášek je po dokončeném tisku odstraněn a po prosytní recyklován pro další využití. Procesní parametry, jako použitý prášek, rychlost skenu laseru či hustota energie laseru, jsou hlavními faktory na výsledné mechanické vlastnosti, odolnost vůči korozi a únavu materiálu. Užitím metody SLM lze vyvinout jen relativně malé výrobky, pro výrobky větších parametrů je potřeba svaření jednotlivých částí a tyto svařence mají též vliv na výsledné vlastnosti výrobku. Na předejití pórovitosti u svařenců pomáhá zvýšení výkonu laseru či úpravě dalších svařovacích parametrů. Experimenty se například došlo k ideálním parametrům pro tisk Inconel 718 (pro zamezení pórovitosti), při výkonu laseru 1 600 W, oscilační frekvenci 100 Hz a rychlosti skenu 1 m/min. U jiných materiálů, například u slitiny AlSi10Mg, se dosáhlo nejvyšší tvrdosti a nejvyšší pevnosti při výkonu laseru 3 000 W a rychlosti skenu 600 mm/min. [43]

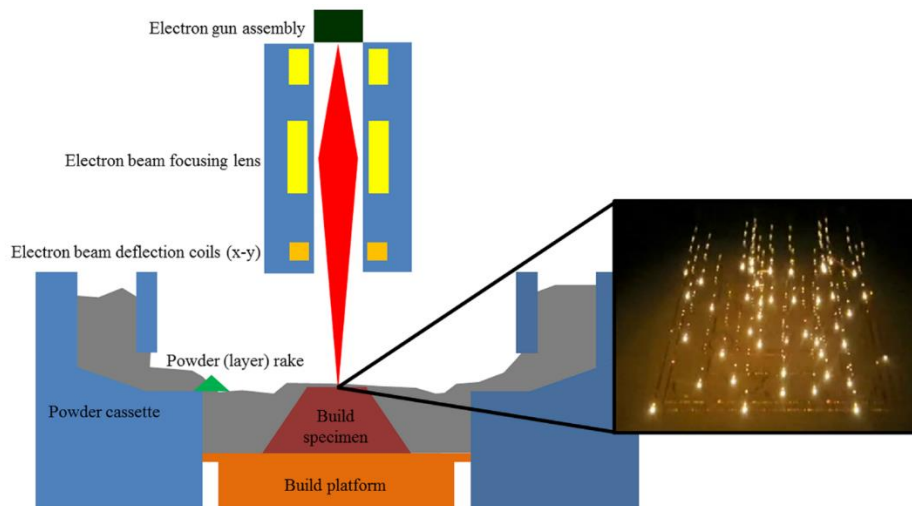


Obrázek 15 – Schéma metody SLM [42]

3.2.2 Metoda EBM

Metoda zde zastupující systémy PBF, které využívají elektronový paprsek jako zdroj tepla, se nazývá Electron Beam Melting. Metoda patentována švédskou firmou Aream AB potřebuje vakuum pro soustředění proudu elektronů, které by v běžné atmosféře urazili jen několik μm . Zároveň toto vakuum zaručuje vysokou čistotu a díky bezkyslíkovému prostředí redukuje případné zachycování vodíku. Během procesu je v komoře udržena teplota okolo 700 $^{\circ}\text{C}$ pro snížení vzniku zbytkových napětí, a tak zabránění nechtěnému zkroucení či ohybu. Elektronová tryska, která zde generuje proud elektronů, pracuje při výkonu 60 kW pro

vygenerování paprsku o hustotě energie 100 kW/cm^2 . Ohnisko elektronového paprsku je dále kontrolováno elektromagnetickými cívkami a pohyb skenu s tryskou je řízen vychylovacími třmeny (viz obr. 16). Budování metodou EBM probíhá dvěma kroky – nejprve se skenem vypracují okraje výsledného produktu a poté stroj přechází od krajů do středu součásti, dokud není celý proces hotov. [41, 42]



Obrázek 16 – Schéma metody EBM [42]

3.3 Powder fed fusion systems

Jak už název napovídá, PFF systémy využívají stejný typ surovin, ale proces, kterým je materiál nanášen na jednotlivé vrstvy je rozdílný. Kovový prášek procházející tryskou je roztaven paprskem přesně na povrchu zpracované části. Od svařovacích technik se PFF systémy rozlišují malým zdrojem tepla penetrující substrát. [44]

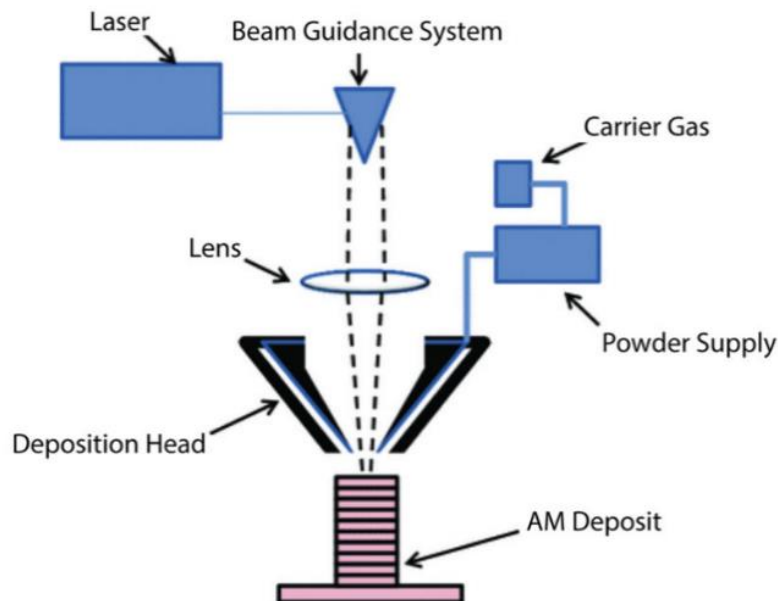
PFF systémy jsou též známy jako LC, DED či LMD. Tyto systémy jsou založeny na automatické depozici vrstvy a jsou též velice precizní. Tloušťka vrstvy materiálu může dosahovat 0,1 mm až několik centimetrů. Mezi některé z výhod PFF patří metalurgické spojování opalšovacího materiálu se základním materiálem a absence podsekávání. Jednou z nejpoužívanějších PFF metod je DED a shodou okolností jsou právě touto metodou připraveny použité materiály do experimentální části této práce. [44]

3.3.1 Metoda DED

Metoda Directed Energy Deposition, je definována jako proces aditivní výroby, při kterém je soustředěná teplotní energie použita ke spojení materiálů roztavením, zatímco

dochází k nanášení. Nanášený materiál a zdroj tepla se tak setkávají v ohniskovém bodě, obecně za přítomnosti inertního plynu (viz obr. 17). Atmosféra inertního plynu je zde opět na zajištění ostatečných podmínek pro správné tuhnutí materiálu. DED je tak nerovnovážnou procesní technikou, která má vysokou míru ochlazení materiálu. [44, 45]

DED systémy se dají rozdělit podle formy materiálu a zdroje tepla, je zde tak široké spektrum využití, která záleží na zadání výrobku. Materiál zde může být ve formě kovového prášku či drátu, zatímco jako zdroj tepla lze brát laserový paprsek, elektronový paprsek, plazmu či elektrický oblouk. Z těchto možných variací je nejpoužívanější Powder-feed based DED, která využívá kovového prášku jako formy materiálu a nejčastěji laserový paprsek jako zdroj tepla. Mezi výhody této variace patří poměrně krátký čas tisku či možná kombinace s dalšími průmyslovými technikami, jako je frézování pro dokončení povrchu. K nevýhodám pak patří poměrně špatné rozlišení a potřeba post-produkčních procesů kvůli možným nerovnoměrným tuhnutím materiálu. Přesnost se ale dá zlepšit snížením nanášecí rychlosti a zmíněnými post-produkčními procesy. Technika DED je tak obecně využívána k opravám nebo úpravám existujících částí a při dostatečných parametrech dokáže vytvářet komponenty odpovídající součástem z konvenčně získaných materiálů. [41, 45, 46, 47, 48]

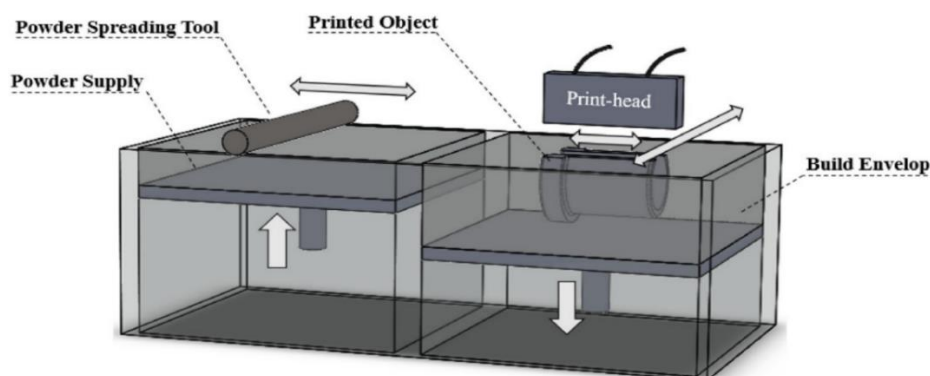


Obrázek 17 – Schéma metody DED, [41]

3.3.2 Binder jetting

Pracovním procesem se Binder Jetting, v češtině tryskání pojiva, podobá systémům PBF, kdy hlava nanáší roztavený materiál podle vymezených cestách na vytvoření jednotlivých vrstev. Ale zatímco u metod SLM a EBM docházelo k roztavení práškového materiálu a jejich spojení, zde je tekuté pojivo nanášeno skrz pracovní hlavu na práškové částice na stavěcí plošině. Práškový dopravník pak nanáší novou vrstvu kovového prášku na vytvoření další vrstvy (viz obr. 18). Tento proces se opakuje do vytvoření tzv. zelené části – část, kde jsou částice kovového prášku vzájemně spojeny. BJ proces je dokončen post-slinovacím procesem 3D vytvořených zelených částí ve vysoko teplotní peci, kde se polymerový vazač vypaluje a prachové částice jsou slinuty dohromady přes atomovou difuzi na získání finální hustoty a pevnosti. Teplota pece se udržuje při teplotě mezi 650 °C a 700 °C pro plné vyhoření šanonu. [9, 41, 49, 50]

Tento proces má tak určité výhody oproti předchozím metodám. Například z teplotního hlediska zde nedochází k rapidnímu ohřevu a ochlazení, není tu tak potřeba uvolnění teplotních stresů před finalizací výrobku. Zde dochází k finalizaci po svaření zelené části v peci. Není zde potřeba podpůrné konstrukce či udržovaná inertní atmosféra během zhotovování zelené části. BJ se podle některých zdrojů považuje za nejrychlejší AM metodu, ale je zde potřeba brát v úvahu potřebné post-produkční procesy, velikost a počet vyráběných kusů, což má vliv na celkový čas tisku. Na druhou stranu mezi největší nevýhody BJ patří obtížné dosažení plné hustoty po post-slinování, což vede ke sníženým mechanickým vlastnostem vzhledem ke konvenčně získanému materiálu. Další nevýhodou je nemožnost pracování s ultra jemnými kovovými prášky, které by vytvářely defekty v zelené části. Stejně jako další AM metody je proces BJ využíván v leteckém či automobilovém průmyslu, stejně jako u vytváření protéz a elektronice. [47, 49, 50]



Obrázek 18 – Schéma metody BJ [50]

4. Analýza koroze u vybraných materiálů

4.1 Úvod

Praktická část této práce se zaměřuje na porovnání konvenčních materiálů vůči materiálům získaných aditivními metodami. Vzhledem k prostředí, kterým budou tyto materiály vystaveny, experiment a následné porovnání se zaměřuje na jejich odolnost vůči korozi v prostředí tekuté soli NaF-NaBF₄. Právě tato tekutá sůl je brána jako potenciální sekundární chladivo. Na porovnání jejich dalších mechanických vlastností, jako pevnosti v tahu či v ohybu je potřeba dalších výzkumů, na které se tato práce nezaměřuje. Zde dva zkoumané materiály patří mezi nejvíce zkoumané materiály na možné použití v solných reaktorech – nerezová ocel AISI 316L a niklová super-slitina Inconel 718. Obě slitiny vykazují při konvenčním zpracování vysokou korozivzdornost a mechanickou pevnost při vystavení vysokým teplotám. Obě jsou tak velice atraktivní pro využívání v jaderné energetice, chemickém průmyslu a dalších odvětvích. Nicméně jejich vlastnosti po vyprodukování přes aditivní metody jsou celkem neznámé a otázka koroze v solném prostředí je tak jedna z prvotních pro bližší výzkum. V experimentu byly tak otestovány vzorky těchto slitin získaných konvenčními metodami a byly porovnány se vzorky získanými aditivními technologiemi, respektive metodou DED.

Pro jednodušší rozlišení vzorků jsou v následujících řádcích materiály získané konvenčními metodami označené písmenem N (S-S 316L N a Inconel 718 N) a materiály získané aditivní metodami označené písmeny AM (S-S 316L AM a Inconel 718 AM). Experiment jako takový proběhl v několika krocích, které jsou dále rozvedeny pro přiblížení postupu a použitých přístrojů v Centrum výzkumu Řež, s.r.o. Všechny nástroje byly zvoleny pro příslušné materiály, v tomto případě pro materiály o tvrdosti HV 30-800. [10]

4.2 Experiment

4.2.1 Příprava vzorků

Pro zachování minimálních odchylek byly všechny vzorky připraveny stejným postupem, který započal uříznutím většího kusu materiálu na menší vzorky, o přibližně stejných rozměrech. K tomuto procesu byla použita řezačka Strues Accutom-100 s řezným kotoučem z oxidu hliníku Cutt-Off Wheel 50A15. Řezací rychlost řezačky byla nastavena na 0.015-0.030 mm/s (záleže na materiálu), s rotační rychlostí 2500 min⁻¹. Odříznuté vzorky byly následně opracovány bruskou Struers Gekko PSA s brusným papírem o drsnosti #500. Strany všech vzorků byly následně dvakrát přeměřeny posuvným měřítkem Mitutoyo Digimatic s přesností ±0.02 mm a do budoucích výpočtů zprůměrovány. Jako poslední byly vzorky zváženy na váze Precisa 125A s přesností ±0.001 g (obr. 19). Tímto procesem vznikly 2 vzorky z každého materiálu pro každý experiment. Po uložení do grafitových kapsulí byly vzorky připraveny na zalití tekutou solí. [10]



Obrázek 19 – Fotografie váhy Precisa 125A [10]

4.2.2 Příprava experimentu

Sůl NaF-NaBF₄ byla připravena smícháním solí NaF a NaBF₄ v krystalické formě, v poměru 3:97 wt%, v tomto pořadí. Tímto vznikla eutektická směs, která byla vložena do grafitového záchytného kelímku a vložena do elektrické pece CLARE 4.0 na teplotu 500 °C. Po přibližně 4 hodinách byla směs roztavena a připravena na vlití do grafitových kapsulí, obsahující jednotlivé vzorky. Po plném zakrytí všech vzorků tekutou solí, došlo k vychladnutí na pokojovou teplotu a přípravu experimentu jako takový. Po vychladnutí a krátké inspekci na možné úniky soli z grafitových kapsulí, byly připravené nádoby rozděleny do záchytných kelímků po čtyřech vzorcích (obr. 20a). Nakonec byly záchytné kelímky uloženy do elektrické

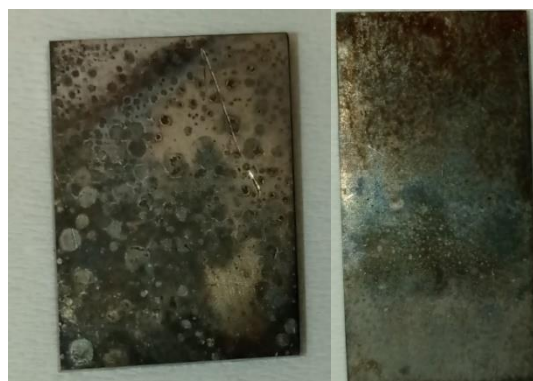
pece na požadovanou teplotu. Celý proces přípravy a následného experimentu byl proveden v rukavicovém boxu při nastavené dusíkové atmosféře pro zajištění bezpečí při pracování s tekutou solí a zabránění nežádoucí kontaminace soli (obr. 20b). Takto byly provedeny dva experimenty: test po dobu 720 h při teplotě 550 °C a test po dobu 720 h při teplotě 700 °C. [10]



Obrázek 20 – Fotky z přípravy měření: a) Záchytný grafitový kelímek s čtyřmi grafitovými kapsulemi obsahující vzorky s zalité tekutou solí NaF-NaBF₄; b) Rukavicový box [10]

4.2.3 Očištění vzorků

Po uplynutí požadované délky experimentu byla elektrická pec vypnuta a záchytné kelímky se nechaly vychladnout na pokojovou teplotu. Toto zabralo přibližně 48 h. Po vychladnutí byly záchytné kelímky vyndány z rukávového boxu a připraveny na separování vzorků od grafitových kapsulí a solidifikované soli. Základní očištění proběhlo ručně s pomocí smetáčku a skalpelu, po kterém následovalo ultrazvukové čištění v demineralizované lázni po dobu přibližně 20 h. Po následném vysušení a finálním očištění byly vzorky připraveny na hmotnostní a rozměrové přeměření a XFR analýzu. Příklad takto očištěných vzorků je zobrazen níže na obr. 21 níže. [10]



Obrázek 21 – Fotografie očištěných vzorků

4.2.4 Analýza vzorků

Jednotlivé vzorky byly znovu zváženy, po čemž následovalo určení chemické kompozice vzorků. K této analýze byl využit spektrometr Thermo Scientific ARL QUANT'X. Vzorky byly přidrženy tenkou fólií o tloušťce 4 μm (cat. No. 416) a na spektrometru byly nastaveno osm filtrů s různými rozhraními pro zjištění jednotlivých prvků a jejich zastoupení ve vrstvě vzorku. Na každém vzorku tak proběhlo osm měření z každé strany, každé trvající 60 vteřin. Pro získání dat ze spektrometru byl využit software od firmy Thermo Fisher Scientific Inc (Verze 10.2.0.57) se jménem Acquisition Manager. Tato data byla následně analyzována softwary od stejné společnosti, UniQuant Quant'X ED 6.25 a Spectrum Viewer. Výsledkem těchto analýz byly textové dokumenty s jednotlivými zaznamenanými prvky, jejich procentuálním zastoupením a možnou odchylkou v jejich zastoupení (příklad takového výstupu v příloze 1, tab. 1A). Pro porovnání s původním zastoupením prvků v jednotlivých materiálech byly stejnou analýzou určeny chemické kompozice vzorků, které nebyly vystaveny experimentu a byly z původních kusů. [10]

4.2.4.1 Energiově Disperzní Rentgenová Spektroskopie

Zde použitá analýza se nazývá energiově disperzní rentgenová spektroskopie (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, neboli EDXS), která se často používá pro charakterizování materiálů, respektive určení zastoupení jednotlivých prvků v povrchu vzorku. Tato analytická metoda pracuje na principu, kdy unikátní atomová struktura má určitý vrchol v emisním spektru rentgenového záření. Částice o vysoké energii, elektron či rentgenový paprsek, padá na vzorek, čímž vyvolává excitaci elektronu z vnitřní energetické úrovně a vytváří tím díru na stejném místě. Elektron z vnější energetické úrovně se může do této díry přesunout díky uvolnění nadbytečné energie ve formě rentgenových fotonů. Počet a energie těchto fotonů je pak změřena energiově disperzním rentgenovým spektroskopem, čímž je dosažena přibližná kompozice prvků. [51]

5. Výsledky

5.1 Zpracování dat

Jak již bylo zmíněno, každý vzorek byl měřen ze dvou stran spektroskopem, čímž vzniklo celkem 16 záznamů z každého pokusu. Avšak vzhledem k možné podobnosti jednotlivých prvků s jinými s velice podobnou emisivitou, spektrometrie naměřila mnoho prvků, které by se daly považovat za příměsi či za čistou chybu v měření. Z tohoto důvodu byly prvky s příliš nízkými koncentracemi (pod 0.01%) vyřazeny z výsledného určování kompozice vzorku. Dále zde byly vyřazeny prvky, které byly z nejpravděpodobněji naměřeny při prvkové interferenci spektra. Mezi tyto prvky patří například sulfáty, fosfáty, Ca či Th. Nakonec byly vybrány jen ty prvky, jejichž procentuální zastoupení se nacházelo při všech měřeních daného materiálu. Pro kontrolu byly tyto prvky porovnány s běžným zastoupením prvků a jejich koncentracemi v průmyslově dostupných variacích těchto materiálů. [52, 53]

Podle tohoto postupu byly vybrány následující prvky pro jednotlivé materiály, vypsány v tab. 1 níže

Tabulka 1 – Vybrané prvky pro experiment v jednotlivých materiálech

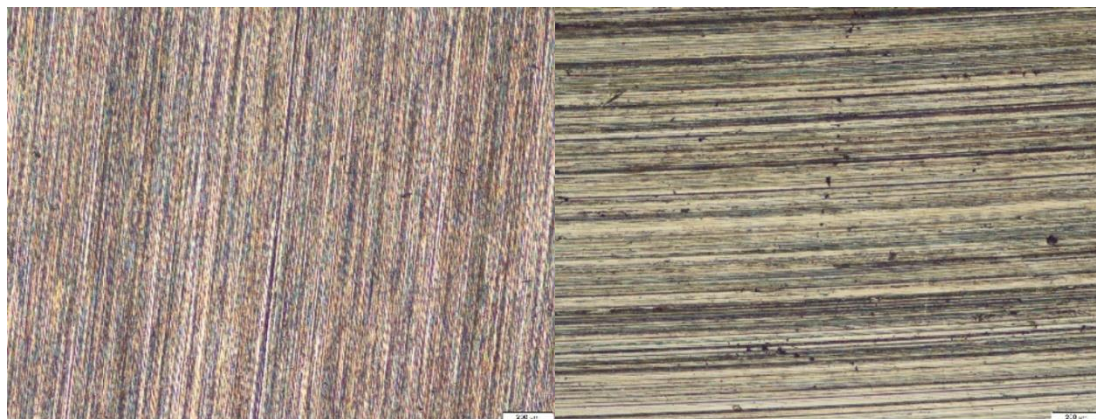
Materiál	Prvky
S-S 316L	Fe, Cr, Ni, Mo, Mn
Inconel 718	Fe, Cr, Ni, Mo, Nb, Ti

Po odstranění ostatních prvků byly koncentrace těchto zbylých prvků převedeny na 100 %. Tímto procesem je možné zobrazit původní koncentrace jednotlivých prvků v jednotlivých slitinách před experimentem (tab. 2 a 3).

Tabulka 2 – Procentuální hmotnostní zastoupení prvků v S-S 316L před experimenty

Materiál	S-S 316L N	S-S 316L AM
Prvek	m/m %	
Fe	68,22	65,73
Cr	17,32	16,79
Ni	10,37	14,29
Mo	2,35	2,24
Mn	1,74	0,95

Z tabulek 2 a 3 je zřejmé, že zastoupení jednotlivých prvků v S-S 316L N a S-S 316L AM je přibližně stejné, obdobně v případě variací slitiny Inconel 718.

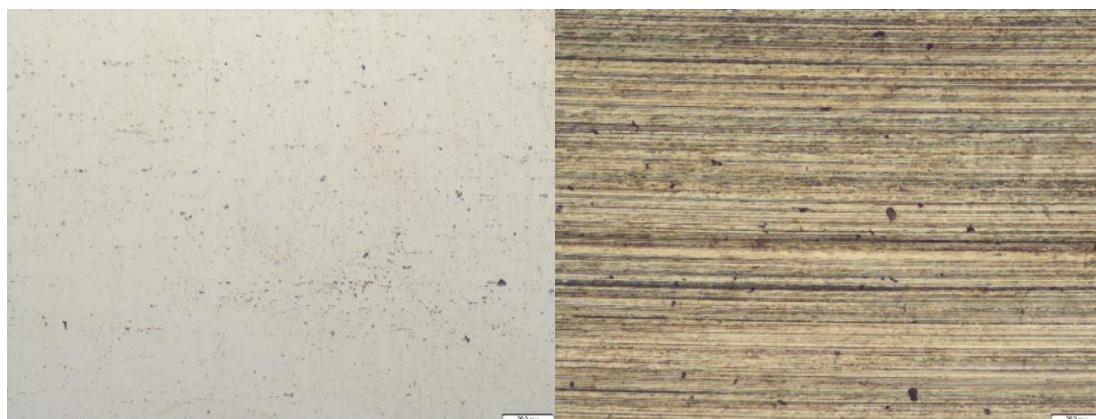


Obrázek 22 - Snímky z mikroskopu materiálů S-S 316L N (nalevo) a S-S 316L AM (napravo) před experimenty

Tabulka 3 – Procentuální hmotnostní zastoupení prvků v Inconel 718 před experimenty

Materiál	Inconel 718 N	Inconel 718 AM
Prvek	m/m %	
Ni	55,34	54,56
Cr	18,51	19,68
Fe	17,61	17,76
Nb	4,61	4,43
Mo	3,01	2,81
Ti	0,92	0,76

Snímky z mikroskopu jednotlivých materiálů je zobrazeno na obr. 22 výše (materiály S-S 316L N a S-S 316L AM) a na obr. 23 níže (materiály Inconel 718 N a Inconel 718 AM).



Obrázek 23 – Snímky z mikroskopu materiálů Inconel 718 N (nalevo) a Inconel 718 AM před experimenty

Hmotnostní úbytek byl separátně vypočítán přes zprůměrované plochy jednotlivých vzorků, hmotnostní rozdíl před a po experimentu a následné výsledky byly zapsány do tabulek a vyneseny do grafů (viz příloha 1, tab. 2A a 3A; příloha 2, graf 1B a 2B).

5.2 S-S 316L

Jak již bylo zmíněno, pro každý materiál byly vyhrazeny dva vzorky, které byly následně změřeny spektrometrem ze dvou stran. Tímto postupem vyšly pro každý materiál čtyři kompozitní analýzy. Pro porovnání s prvkovým zastoupením před každým experimentem, jednotlivá zastoupení byla zprůměrována a zapsána do tabulek, jako je tab. 4 níže (viz příloha 1, tab. 4A pro druhý experiment).

Tabulka 4 – Procentuální hmotnostní zastoupení prvků v S-S 316L po vystavení teplotě 550 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h

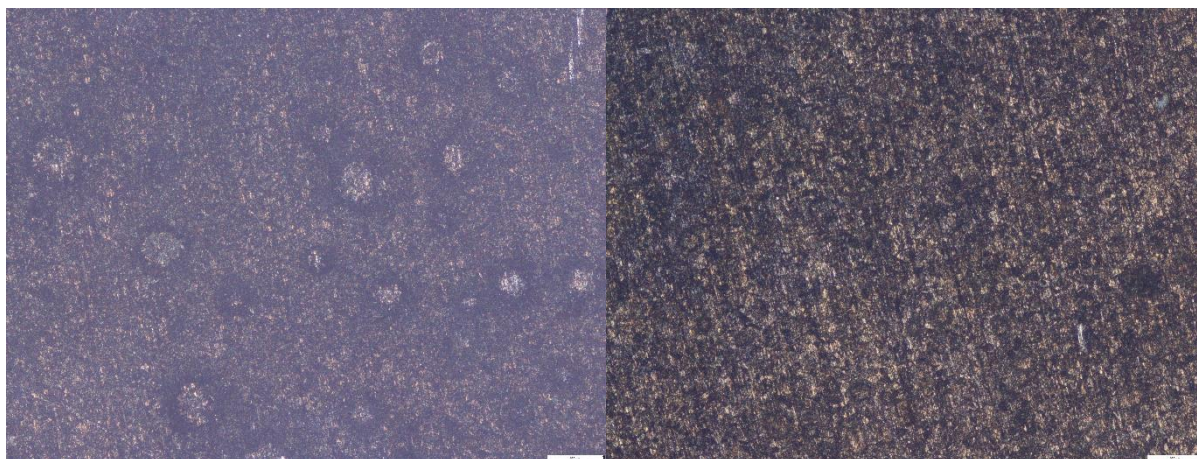
Materiál	S-S 316L N	S-S 316L AM
Prvek	m/m%	
Fe	67,42	64,14
Cr	16,13	15,15
Ni	12,32	17,55
Mo	2,38	2,21
Mn	1,74	0,94

Jedním z postupů porovnání byl absolutní rozdíl v procentuálním zastoupení jednotlivých prvků v materiálu (dále jen rozdíl). Ovšem pro zakomponování původní koncentrace prvků byly koncentrace procentuálně vztaženy k původním procentuálním koncentracím (viz tab. 5)

Tabulka 5 – Porovnání S-S 316L N před a po vystavení teplotě 550 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h

Prvek	Před [m/m%]	Po [m/m%]	Rozdíl [m/m%]	Relativní změna [%]
Fe	68,22	67,42	0,79	1,16
Cr	17,32	16,13	1,19	6,89
Ni	10,37	12,32	-1,95	-18,82
Mo	2,353	2,381	-0,028	-1,17
Mn	1,7356	1,7400	-0,0044	-0,26

Plus v případě rozdílu a procentuální změně indikuje snížení obsahu prvku v materiálu vůči původní koncentraci. Mínus v opačném případě, jak moc se daný prvek udržel v dané soustavě a svým zastoupením tak nahradil zastoupení jiných. Z pohledu koroze nás zde nejvíce zajímají prvky, které se korozními procesy nejvíce vypotřebovali do tekuté soli. Při tomto uvážení je zde vidět, že u Cr došlo k nejvyššímu vypotřebování. K tomuto závěru lze dojít nejen u dalších výsledků (viz příloha 1, tab. 5A až 7A), ale i u jiných studií, které se zabývaly podobnou tematikou. Tyto studie došly k závěru, že vypotřebování Cr mělo dominantní vliv na průběh a rozsah výsledné koroze. Kromě Cr zde ubývají i další prvky, jako Mo nebo Mn, ale vzhledem k jejich nízkému zastoupení v materiálu a nízkému rozdílu, nejsou dál brány v potaz. [54, 55]

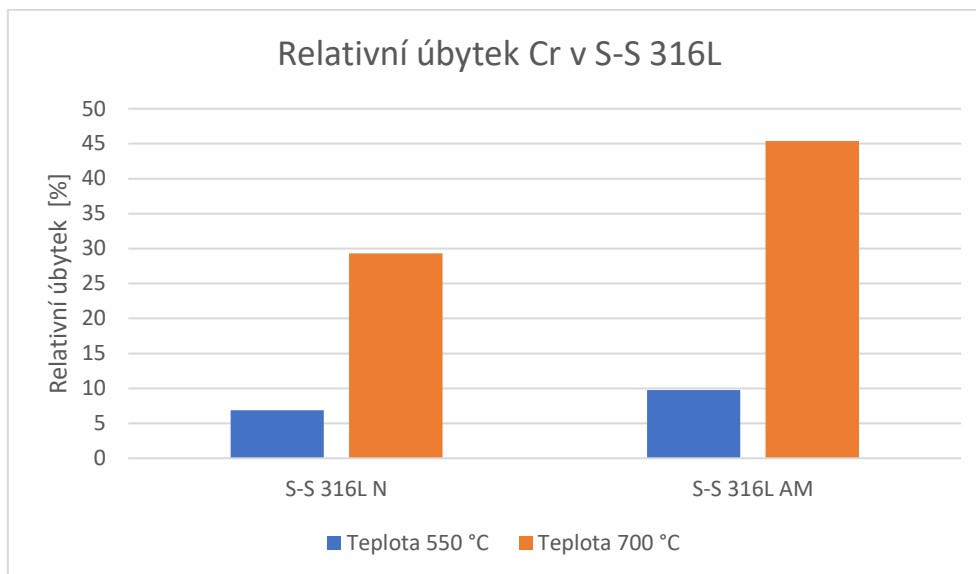


Obrázek 24 – Snímky z mikroskopu materiálu S-S 316L N po vystavení teplotě 550 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h

Vzhledem k těmto poznatkům a dosavadním výsledkům, je přiměřené brát Cr jako hlavní faktor při určování koroze. Z dostupných dat je zde zřejmá korelace mezi vypotřebováním Cr a hmotnostními úbytky v daných teplotách.

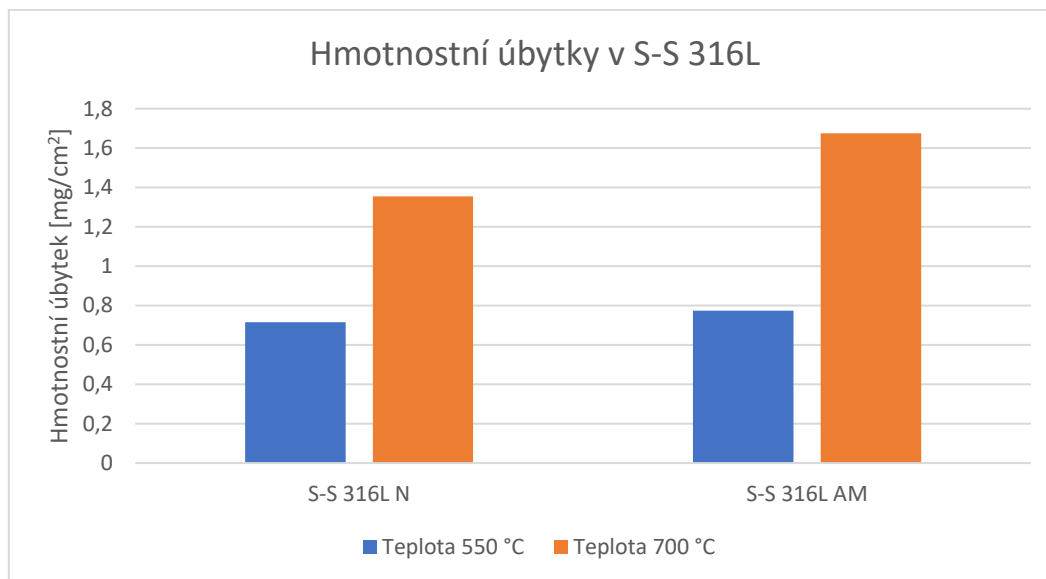
Pro přiblížení stavu vzorků je v této části uveden obr. 24 (výše), na které jsou snímky z mikroskopu testovaného materiálu S-S 316L N po vystavení teplotě 550 °C. Snímky dalších testovaných vzorků jsou uvedené v příloze 3, obr. 1C až 3C.

Graf 1 – Relativní úbytky Cr v S-S 316L po vystavení teplotám 550 °C a 700 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h



Při teplotě 550 °C vykazuje S-S 316L v obou provedeních určitý úbytek Cr, avšak u S-S 316L AM je tento úbytek mírně vyšší, přibližně o 2,85 % relativního úbytku (viz graf 1). Nárůst relativního úbytku Cr u S-S 316L AM je tak 1,4násobný oproti S-S 316L N. Podobný postup nastává i při vystavení vyšší teplotě, zde 700 °C. Vypotřebování je však oproti relativnímu úbytku Cr při předchozí teplotě mnohem vyšší, přibližně 4,2násobné u vzorcích z S-S 316L N a 4,65násobné u vzorků z S-S 316L AM. Opět dochází k vyššímu relativnímu úbytku v případě materiálu S-S 316L AM, kterého ubylo přibližně o 16 % více, než S-S 316L N. Úbytek u aditivně získaného materiálu je tak při teplotě 700 °C více než 1,5násobný, oproti konvenčně získanému materiálu. Z pohledu korozního chování tak dochází k určité shodě, kdy se vypotřebuje vždy více Cr v případě materiálu získaném aditivními technologiemi oproti konvenčně získanému materiálu, nezáleže na vystavené teplotě.

Graf 2 – Hmotnostní úbytky v S-S 316L po vystavení teplotám 550 °C a 700 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h



Při porovnání těchto poznatků s hmotnostními úbytky S-S 316L při obou teplotách (viz graf 2), procentuální úbytky Cr v S-S 316L celkem odpovídají svým chováním hmotnostním úbytkům při stejných teplotách. Při teplotě 550 °C dochází k mírně vyššímu hmotnostnímu úbytku v S-S 316L AM vzhledem k S-S 316L N, přibližně o 8,2 %. Po zvýšení teploty je tento trend stejný, avšak rozdíl mezi jednotlivými materiály dosahuje 23,6 %. Oba materiály reagují obdobně při zvýšení teploty, zvýšením hmotnostního úbytku, který je přibližně dvojnásobný oproti hmotnostnímu úbytku při teplotě nižší. Je zde tak opět vyšší úbytek při vyšší teplotě, ale rozdíl mezi úbytky materiálů S-S 316L N a S-S 316L AM není markantní.

5.3 Inconel 718

Stejný postup použitý při charakterizování korozního chování S-S 316L byl využit i pro Inconel 718, kde byla jednotlivá data zprůměrována a porovnána. I v této slitině docházelo k hlavnímu vyčerpání prvku Cr a stejný postup predikují i studie s podobným zaměřením. [56, 57]

Z těchto důvodů zde bude stejné zaměření na úbytek Cr a rozdíly v jeho vypočítání. Kromě Cr došlo také ke snížení koncentrace Ti, ale vzhledem k celkově nízkému zastoupení Ti zde nebude dále brán v potaz.

Tabulka 6 – Procentuální hmotnostní zastoupení prvků v Inconel 718 po vystavení teplotě 550 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h

Materiál	Inconel 718 N	Inconel 718 AM
Prvek	m/m%	
Ni	62,07	60,24
Cr	10,84	12,73
Fe	18,93	19,11
Nb	4,50	4,42
Mo	3,08	3,02
Ti	0,56	0,48

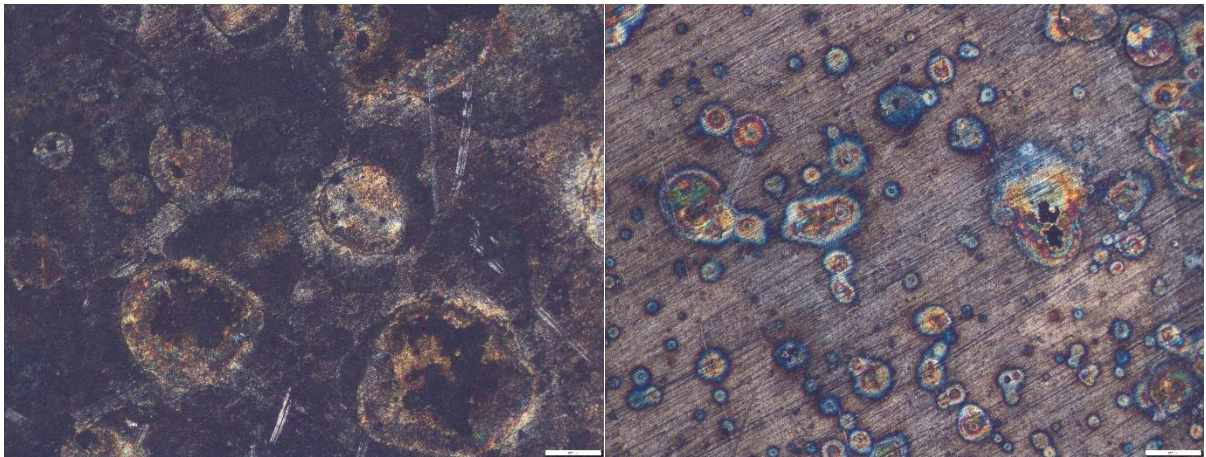
Již po vystavení teplotě 550 °C dochází k rapidnějšímu poklesu koncentrace Cr, vzhledem k materiálu S-S 316L N/AM. U materiálu Inconel 718 N tak dochází ke snížení koncentrace Cr o téměř polovinu (viz tab. 7).

Tabulka 7 – Porovnání Inconel 718 N před a po vystavení teplotě 550 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h

Prvek	Před [m/m%]	Po [m/m%]	Rozdíl [m/m%]	Relativní změna [%]
Ni	55,34	62,07	-6,73	-12,15
Cr	18,51	10,84	7,67	41,42
Fe	17,61	18,93	-1,32	-7,50
Nb	4,61	4,50	0,11	2,42
Mo	3,009	3,097	-0,089	-2,95
Ti	0,92	0,56	0,36	38,78

U dalších porovnáních (viz příloha 1, tab. 9 až 11) je vidět podobný průběh, kde dochází k vyššímu relativnímu úbytku Cr, oproti relativním úbytkům Cr při stejných teplotách u S-S 316L. Oproti S-S 316L však nastává vyšší relativní úbytek Cr při nižší teplotě u konvenčně získaného materiálu, zde naopak. Je však přiměřené zmínit, že rozdíl mezi relativními úbytky mezi Inconel 718 N a Inconel 718 AM při teplotě 550 °C je celkem nízký, přibližně 6.1 %.

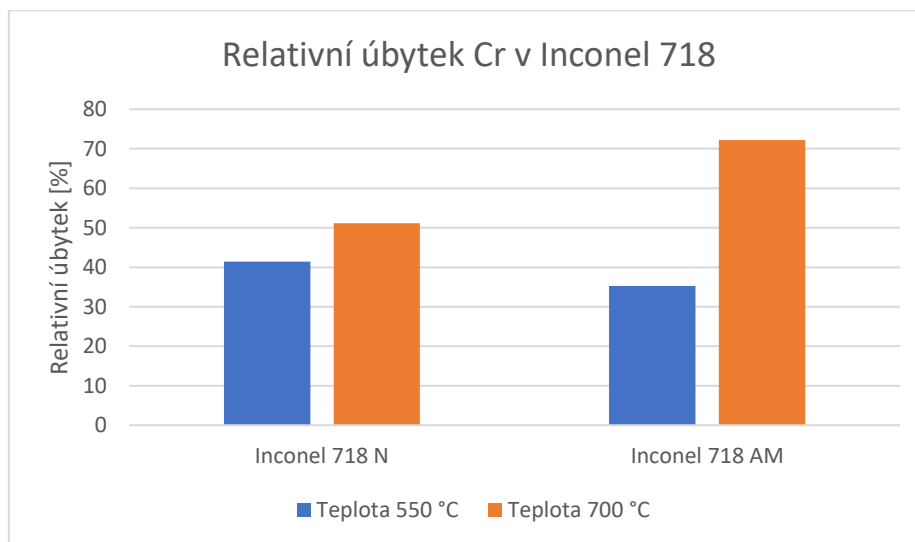
Snímky vzorků vystavených tekuté soli NaF-NaBF₄ při teplotě 550 °C materiálu Inconel 718 N jsou zobrazeny na obr. 25 níže. Pro zjednodušení jsou snímky dalších testovaných materiálů v příloze 3, obr. 4C až 6C.



Obrázek 25 – Snímky z mikroskopu materiálu Inconel 718 N po vystavení teplotě 550 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h

V případě experimentu s vyšší teplotou 700 °C je průběh vypotřebování Cr jiný. Dochází zde k vyššímu vypotřebování Cr u Inconel 718 AM. Tímto si je při vyšší teplotě podobný s průběhem relativního úbytku Cr u slitiny S-S 316L, zde je ale mnohem vyšší oproti předchozí teplotě. Relativní úbytek Cr u Inconel 718 N se zvýšil o přibližně 1,23násobně oproti předchozí teplotě, zatímco relativní úbytek Cr se u Inconel 718 AM zvýšil dvojnásobně. Relativní úbytek Cr u Inconel 718 AM je tak 1,41násobně vyšší nad úbytkem v Inconel 718 N.

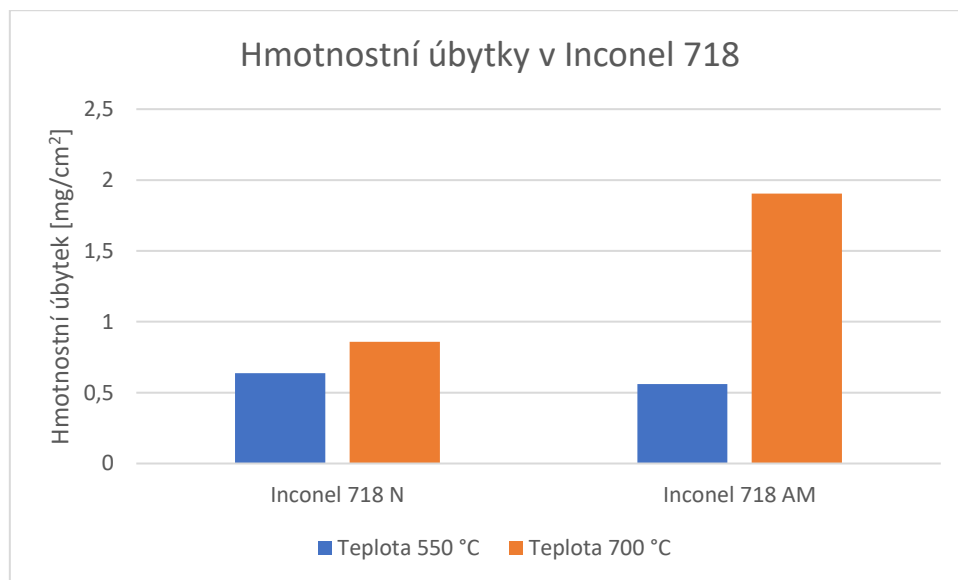
Graf 3 – Relativní úbytek Cr v Inconel 718 po vystavení teplotám 550 °C a 700 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h



U hmotnostních úbytků nastává podobná situace, jako u relativních úbytků Cr. Při teplotě 550 °C ubývá více materiálu Inconel 718 N, o přibližně 19 % více, než materiálu Inconel 718 AM. Při zvýšení teploty ale dochází k rapidnímu rozdílu. Konvenčně získaný materiál měl

celkem minimální nárůst relativního úbytku Cr vůči nižší teplotě, zatímco materiál získaný aditivními metodami získal nárůst relativního úbytku Cr více jak dvojnásobný (viz graf 3). V případě hmotnostního úbytku nastává podobný průběh – v případě Inconel 718 N nastává celkem nízký nárůst hmotnostního úbytku (o přibližně 34 %). Naproti tomu u Inconel 718 AM dochází k více než 3násobnému hmotnostnímu úbytku vůči úbytku při teplotě nižší (viz graf 4).

Graf 4 – Hmotnostní úbytky v Inconel 718 po vystavení teplotám 550 °C a 700 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h

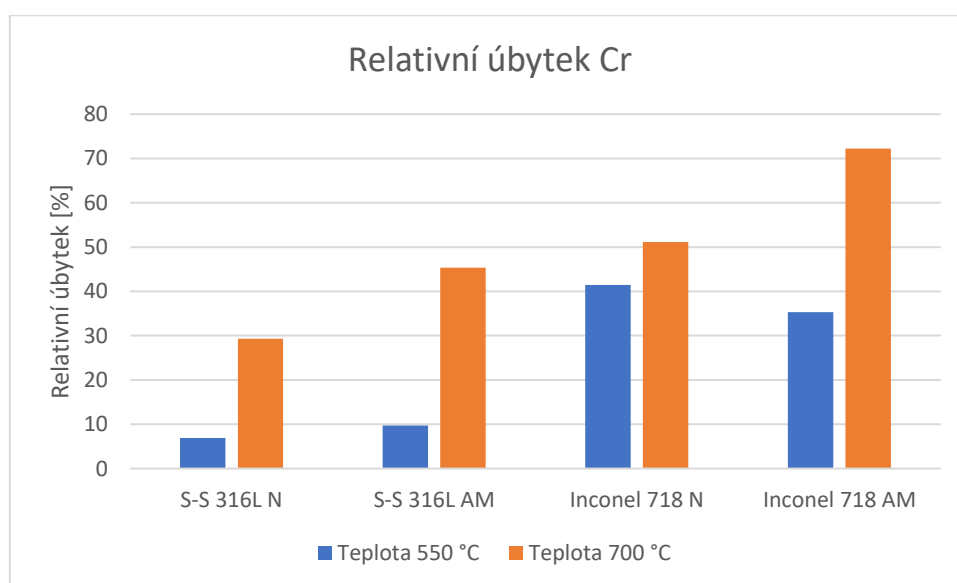


6. Závěr

Ze získaných dat je možno vidět určitou korelaci mezi hmotnostními úbytky daných materiálů a relativním úbytkům Cr při stejných teplotách. To tak odpovídá původním předpokladům a závěrům zmíněných studií. Avšak průběh koroze je u daných slitin různá.

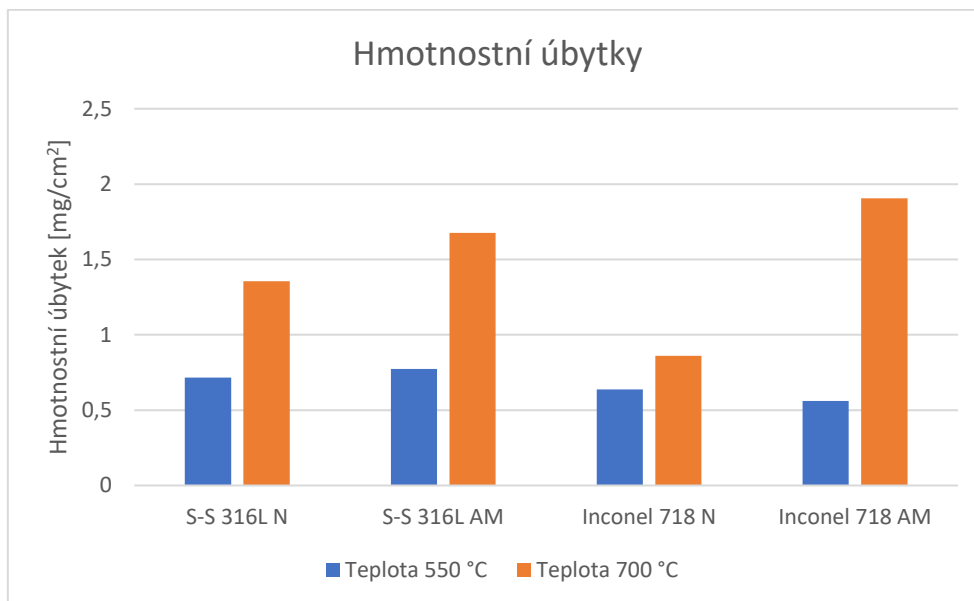
U slitiny S-S 316L probíhá koroze během obou teplot celkem podobně, kde ubývá více materiálu získaného aditivními technologiemi. Relativní úbytky Cr jsou mnohem vyšší při teplotě 700 °C (více než 4násobné, viz graf 5), zatímco hmotnostní úbytky jsou 2násobné oproti teplotě nižší (viz graf 6). Zvýšená teplota zde tak hraje výraznou roli. Rozdíly mezi těmito materiály jako takovými jsou ale poměrně malé, dalo by se tak argumentovat, že chování S-S 316L AM je z korozního hlediska velice podobné materiálu S-S 316L N.

Graf 5 – Relativní úbytky Cr u testovaných materiálu po vystavení teplotám 550 °C a 700 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h



U druhé zkoušené slitiny nastal průběh koroze jiný. Stejně jako u S-S 316L, hmotnostní úbytky a relativní úbytky Cr byly podobné ve stejných teplotách. Na druhou stranu při nižší teplotě došlo k mírně zvýšené korozi u Inconel 718 N, indikující, že by mohl mít materiál získaný aditivními technologiemi teoreticky podobné či lepší korozní vlastnosti při teplotě do 550 °C. Je však nutné zmínit, že tento rozdíl byl poměrně malý. Při porovnání s S-S 316L je nutné zmínit, že ačkoliv došlo při nižší teplotě u Inconel 718 k nižším hmotnostním úbytkům (viz graf 5), z pohledu relativních úbytků Cr nastal téměř 4násobný nárůst (viz graf 6).

Graf 6 – Hmotnostní úbytky u testovaných materiálů po vystavení teplotám 550 °C a 700 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h



Při zvýšení teploty se tento trend mění. Zatímco u Inconel 718 N dochází k mírně vyšší korozi, kde se hmotnostní úbytek zvýšil 1,34násobně a relativní úbytek Cr 1,23násobně, u Inconel 718 AM jsou nárůsty mnohem vyšší. Hmotnostní úbytek materiálu Inconel 718 AM je při teplotě 700 °C více než 3násobný a relativní úbytek Cr je 2násobný, oproti úbytkům materiálu Inconel 718 AM při teplotě 550 °C. Z toho by se dalo usuzovat, že korozi chování Inconel 718 N je při teplotách 550 °C a 700 °C velice podobné a nedochází k příliš vysokým změnám. Inconel 718 AM má opačný průběh, kde dochází při zvýšení teploty k mnohem vyššímu vypotřebování Cr a hmotnostního úbytku, oproti nižší teplotě. Dalo by se tak dojít k závěru, že teplota hraje velkou roli u rozdílů v korozi Inconel 718 N a Inconel 718 AM a že při vyšší teplotě je materiál získaný aditivními technologiemi mnohem náchylnější na korozi.

Pro lepší prostudování by byl vhodný výzkum chování těchto materiálů po delší dobu, pro určení doby vystavení jako dalšího možného faktoru, který může mít vliv na korozi materiálů. Z pohledu dalšího výzkumu S-S 316L AM a Inconel 718 AM v prostředí tekutých solí, je nutné definovat jejich mechanické a fyzikální vlastnosti po vystavení tomuto prostředí. Dále prostudování vzorků s většími i menšími rozměry, pro lepší klasifikování S-S 316L AM a Inconel 718 AM jako možných materiálů pro využití v solných reaktorech.

Bibliografie

- [1] – ZEMAN, Jan. Jaké jsou hlavní výhody a nevýhody jaderné energie?. *Argument* [online]. Praha: Argument OVIA, z.s., L 67316, 2017, 5. 1. 2021 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <http://casopisargument.cz/?p=27440>
- [2] – Energetika ve světě. *Skupina ČEZ* [online]. ČEZ, 2022, 2022 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/cisla-a-statistiky/energetika-ve-svete>
- [3] – Chicago Pile-1. In: *Atomic Heritage Foundation: In partnership with the National Museum of Nuclear Science and History* [online]. Cynthia Kelly: Atomic Heritage Foundation, 2002, 1. 12. 2016 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.atomicheritage.org/history/chicago-pile-1>
- [4] – MIGNACCA, Benito a Giorgio LOCATELLI. Economics and finance of Molten Salt Reactors. *Progress in Nuclear Energy* [online]. 2020, **129** [cit. 2022-05-26]. ISSN 01491970. Dostupné z: [doi:10.1016/j.pnucene.2020.103503](https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103503)
- [5] – KELLY, John E. Generation IV International Forum: A decade of progress through international cooperation. *Progress in Nuclear Energy* [online]. 2014, **77**, 240-246 [cit. 2022-05-26]. ISSN 01491970. Dostupné z: [doi:10.1016/j.pnucene.2014.02.010](https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.02.010)
- [6] - admin. Solný reaktor IMSR-400. In: *Atominfo.cz* [online]. Atominfo.cz, 2016, 12. 4. 2018 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2018/04/solny-reaktor-imsr-400/>
- [7] – TOURAN, PH.D., Nick. Molten Salt Reactors. In: *Whatisnuclear.com* [online]. USA: Whatisnuclear.com, 2007 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://whatisnuclear.com/msr.html#history>
- [8] – ZHANG, Dalin, Limin LIU, Minghao LIU, et al. Review of conceptual design and fundamental research of molten salt reactors in China. *International Journal of Energy Research* [online]. 2018, **42(5)**, 1834-1848 [cit. 2022-05-26]. ISSN 0363907X. Dostupné z: [doi:10.1002/er.3979](https://doi.org/10.1002/er.3979)
- [9] – PEŠKA, Robert. Aditivní výroba překonává překážky. In: *Automatizace.hw.cz: Rady a poslední novinky z oboru* [online]. Praha: HW Server, 17. 12. 2019 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/aditivni-vyroba-prekonava-prekazky.html>

- [10] – CIHLÁŘ, Michal. *Technologie solných reaktorů a testování materiálů sekundárního okruhu reaktoru Energy-Well: Jugoslávských partyzánů 1580/3, Praha, 160 00, Česko*. Praha, 2020. Diplomová práce. České Vysoké Učení Technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Jan Přehradný, PhD.
- [11] – Smlouva o založení Evropského společenství pro atomovou energii (Euratom). In: *EUR-Lex: Přístup k právu Evropské unie* [online]. Luxemburg: Publications Office of the European Union, 19. 10. 2007 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=LEGISSUM:xy0024>
- [12] – Brief Introduction. *Shanghai Institute of Applied Physics: Chinese Academy of Sciences* [online]. Shanghai, China: Shanghai Institute of Applied Physics, 2009 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: http://english.sinap.cas.cn/about_sinap/brief_introduction/
- [13] – SUN, Kaichao, Lin-wen HU a Charles FORSBURG. Neutronics feasibility of an MIT Reactor-driven subcritical facility for the Fluoride-salt-cooled High-temperature Reactor. *International Journal of Energy Research* [online]. 2017, **41**(14), 2248-2257 [cit. 2022-05-26]. ISSN 0363907X. Dostupné z: doi:10.1002/er.3786
- [14] – Historical Timeline. In: *Wisconsin: University of Wisconsin-Madison* [online]. Wisconsin, USA: Board of Regents of the University of Wisconsin System, 2022 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.wisc.edu/about/historical-timeline/>
- [15] – Wisconsin. In: *History* [online]. A&E Television Networks, 2022, 6. 11. 2009 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.history.com/topics/us-states/wisconsin>
- [16] – About UW. *Wisconsin: University of Wisconsin-Madison* [online]. Board of Regents of the University of Wisconsin System, 2022 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.wisc.edu/about/>
- [17] – About. *University of Wisconsin-Madison: Research* [online]. Madison, Wisconsin, USA: Board of Regents of the University of Wisconsin System, 2022 [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: <https://research.wisc.edu/about/>
- [18] – University of Wisconsin--Madison: Over. In: *US News and World Report* [online]. USA: U.S. News & World Report L.P, 2022 [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: <https://www.usnews.com/best-colleges/university-of-wisconsin-3895>

- [19] – University of Wisconsin-Madison. In: *Wisconsin, University of Wisconsin-Madison: Launch your future here* [online]. Wisconsin, USA: Board of Regents of the University of Wisconsin System, 2022 [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.wisc.edu%2F&psig=AOvVaw2BE1w15IUWcepmyifRVmv0&ust=1653410628188000&source=images&cd=vfe&ved=0CAwQjRxqFwoTCPC7tJWR9vcCFQAAAAAdAAAAABAD>
- [20] – ABOU DBAI, Mohamed, Raluca O. SCARLAT a Mario F. TRUJILLO. Radiative heat transfer in FLiBe molten salt participating medium in a vertical heated tube under forced and mixed convection laminar flows. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2020, **368** [cit. 2022-05-28]. ISSN 00295493. Dostupné z: doi:10.1016/j.nucengdes.2020.110775
- [21] – DOLAN, Thomas J. Introduction. *Molten Salt Reactors and Thorium Energy* [online]. Elsevier, 2017, 2017, 1-12 [cit. 2022-05-28]. ISBN 9780081011263. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-101126-3.00001-4
- [22] – Frequently Asked Questions About Liquid Radioactive Releases. *United States Nuclear Regulatory Commission: Protecting People and the Environment* [online]. Washington, USA: US NRC, 2022, 2. 6. 2021 [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: <https://www.nrc.gov/reactors/operating/ops-experience/tritium/faqs.html>
- [23] – DOLAN, Kieran, Guiqiu ZHENG, Kaichao SUN, David CARPENTER a Lin-wen HU. Tritium generation, release, and retention from in-core fluoride salt irradiations. *Progress in Nuclear Energy* [online]. 2021, **131** [cit. 2022-05-28]. ISSN 01491970. Dostupné z: doi:10.1016/j.pnucene.2020.103576
- [24] – MCALPINE, Samuel W., Natasha C. SKOWRONSKI, Weiyue ZHOU, Guiqiu (Tony) ZHENG a Michael P. SHORT. Corrosion of commercial alloys in FLiNaK molten salt containing EuF₃ and simulant fission product additives. *Journal of Nuclear Materials* [online]. 2020, **532** [cit. 2022-05-28]. ISSN 00223115. Dostupné z: doi:10.1016/j.jnucmat.2020.151994
- [25] – Transgranular Corrosion: What Does Transgranular Corrosion Mean?. *CorrosionPedia* [online]. Corrosionpedia, 2022 [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: <https://www.corrosionpedia.com/definition/1508/transgranular-corrosion>

- [26] – Mk1 PB-FHR Technology: The Mk1 PB-FHR. *FHR, NUC, Berkeley* [online]. UC Berkeley, USA: UC Berkeley, 2015 [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: <https://fhr.nuc.berkeley.edu/pb-fhr-technology/>
- [27] – About Berkeley. *Berkeley, University of California* [online]. Berkeley, USA: UC Regents, 2022 [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: <https://www.berkeley.edu/about>
- [28] – *Cal Facts: Transforming lives Fueling social mobility Changing the world* [online]. Berkeley, USA: University Development and Alumni Relations, 2021 [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: <https://admissions.berkeley.edu/sites/default/files/CalFacts2021.pdf>
- [29] – SMITH, Jami, KELL, Gretchen, ed. UC wins North America's largest open access publishing agreement. In: *Berkeley News* [online]. Berkeley, USA: UC Regents, 2022, 16. 6. 2020 [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: <https://news.berkeley.edu/wp-content/uploads/2020/06/Library750.jpg>
- [30] – LIU, Limin, Per PETERSON, Dalin ZHANG, Ishak JOHNSON, Suizheng QIU a G.H. SU. Scaling and distortion analysis using a simple natural circulation loop for FHR development. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2020, **168** [cit. 2022-05-28]. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.114849
- [31] – SEIFRIED, Jeffrey E., Raluca O. SCARLAT, Per F. PETERSON a Ehud GREENSPAN. A general approach for determination of acceptable FLiBe impurity concentrations in Fluoride-Salt Cooled High Temperature Reactors (FHRs). *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2019, **343**, 85-95 [cit. 2022-05-28]. ISSN 00295493. Dostupné z: doi:10.1016/j.nucengdes.2018.09.038
- [32] – KECKLER, Chris, Nader SATVAT, Kevin JOHNSON, Brandon HAUGH a Massimiliano. Photoneutron production and characterization in fluoride-salt cooled high-temperature reactors. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2021, **372** [cit. 2022-05-28]. ISSN 00295493. Dostupné z: doi:10.1016/j.nucengdes.2020.110976
- [33] – Overview: Mission Statement. *Bulletin 2021-2022: MIT Course Catalog* [online]. Cambridge, MA, USA: Massachusetts of Technology, 2021 [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: <http://catalog.mit.edu/mit/overview/>
- [34] – What's the MIT motto?. *MIT Admissions* [online]. Cambridge, MA, USA: Massachusetts of Technology [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: <https://mitadmissions.org/help/faq/motto-mens-et-manus/>

- [35] – About MIT. *Massachusetts Institute of Technology* [online]. Cambridge, MA, USA: Massachusetts of Technology [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: <https://www.mit.edu/about/>
- [36] – CHANDLER, David L., ed. MIT is on the path to achieve at least a 32 percent reduction in campus emissions of greenhouse gases by the year 2030. In: *MIT News: On campus and around the world* [online]. Cambridge, MA, USA, 21. 11. 2017 [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: https://news.mit.edu/sites/default/files/styles/news_article__image_gallery/public/images/201711/MIT-GHG-Reduction-Progress_0.jpg?itok=CucQCBX_
- [37] – RILEY, Brian J., Joanna MCFARLANE, Guillermo D. DELCUL, John D. VIENNA, Cristian I. CONTESCU a Charles W. FORSBERG. Molten salt reactor waste and effluent management strategies: A review. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2019, **345**, 94-109 [cit. 2022-05-28]. ISSN 00295493. Dostupné z: doi:10.1016/j.nucengdes.2019.02.002
- [38] – PÉREZ, Mercedes, Diego CAROU, Eva María RUBIO a Roberto. Current advances in additive manufacturing. *Procedia CIRP* [online]. 2020, **88** [cit. 2022-05-28]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2020.05.076
- [39] – Additive: Additive manufacturing makes it possible to create objects with complex geometries. *PhysOrg* [online]. Science X Network, 2003, 2016 [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: <https://scx1.b-cdn.net/csz/news/800a/2017/2-additivemanu.jpg>
- [40] – Metal Additive Manufacturing processes. In: *Metal Additive Manufacturing* [online]. UK: Inovar Communications [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: <https://www.metal-am.com/introduction-to-metal-additive-manufacturing-and-3d-printing/metal-additive-manufacturing-processes/>
- [41] – COOKE, Shaun, Keivan AHMADI, Stephanie WILLERTH a Rodney HERRING. Metal additive manufacturing: Technology, metallurgy and modelling. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2020, **57**, 978-1003 [cit. 2022-05-28]. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2020.07.025
- [42] – SING, Swee Leong, Jia AN, Wai Yee YEONG a Florencia Edith WIRIA. Laser and electron-beam powder-bed additive manufacturing of metallic implants: A review on processes, materials and designs. *Journal of Orthopaedic Research* [online]. 2016, **34**(3), 369-385 [cit. 2022-05-28]. ISSN 07360266. Dostupné z: doi:10.1002/jor.23075

- [43] – DURAI MURUGAN, P., S. VIJAYANANTH, M.P. NATARAJAN, D. JAYABALAKRISHNAN, K. ARUL, V. JAYASEELAN a J. ELANCHEZHIAN. A current state of metal additive manufacturing methods: A review. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2022, **59**, 1277-1283 [cit. 2022-05-28]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2021.11.503
- [44] – FRIEL, R.J. Power ultrasonics for additive manufacturing and consolidating of materials. *Power Ultrasonics* [online]. Elsevier, 2015, 2015, 313-335 [cit. 2022-05-28]. ISBN 9781782420286. Dostupné z: doi:10.1016/B978-1-78242-028-6.00013-2
- [45] – DASS, Adrita a Atieh MORIDI. State of the Art in Directed Energy Deposition: From Additive Manufacturing to Materials Design. *Coatings* [online]. 2019, **9**(7) [cit. 2022-05-28]. ISSN 2079-6412. Dostupné z: doi:10.3390/coatings9070418
- [46] – WHAT IS DIRECTED ENERGY DEPOSITION (DED)?. *TWI* [online]. Cambridge, UK: TWI, 2022 [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/directed-energy-deposition>
- [47] – FAYAZFAR, Haniyeh, Mehrnaz SALARIAN, Allan ROGALSKY, Dyuti SARKER, Paola RUSSO, Vlad PASERIN a Ehsan TOYSERKANI. A critical review of powder-based additive manufacturing of ferrous alloys: Process parameters, microstructure and mechanical properties [online]. 2018, **144**, 98-128 [cit. 2022-05-28]. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2018.02.018
- [48] – SHAMSAEI, Nima, Aref YADOLLAHI, Linkan BIAN a Scott M. THOMPSON. An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control. *Additive Manufacturing* [online]. 2015, **8**, 12-35 [cit. 2022-05-28]. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2015.07.002
- [49] – KLEIN, Andrew. How Binder Jet 3D Printing for Metals Compares to Selective Laser Melting and Electron Beam Melting. *VDMA: Future Manufacturing* [online]. Germany: VDMA, 2021, 2019, 1 [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: <https://www.exone.com/Admin/getmedia/d2e3e618-aa7c-457a-a019-fbef2b8063c2/Klein-English-Article-012020.pdf>

- [50] – ZIAEE, Mohsen a Nathan B. CRANE. Binder jetting: A review of process, materials, and methods. *Additive Manufacturing* [online]. 2019, **28**, 781-801 [cit. 2022-05-28]. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2019.05.031
- [51] – KHATUA, Lizina a Susanta Kumar DAS. Energy dispersive X-ray spectroscopy study of compound semiconductor zinc orthotitanate prepared by solid state reaction method. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2020, **33**, 5628-5631 [cit. 2022-04-28]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.03.794
- [52] – Stainless Steel 316L 1.4404. Thyssenkrupp Materials UK [online]. United Kingdom: thyssenkrupp Materials (UK) Ltd © 2022, 11/2017 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.thyssenkrupp-materials.co.uk/stainless-steel-316l-14404.html>
- [53] – INCONEL® 718. Mega Mex [online]. Texas, USA: Mega Mex, 2022 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://megamex.com/inconel-718/>
- [54] – ZHENG, Guiqiu, Brian KELLEHER, Guoping CAO, Mark ANDERSON, Todd ALLEN a Kumar SRIDHARAN. Corrosion of 316 stainless steel in high temperature molten Li₂BeF₄ (FLiBe) salt. *Journal of Nuclear Materials* [online]. 2015, **461**, 143-150 [cit. 2022-04-28]. ISSN 00223115. Dostupné z: doi:10.1016/j.jnucmat.2015.03.004
- [55] – QIU, Jie, Bin LENG, Huajian LIU, et al. Effect of SO₂ on the corrosion of 316L stainless steel in molten FLiNaK salt. *Corrosion Science* [online]. 2018, **144**, 224-229 [cit. 2022-04-28]. ISSN 0010938X. Dostupné z: doi:10.1016/j.corsci.2018.08.057
- [56] – ZHANG, Baicheng, Mingzhen XIU, Yong Teck TAN, Jun WEI a Pei WANG. Pitting corrosion of SLM Inconel 718 sample under surface and heat treatments. *Applied Surface Science* [online]. 2019, **490**, 556-567 [cit. 2022-04-28]. ISSN 01694332. Dostupné z: doi:10.1016/j.apsusc.2019.06.043
- [57] – ZHENG, Guiqiu a Kumar SRIDHARAN. Corrosion of Structural Alloys in High-Temperature Molten Fluoride Salts for Applications in Molten Salt Reactors. *JOM* [online]. 2018, **70**(8), 1535-1541 [cit. 2022-04-28]. ISSN 1047-4838. Dostupné z: doi:10.1007/s11837-018-2981-2

Příloha 1 – Tabulky

Tabulka 1A – Příklad výstupu z EDXS analýzy

El	m/m%	StdErr
Fe	67,74	0,91
Cr	17,03	0,31
Ni	10,23	0,27
Mo	2,31	0,15
Mn	1,76	0,18
Si	0,345	0,035
Cu	0,29	0,032
Pb	0,0704	0,0046
V	0,042	0,0045
Au	0,0265	0,0015
Bi	0,0145	0,0022
Nb	0,0139	0,0009
Tl	0,0126	0,002
Ca	0,0093	0,0042
Sn	0,0081	0,0005
Hg	0,0066	0,0016
Cd	0,00077	0,00032

Tabulka 2A – Hmotnostní úbytky materiálů při vystavení teplotě 550 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h

Materiál	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Váha před testem [g]	Váha po testu [g]	Hmotnostní úbytek [mg·cm⁻²]
SS 316L N	30,07	0,95	15,09	3,464	3,457	0,715
SS 316L AM	21,61	1,28	14,90	3,328	3,323	0,774
Inconel 718 N	19,26	2,05	14,54	4,724	4,719	0,638
Inconel 718 AM	21,84	1,34	13,91	3,395	3,391	0,562

Tabulka 3A – Hmotnostní úbytky materiálů při vystavení teplotě 700 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h

Materiál	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Váha před testem [g]	Váha po testu [g]	Hmotnostní úbytek [mg·cm ⁻²]
SS 316L N	29,74	0,98	15,21	3,497	3,483	1,355
SS 316L AM	21,64	1,32	15,08	3,539	3,526	1,676
Inconel 718 N	29,64	1,10	19,47	5,473	5,462	0,860
Inconel 718 AM	21,83	1,39	13,91	3,474	3,461	1,905

Tabulka 4A – Procentuální hmotnostní zastoupení prvků v S-S 316L po vystavení teplotě 700 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h

Materiál	S-S 316L N	S-S 316L AM
Prvek	m/m%	
Fe	70,44	67,56
Cr	12,25	9,17
Ni	13,25	19,94
Mo	2,54	2,40
Mn	1,52	0,94

Tabulka 5A – Porovnání S-S 316L N před a po vystavení teplotě 700 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h

Prvek	Před [m/m%]	Po [m/m%]	Rozdíl [m/m%]	Relativní změna [%]
Fe	68,22	70,44	-2,23	-3,27
Cr	17,32	12,25	5,08	29,32
Ni	10,37	13,25	-2,87	-27,70
Mo	2,35	2,54	-0,19	-8,07
Mn	1,74	1,52	0,21	12,20

Tabulka 6A – Porovnání S-S 316L AM před a po vystavení teplotě 550 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h

Prvek	Před [m/m%]	Po [m/m%]	Rozdíl [m/m%]	Relativní změna [%]
Fe	65,73	64,14	1,59	2,42
Cr	16,79	15,15	1,64	9,74
Ni	14,29	17,55	-3,26	-22,82
Mo	2,243	2,212	0,031	1,40
Mn	0,9466	0,9435	0,0031	0,33

Tabulka 7A – Porovnání S-S 316L AM před a po vystavení teplotě 700 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h

Prvek	Před [m/m%]	Po [m/m%]	Rozdíl [m/m%]	Relativní změna [%]
Fe	65,73	67,56	-1,82	-2,77
Cr	16,79	9,17	7,61	45,36
Ni	14,29	19,94	-5,65	-39,50
Mo	2,24	2,40	-0,15	-6,86
Mn	0,9466	0,9370	0,0095	1,01

Tabulka 8A – Procentuální hmotnostní zastoupení prvků v Inconel 718 po vystavení teplotě 700 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h

Materiál	Inconel 718 N	Inconel 718 AM
Prvek	m/m%	
Ni	62,94	66,48
Cr	9,05	5,47
Fe	19,46	20,07
Nb	4,74	4,41
Mo	3,28	3,23
Ti	0,54	0,35

Tabulka 9A– Porovnání Inconel 718 N před a po vystavení teplotě 700 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h

Prvek	Před [m/m%]	Po [m/m%]	Rozdíl [m/m%]	Relativní změna [%]
Ni	55,34	62,94	-7,60	-13,73
Cr	18,51	9,05	9,46	51,13
Fe	17,614	19,46	-1,85	-10,52
Nb	4,61	4,74	-0,13	-2,85
Mo	3,01	3,28	-0,27	-8,87
Ti	0,92	0,54	0,38	41,68

Tabulka 10A – Porovnání Inconel 718 AM před a po vystavení teplotě 550 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h

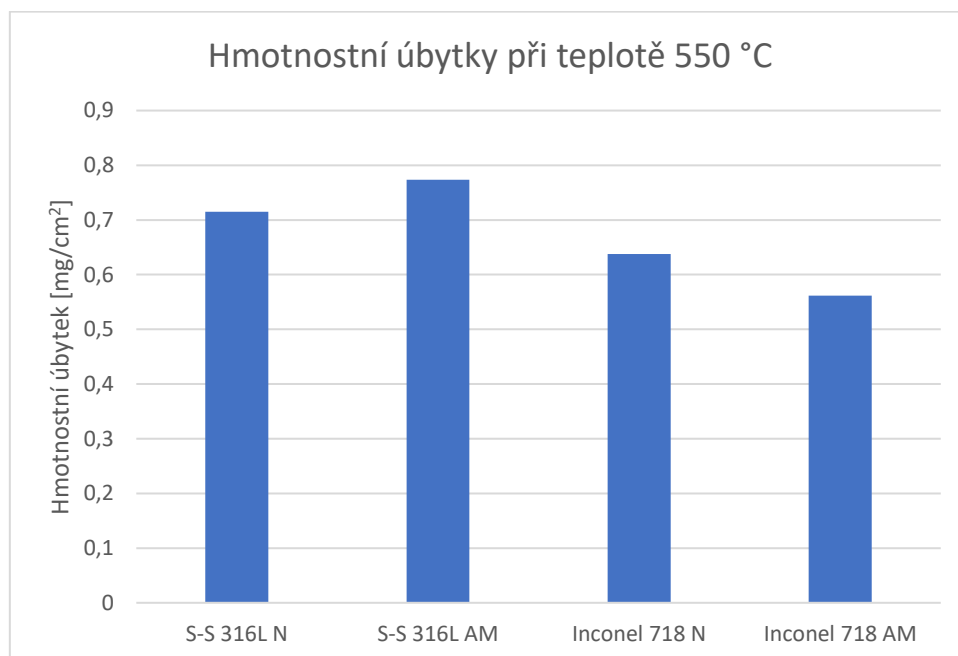
Prvek	Před [m/m%]	Po [m/m%]	Rozdíl [m/m%]	Relativní změna [%]
Ni	54,56	60,24	-5,68	-10,41
Cr	19,68	12,73	6,94	35,29
Fe	17,76	19,11	-1,39	-7,59
Nb	4,427	4,416	0,012	0,26
Mo	2,81	3,02	-0,21	-7,48
Ti	0,76	0,48	0,28	36,81

Tabulka 11A – Porovnání Inconel 718 AM před a po vystavení teplotě 700 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h

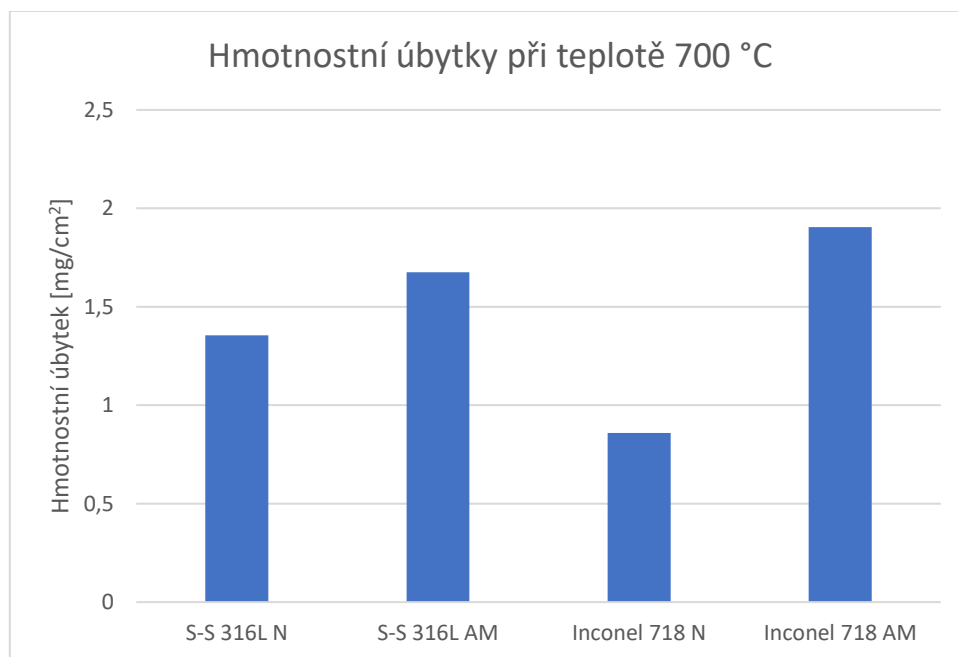
Prvek	Před [m/m%]	Po [m/m%]	Rozdíl [m/m%]	Relativní změna [%]
Ni	54,56	66,48	-11,92	-21,84
Cr	19,68	5,47	14,21	72,22
Fe	17,76	20,07	-2,31	-12,99
Nb	4,427	4,411	0,016	0,37
Mo	2,81	3,23	-0,42	-15,03
Ti	0,76	0,35	0,42	54,77

Příloha 2 – Grafy

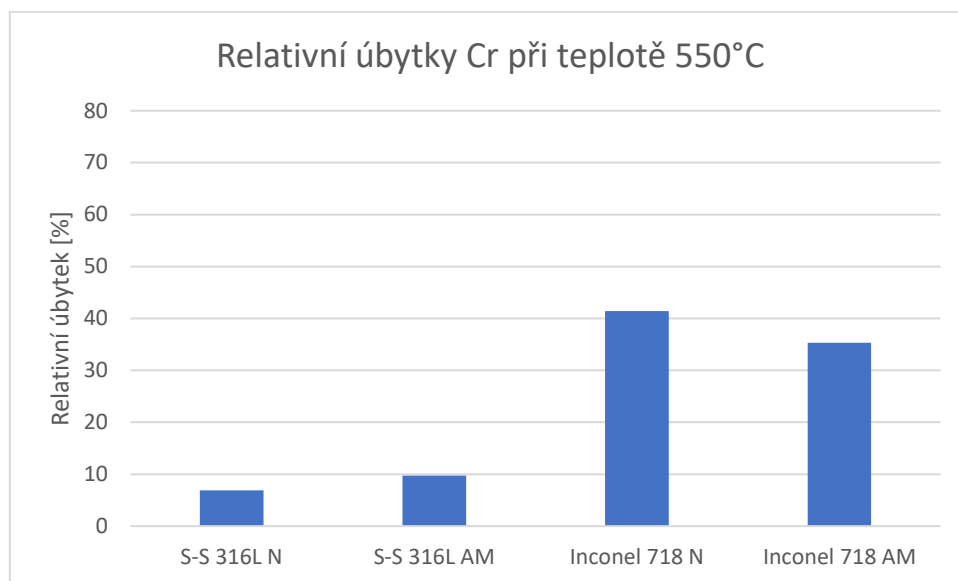
Tabulka 1B – Hmotnostní úbytky v testovaných materiálech po vystavení teplotě 550 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h



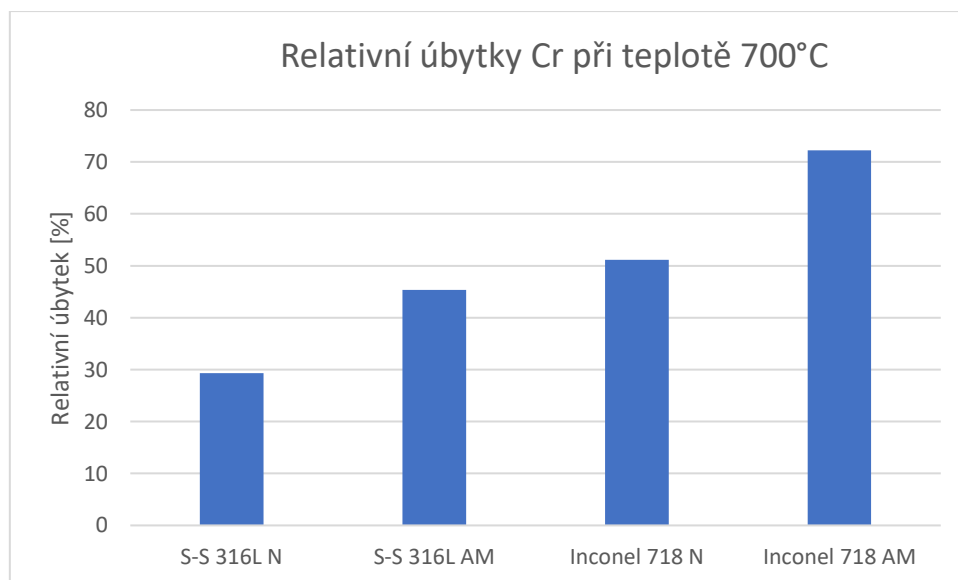
Tabulka 2B – Hmotnostní úbytky v testovaných materiálech po vystavení teplotě 700 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h



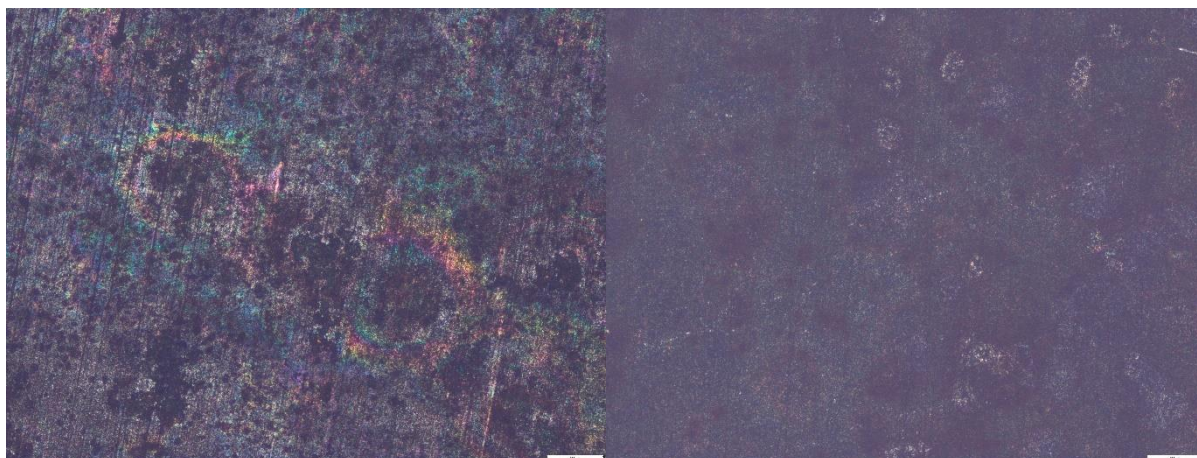
Tabulka 3B – Relativní úbytky Cr v testovaných materiálech po vystavení teplotě 550 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h



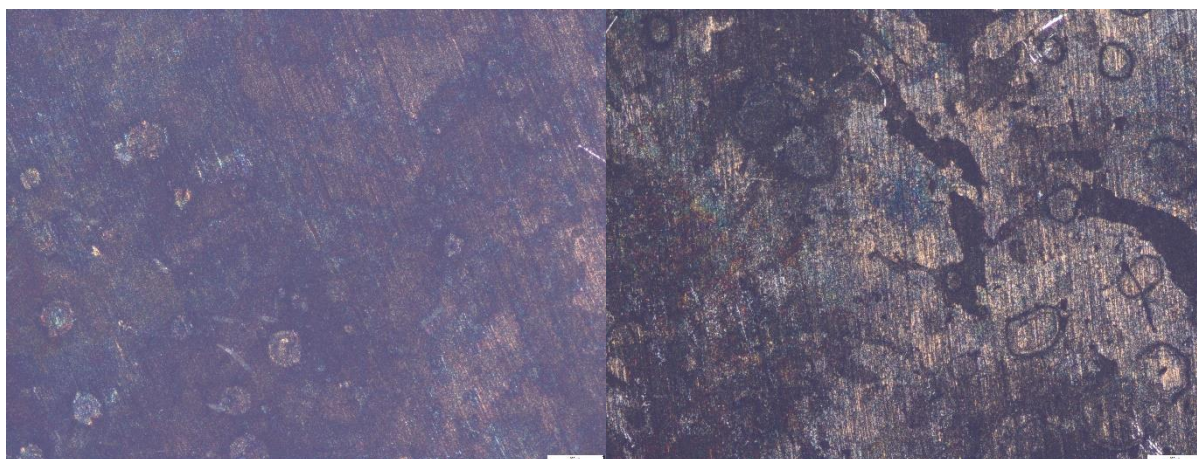
Tabulka 4B – Relativní úbytky Cr v testovaných materiálech po vystavení teplotě 700 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h



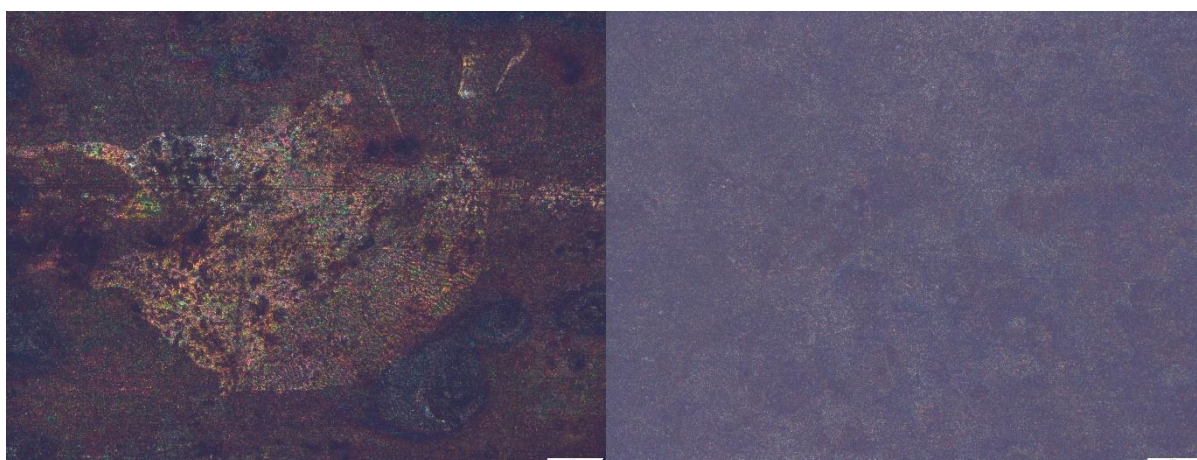
Příloha 3 – Obrázky



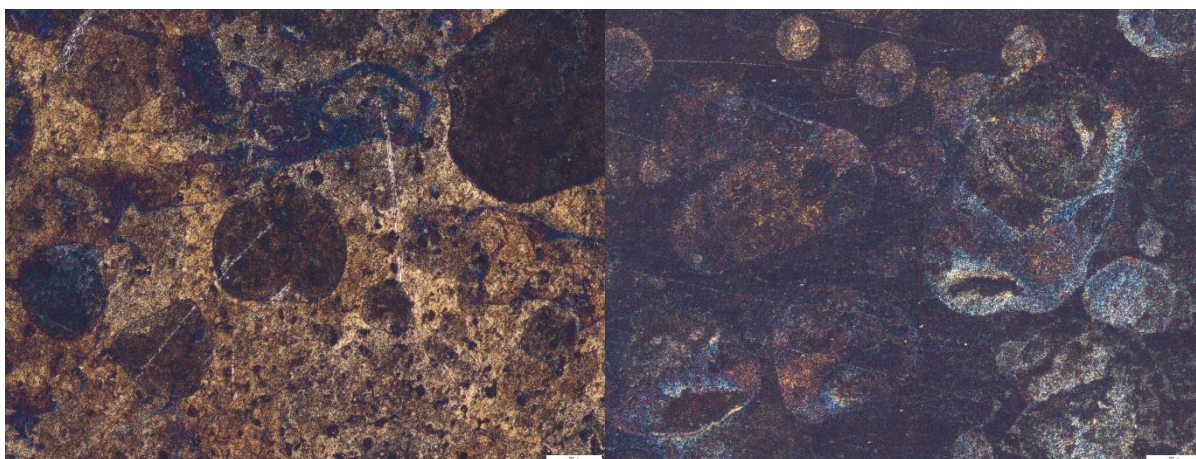
Obrázek 1C – Snímky z mikroskopu materiálu S-S 316L N po vystavení teplotě 700 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h



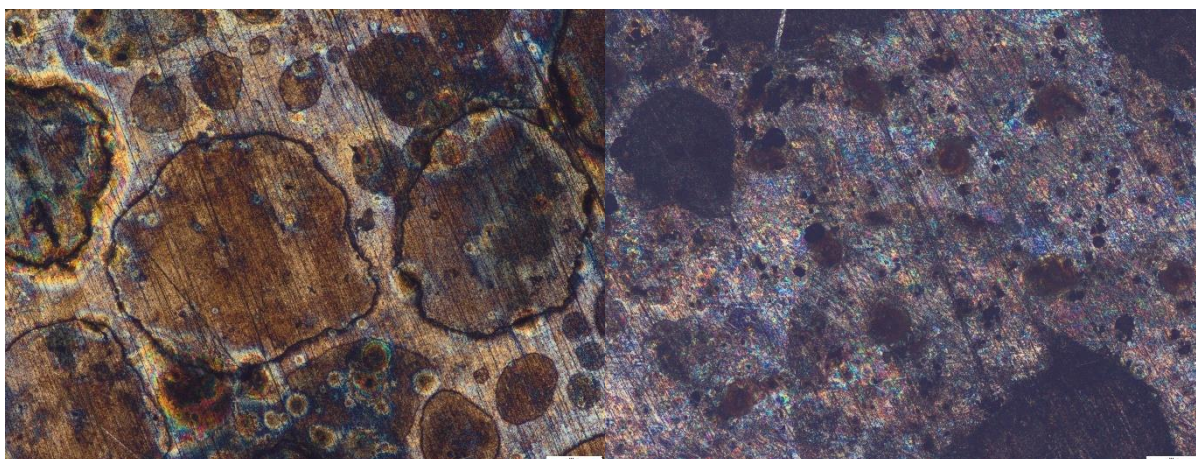
Obrázek 2C – Snímky z mikroskopu materiálu S-S 316L AM po vystavení teplotě 550 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h



Obrázek 3C – Snímky z mikroskopu materiálu S-S 316L AM po vystavení teplotě 700 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h



Obrázek 4C – Snímky z mikroskopu materiálu Inconel 718 N po vystavení teplotě 700 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h



Obrázek 5C – Snímky z mikroskopu materiálu Inconel 718 AM po vystavení teplotě 550 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h



Obrázek 6C – Snímky z mikroskopu materiálu Inconel 718 AM po vystavení teplotě 700 °C v tekuté soli NaF-NaBF₄ po dobu 720 h