



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

CHARAKTERISTIKA PALIVOVÉHO ELEMENTU

FUEL ELEMENT CHARACTERIZATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

DÁVID HALABUK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ MARTINEC, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Dávid Halabuk

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Energetika, procesy a ekologie (3904R030)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Charakteristika palivového elementu

v anglickém jazyce:

Fuel element characterization

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Palivový element je základní funkční součástí aktivní zóny reaktoru. Palivový element je složen především z palivové části, pokrytí a konstrukční prvků pro uchycení v palivovém souboru. Spolehlivost palivového elementu spočívá především v tvarové stálosti, neprodyšným pokrytím a odolnosti proti podmínkám v aktivní zóně v průběhu vyhořívání paliva. Základní charakteristika palivového elementu je nezbytná z pohledu jeho použití, případných provozních nestabilit i konstrukčních úprav.

Cíle bakalářské práce:

Základní popis palivového elementu z pohledu jeho konstrukce a funkčnosti.

Rešerše používaných palivových elementů a nových trendů v jejich vývoji.

Popis strukturních změn palivového elementu v průběhu vyhořívání paliva.

Charakteristika palivového elementu pro vybranou oblast - pevnostní, strukturní nebo teplotní.

Seznam odborné literatury:

BEČVÁŘ, Josef. *Jaderné elektrárny*. 2., opravené vyd. Praha: [s.n.], 1981, 634, [1] s. [4] s. obr. příl.

HEŘMANSKÝ, Bedřich. *Termomechanika jaderných reaktorů: vysokoškolská učebnice pro vysoké školy technické, studijní obor 39-39-8 Jaderné inženýrství*. 1. vyd. Praha: Academia, 1986, 434 s.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Martinec, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 24.10.2013

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá popisom palivových elementov reaktorov typu VVER. Okrem obecného popisu palivového elementu je v nej spracovaný prehľad jadrového paliva používaného v minulosti a v súčasnosti na českých a slovenských jadrových elektrárnach, ako aj prehľad nových trendov vo vývoji jadrového paliva. Veľká časť práce je venovaná opisu vlastností jadrového paliva a pokrytia palivových elementov a jednotlivých procesov, ku ktorým dochádza v palivovom elemente počas vyhorevania paliva. V ďalšej časti práce sú podrobne opísané príčiny poškodenia palivových elementov vyskytujúce sa na reaktoroch typu VVER. Posledná časť práce obsahuje výpočet zmeny deformácií a napätí pokrytia palivového elementu pri vytvorení kontaktu medzi palivovou tabletou a pokrytím. Výpočet je robený pre 4 rôzne tvary palivových tabliet a okrem deformácií a napätí sú počítané taktiež axiálne dilatácie stĺpca paliva a rozloženia teplôt po polomere palivového elementu.

Kľúčové slová

jadrové palivo, pokrytie paliva, palivový element, poškodenie palivového elementu, deformačno-napät'ová analýza

Abstract

This bachelor thesis describes the fuel rods of VVER reactors. In addition to general description of fuel rod, there is also overview of the nuclear fuel used in the past and at present in Czech and Slovak nuclear power plants, as well as overview of the new trends in development of nuclear fuel. Big part of the thesis is focused on description of nuclear fuel and fuel cladding properties and the individual processes affecting fuel rod during fuel burnup. Next part describes in detail the causes of fuel failures occurring in VVER reactors. The last part of the thesis includes calculation of changes of deformations and stresses occurred in fuel cladding during pellet-cladding interaction. Calculation is done for four different shapes of fuel pellets and in addition to deformation and stress analysis, there are also calculated axial dilatations of fuel column and radial temperature distributions in fuel rod.

Key words

nuclear fuel, fuel cladding, fuel rod, fuel failure, deformation and stress analysis

Bibliografická citácia

HALABUK, D. *Charakteristika palivového elementu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 66 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Martinec, Ph.D.

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne pod vedením Ing. Jiřího Martinca, Ph.D., s využitím vlastných znalostí a literatúry uvedenej v zozname použitých zdrojov.

V Brne dňa 25.5.2014

.....
Dávid Halabuk

Pod'akovanie

Týmto by som chcel poďakovať môjmu vedúcemu bakalárskej práce Ing. Jiřímu Martincovi, Ph.D. za odborné vedenie a cenné rady, ktorými prispel k vypracovaniu tejto bakalárskej práce.

Obsah

Úvod	11
1 Charakteristika palivového elementu reaktora typu VVER	12
1.1 Jadrové palivo	13
1.2 Pokrytie paliva	13
2 Vývoj v oblasti jadrového paliva	14
2.1 Palivo reaktora VVER 440	14
2.1.1 Jadrové palivo používané v minulosti	14
2.1.2 Aktuálne používané jadrové palivo	16
2.1.3 Budúce smerovanie v oblasti vývoja jadrového paliva	16
2.2 Palivo reaktora VVER 1000	18
2.2.1 Jadrové palivo používané v minulosti	18
2.2.2 Aktuálne používané jadrové palivo	18
2.2.3 Budúce smerovanie v oblasti vývoja jadrového paliva	18
3 Základné vlastnosti UO_2	19
3.1 Hustota	19
3.2 Teplota tavenia	19
3.3 Merná tepelná kapacita	20
3.4 Tepelná vodivosť	21
3.5 Tepelná rozťažnosť	21
3.6 Mechanické charakteristiky	22
4 Procesy ovplyvňujúce jadrové palivo počas jeho vyhorievania	23
4.1 Praskanie paliva	23
4.2 Uzatváranie trhlín	23
4.3 Realokácie paliva	24
4.4 Tvorba centrálného otvoru	24
4.5 Denzifikácia	24
4.6 Objemový rast	25
4.7 Zmena kryštalickej štruktúry paliva	26
4.8 Reštrukturalizácia paliva	26
4.9 Uvoľňovanie plynných produktov štiepenia	26
4.10 Tečenie paliva	27
4.11 Zmena tvaru tablety	28
4.12 Zmena teploty paliva	28
5 Základné vlastnosti pokrytia a procesy vyplývajúce z jeho ožarovania	29
5.1 Chemické zloženie	29
5.2 Teplota tavenia a hustota	29
5.3 Kryštalická štruktúra zirkóniových zliatin	30

5.4	Merná tepelná kapacita.....	30
5.5	Tepelná rozťažnosť	30
5.6	Tepelná vodivosť	31
5.7	Modul pružnosti v ťahu a šmyku	31
5.8	Medza klzu, medza pevnosti, tvrdosť, predĺženie a kontrakcia	32
5.9	Creep	33
5.10	Radiačný rast	34
5.11	Zmeny priemeru a výšky palivového elementu	35
6	Príčiny poškodenia palivových elementov	37
6.1	Korózia	37
6.2	Hydridácia	38
6.3	Poškodenie palivového elementu trením o mriežku.....	38
6.4	Ohýbanie palivových kaziet	38
6.5	Kontakt medzi palivovou tabletou a pokrytím	39
6.6	Výrobné chyby	39
6.7	Poškodenie cudzou časticou	40
6.8	Poškodenie pri manipulácii s palivovými kazetami	40
6.9	Sekundárne poškodenie	41
6.10	Detekcia poškodených palivových elementov počas prevádzky	41
6.11	Vývoj porúch palivových elementov a palivových kaziet tlakovodných reaktorov.....	42
7	Analýza pokrytia palivového elementu.....	44
7.1	Geometrický model	45
7.2	Základné rozmery modelu.....	45
7.3	MKP model	46
7.4	Použité materiálové vlastnosti.....	46
7.5	Okrajové podmienky	48
7.6	Výsledky analýzy	49
7.6.1	Deformácie a napätia vznikajúce v pokrytí pri stave 1	49
7.6.2	Deformácie a napätia vznikajúce v pokrytí pri stave 2	51
7.6.3	Porovnanie vplyvu tvaru palivovej tablety na veľkosť deformácií a napätí vznikajúcich v pokrytí	52
7.6.4	Priebeh teplôt v palivovom elemente	55
7.6.5	Axiálne dilatácie stĺpca paliva.....	56
7.6.6	Zhrnutie výsledkov	56
	Záver	58
	Zoznam použitých zdrojov	59
	Zoznam použitých skratiek a symbolov	64
	Zoznam obrázkov, grafov a tabuliek.....	65

Úvod

Dopyt po energii v dnešnej spoločnosti neustále narastá. Každým dňom sa spotrebuje väčšie množstvo elektrickej energie, ktorá musí byť niekde vyrobená. Najväčší podiel na tejto výrobe majú elektrárne spaľujúce fosílna palivá. Ide síce o ekonomicky výhodný zdroj, ale spaľovanie fosílnych palív je jedným z hlavných zdrojov znečisťovania ovzdušia. Časť vyrobenej energie pochádza taktiež z obnoviteľných zdrojov, ktoré sú síce šetrnejšie k prírode, ale možnosť ich využitia je obmedzená klimatickými podmienkami a polohou krajiny.

Ďalším využívaným zdrojom sú jadrové elektrárne. Ich podiel nie je v súčasnosti vo svetovom meradle veľmi výrazný, ale v budúcnosti by vďaka svojej dobrej ekonomickej bilancii a neškodnosti z pohľadu tvorby skleníkových plynov, mohol nabráť na význame. Jadrová energetika ale naráža na odpor verejnosti, ktorý je spôsobený hlavne strachom z následkov možnej havárie. Aj keď pravdepodobnosť havárie je veľmi nízka, je pravda, že jadrové elektrárne využívajú veľmi koncentrovanú formu energie a následky havárie by mohli byť vážne. Z tohto dôvodu je pri prevádzke jadrových zariadení vždy na prvom mieste bezpečnosť.

Aby bolo možné bezpečne prevádzkovať jadrovú elektrárňu, musia byť procesy, ktoré v nej prebiehajú, do detailov pochopené a preskúmané. Základným elementom každej jadrovej elektrárne je palivový element, pretože je v ňom uložené jadrové palivo. V tejto bakalárskej práci je okrem obecného opisu palivového elementu spracovaný aj prehľad jadrového paliva používaného v minulosti a súčasnosti v českých a slovenských jadrových elektrárňach. Je v nej taktiež naznačený smer, akým sa v dnešnej dobe ubera vývoj v oblasti jadrového paliva.

Jadrové palivo prechádza počas svojho vyhorenia značnými zmenami. Mení sa nielen väčšina jeho tepelných a mechanických vlastností, ale taktiež na jeho správanie vplyvajú určité špecifické fenomény, ktoré sú priamym dôsledkom prebiehajúcich štiepných reakcií. Značná časť práce je venovaná práve opisu vybraných základných vlastností jadrového paliva a procesov, ktoré ovplyvňujú jeho správanie počas vyhorenia.

Jednou z prvých bariér oddeľujúcou jadrové palivo od vonkajšieho prostredia je pokrytie palivových elementov. Z tohto dôvodu má pokrytie palivových elementov významnú úlohu pri posudzovaní bezpečnosti a prevádzkyschopnosti celej jadrovej elektrárne. Nakoľko v reaktore sa okrem tepelného a mechanického namáhania vyskytuje aj silné rádioaktívne žiarenie, je pokrytie palivových elementov vystavené náročnému zaťažujúcim podmienkam. Táto bakalárska práca obsahuje opis niektorých základných vlastností pokrytia, ako aj procesov, ktoré sú priamym dôsledkom jeho ožarovania. Samostatná kapitola je venovaná príčinám poškodení palivových elementov, kde je okrem detailného opisu jednotlivých poškodení uvedený aj prehľad počtu poškodených palivových kaziet reaktorov typu VVER.

Jednou z príčin poškodenia palivových elementov býva zvýšenie napätia v pokrytí v dôsledku vytvorenia kontaktu medzi palivom a pokrytím. V poslednej kapitole práce je urobená deformačno-napäťová analýza, pri ktorej sa skúma nárast napätí a deformácií v pokrytí pre rôzne tvary palivových tabliet, počas vytvorenia kontaktu medzi palivovou tabletou a pokrytím palivového elementu. Okrem deformácií a napätí sú skúmané aj axiálne dilatácie stĺpca paliva a rozloženia teplôt po polomere palivového elementu.

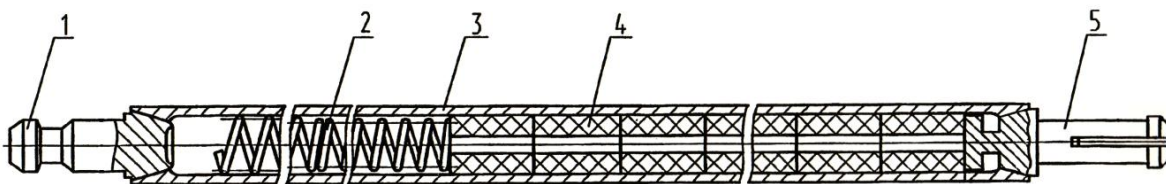
1 Charakteristika palivového elementu reaktora typu VVER

Základnou súčasťou každej jadrovej elektrárne je reaktor. Aktívna zóna reaktora pozostáva z palivových kaziet, v ktorých sú naskladané jednotlivé palivové elementy. V palivových elementoch je uložené jadrové palivo, a preto je palivový element základným elementom celej jadrovej elektrárne.

Palivový element má tvar dlhého štíhleho prútika a skladá sa z palivových tabliet, pokrytia a ďalších konštrukčných prvkov. Palivové tablety o priemere 7,6 mm a výške 9 – 12 mm sú hermeticky uložené v tenkej trubke zo zirkóniovej zliatiny. Konce trubky sú ukončené prizváranými koncovkami. Dolná koncovka je napevno zasadená do spodnej distančnej mriežky v palivovej kazete, zatiaľ čo vrchná koncovka je uložená voľne, aby mohol palivový element voľne dilatovať. Vonkajší priemer pokrytia je 9,1 mm a jeho hrúbka je približne 0,65 mm. Stĺpec palivových tabliet je posadený na dolnej koncovke a zvrchu je pritláčaný pružinou, ktorá bráni pohybu palivových tabliet pri manipulácii s palivovými kazetami. Obsah paliva v jednom palivovom elemente reaktora typu VVER 440 je približne 1,06 kg. [1, 2]

Palivové tablety majú valcový tvar, ktorý môže mať v niektorých prípadoch malé konštrukčné úpravy. Ide napríklad o skosenie hrán alebo vybranie na čelách. Skosenie hrán znižuje napätie v pokrytí pri vytvorení kontaktu medzi palivom a pokrytím, zatiaľ čo vybranie na čelách znižuje axiálnu dilatáciu stĺpca paliva. Ďalšou používanou úpravou je centrálny otvor v palivovej tablete, ktorý znižuje teplotnú špičku v strede osi tablety a zároveň zvyšuje voľný objem palivového elementu, do ktorého môžu unikať plynné produkty štiepenia. Jeho priemer býva približne 1,2 mm. Medzi palivom a pokrytím je ponechaná medzera, ktorá slúži na kompenzáciu objemových zmien paliva. Táto medzera je z dôvodu lepšieho odvodu tepla vyplnená čistým héliom. [1,2]

Palivové elementy reaktorov VVER 1000 a VVER 440 sú veľmi podobné. Líšia sa len vo svojej dĺžke, ktorá pre palivový element reaktora VVER 1000 dosahuje 3915 mm, zatiaľ čo pri palivovom elemente reaktora VVER 440 je len 2540 mm. S dĺžkou palivového elementu úmerne narastá aj množstvo paliva, a preto je v palivových elementoch reaktora VVER 1000 o niekoľko stoviek gramov viac uránu. [3]



Obr. 1-1 Palivový element reaktora VVER 440 [4]

1-horná koncovka, 2-pružina, 3-pokrytie, 4-palivová tableta, 5-dolná koncovka

1.1 Jadrové palivo

Jadrové palivo používané v tlakovodných reaktoroch typu VVER má formu oxidu uraničitého (UO_2). Toto keramické palivo je lisované a spekané do malých tabliet, ktoré sú naskladané v palivových elementoch. Použitie keramického paliva umožnilo vyššie vyhorenie paliva pri jeho menšom objemovom raste. Výhodou je aj jeho vyšší bod tavenia, ktorý umožnil používať toto palivo pri vyšších teplotách, a tým dosiahnuť vyšší merný výkon. Nevýhodou oproti kovovému palivu sú ale jeho zhoršené tepelné vlastnosti, ako napríklad nízka tepelná vodivosť. [1]

1.2 Pokrytie paliva

Hlavnou úlohou pokrytia paliva je oddelenie jadrového paliva od chladiča, a tým zabránenie prenikaniu štiepných produktov do chladiča, ako aj chemickému pôsobeniu chladiča na palivo. Na materiál pokrytia sú okrem bežných konštrukčných požiadaviek kladené aj určité špeciálne požiadavky, ako malý účinný prierez pre zachyt a nepružný rozptyl neutrónov, kompatibilita s UO_2 , dobrá korózna odolnosť, tvarová stálosť a dobré tepelné vlastnosti. Materiálov, ktoré by spĺňali všetky tieto podmienky, nie je veľa a v tlakovodných reaktoroch sa osvedčili zliatiny zirkónia. V reaktoroch typu VVER sa jedná konkrétne o ruskú zliatinu s označením E110 ($\text{Zr1\%Nb}$). [1]

2 Vývoj v oblasti jadrového paliva

Jadrové palivo prešlo od začiatku svojho používania v jadrových elektrárnach značným vývojom. Zmenilo sa obohatenie paliva, začal sa používať vyhorevajúci absorbátor, upravili sa niektoré konštrukčné prvky kaziet a pod. Vývoj v tejto oblasti naďalej pokračuje a prináša neustále zvyšovanie účinnosti a efektívnosti využitia jadrového paliva.

2.1 Palivo reaktora VVER 440

2.1.1 Jadrové palivo používané v minulosti

Palivové kazety reaktorov typu VVER 440 prešli za posledných niekoľko rokov výrazným vývojom. Tab. 1 ukazuje ako sa s postupom rokov menili niektoré hlavné parametre paliva.

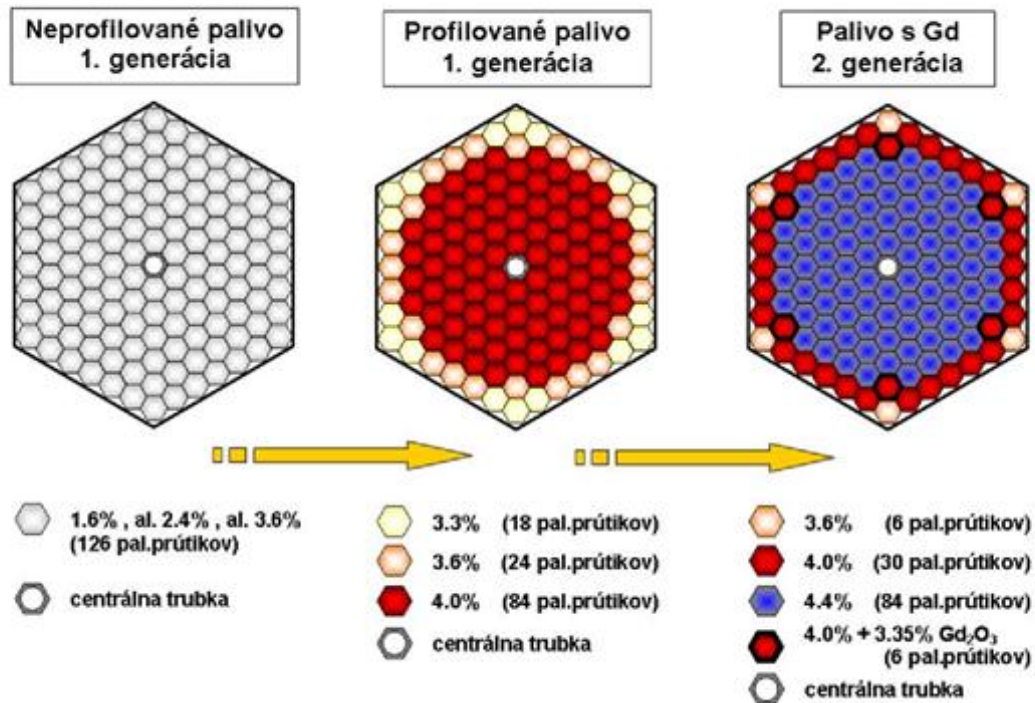
Tab. 1 Vývoj palivových kaziet reaktora VVER 440 [5]

Rok	pred 1998	po 1998	po 2003	po 2010
Typ palivovej kazety	s opláštením	s opláštením	2. generácia, s opláštením	2. / 3. generácia
Typ palivového elementu	neprofilovaný	profilovaný	profilovaný, U+Gd	profilovaný, U+Gd
Obohatenie paliva [%U ²³⁵]	3,6	3,82	4,25 / 4,38	do 4,87
Navážka čerstvých palivových kaziet [ks]	105	84	66	60
Vyhorenie [MWd/kgU]	36	45	57	65
Palivový cyklus	3-ročný	4-ročný	5-ročný	6-ročný
Spotreba prírodného uránu [kg/MWd]	0,256	0,209	0,184	0,180

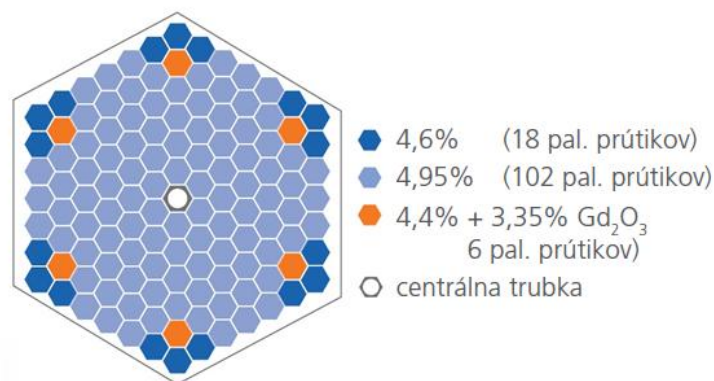
Dôležitou zmenou bol prechod z neprofilovaného paliva na palivo profilované. Podstatou profilovaného paliva je, že po priereze kazety majú palivové elementy rôzne obohatenie. Tým sa dosiahlo rovnomernejšieho rozloženia neutrónového toku po polomere kazety, čo umožnilo zvýšiť obohatenie paliva. Tieto dva druhy paliva spadajú do tzv. 1. generácie paliva. [6]

Ďalšia generácia paliva prišla s výraznou inováciou, a to so zavedením vyhorevajúceho absorbátora. Ako absorbátor neutrónov je používaný prvok gadolínium, ktorý je do paliva pridávaný vo forme oxidu gadolinitého (Gd₂O₃). Gadolínium na začiatku kampane pohlcuje tepelné neutróny, čím znižuje vysokú reaktivitu čerstvého paliva. Počas kampane reaktivita paliva postupne klesá a zároveň gadolínium v palive vyhorieva. Tieto dva efekty spôsobia, že celková reaktivita paliva má na začiatku kampane približne konštantný priebeh. Zavedenie vyhorevajúceho absorbátora umožnilo ďalšie zvýšenie obohatenia paliva, a tým aj jeho

vyššie vyhorenie. Predĺžil sa tak palivový cyklus a zmenšil sa počet potrebných čerstvých palivových kaziet. Na obr. 2-1 a obr. 2-2 je možné vidieť ako sa postupne menilo obohatenie a usporiadanie jednotlivých palivových elementov v palivovej kazete. [7]



Obr. 2-1 Rezy palivovými kazetami so stredným obohatením 3,6 %; 3,82 % a 4,25 % [8]



Obr. 2-2 Rez palivovou kazetou so stredným obohatením 4,87 % [7]

2.1.2 Aktuálne používané jadrové palivo

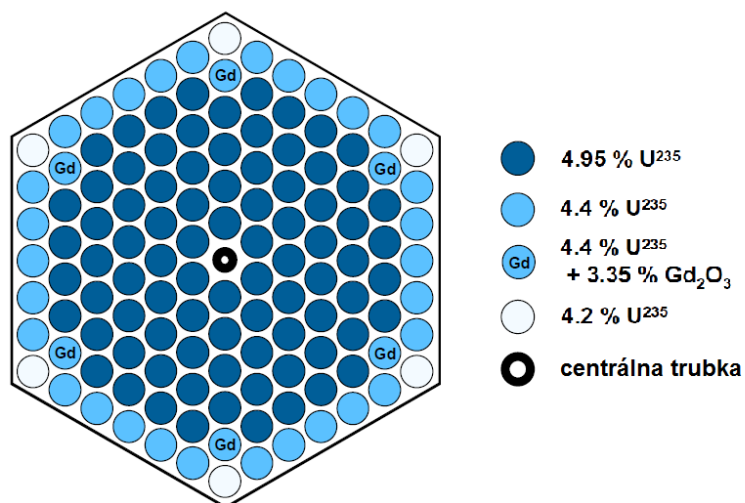
V elektrárni Dukovany sa od roku 2009 používa gadolíniové palivo 2. generácie so stredným obohatením 4,38 %. Toto palivo umožnilo zvýšenie tepelného výkonu reaktora na 105 % nominálneho výkonu. V blízkej budúcnosti sa počíta so zavedením gadolíniového paliva so stredným obohatením 4,76 %, ktoré je popísané v nasledujúcej podkapitole. [9]

V slovenských elektrárnach sa (od roku 2011 v Mochovciach a od roku 2012 v Jaslovských Bohuniciach) používa gadolíniové palivo 2. generácie so stredným obohatením 4,87 %. Zavedenie tohto paliva prinieslo niekoľko pozitív, ktorými sú napríklad zvýšenie tepelného výkonu z 1375 na 1471 MW, zvýšenie počtu efektívnych dní paliva a predĺženie palivového cyklu na 6 rokov. [10]

2.1.3 Budúce smerovanie v oblasti vývoja jadrového paliva

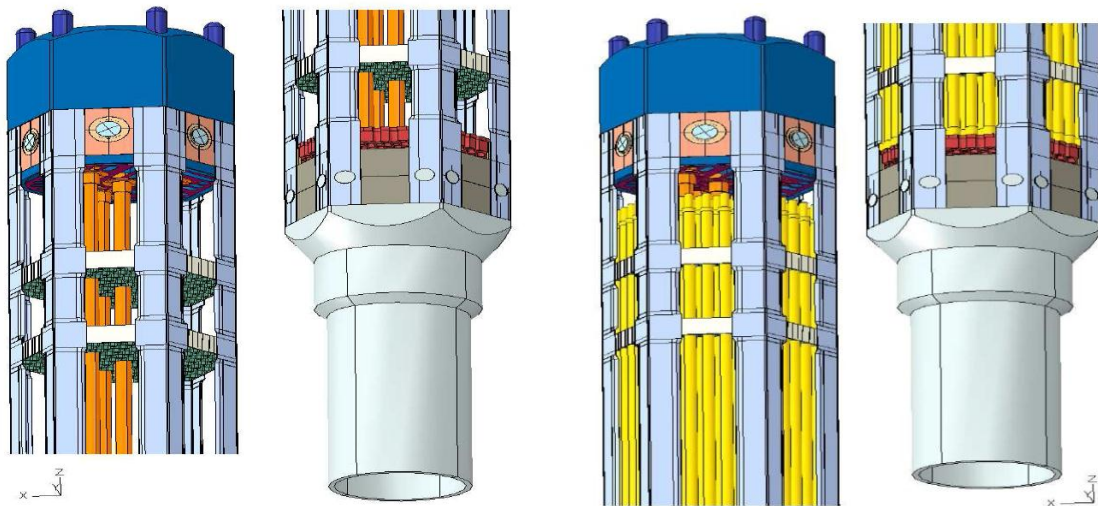
Vývoj palivových kaziet smeruje k vyššej efektívnosti využitia jadrového paliva. Jedným z hlavným prostriedkov ako sa tohto efektu dá dosiahnuť je zvýšenie množstva paliva v palivovej kazete.

Nové gadolíniové palivo 2. generácie so stredným obohatením 4,76 % obsahuje oproti pôvodnému palivu druhej generácie približne o 8 % viac uránu. Dosiahlo sa toho zväčšením priemeru palivovej tablety zo 7,6 mm na 7,8 mm a odstránením centrálného otvoru. Aby zostali zachované vonkajšie rozmery palivových elementov, musela byť pri zavedení väčších tabliet zmenšená hrúbka pokrytia. Obohatenie jednotlivých palivových elementov a ich rozmiestnenie v palivovej kazete je možno vidieť na obr. 2-3. Prínosom pri použití tohto paliva, by malo byť zníženie počtu potrebných čerstvých palivových kaziet o 7 % oproti gadolíniovému palivu 2. generácie s obohatením 4,87 %. [5]

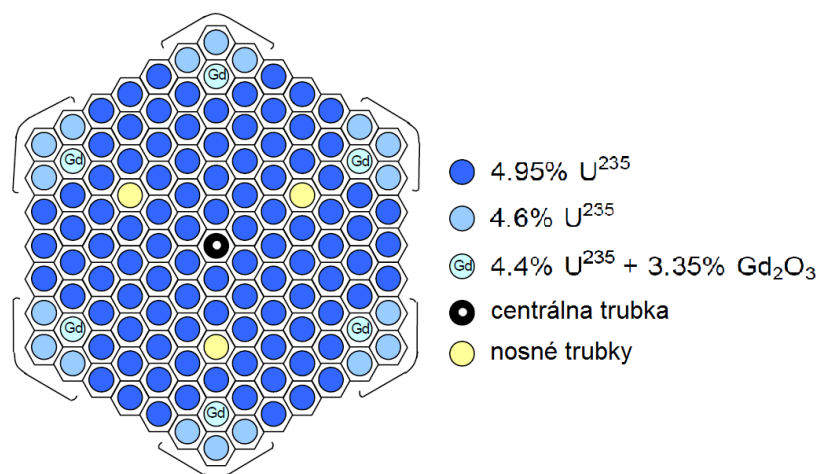


Obr. 2-3 Rez palivovou kazetou so stredným obohatením 4,76 % [9]

Ďalšou možnou alternatívou je palivo 3. generácie. Toto palivo má oproti predchádzajúcim generáciám iné konštrukčné riešenie palivovej kazety. Ako je možné vidieť na obr. 2-4, kazeta nemá po celom svojom obvode plášť, ale kryté sú len hrany kazety. Nakoľko plášť mal pri predchádzajúcich koncepciách aj nosnú funkciu, museli byť 3 palivové elementy nahradené nosnými trúbkami. Absencia plášťa dovoľuje umiestniť palivové elementy s väčším krokom v distančnej mriežke (z 12,3 mm na 12,6 mm), a tým zlepšiť moderáciu neutrónov. Stredné obohatenie paliva je 4,87 %. Obohatenie jednotlivých palivových elementov a ich rozmiestnenie v palivovej kazete je možno vidieť na obr. 2-5. Palivová tableta je bez centrálného otvoru a má priemer 7,8 mm. Množstvo UO_2 v kazete je o 4,5 % vyššie ako pri palive s tabletami o priemere 7,6 mm s centrálnym otvorom. Výsledným efektom zavedenia tohto nového druhu paliva, by malo byť zvýšenie efektívnosti spotreby paliva, a to až o 10 % v porovnaní s palivom druhej generácie s obohatením 4,87 %.



Obr. 2-4 Model palivovej kazety 3. generácie bez palivových elementov (vľavo) a s palivovými elementmi (vpravo) [9]



Obr. 2-5 Rez palivovou kazetou 3. generácie [9]

2.2 Palivo reaktora VVER 1000

2.2.1 Jadrové palivo používané v minulosti

V roku 2000 bolo do jadrovej elektrárne Temelín zavezené prvé jadrové palivo. Jednalo sa o palivové kazety typu VVANTAGE-6 vyrábané spoločnosťou Westinghouse. Tieto palivové kazety mali po priereze rôzne obohatenie palivových elementov a ako vyhorievajúci absorbátor bol použitý ZrB_2 . Pri 10-ročnej prevádzke týchto palivových kaziet, došlo vo viacerých prípadoch ku komplikáciám, akými boli napríklad netesnosti palivových elementov spôsobené trením palivového elementu o distančnú mriežku a prehýbanie palivových kaziet. Na základe týchto problémov, bol dizajn palivových kaziet niekoľkokrát inovovaný. Jednalo sa predovšetkým o spevnenie konštrukcie palivovej kazety, úpravu horných nastavcov a distančných mriežok. Tieto zmeny nakoniec prispeli k zmenšeniu počtu porúch palivových elementov. [11]

2.2.2 Aktuálne používané jadrové palivo

Od roku 2010 sa v elektrárni Temelín používa nový typ paliva. Ide o palivové kazety s označením TVSA-T vyrábané ruskou spoločnosťou TVEL. Tieto kazety boli špeciálne navrhnuté pre elektrárňu Temelín, aby boli kompatibilné s palivom VVANTAGE-6. Na rozdiel od predchádzajúcich kaziet majú kazety TVSA-T opláštené uhly, čo prispelo k spevneniu konštrukcie a zamedzeniu problémov vzniknutých prehýnaním palivových kaziet. K zmenám došlo aj v konštrukcii a umiestnení distančných a zmiešavacích mriežok. Palivo je po priereze kazety profilované a ako vyhorievajúci absorbátor je použitý Gd_2O_3 . Obohatenie paliva môže byť až do 4,95 %. Palivové tablety majú priemer 7,6 mm s centrálnym otvorom o priemere 1,2 mm. Pri použití tohto paliva sa počíta s 5-ročným palivovým cyklom s 320 efektívnymi dňami. Dobré výsledky pri prevádzke nového paliva umožnili zvýšenie tepelného výkonu elektrárne na 104 %. [5, 12]

2.2.3 Budúce smerovanie v oblasti vývoja jadrového paliva

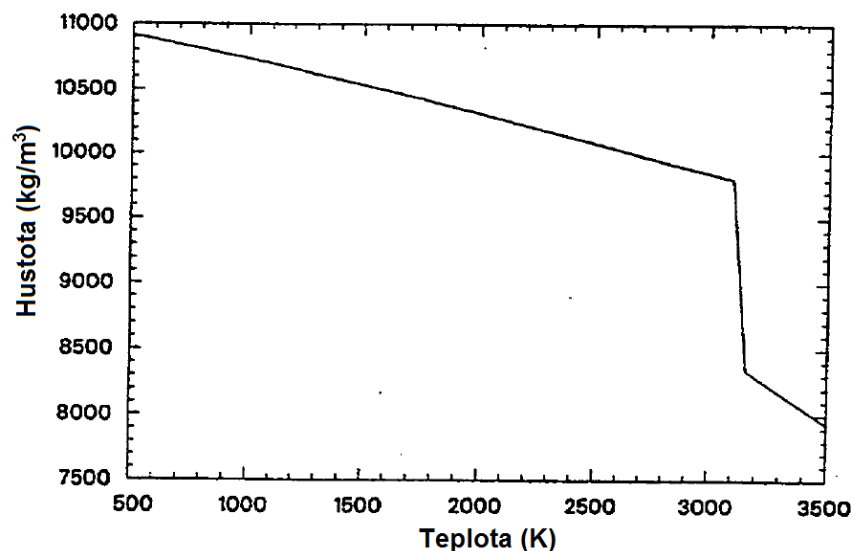
Vývoj palivových kaziet pre reaktory VVER 1000 smeruje k zvýšeniu množstva UO_2 v palivových kazetách a ku zlepšeniu prestupu tepla z palivových elementov do chladiča. Väčšie množstvo paliva má byť dosiahnuté použitím palivových tabliet bez centrálného otvoru s vonkajším priemerom 7,8 mm a lepším prestup tepla zavedením efektívnejších zmiešavacích mriežok. Tieto dva efekty by mali viesť k zvýšeniu efektívnosti využitia jadrového paliva. [12]

3 Základné vlastnosti UO_2

V nasledujúcej kapitole sú popísané niektoré vybrané základné vlastnosti UO_2 . Väčšina vlastností je závislá od teploty, vyhorenia paliva a ďalších parametroch. Niektoré z opísaných vlastností boli použité pri výpočtovej analýze spracovanej v kapitole 7.

3.1 Hustota

Hustota čistého UO_2 je pri teplote 20°C 10970 kg/m^3 . Hustota paliva je závislá na viacerých faktoroch, akými sú napríklad teplota, stechiometria, pórovitosť a vyhorenie paliva. Závislosť teoretickej hustoty UO_2 na teplote je možno vidieť v grafe 3-1. Pri výrobe dosahuje palivo len približne 94–96 % teoretickej hustoty UO_2 , čo je zapríčinené pórovitosťou keramického materiálu. Na začiatku vyhorievania dochádza k denzifikácii paliva, čím sa zvyšuje jeho hustota. Najvyššiu hodnotu nadobúda hustota paliva pri vyhorení 5–15 MWd/kgU. Pri ďalšom ožarovaní začína prevládať objemový rast paliva a hustota paliva postupne klesá. [13]



Graf 3-1 Teoretická hustota UO_2 [14]

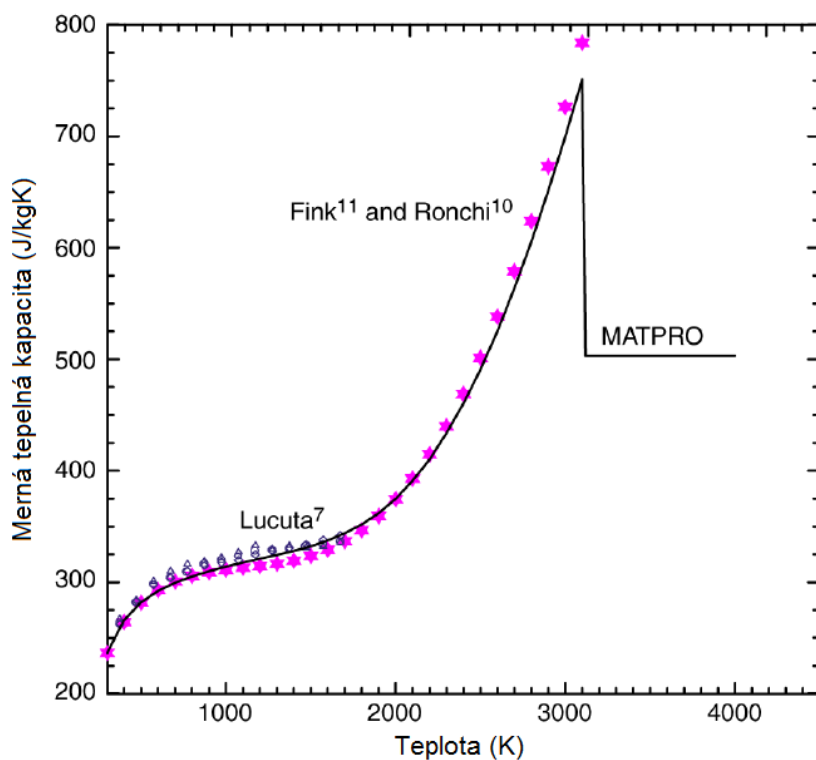
3.2 Teplota tavenia

Teplota tavenia čistého UO_2 je približne 2840°C . Pokiaľ chemické zloženie paliva neodpovedá stechiometrickému pomeru, napríklad obsah kyslíka je menší, teplota tavenia je nižšia. Počas vyhorievania paliva teplota tavenia UO_2 postupne klesá. Túto závislosť vyjadruje rovnica (1). [14]

$$T_t = 3113,15 - 3,2 \cdot 10^{-3} \cdot FBu \quad [14] \quad (1)$$

3.3 Merná tepelná kapacita

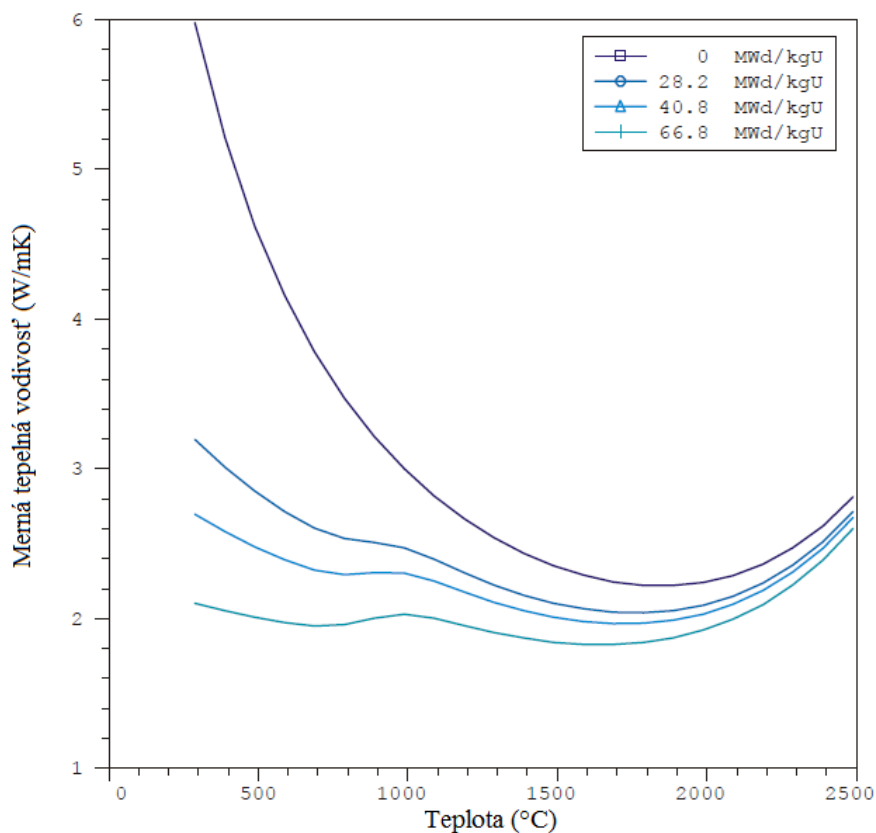
Merná tepelná kapacita UO_2 je závislá na teplote, vyhorení paliva a stechiometrickom pomere uránu a kyslíka v palive. Vplyv vyhorenia a stechiometrie paliva je veľmi malý a môže byť v podstate zanedbaný. Závislosť mernej tepelnej kapacity na teplote je možné vidieť v grafe 3-2. Pri roztavení paliva nadobúda merná tepelná kapacita konštantnej hodnoty, a to 502,95 J/kgK. [13]



Graf 3-2 Merná tepelná kapacita UO_2 [13]

3.4 Tepelná vodivosť

Súčiniteľ tepelnej vodivosti UO_2 , ako je možné vidieť v grafe 3-3, vykazuje silnú závislosť na teplote. Približne do teploty 1800°C tepelná vodivosť materiálu klesá a po prekročení tohto minima, nastáva mierny nárast. Tepelná vodivosť je taktiež závislá na stechiometrii paliva, obsahu plutónia a štádiu vyhorenia paliva. Počas vyhorievania dochádza k popraskaniu paliva, hromadeniu plyných produktov v palive a k zvýšeniu jeho pórovitosti. Všetky tieto efekty negatívne vplyvajú na tepelnú vodivosť UO_2 . V grafe 3-3 je taktiež možné vidieť, ako tepelná vodivosť UO_2 pri vyššom vyhorení paliva prudko klesá. [15]



Graf 3-3 Merná tepelná vodivosť UO_2 v závislosti na teplote a vyhorení [15]

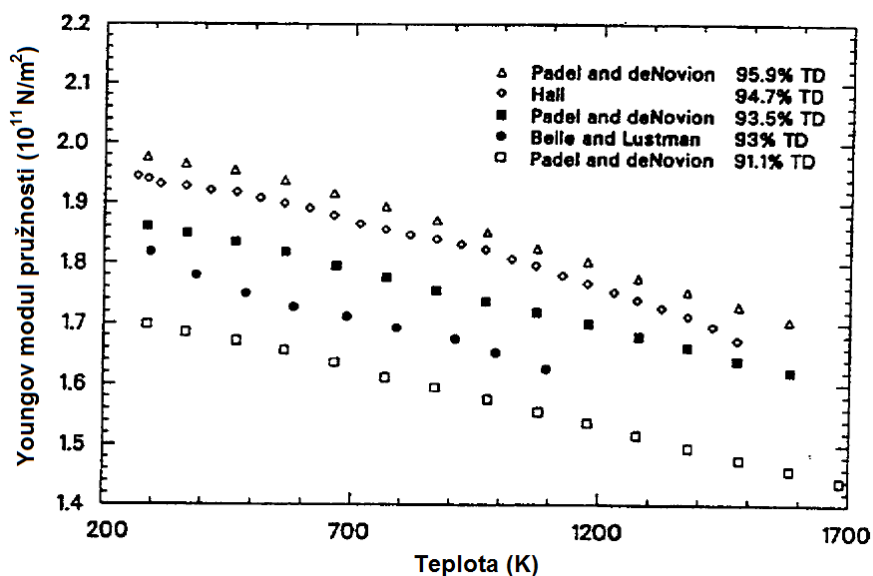
3.5 Tepelná rozťažnosť

Ako väčšina materiálov aj UO_2 sa pri zahrievaní rozťahuje. Mieru tejto expanzie vyjadruje súčiniteľ lineárnej rozťažnosti paliva. Tento súčiniteľ je závislý na teplote a s narastajúcou teplotou nadobúda vyšších hodnôt. [2]

$$\beta_{\text{UO}_2} = 8,42 \cdot 10^{-6} + 2,148 \cdot 10^{-9} \cdot t_{\text{UO}_2} \quad [2] \quad (2)$$

3.6 Mechanické charakteristiky

Youngov modul pružnosti UO_2 si na začiatku vyhorievania paliva zachováva približne konštantnú hodnotu a od vyhorenia 30 MWd/kgU začína pomaly klesať. Silnejšiu závislosť vykazuje modul pružnosti na teplote a hustote paliva. Z grafu 3-4 je možné vidieť, že s narastajúcou teplotou Youngov modul pružnosti klesá a pri nižšej hustote paliva nadobúda nižších hodnôt. Hodnota Poissonovho čísla sa vplyvom teploty nemení a pre UO_2 je udávaná 0,316. [14]



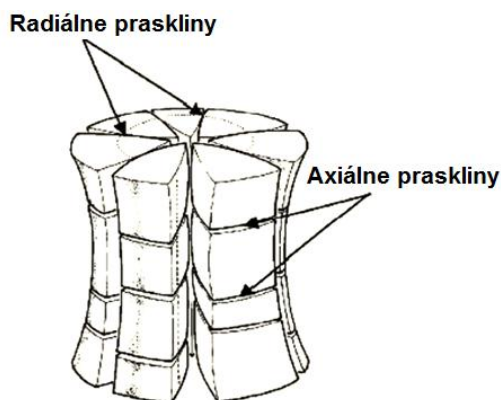
Graf 3-4 Youngov modul pružnosti v závislosti na teplote a teoretickej hustote paliva [14]

4 Procesy ovplyvňujúce jadrové palivo počas jeho vyhorievania

Počas vyhorievania paliva dochádza k zásadným zmenám niektorých jeho vlastností. Menia sa jeho tepelné vlastnosti, mechanické vlastnosti, ako aj objem a tvar palivovej tablety. Ďalej sa tu vyskytujú určité fenomény, ktoré sú priamym dôsledkom ožarovania. Tieto jednotlivé fenomény spolu úzko súvisia a navzájom sa ovplyvňujú, a preto je presné modelovanie správania paliva veľmi náročné. Napriek tomu je ale dôležité venovať týmto zmenám dostatočnú pozornosť a pri podrobných analýzach s nimi uvažovať.

4.1 Praskanie paliva

K praskaniu palivových tabliet dochádza už pri nahrievaní paliva na prevádzkovú teplotu. Približne pri lineárnom výkone palivového elementu 50 W/cm, sa v palive začínajú tvoriť prvé trhliny. Pri zvýšení lineárneho výkonu na 300 W/cm, čo je približný výkon pri bežnej prevádzke, sa v priečnom reze tablety vytvorí 6 až 11 fragmentov. Popraskanie je spôsobené rozdielnymi teplotami v osi palivovej tablety a na jej okraji. Dôsledkom rozdielnych teplôt je vznik teplotného gradientu a veľkého tepelného namáhania tablety. Stred tablety má tendenciu expandovať viac ako jej povrch, a preto vzniká v jej strede tlakové a na okraji ťahové obvodové napätie. Nakoľko keramické materiály, medzi ktoré sa radí aj UO_2 , majú vo všeobecnosti medzi pevnosti v tlaku omnoho vyššiu ako v ťahu, vznikajú na okrajoch tablety trhliny. Tieto trhliny sa šíria smerom do stredu, až kým obvodové napätie neklesne pod hodnotu šírenia sa trhliny v materiáli pre danú teplotu. [16, 17]



Obr. 4-1 Popraskanie palivovej tablety [18]

4.2 Uzatváranie trhlín

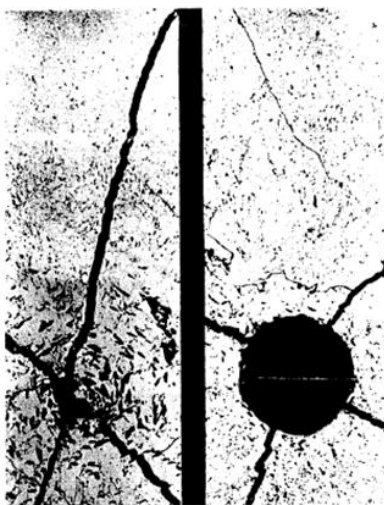
Ak sa počas vyhorievania zvýši teplota paliva až do plastickej oblasti, nastáva jav pri ktorom sa uzatvárajú trhliny vzniknuté v palive (tzv. crack healing). Tento proces sa začína v stredovej oblasti tablety, kde sa nachádza najvyššia teplota a je okrem teploty závislý aj na čase. Ďalšími faktormi ovplyvňujúcimi uzatváranie trhlín sú realokácie paliva, objemový rast či únik plyných produktov štiepenia. [17]

4.3 Realokácie paliva

Jednotlivé fragmenty, vytvorené v palivovej tablete počas jej popraskania, sa môžu vďaka rozdielnej tepelnej expanzii, objemovému rastu, denzifikácii paliva a ďalším mechanizmom postupne mierne presúvať. Nakoľko všetky tieto mechanizmy sa navzájom ovplyvňujú je modelovanie realokácií paliva veľmi zložitým problémom. Napriek tomu ale musí byť princíp realokácií známy, pretože popraskané časti tablety môžu v určitých miestach tlačiť na pokrytie, a tým vytvárať miesta s koncentraciami napätí. [17]

4.4 Tvorba centrálného otvoru

Pokiaľ bola palivová tableta vyrobená s centrálnym otvorom, jeho priemer sa počas vyhorievania paliva mení len nepatrne. U tabliet bez centrálného otvoru dochádza pri zvýšení teploty nad 2000 °C k pohybu pórov a dutín do stredu tablety. Tento jav má za následok, že počas vyhorievania sa môže vytvoriť centrálna dutina aj u tabliet, ktoré boli vyrobené bez nej. Nakoľko ide o veľmi vysokú teplotu, ktorá sa počas bežnej prevádzky v palive nevyskytuje, je tvorba centrálného otvoru obmedzená len na výnimočné stavy alebo pre reaktory s veľmi vysokým merným výkonom. [2]



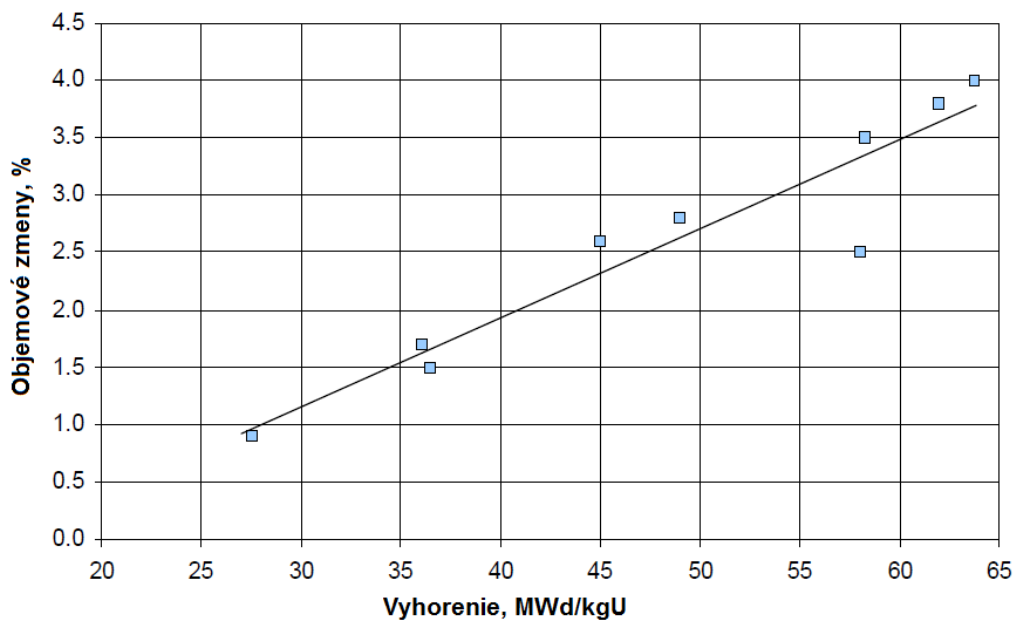
Obr. 4-2 Tvorba centrálného otvoru v palivovej tablete [19]

4.5 Denzifikácia

Hlavnou príčinou denzifikácie (zhusťovania) paliva je odstránenie zvyškovej pórovitosti malej veľkosti ($< 1 \mu\text{m}$), ktorá zostala v palive po spekaní. Tento proces musí byť tepelne aktivovaný a prebieha pomocou difúzie vakancií z pórov. Rýchlosť difúzie je závislá na teplote, ako aj na rýchlosti prebiehajúcich štiepných reakcií, pretože tieto reakcie spôsobujú vznik bodových porúch v kryštalickej mriežke. Nakoľko zhusťovanie je priamo závislé na pórovitosti materiálu, hlavným faktorom ktorý naň vplýva je mikroštruktúra paliva vznikajúca pri výrobe. Výsledkom zhusťovania paliva je zmenšenie dĺžky stĺpca paliva, ako aj zmenšenie priemeru palivovej tablety. [20]

4.6 Objemový rast

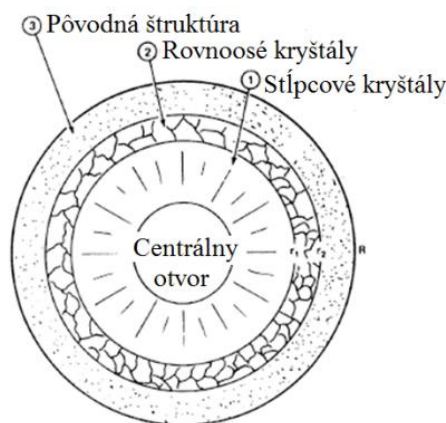
Objemový rast je jedným z dôležitých fenoménov ovplyvňujúcich jadrové palivo pri jeho vyššom vyhorení. Jeho dôsledkom je zväčšovanie priemeru palivovej tablety, a tým zmenšovanie medzery medzi palivom a pokrytím. Tento jav je spôsobený nahromadením produktov štiepenia v palive a ich následnou difúziou. Najväčšou mierou prispievajú k objemovému rastu plynné produkty štiepenia, ktoré difundujú na hranicu zrn, kde sa zgrupujú do malých bubliniek. Tieto bublinky postupne rastú a významnou mierou ovplyvňujú objemový rast paliva. Na začiatku vyhorenia sa objemový rast paliva neprejavuje veľmi výrazne. Je to spôsobené pórovitosťou UO_2 a postupným zapĺňaním týchto pórov produktmi štiepenia. Po zaplnení pórov nastáva objemový rast, ktorý má približne lineárny priebeh s hodnotou 0,6 obj.% na 10 MWd/kgU. Celkový nárast objemu sa pohybuje na hodnote 3 – 4 %. [21, 22]



Graf 4-1 Objemový rast UO_2 [22]

4.7 Zmena kryštalickej štruktúry paliva

Počas pobytu palivovej tablety v reaktore sa môžu v jej radiálnom smere vytvoriť až tri oblasti s rozdielnou kryštalickou štruktúrou, z ktorých každá má iné tepelno-fyzikálne vlastnosti. Po presiahnutí teploty 1700°C , sa v centrálnej oblasti palivovej tablety vytvára štruktúra so stĺpcovými kryštálmi. V oblasti, kde sa teploty pohybujú od 1450 do 1750°C , dochádza k tvorbe štruktúry s rovnoosými kryštálmi. Na okraji palivových tabliet, kde teplota nedosahuje vyšších teplôt než 1450°C , zostáva zachovaná pôvodná štruktúra paliva. [2]



Obr. 4-3 Kryštalické štruktúry vytvorené v palivovej tablete [19]

4.8 Reštrukturalizácia paliva

Reštrukturalizácia paliva sa objavuje v okrajových častiach palivových tabliet pri lokálnom vyhorení okolo 70 MWd/kgU . Novovzniknutá štruktúra (tzv. HBS – high burnup structure) je charakterizovaná rozdelením pôvodných zŕn s veľkosťou $6 - 10 \mu\text{m}$ na zrná s veľkosťou $0,1 - 0,3 \mu\text{m}$. V týchto oblastiach dochádza taktiež k zvýšeniu pórovitosti materiálu, a to až na 20% . Tieto štrukturálne zmeny majú vplyv na tepelné a mechanické vlastnosti paliva, ako aj na únik plyných produktov štiepenia. Reštrukturalizácia paliva je priamym dôsledkom nahromadenia poškodení vzniknutých v palive vplyvom ožarovania. [23]

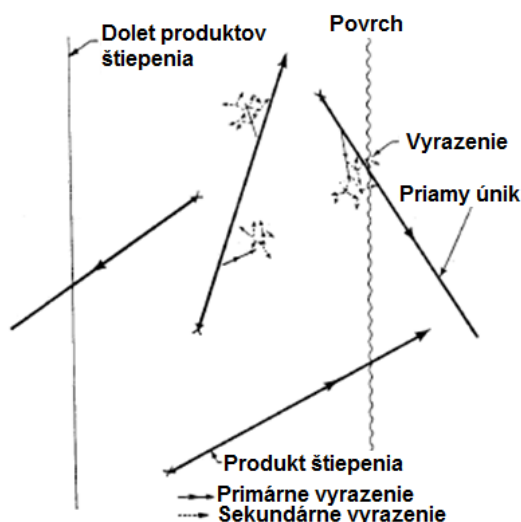
4.9 Uvoľňovanie plyných produktov štiepenia

Pri rozštiepení jedného jadra uránu vznikajú dve jadrá ľahších prvkov. Tieto prvky môžu mať pevné, kvapalné alebo plyné skupenstvo. Asi 25% z celkového množstva produktov štiepenia tvoria plyny, ktorých hlavnými zástupcami sú xenón a kryptón. Tieto plyny, buď zostanú uväznené v palive alebo uniknú do voľného priestoru v palivovom elemente. V prvom prípade spôsobujú objemový rast paliva a zvýšenie jeho teploty zapríčinené zhoršením jeho tepelnej vodivosti. V druhom prípade spôsobujú nárast tlaku v palivovom elemente (až o 10 MPa), zníženie tepelnej vodivosti plynnej medzery medzi palivom a pokrytím a podnecujú koróziu pokrytia z jeho vnútornej strany. Plyné produkty štiepenia môžu unikať z paliva pomocou rôznych mechanizmov, z ktorých je dominantná difúzia. Pri prekročení teploty 1000°C nastáva v palive difúzia atómov a nad teplotou 1600°C difundujú v palive už aj vytvorené bublinky. Difúzia prebieha hlavne po hraniciach

zrn, a preto má na ňu zásadný vplyv štruktúra paliva. Je to pozorovateľné hlavne pri vysokom vyhorení paliva, kde v oblasti reštrukturalizácie paliva dochádza k veľkému úniku plyných produktov štiepenia. [24, 25]

Ďalšími z mechanizmov sú tzv. priamy únik a únik vyrazením. Po rozštiepení majú plyné produkty veľkú kinetickú energiu a ich dolet je približne 10 μm . Pokiaľ sa povrch nachádza v tejto oblasti a smer hybnosti je smerom k povrchu paliva, dôjde k priamemu úniku plyných produktov štiepenia. K úniku vyrazením dochádza, ak sa atóm plynu nachádza dostatočne blízko povrchu a dôjde ku kolízii tohto atómu s inými produktmi štiepenia. Únik môže nastať priamym vyrazením alebo pomocou tzv. kaskády kolízií. [24]

Veľký vplyv na difúzny únik, ako aj na priamy únik a únik vyrazením má popraskanie paliva. Pri popraskaní dochádza k nárastu merného povrchu paliva, a tým k zvýšeniu pravdepodobnosti úniku. [24]



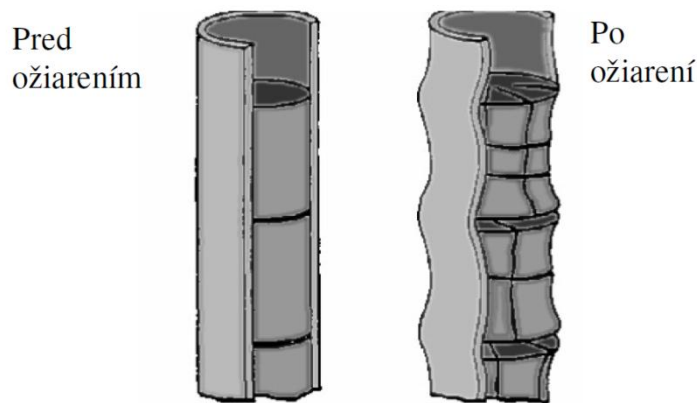
Obr. 4-4 Uvoľňovanie plyných produktov štiepenia pomocou mechanizmu priameho úniku a úniku vyrazením [25]

4.10 Tečenie paliva

Pri mechanickom zaťažení materiálov za vyšších teplôt, môže dochádzať v týchto materiáloch k plastickým deformáciám, aj keď u nich nebola prekročená medza klzu. Tento jav je označovaný ako tečenie materiálu alebo creep. V jadrovom palive, ktoré sa používa v reaktore, je creep spôsobený dvomi mechanizmami, a to teplotným tečením a radiačným tečením. Nakoľko jedným z hlavných faktorov ovplyvňujúcim rýchlosť tečenia je teplota, vznikajú v palivovej tablete dve oblasti s rozdielnymi mechanizmami creepu. V centrálnej oblasti s teplotami nad 1000 °C prevláda teplotný creep a v oblasti s nižšou teplotou, nad 500 °C, je dominantný radiačný creep. Creep je závislý aj na ďalších faktoroch ako je čas, veľkosť zrn, rýchlosť prebiehajúcich štiepných reakcií, stechiometria UO_2 a v neposlednom rade na veľkosti zaťaženia. Pri nízkych zaťaženiach vykazuje creep lineárnu závislosť na zaťažení a je spôsobený hlavne difúziou vakancií. Avšak pri veľkých zaťaženiach je mechanizmus creepu založený na presune dislokácií, pri ktorom je závislosť už exponenciálna. [26]

4.11 Zmena tvaru tablety

Priebeh teploty tablety sa v jej radiálnom smere značne mení. Rozdielne teploty v strede a na okraji palivovej tablety spôsobujú, že sa konce tabliet rozťahujú v axiálnom smere viac v centrálnej oblasti ako na okraji a zároveň sa stred tablety rozťahuje menej ako jej povrch. Tieto dva efekty spôsobia, že konce tabliet sa vyhýňajú a tableta si nezachováva svoj pôvodný valcový tvar. Pri vyhorevaní a zmenšení medzery medzi palivom a pokrytím, môže vďaka tomuto efektu dôjsť na koncoch tablety ku kontaktu tablety s pokrytím. V takýchto miestach následne dochádza k lokálnemu zvýšeniu napätia v pokrytí. Materiál pokrytia sa vydúva a nadobúda tzv. bambusovitý tvar. [27]



Obr. 4-5 Vydúvanie pokrytia palivových elementov [28]

4.12 Zmena teploty paliva

Pri zavezení čerstvého paliva do reaktora je medzera medzi palivom a pokrytím vyplnená čistým héliom. Je to z dôvodu dosiahnutia lepšej tepelnej vodivosti medzi palivom a pokrytím. Počas vyhorevania sa z paliva uvoľňujú plynné produkty štiepenia, ktoré negatívne ovplyvňujú tepelnú vodivosť medzery. Hlavne je tak v prípade xenónu, ktorý má teplotnú vodivosť rádovo menšiu ako hélium. Počas vyhorevania sa zhoršuje tepelná vodivosť aj samotného paliva. Je to spôsobené zvyšovaním pórovitosti paliva a popraskaním palivovej tablety. Tieto zhoršené podmienky na prenos tepla, či už v palive alebo v medzere, majú za následok zvýšenie teploty paliva. Zvýšená teplota síce za normálnych prevádzkových podmienok nedosahuje teplotu tavenia UO_2 , ale je dostatočne vysoká na zmenu kryštalickej štruktúry paliva. Počas vyhorevania sa postupne znižuje lineárny výkon palivového elementu a teplota palivovej tablety tak postupne klesá. [2]

5 Základné vlastnosti pokrytia a procesy vyplývajúce z jeho ožarovania

Konštrukčné materiály používané v jadrových reaktoroch sú okrem mechanického a tepelného namáhania vystavené aj silnému neutrónovému toku a širokému spektru žiarenia. Pri posudzovaní radiačného poškodenia materiálov, hrajú najdôležitejšiu rolu neutróny s vyššími energiami. Neutróny pri prechode kryštalickou mriežkou materiálu spôsobujú vyražanie iónov z ich pôvodného miesta, a tým vytvárajú v mriežke vakancie a intersticiálne atómy. Tento jav má za následok zmenu väčšiny vlastností ožarovaného materiálu. Mení sa napríklad medza klzu a pevnosti, ťažnosť, tvrdosť, modul pružnosti, tepelná vodivosť, atď. Na každý materiál vplýva ožarovanie inak, a preto sú aj zmeny vlastností pre každý z materiálov špecifické. [1]

5.1 Chemické zloženie

Ako pri väčšine konštrukčných materiálov aj pri zirkóniových zliatinách používaných v tlakovodných reaktoroch má obsah prímies veľký vplyv na ich vlastnosti. Z tohto dôvodu sú kladené prísne limity na obsahy jednotlivých prvkov v zliatine. V tab. 2 je možné vidieť typické hodnoty vybraných prvkov obsiahnutých v zliatine E110 a v zliatine Zircaloy-4.

Tab. 2 Obsah prímies v zliatine E110 a Zircaloy-4 [29]

Chemický prvok	E110	Zircaloy-4
	Typická hodnota hm. %	
Niób	0,95 ÷ 1,1	-
Cín	< 0,001	1,2 ÷ 1,7
Železo	0,014	0,18 ÷ 0,24
Chróm	-	0,07 ÷ 0,13
Kyslík	0,05 ÷ 0,07	0,09 ÷ 0,1
Dusík	0,003 ÷ 0,004	0,008
Vodík	0,0004 ÷ 0,0007	0,0025
Uhlík	0,03 ÷ 0,007	0,0270
Kremík	0,004 ÷ 0,009	0,005 ÷ 0,012
Hafnium	< 0,008	0,01

5.2 Teplota tavenia a hustota

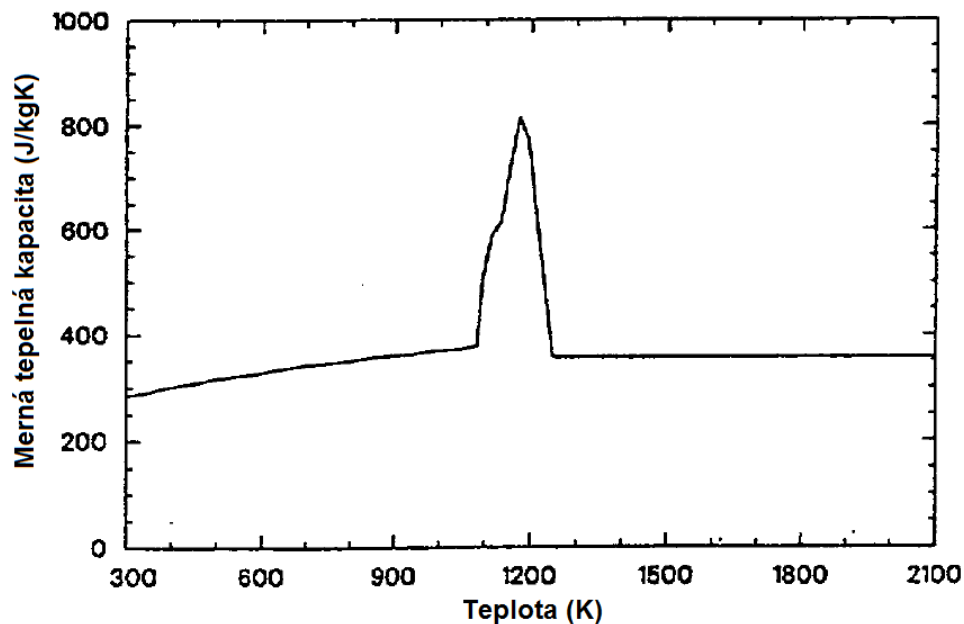
Teplota tavenia zirkóniových zliatin je závislá od množstva kyslíka obsiahnutého v zliatine a pre zliatinu Zircaloy-4 je udávaná 1850 °C. Hustota tejto zliatiny je pri teplote 20 °C 6570 kg/m³. [30]

5.3 Kryštalická štruktúra zirkóniových zliatin

Zirkóniové zliatiny vykazujú pri nižších teplotách hexagonálne tesné usporiadanie mriežky. Pri teplote približne 865 °C dochádza k alotropickej modifikácii α fázy na β fázu, pričom sa mení hexagonálna mriežka na kubickú priestorovo centrovanú mriežku. Veľký vplyv na zmenu fázy majú ostatné chemické prvky pridávané do zliatiny. Napríklad niób znižuje teplotu alotropickej modifikácie až na 615 °C. [31]

5.4 Merná tepelná kapacita

Merná tepelná kapacita zirkóniových zliatin je závislá od fázy v ktorej sa zliatina nachádza. Pri nižších teplotách, kde sa vyskytuje len α fáza, má merná tepelná kapacita mierny stúpajúci trend. Pokiaľ teplota vystúpi do oblasti, v ktorej sa súčasne vyskytuje α a β fáza dochádza k prudkému nárastu mernej tepelnej kapacity. Po prechode touto oblasťou merná tepelná kapacita klesne približne na hodnotu, akú mala na konci α fázy a zachováva si konštantný priebeh. [14]



Graf 5-1 Merná tepelná kapacita zliatiny Zircaloy-4 [14]

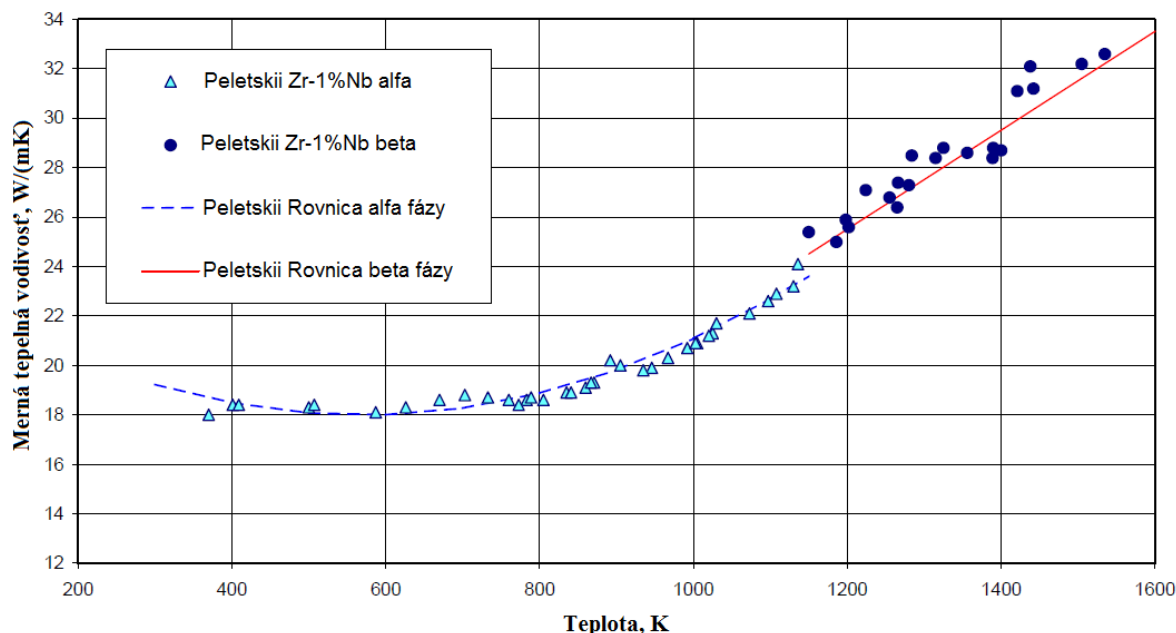
5.5 Tepelná rozťažnosť

Tepelná rozťažnosť zirkóniových zliatin je závislá na teplote. Z rovnice (3) je možné vidieť ako s narastajúcou teplotou lineárne narastá aj súčiniteľ tepelnej rozťažnosti zliatiny. [30]

$$\beta_{Zr} = (5,62 \cdot 10^{-6}) + (3,162 \cdot 10^{-9})t_{Zr} \quad [30] \quad (3)$$

5.6 Tepelná vodivosť

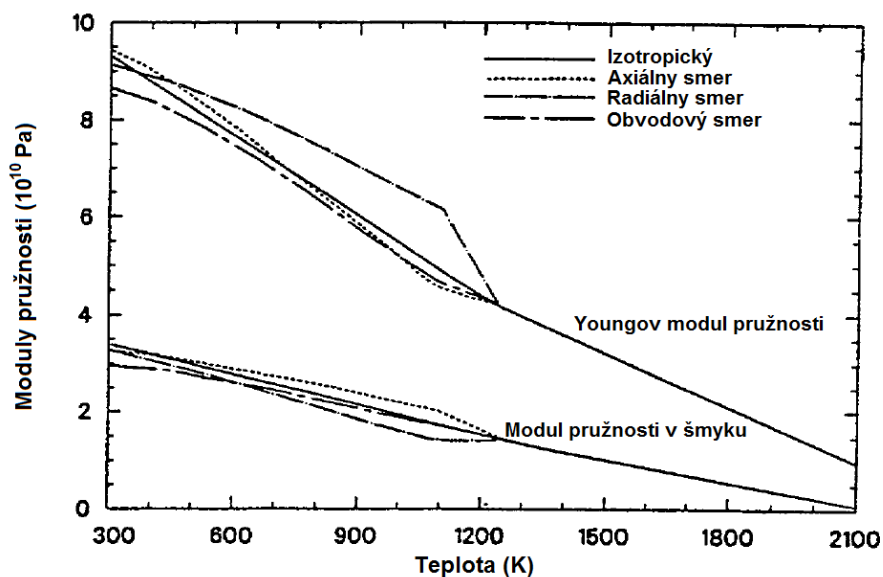
Závislosť súčiniteľu tepelnej vodivosti zirkóniovej zliatiny E110 na teplote je možné vidieť v grafe 5-2. Tepelná vodivosť zliatiny najskôr mierne klesá a po prekročení svojho minima, ktoré dosahuje pri teplote približne 550 K, dochádza následne k jej opätovnému nárastu. [32]



Graf 5-2 Merná tepelná vodivosť zliatiny Zr1%Nb [32]

5.7 Modul pružnosti v ťahu a šmyku

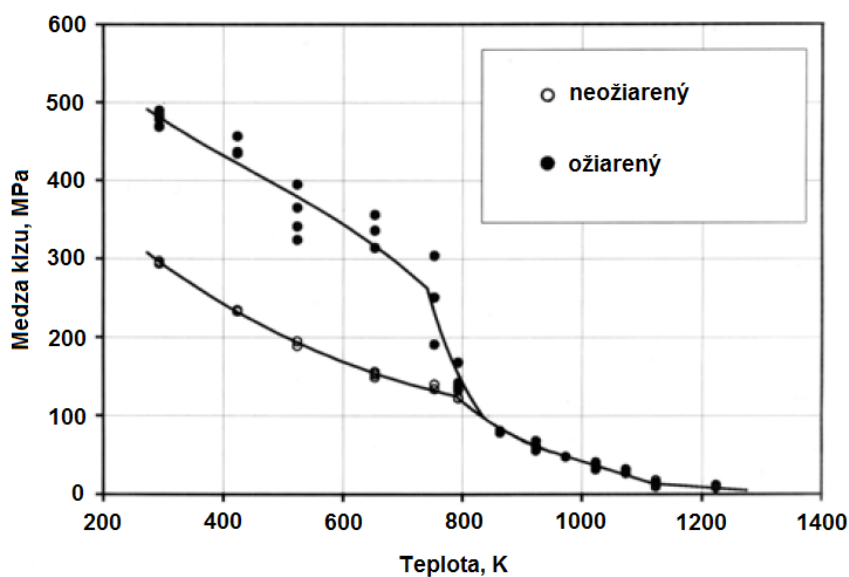
Youngov modul pružnosti v ťahu, ako aj modul pružnosti v šmyku, sú mechanické charakteristiky materiálu, ktoré sú u zirkóniových zliatin závislé na smere zaťažovania a teplote. Ako je možné vidieť v grafe 5-3 pri narastajúcej teplote ich hodnota postupne klesá.



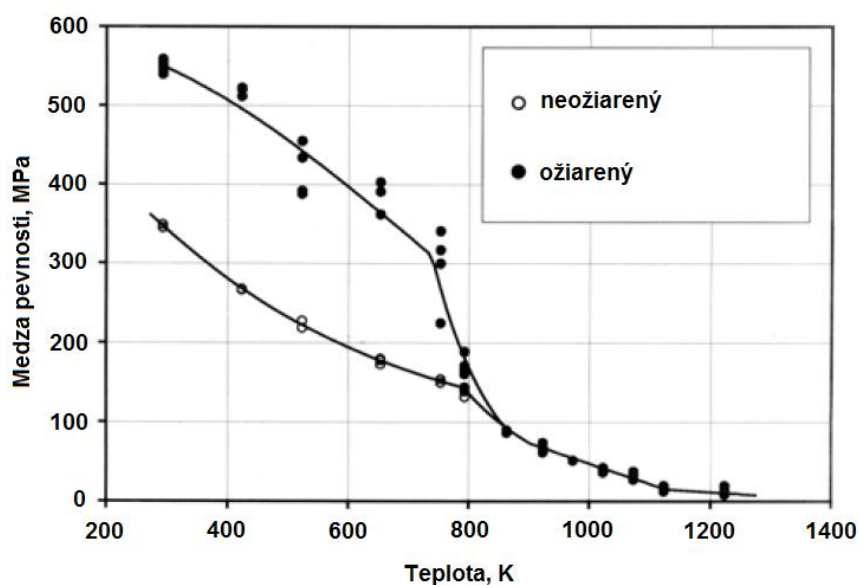
Graf 5-3 Modul pružnosti v ťahu a šmyku zliatiny Zircaloy-4 [14]

5.8 Medza klzu, medza pevnosti, tvrdosť, predĺženie a kontrakcia

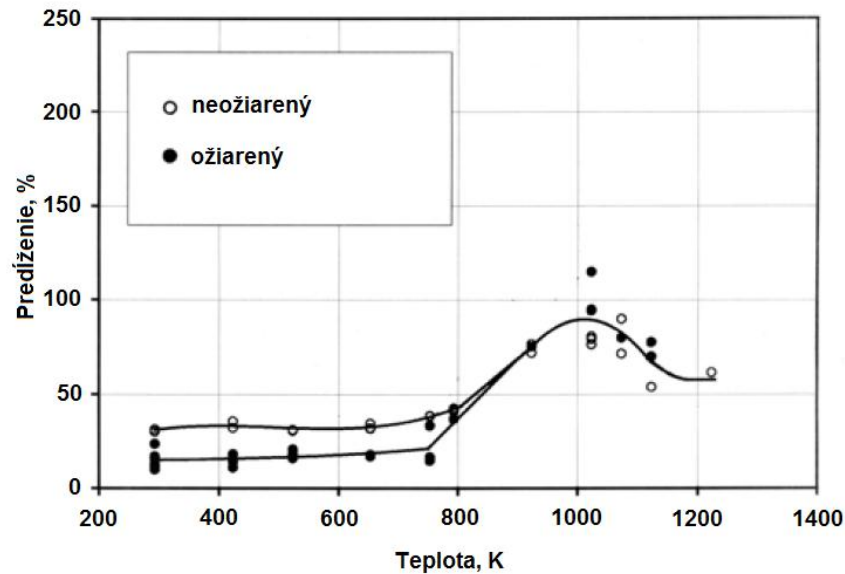
Pri ožarovaní zirkóniových zliatin dochádza k zásadným zmenám niektorých ich mechanických vlastností. Zvyšuje sa medza pevnosti a medza klzu a zároveň dochádza k ich vzájomnému približovaniu, čo má za následok zmenšenie oblasti plastických deformácií. Narastá taktiež tvrdosť materiálu, zatiaľ čo ťažnosť, kontrakcia a húževnatosť klesajú. Závislosť medze klzu, medze pevnosti a ťažnosti na teplote v neožiarenom stave a ožiarenom stave je možné vidieť v grafoch 5-4, 5-5 a 5-6. Ožiarený stav je pre palivo s vyhorením 40 – 50 MWd/kgU. [1, 33]



Graf 5-4 Medza klzu zliatiny E110 [33]



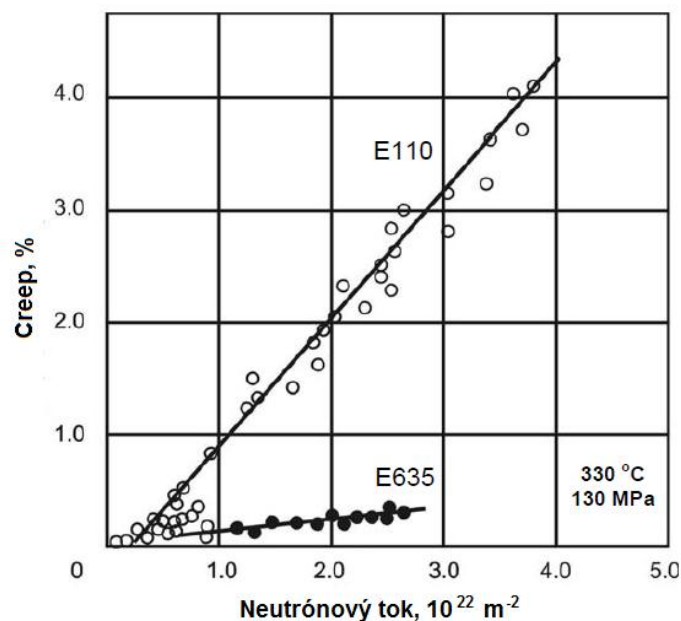
Graf 5-5 Medza pevnosti zliatiny E110 [33]



Graf 5-6 Predĺženie zliatiny E110 [33]

5.9 Creep

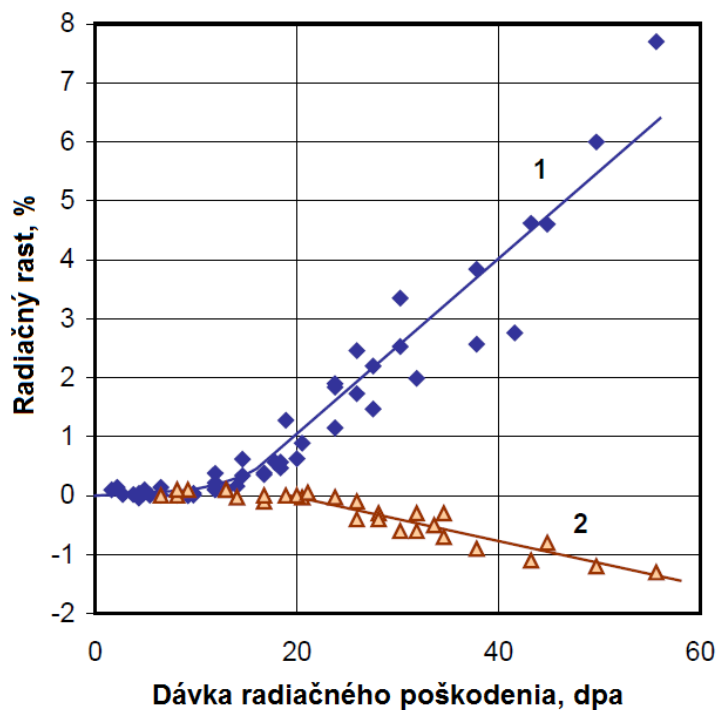
Tečenie (creep) zirkóniových zliatin je spôsobené nielen teplotným tečením, ale aj radiačným tečením. Ide o zložitý mechanizmus, ktorý je okrem radiačnej dávky závislý na teplote, veľkosti záťaže, podmienkach zaťažovania, radiačnom poškodení a mnohých ďalších parametroch. Na každý materiál vplyvajú zaťažovacie podmienky inak, a preto je aj veľkosť creepu u každého materiálu iná. V grafe 5-7 je porovnanie dvoch zirkóniových zliatin E110 (Zr1%Nb) a E635 (Zr2,5%Nb). Z obrázku je zrejmé, že veľkosť creepu zliatiny E635 je niekoľkonásobne menšia ako zliatiny E110. Práve z tohto dôvodu sa zliatina E635 používa na konštrukčné prvky palivových kaziet. [34]



Graf 5-7 Creep zliatin pokrytia palivových elementov ($E > 0,1 \text{ MeV}$) [33]

5.10 Radiačný rast

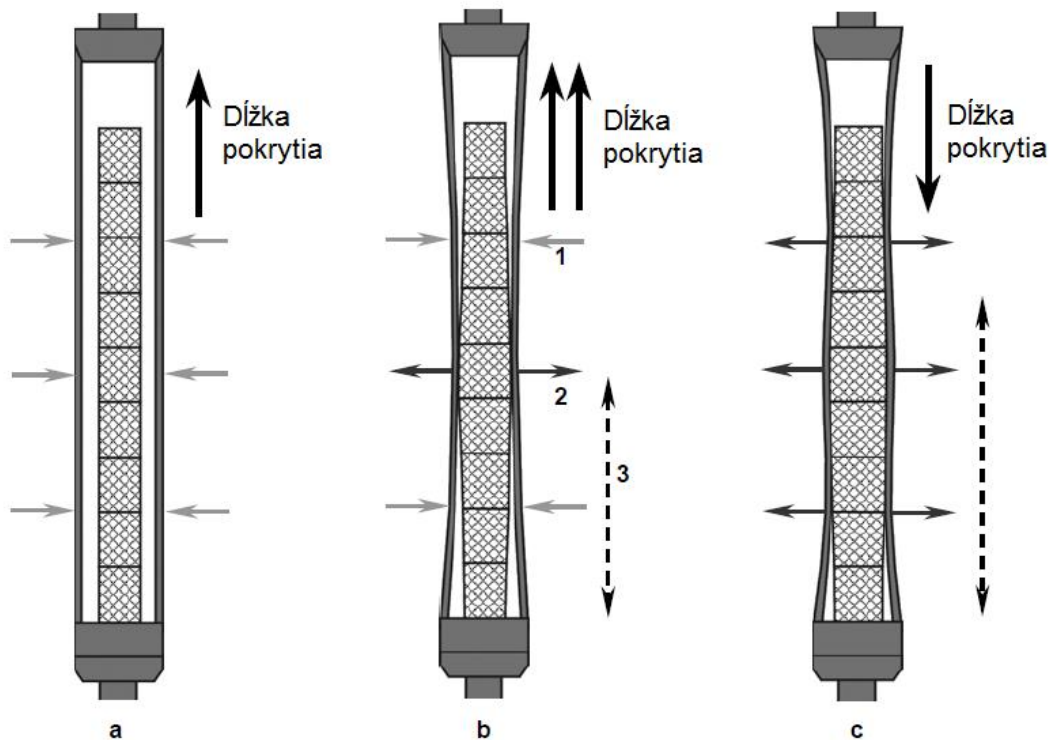
Radiačný rast zirkóniových zliatin je úzko spojený s anizotropiou tohto materiálu a jeho textúrou. Výsledkom radiačného rastu je predlžovanie palivových elementov a zmenšovanie ich priemeru. Závislosť radiačného rastu v pozdĺžnom a tangenciálnom smere na veľkosti dávky radiačného poškodenia je možno vidieť v grafe 5-8. [34]



Graf 5-8 Radiačný rast zliatiny E110 v závislosti na dávke radiačného poškodenia v pozdĺžnom (1) a tangenciálnom smere (2) [34]

5.11 Zmeny priemeru a výšky palivového elementu

Počas pobytu palivových elementov v reaktore sa postupne mierne mení ich geometrický tvar. Táto zmena je spôsobená radiačným rastom a radiačno-teplotným creepom pokrytia. Celý proces je možno vidieť na obr. 5-1. Vonkajší tlak chladiva spolu s creepom spôsobia, že priemer palivových elementov sa začne na začiatku vyhorevania paliva pomaly znižovať. Zároveň so znižujúcim sa priemerom palivového elementu narastá kvôli radiačnému rastu jeho dĺžka. Počas vyhorevania sa medzera medzi palivom a pokrytím postupne znižuje, až nakoniec dôjde k jej úplnému zániku. V takomto prípade sa vďaka interakcii medzi pokrytím a palivovou tabletou začne priemer palivového elementu opäť zväčšovať. Takýto kontakt má tiež za následok zvýšenie tangenciálneho napätia v pokrytí a zmenu smeru predlžovania palivových elementov. Závislosť priemeru a predĺženia palivových elementov na vyhorení paliva je možné vidieť v grafoch 5-9 a 5-10. [34]



Obr. 5-1 Vplyv paliva na pokrytie palivových elementov počas prevádzky [34]

a – pred kontaktom medzi palivom a pokrytím

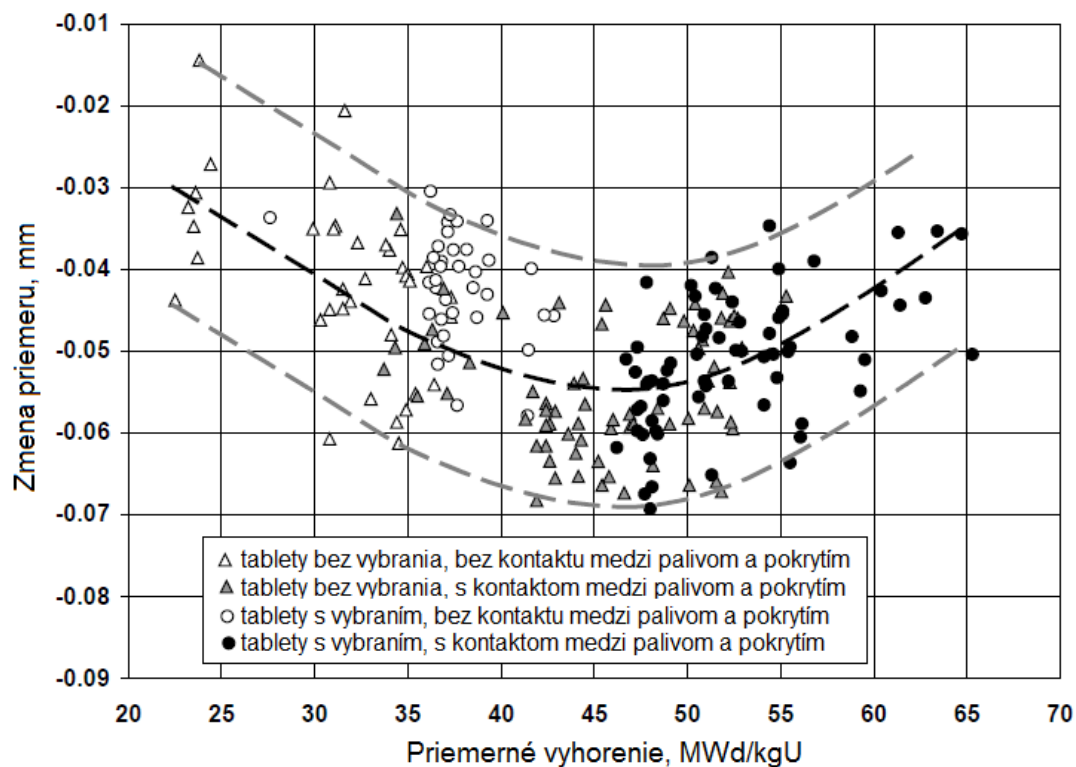
b – moment vytvorenia kontaktu medzi palivom a pokrytím

c – vytvorenie kontaktu medzi palivom a pokrytím na väčšine dĺžky palivového elementu

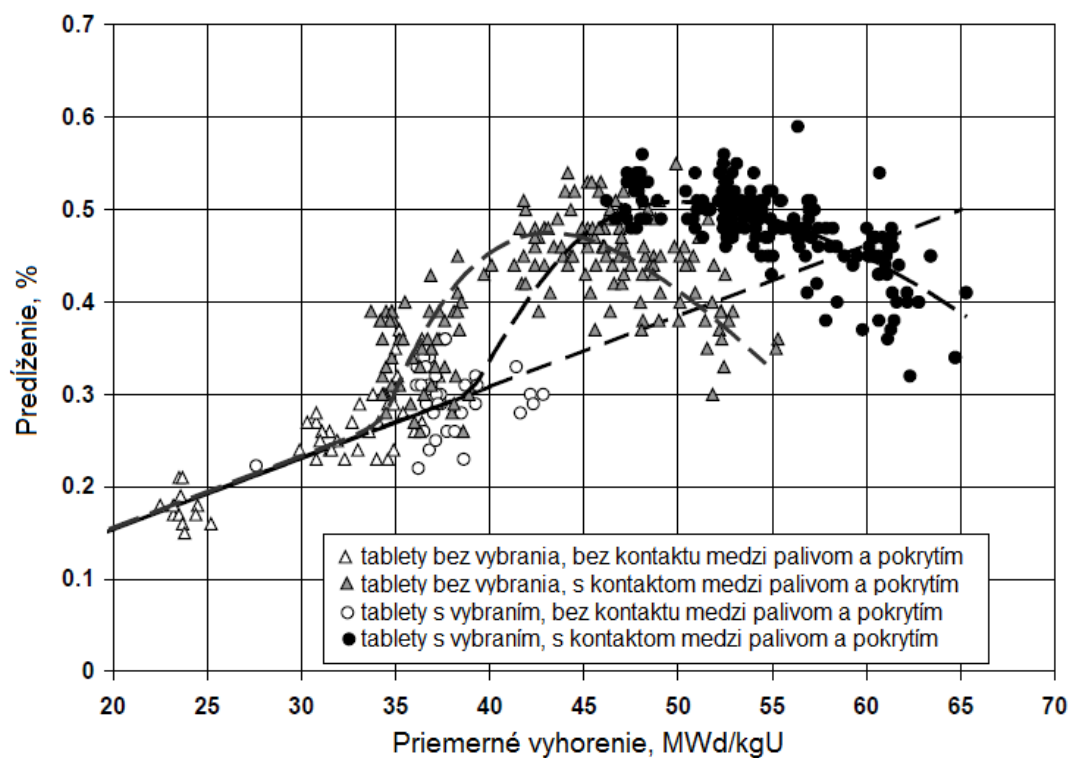
1 – účinok chladiva

2 – radiálny efekt stĺpca paliva

3 – axiálny efekt stĺpca paliva



Graf 5-9 Zmena priemeru palivových elementov v závislosti na vyhorení paliva [34]



Graf 5-10 Predĺženie palivových elementov v závislosti na vyhorení paliva [34]

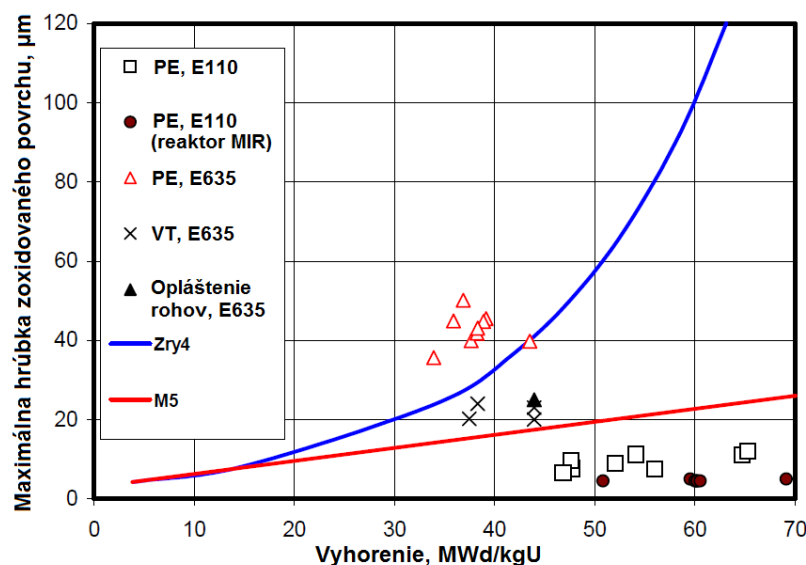
6 Príčiny poškodenia palivových elementov

Tesnosť palivových elementov je jedným z hlavných limitujúcich podmienok prevádzky jadrovej elektrárne. Pri poškodení pokrytia palivových elementov sa môžu do chladiva primárneho okruhu dostávať štiepne produkty, ktoré spôsobuje jeho kontamináciu, a preto sú na tesnosť palivových elementov kladené vysoké požiadavky.

6.1 Korózia

Zliatina E110 má pri normálnych prevádzkových podmienkach veľmi dobrú koróznú odolnosť. Hrúbka zoxidovanej vrstvy, na vonkajšom povrchu palivových elementov, nie je väčšia než 10 – 15 μm pri vyhorení 65 MWd/kgU. Vo väčšine prípadov je zoxidovaná vrstva celistvá a nedochádza k jej praskaniu alebo odlupovaniu. K zvýšeniu korózie dochádza len v prípade presiahnutia limitov tepelného toku alebo pri zhoršení chemickej čistoty chladiva. Zliatina Zircaloy-4 má menšiu koróznú odolnosť ako E110 a hlavne pri vyššom vyhorení dochádza k zmene rýchlosti oxidácie a prudkému nárastu zoxidovanej vrstvy. [33]

Na vnútornej strane pokrytia dochádza k väčšej korózii, pretože táto strana je vystavená zhoršenému korozívnemu prostrediu vďaka produktom štiepenia, ktoré sa uvoľňujú z paliva. [33]



Graf 6-1 Hrúbka zoxidovanej vrstvy vonkajšieho povrchu pokrytia v závislosti na vyhorení paliva pre rôzne druhy zirkóniových zliatin (PE – palivový element, VT – vodiaca trubka) [33]

6.2 Hydridácia

Hlavným zdrojom vodíka na vonkajšej strane pokrytia je korózia, čiže reakcia zirkónia s vodou: $\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2$. Nakoľko zirkóniové zliatiny majú veľkú afinitu k vodíku, vzniknutý vodík je absorbovaný do pokrytia a po prekročení miery svojej rozpustnosti vytvára v zliatine krehké hydridy. Pretože tieto hydridy majú menšiu hustotu ako zirkóniová zliatina, spôsobujú v pokrytí zvýšenie napätia. Taktiež zapríčiňujú jeho skrehnutie, čo môže viesť až k tvorbe trhlín. Na vnútornej strane pokrytia je hlavným zdrojom vodíka zvyšková vlhkosť absorbovaná v póroch palivových tabliet počas výroby. Vďaka efektívnemu vysušaniu paliva a pokrytia počas výroby sa tento efekt minimalizoval. [35]

6.3 Poškodenie palivového elementu trením o mriežku

Pri prúde chladiva cez aktívnu zónu reaktora sa môžu v prúde kvapaliny vytvoriť tzv. Karmánove víry alebo tlakové pulzy, ktoré rozkmitajú palivové elementy. Pokiaľ vznikne medzi palivovým elementom a mriežkou medzera, dochádza v týchto oblastiach k treniu a pokrytie palivového elementu sa môže poškodiť. Vznik medzery môže byť zapríčinený nevhodnou konštrukciou mriežky, zmenšením priemeru palivového elementu alebo relaxáciou materiálu mriežky. Preto sa distančné mriežky vyrábajú z materiálu s väčšou odolnosťou proti creepu a ich tvar sa navrhuje tak, aby v miestach dotyku s palivovými elementmi nemali žiadne ostré hrany. [36]



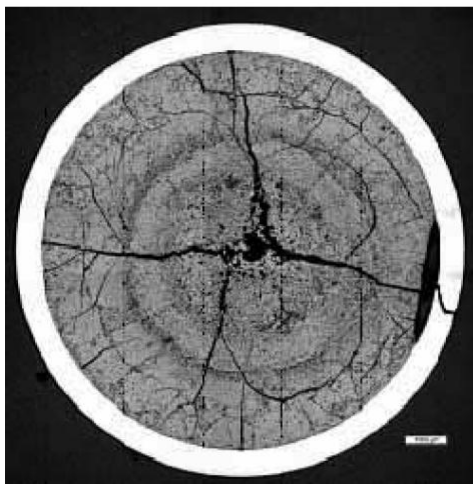
Obr. 6-1 Poškodenie pokrytia palivového elementu trením o distančnú mriežku [36]

6.4 Ohýbanie palivových kaziet

Počas prevádzky pôsobia na palivovú kazetu rôzne zaťaženia (pridržiavacia sila, teplotné namáhanie, tlak, radiačná dávka), ktoré môžu spôsobiť, že palivová kazeta stratí svoju geometrickú stabilitu a prehne sa do tvaru písmena „C“ alebo „S“. Tento efekt nastáva hlavne u palivových kaziet reaktora VVER 1000. Pri zasúvaní kontrolných tyčí do takto prehnutej kazety, dochádza k výraznému treniu medzi absorpčnými tyčami a ich púzdom. Zvyšuje sa tak čas potrebný na zasunutie absorpčných tyčí, čo zhoršuje bezpečnosť reaktora. Ďalším negatívnym efektom je fakt, že pri prehnutí palivovej kazety sa niektoré palivové elementy dostanú bližšie k sebe a v tejto oblasti tak dochádza k zmenšeniu prietoku chladiva a lokálnemu zvýšeniu teploty. Na zamedzenie ohýbania palivových kaziet boli skonštruované palivové kazety s tuhšou konštrukciou, ale došlo len k zmenšeniu prehnutia a nie k jeho úplnému odstráneniu. [37]

6.5 Kontakt medzi palivovou tabletou a pokrytím

Pri čerstvom palive je medzi palivovou tabletou a pokrytím medzera. Táto medzera sa z dôvodu tepelnej rozťažnosti tablety a objemového rastu paliva počas prevádzky postupne zmenšuje. Pri vyššom vyhorení paliva môže nastať až stav, že táto medzera úplne zmizne a dôjde ku kontaktu paliva a pokrytia. Palivová tableta následne tlačí na pokrytie, a tým v ňom zvyšuje napätie. Nakoľko tableta a pokrytie majú rozdielnú tepelnú rozťažnosť, môže kontakt nastať aj oveľa skôr, a to pri náhlých zmenách výkonu palivových elementov. Najviac sú náhlými výkonovými zmenami zasiahnuté palivové elementy v okolí regulačných tyčí. Pri štiepení uránu vznikajú okrem iných aj prvky ako jód a cézium, ktoré prispievajú k tvorbe korozívneho prostredia vo vnútri palivových elementov. Ak sa časť tablety odlomí vznikne medzi tabletou a pokrytím medzera, kde sa tieto prvky hromadia a spôsobujú zvýšenú koróziu pokrytia. Na povrchu pokrytia sa v týchto miestach následne vytvorí krehká vrstva ktorá je náchylná na tvorbu trhlín. Pokiaľ je pokrytie dostatočný čas vystavené korozívnemu prostrediu a zvýšenému napätiu spôsobenému dotykom medzi palivom a pokrytím, môže dôjsť k jeho praskaniu (tzv. SCC – Stress Corrosion Cracking). Na zabránenie vzniku tohto efektu sa používa tenká vrstvička čistého zirkónia, nanášaná na vnútornú stranu pokrytia, ktorá zvyšuje odolnosť zliatiny proti koróznemu praskaniu pod napätím. Ďalším opatrením je lepšia kontrola pohybu riadiacich tyčí, a tým zamedzenie vzniku veľkých výkonových skokov. [35]



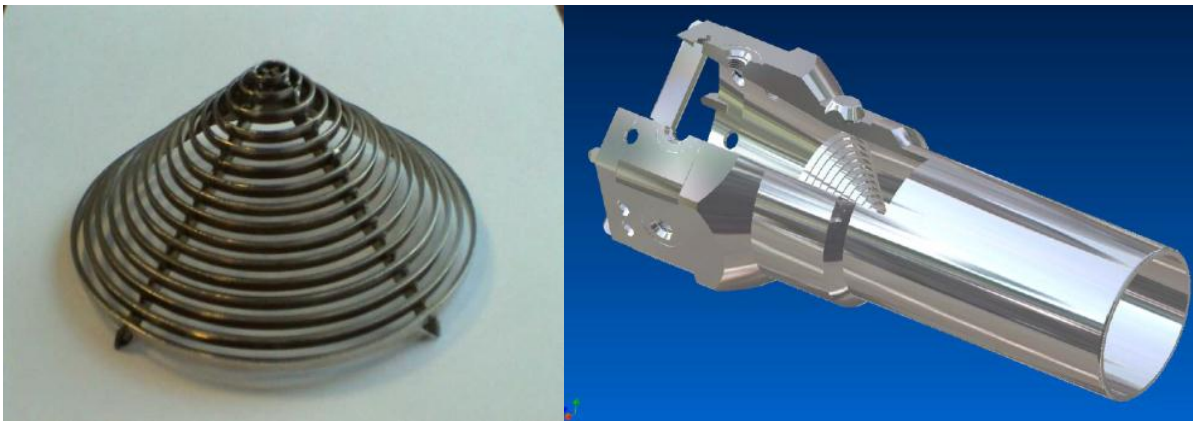
Obr. 6-2 Poškodenie pokrytia palivového elementu spôsobené kontaktom medzi palivom a pokrytím a chýbajúcou časťou palivovej tablety [35]

6.6 Výrobné chyby

Počet poškodení palivových elementov zapríčinených výrobnými chybami sa za posledné roky znížil na minimum. Je to priamy dôsledok neustáleho zlepšovania výrobných procesov. Napriek tomu sa ale ešte občas objaví porucha zapríčinená práve výrobným procesom. Ide hlavne o nedokonalé privarenie koncoviek alebo o kontamináciu zvaru niklom. Niekedy môžu byť defekty také malé, že sa neodhalia ani pri kontrole, ani pri zavedení palivového elementu do reaktora, ale objavajú sa až po niekoľkých rokoch prevádzky, keď sa pôvodná veľkosť defektu zväčší dôsledkom pridružených efektov. [35]

6.7 Poškodenie cudzou časticou

Niekedy sa do chladiva primárneho okruhu dostane pevná častica, ktorá je prúdom chladiva unášaná až k palivovým kazetám. Ak sa jedná o kovovú časticu môže dôjsť pri jej kolízii s palivovým elementom k zásadnému poškodeniu jeho pokrytia. Taktiež sa táto častica môže zachytiť medzi palivovým elementom a distančnou mriežkou, kde pod vplyvom prúdu chladiva kmitá a poškodzuje povrch palivového elementu. Tento jav bol v minulosti častou príčinou poškodenia palivových elementov, a preto bol do konštrukcie palivovej kazety pridaný tzv. filter nečistôt (anti-debris filter). Konštrukciu a umiestnenie tohto filtra palivovej kazety reaktora typu VVER 440 je možno vidieť na obr. 6-3. [35]



Obr. 6-3 Filter nečistôt (vľavo) a jeho umiestnenie v palivovej kazete reaktora VVER 440 (vpravo) [38]

6.8 Poškodenie pri manipulácii s palivovými kazetami

Občas sa stane, že pri výmene palivových kaziet dôjde k ich vzájomnej kolízii. Takáto kolízia môže spôsobiť poškriabanie povrchu palivových elementov alebo poškodenie distančnej mriežky. Ako je vidieť na obr. 6-4, z takto poškodenej distančnej mriežky sa môže odlomiť kus materiálu, ktorý musí byť z reaktora odstránený, lebo pri cirkulácii chladiva by mohol spôsobovať ďalšie poškodenie palivových elementov. [35]



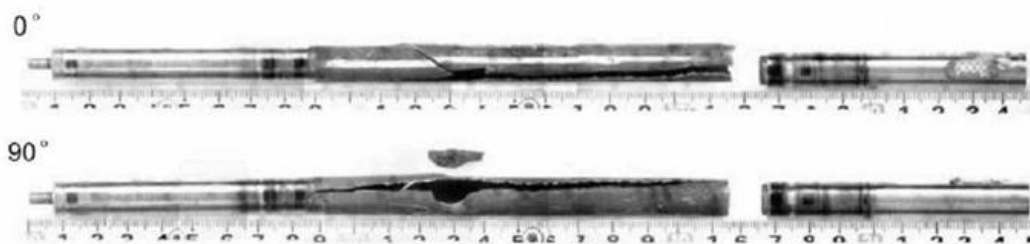
Obr. 6-4 Poškodenie distančnej mriežky palivovej kazety [35]

6.9 Sekundárne poškodenie

Po vytvorení prvotného defektu, ktorý spôsobí netesnosť pokrytia palivového elementu, môže dôjsť k prenikaniu chladiva do vnútorných priestorov palivového elementu. Takéto chladivo je vplyvom vysokej teploty okamžite odparené a para reagujúca s pokrytím alebo palivom produkuje vodík. Následne dochádza k silnej hydridácii povrchu pokrytia a k tvorbe veľkých hydridov. Tie zvyšujú v pokrytí napätie a môžu spôsobiť vznik rozsiahlych prasklín alebo dier. V najhorších prípadoch môže dôjsť až k tzv. „gilotínovému presekutiu“ palivového elementu alebo k tvorbe dostatočne veľkej trhliny pre únik jadrového paliva z palivového elementu, a tým silnej kontaminácii chladiva. [35]



Obr. 6-5 „Gilotínové preseknutie“ palivového elementu [35]



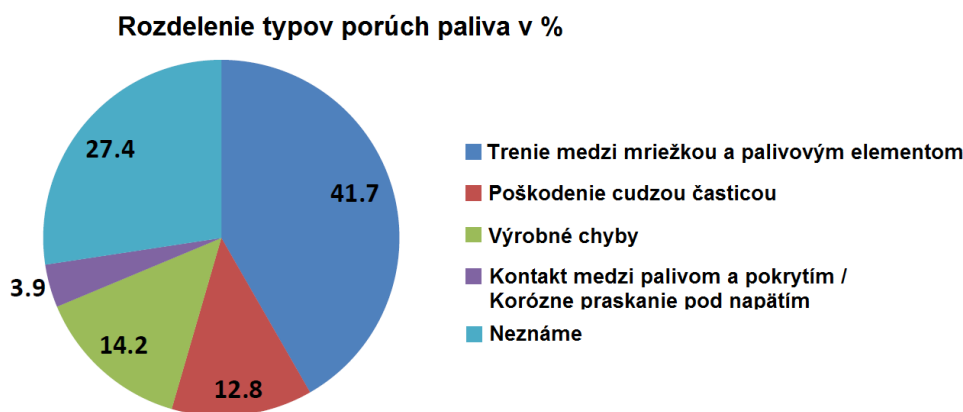
Obr. 6-6 Prasknutie pokrytia palivového elementu [39]

6.10 Detekcia poškodených palivových elementov počas prevádzky

Na detekciu poškodených palivových elementov sa využíva monitorovanie rádionuklidov v chladive primárneho okruhu. Jedná sa predovšetkým o prvky jódu, cézium, xenón a kryptón. Zvýšený obsah týchto prvkov indikuje, že u niektorých palivových elementov došlo k netesnosti a štiepne produkty môžu unikáť do chladiva. Z rôzneho pomeru unikajúcich prvkov sa dá odhadnúť rozsah poškodenia a miesto v ktorom k nemu došlo. Pokiaľ je tento rozsah v rámci predpísaných noriem, únik sa pozorne monitoruje a prevádzka bloku sa prispôsobí vzniknutej situácii. Pri výmene paliva sa následne postihnuté miesto lokalizuje a palivová kazeta alebo palivový element sa vymení. Ďalšou analýzou sa zistí dôvod vzniku poškodenia a zavedú sa potrebné opatrenia, aby sa v budúcnosti takýmto poškodeniam predišlo. [35]

6.11 Vývoj porúch palivových elementov a palivových kaziet tlakovodných reaktorov

Pri prevádzke reaktora VVER 440 sa v aktívnej zóne reaktora nachádza 43974 palivových elementov. Pri reaktore VVER 1000 je toto číslo ešte o niečo vyššie, konkrétne ide o 50856 palivových elementov. Pri takomto vysokom počte palivových elementov občas dochádza k ich poškodeniu a následnej netesnosti. Väčšinou sa jedná o mikrotrhliny a vo výnimočných prípadoch o defekty dosahujúce rozmery milimetrov, prípadne centimetrov. Najčastejšou príčinou býva poškodenie trením medzi palivovým elementom a mriežkou. Ďalej nasleduje poškodenie cudzou časticou, výrobné chyby a kontakt medzi palivom a pokrytím. Percentuálne zastúpenie jednotlivých porúch palivových elementov tlakovodných reaktorov je zobrazené v grafe 6-2. [40, 41]

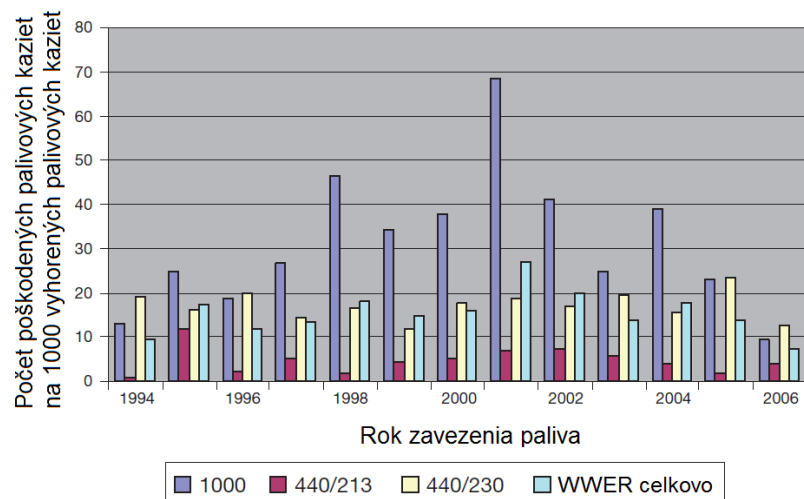


Graf 6-2 Príčiny poškodenia palivových elementov tlakovodných reaktorov v rokoch 2006 - 2010 [41]

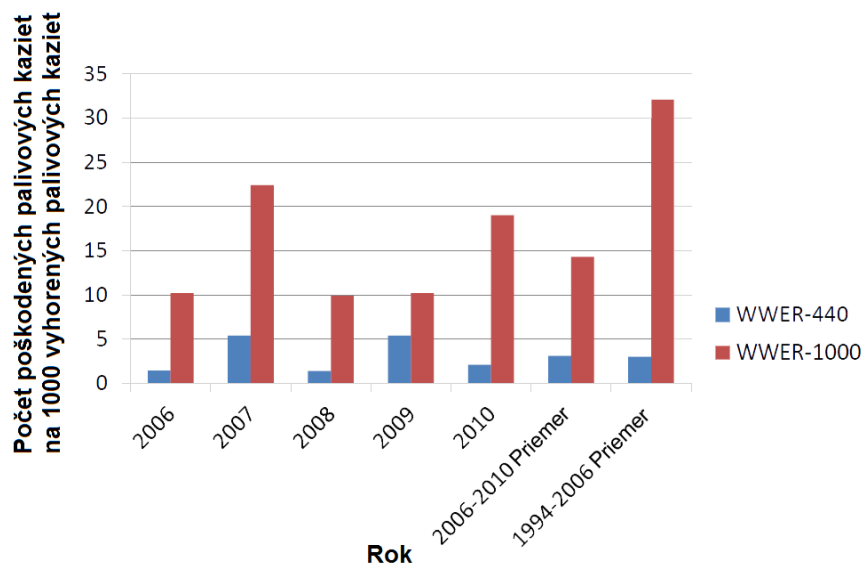
Grafy 6-3 a 6-4 ukazujú počet poškodených palivových kaziet k počtu vyhorených kaziet reaktorov typu VVER od roku 1994 do roku 2010. Na grafoch je možné vidieť, že počet poškodených palivových kaziet je pri reaktoroch typu VVER 440 niekoľkokrát nižší ako pri reaktoroch typu VVER 1000.

České a slovenské reaktory typu VVER 440-213 sa vyznačujú vysokou mierou bezporuchovosti palivových elementov. Svedčí o tom aj fakt, že počas 28 rokov prevádzky 2 blokov elektrárne v Jaslovských Bohuniciach došlo len k 4 netesnostiam a v prípade jadrovej elektrárne Mochovce sa jedná o dve netesnosti počas 12 a 13-ročnej prevádzky dvoch blokov. [9, 8]

Elektráreň Temelín s reaktorom VVER 1000 má počet netesností o niečo vyšší. Počas prvých 7 palivových kampaní došlo ku 67 netesnostiam. Hlavnými príčinami týchto netesností bolo trenie medzi palivovými elementmi a mriežkou a prehýbanie palivových kaziet. Po viacerých konštrukčných úpravách a zavedení nového typu paliva výrazne klesol počet poškodených palivových elementov. [42]



Graf 6-3 Počet poškodených palivových kaziet reaktorov typu VVER v rokoch 1994 - 2006 [35]

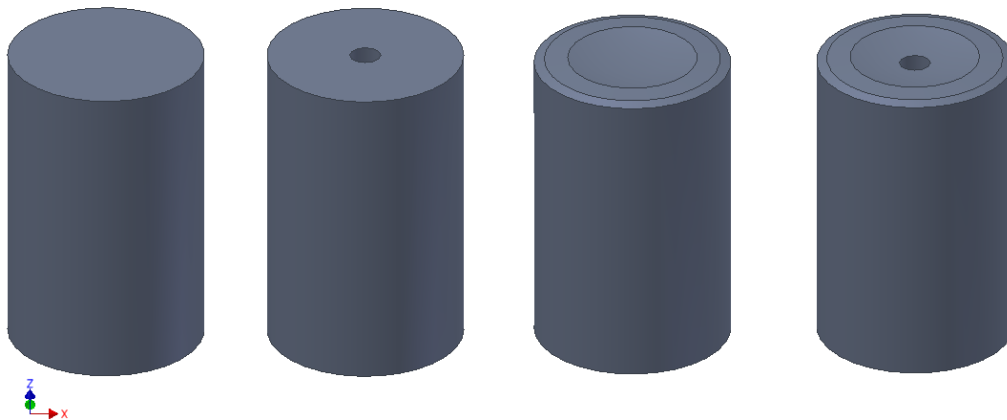


Graf 6-4 Počet poškodených palivových kaziet reaktorov typu VVER v rokoch 2006 - 2010 [41]

7 Analýza pokrytia palivového elementu

Počas vyhorievania paliva v reaktore, môže nastať stav, keď sa vďaka objemovému rastu a ďalším efektom zväčší priemer palivovej tablety. Priemer tablety sa môže zväčšiť až natoľko, že medzera ktorá je medzi palivom a pokrytím úplne zanikne. V takom prípade začne palivová tableta tlačiť na pokrytie, čo spôsobí zvýšenie napätí a deformácií pokrytia. Palivové tablety majú pre zlepšenie niektorých vlastností určité úpravy svojho tvaru. Jedná sa napríklad o centrálny otvor v tablete, skosenie hrán alebo vybranie na čelách. Každá z týchto úprav tvaru má vplyv na veľkosť zmeny napätia a deformácie pokrytia pri vytvorení kontaktu medzi palivom a pokrytím. V nasledujúcej kapitole je opísaný výpočet, ktorý porovnáva zvýšenie napätia a deformácie pokrytia pri vytvorení kontaktu medzi palivom a pokrytím pre štyri rôzne tvary palivových tabliet. Jednotlivé tvary palivových tabliet je možné vidieť na obr. 7-1. Prvé dve tablety sú valcového tvaru bez centrálnneho otvoru a s centrálnym otvorom. Ďalšie dve tablety majú valcový tvar so skosením hrán a vybráním na čelách taktiež bez centrálnneho otvoru a s ním.

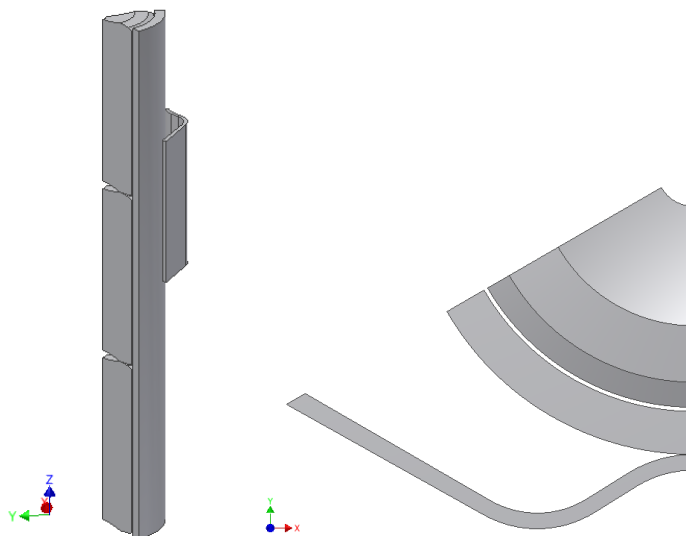
Okrem napätí a deformácií pokrytia, bolo porovnávané aj radiálne rozloženie teplôt v palivovom elemente a axiálna dilatácia stĺpca paliva. Celý výpočet bol robený len v oblasti elastických deformácií a neboli v ňom zahrnuté žiadne plastické deformácie. Výpočet bol robený pomocou programu ANSYS 14.5 v rozhraní „Workbench“ s kombináciou analýz „Steady-State Thermal“ a „Static Structural“.



Obr. 7-1 Porovnávané tvary palivových tabliet

7.1 Geometrický model

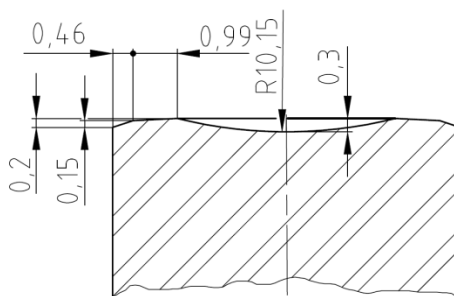
Geometrický model sa skladá z troch palivových tabliet, pokrytia a z časti distančnej mriežky. Nakoľko je tento model symetrický podľa troch osí, vo výpočtovom modeli bola použitá len 1/6 geometrického modelu. Jednotlivé výpočtové modely sa od seba líšili len tvarom palivovej tablety, pričom pri simulácii kontaktu bol vonkajší priemer tablety zväčšený tak, aby sa dotýkal pokrytia. Rozmery pokrytia a distančnej mriežky zostali vo všetkých prípadoch rovnaké. Celkovo bolo pre výpočet vytvorených 8 rôznych modelov. Jeden z použitých modelov je možné vidieť na obr. 7-2.



Obr. 7-2 Geometrický model palivového elementu bez dotyku medzi palivom a pokrytím s palivovými tabletami bez centrálneho otvoru, so skosením hrán a vybraním na čelách (vľavo izometrický pohľad, vpravo pohľad zhora)

7.2 Základné rozmery modelu

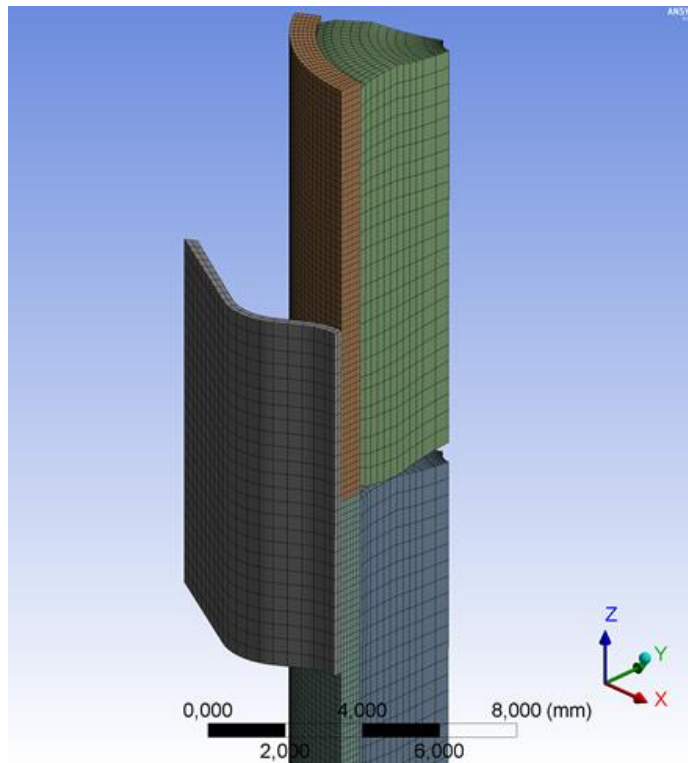
Palivové tablety majú priemer 7,6 mm a výšku 12 mm. V prípadoch, pri ktorých bol simulovaný kontakt medzi palivom a pokrytím, bol priemer palivovej tablety zväčšený na 7,73 mm. Centrálny otvor, ktorý sa vyskytuje pri dvoch typoch porovnávaných tabliet, má priemer 1,2 mm. Dve tablety majú skosenie hrán a vybranie na čelách, ktorých rozmery je možné vidieť na obr. 7-3. Vonkajší priemer pokrytia je 9,1 mm a jeho hrúbka je 0,685 mm. Distančná mriežka, ktorej hrúbka je 0,25 mm, je umiestnená na rozhraní druhej a tretej tablety a má výšku 10 mm. [43, 44]



Obr. 7-3 Nákres skosenia hrán a vybraní na čele palivovej tablety [45]

7.3 MKP model

Počet jednotlivých prvkov bol pre každý z výpočtových modelov rozdielny. Pokrytie aj distančná mriežka sa síce skladali vždy z rovnakého počtu prvkov, ale palivové tablety mali vždy iný tvar, čomu musela byť prispôsobená sieť prvkov. Na obr. 7-4 je možné vidieť hustotu siete prvkov pre jeden z výpočtových modelov.



Obr. 7-4 MKP model

7.4 Použité materiálové vlastnosti

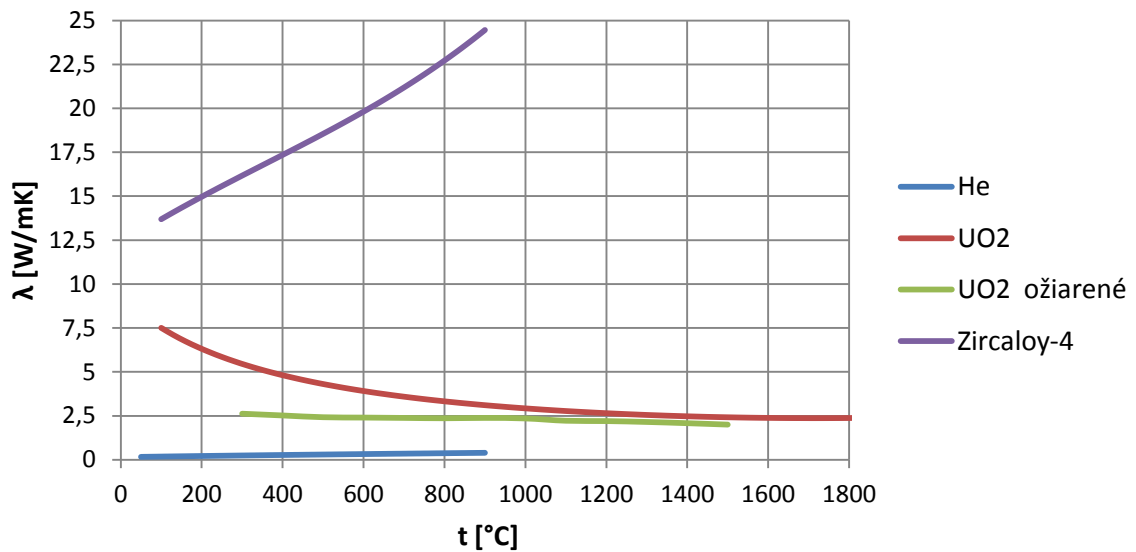
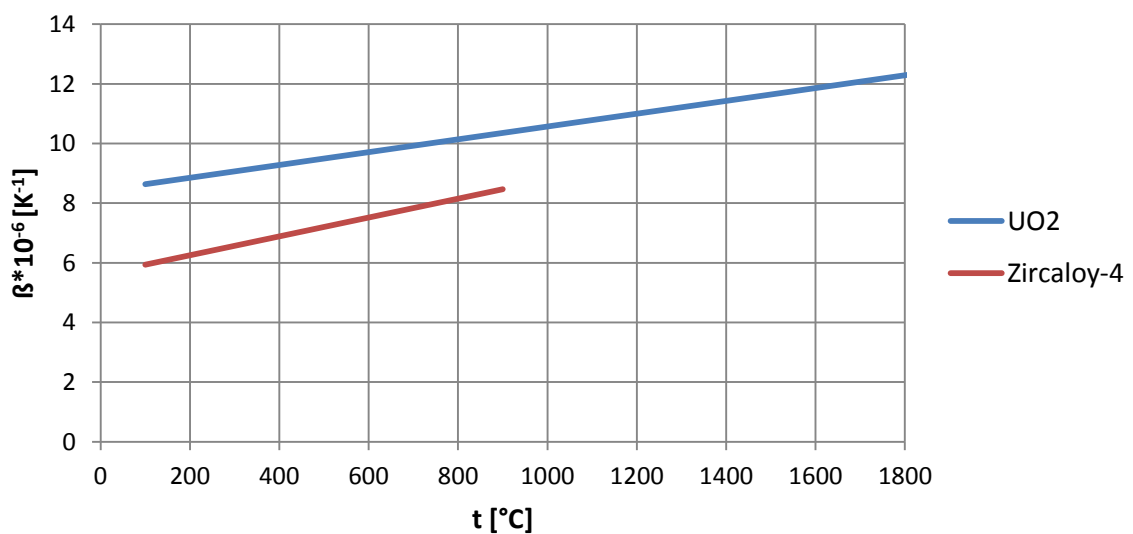
Ako materiál palivových tabliet bol uvažovaný čistý UO_2 . Medzera medzi palivom a pokrytím bola vyplnená héliom a ako materiál pokrytia a distančnej mriežky bola uvažovaná zirkóniová zliatina Zircaloy-4. V reaktoroch typu VVER sa síce používa ako materiál pokrytia zliatina E110, ale pre nedostatok presných dostupných informácií o vlastnostiach tejto zliatiny potrebných pre výpočet bola použitá zliatina Zircaloy-4. Táto zliatina je používaná tiež na pokrytie palivových elementov, ale pri západných typoch reaktorov s označením PWR. Nakoľko tepelné a mechanické vlastnosti, použité pri výpočte, sú v uvažovanom rozsahu teplôt pre obe zliatiny veľmi podobné, môžu byť dosiahnuté výsledky orientačne použité aj pre zliatinu E110.

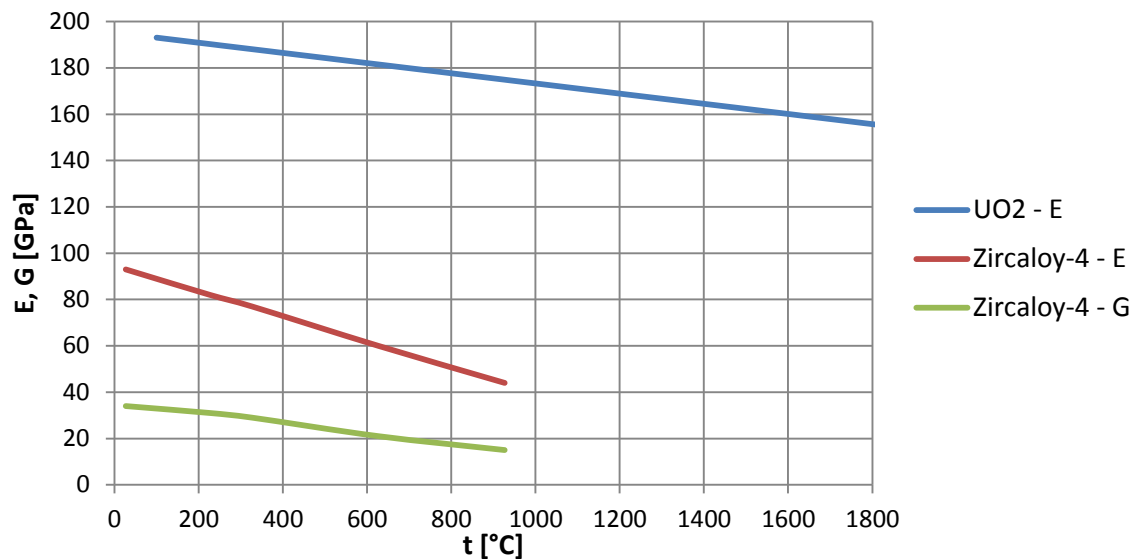
Pri výpočte boli použité štyri základné vlastnosti materiálov, a to tepelná vodivosť, tepelná rozťažnosť, modul pružnosti v ťahu a modul pružnosti v šmyku alebo poissonovo číslo. Všetky vlastnosti boli uvažované ako závislé na teplote, len poissonovo číslo pre UO_2 bolo v rozmedzí použitých teplôt konštantné. Tepelná vodivosť UO_2 bola okrem závislosti na teplote uvažovaná ako závislá aj na vyhorení paliva. Tab. 3 ukazuje z ktorých zdrojov boli čerpané jednotlivé použité materiálové vlastnosti.

Tab. 3 Zdroje materiálových vlastností použitých pri výpočte

	Súčiniteľ tepelnej vodivosti	Súčiniteľ tepelnej rozťažnosti	Modul pružnosti v ťahu	Modul pružnosti v šmyku	Poissonovo číslo
UO ₂	[2]	[2]	[14]	-	[14]
UO ₂ -vyhorené	[13]	[2]	[14]	-	[14]
Zircaloy-4	[14]	[30]	[14]	[14]	-
Hélium	[2]	-	-	-	-

Konkrétne hodnoty jednotlivých materiálových vlastností je možné vidieť na grafoch 7-1, 7-2 a 7-3. Poissonovo číslo pre UO₂ bolo uvažované ako konštantné s hodnotou 0,316. [14]

**Graf 7-1** Súčiniteľ tepelnej vodivosti hélia, UO₂, ožiareného UO₂ a Zircaloy-4 v závislosti na teplote**Graf 7-2** Súčiniteľ tepelnej rozťažnosti UO₂ a Zircaloy-4 v závislosti na teplote



Graf 7-3 Modul pružnosti v tahu UO_2 a Zircaloy-4 a modul pružnosti v šmyku Zircaloy-4 v závislosti na teplotě

7.5 Okrajové podmienky

Okrajové podmienky použité pri výpočte vychádzajú z podmienok vyskytujúcich sa v reaktore VVER 440-213. Výpočet bol robený pre dva rôzne stavy, ktorých porovnanie je možné vidieť v tab. 4. Pri stave 1 ide o čerstvé palivo, pri ktorom nedochádza ku kontaktu medzi palivom a pokrytím. Druhý stav je charakteristický značne vyhoreným palivom, pri ktorom klesá výkon palivového elementu, narastá tlak plyných produktov štiepenia vo vnútri palivového elementu a vytvára sa kontakt medzi palivovou tabletou a pokrytím.

Tab. 4 Základné parametre výpočtových stavov

	Stav 1	Stav 2
Stav paliva	čerstvé	vyhorené
Dotyk medzi palivom a pokrytím	nie	áno
Lineárny výkon palivového elementu [W/cm]	300	100
Tlak plynov vo vnútri palivového elementu [MPa]	0,6	5

Z lineárneho výkonu palivového elementu bola podľa rovnice (4) určená hodnota objemového výkonu palivovej tablety. Pre stav 1 nadobúda tento výkon hodnoty $0,66164 \text{ W/mm}^3$ a pre stav 2 hodnoty $0,21319 \text{ W/mm}^3$. Merný objemový výkon bol použitý ako jedna z okrajových podmienok pre tepelný výpočet. Ďalej bola použitá okrajová podmienka pre prechod tepla prúdením, ktorá bola priradená na vonkajšiu stranu pokrytia. Teplota chladiva bola zvolená 297 °C a veľkosť súčiniteľa prechodu tepla $35 \text{ kW/m}^2\text{K}$. [2]

$$q_H = q_V \cdot r_u^2 \cdot \pi \quad [2] \quad (4)$$

Pri mechanickom výpočte bola na plochách, ktoré boli uvažované ako symetrické použitá okrajová podmienka pre symetrickosť. Na dolnú hranu spodnej tablety bola priradená podmienka, ktorá zabráňuje deformácii v smere po výške palivového elementu. Táto okrajová podmienka charakterizuje ustavenie stĺpca paliva na spodnej koncovke. Na vrchnú palivovú tabletu bola priradená sila o veľkosti 10 N, ktorá vystihuje váhu zvyšného stĺpca paliva a silu dotlačacej pružiny. Všetky vnútorné plochy palivového elementu boli pri stave 1 zaťažené tlakom o veľkosti 0,6 MPa a pri stave 2 tlakom o veľkosti 5 MPa. Tento tlak odpovedá tlaku plyných produktov štiepenia vo vnútri palivového elementu. Na vonkajšiu stranu pokrytia a mriežku bol priradený tlak o veľkosti 12,26 MPa, ktorý odpovedá tlaku chladiva. Jednou z okrajových podmienok bolo taktiež teplotné pole jednotlivých častí modelu, ktoré bolo výstupom teplotného výpočtu.

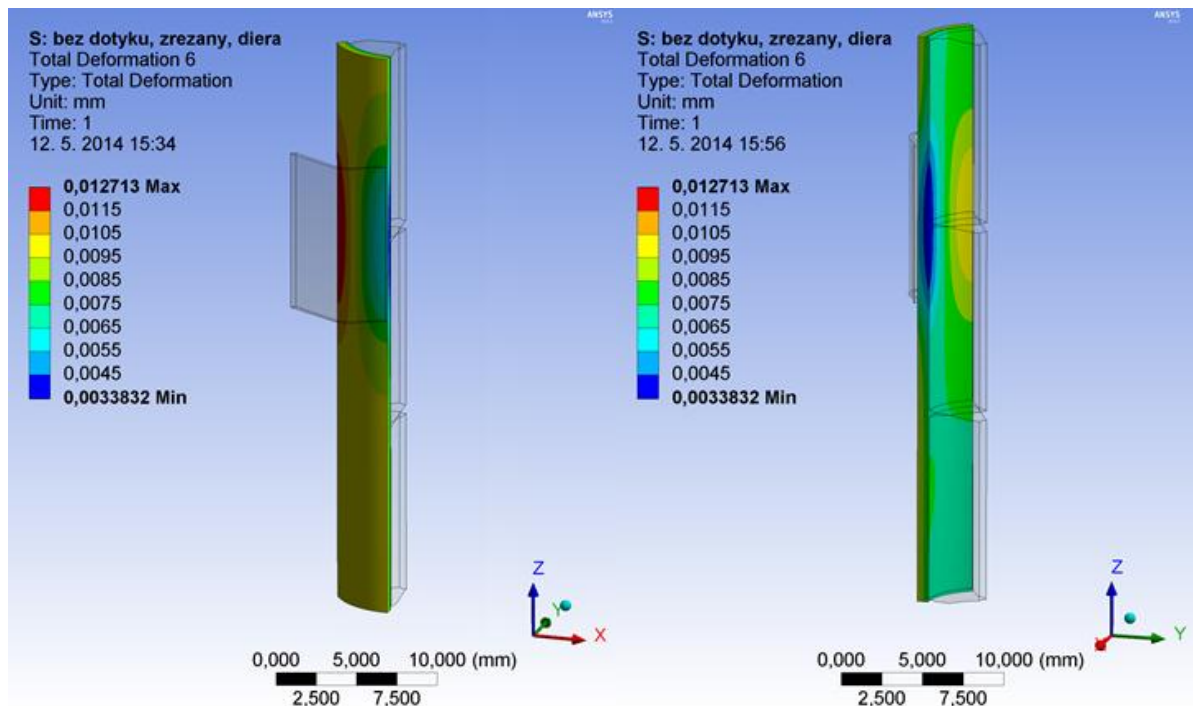
Kontakty medzi jednotlivými časťami modelu boli uvažované ako kontakty bez trenia, nakoľko zistiť jednotlivé súčinitele trenia by bolo veľmi náročné a výsledok bol týmto zjednodušením ovplyvnený len minimálne.

7.6 Výsledky analýzy

Deformácie pokrytia boli počítané ako celkové deformácie a napätie vznikajúce v pokrytí ako ekvivalentné napätie von Mises. Na obrázkoch v nasledujúcich podkapitolách sú zobrazené rozloženia napätí a deformácií vždy len pre jeden typ modelu, a to model s palivovými tabletami s centrálnym otvorom, so skosením hrán a vybraním na čelách. Ostatné modely s inými tvarmi palivových tabliet majú rozloženie napätí a deformácií veľmi podobné a líšia sa len vo veľkosti ich hodnôt, ktoré sú porovnané v grafoch.

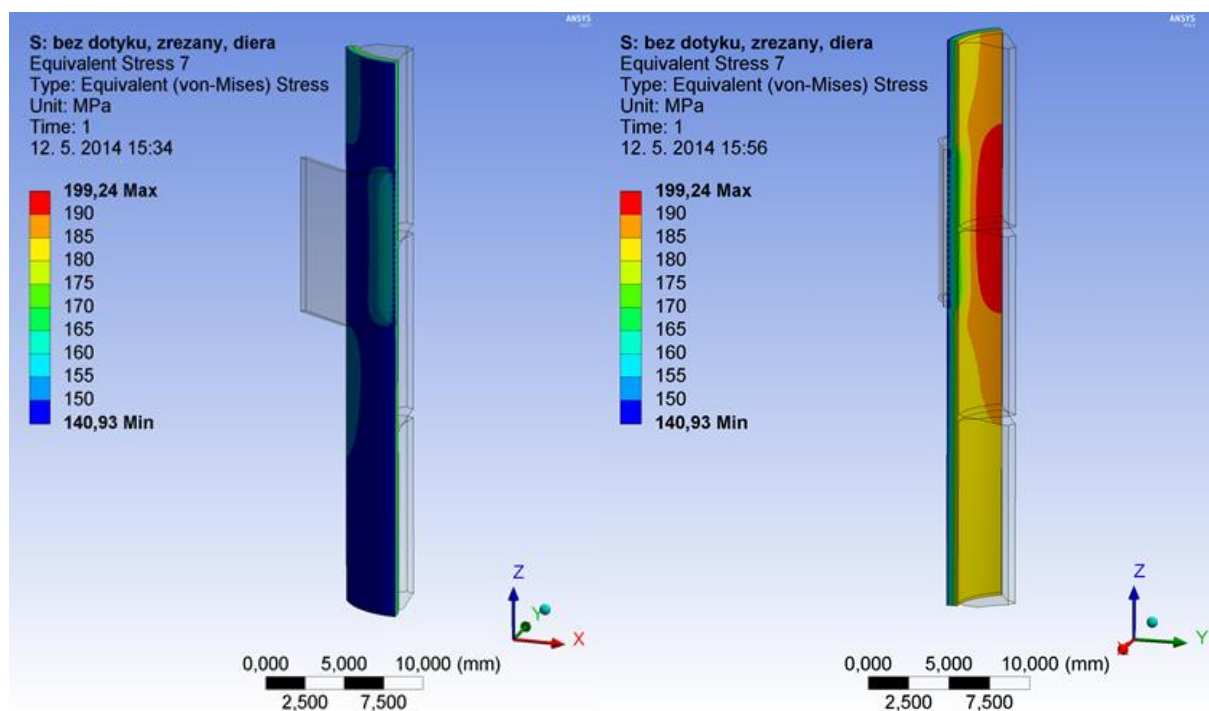
7.6.1 Deformácie a napätia vznikajúce v pokrytí pri stave 1

Na obr. 7-5 je možné vidieť rozloženie deformácií pokrytia pre stav 1. Nakoľko nedochádza ku kontaktu medzi palivom a pokrytím, je pokrytie zaťažené len tlakom a vlastnou tepelnou expanziou. Podľa očakávania je deformácia rovnomerná a k jej výkyvom dochádza len v oblasti dotyku pokrytia a mriežky. Mriežka v mieste dotyku bráni expanzii pokrytia, a preto vznikajú v mieste dotyku menšie deformácie. Takéto zabránenie má ale presne opačný efekt na stranu, kde sa mriežka pokrytia nedotýka. V týchto miestach dochádza k vydúvaniu pokrytia a k jeho väčším deformáciám.



Obr. 7-5 Rozloženie deformácií v pokrytí pre stav 1

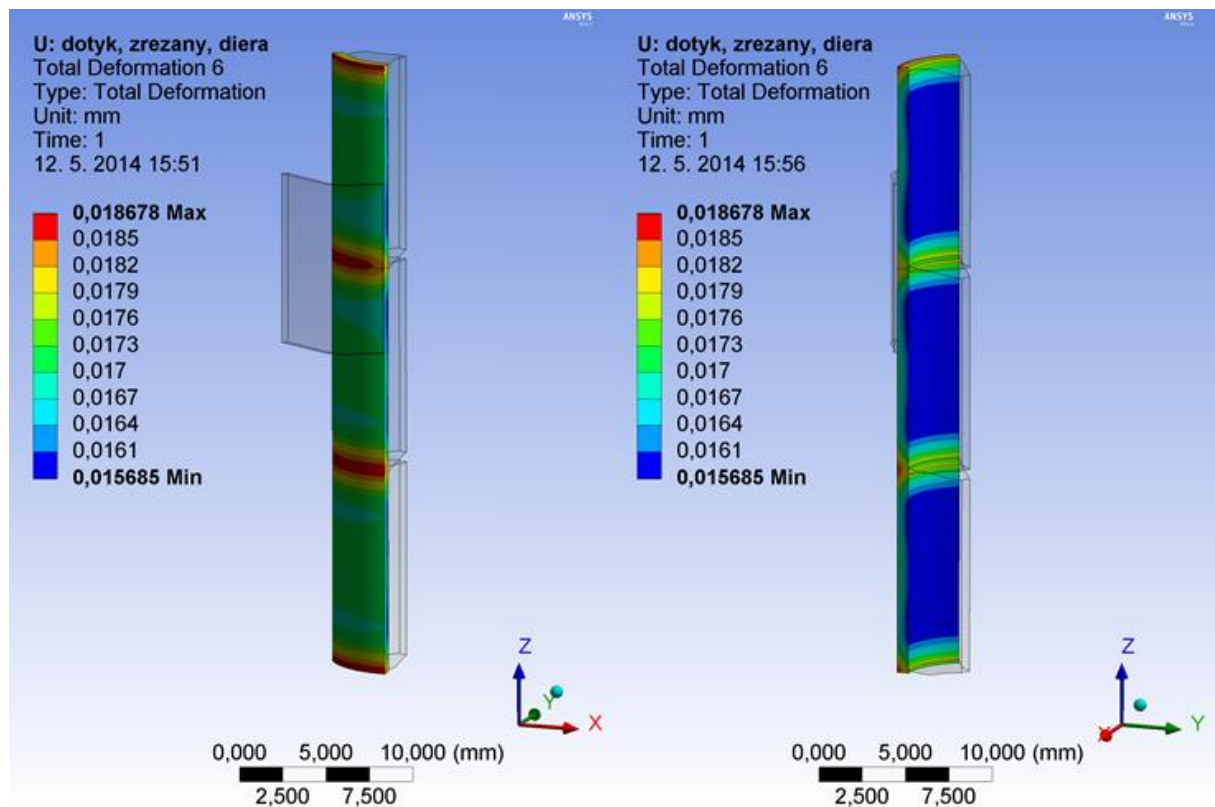
Rozloženie napätí v pokrytí je možné vidieť na obr. 7-6. Toto rozloženie je podobné ako pri deformáciách rovnomerné a k jeho zvýšeniu dochádza len v oblasti dotyku mriežky a pokrytia. Na rozdiel od deformácií, pri ktorých sa nachádzali najväčšie deformácie na vonkajšej strane pokrytia, najväčšie napätia sa vyskytujú na vnútornej strane pokrytia.



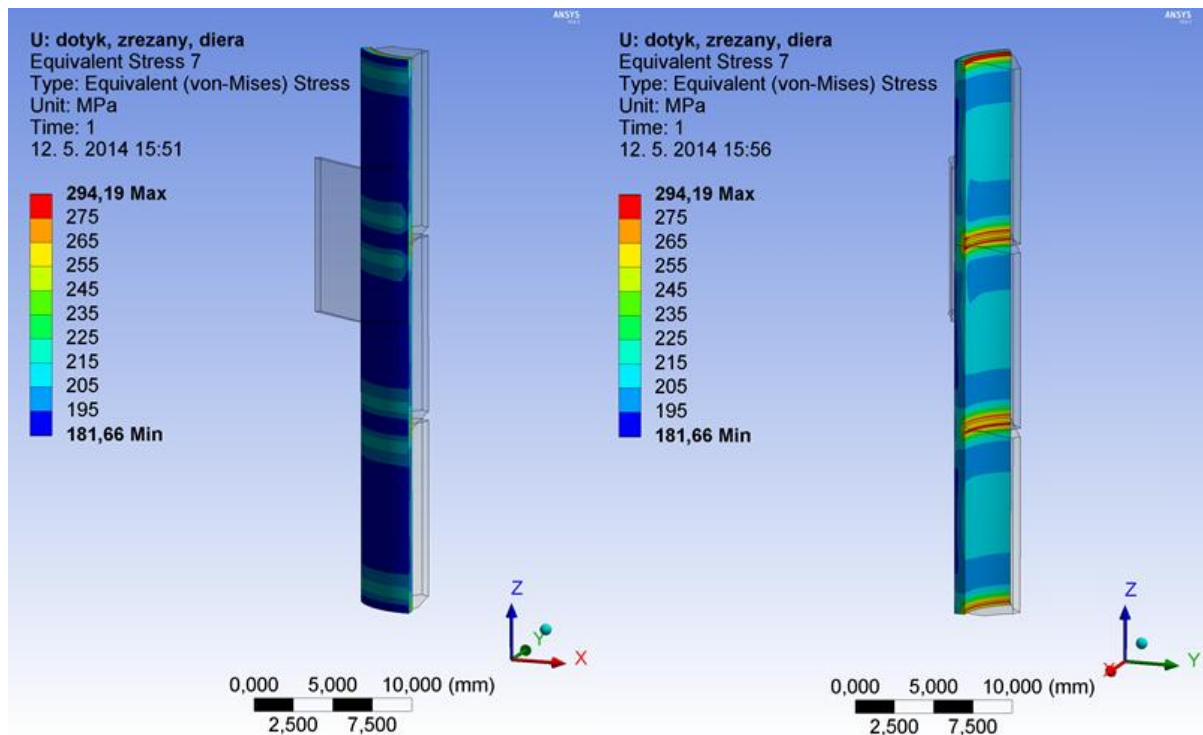
Obr. 7-6 Rozloženie napätia v pokrytí pre stav 1

7.6.2 Deformácie a napätia vznikajúce v pokrytí pri stave 2

Ako je možné vidieť na obr. 7-7 a obr. 7-8, je pri stave 2 vplyv mriežky na deformácie a napätia vznikajúce v pokrytí veľmi malý. Je to z dôvodu väčšieho zaťaženia pokrytia spôsobeného tlakom dotýkajúcej sa palivovej tablety. Na obrázkoch je taktiež vidieť, že ku zväčšeným deformáciám a koncentráciám napätia dochádza v pokrytí v oblasti na rozhraní palivových tabliet. Je to spôsobené nerovnomernou deformáciou tablety po jej výške, pretože konce tablety expandujú v radiálnom smere viac ako jej stred, a tým vytvárajú zvýšený tlak na vnútornú stranu pokrytia. Najväčšie deformácie vznikajú na vonkajšej strane pokrytia a najväčšie napätia sa objavujú naopak na vnútornej strane pokrytia.



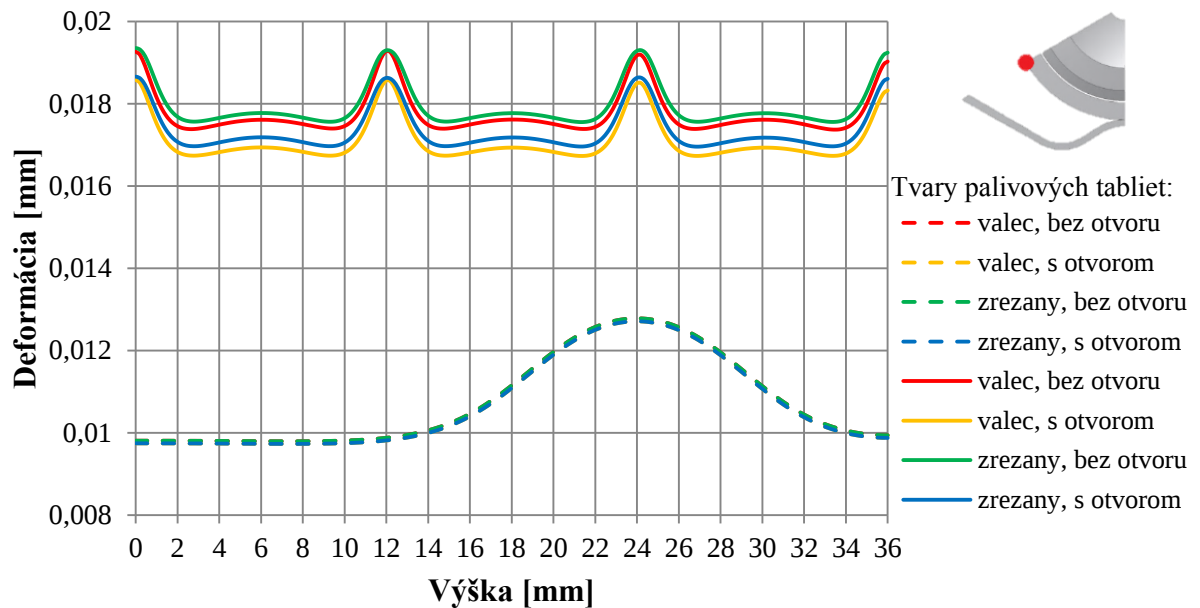
Obr. 7-7 Rozloženie deformácií v pokrytí pre stav 2



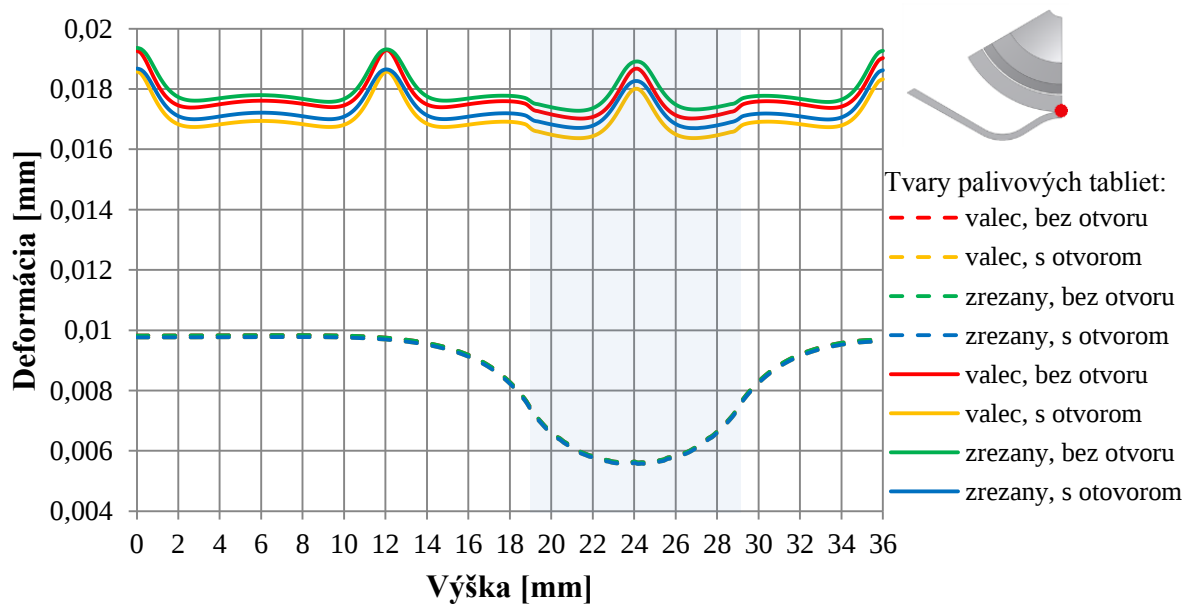
Obr. 7-8 Rozloženie napätí v pokrytí pre stav 2

7.6.3 Porovnanie vplyvu tvaru palivovej tablety na veľkosť deformácií a napätí vznikajúcich v pokrytí

V grafe 7-4 je možné vidieť priebehy deformácií vonkajšej strany pokrytia palivového elementu po jeho výške, v oblasti, kde sa mriežka nedotýka pokrytia. V grafe 7-5 sú vykreslené taktiež deformácie vonkajšej strany pokrytia po jeho výške, ale v tomto prípade ide o miesto s dotykom mriežky a pokrytia. Pre lepšiu názornosť je v pravom hornom rohu grafu pohľad na model zvrchu, na ktorom je červenou bodkou naznačené miesto, ktoré je v grafe vykreslené. Čiarkovanou čiarou sú v oboch grafoch vykreslené deformácie pre stav 1 a plnou pre stav 2. Modrá oblasť v grafe 7-5 označuje miesto v ktorom sa mriežka priamo dotýka pokrytia. V tejto oblasti dochádza pri stave 2 k miernemu zníženiu deformácií pre všetky tvary palivových tabliet. Z grafov je možné vidieť, že pokiaľ nedochádza ku kontaktu medzi tabletou a pokrytím nemá tvar tablety žiadny vplyv na veľkosť deformácie pokrytia a priebehy sa v grafoch prekrývajú. Po vytvorení kontaktu vznikajú väčšie deformácie pokrytia pri použití tabliet bez centrálneho otvoru a tabliet so skosením a vybraním na čelách. Ako bolo opísané v predchádzajúcej podkapitole, vďaka nerovnomernej deformácii tablety dochádza k zvýšeným deformáciám pokrytia na rozhraní palivových tabliet.



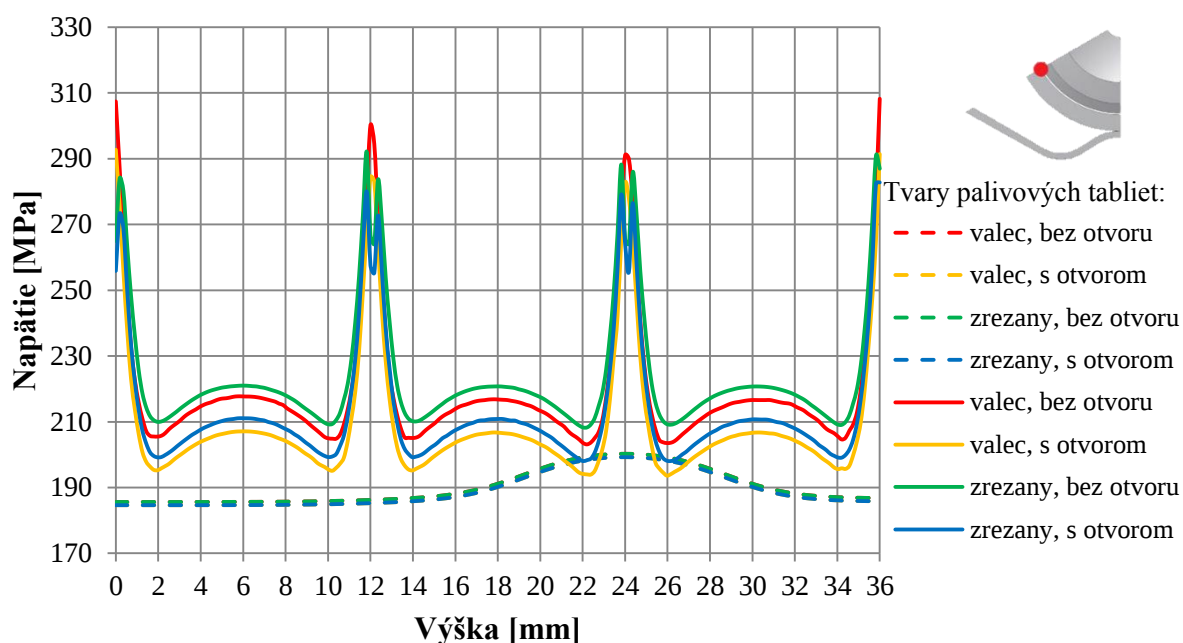
Graf 7-4 Priebeh deformácie vonkajšej strany pokrytia po jeho výške



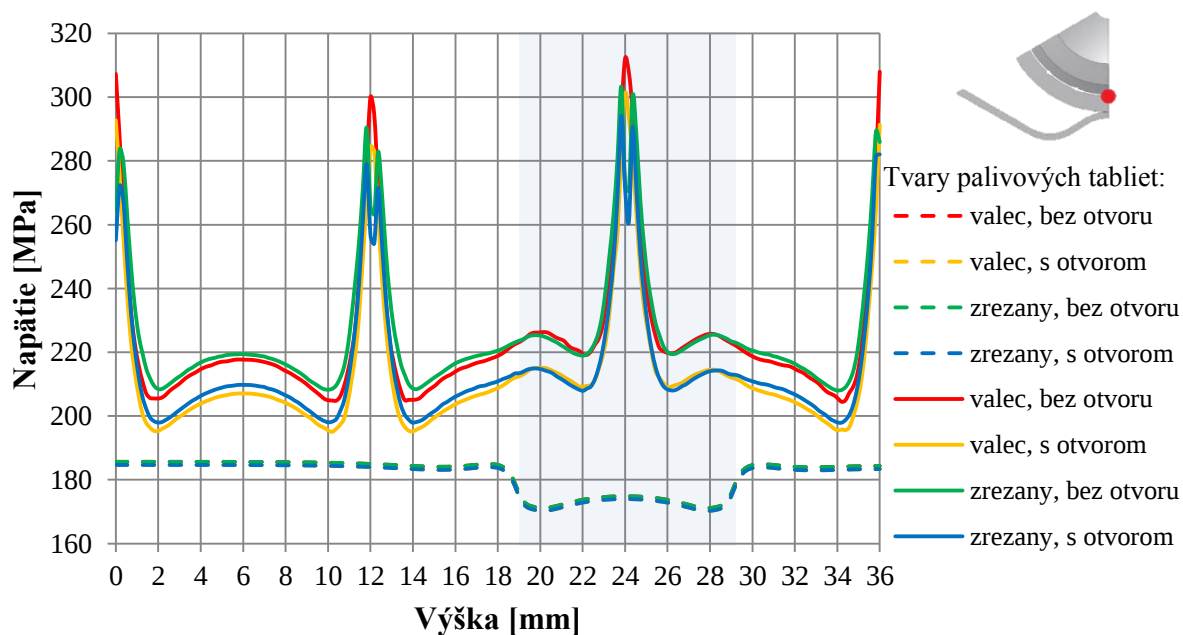
Graf 7-5 Priebeh deformácie vonkajšej strany pokrytia po jeho výške v oblasti dotyku mriežky

V grafoch 7-6 a 7-7 je možné vidieť priebehy napätí vznikajúce na vnútornej strane pokrytia po výške palivového elementu. V grafe 7-6 je vykreslené napätie pre oblasť bez dotyku s mriežkou a v grafe 7-7 oblasť, v ktorej sa mriežka dotýka pokrytia. Na oboch grafoch je, ako aj pri grafoch vykresľujúcich deformácie, v pravom hornom rohu naznačená vykresľovaná oblasť a modrou farbou je vyznačená oblasť priameho dotyku mriežky a pokrytia. Podobne ako tomu bolo pri deformáciách, ani pri porovnávaní napätí nemá tvar

tablety vplyv na jeho veľkosť, pokiaľ nedošlo ku kontaktu medzi tabletou a pokrytím. Po vytvorení kontaktu dochádza ku koncentráciám napätia v pokrytí v oblastiach na rozhraní palivových tabliet. Z grafov je možné vidieť, že pri použití tabliet so skosením hrán a vybraním na čelách dochádza k rozdeleniu vrcholku napätia na dve menšie. Tento efekt zapríčiňuje práve skosenie hrán, pretože nedochádza ku koncentrácii tlaku do jedného miesta, ako je tomu pri použití tabliet valcového tvaru bez skosenia. Ďalej je možné vidieť, že vyššie napätia vznikajú v pokrytí pri použití tabliet bez centrálneho otvoru.



Graf 7-6 Pribeh napätia na vnútornej strane pokrytia po jeho výške

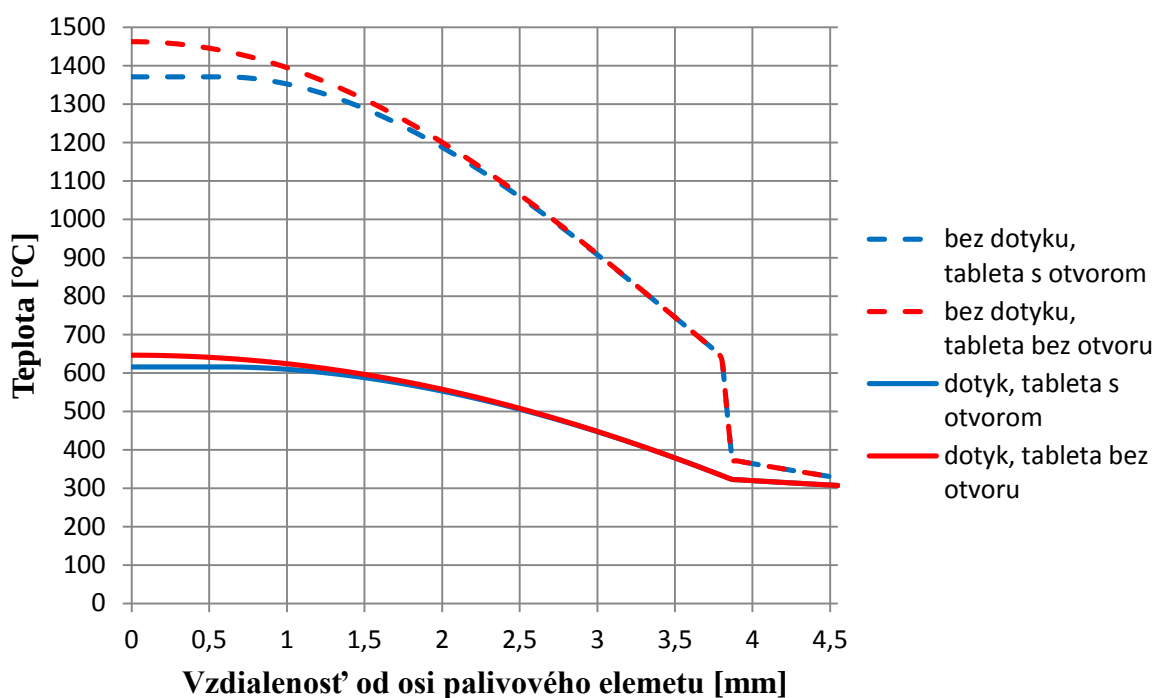


Graf 7-7 Pribeh napätia na vnútornej strane pokrytia po jeho výške v oblasti dotyku mriežky

7.6.4 Priebeh teplôt v palivovom elemente

Na grafe 7-8 je možné vidieť priebeh teplôt v palivovom elemente v jeho radiálnom smere. V grafe sú porovnávané len dva tvary palivových tabliet, a to tvar s centrálnym otvorom a bez neho, nakoľko skosenie hrán ani vybranie na čelách nemá vplyv na priebeh teploty palivového elementu v jeho radiálnom smere. Čiarkovanou čiarou sú v grafe vykreslené teploty pre stav 1 a plnou čiarou teploty pre stav 2. Z grafu je možné vidieť, že centrálny otvor v tablete znižuje teplotu v palivovom elemente, ale len v centrálnej oblasti. Pri čerstvom palive je rozdiel teplôt v osi palivovej tablety 91 °C, zatiaľ čo pri vyhorenom palive, s nižším objemovým výkonom, už len 30 °C.

Pri stave 1 teplota v palivovom elemente smerom od stredu tablety postupne klesá a v oblasti, kde je teplo prenášané pomocou plynnej medzery, dochádza vďaka nízkej teplotnej vodivosti plynov k jej výraznému poklesu. V ďalšej časti palivového elementu je teplo prenášané kovovým pokrytím, ktoré má dobrú tepelnú vodivosť, a preto v tejto oblasti nastáva len mierny pokles teploty. Priebeh teploty pre stav 2 má podobný charakter ako pri stave 1. Nie je tu ale možné pozorovať výrazný skok v priebehu teplôt, nakoľko sa pri tomto stave vytráca plynná medzera a teplo je prenášané len vedením v palivovej tablete a následne v pokrytí.



Graf 7-8 Rozloženie teplôt po polomere palivového elementu

7.6.5 Axiálne dilatácie stĺpca paliva

Pri nahrievaní paliva na prevádzkovú teplotu, zväčšuje stĺpec palivových tabliet svoju dĺžku. Z výsledkov výpočtu bolo preukázané, že najvýraznejší vplyv na dilatáciu stĺpca paliva má vybranie na čelách palivových tabliet. Palivové tablety expandujú v axiálnom smere najviac v osi palivovej tablety a pri použití tabliet s vybraním, kde sa tablety navzájom dotýkajú len v okrajových častiach, je práve táto expanzia zmiernená. Centrálny otvor v tablete taktiež vplýva na dilatáciu paliva, ale jeho vplyv je menší ako vplyv vybraní na čelách. Pri stave 1 nie je stĺpec paliva ovplyvnený kontaktom medzi palivom a pokrytím a môže v axiálnom smere voľne dilatovať. Z toho dôvodu je dilatácia stĺpca paliva pri stave 1 výrazne vyššia ako pri stave 2, kde kontakt medzi palivom a pokrytím bráni axiálnej dilatácii paliva. Konkrétne hodnoty pre jednotlivé tvary palivových tabliet je možné vidieť v tab. 5. Rozdiely medzi jednotlivými hodnotami sú síce len v stotínach milimetrov, ale výpočet bol robený pre stĺpec paliva skladajúci sa z troch palivových tabliet. Pri uvažovaní výšky stĺpca paliva 2500 mm, čo je približná hodnota pre palivové elementy reaktorov typu VVER 440, sú tieto rozdiely už niekoľko milimetrov.

7.6.6 Zhrnutie výsledkov

V tab. 5 je možné vidieť zhrnutie výsledkov skúmaných vlastností štyroch porovnávaných tvarov palivových tabliet. Pri deformáciách a napätiach vznikajúcich v pokrytí, ako aj pri axiálnej dilatácii palivových tabliet sú uvedené len maximálne hodnoty. Taktiež je pri niektorých sledovaných vlastnostiach uvedený rozdiel hodnôt medzi stavom 1 a stavom 2, aby bolo možné vidieť o koľko sa zvýšila sledovaná hodnota pri vytvorení kontaktu medzi palivom a pokrytím.

Tab. 5 Prehľad výsledkov

					
Deformácie pokrytia [mm]	Stav 1	0,0127	0,0127	0,0127	0,0127
	Stav 2	0,0192	0,0186	0,0193	0,0187
	rozdiel	0,0065	0,0059	0,0066	0,006
Napätie v pokrytí [MPa]	Stav 1	199,2	199,2	199,2	199,2
	Stav 2	312,2	301,2	303,3	294,2
	rozdiel	113	102	104,1	95
Teplota v osi palivovej tablety [°C]	Stav 1	1462	1371	1462	1371
	Stav 2	646	616	646	616
Axiálne dilatácie troch palivových tabliet [mm]	Stav 1	0,473	0,434	0,392	0,380
	Stav 2	0,186	0,185	0,165	0,156

Z tabuľky je vidieť, že pre rôzne skúmané vlastnosti vychádzajú aj rozdielne najvhodnejšie tvary palivových tabliet. Z celkového hľadiska vychádza ako najnevhodnejší tvar palivovej tablety valcový tvar bez centrálneho otvoru. Naopak ako najvhodnejší sa javí tvar so skosením hrán, vybraním na čelách a s centrálnym otvorom.

Celkový vplyv tvaru tablety na deformácie a napätia vznikajúce v pokrytí nie je veľký. Pri porovnaní najnevhodnejšieho a najvhodnejšieho tvaru tablety sa rozdiel v hodnotách pri stave 2 líši o menej než 6 % (vzťahnuté na najnevhodnejší tvar). Výraznejší vplyv tvaru tablety vidieť pri porovnaní axiálnych dilatácií, kde je rozdiel medzi hodnotami pre stav 1 skoro 20 % (vzťahnuté na najnevhodnejší tvar).

Napätia vznikajúce v pokrytí narastli vplyvom kontaktu v niektorých prípadoch o viac než 100 MPa, ale stále sú pri všetkých tvaroch palivových tabliet tieto hodnoty pod medzou pevnosti. Problém môže nastať len v prípade, keď sa ku zvýšenému napätiu spôsobenému kontaktom medzi palivom a pokrytím pridá ešte ďalší degradačný vplyv, ako napríklad hydridácia alebo korózia povrchu pokrytia, výrobné chyby, poškodenie pokrytia trením o mriežku a iné.

Výsledky analýzy boli konzultované s pánom Ing. Martinom Dostálom, Ph.D. z oddelenia Ťeských havárií a termomechaniky, divízie Jaderné bezpečnosti a spoľahlivosti, spoločnosti ÚJV Řež a.s.

Záver

Vývoj v oblasti jadrového paliva neustále napreduje. Ako je možné vidieť v druhej kapitole, za posledných niekoľko rokov sa zmenilo nielen obohatenie paliva, ale sa upravila aj konštrukcia palivových kaziet a vylepšili sa používané materiály. Všetky zavedené inovácie prispeli k zvýšeniu bezpečnosti a výkonnosti paliva, k predĺženiu palivového cyklu a k efektívnejšiemu využívaniu jadrového paliva.

Každý inovácií zavedenej do jadrového reaktora musí predchádzať rozsiahly výskum. Palivové elementy sú v reaktore vystavené špecifickým zaťažujúcim podmienkam, a preto sa pri ich prevádzke objavujú určité špecifické fenomény a procesy, ktoré priamo vplyvajú na ich správanie. Aby bolo možné správne namodelovať správanie palivových elementov, musia byť najskôr tieto procesy do detailov pochopené. Cieľom bakalárskej práce bolo zdokumentovanie jednotlivých procesov, ku ktorým dochádza v jadrovom palive a pokrytí palivových elementov počas prevádzky v jadrovom reaktore a priblíženie mechanizmov a dôsledkov ich vzniku. Aj pri pochopení všetkých týchto procesov je komplexné modelovanie správania palivových elementov veľmi zložitým problémom, nakoľko väčšina procesov prebieha súčasne a navzájom sa výrazne ovplyvňuje.

V bakalárskej práci boli taktiež opísané niektoré základné vlastnosti materiálov používaných v palivových elementoch. Jedná sa konkrétne o oxid uranický z ktorého sú vyrábané palivové tablety a zirkóniové zliatiny používané na pokrytie palivových elementov. Väčšina vlastností je závislá na teplote, vyhorení a ďalších parametroch. Niektoré z uvedených vlastností boli použité pri analýze pokrytia palivových elementov, opísanej v poslednej kapitole.

Na palivový element pôsobia počas jeho pobytu v reaktore rôzne degradačné vplyvy, ktoré môžu v niektorých prípadoch viesť až k jeho poškodeniu. V šiestej kapitole boli opísané jednotlivé príčiny poškodenia palivových elementov vyskytujúce sa na reaktoroch typu VVER. Taktiež je v tejto kapitole uvedený prehľad vývoja porúch a zhodnotenie poruchovosti palivových elementov českých a slovenských jadrových elektrární.

Jednou z úprav s ktorou sa uvažuje v budúcnosti je zväčšenie priemeru palivovej tablety, a tým zväčšenie množstva paliva v reaktore. Aby zostali zachované základné rozmery palivových kaziet, musí byť pri zväčšení priemeru tablety zmenšená hrúbka pokrytia palivových elementov. Hrúbka pokrytia môže byť zmenšená, ale len do takej miery, aby zostala stále zaručená pevnosť a odolnosť pokrytia voči poškodeniam, nakoľko tesnosť palivových elementov je jedným z limitujúcich prvkov prevádzky jadrovej elektrárne. Pri vyššom vyhorení paliva narastie palivová tableta až natolko, že začne tlačiť na pokrytie. Pokrytie sa následne deformuje a dochádza v ňom k výraznému zvýšeniu napätia. Ako je vidieť z urobenej analýzy, opísanej v poslednej kapitole, každá zmena tvaru palivovej tablety má vplyv na veľkosť deformácií a napätí vznikajúcich v pokrytí palivového elementu. Okrem deformácií a napätí, boli taktiež skúmané axiálne dilatácie stĺpca paliva a rozloženie teploty po polomere palivového elementu. Z dosiahnutých výsledkov je možné zhodnotiť, ktorý tvar palivovej tablety sa javí ako najvhodnejší a najnevhodnejší pre posudzované vlastnosti.

Zoznam použitých zdrojov

- [1] BEČVÁŘ, Josef et al. *Jaderné elektrárny*. 2. opravené vydání. Praha: SNTL/ALFA, 1981, 634 s.
- [2] HEŘMANSKÝ, Bedřich. *Termomechanika jaderných reaktorů*. 1. vyd. Praha: Academia, 1986, 434 s.
- [3] THE TVEL FUEL COMPANY OF ROSATOM. *Nuclear fuel for VVER reactors* [cit. 2014-2-22]. Dostupné z: <http://www.tvel.ru/>
- [4] Výkresová dokumentácia spoločnosti Slovenské elektrárne
- [5] UGRYUMOV, A. NUCLEAR FUEL FOR NPP: CURRENT STATUS AND MAIN FIELDS OF THE DEVELOPMENT. In: *International Conference VVER 2013* [online]. Praha, 2013 [cit. 2014-3-22]. Dostupné z: <http://ftp.vver2013.com/VVER%202013%20-%20Day%20II.,%20Parallel%20Section%20II.,PDF/Ugryumov%20A..pdf>
- [6] VUJE. *Prevádzka JE*. Školiace a výcvikové stredisko personálu JE, 2010
- [7] SLOVENSKÉ ELEKTRÁRNE. Nový typ paliva. *Generálne opravy 2011*. 2011
- [8] PÁLENÍK, Peter. *Nové palivo Gd-II s obohatením 4,87% v EMO* [prezentácia]. SE, 2011
- [9] MIKOLÁŠ, Pavel. VVER-440 fuel cycles possibilities using modified FA design. In: *20. Atomic Energy Research Symposium on WWER Physics and Reactor Safety* [online]. Hanasaari, 2010 [cit. 2014-3-22]. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/131/41131417.pdf
- [10] GREŽDO, Ondrej. Operational experience with Gd 4.8% fuel type at Bohunice NPP. In: *10. International conference on WWER fuel performance, modelling and experimental support* [online]. Sandanski, 2013 [cit. 2014-3-22]. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/44/122/44122477.pdf
- [11] SVOBODA, Radek. Implementation of New Fuel System at Temelin. In: *Nuclear Power for the People* [online]. Nesebar, 2010 [cit. 2014-3-22]. Dostupné z: www.bgns.bg/web/pub/bgns/7_paper.doc
- [12] SAMOILOV, O. Development of TVSA VVER-1000 fuel. In: *10. International conference on WWER fuel performance, modelling and experimental support* [online]. Sandanski, 2013 [cit. 2014-3-22]. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/44/122/44122449.pdf
- [13] POPOV, S.G. Thermophysical Properties of MOX and UO₂ Fuels Including the Effects of Irradiation. In: [online]. ORNL, 2000 [cit. 2014-3-22]. Dostupné z: web.ornl.gov/~webworks/cpr/v823/rpt/109264.pdf

- [14] SIEFKEN, L. J. *MATPRO -A Library of Materials Properties for Light-Water-Reactor Accident Analysis* [online]. Idaho Falls: Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, 2001 [cit. 2014-03-22]. Dostupné z: <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6150/v4/>
- [15] RASHID, J. Behaviour Modelling of LWR Fuel. In: *International conference on WWER fuel performance, modelling and experimental support* [online]. Varna, 2001 [cit. 2014-4-16]. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/070/33070742.pdf
- [16] GOLOVANOV, V.N. WWER fuel behaviour and characteristics at high burnup. In: *Technical committee meeting on nuclear fuel behaviour modelling at high burnup and its experimental support* [online]. Windermere, 2000 [cit. 2014-4-16]. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/32/044/32044083.pdf
- [17] FAYA, S.C.S. A survey on fuel pellet cracking and healing phenomena in reactor operation. In: [online]. Sao Paulo: Instituto de Pesquisas Energeticas e Nucleares, 1981 [cit. 2014-4-16]. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/13/703/13703398.pdf
- [18] PATTERSON, Charles. *Processes going on in Nonfailed Rod during Normal Operation* [online]. Mölnlycke: Advanced Nuclear Technology International, 2010 [cit. 2014-03-22]. Dostupné z: https://www.antinternational.com/fileadmin/Products_and_handbooks/Anim_PDFs/ZIRAT/15/STR_Vol_1/files/zirat15_str_vol1_processes.pdf
- [19] ALLEN, Tod. *Restructuring & Rod Bowing* [prezentácia]. University of Wisconsin–Madison, Department of Engineering Physics, 2006
- [20] CAILLOT, L. Thermal and in-pile densification of MOX fuels: Some recent results. In: *Technical committee meeting on recycling of plutonium and uranium in water reactor fuel* [online]. Newby Bridge, 1997 [cit. 2012-4-16]. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/28/047/28047181.pdf
- [21] MASSIH, A. Irradiation Induced Swelling of Nuclear Fuel. In: [online]. Vaesteraas, 1988 [cit. 2014-03-22]. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/20/023/20023188.pdf
- [22] SMIRNOV, A. Results of Post-Irradiation Examination to Validate WWER-440 and WWER-1000 Fuel Efficiency at High Burnups. In: *International conference on WWER fuel performance, modelling and experimental support* [online]. Varna, 2001 [cit. 2014-4-16]. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/070/33070715.pdf

- [23] LIKHANSKII, V. Modelling of high burnup structure in UO₂ fuel with the RTOP code. In: *7. International conference on WWER fuel performance, modelling and experimental support* [online]. Albena, 2008 [cit. 2014-2-24]. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/39/079/39079744.pdf
- [24] LEE, Chan Bock. A New Mechanistic and Engineering Fission Gas Release Model for a Uranium Dioxide Fuel. *Journal of Nuclear Science and Technology* [online]. 2008, roč. 45, č. 1, s. 60-71 [cit. 2014-03-22]. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1080/18811248.2008.9711415>
- [25] ALLEN, Tod. *Fission Gas Release* [prezentácia]. University of Wisconsin–Madison, Department of Engineering Physics, 2006
- [26] MASSIH, A. R. *Models for MOX fuel behaviour: A selective review* [online]. Uppsala: Quantum Technologies AB, 2006 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/37/064/37064948.pdf
- [27] BENTEJAC, F. Fuel rod modelling during transients: The TOUTATIS code. In: *Technical committee meeting on nuclear fuel behaviour modelling at high burnup and its experimental support* [online]. Windermere, 2001 [cit. 2014-2-24]. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/32/044/32044064.pdf
- [28] SABATULA, Ondrej. Analýza príčin degradácií konštrukčných materiálov jadrového paliva pre VVER. In: *Študentská vedecká konferencia* [online]. Bratislava, 2007 [cit. 2014-1-23]. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/131/41131495.pdf
- [29] WEIDINGER, H. G. Zr-alloys, the nuclear material for water reactor fuel. A survey and update with focus on fuel for pressurized water reactor systems. In: *7. International conference on WWER fuel performance, modelling and experimental support* [online]. Albena, 2008 [cit. 2014-1-23]. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/39/079/39079704.pdf
- [30] WHITMARSH, C. L. *Review of Zircaloy-2 and Zircaloy-4 properties relevant to N.S. savannah reactor design* [online]. OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, 1982 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://web.ornl.gov/info/reports/1962/3445605716311.pdf>
- [31] OLANDER, D. R. a A. T. MOTTA. *A New Book: Light Water Reactor Materials* [online]. Nuclear Engineering and Technology, 2005 [cit. 2014-03-12]. Dostupné z: http://www2.mne.psu.edu/motta/Chapters/BookVersionDec2011/Chapter%2017/Chapter17_ZrAlloys_july11.pdf

- [32] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Thermophysical properties database of materials for light water reactors and heavy water reactors: final report of a coordinated research project, 1999-2005 [online]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2006 [cit. 2014-05-12]. ISBN 92-010-4706-1. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/37/118/37118326.pdf
- [33] SMIRNOV, A. Results of post-irradiation examination of VVER fuel assembly structural components made of E110 and E635 alloys. In: 6. *International conference on WWER fuel performance, modelling and experimental support* [online]. Albena, 2006 [cit. 2014-3-22]. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/37/098/37098327.pdf
- [34] MARKOV, D. Change of VVER-440 fuel rod geometry under operation up to 65 MWd/kgU fuel burnup. In: 6. *International conference on WWER fuel performance, modelling and experimental support* [online]. Albena, 2006 [cit. 2014-3-21]. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/37/098/37098326.pdf
- [35] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Review of fuel failures in water cooled reactors*[online]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010 [cit. 2014-04-12]. ISBN 978-920-1026-101. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1445_web.pdf
- [36] SVOBODA, R. Grid-to-rod fretting: Rodinná choroba paliva PWR. In: *NUSIM 2008: 16. Annual Nuclear Seminar and Information Meeting* [online]. 2008 [cit. 2014-4-22]. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/124/43124127.pdf
- [37] TSYGANOV, S. V. The procedure for determination of special margin factors to account for a bow of the VVER-1000 fuel assemblies. In: *Proceedings of the eighteenth symposium of atomic energy research* [online]. 2008 [cit. 2014-3-12]. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/40/059/40059728.pdf
- [38] KOLOSOVSKY, V. Development of anti-debris filter for VVER-440 working fuel assembly. In: 6. *International conference on WWER fuel performance, modelling and experimental support*[online]. Albena, 2006 [cit. 2014-4-12]. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/37/098/37098319.pdf
- [39] ALLEN, Tod. *Fuel Failures and Consequences* [prezentácia]. University of Wisconsin–Madison, Department of Engineering Physics, 2006
- [40] KLIK, František a Jaroslav DALIBA. *Jaderná energetika*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 189 s. ISBN 80-010-2550-0.

-
- [41] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Preliminary results of the IAEA study on Fuel Failures in Water Cooled Reactors in 2006-2010. In: [online]. IAEA, 2011 [cit. 2014-3-22]. Dostupné z: <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/documents/TWGFPT-2011/presentations/FFR.pdf>.
- [42] MIKLOŠ, Marek. The role of CVR in the fuel inspection at Temelín NPP. In: *Hot cell post-irradiation examination and poolside inspection of nuclear fuel* [online]. Smolenice, 2013 [cit. 2014-3-22]. Dostupné z: [http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/Technical_Areas/NFC/documents/TM-Smolenice-2011/Session_1_\(Inspection\)/1.4. MIKLOS The role of CVR in the fuel inspection at Temelin NPP.pdf](http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/Technical_Areas/NFC/documents/TM-Smolenice-2011/Session_1_(Inspection)/1.4._MIKLOS_The_role_of_CVR_in_the_fuel_inspection_at_Temelin_NPP.pdf)
- [43] MOROZOV, V.V. Fuel cycles of VVER-440 with third generation fuel assemblies application. In: *20. Atomic Energy Research Symposium on VVER Physics and Reactor Safety* [online]. Espoo, 2010 [cit. 2014-2-12]. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/131/41131415.pdf
- [44] RAEMAE, T. Effect of spacer grid mixing vanes on coolant outlet temperature distribution. In: *21. Atomic Energy Research Symposium on WVER Physics and Reactor Safety* [online]. Dresden, 2011 [cit. 2014-2-12]. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/42/105/42105744.pdf
- [45] WOLFGANG, Doerr. *Nuclear reactor green and sintered fuel pellets, corresponding fuel and fuel assembly* [online]. AREVA, 2011 [cit. 2014-2-12]. Dostupné z: <http://www.google.com/patents/US20110176650>

Zoznam použitých skratiek a symbolov

Skratka/symbol	Význam	Jednotka
VVER	vodo-vodný energetický reaktor	
UO ₂	oxid uraničitý	
Gd ₂ O ₃	oxid gadolinitý	
ZrB ₂	borid zirkónia	
HBS	high burnup structure	
SCC	stress corrosion cracking	
MKP	metóda konečných prvkov	
T_t	teplota tavenia	K
FBu	vyhorenie paliva	MWd/tU
β_{UO_2}	súčiniteľ tepelnej rozťažnosti UO ₂	°C ⁻¹
t_{UO_2}	teplota paliva	°C
β_{Zr}	súčiniteľ tepelnej rozťažnosti zirkóniovej zliatiny	°C ⁻¹
t_{Zr}	teplota zirkóniovej zliatiny	°C
q_H	lineárny výkon palivového elementu	W/m
q_V	objemový výkon palivovej tablety	W/m ³
r_u	polomer palivovej tablety	m

Zoznam obrázkov, grafov a tabuliek

Obr. 1-1 Palivový element reaktora VVER 440.....	12
Obr. 2-1 Rezy palivovými kazetami so stredným obohatením 3,6 %; 3,82 % a 4,25 %.....	15
Obr. 2-2 Rez palivovou kazetou so stredným obohatením 4,87 %	15
Obr. 2-3 Rez palivovou kazetou so stredným obohatením 4,76 %	16
Obr. 2-4 Model palivovej kazety 3. generácie bez palivových elementov (vľavo) a s palivovými elementmi (vpravo)	17
Obr. 2-5 Rez palivovou kazetou 3. generácie.....	17
Obr. 4-1 Popraskanie palivovej tablety	23
Obr. 4-2 Tvorba centrálneho otvoru v palivovej tablete	24
Obr. 4-3 Kryštalické štruktúry vytvorené v palivovej tablete	26
Obr. 4-4 Uvoľňovanie plynných produktov štiepenia pomocou mechanizmu priameho úniku a úniku vyrazením	27
Obr. 4-5 Vydúvanie pokrytia palivových elementov	28
Obr. 5-1 Vplyv paliva na pokrytie palivových elementov počas prevádzky.....	35
Obr. 6-1 Poškodenie pokrytia palivového elementu trením o distančnú mriežku.....	38
Obr. 6-2 Poškodenie pokrytia palivového elementu spôsobené kontaktom medzi palivom a pokrytím a chýbajúcou časťou palivovej tablety	39
Obr. 6-3 Filter nečistôt (vľavo) a jeho umiestnenie v palivovej kazete reaktora VVER 440 (vpravo).....	40
Obr. 6-4 Poškodenie distančnej mriežky palivovej kazety	40
Obr. 6-5 „Gilotínové preseknutie“ palivového elementu	41
Obr. 6-6 Prasknutie pokrytia palivového elementu.....	41
Obr. 7-1 Porovnávané tvary palivových tabliet.....	44
Obr. 7-2 Geometrický model palivového elementu bez dotyku medzi palivom a pokrytím s palivovými tabletami bez centrálneho otvoru, so skosením hrán a vybraním na čelách ...	45
Obr. 7-3 Nákres skosenia hrán a vybraní na čele palivovej tablety.....	45
Obr. 7-4 MKP model.....	46
Obr. 7-5 Rozloženie deformácií v pokrytí pre stav 1	50
Obr. 7-6 Rozloženie napätia v pokrytí pre stav 1	50
Obr. 7-7 Rozloženie deformácií v pokrytí pre stav 2	51
Obr. 7-8 Rozloženie napätí v pokrytí pre stav 2.....	52

Graf 3-1 Teoretická hustota UO_2	19
Graf 3-2 Merná tepelná kapacita UO_2	20
Graf 3-3 Merná tepelná vodivosť UO_2 v závislosti na teplote a vyhorení.....	21
Graf 3-4 Youngov modul pružnosti v závislosti na teplote a teoretickej hustote paliva	22
Graf 4-1 Objemový rast UO_2	25
Graf 5-1 Merná tepelná kapacita zliatiny Zircaloy-4.....	30
Graf 5-2 Merná tepelná vodivosť zliatiny Zr1%Nb	31
Graf 5-3 Modul pružnosti v ťahu a šmyku zliatiny Zircaloy-4	31
Graf 5-4 Medza klzu zliatiny E110	32
Graf 5-5 Medza pevnosti zliatiny E110.....	32
Graf 5-6 Predĺženie zliatiny E110	33
Graf 5-7 Creep zliatin pokrytia palivových elementov ($E > 0,1 \text{ MeV}$)	33
Graf 5-8 Radiačný rast zliatiny E110 v závislosti na dávke radiačného poškodenia v pozdĺžnom (1) a tangenciálnom smere (2)	34
Graf 5-9 Zmena priemeru palivových elementov v závislosti na vyhorení paliva	36
Graf 5-10 Predĺženie palivových elementov v závislosti na vyhorení paliva.....	36
Graf 6-1 Hrúbka zoxidovanej vrstvy vonkajšieho povrchu pokrytia v závislosti na vyhorení paliva pre rôzne druhy zirkóniových zliatin	37
Graf 6-2 Príčiny poškodenia palivových elementov tlakovodných reaktorov.....	42
Graf 6-3 Počet poškodených palivových kaziet reaktorov typu VVER	43
Graf 6-4 Počet poškodených palivových kaziet reaktorov typu VVER	43
Graf 7-1 Súčinitele tepelnej vodivosti hélia, UO_2 , ožiareného UO_2 a Zircaloy-4 v závislosti na teplote	47
Graf 7-2 Súčiniteľ tepelnej rozťažnosti UO_2 a Zircaloy-4 v závislosti na teplote.....	47
Graf 7-3 Modul pružnosti v ťahu UO_2 a Zircaloy-4 a modul pružnosti v šmyku.....	48
Graf 7-4 Priebeh deformácie vonkajšej strany pokrytia po jeho výške	53
Graf 7-5 Priebeh deformácie vonkajšej strany pokrytia po jeho výške v oblasti dotyku mriežky	53
Graf 7-6 Priebeh napätia na vnútornej strane pokrytia po jeho výške	54
Graf 7-7 Priebeh napätia na vnútornej strane pokrytia po jeho výške v oblasti dotyku mriežky	54
Graf 7-8 Rozloženie teplôt po polomere palivového elementu	55
Tab. 1 Vývoj palivových kaziet reaktora VVER 440	14
Tab. 2 Obsah prímies v zliatine E110 a Zircaloy-4	29
Tab. 3 Zdroje materiálových vlastností použitých pri výpočte.....	47
Tab. 4 Základné parametre výpočtových stavov	48
Tab. 5 Prehľad výsledkov	56