



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

INOVACE JADERNÉHO PALIVA

NUCLEAR FUEL INNOVATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Peter Mičian

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Karel Katovský, Ph.D.

BRNO 2016

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Peter Mičian

ID: 164337

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Inovace jaderného paliva

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Zpracujte rešerši v oblasti současných trendů výzkumu a vývoje v oblasti jaderného paliva.
2. Zaměřte se na ATF - Accident Tolerant Fuel, zejména na vývoj paliv se zvýšenou tepelnou vodivostí.
3. Proveďte výpočty základních parametrů návrhu inovovaného jaderného paliva.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 24.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Karel Katovský, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

MIČIAN, P. *Inovace jaderného paliva*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Katovský, PhD..

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....

ABSTRAKT

Táto bakalárska práca sa zaoberá najnovšími poznatkami o jadrovom palive, hlavne palivami pre tlakovodné reaktory. V práci je uvedený prehľad najnovších výskumov z oblasti pokrytia paliva, ktoré oddeľuje palivo od chladiva. Časť je venovaná vyhorievajúcim absorbátorom, ktoré pomáhajú vyrovnať neutrónový tok počas prvého roka novej kazety zavezenej v aktívnej zóne. Ďalej práca pojednáva krátko o transmutačných palivových cykloch, hlavný dôraz je venovaný ATF palivám v podobe palív so zvýšenou tepelnou vodivosťou. Vývoj v tejto oblasti by mohol zvýšiť bezpečnosť a využitie jadrovej energetiky. Posledná časť práce je venovaná použitiu výpočtového programu FEMAXI-6 a analýze jeho výstupov. Tento program je zameraný na výpočty chovania palivových elementov pri vysokom vyhorení. Pre vstupy do programu boli použité reálne dáta z jadrovej elektrárne Dukovany.

KEÚČOVÉ SLOVA: jadrové palivo; vyhorievajúce absorbátory; pokrytie paliva; ATF palivá; tepelná vodivosť; FEMAXI-6

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the latest findings about nuclear fuel, especially fuels for pressurized water reactors. The thesis provides an overview of the latest research in the field of fuel cladding, which separates the fuel from coolant. Part is focused on burnable absorbers, which helps to reduce neutron flux during the first year of new fuel assembly. Furthermore, the thesis briefly discusses transmutation fuel cycles. the main empahsis is focused on ATF fuels, in the form of fuels with enhanced thermal conductivity. Develompment in this field could increase the safety and usage of the nuclear energy. The latest part is focused on applications of computational program FEMAXI-6 and analyze its outputs. This program deals with calculations of behavior of high-burnup fuel elements. As data for inputs were used real data from the nuclear power plant Dukovany.

KEY WORDS: nuclear fuel; burnable absorbers; fuel cladding; ATF fuels; thermal conductivity; FEMAXI-6

OBSAH

ZOZNAM OBRÁZKOV.....	7
ZOZNAM TABULIEK.....	8
ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK.....	9
1 ÚVOD.....	10
2 POKRYTIE PALIVA	11
2.1 ZLIATINY ZIRKÓNIA	11
2.2 NANESENIE VRSTVY KARBIDU KREMÍKA ALEBO TITÁNU NA POKRYTIE	11
2.3 ELOXÁCIA POKRYTIA	13
2.4 POUŽITIE CR A JEHO ZLIATIN.....	15
2.5 POUŽITIE OXIDU YTRIA	17
3 VYHORIEVAJÚCE ABSORBÁTORY	19
4 URÁNOVÉ PALIVO	21
4.1 KOVOVÉ URÁNOVÉ PALIVO	21
4.2 NITRIDICKÉ PALIVÁ.....	21
4.3 PALIVO MOX	22
4.4 KERAMICKÉ PALIVO S PRIDANÍM KARBIDU KREMÍKA	23
4.5 KERAMICKÉ PALIVO S PRIDANÍM OXIDU BERÍLIA	26
5 TRANSMUTAČNÉ PALIVOVÉ CYKLY	28
5.1 URÁN-PLUTÓNIOVÝ PALIVOVÝ CYKLUS.....	28
5.2 THÓRIUM-URÁNOVÝ PALIVOVÝ CYKLUS	28
6 VÝPOČTOVÉ PROGRAMY	30
6.1 FEMAXI.....	30
6.2 ŠTRUKTÚRA FEMAXI-6.....	31
6.3 VÝPOČET VO FEMAXI-6	33
6.4 VÝSTUPY	37
7 ZÁVER.....	43
POUŽITÁ LITERATÚRA	44

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 2-1 Morfológia pokrytia ZIRLOTM so zličeninou TiN vyobrazená pomocou elektrónového mikroskopu	12
Obr. 2-2 Hybridné riešenie pokrytia pomocou SiC.....	13
Obr. 2-3 Trvanie eloxácie(duration of anodization) vs zvýšenie CHF(tepelnej vodivosti).....	14
Obr. 2-4 Hodnota prúdovej hustoty (current density) závislá na trvaní eloxácie (duration of anodization).....	14
Obr. 2-5 Nárast hmotnosti pri korózii čistej zliatiny zirkónia a chrómom pokrytej zliatiny zirkónia v atmosfére pary o teplote 1200 °C po dobu 2000 s.....	15
Obr. 2-6 Priebiehy medze šmyku a pevnosti v závislosti na teplote, použitie 9Cr-1Mo ocele.....	16
Obr. 2-7 Porovnanie vývinu vodíka v závislosti na teplote pre rôzne zliatiny.....	17
Obr. 2-8 Závislosti tvrdosti zliatin zirkónia s obsahom Y ₂ O ₃ a pri rôznych teplotách SPS.....	18
Obr. 3-1 Rozmiestnenie palivových prútikov v kazete spolu s vyhoriavajúcim absorbátorom, VVER 440 EMO	20
Obr. 4-1 XRD spektrum UO ₂ -SiC paletiek spekaných pomocou SPS a oxidácie	23
Obr. 4-2 Použitie SiCw(vlákná) a SiCp(prášok) spekaní pomocou oxidácie a SPS	24
Obr. 4-3 Rôzne veľkosti SiC (tmavá farba) v UO ₂ (bledá farba), (a)0,6 μm, (b)1 μm, (c) 9 μm, (d)16,9 μm, (e)55 μm	25
Obr. 4-4 Spojenie UO ₂ so zrnami SiC re zrná veľkosti (a)9 μm, (b)16,9 μm, (c)55 μm.....	25
Obr. 4-5 Závislosť tepelnej vodivosti na podielovom objeme SiC v porovnaní s výpočtovým modelom Hasselmana a Johnsona	26
Obr. 4-6 Granule UO ₂ po mletí a pokrytí práškom BeO.....	27
Obr. 6-1 Štruktúra kódu FEMAXI-6.....	32
Obr. 6-2 Príklad vstupného súboru ABC.d05	34
Obr. 6-3 Rozloženie profilovanej kazety Gd_2M	35
Obr. 6-4 Štruktúra priečinkov programu FEMAXI-6	36
Obr. 6-5 Priebeh priemerného lineárneho (po-prútikového) výkonu v závislosti na vyhorení s naznačením jednotlivých rokov.....	38
Obr. 6-6 Priebeh teploty uprostred palivovej paletky v závislosti na vyhorení	39
Obr. 6-7 Priebeh tlaku v prútiku v závislosti na vyhorení.....	40
Obr. 6-8 Priebeh teploty chladiča na vstupe/strede/výstupe v závislosti na vyhorení	41
Obr. 6-9 Priebeh rastu zoxidovanej vrstvy na povrchu palivového prútika v závislosti na vyhorení	42

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 6-1 Hlavné oblasti analýzy programu FEMAXI-6	31
Tab. 6-2 Premenné funkcie PTHCON	37

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

ATF	- accident tolerant fuel - palivá so schopnosťou zvládať havárie
CANUT	- Centre for Advanced Nuclear Technologies - centrum pokročilých jadrových technológií
CHF	- critical heat flux - kritický tepelný tok
ECO fuels	- enhanced conductivity fuels - palivo so zvýšenou tepelnou vodivosťou
EMO	- elektrárň Mochovce
FEM	- Finite Element Method - metóda konečných prvkov
GG	- green granules
JAEA	- Japan Atomic Energy Agency - Japonská agentúra pre atómovú energiu
LOCA	- loss-of-coolant-accident - havária zo stratou chladiva
MOX	- mixed oxide - zmesné palivo oxidov ($\text{UO}_2 + \text{PuO}_2$)
PCMI	- pallet cladding mechanical interaction - výpočet mechanickej interakcie medzi paletkou a pokrytím
SiC	- karbid kremíku
SPS	- spark plasma sintering - spekanie pomocou plazmy (iskier)
SB	- slug bisque
VA	- vyhoriavajúci absorbátor
VVER	- ľahkovodný energetický reaktor východného typu
ΔT	- zmena teploty

[°C]

1 ÚVOD

Život bez elektrickej energie si už nikto nevie predstaviť. Je veľký dopyt po elektrickej energii, na ktorej sme závislí. Mnoho ľudí si však neuvedomuje, že všetku túto energiu musíme nejakým spôsobom získať. Elektrickú energiu dokážeme vyrobiť spaľovaním fosílnych palív, využívaním energie vodných tokov, premenou slnečnej energie, využitím vetra alebo rozštiepením jadier uránu.

Jadrová energetika je v dnešnej dobe neoddeliteľnou súčasťou nášho energetického mixu, ktorý by mal byť najekologickejší a samozrejme najefektívnejší. Hoci sú skôr podporované zdroje obnoviteľné, ako slnečná a veterná energia, vývoj v oblasti jadrovej energetiky určite nezaspal. Vývojári sa snažia aj v tejto oblasti čo najviac vylepšiť, zrenovovať a posunúť vpred výrobu elektrickej energie. Môže to byť spôsobené trhom, ktorý ich tlačí s nízkymi cenami elektrickej energie, alebo za predstavou väčšieho zisku. Jednoznačnou súčasťou vývoja je aj tlak na zvyšovanie bezpečnosti jadrových elektrární, či už zo strany štátnych orgánov, alebo zo strany verejnosti. Zvyšovanie bezpečnosti je a vždy bude hlavnou prioritou po zvlášť nepríjemných skúsenostiach po jadrových haváriách.

Napomôť k zefektívneniu a zvýšeniu bezpečnosti určite patrí vývoj okrem iného aj v oblasti základnej jednotky jadrového reaktora, ktorou je palivo. V tejto práci je priblížený stav, vývoj a výskum v oblasti jadrového paliva. Nachádzajú sa tu zhrnuté trendy v oblasti pokrytia palivových prútikov. Neoddeliteľnou súčasťou dnešných palív sú tiež vyhoriavajúce absorbátory, ale hlavné zameranie je na samotné palivo a jeho rôzne modifikácie. Nachádza sa tu aj krátke priblíženie oblasti transmutačných cyklov.

Práca sa venuje predovšetkým tzv. ECO fuels, čo znamená palivá so zvýšenou tepelnou vodivosťou. Táto zvýšená tepelná vodivosť sa dosahuje, či už pridávaním rôznych zlúčenín do samotného paliva, alebo jeho modifikáciou. Ide o to, aby sa znížila teplota uprostred paletky paliva tým, že sa zvýši jej tepelná vodivosť. To bude viesť k väčšej efektívite a bezpečnosti paliva. Avšak vynára sa mnoho otáznikov, ako sa bude palivo chovať.

Súčasťou tejto práce je aj krátke vovedenie do výpočtových programov pre jadrové palivá. Je tu vysvetlené, ako pracuje program FEMAXI-6, načo sa dá použiť a ako sa dajú jednotlivé výstupy interpretovať a využiť. Pre vstupy, aby boli výpočty názorné, boli použité reálne hodnoty zo štvrtého bloku jadrovej elektrárne Dukovany. Cieľom práce je v prvej časti zoznámiť čitateľov s trendami a v druhej časti s programom FEMAXI-6. Táto práca je súčasťou projektu CANUT.

2 POKRYTIE PALIVA

Pokrytie chráni palivo pred priamym stykom s pracovným prostredím, ktoré môže na palivo pôsobiť nepriaznivo. Je tiež bariérou, ktorá má chrániť pred únikom štiepných produktov (či už pevných, kvapalných alebo plyných) do životného prostredia. Preto by malo pokrytie vydržať aj vysoké teploty a neroztaviť sa. Tiež by malo byť chemicky nereaktívne s prostredím v ktorom sa môže nachádzať. V niektorých prípadoch pôsobí aj ako nosný konštrukčný element palivovej tyče. V neposlednom rade však musí mať pokrytie malý účinný prierez pre záchyt a nepružný rozptyl neutrónov.

Z doterajších poznatkov o materiáloch, môžeme usúdiť, že vhodné na pokrytie sú zliatiny na báze hliníka, horčíka, zirkónia, berýlia, niklu, austenitickej ocele a grafitu. Je to vďaka ich komplexnému zhodnoteniu vzhľadom na jadrové, korózne a mechanické vlastnosti. [1,2]

2.1 Zliatiny zirkónia

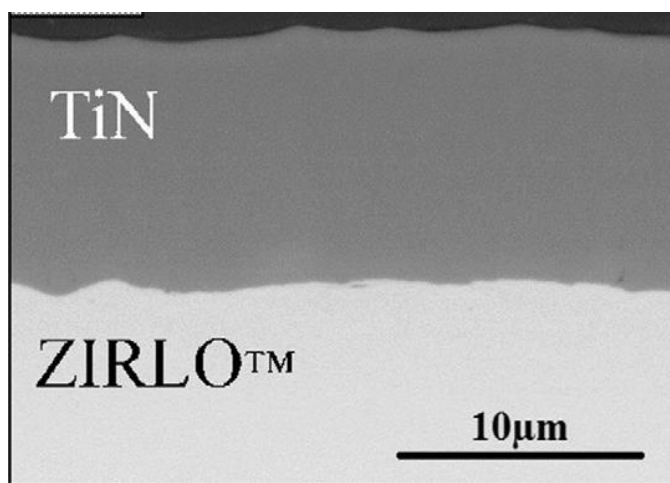
V dnešnej dobe sa ako pokrytie využívajú zliatiny zirkónia, najznámejšia Zircaloy, kvôli ich malému účinnému prierezu pre záchyt a nepružný rozptyl neutrónov, odolnosti voči vysoko teplotnej parnej korózii, dobrej tepelnej vodivosti a dobrým mechanickým vlastnostiam. Ich nevýhodou je, že pri vysokých teplotách môžu dramaticky strácať svoju pevnosť. Tým pádom sa dostávajú štiepne produkty von z palivového prútika. Ale ak sa udrží geometria ktorú je možno chladiť a mohli by sme ju dlho dochladzovať, je tu malá šanca udržať štiepne produkty v kontajneri, alebo by bolo možné ich zachytiť aj mimo kontajneru. Tým pádom by sa dal primárny okruh dekontaminovať ak by nebol poškodený a vrátiť späť do prevádzky. Ale cena dekontaminácie by bola veľmi vysoká. Pri nadprojektových haváriách, kde nie je možné dochladzovať palivo, čiže ide o LOCA haváriu (loss-of-coolant-accident, ako to bolo vo Fukušime), teplota narastie na hodnoty okolo 1500 – 1700 °C. Dochádza k silnému nárastu vzniku vodíka pri chemickej reakcii zirkónia s vodou, ktorú môžeme vidieť v rovnici (2.1), a následne môže dôjsť k zapáleniu takto vzniknutého vodíka, čiže výbuchu. Toto môže viesť ku porušeniu kontajneru a štiepne produkty sa môžu dostať až za hranice elektrárne. V tomto prípade nie je zničená iba elektrárňa, ale je potrebné dekontaminovať aj okolité prostredie ktoré je zamorené. Avšak pri ľahkovodných reaktoroch je nadprojektová havária považovaná za veľmi málo pravdepodobnú. [1,3]



2.2 Nanosenie vrstvy karbidu kremíka alebo titánu na pokrytie

Aby sa predišlo efektu vznikaníu vodíka snažia sa vývojári vyvinúť či už nové pokrytie alebo sa snažia vytvoriť tenkú vrstvu z iného materiálu, ktorá ma chrániť dnešné pokrytie. Takéto palivo sa nazýva ATF (accident tolerant fuels) palivo, ktoré by bolo schopné zvládať situáciu dlhší čas bez poškodenia, pokiaľ by sa nezasiahlo z vonku. Hlavnou úlohou je zvládnuť reakciu zirkónia s vodou pri ktorej vzniká vodík. Nové materiály pokrytia sú založené na silicon carbide (SiC), feritických zliatinách oceli a iné. Ako vrstva nanosená na pokrytie sa používajú napríklad zlúčeniny titánu (TiAlN a TiN), v podobe jednotlivých keramických vrstiev, na zvýšenie odolnosti voči korózii pri vysokých teplotách vody. Štruktúru môžeme vidieť na obr. 2-1, ktorá je

vytvorená pomocou elektrónového mikroskopu. Ďalej však treba skúmať akú hrúbku treba použiť, aby bolo pokrytie účinné ale nebolo príliš ťažké a tým neúmerne zaťažovalo palivový súbor. [3]



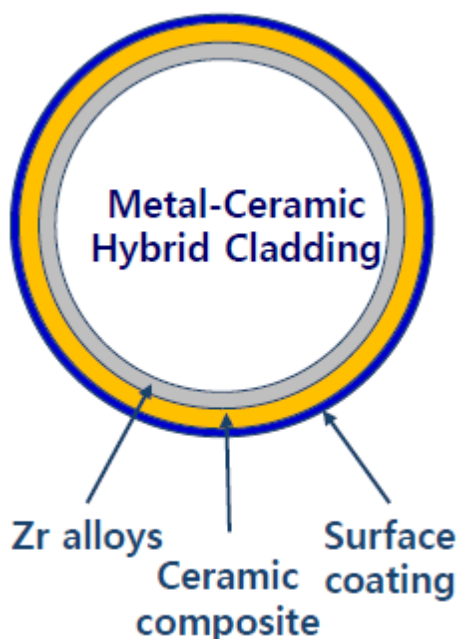
Obr. 2-1 Morfológia pokrytia ZIRLO™ so zličeninou TiN vyobrazená pomocou elektrónového mikroskopu [3]

Pri použití silicon carbidu (SiC), ktorý sa tiež používa aj vo fúzných reaktoroch, sa skúmajú jeho vlastnosti ako sú výborné vysoko teplotné vlastnosti, radiačná tolerancia, nízka aktivácia a mnohé ďalšie dobré chemické a fyzikálne vlastnosti. V porovnaní so súčasnými Zr zliatinami má SiC lepšiu neutrónovú ekonomiku a tiež lepšie mechanické vlastnosti pri vyšších teplotách. A hlavne je vysoko odolný voči korózii vďaka vytvoreniu vrstvy SiO₂ na povrchu. Avšak táto odolnosť je veľmi závislá na spôsobe výroby a presných podmienkach prostredia. Napríklad pri vysokej teplote a tlaku táto schopnosť klesá, kvôli zhoršeniu schopnosti vrstvy SiO₂ chrániť. Pri skúške kedy bola teplota 1200 °C a tlaku pary 1 MPa bola oxidácia povrchu SiC približne o dva rády menšia ako oxidácia povrchu Zircaloy-4.

Zlá vlastnosť SiC je, že sa nedá zväčšať. Je to problém na koncoch hermeticky uzavretých prútikov. Preto sa napríklad vytvára zmes TiC + Si ako spojovací materiál. Pri vytváraní týchto spojovacích materiálov sa musí dbať tiež na ich odolnosť voči korózii a radiačnú stálosť.

Pri radiačnom zaťažení vzniká jav napúčania, avšak je veľmi nepatrný, ale pri rozdielnom napúčaní vnútorného a vonkajšieho povrchu kompozitnej trubky, môžu vznikať problémy. Napriek všetkým problémom pokrytie SiC výrazne zlepši ekonomiku a bezpečnosť ľahkovodného paliva či už pri havárii alebo štandardnej prevádzke. [9]

Tiež sa v mnohých krajinách uvažuje o pokrytí čisto tvoreného z SiC. V dnešnej dobe sa používajú rôzne komponenty vyrobené priamo iba z SiC, to sú napríklad kanály vo varných reaktoroch. Čisto keramické riešenie je slabé pri zachytávaní štiepných produktov. Preto sa uvažuje o tzv. hybridných alebo sandwichových riešeniach kde sa uvažuje o vložení kovovej vrstvy, ktorá by mala zlepšiť tesnosť. Zatiaľ sa ako najvhodnejšie javí tálium ale tiež sa uvažuje aj o použití viacerých vrstiev a použití zirkónia. Pri hybridných riešeniach sa uvažuje kombinácia výhod kovu a SiC. Vnútna vrstva by mala byť zo zirkónia kvôli udržaniu plynov vo vnútri, stredná vrstva tvorená z SiC by redukovala vývin vodíka a zlepšovala by mechanické vlastnosti a tretia vrstva by chránila SiC pri normálnych podmienkach. Toto riešenie môžeme vidieť na obrázku 2-2. [27]



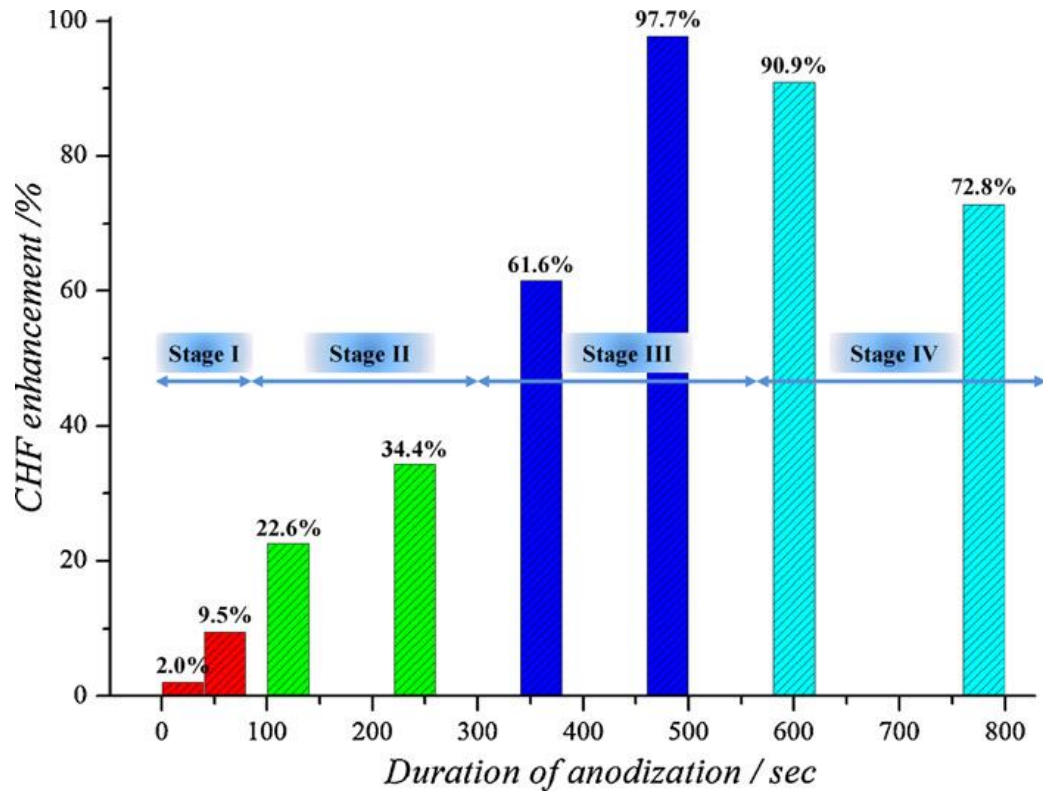
Obr. 2-2 Hybridné riešenie pokrytia pomocou SiC [28]

2.3 Eloxácia pokrytia

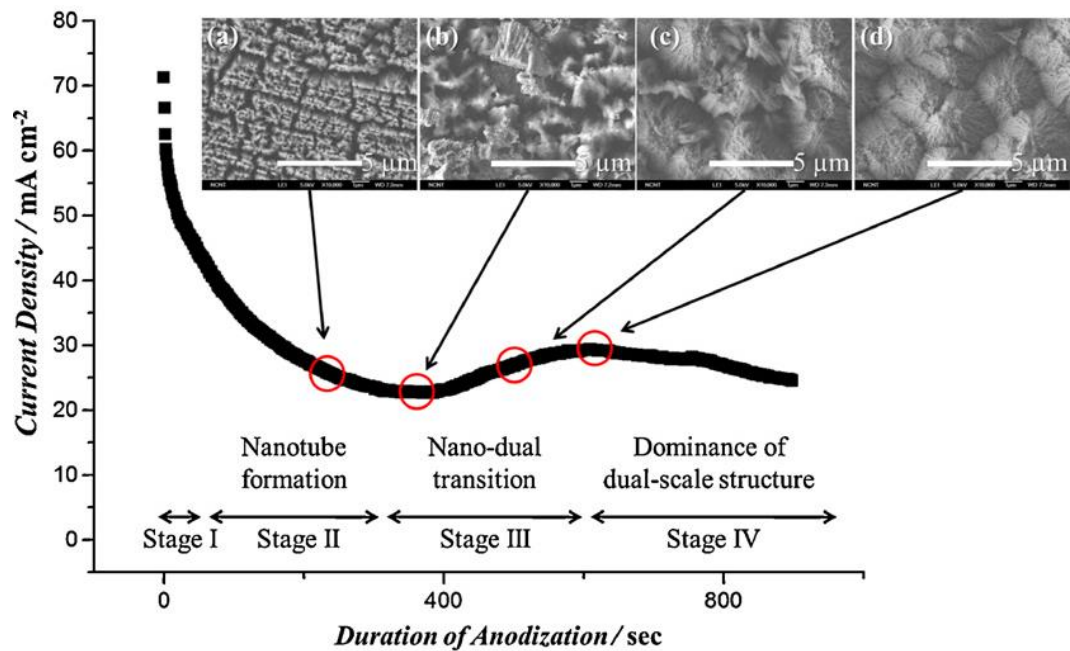
Pretože pokrytie prenáša celý tepelný výkon ktorý sa vyrába v palive, musí byť aj jeho tepelná vodivosť čo najväčšia. Ak dosiahneme viac hydrofilný (zmáčateľný) povrch, jeho tepelný tok sa zvýši, čo môže viesť ku zväčšeniu bezpečnosti. Mnoho mikro a nano techník výroby sa dajú použiť na zlepšenie hydrofilnosti povrchu. Napríklad pôsobením plazmy, fotolitografiou, umiestnením nanočastíc a eloxáciou. Medzi mnohými spôsobmi na zlepšenie hydrofilnosti povrchu má eloxácia mnoho výhod, napríklad že efekt eloxácie je trvalý na rozdiel od použitia plazmy. Tieto výhody sú dôležité pre priemyselné použitie a výrobu vo veľkých množstvách.

Eloxácia vytvára na povrchu nerovnosti a zároveň tiež oxiduje kovovú vrstvu. Obe tieto skutočnosti zlepšujú jeho hydrofilnosť. Pri eloxácií zirkónia sa využívajú ako elektrolyty hlavne kyseliny mliečna, fosforečná a dusíková.

Pri použití kyseliny fluorovodíkovej sa vytvárajú na povrchu nanorúrky, ktoré tiež zlepšujú vlastnosti. Pri eloxácii a za použitia kyseliny fluorovodíkovej rozlišujeme 4 štádiá materiálu. Prvé bez výrazných vizuálnych štruktúr, v druhom stave je možné pozorovať nanorúrky, v treťom sa objavujú súčasne nanorúrky spolu s tzv. dvoj-vrstvou štruktúrou a v poslednom štádiu je už iba dvoj-vrstvová štruktúra. Pri prvom štádiu sa zlepší tepelný tok o 9,5 %, pri druhom štádiu 34,4 %, pri treťom až o 97,7 % a v poslednom o 90,9 %. Jednotlivé štádiá sú medzi sebou rozlíšené iba dĺžkou eloxácie, čo môžeme vidieť na obrázku 2-3. Čím bude eloxácia dlhšie trvať, tým sa budeme v štádiách posúvať od prvého po štvrté. Rozmedzie jednotlivých fázii je v stovkách sekúnd, obr. 2-3, 2-4. Pre priemysel je výhodné, že jednotlivé štádiá sa líšia aj prúdovou hustotou. Vo všetkých štádiách okrem tretieho táto prúdová hustota klesá, čo nám pomáha určiť tú správnu chvíľu, aby mal povrch čo najlepšie vlastnosti. Tento priebeh spoločne so zväčšenými fotkami jednotlivých fáz je znázornený na obrázku 2-3. [4]



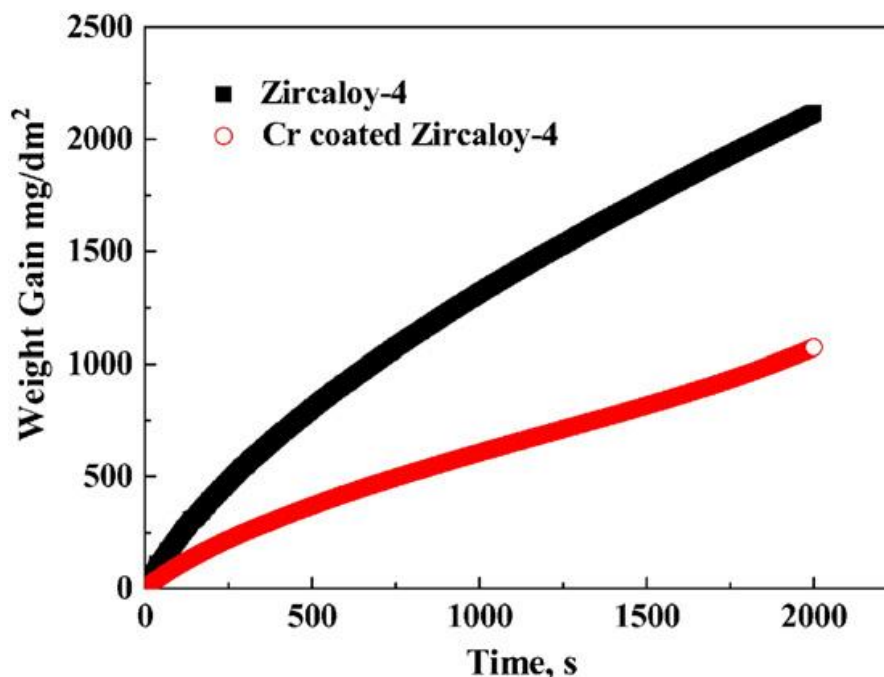
Obr. 2-3 Trvanie eloxácie(duration of anodization) vs zvýšenie CHF(tepelnej vodivosti) [4]



Obr. 2-4 Hodnota prúdovej hustoty (current density) závislá na trvaní eloxácie (duration of anodization) [4]

2.4 Použitie Cr a jeho zliatin

Ďalší vývin v oblasti ATF, hlavne po Fukušimskej havárii, bol tiež v použití tenkého filmu tvoreného chrómom na stávajúce pokrytie. Toto riešenie sa ukázalo ako veľmi účinné. Z výsledkov testov je vidieť, že korózia povrchu s filmom chrómu je menšia ako samotnej zliatiny zirkónia pri skúške v atmosfére pary o teplote 1200 °C na 2000 sekúnd (obr. 2-5).



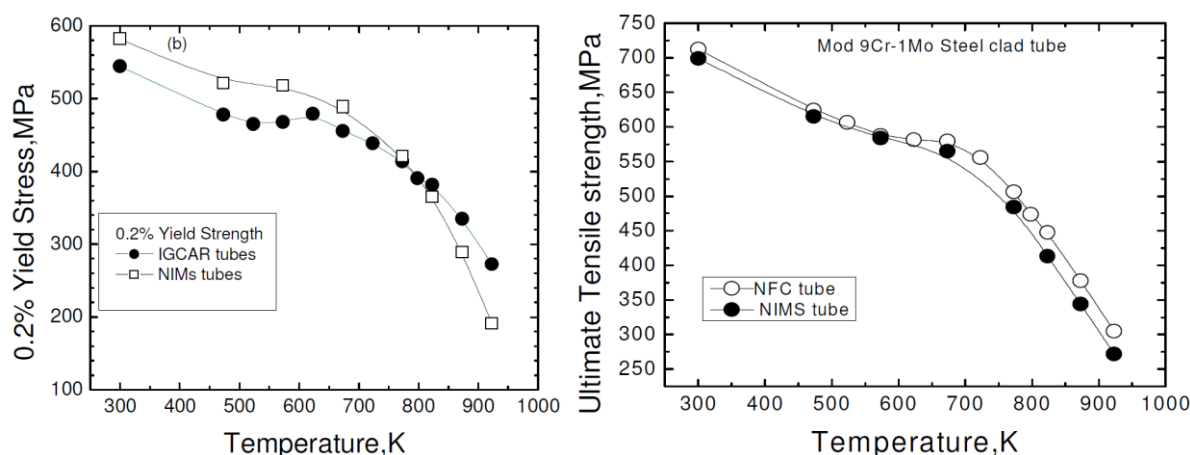
Obr. 2-5 Nárast hmotnosti pri korózii čistej zliatiny zirkónia a chrómom pokrytej zliatiny zirkónia v atmosfére pary o teplote 1200 °C po dobu 2000 s [5]

Pri tomto teste bola použitá metóda oblúkového iónového pokovovania a ukázala sa ako jedna z možností ako chrániť pokrytie pred oxidáciou. Neboli pozorované žiadne trhliny medzi vrstvou chrómu a zirkónia, čo ukazuje jeho dobrú odolnosť voči korózii. Po vysokoteplotnom teste na oxidáciu vznikol prechod medzi vrstvami kde bol premiešaný chróm so zirkóniom. [5]

Ďalšou metódou nanášania vrstvy chrómu je pomocou 3D laserovej metódy s Cr práškom. Toto pokrytie bolo tak isto podrobené skúške v atmosfére pary o teplote 1200 °C. Po skúške sa ukázalo, že touto metódou sa zvýšila odolnosť voči vysokej oxidácii ale tiež sa zvýšila aj pevnosť materiálu. [6]

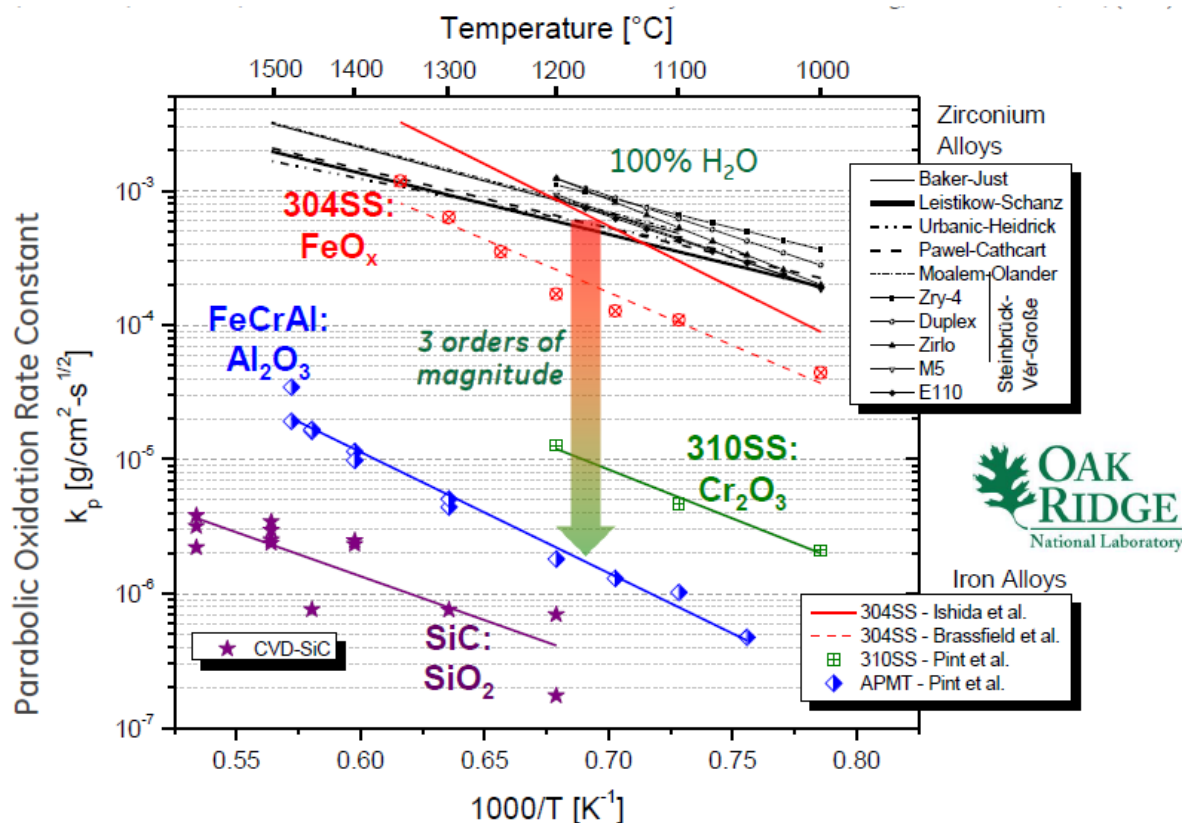
Tiež sa uvažuje o použití spojenia Cr-Mo. Bola testovaná 9Cr-1Mo oceľ. Štúdia bola zameraná hlavne na mechanické vlastnosti tejto ocele. Tento materiál vykazuje zlepšenie na medzi šmyku a medzi pevnosti, kedy pri teplotách 523 – 673 K sa vlastnosti nezhoršujú, ale držia si svoju hodnotu, ako môžeme vidieť v obrázku 2-6. Vzniká tzv. náhorná plošina v týchto dvoch priebehoch. Tento materiál sa uvažuje ako pokrytie kovového paliva pre rýchle množivé reaktory, ale tiež aj ako materiál napríklad do parogenerátora. Je používaný široko v energetike na rôzne typy trubiek u ktorých je požadovaná dlhá životnosť pri teplotách až do 873 K. V rýchlych množivých reaktoroch chladených sodíkom je vyhorenie paliva limitované napúchaním a praskaním obalového materiálu. Preto sa skúmala táto oceľ ktorá má vysokú odolnosť voči napúchaniu. Vlastnosti čistého Mo sú veľmi dobré. Výhodami sú dobré mechanické vlastnosti pri 1000 – 1800 °C, vyrobiteľnosť dlhých a tenkých stien trubky a je aj

dobré zvárateľný. Avšak jeho absorpcia neutrónov je väčšia ako pri Zr a preto je treba vyrobiť steny dostatočne tenké, menej ako 0,25 mm. Nevýhodou tiež je reakcia s vysokoteplotnou parou, čiže bude nutné vyvinúť či už samotné pokrytie alebo bude treba chrániť toto pokrytie. [7,31]



Obr. 2-6 Priebehy medze šmyku a pevnosti v závislosti na teplote, použitie 9Cr-1Mo ocele [7]

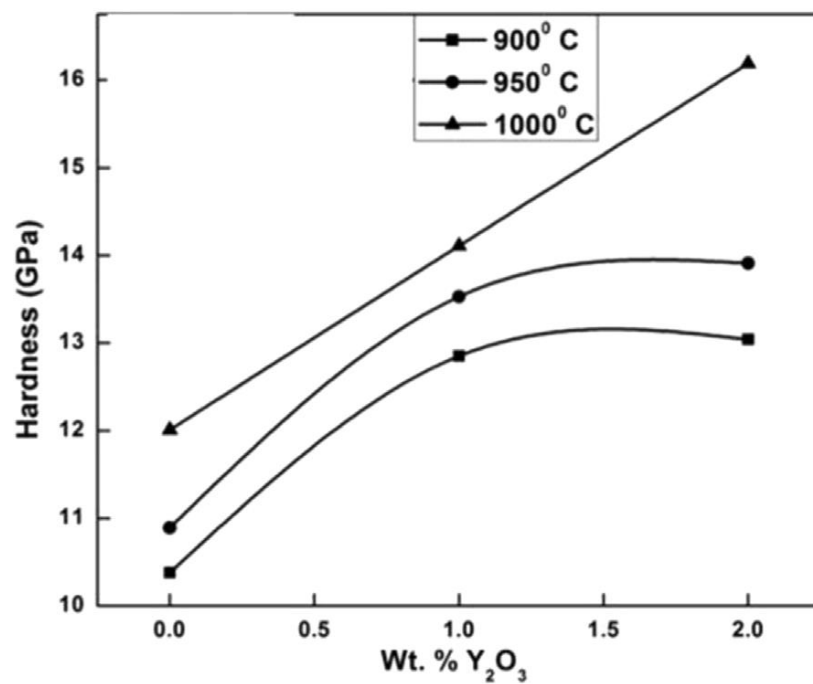
Chróom sa používa v rôznych zliatinách a snahou je vybrať tú najlepšiu, ktorá má najmenšiu generáciu vodíka pri reakcií s vodou. Vedci z OAK RIDGE národných laboratórií sa zameriavajú na FeCrAl zličeniny a tiež Cr_2O_3 . Prehľad vývinu vodíka pri jednotlivých zliatinách a porovnanie s konvenčnými zliatinami zirkónia je na obr. 2-7. Môžeme vidieť že nové zliatiny majú až o 3 rády menší vývin vodíka oproti konvenčným zliatinám zirkónia. Pri zliatine FeCrAl je možné vyrobiť pokrytie o polovicu tenšie ako pri zliatinách zirkónia. To znamená že pri rovnakej medzere medzi pokrytím a palivom sa dosiahne o 43 % menej pokrytia a 18,5 % viacej paliva. Výhodami je výborná tvárnosť a mechanické vlastnosti, pri nižších teplotách výborné a pri vysokých sú tiež veľmi dobré a stále lepšie ako pri zirkóniu. Nevýhodou je vysoká absorpcia neutrónov. Skúmajú sa aj rôzne pomery jednotlivých prvkov v zliatine. [29,30]



Obr. 2-7 Porovnanie vývinu vodíka v závislosti na teplote pre rôzne zliatiny [29]

2.5 Použitie oxidu ytria

Skúma sa aj pridanie Y_2O_3 do zliatin zirkónia. V štúdií [8] boli skúmané zliatiny s rôznym obsahom zlúčeniny Y_2O_3 , a to 0,1 a 2 % (hmotnostných), ktorá bola rozptýlená v zliatine. Jednotlivé prvky a zlúčeniny boli mechanicky zlievané a následne spekané pomocou plazmy (SPS) pri rôznych teplotách (900, 950, 1000°C). Výsledky boli hodnotené pomocou skenovacieho transmisného elektrónového mikroskopu a röntgenovej difrakcie. Pri najvyššej teplote spekania vyšli výsledky najslubnejšie. Zliatina vykazovala najvyššiu tvrdosť ktorá bola 7-8 krát vyššia oproti komerčne dostupným zliatinám zirkónia. Pevnosť v tlaku narástla z 820 MPa na 1200 MPa pri pridaní 2 % Y_2O_3 rozptýleného v zliatine. Výsledky môžeme vidieť zobrazené na obr. 2-8. [8]



Obr. 2-8 Závislosti tvrdosti zliatin zirkónia s obsahom Y_2O_3 a pri rôznych teplotách SPS [8]

3 VYHORIEVAJÚCE ABSORBÁTORY

Vyhorievajúci absorbátor sa využíva v jadrovom reaktore ako dlhodobá regulácia, kedy je potrebné kompenzovať vysokú reaktivitu čerstvého paliva. S trendom zvyšovania obohatenia paliva stúpa aj jeho počiatočná reaktivita ktorú treba kompenzovať. Použitím bóru je možné túto reaktivitu kompenzovať iba do určitej miery, preto sa používajú vyhorievajúce absorbátory. V priebehu vyhorevania sa koncentrácia absorbátora znižuje, tým pádom sa reaktivita paliva zvyšuje až dosiahne svojho maxima a začne klesať. Pre vyhorievajúci absorbátor by bolo vhodné aby mal čo najvyšší účinný prierez, avšak produkty z jeho vyhorenia by mali mať účinný prierez čo najnižší, aby nepridávali zápornú reaktivitu do paliva.

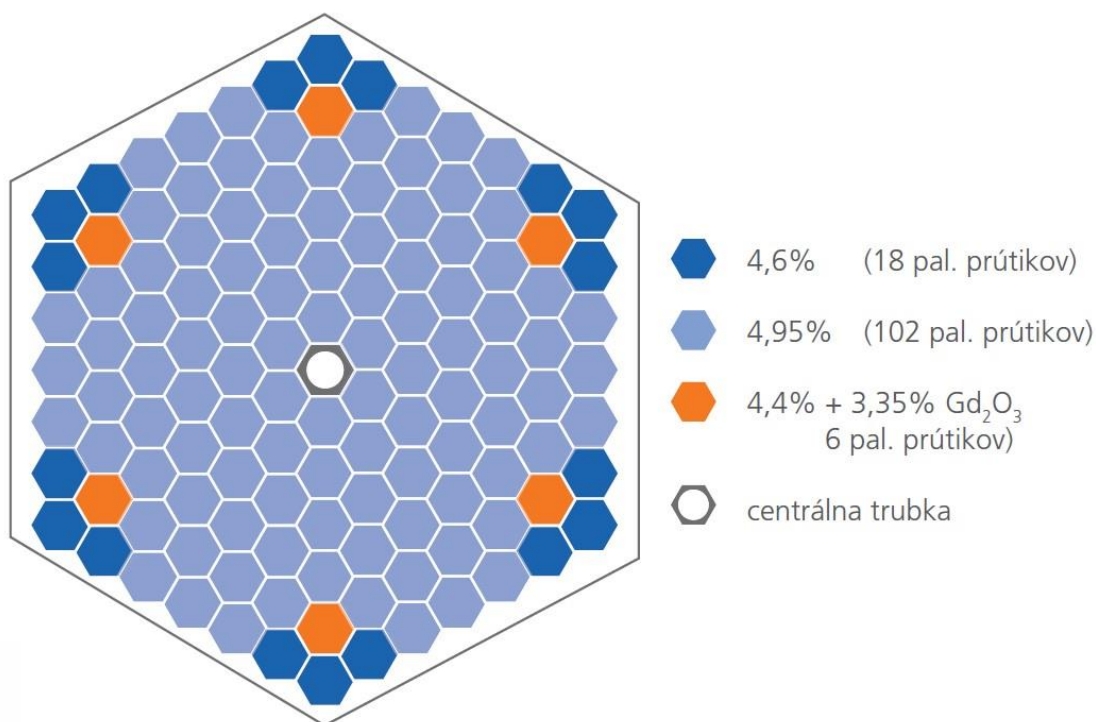
Použitie vyhorievajúceho absorbátora má mnoho výhod. Pomáha zvýšiť tepelný výkon reaktorov a vyhorenie paliva. Jednotlivé bloky môžu predĺžiť svoje palivové kampane a samozrejme zvýšiť tým svoju efektivitu.

Keby sme na reguláciu použili iba kyselinu boritú v chladive nastal by problém v tom, že by sme stratili záporný teplotný koeficient reaktivity chladiva. V prípade zvýšenia teploty chladiva pri typoch reaktorov VVER ktoré sa používajú u nás je chladivom voda, začne sa hustota vody znižovať a tým aj jej schopnosť moderovať neutróny na tepelné. To znamená, že reaktivita klesá. Avšak pri použití iba kyseliny boritej na kompenzovanie počiatočnej reaktivity jej koncentrácia v chladive spoločne s hustotou chladiva klesá čo znamená, že klesá aj schopnosť kompenzácie počiatočnej reaktivity.

V súčasnosti sa používajú ako vyhorievajúce absorbátory v prírodnom izotopickom zložení prvky ako bór, európium, erbium a gadolínium. Určuje sa rozdiel medzi účinným prierezom medzi vyhorievajúcim absorbátorom a jeho prvým produktom. Ak je tento rozdiel vysoký môže to znamenať buď vysokú kompenzáciu počiatočného prebytku reaktivity, alebo tiež veľmi rýchle vyhorevanie absorbátora. Napríklad pri použití európie je rozdiel menší, čo znamená, že vyhoreva pomalšie a preto ovplyvňuje reaktivitu po dlhšiu dobu.

Vyhorievajúce absorbátory sa môžu používať či už v diskkrétnej alebo integrálnej forme. Diskrétna forma je tvorená prútikmi s vyhorievajúcim absorbátorom namiesto palivových, naopak integrálna forma je tvorená VA zmiešaným s palivom alebo tenkou vrstvou nanosenou na povrchu pokrytia prútika. Diskrétna forma sa používala hlavne v minulosti napríklad ako borosilikaté sklo s oceľovým pokrytím, prútiky s bórom v matrici so zirkóniovým pokrytím alebo prútiky s pridaným vnútorným pokrytím kde vznikla vnútorná moderátorová dutina. Integrálna forma sa používa v súčasnosti napríklad aj v našich reaktoroch v podobe oxidu gadolína, ďalej v podobe oxidu erbia, tenkej vrstvy absorbátora na povrchu palivových prútikov tvorenou ZrB_2 , alebo v rýchlych reaktoroch vo forme vrstvy B_4C .

V slovenských a českých reaktoroch typu VVER, sa používajú palivové kazety s vyhorievajúcim absorbátorom v podobe Gd_2O_3 , ktorý je rozmiešaný spolu s palivom UO_2 , v niekoľkých prútikoch kazety. Jeho podiel je volený tak aby sa výkon blížil konštantnej hodnote v priebehu kampane. Rozmiestnenie v palivovej kazete môžete vidieť na obr.3-1.



Obr.3-1 Rozmiestnenie palivových prútikov v kazete spolu s vyhoriavajúcim absorbátorom, VVER 440 EMO [21]

Boli uskutočnené aj štúdie kde ako vyhoriavajúci absorbátor boli použité aktinidy. Venuje sa pozornosť najmä použitiu minoritných aktinidov Np-237 a Am-241 ako prímies do paliva. Tieto minoritné aktinidy zvyšujú podiel Pu-238 a tiež fungujú ako vyhoriavajúci absorbátor.

VA nie je nutné používať iba vo forme prírodného zloženia, ale môžeme tiež obohatiť daný VA. V praxi sa zatiaľ použilo iba obohatenie B-10. Laserovým obohacovaním nikludov gadolína Gd-155 a Gd-157 bolo dosiahnutá až dvojnásobná koncentrácia oproti prírodnej forme, pre Gd-155 na 33 wt% a Gd-157 na 24 wt%. Z dôvodu malej tepelnej vodivosti gadolína a limitov na teplotu paliva sa palivové prútiky s gadolínovým obohacujú na nižšie hodnoty oproti ostatným palivovým prútkom v palivových kazetách. Bolo dokázané že pri koncentrácií do 2 wt% Gd_2O_3 , nie je nutné znižovať obohatenie paliva. Tiež sa ukázalo že tepelná vodivosť je závislá na obsahu gadolína ako VA. Gadolínium má tiež nevýhodu, že sa nedá použiť ako integrálna forma akou je vrstva na povrchu pokrytia. Gadolínium nemôže byť použité z dôvodu jeho vysokej teplotnej korózií, na rozdiel od oxidačne odolnej vrstvy z bóru.

Po tom ako sa vyberie materiál vyhoriavajúceho absorbátora nasleduje tiež veľmi dôležitý design palivového súboru/kazety. Jednou z možností okrem rozmiestnenia jedného typu VA v kazete je aj možnosť použiť kombináciu rôznych typov vyhoriavajúceho absorbátora. [10,11]

4 URÁNOVÉ PALIVO

V dnešných reaktoroch sa najviac požíva ako palivo urán. Najbežnejšia forma je keramická v podobe oxidu uraničitého UO_2 , ktoré sa používa ako palivo pre ľahko vodné reaktory od roku 1955. Používajú sa aj iné formy uránového paliva. Kovový urán a jeho zliatiny sa používajú vo výskumných reaktoroch. Ďalším typom, ktorý sa začína používať v ľahko vodných reaktoroch je palivo MOX, čo je zmes oxidov uránu a plutónia. Vzniká po prepracovaní už použitého paliva. UO_2 a MOX sú vhodné vďaka ich dobrým chemickým a radiačným vlastnostiam a presahujú ich menej silné stránky ako sú malá tepelná vodivosť a nízka hustota uránu. [15]

4.1 Kovové uránové palivo

Kovový urán sa v dnešnej dobe používa najmä ako palivo v rýchlych výskumných množivých reaktoroch. Používa sa aj čistý kovový urán, avšak je snaha vytvárať zliatiny pre lepšie vlastnosti paliva. Rôzne zliatiny ako napríklad U-10Zr dokážu zneškodniť transurány a tým pádom odstrániť dlhodobý vplyv na životné prostredie. Je uvažované zvyšovanie výkonu s ohľadom na bezpečnosť a zvyšovanie vyhorenia paliva a samozrejme s ohľadom na vyhorenie transuránov.

Jedným smerom výskumu je chemická stabilita. Za prvé, je známe, že štiepne produkty lanthanoidov veľmi prudko reagujú s pokrytím. Za druhé, môže reagovať s pokrytím samotné palivo. Aby sa predišlo týmto nežiadúcim vplyvom do paliva sa pridáva paládium a indium kvôli zlepšeniu týchto reakcií paliva s pokrytím. Paládium a indium majú schopnosť na seba viazať štiepne produkty lanthanoidov, čím znižujú ich nepriaznivý vplyv na pokrytie. Pridávaním titánu a molybdénu sa zlepšuje termodynamika, čiže teplota tavenia, čo je dôležité pre vyhorenie transuránov. Plutónium a neptúnium znižujú teplotu tavenia zliatin, čo sa musí brať do úvahy pri určovaní bezpečnostných limitov. [16]

Veľký problém kovového úranu je napúchanie. Tento jav má oveľa väčšiu intenzitu ako pri keramických palivách. Nevýhodami je aj reakcia s vodou a tiež nízky bod tavenia.

V niektorých prípadoch sa používa zliatina uránu a plutónia, ktoré je pokryté zirkóniovou bariérou a následne utesnené v obalovom materiáli T91. Takýto typ palivového prútika má umiestnené výrezy kvôli napáчанию paliva a sú vyplnené héliom. Výhodou je, že zirkóniová bariéra má takmer dokonalý dotyk s obalovým materiálom T91 a ani medzi zirkóniovou bariérou a palivom čo je veľmi výhodné kvôli prenášaniam tepla. Pri zvyšovaní teploty narastá tepelná vodivosť zliatiny uránu a plutónia takmer lineárne a pri teplote 1300 K nabera hodnoty 43 W/mK. V tomto zostavení palivového prútika má najhoršiu tepelnú vodivosť zirkóniová bariéra hneď po héliu, ktorým sú však naplnené iba výrezy. [17][26]

4.2 Nitridické palivá

Ďalším typom paliva je nitridické, ktoré zahŕňa viaceré keramické zlúčeniny uránu a dusíka a tie sú UN, U_2N_3 a UN_2 . Považuje sa za potenciálne palivo pre IV. generáciu reaktorov. Jeho silné vlastnosti sú vysoká hustota, vysoká teplota tavenia a vysoká tepelná vodivosť, ktorá je 4-8 krát vyššia ako pri keramickom UO_2 . Výhoda je aj nízky zachyt neutrónov pre ^{15}N . Pre ^{15}N je efekt presne opačný, čiže má vysoký zachyt neutrónov. Preto je treba obohacovať ^{15}N čo však zvyšuje náklady na výrobu tohto paliva. Problémom sú štiepne plyny, efekt napúchania a chemická reaktivita s materiálom pokrytia. Tiež je tento typ paliva citlivý na kontakt s vodou a

parou. Pri zvýšenej tepelnej vodivosti teplotný gradient medzi vonkajšou a vnútornou časťou paliva je menší, čo vplýva na palivo tak, že naň pôsobí menšie namáhanie a dovoľuje prevádzku na vyšších teplotách.

Ak je palivo uzavreté pod pokrytím nie je problém, ale ak nastane že sa pokrytie poruší a palivo sa dostane do kontaktu s vodou s vysokou teplotou a pod vysokým tlakom paletky začnú rýchlo erodovať. Ak paletky z-erodujú príliš rýchlo, veľké množstvo rádioaktívneho odpadu sa dostane do primárneho okruhu. Tento nežiadúci efekt môže odstaviť reaktor na oveľa väčší čas oproti tomu, ak by bol použitý iný typ paliva a došlo k netesnosti na palivovou prútiku. Preto treba do paliva pridať aditíva pre zlepšenie odolnosti voči korózii, aby bolo schopné zvládnuť takúto situáciu. Pridať aditíva je možné tromi spôsobmi: pokrytie s vrstvou odolnou voči oxidácii, heterogénne rozptýlenie štiepných produktov a homogénne rozptýlenie štiepných produktov. [24,25,26]

4.3 Palivo MOX

MOX je skratka pre mixed oxide, čo v preklade znamená zmes oxidov, ktoré sa používajú ako jadrové palivo. Tvoria ho oxidy uránu a plutónia (UO_2 , PuO_2). Prvýkrát sa použilo v reaktore v roku 1963, ale nepoužívalo sa komerčne až do 80-tych rokov. V dnešnej dobe spaľuje palivo MOX cez 30 reaktorov, hoci ich je licencovaných okolo 40 a v Japonsku je to okolo 10 v prevádzke. Pri prevádzke s použitím MOX paliva sa palivo zaväzuje štandardne v 30 %, avšak je snaha zvýšiť tento podiel na 50 % z celkového počtu palivových súborov. Do 50% podielu nie je nutné robiť veľké zmeny v dizajne reaktora, nie sú žiadne zmeny v chovaní reaktora, stačí pridať viac kontrolných tyčí. Pri podiele nad 50 % by už museli byť spravené značné zmeny na reaktore.

Toto palivo obsahuje asi 0,2 % ochudobneného uránu ^{235}U ktorý vzniká pri obohacovaní paliva a plutónia, ktoré je vyseparované z už použitého paliva. MOX sa obohacuje na úroveň okolo 7-10 % plutónia, čo približne odpovedá štandardnému obohateniu uránového paliva okolo 4,5 %. ^{241}Pu má štiepne vlastnosti podobné ako ^{235}U s podobnou uvoľnenou energiou pri štiepení. Ak sa palivo nechá dlhšie vyhorieť obsahuje dané palivo menej ^{241}Pu . Pri výrobe sa postupuje obdobne ako pri štandardnom uránovom palive s tým rozdielom, že je treba chrániť pracovníkov pred spontánnou emisiou neutrónov z ^{240}Pu . Tiež je vhodné palivo prepracovávať čo najskôr, aby sa vyhlo problémom s krátko žijúcimi izotopmi. Výhodou je ľahké zvýšenie obohatenia MOX paliva oproti uránovému. Stačí pridať väčší podiel plutónia, pričom zvýšenie obohatenia uránu je značne drahšie.

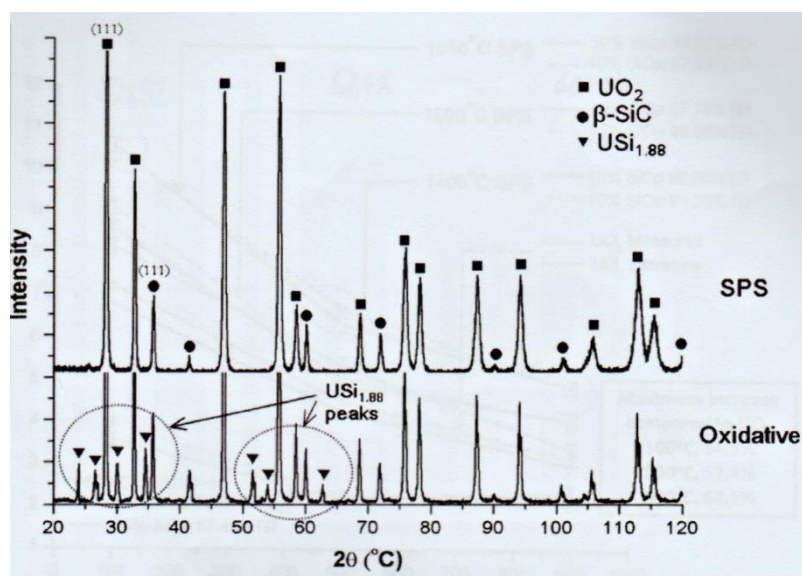
Ak sa použije palivo MOX zvýši sa výnosnosť z pôvodného paliva o 12 %, ak bolo už uránové palivo recyklované dosiahne sa zlepšenie až o 22 %. Ďalšou výhodou je, že sa používa v tomto palive plutónium z vyradených jadrových zbraní. MOX palivo zatiaľ nie je dostatočne ekonomicky výhodné, ale stane sa výhodnejším keď ceny uránu porastú, alebo keď bude potrebné znižovať narastajúci objem použitého paliva. Približne zo siedmich palivových súborov obsahujúcich štandardné palivo sa dá získať jeden súbor MOX paliva.

Komerčná výroba paliva MOX je zvládnutá na území Európy vo Francúzsku a Anglicku. Tiež je táto metóda zvládnutá v Rusku, Indii a Japonsku. [22,23]

4.4 Keramické palivo s pridaním karbidu kremíka

Napriek tomu že je mnoho druhov jadrového paliva, ako som už vyššie uviedol napríklad kovové, nitridické, MOX atď., v dnešných komerčných reaktoroch sa na celom svete najviac využíva keramické palivo v podobe oxidu uraničitého UO_2 . Toto palivo je oveľa viac preštudované ako ostatné typy. Má vysokú teplotu tavenia a je tiež odolný voči korózii. Nedostatkom tohto typu je jeho malá tepelná vodivosť, okolo $7,7 \text{ W/mK}$ pri teplote 300 K . Preto sa snažíme zvýšiť ju a tým pádom by sa mohol zvýšiť výkon reaktora a tiež samozrejme jeho bezpečnosť, či už počas bežnej prevádzky alebo počas krátkych nehôd. Takto vylepšené palivo sa tiež nazýva ECO palivo, čo znamená enhanced conductivity, v preklade palivo so zvýšenou tepelnou vodivosťou. Tým že zvýšime tepelnú vodivosť paliva uprostred paletky klesne teplota a tým pádom aj gradient teploty, čo bude mať za následok zmenšenie tvorby štiepných plynov a zmenšenie množstva prasklín paletiek kvôli tepelnému namáhaniu.

Ako zvýšiť tepelnú vodivosť keramického paliva pridaním materiálu s vysokou teplotnou vodivosťou už preštudovali mnohí a vyplynulo, že najvhodnejším kandidátom je SiC . Je to vďaka jeho neutrónovému prierezu, vysokej tepelnej vodivosti, vysokej teplote tavenia okolo 2970°C a vďaka chemickej stabilite čo znamená jeho veľkú odolnosť voči oxidácií. Jeho výhodou oproti iným alternatívam, ako je napríklad BeO , je to, že je netoxický. Bola však zistená chemická reakcia medzi UO_2 a SiC pri spekaní paletiek v okolí teplôt 1370°C , čo môže znížiť tepelnú vodivosť. Zistilo sa, že ak sa použije spekanie pomocou oxidácie ktoré trvá niekoľko hodín, vznikajú rôzne chemické zlúčeniny ako napríklad $\text{USi}_{1,88}$, ktoré môžeme vidieť na spektre na obr. 4-1. Tieto zlúčeniny neskôr ovplyvňujú tepelnú vodivosť materiálu. Pri použití SPS metódy ktorá trvá 5 minút nepozorovať žiadne nežiadúce zlúčeniny. Z toho vyplýva, že pri dlhšom spekaní pomocou oxidácie nám vznikajú nežiadúce zlúčeniny.

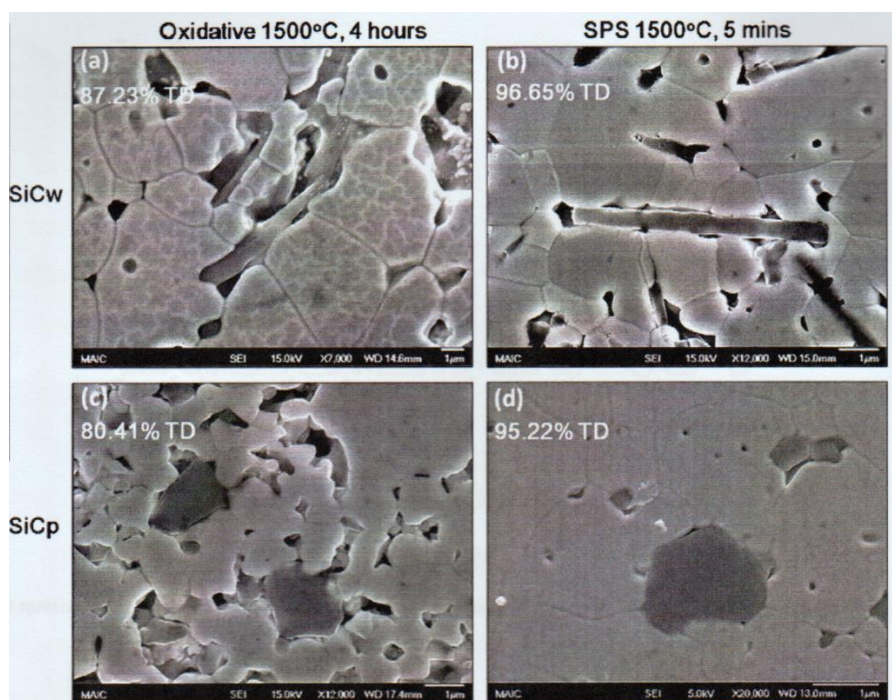


Obr. 4-1 XRD spektrum UO_2 - SiC paletiek spekaných pomocou SPS a oxidácie [18]

Ďalšou skúmanou oblasťou bolo použitie SiC prášku alebo vlákien a tiež veľkosť zŕn UO_2 . Pri použití mnohonásobne kratšej doby spekania pomocou SPS, vznikajú aj menšie zrná UO_2 , pretože nestíhajú narásť do takej veľkosti. Objavuje sa až 53,3% rozdiel vo veľkosti zŕn oproti

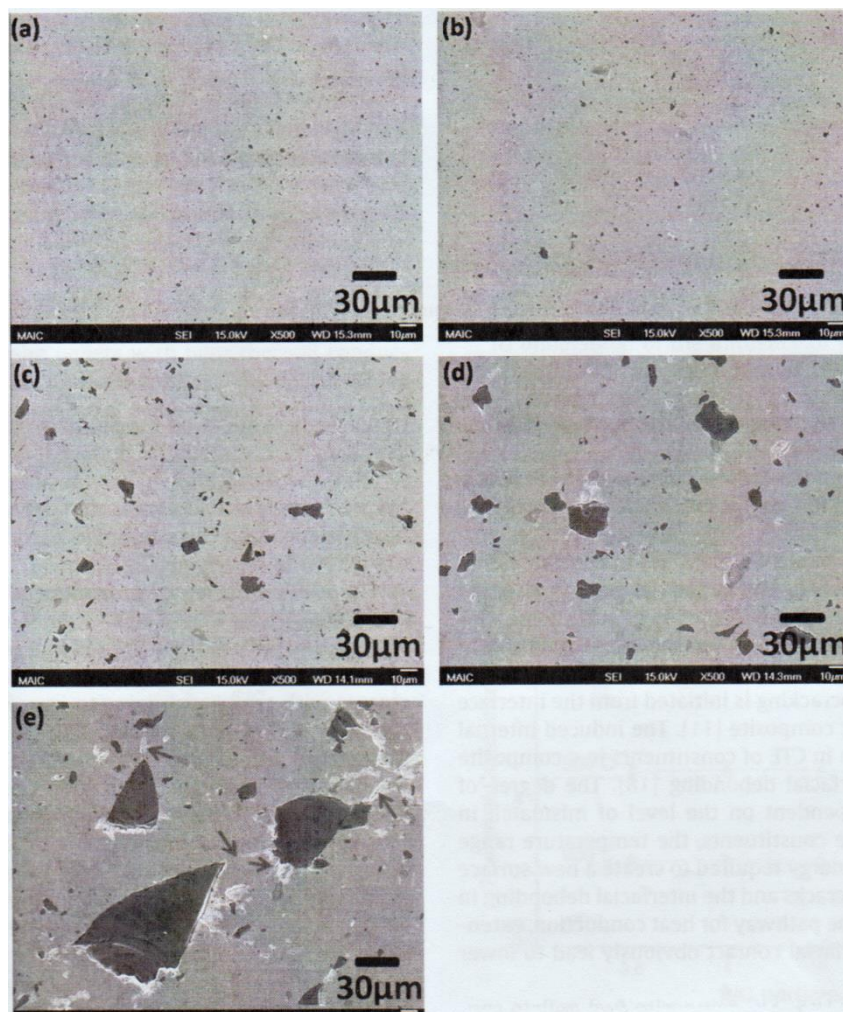
spekaniu pomocou oxidácie. Pridávanie SiC tiež znižuje veľkosť zŕn, avšak použitie vlákien nemá na to až taký veľký dopad ako použitie prášku. Avšak vo výsledku nebol pozorovaný žiadny významný rozdiel v tepelnej vodivosti pri použití či už SiC vlákien alebo prášku.

Pri spekaní pomocou SPS sa získava palivo s vyššou hustotou, lepším medzifázovým kontaktom a redukuje sa chemická reakcia medzi UO_2 a SiC v porovnaní s konvenčnými spôsobmi spekania, čo môžeme vidieť na obr. 4-2. Táto metóda sa javí v dnešnej dobe ako najvhodnejšia.

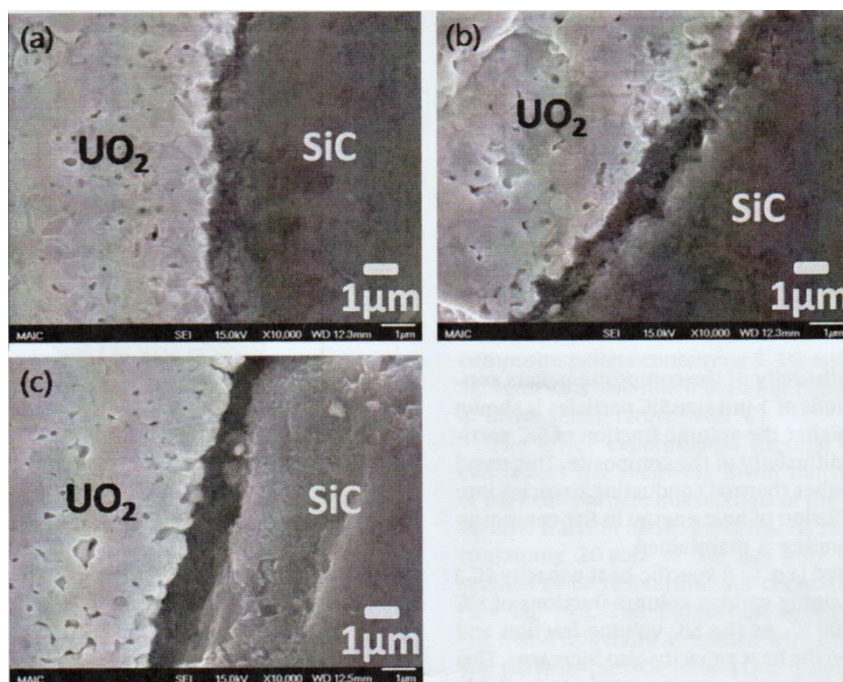


Obr. 4-2 Použitie SiCw(vlákná) a SiCp(prášok) spekaní pomocou oxidácie a SPS [18]

Zlepšenie tepelnej vodivosti pridaním SiC tiež závisí na rozmeroch jednotlivých zŕn SiC. Jednotlivé príklady sú znázornené na obr. 4-3. Bolo pozorované, že ak sa použije zrno s veľkosťou nad 16,9 µm dochádza ku zníženiu tepelnej vodivosti oproti čistému UO_2 . Je to spôsobené tým, že pri tejto veľkosti vznikajú trhliny medzi jednotlivými zrnami SiC, čo vidieť na obr. 4-3 v časti e). A tiež mechanické spojenie medzi SiC a UO_2 je nehomogénne, s veľkými medzerami. Tieto spojenia môžeme vidieť na obr. 4-4. Toto majú za následok rôzne teplotné rozťažnosti jednotlivých častí a čím sú zrná väčšie je aj väčší rozdiel veľkostí pri teplotnom namáhaní a tým sú prechody namáhané.

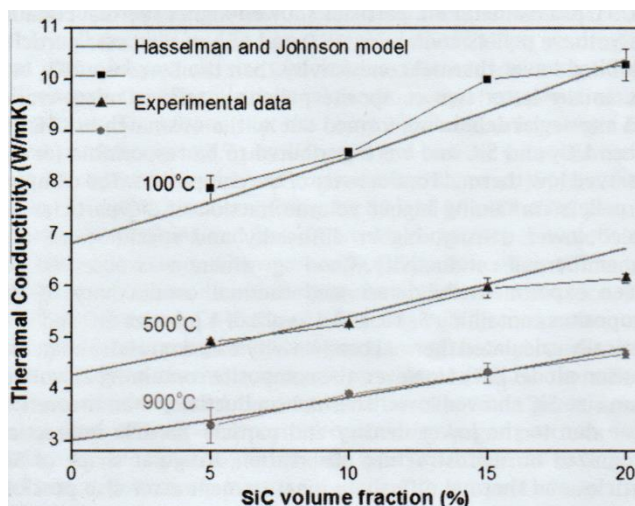


Obr. 4-3 Rôzne veľkosti SiC (tmavá farba) v UO_2 (bledá farba), (a) $0,6 \mu\text{m}$, (b) $1 \mu\text{m}$, (c) $9 \mu\text{m}$, (d) $16,9 \mu\text{m}$, (e) $55 \mu\text{m}$ [19]



Obr. 4-4 Spojenie UO_2 so zrnami SiC re zrná veľkosti (a) $9 \mu\text{m}$, (b) $16,9 \mu\text{m}$, (c) $55 \mu\text{m}$ [19]

Tiež bolo skúmané ako bude vplývať objemový podiel na tepelnú vodivosť. Pri veľkosti zŕn 1 μm sa postupne skúmala tepelná vodivosť pri objemových podieloch SiC 5, 10, 15 a 20 %. Zvýšenie vodivosti pri jednotlivých objemových podieloch bolo v percentách 14,23; 26,44; 43,22 a 49,84 %. Tieto hodnoty v závislosti na teplotách je vidieť na obr. 4-5. Problém však je vytvoriť vyššie objemové podiely, pretože proces zmiešania a následného spekania pomocou SPS pri daných podmienkach je možné iba do 15 %. Ak by sa pozmenili podmienky ako napríklad dlhší čas premiešavania a pri spekaní vyššia teplota, tlak alebo dlhšia doba pôsobenia, možno by sa dali vytvárať $\text{UO}_2\text{-SiC}$ paletky s vyšším objemovým podielom ako je 15 % a s dostatočnou hustotou. [18,19]



Obr. 4-5 Závislosť tepelnej vodivosti na podielovom objeme SiC v porovnaní s výpočtovým modelom Hasselmana a Johnsona [19]

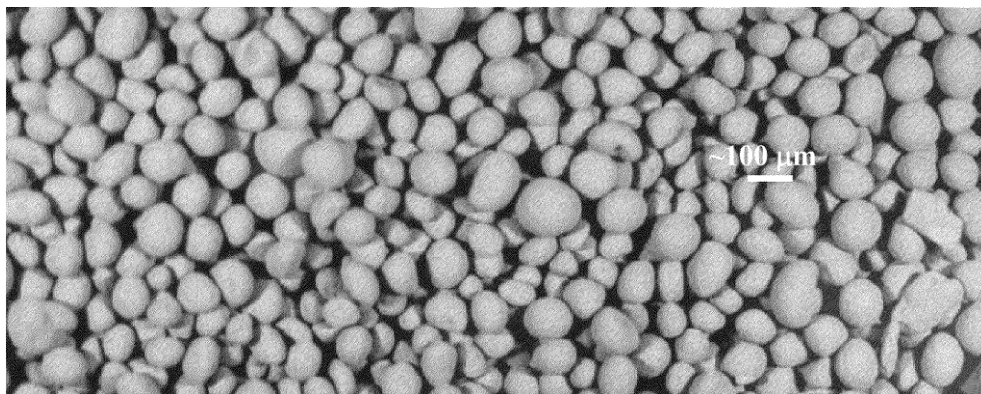
4.5 Keramické palivo s pridaním oxidu berília

Ďalším kandidátom po SiC je zlúčenina oxidu berylnatého BeO. Táto zlúčenina vykazuje tiež veľmi vysokú tepelnú vodivosť, avšak jej nevýhodou je, že je toxický. Preto pri výrobe je treba dbať na zvýšené bezpečnostné požiadavky.

Pri vytváraní paliva $\text{UO}_2\text{-BeO}$ sú známe dve techniky, prvá je tzv. slug bisque (SB) a druhá green granule (GG), v preklade zelené granule. Rozdiel v týchto metódach je iba v predpríprave prášku UO_2 . Pri SB sa granule UO_2 umiestnia do guľového mlyna, pridá sa BeO v 10% objemovom podiele a približne 30 minút sa spoločne melú. Pri tomto procese sa granule UO_2 obalia práškom BeO a následne sú stláčané do paletiek pri tlaku približne 240 MPa a spekané pri teplote 1700 °C po dobu 10 hodín v atmosfére prúdiaceho argónu s 5 % H_2 . Pri metóde GG sú najskôr samotné granule UO_2 mleté po dobu 8 hodín v bubne a až po tejto dobe sa pridá prášok BeO. Týmto spôsobom granule dosiahnu takmer dokonalý guľatý tvar ako môžeme vidieť na obr. 4-6. V konečnom dôsledku má tento rozdiel vplyv na prechody medzi BeO a UO_2 , kde metóda GG má lepšie výsledky v tepelnej vodivosti pretože granule UO_2 sú o polovicu menšie a hustota je 98 % kde pri SB je hustota 96,3 %. Z toho vyplýva, že metóda GG má lepšie výsledky v tepelnej vodivosti ako SB, avšak oboje majú lepšie výsledky ako samostatné UO_2 .

Výsledky v modelovaní pre použitie v tlakovodných reaktoroch ukázali pozoruhodný pokles teploty v centre palivovej paletky pri použití oboch metód výroby paletiek, pri GG väčší pokles čo je samozrejme spôsobené väčšou tepelnou vodivosťou. Tepelná vodivosť oboch typov paletiek

klesá so vzrastajúcou teplotou. Pri teplotách do 1600 K je znateľný rozdiel medzi vodivosťami avšak od tejto teploty sú vodivosti takmer rovnaké. [20]



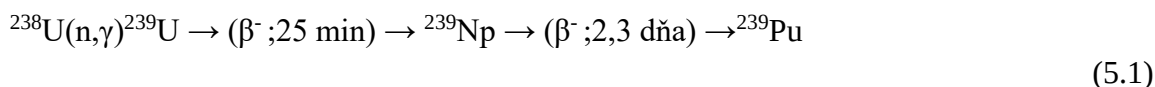
Obr. 4-6 Granule UO_2 po mletí a pokrytí práškom BeO [20]

5 TRANSMUTAČNÉ PALIVOVÉ CYKLY

Jedným z inovatívnych prístupov v oblasti jadrového paliva sú určite aj transmutačné cykly, ktoré nám napomáhajú k lepšiemu využitiu jadrového paliva, preto boli zaradené ako samostatná kapitola do tejto práce. V týchto cykloch ide o to aby sa pomocou jadrových reakcií a neutrónov premenili jadrá, či už ^{238}U alebo ^{232}Th na prvky, ktoré sú schopné reťazovej jadrovej reakcie. Týmito prvkami sú ^{239}Pu alebo ^{233}U . Tieto palivové cykly sa využívajú v tzv. množivých reaktoroch.

5.1 Urán-plutóniový palivový cyklus

Základná rovnica premeny ktorou sa riadi urán-plutóniový cyklus je:

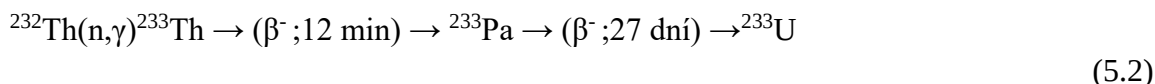


Kde ^{238}U sa transmutuje na plutónium ^{239}Pu , ktoré je tiež štiepiteľné rovnako ako ^{235}U pomalými neutrónmi a dochádza ku reťazovej reakcii, dokonca pri podstatne nižšom kritickom množstve, pretože má vyššiu pravdepodobnosť štiepenia a vyprodukuje viac neutrónov pri reakcii. Z toho vyplýva, že sa môže spotrebovávať v reaktore rovnako ako urán. Využíva sa to v tzv. rýchlych reaktoroch kde neutróny nie sú moderované (spomaľované). Kvôli tomu, že sa používajú rýchle neutróny na ktoré majú aj urán aj thórium malé účinné prierezy, musí byť palivo viacej obohatené, až na hodnoty cca 20-50 %. Vyššie obohatenie vedie k vyšším výkonom koncentrovaným na menší objem, preto musí mať rýchly reaktor chladiivo ktoré dokáže dostatočne odvádzať teplo a pracovať pri vyšších teplotách okolo 500 °C. Voda sa nemôže použiť či už kvôli vysokým teplotám ale aj kvôli schopnosti moderovať neutróny, čo je v tomto prípade nežiadúce. V tomto type reaktorov sa používa napr. roztavený kovový sodík, ktorý má veľmi dobrú tepelnú vodivosť a bod varu je až na hranici 900 °C.

Pri rozštiepení jadra ^{239}Pu rýchlym neutrónom vzniká pri reakcii priemerne 3,02 neutrónu. Z tejto reakcie sa približne dva neutróny opäť spotrebujú na štiepenie ďalšieho plutónia, zbytok sa zachytáva na ^{238}U z ktorého tiež vzniká ^{239}Pu . Aby sa využilo tejto vymoženosti obkladajú sa aktívne zóny rýchlych reaktorov ^{238}U . Tento typ reaktora sa nazýva rýchly množivý reaktor pretože vzniká viac plutónia ako bolo do neho zavezené. Tento cyklus sa vyznačuje tým, že by sa dalo využiť až 90 % ^{238}U , čo by bolo pre energetiku veľkým prínosom. [12,13]

5.2 Thórium-uránový palivový cyklus

Ďalší a podobný je thórium-uránový palivový cyklus, ktorého hlavnou rovnicou je:



kde sa využíva thórium ^{232}Th , ktoré by sa zachytnom malo meniť na ^{233}Th a následným β -rozpadom transmutovalo na urán ^{233}U . Tento izotop uránu je rovnako dobre štiepiteľný ako ^{235}U alebo ^{239}Pu , čiže je schopný reťazovej reakcie. V tomto prípade ide tiež o palivo do množivého reaktora pretože neutróny, ktoré sa nespotrebojú na rozštiepenie ^{233}U sa podieľajú na premene ^{232}Th na ^{233}U . Zásadný rozdiel je, že môže tento proces prebiehať rovnako za prítomnosti rýchlych ale aj pomalých neutrónov. Je tu však problém a tým je medziprodukt protaktínium.

Jeho polčas premeny trvá 27 dní, v priebehu ktorých vo vysokom neutrónovom toku môže dôjsť k ďalšiemu zachytu a premene na nevyužitelný urán ^{234}U . Riešením tohto problému by bolo protaktínium priebežne z reaktora odoberať a nechať ho premeniť mimo reaktora na ^{233}U , ktorý je ďalej použiteľný. Zatiaľ sa ako jediné prevedenie reaktoru s takouto možnosťou ukazuje v reaktore s rozpusteným palivom v roztavených soliach.

Tak ako sme hovorili, že pri urán-plutóniovom cykle by sa dalo využiť oveľa väčšie množstvo uránu oproti súčasnému cyklu, pri thórium-uránovom cykle by sa dalo využívať thórium ktorého je v prírode asi 4-krát väčšie množstvo ako uránu. Ďalšou neodlúčiteľnou výhodou tohto cyklu je, že vznikajú odpady s nižšou mernou aktivitou, hlavne v oblasti ťažkých dlhodobých rádionuklidov. [12,14]

6 VÝPOČTOVÉ PROGRAMY

Pre výpočty v oblasti jadrového paliva sa používajú rôzne výpočtové programy ako napríklad FRAPCON, TRANSURANUS, ENIGMA alebo FEMAXI. Dnešný trend je predlžovať čas ktorý je palivo zavezené v reaktore a tým zvyšovať jeho využitie. Chovanie takéhoto vysoko-vyhoretého paliva nás zaujíma pri tvorbe palivových súborov a ich spoľahlivosti. Preto sú vytvárané výpočtové programy ktoré presne analyzujú chovanie paliva pri vysokých hodnotách vyhorenia aby sa zabezpečila ich spoľahlivosť a bezpečnosť. Bolo preto nutné aby sa zaviedli do výpočtov nové modely a analýzy, pretože chovanie pri vysokých vyhoreniach okolo 50 GWd/t sa veľmi líši od bežných menej vyhorených palivových súborov. Hlavné rozdiely sú v zmene tepelnej vodivosti počas života, vnútornej štruktúry a materiálových zmenách na obode paliva. Tieto zmeny môžu veľmi ovplyvniť celkové chovanie palivového súboru.

6.1 FEMAXI

Pre naše výpočty bol použitý program FEMAXI-6. Predošlé verzie programu FEMAXI-IV a V boli predovšetkým zamerané na stredné vyhorenie. Verzia ktorú sme používali FEMAXI-6 bola vytvorená na skúmanie vysokého vyhorenia palivových súbor pri prevádzkových podmienkach, nie však pri podmienkach havarijných ako napríklad LOCA. Stavala na základoch predošlých verzií s tým že pribudli vylepšenia a rozšírenia.

FEMAXI-6 ponúka kompletnú tepelnú a mechanickú analýzu, tiež predpoveď vývoja medzery medzi palivom a pokrytím. Medzi ďalšie nové modely patria aj produkcia štiepných plynov a tiež detailnejšie analýzy v oblasti vyhorenia. Bolo pridaných mnoho nových materiálových vlastností. Vďaka týmto vylepšeniam by mal byť program schopný počítat okrem ustálených stavov aj očakávané prechodné stavy.

Program FEMAXI má mnoho verzií a je vytváraný agentúrou JAEA. Program vytvára analýzy iba pre jeden palivový súbor počas ustálenej prevádzky alebo očakávaných prechodných stavoch. Pri vytváraní kódu FEMAXI-6 boli poznatky prebraté z predošlých verzií, štruktúra bola revidovaná a boli začlenené nové funkcie. Hlavné oblasti analýzy verzie FEMAXI-6 sú rozdelené do dvoch častí. Prvá je tepelné procesy ktoré určujú rozloženie teploty a procesy súvisiace s mechanickými zmenami. Podrobný popis čo do jednotlivých častí patrí nájdete v tab. 7-1. [32]

Tab. 6-1 Hlavné oblasti analýzy programu FEMAXI-6 [32]

	Tepelné procesy	Mechanické procesy
Paletka	Tepelná vodivosť Rozdelenie tepelného toku Produkcia štiepných plynov	Tepelné rozpínanie Elasticita, plasticita, tečenie, praskanie, premiestňovanie, napúchanie, zahusťovanie
Pokrytie	Tepelná vodivosť Korózia	Tepelné rozpínanie, elasticita, plasticita, tečenie, radiačný rast
Prútik	Tepelná vodivosť medzery (plyny, dotyk, radiácia) Prenos tepla povrchom Pohyb plynov v medzere	Mechanická interakcia medzi paletkou a pokrytím, trenie, spojovanie

6.2 Štruktúra FEMAXI-6

Ako už bolo spomenuté, kód FEMAXI-6 pozostáva z dvoch hlavných častí: teplotná analýza a mechanická analýza. Jej jednotlivé časti sú spomenuté v tab. 7-1. Štruktúra kódu je znázornená na obr. 6-1.

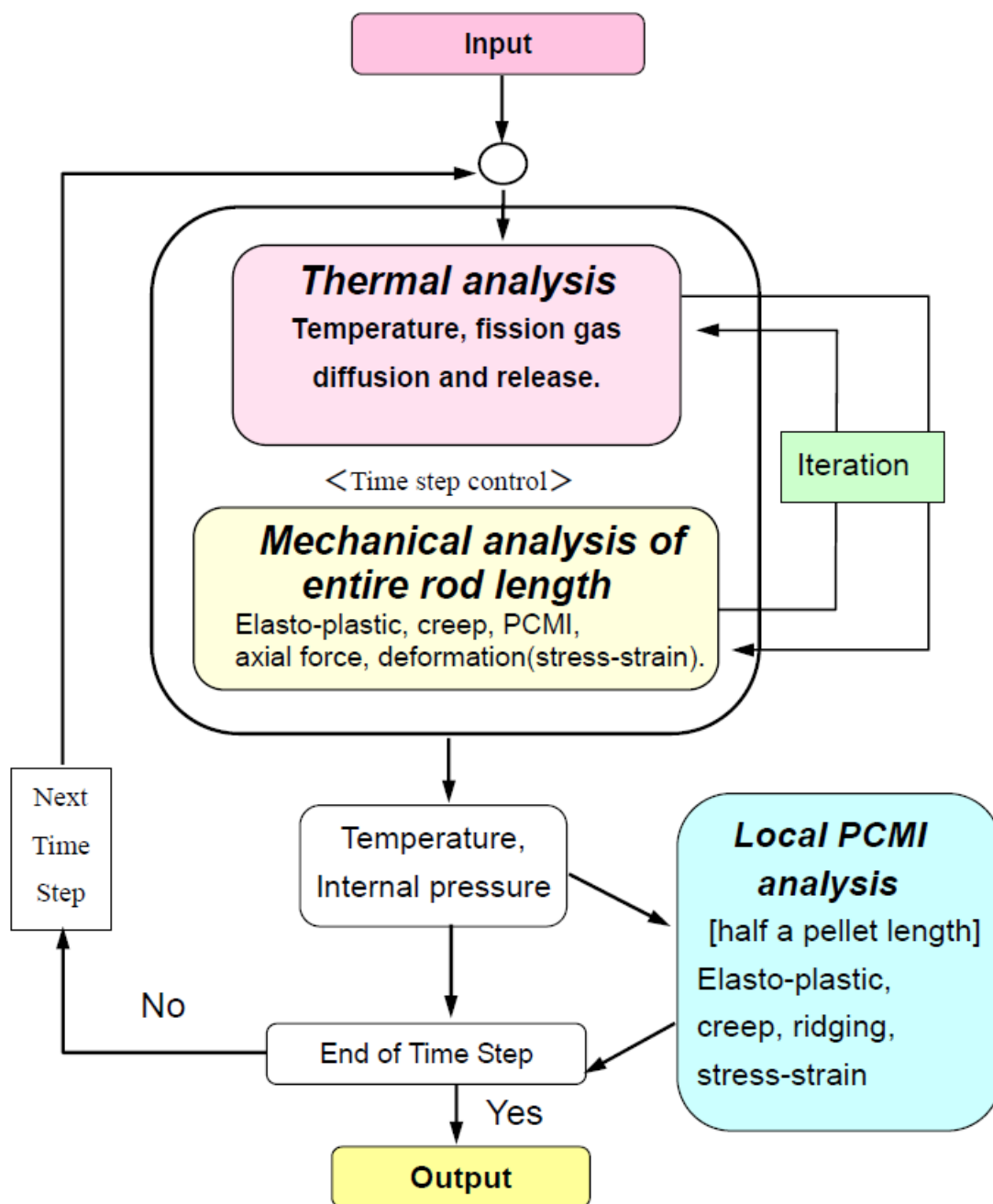
V tepelnej analýze prebieha výpočet pozdĺž celého palivového prútika, ktorý môže byť rozdelený maximálne na 40 axiálnych častí. Rozdelenie teplôt sa počíta ako jednorozmerný osovo súmerný problém v radiálnom smere a pomocou týchto teplôt sa ďalej počíta tvorba štiepných plynov, tok týchto štiepných plynov a ich vplyv na tepelnú vodivosť medzery medzi palivom a pokrytím. Tiež sa berie do úvahy vzájomné ovplyvňovanie axiálnych častí medzi sebou, pokiaľ nie sú krajné.

Pri mechanických analýzach si používateľ môže vybrať či bude uvažovaná celá dĺžka prútika alebo len jedna palivová paletka. Pri výpočtoch je používaná metóda FEM (finite element method), čiže metóda konečných prvkov. Počíta sa iba polovica paletky kvôli tomu že je symetrická.

Pri mechanických analýzach sa ako prvé vypočítajú hodnoty tepelnej roztlačnosti, zhusťovania a premiestňovania ktoré spôsobujú namáhanie paletky, s využitím týchto hodnôt sa ďalej počítajú hodnoty praskania, elasticity/plasticity a tečenia paletky. Potom sa ďalej výpočet posúva na vyjadrenie hodnôt namáhania kontaktu medzi paletkou a pokrytím. Ak sa zmení kontakt medzi paletkou a pokrytím výpočty prebehnú znova s novými hodnotami okrajových podmienok.

Pri analýze po celej dĺžke palivového prútika sa berú do úvahy aj axiálne sily ktoré pôsobia na jednotlivé príľahlé segmenty. Tiež je vyhodnocovaná aj celková deformácia palivového prútika pozdĺž jej celkovej výšky. Pomocou metódy konečných prvkov však môžeme obmedziť celkový počet stupňov voľnosti.

Tepelná časť analýzy po celej dĺžke palivového prútika je previazaná s mechanickými analýzami. Toto previazanie teplôt a deformácií je dosiahnuté iteráciou v každom kroku. Toto je najvýznamnejšia zmena v štruktúre programu FEMAXI-6 oproti jeho predchodcovi FEMAXI-V, v ktorom bola mechanická analýza zjednodušená a nebola dostatočne previazaná s časťou teplotnej analýzy. [32]



Obr. 6-1 Štruktúra kódu FEMAXI-6 [32]

6.3 Výpočet vo FEMAXI-6

Výpočtový program FEMAXI-6 je písaný v staršom type programovacieho jazyku fortran. Pri tomto jazyku si treba dávať pozor na každú zadanú medzeru alebo tabulátor, pretože jazyk pracuje s každým jednotlivým znakom.

Ako vstup sa využíva vstupný súbor s názvom ABC.d05 ktorý je možné upravovať napríklad pomocou poznámkového bloku. Tento vstupný súbor sa dá pomyslene rozdeliť do 4 častí. V prvých troch častiach sa pomocou priradovania hodnoty daným premenným určujú parametre výpočtu. V poslednej časti sú to hlavne už presné hodnoty.

V prvej časti sa napríklad určujú jednotlivé jednotky v ktorých sa budú hodnoty či už zadávať alebo budú vo výstupoch, ako sú jednotka vyhorenia (zadané MWd/tU) alebo jednotky času (zadané dni). Tiež sa tu zadávajú niektoré počiatočné hodnoty napríklad veľkosť zrn, pokojová teplota alebo tiež sa zadáva časový limit pri ktorom presiahnutí sa výpočet automaticky zastaví. V druhej časti sa hlavne vyberajú rôzne rovnice so širokej škály pre výpočty alebo rôzne matematické modely. Ide napríklad o modely výpočtu tepelnej vodivosti ktoré nás najviac zaujímajú, ďalej modely pre napúchanie alebo pre oxidáciu pokrytia. V tretej časti sú predovšetkým zadávané výstupy. Jednotlivé výstupy sú rozdelené do viacerých sekcií, kvôli ich veľkému počtu až okolo 500 možných výstupov. V poslednej pomyslenej štvrtej časti sa nachádzajú hlavné číselné hodnoty ktorých je najviac a najviac sa menia. Najskôr sa zadajú hodnoty palivového prútika ako sú rozmery, geometria, obohatenie, hustota, plyny. Ďalej sa zadávajú hodnoty axiálneho rozloženia výkonu a k jednotlivým hodnotám vyhorenia sa priraduje po-prútikový výkon v jednotkách W/cm. Tiež sa zadáva tlak, množstvo a vstupná teplota chladiča, je tu aj možnosť priradenia neutrónového toku. Toto je zbežné zhrnutie čo obsahuje vstupný súbor a jeho príklad s rozdelením do 4 pomyslených častí je vidieť na obr.6-2. Pre presné možnosti hodnôt jednotlivých premenných a presné znenia rovníc a modelov je potrebné dohľadať v príručke programu kde sú jednotlivé veci dopodrobna vysvetlené a zoradené v prehľadných tabuľkách.

```

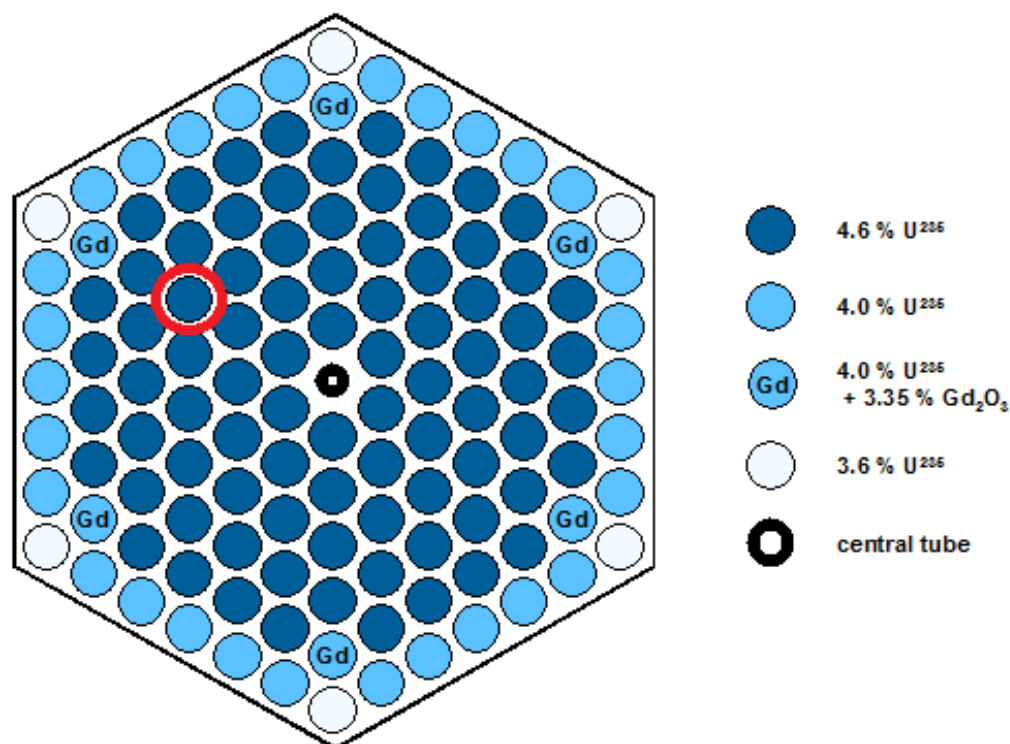
1 ***** PWR-type Rod Sample Case | *****
2 &INPUT IBUNP=1, IDAY=1, IRH=1, TROOM=295.1, DTPL=0.0, ICORRO=2, PX=99.0,
3   PITCH=1.6, IPUGH=1, TLIM=1000., IFLX=-2, INPRD=2, RCORRO=0.3,
4   IRIM=1, RFGFAC=1.0, FRELOC=0.30, EPSRLZ=5.D-3, IFSNT=1, FAIW=5.E11,
5   IGRAIN=0, GR=10.0, GRWF=1.5, LBU=1, IPRO=0, R1=1.0, R2=1.0, ICAGRW=1,
6   IHOT=1, BETAX=0.02, ISPH=1, ICFL=1,
7
8   IFEMRD=1, IFEMOP=2, IDSELM=1, IDENSF=0, DMAX=2.0, FDENSF=0,
9   IPEXT=14, IDCNST=1, IPTHCN=4, IFSWEL=4, ICPLAS=2,
10  IBOND=0, IGAPCN=5, BDX=100000., ALBD=0.7, FBONDG=10., SBONDG=0.01,
11  MAT3=2, FACT2=0.1, 0.1, 0.1, 100., 0.1,
12  CRPEQ=0, CRFAC=1.0, IPCRP=2, FCRFAC=1.0, IPTHEX=3, ATHEX=3.561D-6,
13  IRM=0, MESH=0, MOXP=0, IPLYG=1, IZYG=1, TCS=1773.15, IZOX=1, IST=1,
14
15  IPRINT=1, 1, 0, 0, 1, IPLOPT=5, DPBU=500.,
16  IWTHE=1, 0, 0, 1, 9*0, 1, 3*0, 3*1,
17  IWROD(1)=3*1, 8*0, 3*1, 0, 0, 0, 1, 0, 0,
18  IDNO(1)=8*1, 6*0, 5*1, 20*0,
19  IDNO(41)=10*1, 0, 1, 1, 0, 1, 3*0, 1, 4*0, 1, 1, 0, 1, 1, 5*0, 1, 3*0, 1, 0, 1
20  IDNO(81)=1, 19*0,
21  IDNO(101)=1, 0, 3*1, 0, 1, 3*0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 6*0, 1, 8*0, 1, 1, 0, 0, 1, 13*0,
22  IDNO(151)=2*0, 6*1, 3*0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 3*0, 1, 0, 0, 1, 1, 4*0, 1, 21*0,
23 &END
24
25      10      6
26      1      0.83      0.97
27      2      0      0.0      0.82      1.0      0.04      0.95      10.
28      2      0      0.0      0.82      1.0      0.04      0.95      10.
29      2      0      0.0      0.82      1.0      0.04      0.95      10.
30      2      0      0.0      0.82      1.0      0.04      0.95      10.
31      2      0      0.0      0.82      1.0      0.04      0.95      10.
32      2      0      0.0      0.82      1.0      0.04      0.95      10.
33      2      0      0.0      0.82      1.0      0.04      0.95      10.
34      2      0      0.0      0.82      1.0      0.04      0.95      10.
35      2      0      0.0      0.82      1.0      0.04      0.95      10.
36      0.6218      0.021      0.0
37      8.0      1.0      1.0      0.0      0.0      0.0      550.0      0.0
38      10
39      0.0      .01      558.15      15.4      1      3.04
40      .620      .865      1.000      1.149      1.190      1.163      1.005      0.931
41      .786      .541
42      10.0      114.5
43      15000.0      250.0
44      20000.0      270.0
45      25000.0      290.0      1
46      28000.0      270.0
47      30000.0      260.0
48      30500.0      100.0
49      30501.0      1.0      1
50      59900.0      110.0      558.15      15.4      1      3.04
51 STOP

```

Obr. 6-2 Příklad vstupného súboru ABC.d05

Do vstupov boli dosadené hodnoty ktoré sú reálne pre štvrtý blok dukovanského reaktora. Bola použitá kazeta číslo 6453 typu Gd_2M. Ide o profilovanú kazetu so stredným obohatením 4,38 % a vyhorievajúcim absorbátorom gadolíniom. Počas celej doby 5 rokov čo bola kazeta zavezená v aktívnej zóne reaktora, každý rok menila svoju pozíciu v poradí 53-43-13-40-19, čo sú čísla označení polôh kazety v jednej šestine aktívnej zóny. Z toho vyplýva, že kazeta bola umiestňovaná podľa dnes používanej metódy in-in-out, to znamená, že kazeta sa posúva smerom do stredu aktívnej zóny, až posledné dva roky sa umiestňuje na okraj zóny. Tu je využitá ako reflektor a vďaka jej malému výkonu nepôsobí až takou silnou fluenciou neutrónov na nádobu,

čím sa chráni nádoba pred krehnutím. Z tejto kazety bol vybratý prútik číslo #28, ktorý je zakrúžkovaný na obr. 6-3, kde je zobrazené aj rozloženie profilovanej kazety Gd_2M. Bol volený kvôli jeho polohe približne v strede výkonového profilu kazety. Jeho obohatenie je 4,6 % ^{235}U a neobsahuje vyhorevajúci absorbátor. Do vstupu bolo nutné dosadiť po-prútikové výkony v závislosti na vyhorení kazety a tiež axiálne rozloženia týchto výkonov. K týmto hodnotám bolo nutné sa dopracovať pomocou programu MOBBY-DICK. Tak pomocou tohto programu a reálnych dát z elektrárne Dukovany boli vypočítané a dosadené do programu FEMAXI-6 po-prútikové výkony a ich axiálne rozloženia¹. Program FEMAXI-6 ponúka aj možnosť počítania s vyhorevajúcim absorbátorom. V našom výpočte sme ju však nevyužili, pretože sme sa zamerali na sprevádzkovanie programu a oboznámenie sa s jeho možnosťami, preto bol volený priemerný prútik.

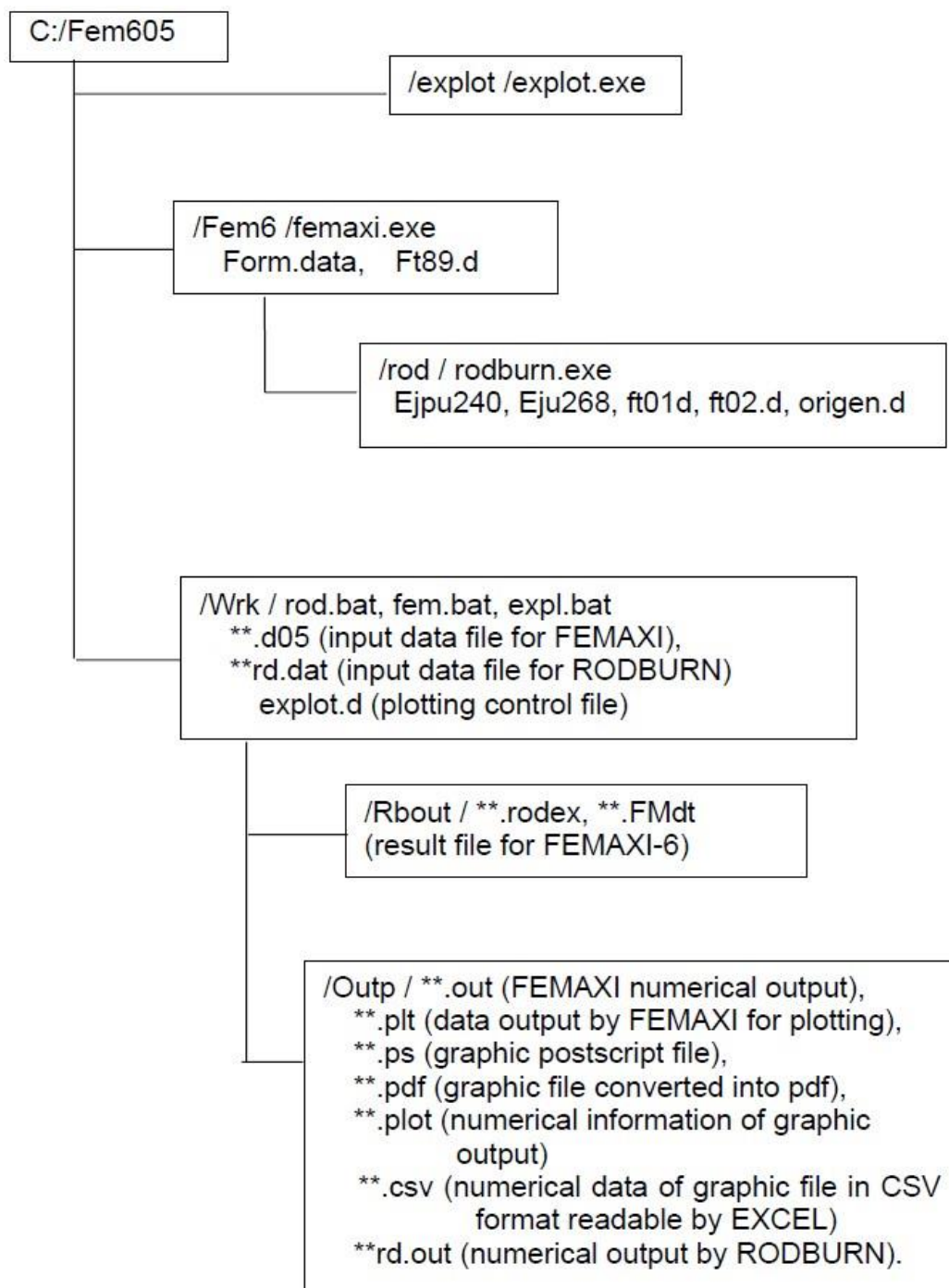


Obr. 6-3 Rozloženie profilovanej kazety Gd_2M

Následne po správnom zadaní všetkých parametrov, hodnôt a modelov sa môže program spustiť. Spúšťa sa pomocou príkazového riadku otvoreného priamo v priečinku Wrk ktorý je umiestnený v priečinku celého programu a ten musí byť umiestnený priamo na disku C/ aby program fungoval, kvôli tomu že sú v ňom zadané presné cesty. Pre lepšie pochopenie celá štruktúra priečinkov je zobrazená na obr. 6-4. Spúšťanie sa robí pomocou .bat súborov. Pri správne zadaných vstupoch by mal program bez problémov prebehnúť a vypísať v príkazovom

riadku že prebehol v poriadku. Čas za ktorý program počíta sa mení podľa zadanej podrobnosti výpočtu a množstva zadaných bodov jednotlivých výkonov počas celej doby, po ktorú je prútik zavezený v aktívnej zóne.

¹ Výpočtový program MOBY.DICK bol použitý vďaka spolupráci s oddelením Fyzika odboru Výpočty spoločnosti ŠKODA JS, a.s. a týmto ďakujeme Ing. Jiřímu Jeníkovi, Ph.D. a Ing. Pavlovi Mikolášovi, CSc. Za zapožičanie programu a potrebnej dokumentácie



Obr. 6-4 Štruktúra priečinkov programu FEMAXI-6 [32]

Po prebehnutí výpočtov a programu na vykreslenie grafov pribudnú v priečinku OUTP výstupné súbory. Vo výstupe ABC1.out sú najskôr zhrnuté zadané hodnoty a následne vypísané všetky vypočítané hodnoty ktoré sme zadali aby boli vypočítané. Na výstup ABC1.ps je potrebné mať ešte nástroj na prevedenie tohto typu postscript súboru do súboru pdf. Potom vo výstupnom pdf súbore sú vykreslené grafy podľa zadania, ktoré sa upravuje vo vstupe explot.d. Pri nastavovaní vstupu pre vykreslenie grafov sa tiež dá postupovať podľa príručky kde je podrobne vysvetlené čo sa kde zadáva. Niektoré vybrané grafy budú rozobraté v ďalšej podkapitole.

Do programu je možné pridávať alebo meniť rôzne ďalšie materiálové modely s ktorými by mohol program počítať. Je možné napríklad pridať modely v oblasti tepelnej rozťažnosti, praskania, napúchania, bodu tavenia, tvorbe štiepných plynov a mnoho ďalších. Pridať sa dajú modely aj tepelnej vodivosti paliva, ktorá je pre nás cieľom. Funkcia PTHCON, ktorú je možné nájsť v zdrojovom kóde programu, sa používa pri pridávaní modelov tepelnej vodivosti paliva. Túto funkciu definuje viacero premenných ako napríklad teplota, relatívna hustota, vyhorenie, množstvo gadolínia a iné. Celý súhrn je uvedený v tab. 6-2. Táto funkcia by mala byť v celom priebehu hladká, čiže by nemala vytvárať skoky v jej priebehu. Ak by bolo do výpočtu funkcie PTHCON nutné zapojiť viacero premenných ako je uvedené v tab. 6-2, odporúča sa priradiť premennú ktorá tieto bežné premenné používa. Pri pridávaní modelov pre palivo tvorené z UO_2 , voľné miesta vo funkcií IPTHCN začínajú od čísla 16 po 29, pre palivo MOX od čísla 34. Je to spôsobené tým, že predošlé číselné hodnoty sú už zabraté inými funkciami tepelnej vodivosti, medzi ktorými si môže užívateľ voľiť. Celkový prehľad jednotlivých modelov je uvedený v literatúre 32.

Tab. 6-2 Premenné funkcie PTHCON [32]

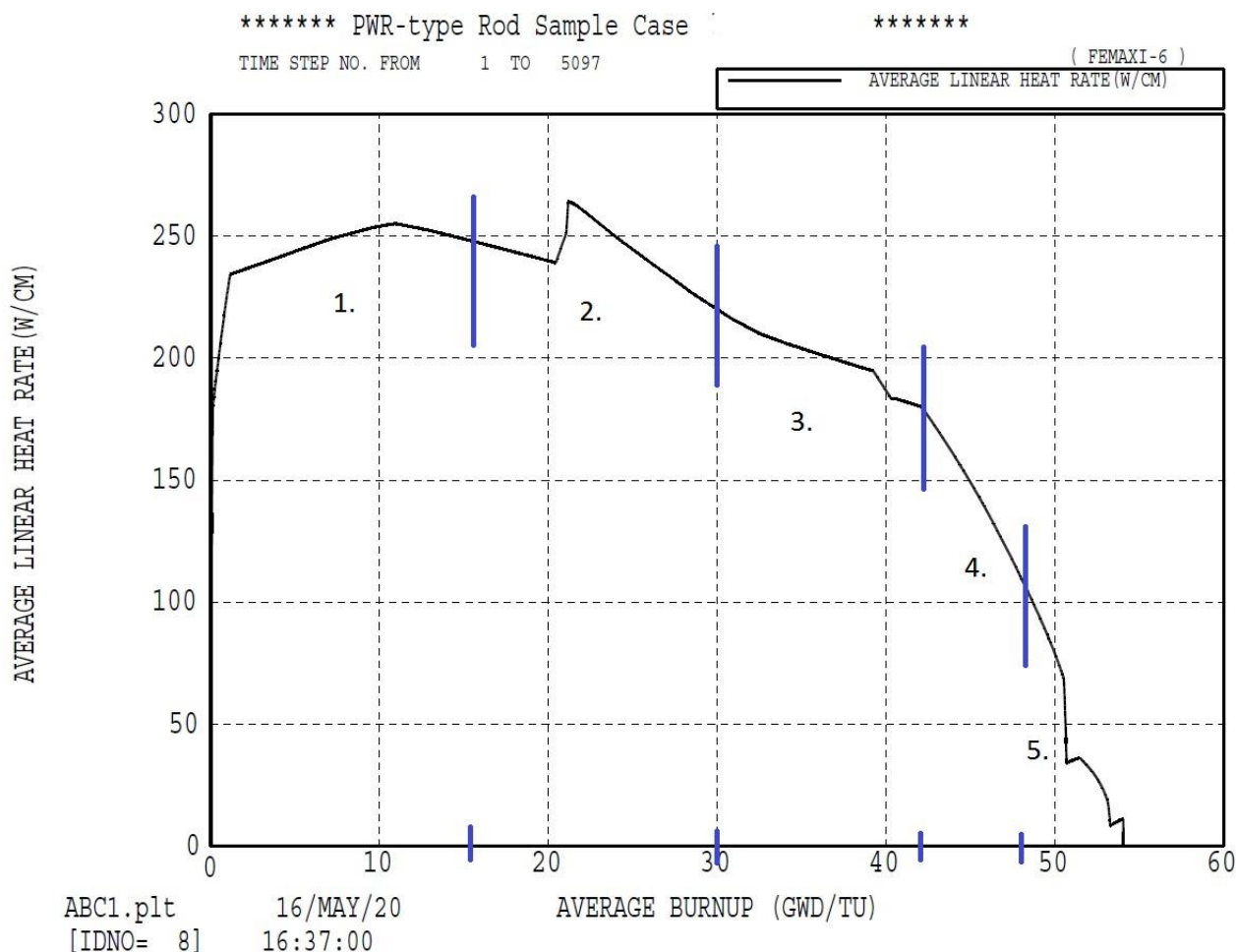
Premenné	Obsah	Jednotka
PTHCON	Tepelná vodivosť palivovej paletky	W/cm-K
IPTHCN	Možnosti pre tepelnú vodivosť paliva	-
IGD	Možnosti pre tepelnú vodivosť paliva obsahujúceho gadolínium	-
TEMP	Teplota	K
FDEN	Relatívna hustota paletky	-
BURNUP	Vyhorenie	MWd/t
GD	Hmotnostný podiel oxidu gadolína	-
Y	Y v $\text{MO}_{(2-Y)}$, napr.: Y=0,001 ak $\text{UO}_{2,001}$	-
PU	Hmotnostný podiel PuO_2	-
PUM	Mólový podiel PuO_2	-

6.4 Výstupy

Program FEMXI-6 vypisuje rôzne typy výstupov ako bolo už popísané vyššie ale najjednoduchšie zhodnotiteľné sú výstupy v podobe grafov. Vo vstupnom súbore pre vykreslenie grafov je možné zadať veľké množstvo rôznych parametrov ktoré môžu byť vykreslené. Rozobratých bude iba niekoľko príkladov pre utvorenie obrazu o výstupoch. Všetky zhodnotené výstupy budú v závislosti na vyhorení.

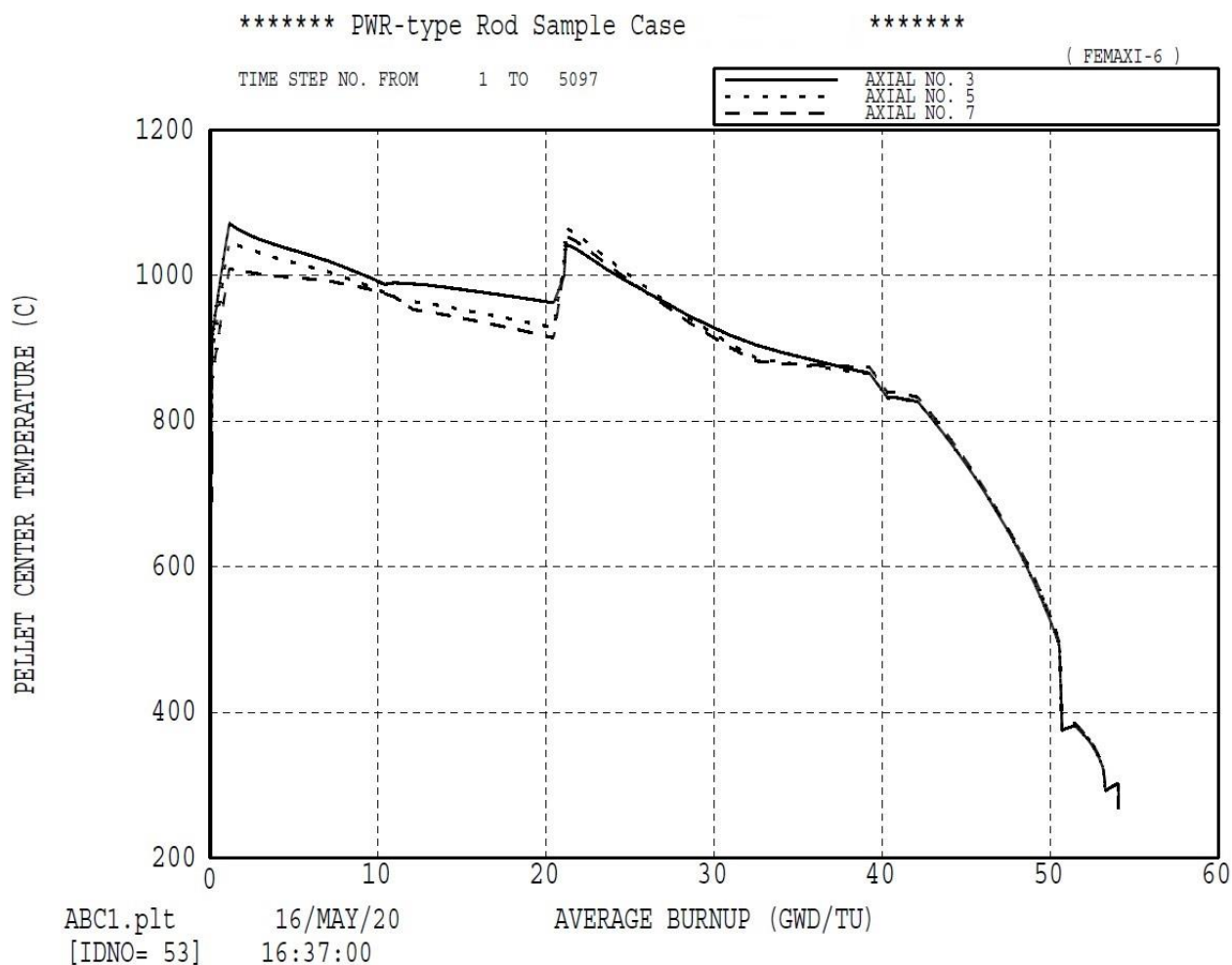
Prvý výstup je zobrazenie lineárneho po-prúťkového výkonu ktorý sme zadali, je vidieť na obr. 6-5. Je zobrazená jeho priemerná hodnota. Na obrázku je vidieť rozdelenie aj na jednotlivé roky kampane. Prvé 3 roky sa kazeta posúvala smerom do stredu aktívnej zóny, čiže môžeme vidieť najskôr nárast výkonu a zmeny jeho hodnôt pri presune. V druhom roku je vidieť mierny skok čo je asi najpravdepodobnejšie spôsobený zmenou výpočtového modelu v priebehu

výpočtu. Tiež je pozorovateľné že čím výkon klesá s pribúdajúcimi rokmi, tak kazeta za jeden rok menej vyhorí ako pri vyšších výkonoch. Posledné dva roky vyhorí približne za rok iba 5 000 MWd/tU, čo je približne jedna desatina z celkového vyhorenia.



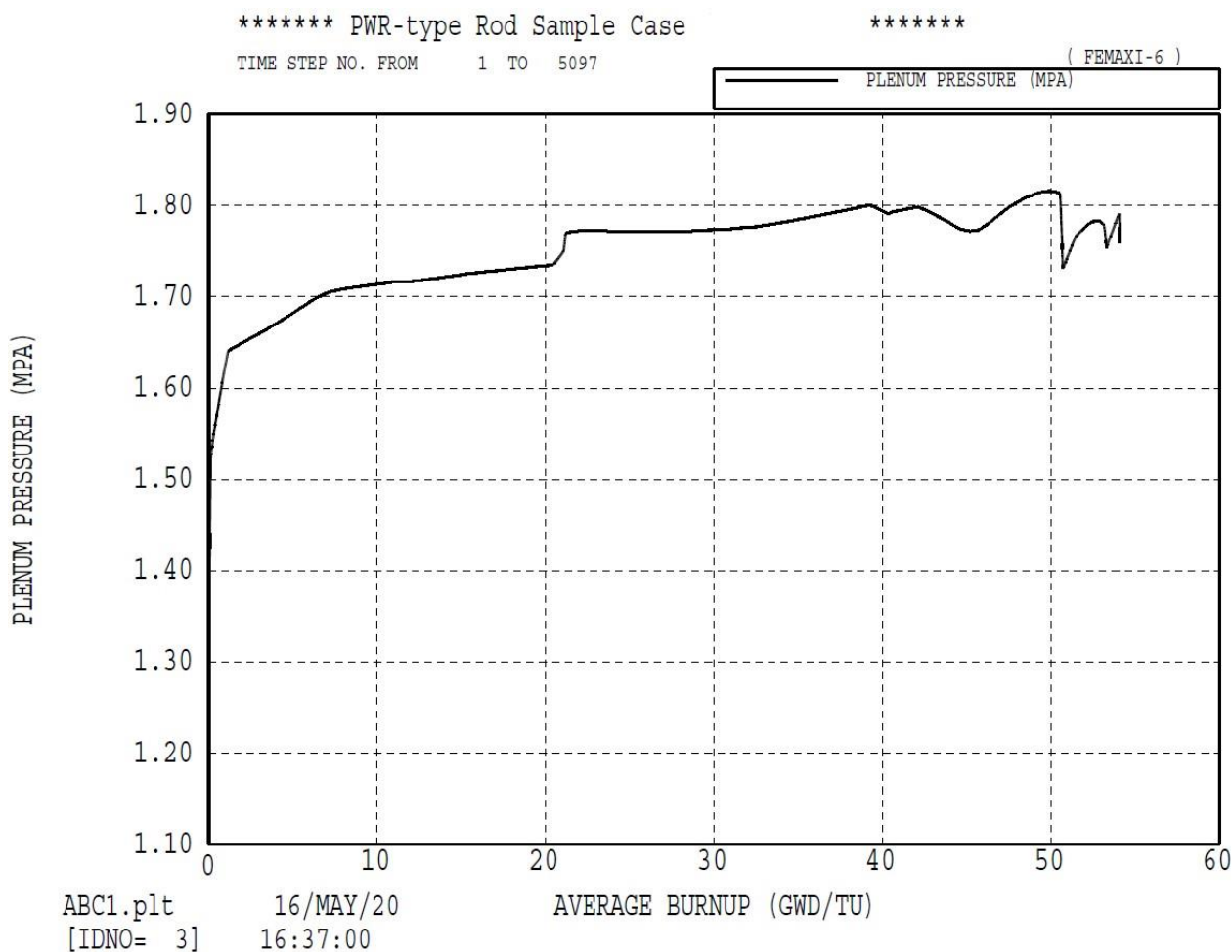
Obr. 6-5 Priebek priemerného lineárneho (po-prúťkového) výkonu v závislosti na vyhorení s naznačením jednotlivých rokov

V ďalšom výstup ktorý je zobrazený na obr. 6-6 je možné vidieť ako sa v priebehu mení teplota v centre palivovej paletky. Sú zobrazené hodnoty pre 3,5 a 7 segment, pričom model je rozdelený na 10 axiálnych segmentov. Rozdiely medzi jednotlivými segmentami je veľmi malý. Priebek teploty skoro kopíruje priebek výkonu. Avšak ide tu hlavne o hodnoty týchto teplôt. Pri nami zadaných teplotách sa pri najvyššom výkone dostaneme na hodnotu 1050 – 1080 °C v centre paletky. Pri zmenách rôznych modelov tepelnej vodivosti sa tieto teploty menia. Tento výstup je dôležitý hlavne pre ECO palivá ktorých cieľom vďaka lepšej tepelnej vodivosti znížiť túto teplotu uprostred. Tým by sa dalo palivo viacej využiť, využívať pri vyšších teplotách a bolo by bezpečnejšie. Tu je obmedzujúca teplota tavenia paliva, ktorú nesmie palivo dosiahnuť v žiadnom prípade pri bežnej prevádzke. Pri haváriách by táto zlepšená tepelná vodivosť mohla viesť k lepšiemu zvládnutiu situácie. Tiež sa tu prejavuje zmena výpočtového modelu v druhom roku kampane.



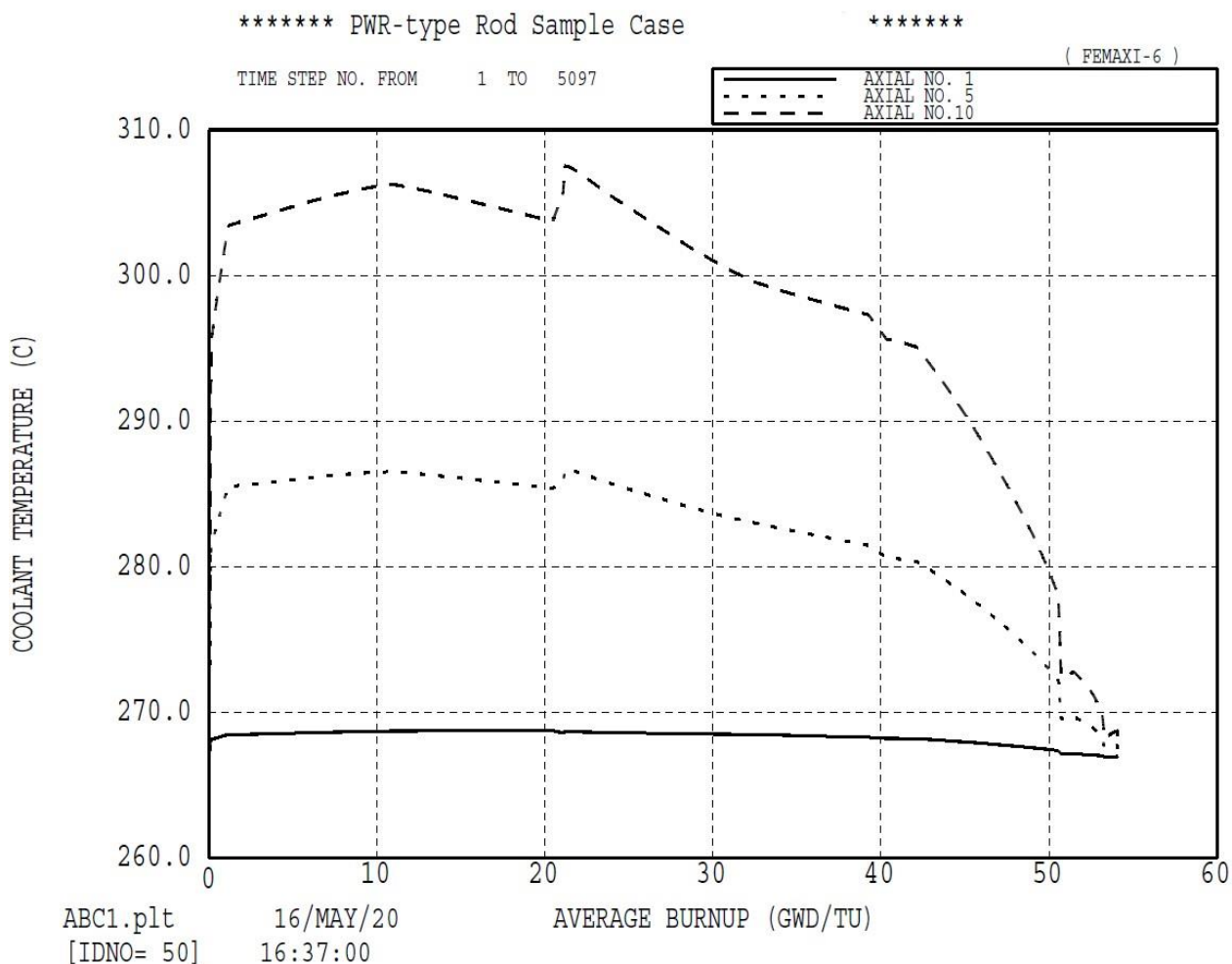
Obr. 6-6 Priebeh teploty uprostred palivovej paletky v závislosti na vyhorení

Ďalší výstup zobrazuje tlak v prútku, ktorý môžeme vidieť na obr. 6-7. Pri vyššom výkone sa tlak zvyšuje rýchlejšie ako pri menších. Je to spôsobené napríklad uvoľňovaním štiepných plynov z paliva, a tiež geometrickými zmenami palivových paletiek ako napríklad ich napúchanie, tečenie, praskanie a podobné procesy ktoré menia tlak v prútku. Napúchanie je takmer lineárne a pri našom vyhorení dosiahlo približne 8-9 %. Závisí veľmi na obsahu pórov a dutín v palive. Prútk je už mierne natlakovaný pri výrobe héliom na 700 kPa. V priebehu vyhorevania sa toto zloženie samozrejme mení ako aj tlak. Medzera medzi paletkou a pokrytím spolu s priestorom nad palivovým stĺpcom kde je umiestnená pružina, slúži na kompenzovanie týchto zmien tlakov a slúži tiež na hromadenie štiepných plynov. Ich množstvo závisí hlavne na teplote. Táto závislosť sa začína prejavovať pri teplote 600 °C. Približne pri teplote 1 700 °C sa uvoľnia z paliva všetky štiepne plyny, pri teplotách pod 1 700 °C je to približne 50 %. Podiel plyných štiepných produktov je známy, je to na 100 rozštiepených ťažkých jadier pripadá 27 atómov plynu. [33]



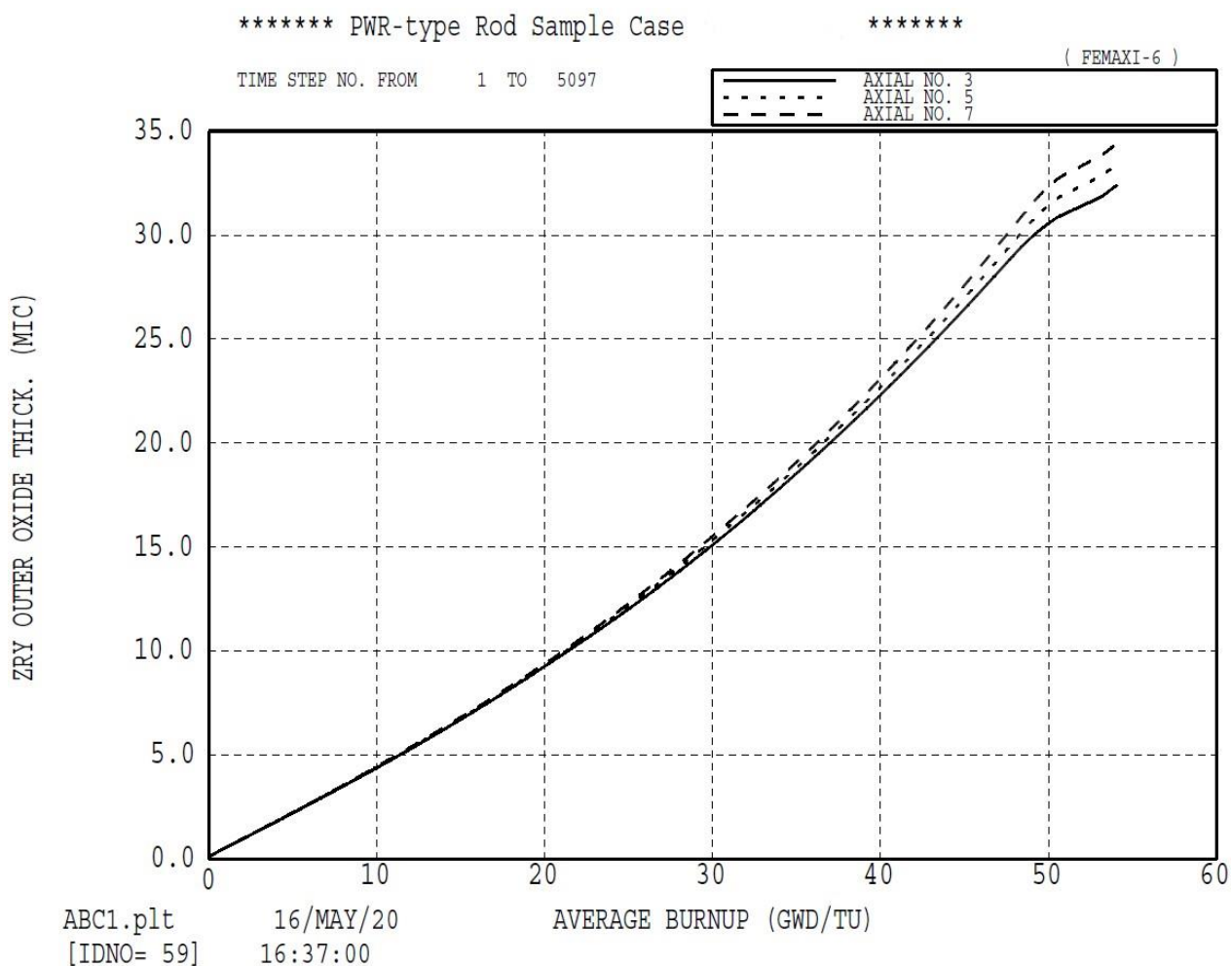
Obr. 6-7 Priebeh tlaku v prútiku v závislosti na vyhorení

Na ďalšom obr. 6-8 je vyobrazený priebeh teplôt chladiva počas priebehu celej doby využívania kazety a jednotlivo vyobrazené krivky pre dané axiálne segmenty. Ide o začiatkový, stredný a koncový segment, čiže môžeme pozorovať ako sa vyvíja teplota na výstupe. Teplota na výstupe približne rovná hodnotám s danými hodnotami zo štvrtého bloku Dukovian. Vidieť približne ohriatie vody o $\Delta T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pri posledných dvoch rokoch je značne vidieť pokles teplôt z dôvodu menšieho výkonu kazety tým že je viac vyhoretá a je umiestnená na okraj aktívnej zóny. Teplota chladiva je závislá na mnoho faktoroch. Tými faktormi sú napríklad prestup tepla z pokrytia do chladiva, tepelná vodivosť pokrytia, tepelná vodivosť medzery medzi palivovými paletkami a pokrytím, prestupy tepla z paletky do medzery a následne do pokrytia a nakoniec samostatná tepelná vodivosť paletiek. Z iných výstupov programu je tiež vidieť ako teplota pokrytia v tomto prípade je skoro po celý čas $340\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tu vidieť tepelný odpor prechodu medzi pokrytím a chladivom. Graf z obr. 6-8 je tiež dôležitý ukazovateľ aby voda v reaktore nepresiahla teplotu pri ktorej by za daného tlaku primárneho okruhu mohla začať vriť, čo je pri tlakovodných reaktoroch nežiadúci stav. Dochádzalo by k obnaženiu paliva a tým pádom k jeho zlému chladeniu. Tiež je treba dávať pri teplote aj na zmenu hustoty vody, čiže aj zmenu hustoty kyseliny boritej v primárnom okruhu a následne zmenám v absorpcii neutrónov touto kyselinou.



Obr. 6-8 Pribeh teploty chladiva na vstupe/strede/výstupe v závislosti na vyhorení

Na poslednom obr. 6-9 z výberu pre krátke zhodnotenie je priebeh rastu zoxidovanej vrstvy na povrchu pokrytia palivového prútika v závislosti na vyhorení. Vo výpočte bola použitá zliatina Zircaloy, ktorá je charakteristická pre západné typy paliva. Program neponúka použiť pokrytie východného typu kde je pokrytie tvorené zliatinou zirkónia a nióbu, s obsahom nióbu 1 %. Pre obálku palivovej kazety sa používa tá istá zliatina ale s obsahom nióbu 2,5 %. Teplota tavenia pre východnú zliatinu je 1860 °C a pre Zircaloy 4 je 1825 °C ale je rozdielna pre jednotlivé formy Zircaloy-u. Zoxidovaná vrstvička má tiež vplyv na prestup tepla. Narastajúca vrstvička však chráni pokrytie pod ňou. Táto analýza by sa dala využiť pri skúmaní nových materiálov pokrytia, ktoré by sa dali pridať do knižnice materiálov pre pokrytie. Ako je vidieť na obrázku na jednotlivých axiálnych segmentoch sa oxidácia zvyšuje smerom nahor veľmi málo. Viac o pokrytí palivových prútikov a rôznych metódach ako zabrániť ich oxidácií alebo reakcií s parou pri vysokej teplote za vzniku vodíka, bolo už pojednávané v druhej kapitole.



Obr. 6-9 Pribeh rastu zoxidovanej vrstvy na povrchu palivového prútika v závislosti na vyhorení

V tejto podkapitole bolo zhodnotených 5 grafických výstupov z programu, ale nastaviť je možné oveľa viac výstupov či už z termálnej analýzy alebo mechanickej. Boli vybraté a okomentované tieto grafy pre ich prínos a názornosť.

7 ZÁVER

Súčasný stav v jadrovej energetike, čo sa týka výstavby je v Európe trochu pribrzdený, ale čo sa týka zlepšovania terajších technológií značne napreduje. Je pravda, že táto oblasť je konzervatívna a nové technológie musia prejsť mnohými testami a analýzami, aby bolo dokázané, že sú vhodné. Hlavne, ak ide o palivové elementy v reaktore, ktoré sú vystavované najšpecifickejším a najnáročnejším podmienkam. Riešenie týchto problémov je veľmi komplexné a náročné. Po svete sa im venuje mnoho inštitúcií a firiem.

V práci boli v prvých kapitolách zhrnuté súčasné trendy v oblasti pokrytia palivových prútikov a vyhoriavajúcich absorbátorov. Vyhoriavajúce absorbátory sa stávajú bežnou súčasťou paliva, kvôli vyrovnaní výkonu počas prvého roka kampane. Najpoužívaným vyhoriavajúcim absorbátorom sa stalo gadolínium. Pri pokrytí je snaha, čo najviac zlepšiť mechanické vlastnosti a tiež zabrániť silnej reakcii s vodnou parou a vzniku nežiadúceho vodíka. Dosahovanie týchto cieľov je buď pomocou zmien v zliatine, alebo nanosením vrstiev z rôznych materiálov na povrch pokrytia. Tejto problematike a hlavne súčasným trendom sa venuje druhá kapitola.

V bakalárskej práci bola pozornosť tiež venovaná samotnému palivu. Bol uvedený prehľad rôznych typov zlúčenín uránu, ktoré sa používajú a zhodnotené ich vlastnosti. Hlavný dôraz v práci bol venovaný tzv. ECO fuels, čiže palivu so zvýšenou tepelnou vodivosťou, ktorá sa dosahuje pridávaním zlúčenín, ako je SiC alebo BeO. Boli tu popísané jednotlivé výhody, charakteristiky týchto metód a oblasti, kde sa bude výskum v tomto smere uberať a kam s najväčšom pravdepodobnosťou nie. Predovšetkým sa jednalo o množstvo, formu a rozmery použitých čiastočiek pridávaných do UO_2 rôznymi spôsobmi. V oblasti technológie výroby takéhoto paliva by nemal byť problém, išlo by však o nutné prestavanie výrobných liniek.

Súčasťou práce bol vytvorený výpočet vo výpočtovom programe FEMAXI-6. Najskôr bola vysvetlená jeho funkčnosť, schopnosti a obmedzenia. Bol vytvorený základný vstup pre palivo štvrtého bloku jadrovej elektrárne Dukovany, konkrétne palivo pre reaktory typu VVER 440 s kazetami Gd₂M. Následne boli výstupy v grafickej podobe zhodnotené a okomentované jednotlivé vplyvy, ktoré zasahovali do výsledkov. Pomocou programu FEMAXI-6 by bolo možné počítať nové typy paliva pre rôzne typy reaktorov. Je však nutné veľmi dobre pochopiť prácu programu aj do hĺbky. Výpočty by mohli byť dobrým odrazovým mostíkom pri rozhodovaní akým smerom by sa mal neskôr uberať experiment.

Ďalším postupom by malo byť rozhodnutie na základe výpočtov v uvedenom programe a navrhnutie experimentu s vytvorením takéhoto ECO paliva. Bolo by nutné sa rozhodnúť pre správny postup výroby a ďalšie parametre paliva. Následne by bolo vhodné vykonať experiment na zistenie, či bola tepelná vodivosť skutočne zlepšená. Pri pozitívnych výsledkoch by sa malo pokračovať v skúmaní aj ďalších vlastností potrebných pre zaradenie do bežnej prevádzky.

Jednotlivé ciele práce ako vytvorenie rešerše, zameranie sa na ATF palivá a zoznámenie sa s výpočtovým programom FEMAXI-6 s následným výpočtom, boli splnené. Z práce sa dá načerpať mnoho informácií z týchto oblastí, či nájsť odpovede alebo pomoc pri používaní programu. Plánom do budúcnosti je získanie dokonalejších výsledkov a použitie nových modelov tepelnej vodivosti pre lepšie skúmanie ATF palív.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] LAHODA, Edward J., Lars HALLSTADIUS, Frank BOYLAN a Sumit RAY. What should be the objective of Accident Tolerant Fuel? *Transactions of the American Nuclear Society*. Nevada: Reno, 2014, (Vol. 110): 733 - 736.
- [2] RAČEK, Jiří. *Jaderné elektrárny*. Vyd. 2. Brno: Zdeněk Novotný, 2005,c2002, 196 s. ISBN 80-214-2945-3.
- [3] ALAT, Ece, Arthur T. MOTTA, Robert J. COMSTOCK, Jonna M. PARTEZANA a Douglas E. WOLFE. Ceramic coating for corrosion (c3) resistance of nuclear fuel cladding. *Surface & Coatings Technology*. 2015, **281**(2015): 133 - 143.
- [4] LEE, Chan, Hyungmo KIM, Ho Seon AHN, Moo Hwan KIM a Joonwon KIM. Micro/nanostructure evolution of zircaloy surface using anodization technique: Application to nuclear fuel cladding modification. *Elsevier: Applied Surface Science* [online]. 2012, 2012-05-26, **258**(2012): 8724-8731 [cit. 2015-12-06].
- [5] PARK, Jung-Hwan, Hyun-Gil KIM, Jeong-yong PARK, Yang-II JUNG, Dong-Joon PARK a Yang-Hyun KOO. High temperature steam-oxidation behavior of arc in plated Cr coatings for accident tolerant fuel claddings. *Elsevier: Surface & Coatomgs Technology* [online]. 2015, 2015-09-14, **280**(2015): 256-259 [cit. 2015-12-06].
- [6] KIM, Hyun-Gil, Jeong-yong PARK, Il-Hyun KIM, Dong-Joon PARK, Dong-Jun KOO a Joeng-Yong PARK. Adhesion property and high-temperature oxidation behavior of Cr-coated Zircaloy-4 cladding tube prepared by 3D laser coating. *Elsevier: Journal of Nuclear Materials* [online]. 2015, 2015-06-18, **465**(2015): 531-539 [cit. 2015-12-06].
- [7] LATHA, S., M. NANDAGOPAL, S. PANNEER SELVI, K LAHA a M. D. MATHEW. Tensile and Creep Behaviour of Modified 9Cr-1Mo steel Cladding Tube for Fast Reactor using Metallic fuel. *Elsevier: Procedia Engineering* [online]. 2014, **86**(2014): 71-79 [cit. 2015-12-06].
- [8] NUTHALAPATI, Mohan, S.K. KARAK, D. CHAKRAVARTY a A. BASU. Development of nano-Y2O3 dispersed Zr alloys by mechanical alloying and spark plasma sintering. *Elsevier: Materials Science & Engineering A*[online]. 2015, 2015-10-22, **650**(2016): 145-153 [cit. 2015-12-06].
- [9] KIM, Weon-Ju, Daejong KIM a Ji Yeon PARK. Fabrication and material issues for application of SiC composites to LWR fuel cladding. *Nuclear engineering and technology*[online]. 2013, 2013-01-02, **4**(2013): 565-572 [cit. 2015-12-06]. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.5516/NET.07.2012.084>
- [10] LOVECKÝ, Martin. *Increasing the efficient of nuclear fuel using burnable absorbers* [Zvyšování účinnosti jaderného paliva použitím vyhořívajících absorbátorů]. Pilsen, 2015. Doctoral dissertation thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Deapartment of Electrical power engineering and Ecology. Supervisor: Radek Škoda
- [11] URBAN, Peter. *Skúsenosti s novým jadrovým palivom v EMO* [online]. In: . Č.Papiernička: SE a.s. - EMO, 2013, 2013-04-18, s. 32 [cit. 2015-12-13]. Dostupné z: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/44/128/44128902.pdf>
- [12] ULLMANN, Vojtěch. *Jaderná a radiační fyzika* [online].[cit. 2016-01-11]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika3.htm>

- [13] Plutonium-239. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 13.2.2006, last modified on 25.10.2011 [cit. 2016-01-11]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Plutonium-239>
- [14] Thorium fuel cycle. In *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 13.2.2006, last modified on 25.10.2011 [cit. 2016-01-11]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Thorium_fuel_cycle
- [15] TODREAS, Neil E a Mujid S KAZIMI. *Nuclear systems*. 2nd ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2012. ISBN 97804158028711.
- [16] MARIANI, Robert D., Douglas L. PORTER, Steven L. HAYES a J. Rory KEMMEDY. Metallic Fuels: The EBR-II legacy and recent advances. *Procedia Chemistry* [online]. 7(2012), 513-520 [cit. 2016-01-13].
- [17] VISHNU, Verma a A.K. GHOSH. Thermal analysis of metallic fuel for future FBRs. *Procedia Chemistry* [online]. 7(2011), 234-249 [cit. 2016-01-13].
- [18] YEO, S., E. MCKENNA, R. BANEY, G. SUBHASH a J. TULENKO. Enhanced thermal conductivity of uranium dioxide–silicon carbide composite fuel pellets prepared by Spark Plasma Sintering (SPS). *Journal of Nuclear Materials* [online]. 433(2013), 66-73 [cit. 2016-01-13].
- [19] YEO, Sunghwan, R. BANEY, Ronald SUBHASH, Ghatu TULENKO a James. The influence of SiC particle size and volume fraction on the thermal conductivity of spark plasma sintered UO₂–SiC composites. *Journal of Nuclear Materials* [online]. 442(2013), 245-252 [cit. 2016-01-13].
- [20] ZHOU, Wenzhong, Rong LIU, Shripad T. REVENKAR a . Fabrication methods and thermal hydraulics analysis of enhanced thermal conductivity UO₂-BeO fuel in light water reactors. *Annals of Nuclear Energy* [online]. (2015) [cit. 2016-01-13].
- [21] *Generálne opravy 2011: 1. a 2. blok Atómových elektrární Mochovce* [online]. In: . Komunikácia jadrových elektrární, s. 1-24 [cit. 2016-01-14]. Dostupné z: <http://www.seas.sk/data/file/127/generalne-opravy-mochovce-2011.pdf>
- [22] Mixed Oxide (MOX) Fuel. *World nuclear association* [online]. United Kingdom: Tower House, 2014 [cit. 2016-01-15]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Fuel-Recycling/Mixed-Oxide-Fuel-MOX/>
- [23] Nuclear Fuel Fabrication. *World nuclear association* [online]. United Kingdom: Tower House, 2015 [cit. 2016-01-15]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Conversion-Enrichment-and-Fabrication/Fuel-Fabrication/>
- [24] *The manufacturing of uranium nitride for possible use in light water reactors* [online]. Stockholm, 2015 [cit. 2016-01-15]. Department of Reactor Physics, Royal Institute of Technology. Vedoucí práce Pertti Malkki. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:816319/FULLTEXT01.pdf>.
- [25] Uranium nitride. *Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. 2015 [cit. 2016-01-15]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Uranium_nitride
- [26] PUIDE, M. High Density Fuels. In: *Nuclear energy agency: Third Meeting of the OECD-NEA Expert Group on Accident Tolerant Fuels for LWRs* [online]. 2015 [cit. 2016-03-11]. Dostupné z: <https://www.oecd-neo.org/science/egatfl/atf-public/atf2015March-public/>
- [27] HO YANG, Jae. Summary on SiC: Task Force 2 (Clad) meeting. In: *Nuclear energy agency: Second Meeting of the OECD-NEA Expert Group on Accident Tolerant Fuels for*

- LWRs [online]. 2014 [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: <https://www.oecd-neo.org/science/egatfl/atf-public/atf2014Sept-public/>
- [28] HYUN-GIL, Kim a Koo YANG-HYUN. Present status of surface-modified Zr alloy claddings in KAERI: Task Force 2 (Clad) meeting. In: *Nuclear energy agency: Fourth Meeting of the OECD-NEA Expert Group on Accident Tolerant Fuels for LWRs* [online]. 2015 [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: <https://www.oecd-neo.org/science/egatfl/atf-public/atf2015Sept-public/>
- [29] REBAK, Rauk B. a Kurt A. TERRANI. Update on R&D on advanced steels at GE/ORNL. In: *Nuclear energy agency: Fourth Meeting of the OECD-NEA Expert Group on Accident Tolerant Fuels for LWRs* [online]. 2015 [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: <https://www.oecd-neo.org/science/egatfl/atf-public/atf2015Sept-public/>
- [30] TANG, C., M. STEINBRUCK, M. GROSSE, A. JIANU, A. WEISENBURGER a H.J. SEIFERT. High temperature steam oxidation of potential cladding materials - FeCrAl alloy and Ti₂AlC MAX phase. In: *Nuclear energy agency: Fourth Meeting of the OECD-NEA Expert Group on Accident Tolerant Fuels for LWRs* [online]. 2015 [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: <https://www.oecd-neo.org/science/egatfl/atf-public/atf2015Sept-public/>
- [31] CHENG, Bo. Refractory Metal Cladding and Mo-alloy Development for Accident Tolerant Fuel. In: *Nuclear energy agency: Third Meeting of the OECD-NEA Expert Group on Accident Tolerant Fuels for LWRs* [online]. 2015 [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: <https://www.oecd-neo.org/science/egatfl/atf-public/atf2015March-public/>
- [32] SUZUKI, Motoe a Hiroaki SAITOU. *Light Water Reactor Fuel Analysis Code FEMAXI-6: Detailed Structure and User's Manual*. Japan Atomic Energy Agency, 2005.
- [33] HEŘMANSKÝ, Bedřich. *TERMO-MECHANIKA JADERNÝCH REAKTORU*. Praha: TISK, knižní výroba, 1986.