

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

**Katedra jaderných reaktorů**

**Obor: Jaderné inženýrství**



## **Deformace palivových proutků**

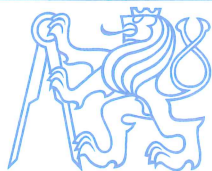
### **Fuel Rods Deformations**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Vypracoval: Michal Ešše

Vedoucí práce: Ing. Dušan Kobyłka, Ph.D.

Rok: 2022



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Michal Ešše**

Studijní program: Aplikace přírodních věd

Obor: Jaderné inženýrství

Název práce česky: **Deformace palivových proutků**

Název práce anglicky: Fuel Rods Deformations

### Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s konstrukcí a materiály palivových proutků a souborů lehkovodních jaderných reaktorů a podmínkami, za kterých jsou provozovány. Zaměřte se především na bezobálková paliva pro tlakovodní reaktory.
2. Seznamte se s jevy, ke kterým v palivu dochází během vyhořívání, a s mechanismy a zatíženími, které na palivové proutky při provozu působí. Nastudujte problematiku deformací (zejména průhybů) palivových souborů a palivových proutků během provozu včetně možností jejich detekce.
3. Proved'te rešerši pozorování deformace/průhybu palivových proutků v jaderných reaktorech, možných nežádoucích dopadů na provoz, uvažovaných mechanismů, které tento průhyb způsobují, prováděných opatření pro snížení výskytu a způsobů a možností modelování. Na základě provedené rešerše odvod'te možné mechanismy vedoucí k průhybu palivových proutků.
4. Na základě bodu 3 zvolte vhodnou metodu a navrh'něte výpočetní postup k ocenění váhy jednotlivých mechanismů a parametrů paliva na velikost možného průhybu palivového proutku (resp. jeho části mezi distančními mřížkami). Proved'te jednoduchý výpočet (analyticky nebo ve vhodném výpočetním kódu), který vyhodnot'te a analyzujte.

### Doporučená literatura:

- [1] Olander D. R.: Fundamental aspects of nuclear reactor fuel elements, TID-26711-P1, University of Berkeley, 1976
- [2] Konings R. J. M.: Comprehensive Nuclear Materials, Elsevier, 2012, ISBN 978-0-08-056033-5
- [3] Bailly H., Ménessier D., Prunier C.: The Nuclear Fuel of Pressurized Water Reactors and Fast Reactors, Design and Behaviour, Lavoisier Publ. Inc., 1999, ISBN: CEA 2-7272-0198-2
- [4] IAEA: Structural Behaviour of Fuel Assemblies for Water Cooled Reactors, IAEA-TECDOC-1454, Vienna, Austria, 2005
- [5] Timošenko Š. P.: Pružnost a pevnost, I. Díl, Technicko-vědecké vydavatelství, Praha, 1951

Jméno a pracoviště vedoucího práce: **Ing. Dušan Kobyłka, Ph.D.**  
KJR FJFI ČVUT v Praze

Jméno a pracoviště konzultanta práce: **Ing. Martin Dostál, Ph.D.**  
ÚJV Řež, a.s.

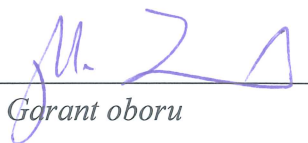
Datum zadání bakalářské práce: 11.10. 2021

Datum odevzdání bakalářské práce: 7.7. 2022

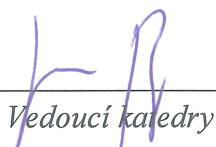
Doba platnosti zadání je dva roky od data zadání.

V Praze dne 11.10. 2021

doc. Ing. Martin Kropík, CSc.

  
Garant oboru

Ing. Jan Rataj, Ph.D.

  
Vedoucí katedry



prof. Ing. Igor Jex, DrSc.

  
Děkan

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne .....

.....

Michal Ešše

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat především Ing. Dušanovi Kobylkovi, Ph.D. za korekturu mé bakalářské práce a za objasnění velkého množství faktů. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Martinovi Dostálovi, Ph.D. za materiály a konzultace, které mi pomohly s vypracováním mé bakalářské práce.

Michal Ešše

*Název práce:*

## **Deformace palivových proutků**

*Autor:* Michal Ešše

*Studijní program:* Aplikace přírodních věd

*Obor:* Jaderné inženýrství

*Druh práce:* Bakalářská práce

*Vedoucí práce:* Ing. Dušan Kobylka, Ph.D.  
KJR FJFI ČVUT v Praze

*Konzultant:* Ing. Martin Dostál, Ph.D.  
ÚJV Řež, a.s.

*Abstrakt:*

Tato bakalářská práce se zaměřuje na deformace palivových proutků. Konstrukce a materiály palivových proutků jsou důležité pro zajištění správné funkčnosti i v nepříznivých podmínkách jaderného reaktoru. Podmínky v jaderném reaktoru vyvolávají deformační mechanismy, které způsobují deformace pokrytí. Spolu s vyhoříváním paliva tyto mechanismy mohou vést k deformaci palivového proutku. Možným následkem deformace palivového proutku je průhyb palivového proutku. Dále průhyb palivového proutku může být způsoben průhybem palivového souboru. Pro vyhodnocení vlivu těchto mechanismů a parametrů palivového proutku na průhyb je potřeba sestavit vhodný model a provést analytický výpočet.

*Klíčová slova:* průhyb palivového proutku, zirkoniová slitina, palivový soubor, pokrytí, palivová tableta

*Title:*

## **Fuel Rods Deformations**

*Author:* Michal Ešše

*Abstract:* This bachelor's thesis focuses on the deformations of fuel rods. The design and materials of the fuel rods are important to ensure proper functionality even under adverse conditions in a nuclear reactor. The conditions in a nuclear reactor induce degradation mechanisms that cause coating deformations. Together with the burning of the fuel, these mechanisms can lead to deformation of the fuel rod. A possible consequence of the deformation of the fuel rod is the bending of the fuel rod. Furthermore, the deflection of the fuel rod can be caused by the deflection of the fuel assembly. To evaluate the effect of these mechanisms and parameters of the fuel rod on the deflection, it is necessary to build a suitable model and perform an analytical calculation.

*Key words:* fuel rod bow, zirconium alloy, fuel assembly, cladding, fuel pellet

# Obsah

<b>Seznam použitých zkratk</b>	<b>ix</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>x</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>xii</b>
<b>Seznam veličin</b>	<b>xiii</b>
<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Konstrukce a materiály palivových proutků</b>	<b>2</b>
1.1 Palivové tablety . . . . .	2
1.2 Pokrytí . . . . .	3
1.2.1 Zirkonium . . . . .	3
1.2.2 Zircaloy-2 . . . . .	4
1.2.3 Zircaloy-4 . . . . .	6
1.2.4 ZIRLO . . . . .	7
1.2.5 E110 . . . . .	8
1.2.6 M5 . . . . .	8
1.3 Palivové proutky . . . . .	9
<b>2 Palivové soubory</b>	<b>11</b>
2.1 Palivové soubory TVSA-T mod. 1 a TVSA-T mod. 2 . . . . .	11
2.2 Palivový soubor typu PWR . . . . .	13
2.3 Palivový soubor typu BWR . . . . .	13
<b>3 Podmínky při provozu palivových souborů</b>	<b>15</b>
3.1 VVER - 1000 a PWR . . . . .	15
3.2 BWR . . . . .	16
<b>4 Vyhořívání jaderného paliva</b>	<b>18</b>
4.1 Rozložení výkonu v tabletě . . . . .	18
4.2 Praskání a relokace . . . . .	18
4.3 Uvolňování štěpných produktů . . . . .	19
4.4 Napuchání paliva . . . . .	21
4.5 Denzifikace . . . . .	21
<b>5 Namáhání palivových proutků</b>	<b>22</b>
5.1 Radiační růst zirkoniových slitin . . . . .	22
5.2 Creep . . . . .	22
5.3 Oxidace . . . . .	22

5.4	Navodíkování . . . . .	23
5.5	PCI . . . . .	23
5.6	Tok chladiva . . . . .	24
5.7	Přítlačná síla buněk v distančních mřížkách . . . . .	25
5.8	Otěr . . . . .	25
5.9	Rozvoj napětí v palivovém proutku . . . . .	26
<b>6</b>	<b>Deformace palivových souborů</b>	<b>27</b>
<b>7</b>	<b>Deformace palivových proutků</b>	<b>30</b>
7.1	Pozorování deformací při provozu . . . . .	30
7.2	Negativní dopady na provoz . . . . .	31
7.2.1	Výkonové peaky . . . . .	31
7.2.2	Vyhořívání paliva . . . . .	31
7.2.3	Vliv deformace na termohydrauliku palivového proutku . . . . .	32
7.3	Modelování . . . . .	33
7.4	Mechanismy průhybu palivových proutků . . . . .	33
7.5	Opatření . . . . .	34
<b>8</b>	<b>Výpočet a analýza průhybu palivového proutku</b>	<b>35</b>
8.1	Model . . . . .	35
8.2	Výpočet . . . . .	37
8.3	Princip analýzy . . . . .	38
8.4	Idealizace palivového souboru . . . . .	39
8.5	Vyhodnocení vlivu parametrů paliva na průhyb . . . . .	40
8.5.1	Porovnání palivových souborů . . . . .	40
8.5.2	Vliv rozteče distančních mřížek . . . . .	40
8.5.3	Vliv vnějšího průměru . . . . .	41
8.6	Vyhodnocení vlivu namáhání na průhyb . . . . .	41
8.6.1	Vliv creepu . . . . .	41
8.6.2	Vliv oxidace . . . . .	42
8.7	Limity navržené analýzy . . . . .	43
8.8	Ocenění váhy parametrů palivových proutků na průhyb . . . . .	43
8.9	Ocenění váhy namáhání palivových proutků . . . . .	43
	<b>Závěr</b>	<b>44</b>
	<b>Bibliografie</b>	<b>46</b>



# Seznam použitých zkratek

BWR	Varný jaderný reaktor - Boiling water reactor
PWR	Tlakovodní jaderný reaktor - Pressurized water reactor
VVER	Vodo-vodní energetický reaktor
RA	Radioaktivita
CHSK	Chemická spotřeba kyslíku
PCI	Interakce palivových tablet a pokrytí - Pellet-cladding interaction

# Seznam obrázků

1.1	Koeficient teplotní roztažnosti Zircaloy-2, [47] . . . . .	5
1.2	Tahový diagram pro Zircaloy-2 při teplotě 23 °C, [30] . . . . .	5
1.3	Tahový diagram pro Zircaloy-2 při teplotě 170 °C, [30] . . . . .	5
1.4	Plastická deformace Zircaloy-4 v tahu, [49] . . . . .	7
1.5	Tloušťka oxidu na povrchu pokrytí, [36] . . . . .	8
1.6	Palivový proutek, [8] . . . . .	9
2.1	Výpočetní schéma palivového souboru TVSA-T mod. 1, [14] . . . . .	11
2.2	Patice a hlavice palivového souboru TVSA-T mod. 1, [35] . . . . .	12
2.3	Palivový soubor TSVA-T mod.1, [35] . . . . .	12
2.4	Kombinovaná distanční mřížka, [35] . . . . .	12
2.5	Palivový soubor firmy Mitsubishi určený pro tlakovodní reaktory západního typu, [2] . . . . .	13
2.6	Vzorové schéma palivového souboru určeného pro varný reaktor, [11] . . . .	14
2.7	Řez čtyřmi palivovými soubory varného reaktoru v konfiguraci 8x8, [11] . .	14
4.1	Model praskání palivových tablet, [5] . . . . .	19
4.2	Teoretický tvar palivové tablety zobrazující praskliny a tvar přesýpacích hodin, [5] . . . . .	19
4.3	Vypočtené atomové zlomky štěpných produktů pro palivo s obohacením 4,49 % a vyhořením 40 MWd·kg/M, [5] . . . . .	20
4.4	Kategorie štěpných produktů, [5] . . . . .	20
5.1	Průběh interakce tablet a pokrytí, [17] . . . . .	24
5.2	Distanční mřížka a její buňka pro palivový soubor 16x16 typu PWR, [46], [45] . . . . .	25
6.1	Tvary prohnutých palivových souborů, [6] . . . . .	27
6.2	Vizuální inspekce palivového souboru, [28] . . . . .	28
7.1	Průměr palivového proutku paliva PLUS7 po ukončení cyklu, [24] . . . . .	31
7.2	Relativní atomová hustota $^{235}\text{U}$ v řezu deformovaným palivovým proutkem, [33] . . . . .	32
7.3	Hmotnostní tok, [23] . . . . .	33
7.4	Kritický tepelný tok, [23] . . . . .	33

8.1 Schéma výseče palivového proutku . . . . .	36
--	----

# Seznam tabulek

1.1	Vlastnosti zirkonia, [4] . . . . .	4
1.2	Nestabilní izotopy Zirkonia, [55] . . . . .	4
1.3	Hlavní složky Zircaloy-2, [55] . . . . .	4
1.4	Moduly elasticity Zircaloy-2, [55] . . . . .	6
1.5	Složení Zircaloy-4, [3] . . . . .	6
1.6	Složení slitin ZIRLO, [36] . . . . .	7
1.7	Tepelné a mechanické vlastnosti E110, [44] . . . . .	8
1.8	Složení slitiny M5, [36] . . . . .	8
1.9	Rozměry palivových proutků pro PWR a BWR reaktory, [42] . . . . .	10
3.1	Podmínky při provozu tlakovodního reaktoru západní koncepce a reaktoru VVER - 1000, [43], [27], [12] . . . . .	15
3.2	Požadavky na chemické složení chladiva v primárním okruhu při provozu, [48] . . . . .	16
3.3	Podmínky při provozu varného jaderného reaktoru, [9] . . . . .	16
8.1	Geometrie palivových souborů, [25], [52], [37] . . . . .	39
8.2	Rozteče distančních mřížek . . . . .	40
8.3	Vliv rozteče na průhyb . . . . .	41
8.4	Vliv vnějšího průměru, [52], [37] . . . . .	41
8.5	Vliv creepu . . . . .	42
8.6	Vliv oxidace . . . . .	42

# Seznam veličin

k	tuhost pružiny (N/m)
F	síla (N)
x	výchylka (m)
$\sigma$	normálové napětí (MPa)
$\varepsilon$	relativní prodloužení (1)
$\lambda$	tepelná vodivost (W/mK)
$\varepsilon$	koeficient teplotní roztažnosti ( $K^{-1}$ )
E	modul pružnosti (MPa)
T	teplota (K)
$\rho$	hustota ( $kg/m^3$ )
l	délka (m)
$J_x$	kvadratický moment průřezu ( $mm^4$ )
R	reakční síla (N)
D	vnější průměr palivového proutku (mm)
d	vnitřní průměr palivového pokrytí (mm)
w	průhybová čára (mm)
$\varphi$	úhel natočení (1)
M	moment (Nm)
q	spojité zatížení (N/m)
T	napětí (MPa)
c	konstanta

# Úvod

Palivové proutky jsou jednou z hlavních součástí jaderného reaktoru. Obvykle jsou zhruba 4 metry dlouhé a ne více než 10 mm široké. Do aktivní zóny jaderného reaktoru jsou umístovány jako součást palivového souboru. Účelem palivového souboru je udržovat palivové proutky v předem navrhnutém uspořádání, které zajišťuje správnou funkčnost řetězové reakce, ale i bezpečnostních systémů. Počet palivových proutků v palivovém souboru je zhruba  $200 \div 300$  v závislosti na typu palivového souboru. Jedná se tedy o jeden z nejzastoupenějších prvků v jaderném reaktoru a zároveň se jedná o jeden z nejzatíženějších prvků. Palivové proutky jsou vystaveny teplotám kolem  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , vysokým neutronovým tokům, proudění a chemickému působení chladiva.

Podmínky v jaderném reaktoru vyvolávají mechanismy, které vedou k deformacím palivových proutků. Zdrojem těchto deformací, kromě už zmíněných faktorů, je i tlak v jaderném reaktoru a vyhořívání paliva. Vysoká teplota napomáhá zejména oxidaci povrchu a v kombinaci s tlakem způsobuje creep povrchu. Oxidaci povrchu způsobuje i chemické působení chladiva. Neutronový tok způsobuje například radiační růst povrchu. Vyhořívání paliva způsobuje napuchání palivových tablet, které následně ovlivňuje mechanické napětí v povrchu. Kvůli délce a úzkému profilu palivového proutku deformace způsobují průhyb. Průhyb může být vyvolán i působením vnější síly. Zdrojem vnější síly může být tekoucí chladivo nebo zdeformovaná kostra palivového souboru.

Motivací pro studium průhybu palivového proutku jsou jeho negativní dopady na provoz jaderného reaktoru. Průhyb palivového proutku způsobuje přiblížení nebo oddálení sousedních proutků v palivovém souboru. To vyvolává změny v moderaci neutronů. Vlivem této změny může dojít k nárůstu lokální generace tepla a překročení kritického tepelného toku. Překročení kritického tepelného toku může způsobit vážné poškození povrchu. S nerovnoměrnou generací tepla souvisí i nerovnoměrné vyhořívání paliva. Průhyb dvou sousedních palivových proutků může vést ke vzájemnému dotyku, jehož důsledkem může být dehermetizace palivového proutku a kontaminace primárního okruhu radioaktivními štěpnými produkty.

Cílem řešební části této bakalářské práce je popsat konstrukci palivových proutků a materiály, ze kterých jsou vyrobeny. Dále popsat mechanismy, ke kterým dochází během vyhořívání paliva a které způsobují deformace povrchu. Na základě této rešerše bude následně možné popsat mechanismy, které vedou k průhybu palivového proutku. Na závěr bude vliv těchto mechanismů a parametrů posouzen pomocí analytického výpočtu.

# 1. Konstrukce a materiály palivových proutků

Jedním z nejdůležitějších prvků pro jaderné elektrárny jsou palivové proutky. Jejich hlavními konstrukčními prvky jsou palivové tablety a pokrytí, které obklopuje palivové tablety. Pokrytí chrání palivové tablety před nehostinným prostředím jaderného reaktoru a zároveň zabraňuje uvolňování radioaktivních izotopů do primárního okruhu jaderného reaktoru.

## 1.1 Palivové tablety

Palivové tablety jsou základním prvkem jaderného paliva. Jedná se o válečky s rozměry jednotek milimetrů, jejichž hlavní složkou je  $\text{UO}_2$ . Velmi důležitý je  $^{235}\text{U}$ , který lze jednoduše štěpit. Problém je však, že zastoupení  $^{235}\text{U}$  v přírodě je pouze 0,7 %, přičemž pro komerční využití v lehkovodních reaktorech je potřeba zastoupení 3 ÷ 5 %. Což vede na náročný proces obohacování uranu.

Uranová ruda se získává zejména loužením, hlubinnou a povrchovou těžbou. Při hlubinné a povrchové těžbě je vytěžená uranová ruda rozdrčena a následně je rafinována na jemný prášek. Pomocí chemikálií se uran oddělí od ostatních minerálů. Při loužení uranové rudy je rozpouštědlo pumpováno do uranového lože, kde se na něj uran naváže. Roztok uranu se následně vyčerpán na povrch. Takto získané roztoky jsou vyčištěné až do nukleární čistoty a převedené na sloučeninu  $\text{U}_3\text{O}_8$  nazývanou žlutý koláč. Žlutý koláč může být převedený na  $\text{UO}_2$  a použitý v reaktorech, které nevyžadují obohacení nebo může být převedený na  $\text{UF}_6$ .  $\text{UF}_6$  se využívá při obohacování, kdy jednotlivé izotopy jsou odseparovány pomocí plynové difuze nebo odstředivek. Poté je  $\text{UF}_6$  převeden na  $\text{UO}_2$ . Prášek  $\text{UO}_2$  je následně stlačen do tablet, které jsou sintrovány při vysoké teplotě. [51], [39]

Sintrování je metoda výroby předmětů z práškových hmot za vysoké teploty v ochranné atmosféře. Funguje na principu spojování práškových částic pomocí tepelné difuze a uplatňuje se při výrobě keramických materiálů. Na začátku je prášek  $\text{UO}_2$  stlačen do velmi porézní tablet. Ta je následně na několik hodin umístěná do pece s ochrannou atmosférou a teplotou 1700 °C. Během této doby dochází ke vzniku zrn<sup>1</sup> spojením několika zrněk prášku a jejich rekrystalizací. Velké zrna  $\text{UO}_2$  jsou chtěná, jelikož lépe zabraňují uvolňování štěpných produktů a tím zlepšují vlastnosti paliva při vysokém vyhoření. (viz kapitola 4.3) Nevýhodou sintrování jsou vysoké výrobní náklady, protože probíhá několik hodin při teplotě přesahující 1700 °C. Proto výrobci nesintrují  $\text{UO}_2$  na maximální teoretickou hustotu, což má za následek pórovitost palivových tablet. [40], [19]

$\text{UO}_2$  je keramický materiál s velmi malou tepelnou vodivostí, ale vysokou teplotou tavení. Poréznost tablet se pohybuje v rozmezí 2 ÷ 7 % celkového objemu. Hustota se

<sup>1</sup>Zrno je část materiálu, který má orientovanou krystalovou mřížku určitým směrem.

pohybuje mezi  $10,2 \div 10,7 \text{ g.cm}^{-1}$  při pokojové teplotě, přičemž teoretická hustota je  $10,95 \text{ g.cm}^{-1}$ , konkrétní hodnota záleží na výrobci paliva. Běžná velikost zrna je  $8 \div 30 \text{ }\mu\text{m}$ . [39], [5]

Tablety se skládají zejména z  $\text{UO}_2$ . Mimo samotného paliva mohou obsahovat také aditiva. Ty slouží k pohlcování neutronů, nebo-li ke snížení reaktivity paliva na počátku palivového cyklu (kampaně), také omezují nerovnoměrné rozložení výkonu. Běžně se jedná o bór nebo gadolinium, které postupem času vyhořívají. Do pokročilých druhů paliv se přidávají i aditiva, jejichž úlohou je zlepšit vlastnosti paliva v průběhu vyhořívání. [5]

## 1.2 Pokrytí

Pokrytí tvoří bariéru mezi chladivem a palivem samotným. Jeho úkolem je zabránit uvolňování štěpných produktů do chladiva a jeho následné kontaminaci a udržování palivových tablet ve správné poloze.

Materiál musí splňovat několik klíčových vlastností, aby mohl být použitý pro pokrytí. Musí odolávat oxidaci i za vysokých teplot. Musí být chemicky odolný a musí mít malý účinný průřez pro absorpci tepelných neutronů. Dalšími důležitými vlastnostmi pokrytí jsou odolnost vůči namáhání, ozařování, plastické deformaci a schopnost dobře vést teplo. Veškeré teplo generované v tabletách musí být odvedeno kondukcí skrz pokrytí. Na rozdíl od tablet se v pokrytí generuje velmi málo tepla.

Tyto vlastnosti splňuje zirkonium. Jeho nejdůležitější vlastností je malý mikroskopický účinný průřez pro absorpci tepelných neutronů. Proto je pokrytí často tvořeno z více než 95 % zirkoniem, zbylou část tvoří aditiva jako niob, železo, chrom a nikl, které slouží ke zlepšení mechanických vlastností a korozivzdornosti. [56], [38], [5]

Zirkoniové slitiny lze rozdělit do kategorií podle toho jestli se používají pro BWR, PWR nebo VVER. Pro BWR palivo se běžně používá Zircaloy-2. Pro PWR palivo západního typu se využívá Zircaloy-4, M5 a ZIRLO<sup>TM</sup> a pro palivo pro reaktory VVER se používá E110. Dále je možné dělit podle jejich hlavních příměsí na cínové slitiny, mezi ně se řadí Zircaloy-2, Zircaloy-4 a ZIRLO<sup>TM</sup> nebo niobové slitiny, mezi ně se řadí E110 a M5. Současné pokrytí vykazuje dobré provozní vlastnosti za normální podmínky, avšak vážné nehody mohou vést na poškození pokrytí. Proto jsou vyvíjena pokročilá pokrytí, které snižují následky takovýchto událostí. [38], [5]

### 1.2.1 Zirkonium

Zirkonium je pevný, kujný, tažný, lesklý stříbrno-šedý kov. Jeho chemické a fyzikální vlastnosti jsou podobné jako u titanu. Zirkonium je odolné vůči vyšším teplotám a korozi, proto se vhodný materiál pro výrobu pokrytí. Zirkonium je lehčí než ocel a jeho tvrdost je podobná mědi. Zirkoniový prášek je černý a může se na vzduchu samovolně vznítit, zejména při vysokých teplotách, proto je považován za nebezpečný. Zirkonium se nerozpouští v kyselinách a zásadách. Jedná o jeho další důležitou vlastnost, jelikož v primárním okruhu tlakovodních reaktorů se může nacházet kyselina boritá, ale i mnoho dalších chemických sloučenin. (viz kapitola 3.1) Mechanické a fyzikální vlastnosti jsou



shrnuty v tabulce 1.1. [32]

**Tabulka 1.1:** Vlastnosti zirkonia, [4]

Hustota (g/cm)	6,53
Teplota tání (°C)	1843
Mez pevnosti v tahu [žíhaný] (MPa)	330
Mez kluzu [žíhaný] (MPa)	230
Poissonovo číslo (1)	0,34
Koeficient teplotní roztažnosti ( $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ )	5,8
Tepelná vodivost (W/mK)	16,7

Zirkonium se skládá z pěti izotopů,  $^{90}\text{Zr}$  51,5 %,  $^{91}\text{Zr}$  11,2 %,  $^{92}\text{Zr}$  17,1 %,  $^{94}\text{Zr}$  17,4 %,  $^{96}\text{Zr}$  2,8 %. Absorpcí neutronu vznikají stabilní izotopy  $^{91}\text{Zr}$  a  $^{92}\text{Zr}$  a nestabilní izotopy  $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{95}\text{Zr}$  a  $^{97}\text{Zr}$ . Tyto izotopy se rozpadají  $\beta$  rozpadem doprovázený emisí  $\gamma$  záření. [55]

**Tabulka 1.2:** Nestabilní izotopy Zirkonia, [55]

Izotop	Rozpad	Poločas života
$^{93}\text{Zr}$	$\beta, \gamma$	$9 \cdot 10^5$ let
$^{95}\text{Zr}$	$\beta, \gamma$	65 dní
$^{97}\text{Zr}$	$\beta, \gamma$	17 hodin

### 1.2.2 Zircaloy-2

Zircaloy-2 pochází z 60. let minulého století, jedná se tedy o starou slitinu. Avšak ve varných rektorech se využívá dodnes, jelikož neexistuje moc konkurenčních slitin jako tomu je u tlakovodních reaktorů. Hlavní složky Zircaloy-2 jsou v tabulce 1.3.

**Tabulka 1.3:** Hlavní složky Zircaloy-2, [55]

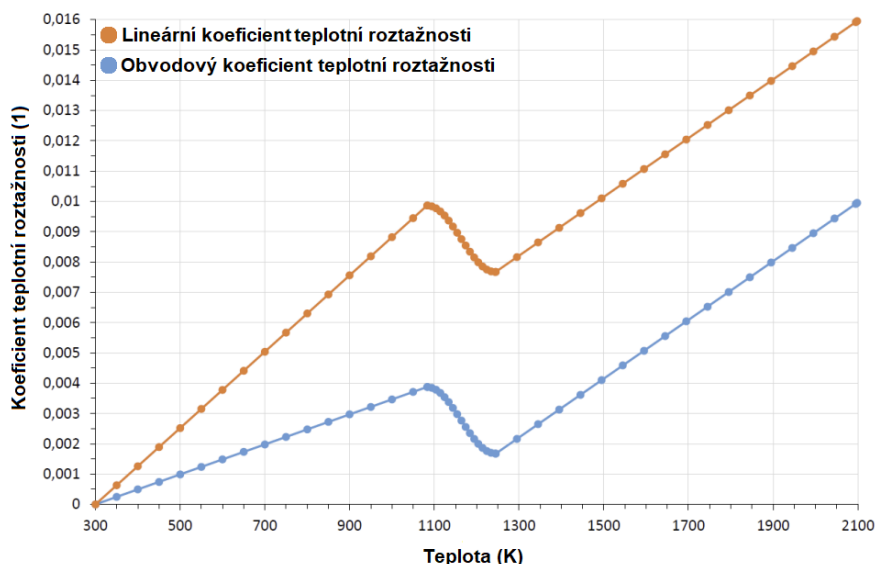
Prvek	Sn	Fe	Cr	Ni
Hmotnost (wt.%)	1,2 ÷ 1,7	0,07 ÷ 0,2	0,05 ÷ 0,15	0,03 ÷ 0,08

Zircaloy-2 obsahuje nečistoty, mezi ně se řadí například C, Pb, Hf, Si, atd. Jejich zastoupení nepřesahuje 0,027 wt.%.

Prvky jako železo, chrom a nikl jsou přidávány, aby potlačily negativní vlivy znečištění materiálu na korozi. Dusík, hliník a uhlík slouží ke zvýšení pevnosti slitiny. Tyto příměsi výrazně nezvyšují absorpci tepelných neutronů. Slitina vykazuje dobrou korozivzdornost i při působení vody za vysokého tlaku a teploty, avšak i malé množství znečištění slitiny má velmi negativní účinky na korozivzdornost.

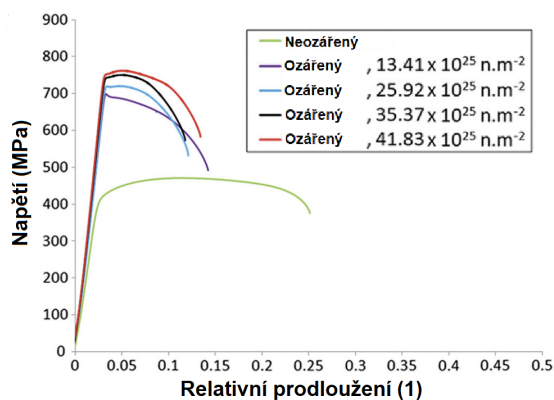
Za horka válcovaný ve vakuu žíhaný Zircaloy-2 má hustotu  $6,57 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}$  při teplotě  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  a teplota tání je  $1848,89 \text{ }^\circ\text{C}$ . Závislost teplotní roztažnosti je zobrazena na obrázku 1.1. Obvodový i lineární tepelný koeficient tepelné se v rozmezí  $300 \div 1100 \text{ K}$  a

1300 ÷ 2100 K chovají lineárně. Mezi teplotami 1100 ÷ 1300 K je možné pozorovat prudkou změnu způsobenou přechodem zirkonia mezi jeho fázemi. Obvodový koeficient teplotní roztažnosti udává teplotní roztažnost po obvodu a lineární teplotní koeficient udává teplotní roztažnost v axiálním směru. Rozdíl v těchto koeficientech je způsoben anizotropním chováním povrchu, které je způsobeno malou šířkou povrchu. Vlivem malé tloušťky povrchu se projevuje anizotropnost krystalové struktury. Hodnoty tepelné vodivosti Zircaloy-2 se mohou lišit v různých publikacích. [15]

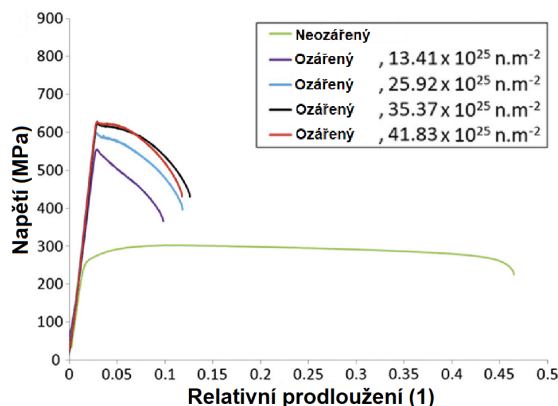


Obrázek 1.1: Koeficient teplotní roztažnosti Zircaloy-2, [47]

Vliv ozáření a teploty na pevnost Zircaloy-2 v tahu je zobrazen na obrázku 1.2 a 1.3. Lze vidět, že bez ohledu na teplotu Zircaloy-2 ozářené neutrony s energií vyšší než 0,65 eV je méně kujné a současně je pevnější. Lze také vidět, že s rostoucí teplotou se výrazně zvyšuje kujnost, ale zároveň se snižuje pevnost. Modul pružnosti s rostoucí teplotou lineárně klesá. Zircaloy-2 se v tahu chová jako typický neželezný kov.



Obrázek 1.2: Tahový diagram pro Zircaloy-2 při teplotě 23 °C, [30]



Obrázek 1.3: Tahový diagram pro Zircaloy-2 při teplotě 170 °C, [30]

Mechanické vlastnosti Zircaloy-2 se výrazně liší v závislosti ozáření, na způsobu výroby

a množství nečistot. Kyslík, dusík, vodík spolu s radiací výrazně ovlivňují mechanické vlastnosti. V tabulce 1.4 lze vidět vliv způsobu výroby na modul elasticity.

**Tabulka 1.4:** Moduly elasticity Zircaloy-2, [55]

Zircaloy-2	Teplota (°C)	Modul pružnosti (MPa)	Poissonovo číslo (1)
Žíhaný	27	13,9 ÷ 14,3	0,368 ÷ 0,380
Žíhaný	150	13,3 ÷ 13,8	0,425 ÷ 0,460
Zpracovaný za studena	27	14,5	0,382 ÷ 0,406
Zpracovaný za studena	150	13,9 ÷ 14,2	0,392 ÷ 0,432

Zircaloy-2 má malý mikroskopický účinný průřez, ten se pohybuje mezi 0,22 ÷ 0,24 b pro tepelné neutrony. Samotné zirkonium má 0,18 b pro tepelné neutrony zbylý příspěvek pochází z příměsí a nečistot. [55]

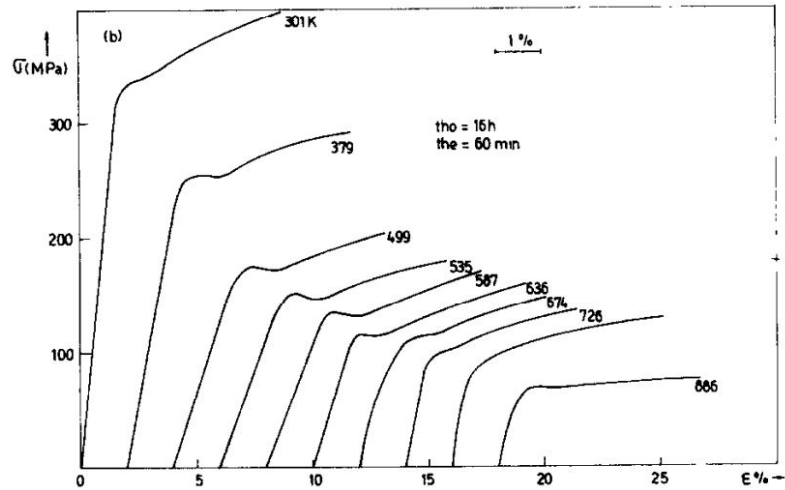
### 1.2.3 Zircaloy-4

Zircaloy-4 narozdíl od Zircaloy-2 neobsahuje nikl a obsah železa je mnohem víc monitorován. Zircaloy-4 také vykazuje lepší odolnost vůči navodíkování než Zircaloy-2 při teplotě 300 °C. Složení Zircaloy-4 je v tabulce 1.5. [50]

**Tabulka 1.5:** Složení Zircaloy-4, [3]

Prvek	Hmotnostní zlomek (wt.%)
Zr	97,56 ÷ 98,27
Sn	1,2 ÷ 1,7
Fe	0,18 ÷ 0,24
Fe+Cr	0,28 ÷ 0,37

Zircaloy-4 může dále obsahovat stopy C, N, O a H a další prvky. Jeho hustota pro 20 °C je 6,56 g.cm<sup>-1</sup> a teplota tání 1850 °C. Při teplotě 20 °C je Poissonovo číslo 0,37 a koeficient tepelné vodivosti 21,5 W/mK. Pevnost v tahu u Zircaloy-4 klesá s rostoucí teplotou, mez kluzu se tedy zhruba pohybuje mezi 90 ÷ 320 MPa v závislosti na teplotě. (viz obrázek 1.4) [49], [3]



Obrázek 1.4: Plastická deformace Zircaloy-4 v tahu, [49]

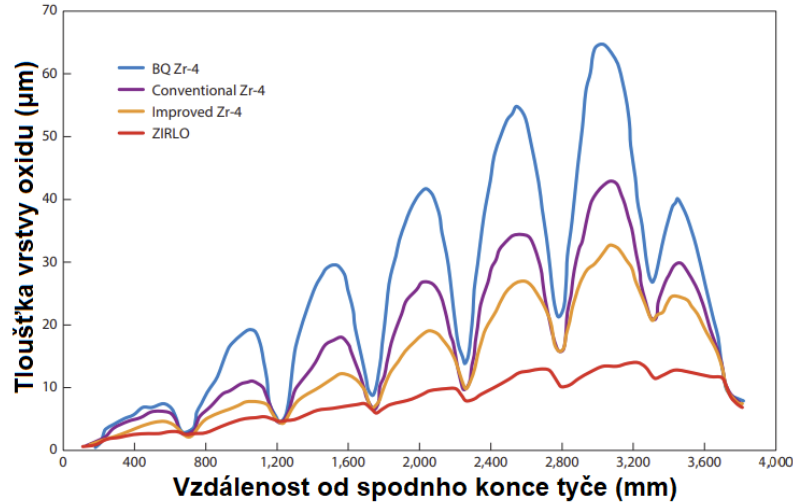
### 1.2.4 ZIRLO

ZIRLO<sup>TM</sup> je novodobá slitina, které byla představena firmou Westinghouse v devadesátých letech. Postupem času nahradila Zircaloy-4 u paliva firmy Westinghouse. Existují dvě verze ZIRLO<sup>TM</sup> a Optimized ZIRLO<sup>TM</sup>, jejich hlavní složkou je zirkonium. Příměsi jsou shrnuty v tabulce 1.6.

Tabulka 1.6: Složení slitin ZIRLO, [36]

	Sn (wt.%)	Nb (wt.%)	Fe (wt.%)
ZIRLO <sup>TM</sup>	1,0	1,0	1,0
Optimized ZIRLO <sup>TM</sup>	0,67	1	0,1

V současné době se využívá novější verze Optimized ZIRLO<sup>TM</sup>. Velkou výhodou, kterou slitiny ZIRLO<sup>TM</sup> poskytují, je zvýšená odolnost vůči korozi, čehož bylo dosaženo snížením podílu cínu. Na obrázku 1.5 je vidět, že v porovnání s slitinami typu Zircaloy-4 se u slitin ZIRLO<sup>TM</sup> za provozu tvoří výrazně tenčí vrstva oxidu. Poklesy grafu jsou způsobené distančními mřížkami a rostoucí trend grafu je způsoben rostoucí teplotou chladiva, protože oxidace rozste s teplotou. Důsledkem větší korozní odolnosti je i větší odolnost vůči navodíkování. Toho všeho bylo dosaženo při zachování dovoleného axiálního růstu palivových proutků. [54], [36]



Obrázek 1.5: Tloušťka oxidu na povrchu pokrytí, [36]

### 1.2.5 E110

Materiál E110 také označovaný jako Zr-1%Nb je zirkoniová slitina vyvinutá v Sovětském svazu v šedesátých letech. Používá se jako prokrytí pro palivo do reaktorů typu VVER. Hlavní příměsí je niob, jehož zastoupení je  $1 \pm 0,1$  wt.%. Dále může obsahovat železo, nikl, titan a další prvky, jejichž zastoupení nepřesahuje několik setin procenta. Hustota E110 při 20 °C je  $\rho = 6550 \text{ kg/m}^3$  a teplota tání je 2133 K. [18] V tabulce 1.7 jsou shrnuty termofyzikální vlastnosti materiálu:

Tabulka 1.7: Tepelné a mechanické vlastnosti E110, [44]

Tepelná vodivost (W/mK)	
$\lambda = 15,06 \exp(0,46 \cdot 10^{-3}T)$	
Koeficient lineární teplotní roztažnosti (m/m)	
$\epsilon = 0,13 \cdot 10^{-8}T^2 + 3,86 \cdot 10^{-6}T - 0,1310^{-2}$	$T < 573$
$\epsilon = 0,14 \cdot 10^{-2} + 5,4 \cdot 10^{-6}(T - 537)$	$573 < T < 883$
$\epsilon = 3,05 \cdot 10^{-3} + 2,31 \cdot 10^{-8}(T - 883) - 7,36 \cdot 10^{-8}(T - 883)^2 + 1,72 \cdot 10^{-10}(T - 883)^3$	$883 < T < 1153$
Modul pružnosti (MPa)	
$E = 1,12 \cdot 10^5 - 64,38T$	$273 < T < 1073$
$E = 9,13 \cdot 10^4 - 45T$	$1073 < T < 1273$
Poissonovo číslo (1)	
$\nu = 0,43 - 5,56 \cdot 10^{-5}T$	$T < 1273$

### 1.2.6 M5

M5 je zirkoniová slitina s příměsí niobu vyvinutá francouzskou společností AREVA v devadesátých letech. Složení této slitiny je shrnuto v tabulce 1.8.

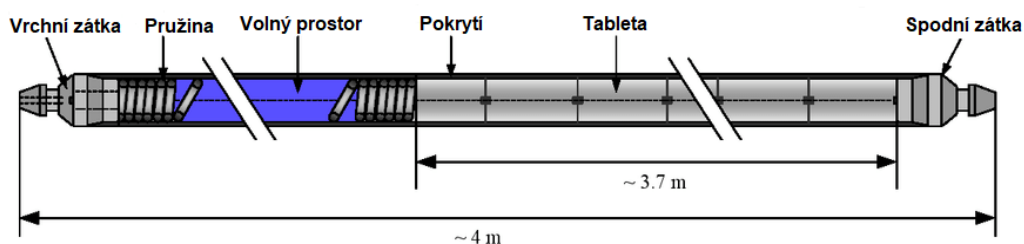
Tabulka 1.8: Složení slitiny M5, [36]

Sn (wt.%)	Nb (wt.%)	O (wt.%)	Fe (wt.%)	Cr (wt.%)	Ni (wt.%)
-	1,0	0,135 ( 0,118 ÷ 0,148)	0,038 ( 0,015 ÷ 0,037)	-	-

Slitina neobsahuje cín a obsah železa, kyslíku a síry je striktně kontrolován. Díky tomu slitina vykazuje výrazně lepší odolnost vůči oxidaci za provozu a nižší navodíkování než Zircaloy-4. Charakteristickým rysem M5 je absence pokročilé koroze při vyhoření vyšším než 30 000 MWd/tHM. Díky těmto vlastnostem se M5 spolu s Optimized ZIRLO<sup>TM</sup> stala dominantní v tlakovodních reaktorech západní koncepce. [36]

### 1.3 Palivové proutky

Palivové proutky se skládají z palivových tablet a pokrytí, ve kterém jsou palivové tablety zapouzdřeny. Mezi samotným pokrytím a palivovými tabletami je mezera o šířce zhruba jedné desetiny milimetru, která umožňuje palivu se rozpínat. Tento prostor je vyplněný heliem, jehož vnitřní tlak se obvykle pohybuje kolem  $1,5 \div 3$  MPa pro tlakovodní reaktory. Ve vrchní části palivového proutku je prostor, ve kterém se nachází pružina. Ta tlačí na palivové tablety a udržuje je tím na místě. Tento prostor současně jímá plynné štěpné produkty a umožňuje palivovým tabletám růst. Na vrchním i spodním konci proutků jsou přivařené zátky, které zabraňují úniku plynů. Zátky jsou obrobny do tvaru, který umožňuje upevnění do palivového souboru a případnou manipulaci s palivovými proutky. V praxi se různé části palivových proutků vyrábí z různých materiálů včetně nerezových ocelí.



Obrázek 1.6: Palivový proutek, [8]

Konkrétní rozměry palivových proutků se odvíjí od typu reaktoru a výrobce. Následující tabulka obsahuje referenční hodnoty pro tlakovodní a varné jaderné reaktory. [42]

**Tabulka 1.9:** Rozměry palivových proutků pro PWR a BWR reaktory, [42]

	BWR	PWR
Průměr tablety (mm)	10,5	9,0
Poměr l/d tablety	0,9 ÷ 1,2	1,0 ÷ 1,3
Tloušťka pokrytí (mm)	0,9	0,6
Průměr proutku (mm)	12,5	9,8
Mezera mezi pokrytím a tabletou (mm)	0,1	0,1
Délka proutku (m)	3,7	3,7
Délka prostoru nad sloupcem paliva (mm)	250	200
Tlak helia (MPa)	-	1,5 ÷ 3

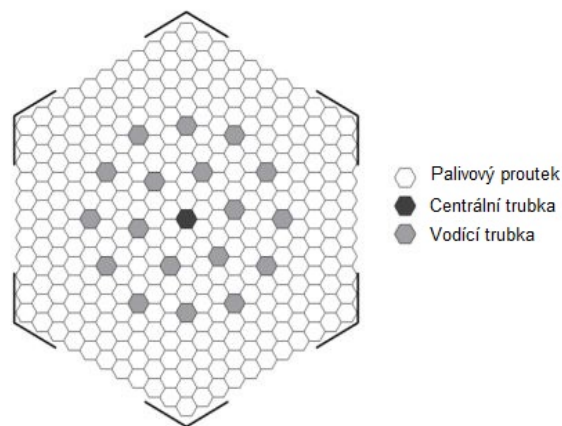
## 2. Palivové soubory

I přesto, že se tato práce zaměřuje výhradně na bezobálková paliva, budou zde uvedeny základní informace pro varné reaktory pro srovnání.

Palivové proutky jsou sdružené do palivových souborů, jejichž konkrétní tvar a uspořádání záleží zejména na typu jaderného reaktoru, výkonu a výrobci jaderného paliva. Palivový soubor se skládá z palivových proutků a kostry. Kostra je u tlakovodních reaktorů tvořena hlavicí, patící, distančními mřížkami, vodicími trubkami a centrální tyčí. Kostra varných reaktorů je tvořena patící, distančními mřížkami a spojovacími tyčemi. Palivové soubory mohou být obklopené vnější obálkou, která zabraňuje příčnému toku chladiva, příkladem palivového souboru s obálkou je palivo pro varné reaktory a VVER-440. Na všechny palivové soubory jsou kladeny základní požadavky. Palivové proutky musí být spojené s kostrou takovým způsobem, který bude zabraňovat pohybu palivových proutků v příčném směru a zároveň bude umožňovat pohyb v axiálním směru. Dále palivový soubor musí být dostatečně tuhý, aby zabraňoval rozvoji průhybu palivových proutků, který může být způsoben různými mechanismy. (viz kapitoly 4 a 5)

### 2.1 Palivové soubory TVSA-T mod. 1 a TVSA-T mod. 2

Palivový soubor TVSA-T mod. 1 je šestiúhelníkového průřezu. Jeho celková délka je 4570 mm a šířka 235 mm. Skládá se z 312 palivových proutků, 18 vodicích trubek a centrální nosné trubky, ve které jsou umístěny samonapájecí neutronové detektory. [14], [35]

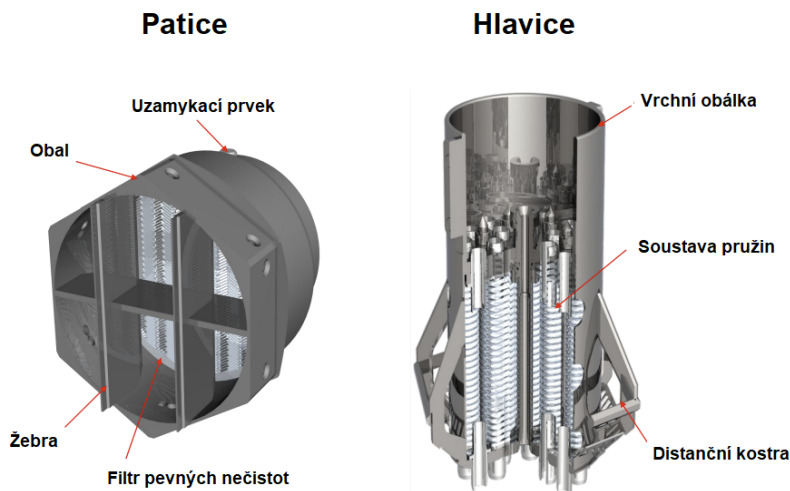


**Obrázek 2.1:** Výpočetní schéma palivového souboru TVSA-T mod. 1, [14]

Na spodním konci je soubor držen pohromadě patící, která obsahuje filtr pevných nečistot. Ten zabraňuje vniku částic větších než 2 mm do palivového souboru. Patice je spojena s úhelníky, které jsou pak spojeny se spodním opěrným uzlem a tlumící mřížkou, která zabraňuje vibračnímu namáhání paliva. Na horním konci je držen pohromadě hlavicí. Ta zodpovídá za odvod chladiva. Hlavice obsahuje pružinovou soustavu, distanční mříž a spojovací prvky. Pružiny slouží ke snížení namáhání kostry palivového souboru při dila-

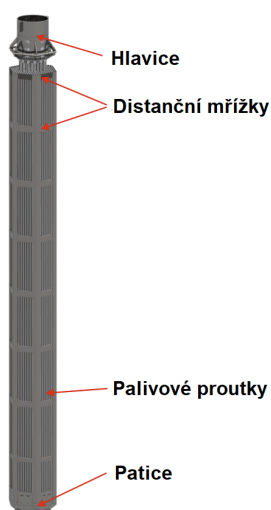


tacích vnitřních částí jaderného reaktoru a kostry palivového souboru. (viz obrázek 2.2) [14], [35]

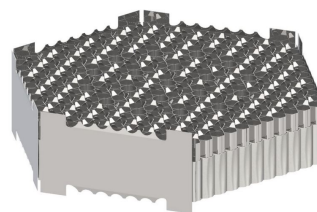


**Obrázek 2.2:** Patice a hlavice palivového souboru TVSA-T mod. 1, [35]

Po délce palivového souboru je rozmístěných 8 distančních mřížek. Ty jsou svařené s nosnou trubkou a úhelníky, které zlepšují mechanické vlastnosti souboru. Distanční mřížky jsou třech typů. Jedná se o spodní distanční mřížku, horní distanční mřížku a kombinované distanční mřížky. Kombinované distanční mřížky se skládají z distanční a mísící části. Úkolem kombinovaných distančních mřížek je mimo zlepšení mechanických vlastností palivového souboru zvýšit příčný tok v palivovém souboru a zvýšit přestup tepla do vody. Příčný tok slouží k promíchávání chladiva mezi jednotlivými kanály a tedy k zrovnoměňování teploty na výstupu z jednotlivých kanálů. Nevýhodou distančních mřížek je zvýšení tlakové ztráty. Pokud je distanční mřížka vyrobena z oceli další nevýhodou je stínění neutronů. (viz obrázek 2.3 a 2.4) [14], [35]



**Obrázek 2.3:** Palivový soubor TVSA-T mod.1, [35]

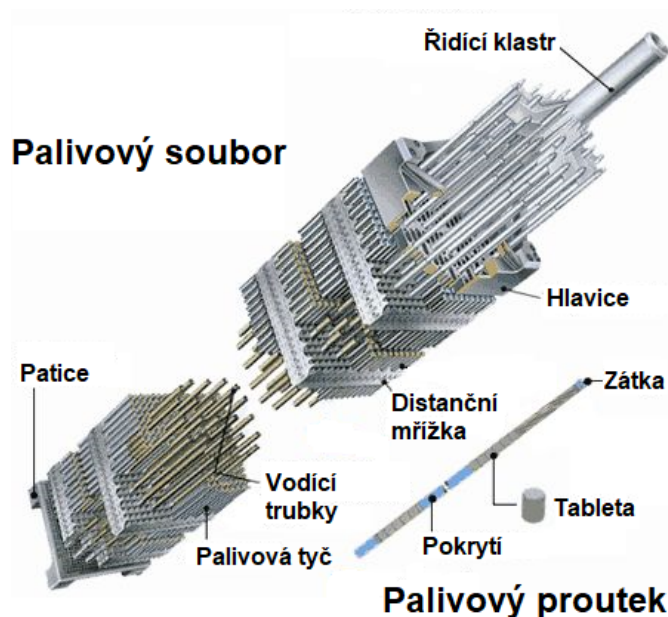


**Obrázek 2.4:** Kombinovaná distanční mřížka, [35]

Konstrukce paliva TVSA-T mod. 2 je velmi podobná svému předchůdci. Hlavním rozdílem je počet distančních mřížek, který vzrostl z 8 na 12 kusů. Dále došlo k oddělení mísících mřížek od distančních mřížek a ke změně jejich konstrukce. Nové mísící mřížky generují příčný tok chladiva palivovým souborem, zatímco ve starší verzi generovaly podélný vířivý tok. [35]

## 2.2 Palivový soubor typu PWR

Palivové soubory pro tlakovodní reaktor západního typu jsou čtvercového průřezu nejčastěji o stranách 17x17 nebo 16x16 proutků. Svým čtvercovým tvarem se tedy výrazně odlišují od paliva s hexagonálním tvarem pro reaktory typu VVER. Kromě toho však sdílí s reaktory VVER-1000 velké množství společných prvků. Stejně jako u paliva typu VVER je kostra souboru tvořena hlavicí, patičí, distančními mřížkami a vodícími trubkami. Štěpná reakce je ovládaná, stejně jako u palivových souborů VVER-1000, pomocí řídicích tyčí zasouvaných do vodících trubek. Souboru řídicích tyčí se nazývá řídicí klastr. [2]

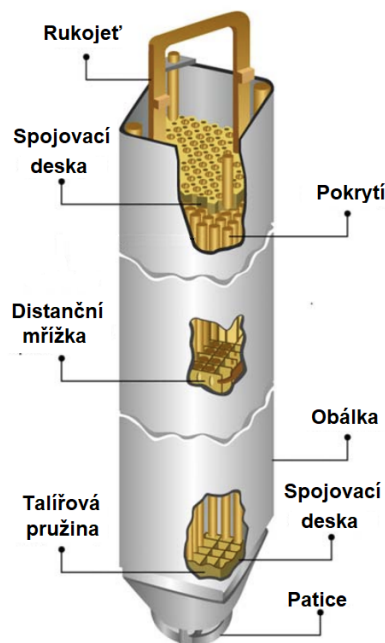


**Obrázek 2.5:** Palivový soubor firmy Mitsubishi určený pro tlakovodní reaktory západního typu, [2]

## 2.3 Palivový soubor typu BWR

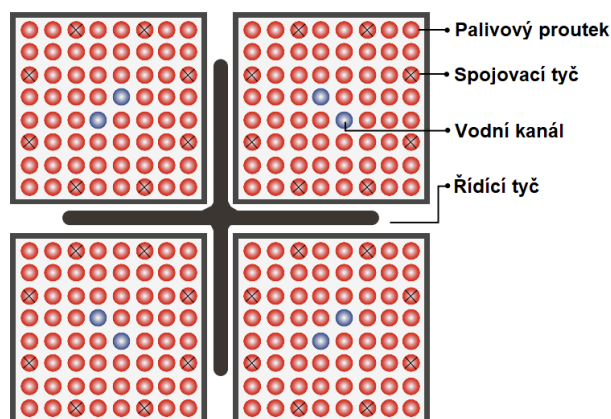
Palivové soubory pro varné reaktory používají různé konfigurace palivových proutků. Moderní palivové soubory mají proutky uspořádané čtvercových svazků o stranách 10x10 proutků. Existují také palivové soubory o stranách 9x9 nebo 8x8. Kromě palivových proutků obsahuje soubor spojovací tyče a vodní kanály. V horní části se nachází rukojeť, která slouží k manipulaci s palivovým souborem. Na koncích jsou palivové proutky drženy pohromadě spojovací deskou. Po délce jsou drženy pomocí distančních mřížek. Palivové

proutky nejsou připevněné k spojovacím deskám ani k distančním mřížkám. Mezi palivovými proutky a spodní spojovací deskou se nachází talířová pružina. Na spodním konci se nachází patice, která obsahuje filtr pevných částic. Celý soubor je obklopen obálkou, která zabraňuje příčnému proudění chladiva. (viz obrázek 2.6) [11], [53]



**Obrázek 2.6:** Vzorové schéma palivového souboru určeného pro varný reaktor, [11]

V tlakovodním reaktoru může být mezi čtyři palivové soubory umístěná řídicí tyč. Řídicí tyč obsahuje absorpční tyče, které slouží k řízení neutronového toku. [11], [53]



**Obrázek 2.7:** Řez čtyřmi palivovými soubory varného reaktoru v konfiguraci 8x8, [11]

Oproti palivovým souborům určeným pro tlakovodní reaktory, palivové soubory varných reaktorů neobsahují vodící trubky, což je výhodné v případě, že dojde k deformaci palivového souboru. Koroze komponentů na bázi slitiny zirkonia nehraje tak silnou roli jako u tlakovodních reaktorů. To je dáno nižší teplotou, při které je reaktor provozován a absencí  $H_3BO_3$  v chladivu při provozu reaktoru. [53]

# 3. Podmínky při provozu palivových souborů

Palivové proutky jsou při provozu vystaveny extrémním podmínkám, které mají negativní vliv na jejich stav. Vysoký tlak v reaktoru tlačí na pokrytí, čímž způsobuje jeho deformaci, vysoká teplota přispívá zejména ke korozi pokrytí, tok chladiva způsobuje vibrace a silově působí na palivové proutky a ozáření pokrytí způsobuje objemový růst palivových proutků. Ten se projevuje zejména v axiálním směru, kvůli délce palivových proutků. Všechny tyto mechanismy přispívají k deformaci palivových proutků a palivových souborů, proto je důležité se s nimi obeznámit.

## 3.1 VVER - 1000 a PWR

V následující tabulce jsou shrnuty podmínky při provozu reaktoru VVER - 1000 a typických tlakovodních reaktorů západní koncepce. Hodnoty pro tlakovodní reaktory západní koncepce jsou pouze referenční.

**Tabulka 3.1:** Podmínky při provozu tlakovodního reaktoru západní koncepce a reaktoru VVER - 1000, [43], [27], [12]

	VVER - 1000	PWR
Tlak vodní páry (MPa)	15,7	15,51
Teplota chladiva na vstupu (°C)	291	293
Teplota chladiva na výstupu (°C)	321	326
Maximální plošná hustota tepelného toku (kW/m <sup>2</sup> )	1570	-
Průměrná plošná hustota tepelného toku (kW/m <sup>2</sup> )	584*	599
Hmotnostní tok chladiva (kg/m <sup>2</sup> s)	4058	3729

\*Dopočteno

Během odstávek teplota klesne teplota a tlak v reaktoru. V tomto případě přestanou být palivové proutky namáhané tlakem z vnějšku a začnou být namáhané tlakem z vnitřku. Zároveň dojde k zmenšování rozměrů palivových proutků vlivem nižší teploty. (viz obrázek 1.1 a kapitola 4.2).

Velký vliv na palivové proutky má chemické složení chladiva. U tlakovodních reaktorů se používá jako chladivo voda. Voda v jaderném reaktoru obsahuje nečistoty. Ty mohou mít původ v provozu jaderného reaktoru nebo v přirozeném znečištění napájecí vody. Na chladivo v primárním okruhu jaderného reaktoru VVER - 1000 jsou kladeny podmínky, které jsou shrnuté v tabulce 3.2.

**Tabulka 3.2:** Požadavky na chemické složení chladiva v primárním okruhu při provozu, [48]

Pr parametr	Hodnota	Jednotka	Pr parametr	Hodnota	Jednotka
pH	> 6		$K^+$ ( $Li^+$ )	$1 \cdot 10^{-4}$	gmol/kg
$NH_3$	> 5	mg/kg	$H_3BO_3$	0-8	g/kg
$Cl^-$	$\leq 0,1$	mg/kg	korozní produkty	< 0,2	mg/kg
$O_2$	$\leq 0,01$	mg/kg	CHSK	< 10	mg $KMnO_4$ /kg
$H_2$	30-60	$Ncm^3/kg$	RA	$\leq 3,7 \cdot 10^8$	Bq/kg
$K^+$	2-16,5	mg/kg	olej	$\leq 0,05$	mg/kg

Hodnoty uvedené v tabulce jsou vztaženy na jeden kilogram  $H_2O$ . Vysoké pH je potřeba udržovat, aby se předešlo poškození kovových povrchů primárního okruhu.  $H_3BO_3$  slouží jako absorbátor neutronů a slouží ke kompenzaci v čase pomalých změn reaktivity na začátku kampaně. Při najíždění reaktoru se její koncentrace mění z 12 g/kg na 8 g/kg. V závislosti na vyhoření paliva může klesnout její zastoupení až na 0 g/kg. Jelikož je jedná o kyselinu je potřeba přidávat KOH, pro udržení optimálního pH při provozu. Při provozu vzniká  $O_2$  radiolýzou vody, přítomnost kyslíku ve vodě podporuje oxidaci pokrytí, proto se přidává  $NH_3$ , který slouží k udržení bezkyslíkového režimu, radiolýzou a korozí. Chloridy a fluoridy jsou nežádoucí jelikož za určitých podmínek porušují pasivační vrstvu na ocelích, které jsou konstrukčním materiálem primárního okruhu, obsahující chrom a převádí povrch do korozně aktivního stavu. Přítomnost  $H_2$  v chladivu způsobuje navodíkování pokrytí. Lithium a sodík se do chladiva dostávají jako nečistoty. Lithium vzniká v důsledku neutronových reakcí. Koncentrace alkalických kovů (Li, K, Na) nepoškozuje materiály primárního okruhu, jejich limity byly odvozeny na základě možného poškození pokrytí. [48]

## 3.2 BWR

Podmínky při provozu BWR jsou shrnuty v tabulce 3.3 a uvedené hodnoty jsou pouze referenční.

**Tabulka 3.3:** Podmínky při provozu varného jaderného reaktoru, [9]

Tlak vodní páry [MPa]	7,13 ÷ 7,17
Teplota moderátoru [°C]	288,33
Suchost páry na výstupu [%]	12 ÷ 15
Průměrný lineární tepelný tok [kW/m]	18,86
Maximální lineární tepelný tok [kW/m]	43,96
Objemový podíl páry [%]	40 ÷ 43
Průtok chladiva [kg/h]	$(30.66 \div 38,1) \cdot 10^6$

Objemový podíl páry vyjadřuje jaký objem varného reaktoru zabírá pára k objemu chladiva. Protože voda slouží jako moderátor, se zvyšujícím se podílem páry v reaktoru

klesá reaktivita. [9]

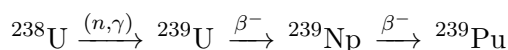
## 4. Vyhořívání jaderného paliva

Vyhořívání jaderného paliva je proces, při kterém dochází k mechanickým a chemickým změnám v jaderném palivu. Při štěpení jaderného paliva je uvolňována energie, kterou odnáší štěpné fragmenty ve formě kinetické energie. Při jedné štěpné reakci na  $^{235}\text{U}$  se uvolní energie o velikosti přibližně 200 MeV. Fragmenty a ionizující záření následně tuto energii ztrácí při interakci s okolím, čímž se zvyšuje teplota okolního materiálu. Teplota okraje palivových tablet nepřesahuje 800 °C.

Vyhoření jaderného paliva u energetických reaktorů se udává v množství energie uvolněné na tunu paliva, tj. megawatt-dní na metrickou tunu MWd/tHM<sup>1</sup>. Běžně se pohybuje vyhoření jaderného paliva okolo 40 000 MWd/tHM. Vyhoření se také udává v procentech štěpných izotopů, tato veličina vychází z podílu rozštěpených štěpných jader a původního počtu štěpných jader. [5]

### 4.1 Rozložení výkonu v tabletě

Výkon se v palivu negeneruje rovnoměrně, protože větší množství neutronů se pohlcuje na  $^{235}\text{U}$  v okrajové části palivové tablety. Výkon v okrajové části tablety je tedy vyšší. Vlivem rezonancí mikroskopického účinného průřezu pro určité energie neutronů dochází k záchytu neutronů na  $^{238}\text{U}$ . Tím vzniká  $^{239}\text{U}$ , který se rozpadá  $\beta^-$  přeměnou na  $^{239}\text{Np}$ . Protože  $^{239}\text{Np}$  má krátký poločas rozpadu, pouze 2,26 dní, dochází po čas provozu k přeměně z  $^{239}\text{Np}$  na  $^{239}\text{Pu}$   $\beta^-$  přeměnou. Na okraji tablety tak vzniká oblast ze zastoupením  $^{239}\text{Pu}$ , jeho štěpení vede na velký nárůst tepelného výkonu v okrajové části tablety a k nárůstu nerovnoměrnosti rozložení výkonu v palivové tabletě. [5]



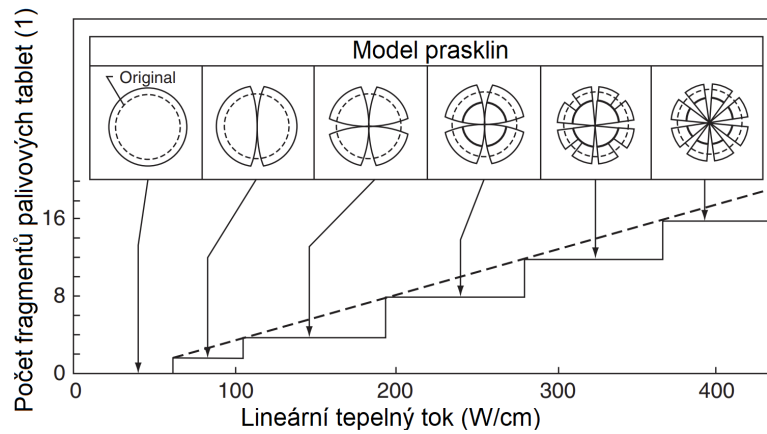
Je vhodné poznamenat, že výše uvedená rovnice je zjednodušená a ve skutečnosti může docházet i k jiným jaderným přeměnám.

### 4.2 Praskání a relopace

Jakmile je reaktor s čerstvým palivem uveden do provozu začne docházet k fragmentaci čerstvých palivových tablet. Vlivem nízkého součinitele tepelné vodivosti je v centru tablety výrazně vyšší teplota než na okraji. Tento rozdíl v teplotách roste s vyhořením, protože velká část štěpných produktů jsou plyny, které vyplňují různá místa v palivových tabletách. (viz kapitola 4.4) To má negativní vliv vedení tepla v palivových tabletách, jelikož plyny mají obecně nižší tepelnou vodivost než pevné látky. To vede k snižování součinitele tepelné vodivosti. Vzniklý teplotní gradient v důsledku teplotní roztažnosti způsobuje napětí, které se uvolňuje praskáním tablet. Při prvním uvedení do provozu se

<sup>1</sup>tHM značí, že je jedná o metrickou tunu těžkého kovu, běžně se používá ve spojení s uranem, plutoniem, thoriem a jejich sloučeninami

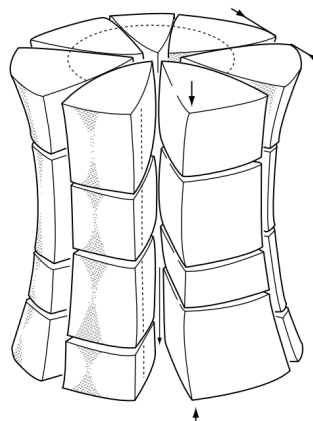
vytvoří 6 ÷ 8 radiálních prasklin a 3 ÷ 4 axiální praskliny. Při opakovaném snižování a zvyšování teploty v důsledku změn výkonu jaderného reaktoru se tvoří další více nepravidelné praskliny.



**Obrázek 4.1:** Model praskání palivových tablet, [5]

Praskání palivových tablet má tendenci tlačít fragmenty palivových tablet směrem k pokrytí, což zmenšuje mezeru mezi palivovými tabletami a pokrytím. Tato vzdálenost je dále zmenšována teplotní roztažností palivových tablet i přes to, že slitiny na bázi zirkonia mají větší koeficient teplotní roztažnosti, děje se tomu tak v důsledku větších teplot v palivových tabletách.

Další změna, ke které dochází při provozu, je tvorba krčku ve střední části palivových tablet. Palivové tablety tím nabývají tvaru přesýpacích hodin. K tomuto jevu dochází vlivem teplotního gradientu a mechanickými vlastnostmi  $UO_2$ . K mechanické interakci palivových tablet s pokrytím dochází nejdříve na okrajích tablet. Rozdíly v průměru palivových tablet, které mohou nastat, se pohybují kolem  $15 \mu m$ . [5]



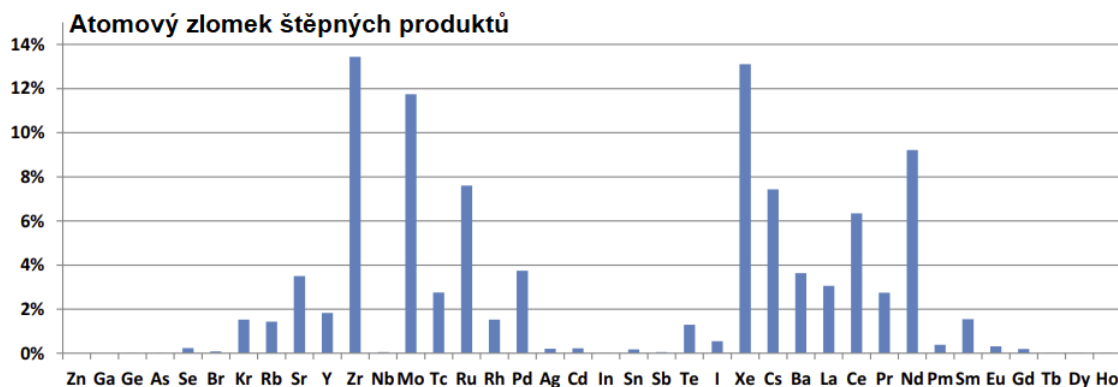
**Obrázek 4.2:** Teoretický tvar palivové tablety zobrazující praskliny a tvar přesýpacích hodin, [5]

### 4.3 Uvolňování štěpných produktů

Štěpením  $^{235}U$  a  $^{239}Pu$  se uvolňuje velké množství štěpných produktů, obvykle v hmotnostním poměru 1/3 - 2/3. Obvykle se jedná o zirkonium, xenon, molybden, neodym, ce-



sium, ruthenium a cer. Velké množství těchto štěpných produktů je nestabilní a přirozeně dochází k dalším přeměnám.



**Obrázek 4.3:** Vypočtené atomové zlomky štěpných produktů pro palivo s obohacením 4,49 % a vyhořením 40 MWd·kg/M, [5]

Vzniklé izotopy mohou být rozpuštěné v palivu nebo tvořit chemické sloučeniny ve formě inkluzí a oxidů. Štěpné produkty se mohou rozpouštět v krystalové mřížce  $UO_2$ , kde nahrazují atomy  $^{235}U$  a  $^{239}Pu$ . Štěpné produkty mohou formovat kovové sraženiny nebo sraženiny ve formě oxidu a nestálé a plynné produkty mohou difundovat a tvořit bubliny v palivu. Štěpné produkty lze podle jejich výš zmíněných vlastností rozdělit do následujících 4 kategorií. [34], [5]

- Oxidy rozpuštěné v palivu
- Plynné nebo nestálé produkty
- Kovové inkluze
- Sraženiny ve formě oxidu

Na obrázku 4.4 jsou štěpné produkty rozděleny do kategorií podle toho jak reagují v podmínkách vyhořívajícího paliva.

H																	He																												
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne																												
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar																												
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr																												
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe																												
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn																												
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og																												
<table border="1"> <tr> <td>Ce</td><td>Pr</td><td>Nd</td><td>Pm</td><td>Sm</td><td>Eu</td><td>Gd</td><td>Tb</td><td>Dy</td><td>Ho</td><td>Er</td><td>Tm</td><td>Yb</td><td>Lu</td> </tr> <tr> <td>Th</td><td>Pa</td><td>U</td><td>Np</td><td>Pu</td><td>Am</td><td>Cm</td><td>Bk</td><td>Cf</td><td>Es</td><td>Fm</td><td>Md</td><td>No</td><td>Lr</td> </tr> </table>																		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu																																
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr																																
Oxidy rozpuštěné v palivu										Plynné nebo nestálé produkty																																			
Kovové inkluze								Keramické sraženiny																																					

**Obrázek 4.4:** Kategorie štěpných produktů, [5]

## 4.4 Napuchání paliva

Na jeden rozštěpený atom připadají  $2 \div 3$  nové atomy v atomové mřížce, a proto přirozeně musí docházet k zvětšování objemu palivových tablet. Tomuto procesu se říká napuchání paliva. Rozlišuje se plynné a pevné napuchání paliva.

Plynné napuchání paliva je spojeno s hromaděním plynných štěpných produktů jak na hranici zrna tak uvnitř zrna. Pokud atom plynného produktu vznikne uprostřed zrna existuje několik způsobů jak se může uvolnit. Po vzniku se může přímo pohybovat k hranici zrna nebo se může zachytit v poruše krystalové mřížce, odkud se nakonec pomocí difuze dostane k hranici zrna. Následně je chycen mezi jednotlivými zrny. K jeho uvolnění může několika způsoby skrz praskliny, skrz póry nebo skrz tunelovou strukturu, která vznikne při dostatečném nahromaděním plynů. Uvolněné štěpné produkty jsou pak zachycené v mezeře mezi pokrytím a palivem nebo ve volném prostoru v horní části palivové proutky. Plynné napuchání je dáno pouze bublinkami plynu na rozhraní zrn nebo v zrnu.

Pevné napuchání paliva je spojeno s hromaděním pevných produktů štěpení, které jsou buď rozpuštěné v palivu nebo ve formě inkluzí. Tyto procesy jsou možné díky tepelné a netepelné difuzi. Netepelná difuze souvisí s radiačním tokem a štěpením a je dominantní při nižších teplotách. Při teplotách vyšších jak  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  začíná převažovat tepelná difuze.

Plynné a pevné napuchání paliva se rozlišuje kvůli rozdílnému fyzikálnímu popisu a různým závislostem. Plynné napuchání paliva závisí na vyhoření paliva a teplotě, přičemž nabývá na důležitosti pokud teplota vzroste nad normální provozní hodnoty. Pevné napuchání paliva závisí téměř výhradně na vyhoření paliva a velmi málo na teplotě. [5], [34]

## 4.5 Denzifikace

Palivové tablety po ukončení výroby dosahují pouze  $90 \div 96\%$  teoretické hustoty  $\text{UO}_2$ , což je to způsobeno nedokončenou sintrací při výrobě. (viz kapitola 1.1) Vlivem vyhořívání dochází k denzifikaci neboli zhušťování paliva, což je způsobeno zanikáním pórů v palivu. To vede na zmenšování rozměrů palivových tablet, jedná se o opačný proces k napuchání paliva. Denzifikace se projevuje zejména během počátku vyhoření, zatímco napuchání nabývá na významu během vysokého vyhoření. [13]

Zanikání pórů může být způsobeno teplotou nebo zářením. Palivové tablety jsou běžně provozovány za teploty  $500 \div 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tyto teploty jsou příliš nízké na to, aby docházelo k růstu krystalů nebo sintrování uvnitř tablet. Může však dojít k sintrování za nízkých teplot způsobené dislokacemi. To vede k eliminaci pórovitosti palivových tablet. Výsledkem je zhušťování štěpného materiálu. [5]

## 5. Namáhání palivových proutků

Namáhání palivových proutků jsou procesy, při kterých dochází ke mechanickému a chemickému zatěžování palivového proutku. Změny tvaru jsou spojeny zejména s makroskopickými mechanismy s výjimkou radiačního růstu palivových proutků. Zatímco změny v krystalové struktuře jsou spojeny s mechanismy na úrovni atomů. Obecně má namáhání palivových proutků degradační účinky.

### 5.1 Radiační růst zirkoniových slitin

Hlavní zdrojem radiačního růstu jsou dislokace způsobené interakcí neutronů s pokrytím, tento proces se nazývá radiační poškození. Dislokace jsou produkovány rychlými neutrony a rychlost rozvoje radiačního poškození je závislá na neutronovém toku. Vztah mezi radiačním poškozením a neutronovým tokem je téměř stejný (s odchylkou menší než 10 %) pro všechny slitiny zirkonia.

Legující prvky jako Nb snižují radiační růst oproti slitinám bez Nb, například Zircaloy-2 a Zircaloy-4. Prvky s menším zastoupením, jako Fe a H, mohou mít také významný vliv na radiační růst. Ukazuje se, že se navodíkování pokrytí přispívá k radiačnímu růstu, naopak zvyšování obsahu Fe snižuje radiační růst, protože atomy Fe dobře difundují v Zr, což mu umožňuje zaplňovat intersticiální defekty nebo vakance. [1]

### 5.2 Creep

Creepová deformace je pomalý nevratný proces, ke kterému dochází pod mezí kluzu. Creep je dán posunem poruch krystalové mřížky. Posuny poruch jsou silně závislé na teplotě. U jaderného paliva rozlišujeme tepelný creep, který je spojený čistě s napětím a radiační creep, který je spojený s neutronovým tokem. Creep by neměl být zaměňován s plastickou deformací, ke které dochází okamžitě.

Creepová deformace pokrytí závisí na teplotě, napětí, materiálu, toku rychlých neutronů a směru namáhání, protože tyto faktory ovlivňují pohyb a tvorbu dislokací v materiálu. Radiační creep je ovlivněn zejména teplotou, napětím a neutronovým tokem. S rostoucí teplotou roste i aktivační energie, to znamená, že pro rychlé neutrony je náročnější způsobovat dislokace v materiálu, což vede na snížení creepové deformace. Pro všechny teploty je však creepová deformace úměrná toku rychlých neutronů. Tepelný creep je ovlivněn teplotou, napětím a vlastností zrn. Například pro Zircaloy-2 se ukázalo, že s rostoucími rozměry zrn materiálu roste i creepová namáhání. [34]

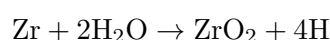
### 5.3 Oxidace

Oxidace pokrytí snižuje jeho tloušťku pevné a kujné slitiny za vzniku nekujného, křehkého oxidu. To má za následek sníženou schopnost pokrytí podstupovat plastické deformace.

Oxidace zirkoniových slitin probíhá pohybem kyslíkových iontů pocházejících z prostředí chladiva skrz vrstvu oxidu k slitině, zatímco kyslíkové vakance se pohybují opačným směrem. Po průchodu oxidovou vrstvou se kyslíkový iont váže na zirkonium kvůli vysoké chemické afinitě, čímž vzniká sloučenina  $ZrO_2$ . Rychlost oxidace závisí na prostředí, metalurgii, slitině, teplotě, záření, tepelný tok, na tloušťce vrstvy a mechanickém namáhání. Mechanické namáhání způsobuje trhliny ve vrstvě oxidu, kterými se oxidy snadněji dostávají ke slitině. Chemické složení vody má velký vliv na oxidaci, zejména kvůli obsahu rozpuštěného kyslíku, který je nezbytný pro rozvoj koroze. Dalším významným parametrem je metalurgie povrchu, jelikož některé fáze zirkoniových slitin vykazují sníženou odolnost vůči oxidaci. Teplota je velmi důležitá, častokrát i menší nárůst teploty může vést na významný nárůst tloušťky oxidu. Oxidace povrchu probíhá i na vnitřním povrchu povrchu, protože palivové tablety obsahují kyslík, avšak v porovnání s oxidací na vnější straně je oxidace na vnitřní straně malá. [21], [34]

## 5.4 Navodíkování

Během provozu se generuje samostatný vodík. Hlavním zdrojem vodíku je koroze povrchu, kdy dochází k navázání kyslíku na zirkonium, vzniká tak sloučenina  $ZrO_2$ , čímž se uvolňuje vodík.



Dalším zdrojem vodíku je  $NH_3$  (viz kapitola 3.1) a radiolýza vody, tj. proces kdy dochází k rozštěpení molekuly vody na vlivem interakce s neutronem.

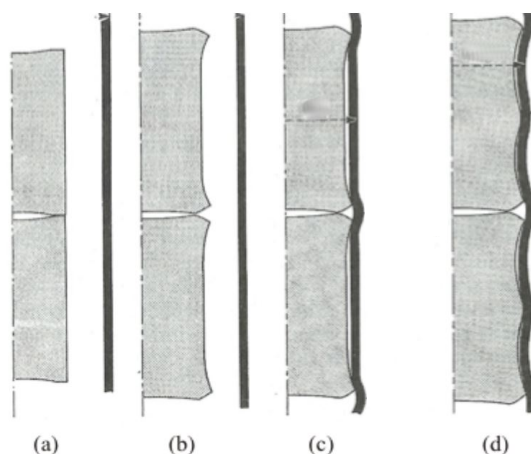


Takto vzniklé atomy vodíku se rozpouští v zirkoniovém povrchu. Vodík je absorbován v zirkoniu, protože je stabilnější v  $\alpha$  fázi zirkonia než v plynné formě. Při změně teploty může dojít k vysrážení vodíku, který absorbovaný v povrchu. To velice negativně ovlivňuje rozměrovou stabilitu, maximální napětí, korozivzdornost a creepovou deformaci. Navodíkování povrchu je ovlivněno vnitřními i vnějšími faktory. Mezi vnitřní faktory se řadí chemické složení, mikrostruktura, póry a praskliny a vnějšími faktory jsou např. teplota a chemické složení vody. [20]

## 5.5 PCI

Pellet-Cladding Interaction neboli interakce palivové tablety a povrchu je pomalý proces, ke kterému dochází po kontaktu povrchu a palivových tablet. Tomu předchází uzavírání mezery mezi povrchem a palivovými tabletami. Následný kontakt zvyšuje napětí a tedy i deformaci povrchu. Tento mechanismus je důsledkem creepu povrchu, teplotní roztažnosti a objemového růstu tablety. PCI se projevuje při vysokém vyhoření. (viz kapitoly 4.4 a 5.2)

Na obrázku 5.1 je vidět průběh interakce palivových tablet a pokrytí. Část (a) zobrazuje proutek za provozu, kdy je pokrytí vystaveno vysokému tlaku chladiva. Je tedy vystaveno kompresnímu namáhání a tedy creepové deformaci. V části (b) kvůli vyhořívání paliva nabývají tablety na objemu v důsledku napuchání. Nejsignifikantnější napuchání palivových tablet je na jejich okrajích, což způsobuje, že palivové tablety nabývají tvaru přesýpacích hodin. Více palivových tablet umístěných nad sebe pak, vlivem tohoto mechanismu, připomíná svým tvarem bambusovou tyč. Část (c) zobrazuje rozhraní dvou palivových tablet, kde dochází k prvnímu dotyku s pokrytím. Část (d) zobrazuje pokračující deformaci palivové tablety s ohledem na nerovnoměrné rozložení interakce. V důsledku toho začne pokrytí, které bylo dříve namáhané na tlak, být namáhané na tah. Vlivem napuchání se při PCI palivové tablety zakousnou do vnitřní strany pokrytí, čímž při dilatacích palivového proutku, způsobených změnami výkonu, na pokrytí působí axiální síla vyvolaná rozdílnými koeficienty teplotní roztažnosti. Jedná se možný zdroj namáhání a poškození pokrytí. PCI závisí na mnoha parametrech řadí se mezi ně napuchání tablet, radiační poškození, koroze, navodíkování a další. [17], [10]



**Obrázek 5.1:** Průběh interakce tablet a pokrytí, [17]

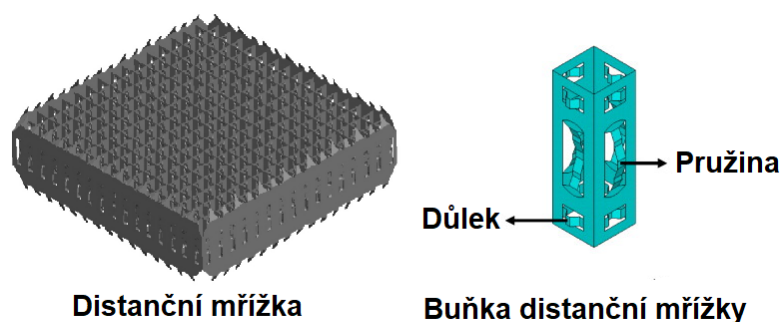
## 5.6 Tok chladiva

Tok chladiva působí na palivové proutky dvěma způsoby. Proudění chladiva generuje sílu, která působí na proutek. Její velikost závisí na Reynoldsově čísle a poloze proutku v palivovém souboru. Reynoldsovo číslo zohledňuje rychlost proudění, termofyzikální vlastnosti a geometrii, kterou chladivo proudí. S rostoucím Reynoldsovým číslem roste i síla, která působí na proutky. Poloha proutku je důležitá, protože podmínky na okraji palivového souboru jsou jiné než uprostřed. Publikace [7] analyzuje sílu, kterou chladivo působí na část proutky obecného PWR palivového souboru 17x17 mezi dvěma distančními mřížkami. Výsledná síla byla určena na 160 N ve směru proudění chladiva. Jelikož chladivo proudí zejména směrem vzhůru, tak síla vyvolaná příčným tokem je malá. Naklonění, tedy průhyb, palivových proutků by neměl mít velký vliv na tuto sílu. Pro deformace palivových proutků je důležité zmínit, že proudění působí silou na distanční mřížku. Přičemž tato síla

působí zejména v axiální směru. Přesto je možné pozorovat síly působící v příčném směru. [7]

## 5.7 Přítlačná síla buněk v distančních mřížkách

Pro pochopení této problematiky je nutné se nejdříve detailněji podívat na konstrukci distančních mřížek. Distanční mřížka je pole šterbinových proužků, které jsou svařeny v průsečících dohromady. Do jednotlivých proužků jsou vyraženy pružiny a důlky, které drží palivové proutky. Palivové proutky se nedotýkají celé plochy distanční mřížky, ale pouze pružin a důlků. Na obrázku 5.2 je příklad distanční mřížky a její buňky, provedení se liší v závislosti na palivovém souboru.



**Obrázek 5.2:** Distanční mřížka a její buňka pro palivový soubor 16x16 typu PWR, [46], [45]

Při vkládání palivového proutku do distanční mřížky v průběhu výroby dochází deformaci pružiny a důlku. Jelikož se jejich deformace řídí Hookovým zákonem ( $F = k \cdot x$ ), tak generují normálovou sílu, která vyvolává třecí sílu mezi pokrytím a distanční mřížkou. Pružiny a důlky v distančních mřížkách musí být pečlivě navrženy, jelikož musí být dostatečně silné, aby udržely palivové proutky na místě a zároveň dostatečně měkké, aby nebránily prodlužování palivových proutků, což by mohlo vést na průhyb palivových proutků. Síla, kterou distanční mřížka působí na palivový proutek klesá v průběhu provozu, v důsledku únavy materiálu a radiačního poškození, které snižují modul pružnosti. Zároveň proutky v důsledku creepu zmenšují svůj průměr, to vede na menší vychýlení pružiny a tedy i menší normálovou sílu. Přítlačná síla důlků a pružin závisí na tloušťce proužku, materiálu a jejich rozměrech a deformaci. [46], [45]

## 5.8 Otěr

Opakovaný pohyb dvou dotýkajících se těles s malou výchylkou způsobuje tření, jehož důsledkem je otěr. Otěr je způsobený vibracemi, které vyvolává proudění chladiva. K otěru dochází zejména v blízkosti distančních mřížek, hlavice a patice. Tento mechanismus by v závislosti na intenzitě mohl vést až k prodření pokrytí a dehermetizaci palivového proutku.

Druh a závažnost otěru závisí na amplitudě kmitu, normálové síle mezi pokrytím a distanční mřížkou a součinitelem smykového tření. Amplituda je se pohybuje z kolem

$50 \div 150 \mu\text{m}$  , frekvence kolem  $20 \div 30 \text{ Hz}$  a síla  $0,1 \div 1 \text{ N}$ . [31] Dále závisí na teplotě a oxidaci povrchů. S relaxací pružinek v distanční mřížce roste ořez povrchů.

Vibrace, které jsou primárním zdrojem ořezu v palivových souborech lze rozdělit do dvou kategorií na vnitřní a vnější vibrace. Vnější vibrace jsou způsobeny vnitřními součástmi reaktoru, například vnitřními mezerami v palivovém souboru. Vnitřní vibrace jsou způsobeny nesprávným návrhem lopatek mísících mřížek, vnitřními součástmi distančních mřížek, poměrem objemu paliva a vody a roztečí distančních mřížek. Z tohoto důvodu výrobci dlouho testují každý nový návrh palivového souboru. [31], [26], [57]

## 5.9 Rozvoj napětí v palivovém proutku

Napuchání palivových tablet, PCI, konstrukce palivových proutků, růst povrchů, creepová deformace povrchů a teplotní roztažnost jsou zdrojem napětí v povrchu i palivových tabletách. I přesto, že tyto mechanismy způsobují mechanické napětí v axiálním směru, je vhodné je rozdělit podle směru ve kterém probíhají.

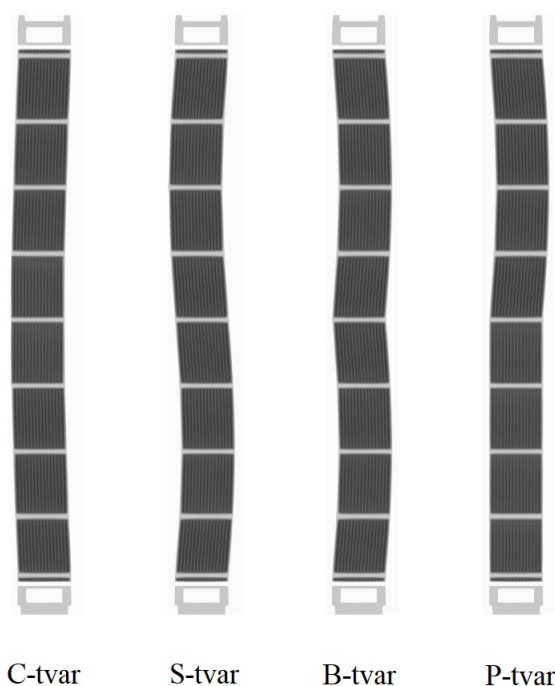
Mechanismy probíhající v radiálním směru jsou napuchání palivových tablet, creep povrchů v radiálním směru, PCI a teplotní roztažnost. Palivové tablety se vlivem napuchání zakousnou do vnitřní strany povrchů, které se současně deformuje směrem dovnitř vlivem creepu, který je vyvolán vnějším tlakem. Toto zabraňuje prokluzování palivových tablet v povrchu při dilatacích palivového proutku vyvolaných změnami výkonu. Při poklesu výkonu se povrch zmenšuje víc než palivové tablety, což v kombinaci s PCI, způsobuje napětí v palivovém proutku. (viz kapitoly 4.4, 5.5, 4.2 a 5.2)

Mechanismy probíhající v axiální směru jsou napuchání palivových tablet, creep povrchů a teplotní roztažnost. Vlivem napuchání tablet v axiálním směru dochází k stlačování už před napjaté pružiny v horní části palivového proutku. Současně dochází ke zkracování palivového proutku vlivem creepu. Tyto dva mechanismy vedou na další stlačování pružiny, která následně tlačí na palivové tablety a horní zátku, čímž způsobuje mechanické napětí v povrchu. (viz kapitoly 1.3 a 5.2)

## 6. Deformace palivových souborů

Palivový soubor se skládá z kostry a palivových proutků. Kostra je tvořena vodícími trubkami, centrální trubkou, hlavicí, patičí a distančními mřížkami. Palivové proutky jsou drženy v kostře distančními mřížkami a uchycením, které se zpravidla nachází v patiči. (viz kapitola 2) Deformací palivových souborů a palivových proutků se rozumí ztráta původního tvaru v důsledku rozdílných teplot a sil, které lze rozdělit na vnější a vnitřní. Zdrojem vnějších sil je obecně chladivo, například tření mezi pokrytím a chladivem. Vnitřní síly mohou být vyvolané například axiálním růstem. Nerovnoměrné rozložení výkonu v palivovém souboru může vyvolávat deformace. Na začátku kampaně se palivové proutky s obtíží pohybují v axiálním směru, jelikož jsou drženy pružinkami v distančních mřížkách. To vede na větší tření a namáhání. Postupem času dojde k relaxaci pružin v distanční mřížce a palivové proutky se začnou volně pohybovat v axiálním směru. Toto má vliv na rozložení napětí v palivovém souboru, které se mění v průběhu kampaně. Na začátku palivové proutky neprokluzují skrz distanční mřížky a napětí z palivových proutků se může přenášet od kostry a naopak. Postupně, ale dojde u uvolnění pružin v distanční mřížce a napětí mezi kostrou a palivovými proutky přestane být sdílené. Tyto změny v rozložení napětí jsou primárním zdrojem, průhybu palivových souborů.

Prohnutý palivový soubor může nabýt několika tvarů, které jsou zobrazeny na obrázku 6.1. Tvary C a S jsou nejběžnější, tvary P a B jsou vzácnější. Tvar B je také občas označován jako W. Tvar také závisí na reaktoru, některé reaktory vykazují větší množství palivových souborů s tvarem C, zatímco jiné vykazují větší výskyt tvaru S. [6], [22]

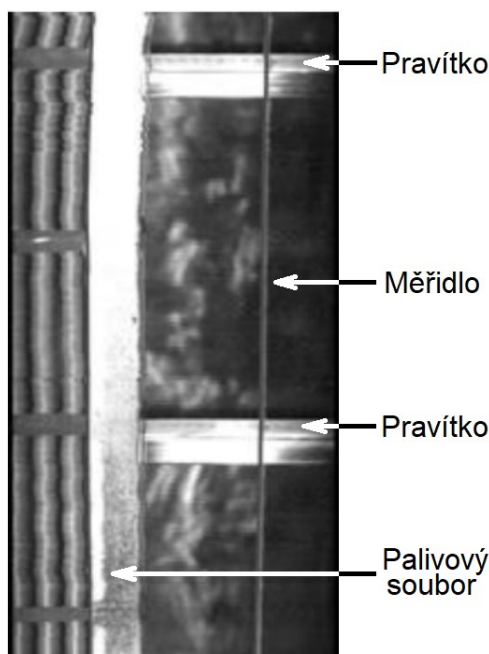


Obrázek 6.1: Tvary prohnutých palivových souborů, [6]



Existuje několik metod, které umožňují vyhodnocovat deformace, ale nejrozšířenější je vizuální kontrola. Kamery používané v dnešní době jsou schopné pracovat v nepříznivém prostředí bazénu pro skladování vyhořelého paliva. Při inspekci je palivový soubor umístěn proti kameře. Obsluha následně může provádět kontrolu palivového souboru. Tuto metodu je možné použít pro jakýkoliv palivový soubor bez obálky a lze pomocí ní stanovit průhyb, růst a krut.

Obrázek 6.2 zobrazuje měření průhybu palivového souboru. Na měřidlo pravé straně slouží jako referenční přímka, v zadní části se nachází dvě pravítka a vlevo je palivový soubor. Kamera je umístěna rovnoběžně s okrajem distanční mřížky a kolmo k pravítku. Odchylka od původního stavu palivového souboru, odečítaná na pravítku, představuje průhyb palivového souboru. Obě pravítka a měřidlo slouží ke kalibraci během postprocessingu.



**Obrázek 6.2:** Vizuální inspekce palivového souboru, [28]

Tato metoda má hned několik výhod. Díky postprocessingu není nutné zpracovávat inspekci okamžitě. To umožňuje efektivnější měření a průběh bez časové tísně. I jednoduchá inspekce lidským okem může sloužit k odhalení průhybu palivového souboru, obzvláště pokud je průhyb v pokročilém stádiu.

Ačkoliv je vizuální inspekce jednoduchá a dovoluje dobře monitorovat průhyb palivového souboru, její hlavní nevýhodou je nepřesnost. Klíčovou roli v tom hraje perspektiva, protože všechny komponenty jsou v různých vzdálenostech od kamery. S rostoucí vzdáleností od kamery je potřeba, aby rostl počet pixelů kamery. Další problém představuje efekt optiky kamer, který zkresluje obraz. Protože kamera má omezený záběr a palivový soubor je dlouhý několik metrů, musí se vůči sobě pohybovat, což přináší problém při postprocessingu, kdy je potřeba správně zkombinovat několik snímků dohromady. [28]

Dalším způsobem je ultrazvukové měření deformace palivového souboru. Měření probíhá pohybem ramena podél palivového souboru, které nese 1 až 4 sondy. Na ramenu

může být současně umístěna kamera pro vizuální inspekci. Sonda vysílá vysokofrekvenční signál, který se následně odráží na povrchu palivového souboru. Největší odezva je na distančních mřížkách. V oblasti palivových proutků je odezva menší kvůli rozptýlení signálu na kulatém povrchu palivových proutků. Díky různým odezvám je možné rozlišit rozdíly v geometrii a zpětně získat jejich polohu a tvar palivového souboru v dané části.

Výhodou tohoto měření je přesnost, možnost automatizace a malé rozměry. Zároveň nevyžaduje kontakt s palivovým souborem, stejně jako vizuální inspekce. Nevýhodou je nízká odolnost krystalů, které generují vysokofrekvenční signál, vůči ionizujícímu záření. Tento problém může být vyřešen stíněním nebo zvětšením vzdáleností mezi palivovým souborem, čímž však zařízení pozbývá malé rozměry. [28]

Velký problém při zkoumání průhybu palivových souborů je, že nemohou být měřeny během provozu, ale pouze při odstávce jaderného reaktoru. To však vede k absenci příčného toku a teplotní roztažnosti a je možné změřit pouze trvalé deformace. Deformace během odstávek mohou být značně odlišné od deformací během provozu. Otevřená literatura neposkytuje informace o jiných měřeních prováděných v praxi. [6], [29]

## 7. Deformace palivových proutků

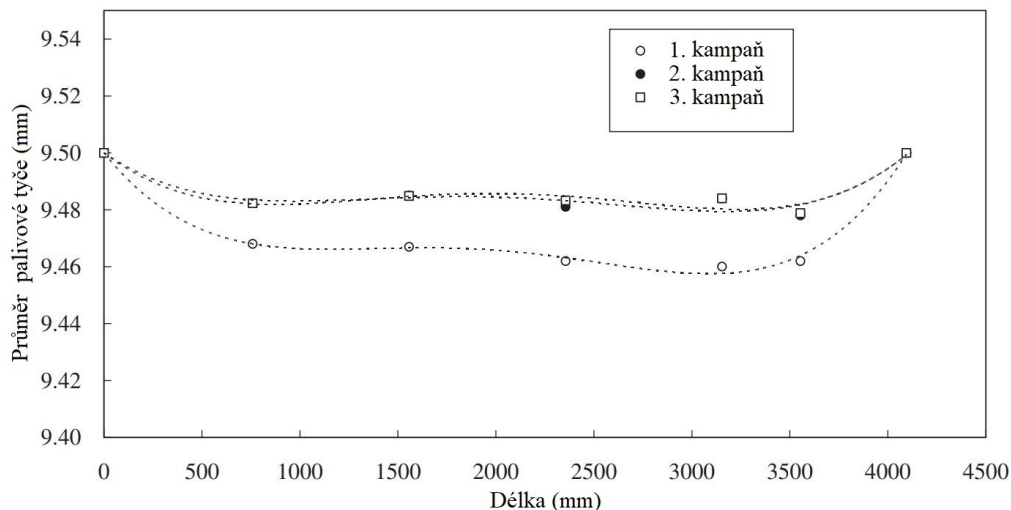
Deformací palivových proutků se rozumí změna jejich rozměrů. Následkem deformace palivových proutků je jejich průhyb, přičemž tyto deformace je možné rozdělit na ty, které přímo nebo nepřímo vedou na průhyb. Mezi deformace přímo vedoucí na průhyb se řadí příčná síla vyvolaná příčným tokem chladiva a mezi nepřímé příčiny se řadí creep a oxidace pokrytí. V případě, že by došlo k doteku palivového proutku a hlavice v důsledku axiálního růstu, mohlo by dojít k průhybu palivového proutku.

Výrobci palivových souborů nezveřejňují informace o průhybech palivových proutků. Zároveň jsem neměl přístup do databází spojených s průhyb palivových proutků. Proto byla pro vypracování této kapitoly použita pouze volně dostupná literatura na internetu. Hlavním zdrojem informací pro tuto kapitolu byly publikace [16] a [24], které pojednávají o průhybu palivových proutků a palivových souborů na švédské jaderné elektrárně Ringhals 3 a korejském palivovém souboru PLUS7.

### 7.1 Pozorování deformací při provozu

Na počátku kampaně se palivový proutek nedotýká hlavice palivového souboru, aby se zamezilo namáhání palivového proutku v důsledku jeho růstu. Mezera mezi hlavicí a proutkem poskytuje možnost volně růst a minimalizovat axiální síly působící na palivový proutek. Při případném kontaktu palivového proutku a hlavice se tyto síly se přenáší do kostry palivového souboru a vnitřních součástí jaderného reaktoru. Zároveň nadměrné namáhání palivového proutku může vést na jeho průhyb. Toto je velmi nežádoucí mechanismus, proto se růst palivových proutků a mezera mezi hlavicí a proutkem během odstávek pečlivě sleduje.

Vnější průměr palivového proutku je další sledovaný parametr. Na základě něho je možné vyhodnotit teplotu v tabletě, vnitřní tlak, napětí v pokrytí a napětí vyvolané pružinami distančních mřížek. Trend deformace pokrytí se v průběhu vyhořívání mění. Graf 7.1 pochází z měření na korejském palivovém souboru PLUS7 určeném pro komerční využití. Hodnoty byly naměřeny vždy po ukončení kampaně. Z grafu 7.1 je vidět, že při první kampani ve střední části došlo k zúžení v důsledku vysokého vnějšího tlaku působícího na palivový proutek s nízkým vnitřním tlakem. Při druhé kampani došlo k rozšíření palivového proutku v důsledku creepu, který byl vyvolán napucháním palivových tablet. Při třetí kampani nedošlo ke změně průměru. To může být způsobeno protichůdnými mechanismy poklesu výkonu a creepem. [24]



Obrázek 7.1: Průměr palivového proutku paliva PLUS7 po ukončení cyklu, [24]

## 7.2 Negativní dopady na provoz

Při deformování palivového proutku může dojít k jeho průhybu. To vede na k rozšiřování nebo zužování mezery mezi jednotlivými palivovými proutky. Výsledkem jsou změny v moderaci neutronů, což má za následek nerovnoměrné generování tepla a nerovnoměrné vyhořívání. Pokud by lokálně došlo v přílišném nárůstu generovaného tepla, mohlo by dojít ke krizi varu prvního druhu, což je nežádoucí mechanismus jak z bezpečnostního tak z provozního hlediska. Pro chlazení proutků je také důležitá změna hydraulické charakteristiky jednotlivých průtočných kanálů, což má za následek jiné rozdělení průtoku přes palivový soubor.

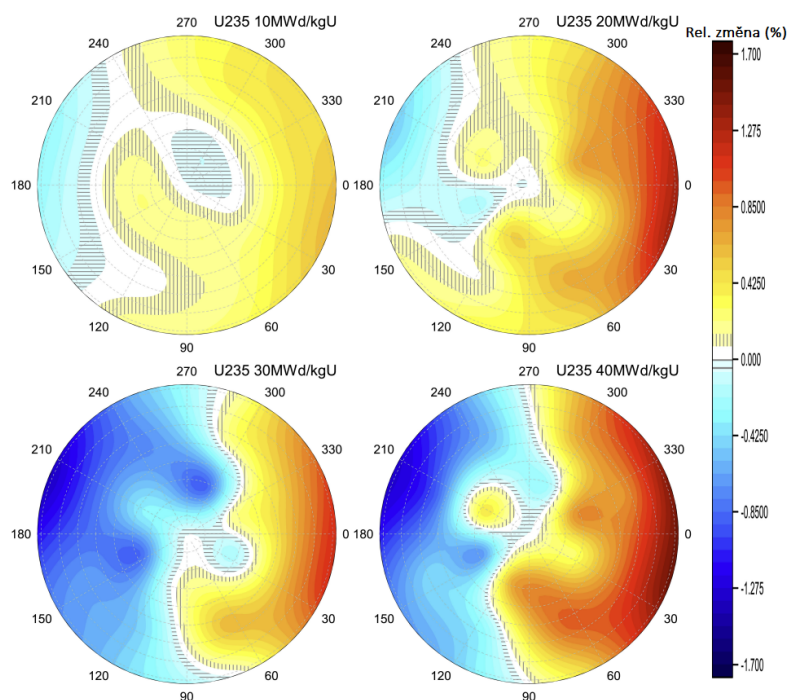
### 7.2.1 Výkonové peaky

Vlivem deformací palivového proutku v palivovém souboru dochází, ke změně rozložení paliva a moderátoru. To má vliv na lokální neutronové toky v palivovém souboru a tedy i na lokální výkon. Může tak dojít k větší generaci tepla na jedné straně palivového proutku než by tomu bylo u nezdeformovaného proutku. Tento mechanismus je ovlivněn vyhořením paliva, průhybem palivového proutku a polohou palivového proutku v palivovém souboru. Nerovnoměrné rozložení výkonu je nežádoucí jev, protože může dojít k překročení kritického tepelného toku, proto se zavádí limity, které mají zajistit, že k tomu nedojde. [16]

### 7.2.2 Vyhořívání paliva

V porovnání s nedeformovaným proutkem v deformovaném proutku se spotřebovává méně  $^{235}\text{U}$  a zároveň se generuje méně  $^{239}\text{Pu}$  a  $^{244}\text{Cm}$ . Obrázek 7.2 byl získán simulací 3x3 čtvercového palivového souboru s deformovaným středovým proutkem do S-tvaru pomocí programu SERPENT a zobrazuje relativní atomovou hustotu  $^{235}\text{U}$  v řezu palivovým prout-

kem. Řez byl proveden v oblasti, kde se palivový proutek nejvíce vychyluje doprava, t.j. vpravo je mezera mezi dvěma palivovými proutky menší než vlevo. Řez je prakticky rozdělen na červenou a modrou oblast, kde červená reprezentuje větší atomovou hustotu  $^{235}\text{U}$  v zdeformovaném palivovém proutku vůči nezdeformovanému palivovému proutku. Modrá reprezentuje nižší atomovou hustotu  $^{235}\text{U}$  v zdeformovaném palivovém proutku vůči nezdeformovanému palivovému proutku. K tomu dochází kvůli menší moderaci vpravo a větší moderaci vlevo. S tím zároveň koresponduje produkce  $^{239}\text{Pu}$ . Nerovnoměrné vyhořívání paliva vede na jeho neefektivní využití a další namáhání. [33]



**Obrázek 7.2:** Relativní atomová hustota  $^{235}\text{U}$  v řezu deformovaným palivovým proutkem, [33]

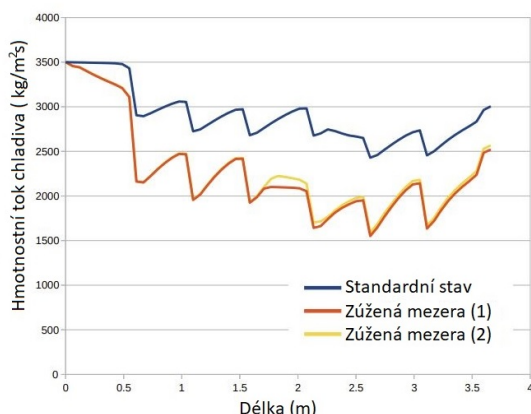
### 7.2.3 Vliv deformace na termohydrauliku palivového proutku

Obrázky 7.3 a 7.4 pochází z publikace [23], které se zabývá zúžením mezery mezi dvěma palivovými soubory pro PWR. Výsledky byly získány pomocí výpočetního kódu COBRA. Díky určité podobnosti v uspořádání palivových souborů v PWR a uspořádáním palivových proutků v palivovém souboru je možné použít tyto grafy pro ilustraci.

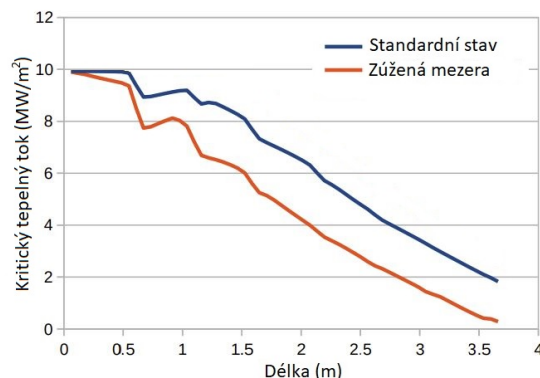
Deformace palivových proutků mohou vést na zúžení jednotlivých kanálů v palivovém souboru a zvýšení místních odporů. To vede na pokles hmotnostního toku, který těmito kanály protéká. Obrázek 7.3 ilustruje možnou závislost hmotnostního toku na výšce palivového proutku. Sestupný trend celého grafu je způsoben působením místních odporů, přičemž výrazné poklesy jsou způsobené distančními mřížkami. Menší hmotnostní tok vede na nižší chlazení a tedy i k nárůstu teplot.

Obrázek 7.4 zobrazuje kritický tepelný tok v závislosti na výšce palivového proutku. Takovýto pokles představuje problém jak z provozního tak bezpečnostního hlediska. Při překročení kritického tepelného toku totiž dochází k prudkému poklesu koeficientu přestupu

tepla, což má za následek prudký nárůst teploty pokrytí a jeho možné poškození. [23]



Obrázek 7.3: Hmotnostní tok, [23]



Obrázek 7.4: Kritický tepelný tok, [23]

### 7.3 Modelování

Průhyb palivových proutků je možné modelovat analyticky nebo numericky. Při analytickém výpočtu jsou palivové proutky často zjednodušené nebo některé mechanismy nejsou uvažované. Příkladem takového zjednodušení může být idealizace uchycení nebo zjednodušení vnitřku palivového proutku. Byť je znalost funkční závislosti průhybu palivového proutku na vyhoření, teplotě nebo jiných parametrech žádaná, je často náročné takový výpočet provést. Obzvláště s rostoucími požadavky na přesnost a snahou zahrnout co nejvíce mechanismů se rovnice a tedy výpočet výrazně komplikuje. Proto se v praxi často volí numerické metody výpočtu prováděné pomocí výpočetního softwaru. Při modelování průhybů palivových proutků se nejčastěji uplatňuje metoda konečných prvků. Ta spočívá v diskretizování definičního oboru, na kterém jsou řešeny diferenciální rovnice, kterými jsou popsány různé mechanismy. V tomto případě se jedná o diskretizaci času a objemu. Zároveň se předpokládá, že díky své malé velikosti se veličiny uvnitř těchto elementů příliš nemění a proto je možné aproximovat jednoduchými funkcemi. Pro modelování průhybů je možné použít konečně prvkové programy jako ANSYS Mechanical a Abaqus. Pro komplexní úlohy popisující palivový proutek nejsou vhodné, protože nedokážou zohlednit mechanismy spojené s vyhoříváním paliva. V praxi se proto používají speciální jednoúčelové kódy připravené pro tyto výpočty [41]

### 7.4 Mechanismy průhybu palivových proutků

Největší potenciál pro rozvoj průhybu palivového proutku se skrývá v mechanismech spojených s axiální deformací palivového proutku. Tyto změny jsou spojeny s napucháním paliva, radiačním růstem a creepem. Vlivem radiačního růstu může dojít dotyku palivového proutku a hlavice palivového souboru a následné deformace.

Hydrodynamické jevy se řadí mezi další příčiny, které vyvolávají průhyb palivového proutku. Při příčném toku dochází vlivem obtékání palivového proutku k změně hybnosti

chladiwa a rozdílům v tlaku, vlivem toho na palivový proutek působí příčná síla. Tato síla způsobuje pomalý průhyb palivových proutků v důsledku creepu pokrytí. Kvůli této síle směr průhybu palivových proutků kopíruje směr proudění chladiwa. Vibrace palivových proutků, vyvolané tokem chladiwa, způsobují deformace pokrytí. Přesto nejsou uvažované při průhybu palivových proutků, ale při výpočtech selhání palivového proutku.

Vnější i vnitřní oxidace pokrytí je mechanismus, který přispívá k průhybu palivového proutku. Tvorbou oxidační vrstvy na povrchu pokrytí ubývá materiál, který je schopen odolávat mechanickému napětí. V příčném řezu dochází ke zmenšení plochy pokrytí a tedy nárůstu mechanického napětí. Creep a napuchání paliva výrazně ovlivňují vnitřní i vnější průměr pokrytí. V důsledku toho se mění kvadratický moment průřezu, který hraje významnou roli při průhybu. Nerovnoměrné generování tepla může mít za následek zvýšení teploty na jedné straně palivového proutku. Vlivem různého prodloužení palivového proutku, v důsledku teplotní roztažnosti, může docházet k průhybu.

Na průhyb palivových proutků mohou mít vliv mechanismy, které s nimi přímo nesouvisí. Při provozu se totiž prohýbá i kostra palivového souboru, která byť není nerozdělitelně spojená s palivovými proutky, může přenášet její průhyby na palivové proutky. Tyto průhyby mohou být způsobeny nadměrnou axiální silou vyvolanou stlačenými pružinami mezi hlavicí a horní deskou v jaderném reaktoru nebo nevyrovnáním výkonu v palivovém souboru, který má za následek vyšší lokální teploty a tedy deformace v důsledku teplotní roztažnosti. (viz kapitola 6)

## 7.5 Opatření

Omezením mechanismů vedoucích k průhybu palivových proutků je možné snížit jejich průhyb. Hlavním cílem by mělo být omezit vznik mechanického napětí. Při návrhu palivového souboru, by se měl výrobce ujistit, že nedojde ke kontaktu obou konců palivového proutku a kostry palivového souboru v důsledku axiálního růstu. Musí být zajištěno, aby palivové proutky mohli volně dilatovat v axiálním směru v důsledku teplotní roztažnosti a dalších mechanismů. Distanční mřížky musí umožňovat prokluzování palivových proutků v axiálním směru. Zvýšením počtu distančních mřížek je možné snížit amplitudu průhybu. Zlepšováním mechanické a chemické odolnosti pokrytí je možné omezit změny průměru proutku, v důsledku creepu a oxidace. Průhyb je také možné zlepšit zvýšením celkové tuhosti palivového souboru nebo kompletně novým konceptem palivového souboru.

## 8. Výpočet a analýza průhybu palivového proutku

Pro určení důležitosti jednotlivých parametrů paliva a mechanismů na průhyb je běžně potřeba provést analytický výpočet nebo simulaci. Pro nejpřesnější výsledky je potřeba zvolit vhodný model, který bude dostatečně dobře reprezentovat různé fyzikální jevy. Změnou parametrů modelu je možné sledovat změny ve výsledcích a na základě toho rozhodnout o důležitosti jednotlivých parametrů. Pokud bude v průběhu kapitoly bude mluveno o nosníku, znamená to, že tvrzení je platné obecně pro všechny nosníky. Pokud bude mluveno o palivovém proutku, znamená to, že tvrzení se vztahuje ke konkrétní situaci.

Mechanismy, které způsobují deformace palivového proutku mají různý vliv rozvoj průhybu, proto lze říct, že některé jsou důležitější než jiné. Pokud by vlivem axiálního růstu palivového proutku došlo k dotyku na obou koncích proutku s kostrou palivového souboru, mohlo by dojít k významnému rozvoji průhyb, proto je mechanismus růstu palivového proutku důležitý z pohledu průhybu. PCI, creep pokrytí a napuchání tablet ovlivňuje vnitřní a vnější průměr pokrytí a způsob, kterým se přenáší napětí v palivovém proutku. (viz kapitola 5.9) Vnější a vnitřní průměr pokrytí určuje kvadratický moment průřezu. Jedná se o důležitou veličinu, která významně ovlivňuje průhyb, proto jsou tyto mechanismy významné z pohledu průhybu. Dalším jevem, který způsobuje změnu vnějšího průměru pokrytí je oxidace. Z tohoto důvodu je stejně významná jako předchozí mechanismy. Je potřeba zdůraznit, že oxidace může mít další dopady na průhyb v podobě navodíkování pokrytí. Mechanismus navodíkování pokrytí ovlivňuje materiálové konstanty, pokud však nedojde nestandardní situaci neměl by mít tento mechanismus významný vliv na průhyb palivového proutku. Pro přesnější posouzení vlivu jednotlivých mechanismů je potřeba sestavit model, na kterém bude vliv těchto mechanismů demonstrován.

### 8.1 Model

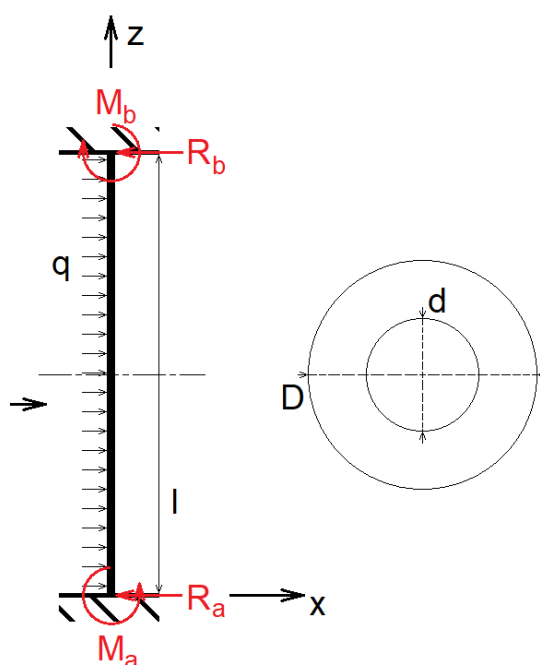
Výpočet bude provedený na výseči palivového proutku mezi dvěma distančními mřížkami. Výpočet bude probíhat pouze ve dvou dimenzích. Osa  $z$  bude reprezentovat délkový rozměr palivového proutku a osa  $x$  bude použita zejména pro určení maximální možného průhybu. Dvou dimenzionální přístup nepředstavuje omezení, jelikož jedním z hlavních parametrů bude uzavírání mezery mezi dvěma palivovými proutky na co stačí pouze jeden rozměr, protože je vždy možné vhodně zvolit soustavu souřadnic.

Nyní je potřeba se zaměřit na uchycení palivového proutku. Vetknutí je způsob uchycení nosníku, který ve dvou dimenzích omezuje posun a rotaci nosníku. Pohyb uchycení palivového proutku ve směru osy  $x$  není možný kvůli distanční mřížce a pohyb ve směru osy  $z$  nebude uvažovaný, protože v tomto případě není důležitý, jinak řečeno posun nosníku není možný. Distanční mřížka neomezuje možné pootočení palivového proutku při prů-



hybu. Avšak je potřeba uvažovat, že palivový proutek pokračuje za vytyčenou výseč, na které probíhá výpočet. Předpokládá se, že navazující část palivového proutku není nijak prohnutá a zároveň nepodléhá deformaci uvažované výseče. Předpoklad, že zbylá část palivového proutku nepodléhá průhybu je velmi důležitá. Bez této úvahy by se zbylá část proutku prohýbala dle průhybu ve výseči, což by vedlo na nereálné deformace palivového proutku. Jinak řečeno zbylá část palivového proutku zamezuje pootočení uvažované výseče. Použití vetknutí je tedy odůvodněné. Tato argumentace však neplatí pro vrchní část palivového proutku, kde takováto restrikce není.

Na obrázku 8.1 se nachází schéma výseče palivového proutku. Veličina  $q$  reprezentuje spojité zatížení, které vzniká prouděním chladiva. Písmenkem  $l$  je označena délka výseče. Červené veličiny reprezentují reakční síly a reakční momenty. Šipky s písmenky reprezentují osu  $z$  a osu  $x$ . V pravé části je vyobrazen řez pokrytí, kde  $d$  reprezentuje vnitřní průměr pokrytí a  $D$  reprezentuje vnější průměr pokrytí.



Obrázek 8.1: Schéma výseče palivového proutku

Veličina  $q$  je konstantní po celé délce  $q = q_0 = \text{konst.}$  a reprezentuje sílu vyvolanou příčným prouděním chladiva. Jedná se o zjednodušení výpočtu a pro zjištění přesnější závislosti by bylo potřeba provést simulaci. Pro zjednodušení výpočtu se uvažuje, že veškeré napětí přenáší pouze pokrytí palivového proutku a palivové tablety nijak nebrání průhybu. Pro přesnější analýzu by bylo potřeba zohlednit tření mezi palivovými tabletami a pokrytím, zda dochází k PCI a případně jak pokročilý PCI je. Takovéto výpočty jsou však příliš komplikované pro analytické řešení a proto nejsou uvažovány.

## 8.2 Výpočet

Teorie použitá pro výpočet platí pouze při malém průhybu nosníku. Průhyb nosníku je dán následující diferenciální rovnicí:

$$\frac{d^2w(z)}{dz^2} = -\frac{M(z)}{EJ_x(z)} \quad (8.1)$$

$w$  je průhybová čára, která reprezentuje průhyb nosníku. Aby bylo možné vyřešit tuto diferenciální rovnici je potřeba určit funkci  $M(z)$ .  $E$  je modul pružnosti a  $J_x(z)$  lze určit z geometrie řezu palivového proutku.

Díky zanedbání vlivu palivových tablet je možné určit kvadratický moment průřezu. (viz kapitola 8.1)

$$J_x(z) = J_x = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4)$$

Vnější ani vnitřní průměr palivového proutku se po délce nemění, proto se neuvažuje, že by se jednalo o funkci  $z$ .

Nejdříve je potřeba nosník uvolnit<sup>1</sup>, tak jako tomu je na obrázku 8.1. Díky tomu je možné napsat následující rovnici:

$$q_0 l - R_a - R_b = 0 \quad (8.2)$$

Protože úloha je symetrická podle osy naznačené na obrázku 8.1 reakční síly si musí být rovny, tj.  $R_a = R_b$ . Z toho vyplývá:

$$R_a = R_b = \frac{1}{2} q_0 l \quad (8.3)$$

Opět je možné využít symetrie úlohy a úlohu rozdělit na polovinu podle naznačené osy. Bez újmy na obecnosti je možné si vybrat bod A a sestavit následující rovnici pro moment:

$$M_a - \left(\frac{1}{2} q_0 l\right) \left(\frac{l}{4}\right) = 0 \quad (8.4)$$

$\left(\frac{1}{2} q_0 l\right)$  reprezentuje sílu, která působí na spodní část rozpůleného nosníku a  $\left(\frac{l}{4}\right)$  reprezentuje rameno této síly. Z toho vyplývá:

$$M_a = M_b = \frac{1}{8} q_0 l \quad (8.5)$$

Jelikož jsou určeny všechny důležité veličiny je možné použít 1. a 2. Schwedlerovu větu pro určení  $M(z)$ . 1. Schwedlerova věta:

$$q(z) = -\frac{dT(z)}{dz} \quad (8.6)$$

$q(z)$  je funkce, která vyjadřuje silové působení a spojité zatížení. V tomto konkrétním případě je  $q(z) = q_0$ . Nyní je možné vyřešit rovnici 8.6 pomocí integrace:

$$T(z) = -q_0 z + c_1 \quad (8.7)$$

<sup>1</sup>Uvolnit nosník znamená rozepsat všechny reakční síly a reakční momenty.

Konstantu  $c_1$  je možné určit z podmínky  $T(0) = R_a = \frac{1}{2}q_0l$ . Z toho vyplývá:

$$T(z) = -q_0z + \frac{1}{2}q_0l \quad (8.8)$$

2. Schwedlerova věta:

$$M(z) = \frac{dT(z)}{dz} \quad (8.9)$$

Integrací se získá následující rovnice:

$$M(z) = -\frac{1}{2}q_0z^2 + \frac{1}{2}q_0lz + c_2 \quad (8.10)$$

Konstantu  $c_2$  je možné určit z podmínky  $M(0) = M_a = \frac{1}{8}q_0l$ . Díky tomu je možné určit funkci  $M(z)$  jako:

$$M(z) = -\frac{1}{2}q_0z^2 + \frac{1}{2}q_0lz + \frac{1}{8}q_0l \quad (8.11)$$

Díky tomuto výpočtu je možné začít řešit průhyb nosníku. Platí:

$$\frac{d^2w(z)}{dz^2} = \frac{d\varphi}{dz} = -\frac{M(z)}{EJ_x(z)} \quad (8.12)$$

Veličina  $\varphi$  vyjadřuje úhel natočení. Veličina  $J_x$  je konstantní a integrací se získá rovnice:

$$\varphi(z) = \frac{1}{EJ_x} \left( \frac{1}{6}q_0z^3 - \frac{1}{4}q_0lz^2 - \frac{1}{8}q_0l^2z \right) + c_3 \quad (8.13)$$

$\varphi(0)$  je rovno 0, protože úhel natočení je ve vetknutí nulový. (viz kapitola 8.1) Konstanta  $c_3$  je teda také rovna 0 a z toho vyplývá:

$$\varphi(z) = \frac{1}{EJ_x} \left( \frac{1}{6}q_0z^3 - \frac{1}{4}q_0lz^2 - \frac{1}{8}q_0l^2z \right) \quad (8.14)$$

Opětovnou integrací se získá rovnice:

$$w(z) = \frac{1}{EJ_x} \left( \frac{1}{12}q_0z^4 - \frac{1}{24}q_0lz^3 - \frac{1}{16}q_0l^2z^2 \right) + c_4 \quad (8.15)$$

Platí  $w(0) = 0$ , protože posunutí ve vetknutí je nulové a tedy  $c_4 = 0$ . (viz kapitola 8.1)

Díky symetrii úlohy k největšímu průhybu výseče dojde uprostřed. Je možné tedy dosadit  $z = \left(\frac{1}{2}\right)$  do funkce  $w(z)$  a tím získat následující vztah pro maximální průhyb:

$$w_{max} \left( \frac{1}{2} \right) = \frac{q_0l^4}{384EJ_x} \quad (8.16)$$

### 8.3 Princip analýzy

Limitací pro průhyb palivového proutku je dotyk se sousedícím palivovým proutkem. Takový to dotyk je nebezpečný z pohledu termohydrauliky nebo kvůli možnému prodření pokrytí. Maximální možná výchylka palivového proutku však není rovna rozteči mezi dvěma palivovými proutky, jelikož může dojít k tom, že dva sousední palivové proutky se budou prohýbat směrem k sobě. Rozteč mezi palivovými proutky je tedy potřeba rozdělit

na polovinu. V případě, že by se dva soudní proutky prohnuly jen na polovinu rozteče, ani takovýto limit by však nezabránil dotyku, protože proutky mají nenulový průměr. Aby se tedy zabránilo doteku, rozteč je potřeba rozdělit na polovinu a zmenšit o poloměr palivového proutku. Touto úvahou lze získat maximální povolený průhyb  $w_{max}$ .

Protože je možné výše zmíněnou analýzou stanovit  $w_{max}$ , lze určit maximální dovolené  $q_0$ , které na palivový proutek může působit. Veličina  $q_0$  tedy bude sloužit jako parametr, podle kterého bude možné určit vliv ostatních mechanismů a parametrů palivových proutků na maximální dovolené  $q_0$ . Díky tomuto parametru bude možné ohodnotit důležitost těchto mechanismů a parametrů.

## 8.4 Idealizace palivového souboru

Pro výpočet budou použité palivové proutky z různých palivových souborů. Konkrétně je jedná o korejské palivo PLUS7 a palivo pro americký reaktor AP1000. Tyto dva palivové soubory byly vybrány kvůli podobným délkovým rozměrům, podobné šířce palivového souboru, z čehož vyplývá podobná rozteč palivových proutků a rozdílné geometrii pokrytí. Veškeré důležité informace o geometrii těchto dvou souborů jsou shrnuty v tabulce 8.1.

**Tabulka 8.1:** Geometrie palivových souborů, [25], [52], [37]

	PLUS7	AP1000
Upořádání souboru	16x16	17x17
Šířka souboru (mm)	207	217
Vnější průměr proutku (mm)	8,197	9,499
Tloušťka pokrytí (mm)	0,572	0,572
Délka proutku (mm)	4094	4267
Počet distančních mřížek (1)	10	8+4
Rozteč palivových proutků (mm)	12,9375	12,598
Materiál	ZIRLO	ZIRLO

Rozteč palivový proutků byla stanovena výpočtem, protože výrobce tuto informaci neuvádí. Podílem šířky palivového souboru počtem palivových proutků je možné stanovit rozměry jedné buňky distanční mřížky. Z toho lze stanovit rozteč mezi palivovými proutky. Palivový soubor je zpravidla o několik milimetrů širší než součet skutečných rozměrů buňek distanční mřížky, takovéto zanedbání však nebude hrát velkou roli. Dále hodnoty pro AP1000 musely být převedeny z palců do centimetrů, čímž mohlo dojít k nepřesnostem. Palivové proutky jsou v obou případech vyrobeny ze slitiny ZIRLO<sup>TM</sup>. Avšak její modul pružnosti není k dispozici, proto bude použitý pro výpočty modul pružnosti slitiny E110 při teplotě 309,5 °C. Teplota 309,5 °C je průměrná teplota chladiwa mezi vtokem a výtokem z PWR. (viz tabulky 1.7 a 3.1) AP1000 má 8 distančních mřížek a 4 mísí mřížky, oba druhy mřížek zabraňují průhybu palivových proutků, avšak výrobce neposkytuje žádné informace o umístění mísících mřížek, a proto nebudou uvažovány. Bude uvažováno následující rozložení distančních mřížek, palivové proutky jsou ukotveny v patici

palivového souboru a distanční mřížky jsou rozmístěny v ekvidistantních vzdálenostech samy od sebe a od patice s tím, že poslední distanční mřížka se nachází na horním konci palivového souboru. Zároveň bude předpokládáno, že distanční mřížka má nulový výškový rozměr. Tento předpoklad nebude představovat omezení, protože distanční mřížka nebrání průhybu palivových proutků. (viz kapitola 8.1) Díky těmto předpokladům lze určit rozteč mezi distančními mřížkami.

**Tabulka 8.2:** Rozteče distančních mřížek

	PLUS7	AP1000
Rozteč (mm)	409,4	533,375

## 8.5 Vyhodnocení vlivu parametrů paliva na průhyb

V následujících kapitolách budou vyhodnoceny vlivy parametrů palivových proutků na průhyb palivových proutků pod vlivem příčného spojitého zatížení.

### 8.5.1 Porovnání palivových souborů

V následující kapitole budou vyhodnoceny parametry paliva na průhyb. Nejdříve je vhodné určit, který palivový soubor lépe odolává spojitému zatížení. Nejdříve pro AP1000:

$$q_0^{AP1000} = 88,07 \text{ N/m}$$

Pro PLUS7:

$$q_0^{PLUS7} = 241,71 \text{ N/m}$$

Dle navržené analýzy lze usoudit, že palivové proutky souboru PLUS7 odolávají lépe příčné síle než soubor AP1000.  $J_x$  je menší pro PLUS7 kvůli menšímu vnějšímu průměru, což přispívá k většímu průhybu. Avšak délka výseče souboru AP1000 je větší, což výrazně přispívá k průhybu. Tato skutečnost je zvýrazněná faktem, že délka výseče palivového proutku vystupuje ve vypočteném vztahu v čtvrté mocnině. (viz rovnice 8.16)

### 8.5.2 Vliv rozteče distančních mřížek

Nyní bude provedena analýza rozteče distančních mřížek. Jak už bylo zmíněno jedná se o velmi důležitý parametr pro průhyb. Budou se předpokládat dvě různé analýzy. V první analýze bude přidána jedna distanční mřížka pro zlepšení mechanických vlastností palivového souboru AP1000 a v druhé analýze budou přidány dvě distanční mřížky. Bude tomu tak učiněno za splnění výše zmíněných předpokladů. (viz kapitola 8.4) Přidávání distančních mřížek pro zlepšení mechanických vlastností je běžné. Takovýmto způsobem byly vylepšeny mechanické vlastnosti palivového souboru TVSA-T mod. 2. (viz kapitola 2.1) V následující tabulce jsou shrnuty nové rozteče distančních mřížek a maximální dovolené zatížení.

**Tabulka 8.3:** Vliv rozteče na průhyb

	8 distančních mřížek	9 distančních mřížek	10 distančních mřížek
Rozteč (mm)	533,375	474,111	426,7
$q_0$ (N/m)	88,07	140,67	214,40
Nárůst (1)	1	1,597	2,434

Nárůst v tabulce 8.3 vyjadřuje násobek o kolik se zvýšilo maximální povolené spojitě zatížení přidáním distančních mřížek. Je vidět, že i přidáním jedné distanční mřížky, tj. zmenšením rozteče mezi mřížkami, lze výrazně ovlivnit průhyb palivového proutku. Zvýšení počtu distančních mřížek je vhodné z pohledu průhybu palivových proutků, avšak distanční mřížky zvyšují tlakové ztráty a stíní neutrony, pokud jsou vyrobeny z nevhodného materiálu.

### 8.5.3 Vliv vnějšího průměru

Vnější i vnitřní průměr pokrytí výrazně ovlivňuje kvadratický moment průřezu. Následující analýza se zaměří na určení tohoto vlivu. Výpočet bude prováděn na palivovém souboru AP1000 a vnější průměr bude proměnný parametr.

**Tabulka 8.4:** Vliv vnějšího průměru, [52], [37]

D (mm)	10	9,4996	9	8,197
$q_0$ (N/m)	103,75	88,07	74,18	54,99
$q_0^M$ (N/m)	86,99	88,07	86,14	78,11

Z tabulky 8.4 je vidět, že zvětšování vnějšího průměru jednoznačně vede na zvětšení maximálního dovoleného zatížení  $q_0$ . Je však potřeba mít na paměti, že s rostoucím vnějším průměrem, klesá prostor, do kterého se může proutek prohýbat a naopak s klesajícím vnějším průměrem se zvětšuje prostor, do kterého se proutek může prohýbat. (viz kapitola 8.3) Veličina  $q_0^M$  byla modifikována tak, aby zohledňovala i tuto skutečnost. Užší palivové proutky, které dříve nevykazovaly dobrou odolnost vůči spojitěmu namáhání, se mohou více prohýbat díky prostoru, který byl uvolněn zmenšením vnějšího průměru. Z tohoto plyne zajímavý poznatek, že maximalizace vnějšího průměru z pohledu průhybu palivového proutku není žádoucí.

## 8.6 Vyhodnocení vlivu namáhání na průhyb

V následujících kapitolách budou vyhodnoceny vlivy namáhání palivových proutků proutků na průhyb palivových proutku pod vlivem příčného spojitěho zatížení.

### 8.6.1 Vliv creepu

Na začátku kampaně dochází v uzavírání mezery mezi pokrytím a palivovými tabletami vlivem působení vysokého vnějšího tlaku a creepu pokrytí. (viz kapitoly 5.2 a 7.1)

V následující analýze bude uvažováno, že dojde k uzavření mezery bez vlivu na tloušťku pokrytí a předtím, než se začne projevovat napučání paliva a nebude uvažována teplotní roztažnost palivových tablet. Dále nebude uvažován creep v axiálním směru, který by mohl ovlivnit vnější průměr pokrytí. (viz kapitola 4.4) Jedná se o mezní případ a je nepravděpodobné, že něco tato ve skutečnosti nastane. Avšak tato situace poslouží jako ilustrace pro analýzu creepu pokrytí. Mezera mezi pokrytím a palivovými tabletami pro čerstvé palivo palivového souboru AP1000 je 0,08255 mm. Bude se předpokládat, že vnitřní povrch pokrytí dolehne na palivové tablety, tj. vnitřní průměr pokrytí je roven průměru tablety  $d_2 = 8,76$  mm. Dále se bude předpokládat, že plocha pokrytí v řezu bude konstantní, tj. platí:

$$\frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) = \frac{\pi}{4} (D_2^2 - d_2^2) \quad (8.17)$$

Veličiny bez indexu reprezentují původní rozměry pokrytí. Veličiny s indexem 2 reprezentují zdeformované pokrytí. Díky této rovnici je možné určit  $D_2 = 9,34$  mm, protože  $d_2$  už bylo určeno pomocí předpokladů.

**Tabulka 8.5:** Vliv creepu

	Čerstvé palivo	Zdeformované pokrytí	Zdeformované pokrytí - modifikace
$q_0$ (N/m)	88,07	46,28	48,65

V tabulce 8.5 je uveden výsledek analýzy creepu pokrytí. Je vidět, že creep obecně snižuje velikost spojitého zatížení, kterému je proutek schopen odolávat. Sloupeček "Zdeformované pokrytí" v tabulce 8.5 ukazuje jaký má vliv samotný creep na velikost maximálního spojitého zatížení. Vedlejší sloupeček zohledňuje i vliv na maximální možnou výchylku. (viz kapitola 8.5.3)

## 8.6.2 Vliv oxidace

Z obrázku 1.5 zle jednoduše vyčíst, že tloušťka oxidační vrstvy nepřesahuje ani u jedné slitiny 70  $\mu\text{m}$ . Pro tuto analýzu bude uvažována tloušťka 100, 50, 20 a 10  $\mu\text{m}$ . dále bude uvažováno, že zoxidovaný materiál není schopen přenášet jakékoliv zatížení.

**Tabulka 8.6:** Vliv oxidace

	Tloušťka 0 $\mu\text{m}$	Tloušťka 10 $\mu\text{m}$	Tloušťka 20 $\mu\text{m}$	Tloušťka 50 $\mu\text{m}$	Tloušťka 100 $\mu\text{m}$
$q_0$ (N/m)	88,07	86,29	84,45	79,03	70,22

Dle tabulky 8.6 pokročilá oxidace pokrytí může mít signifikantní vliv na maximální dovolené spojitě zatížení. V dnešní době však slitiny jako Optimized ZIRLO<sup>TM</sup> vykazují velmi dobrou odolnost vůči oxidaci při teplotách kolem 300 °C. (viz obrázek 1.5) Z pohledu této analýzy oxidace pokrytí nemá velký vliv na průhyb pokrytí. Toto tvrzení nemusí být pravdivé při havarijních stavech, kdy dojde k nárůstu teploty.

## 8.7 Limity navržené analýzy

Navržená analýza má několik limitů. Výpočet neumožňuje analýzu sil působících v axiálním směru. (viz kapitola 5.9) Pro zohlednění takovýchto sil by bylo potřeba vypracovat nový model a provést nový výpočet, kvůli změně silového působení. Obdobná úprava modelu by byla nutná, pokud by bylo potřeba zohlednit silové působení vyvolané deformací kostry palivového souboru. (viz kapitola 7.4) Není tedy možné zohlednit vliv radiačního růstu nebo teplotní roztažnosti. Model palivového proutku umožňuje zohlednit průběh PCI z pohledu změny vnějšího a vnitřního průměru pokrytí, avšak neumožňuje analyzovat tření, které vzniká ve vnitřní části palivového proutku. Model vůbec neumožňuje zohlednění teplotního pole a jeho vlivu na průhyb palivového proutku.

## 8.8 Ocenění váhy parametrů palivových proutků na průhyb

Rozteč mezi distančními mřížkami má zásadní vliv na průhyb palivového proutku. Důležitost tohoto parametru plyne z faktu, že v navrženém výpočtu vystupuje ve čtvrté mocnině. (viz kapitola 8.2) Zmenšování této rozteče mezi distančními mřížkami lze výrazně zlepšit odolnost palivových proutků proti průhybu a jedná se tedy o nejdůležitější parametr. (viz kapitola 8.5.2) Dalším parametrem, který ovlivňuje průhyb palivového proutku je vnější průměr. Jak bylo ukázáno výpočtem, pro konkrétní konfiguraci palivového souboru, lze určit optimální vnější průměr palivového proutku. Při návrhu by mělo být zajištěno, že tohoto ideálního průměru bude dosaženo, jinak to může výrazně snížit schopnost pokrytí odolávat průhybu. (viz kapitola 8.5.3) Nejmenší vliv na průhyb má modul pružnosti, protože na rozdíl od předchozích parametrů vystupuje pouze v první mocnině. Zároveň se jedná o materiálovou konstantu, kterou je náročné ovlivnit. Z pohledu analýzy je tedy efektivnější optimalizovat vnější průměr palivového proutku nebo snížit rozteč distančních mřížek, než zvyšovat tento modul.

## 8.9 Ocenění váhy namáhání palivových proutků

Zvolená metoda dovolila vyhodnotit pouze dva mechanismy a to PCI a oxidaci. Pokročilá oxidace pokrytí může mít velmi negativní dopad na průhyb palivového proutku. Avšak zirkoniové slitiny používané v dnešní době velmi dobře odolávají oxidaci, a proto oxidace nepředstavuje významný problém. Je, ale potřeba mít na paměti ostatní negativní mechanismy, které doprovází oxidaci. (viz kapitoly 8.6.2 a 5.4) Výpočet ukázal, že uvažovaný creep má významný vliv na maximální dovolené spojité zatížení. Na základě této analýzy lze říct, že creep má velký vliv na průhyb palivového proutku. Avšak je nepravděpodobné, že k takovéto situaci při provozu jaderného reaktoru dojde. Lze očekávat, že skutečný vliv creepu pokrytí nebude tak závažný. (viz kapitoly 8.6.1 a 5.5)



# Závěr

Palivové proutky v tlakovodních jaderných elektrárnách jsou kvůli svému dlouhému a úzkému tvaru náchylné na deformace. Těmto deformacím do značné míry brání distanční mřížky, které jsou součástí kostry palivového souboru, jehož jsou palivové proutky součástí.

Jedním zdrojem namáhání palivových proutků je vyhořívání paliva. Vlivem štěpení  $^{235}\text{U}$  a  $^{239}\text{Pu}$  dochází k produkci 2 ÷ 3 štěpných produktů na jedno štěpení. Vzhledem k rostoucímu počtu atomů dochází k objemovému růstu krystalové mřížky. Vlivem toho mechanismu dochází napuchání palivových tablet, což způsobuje deformace palivového proutku. Druhým zdrojem deformací palivových proutků je interakce pokrytí s okolím. Na rozdíl od mechanismů spojených s palivovými tabletami, mechanismů spojených s pokrytím je víc a jsou komplikovanější. Tyto mechanismy jsou vyvolané podmínkami v reaktoru, například creep nebo oxidace, neutronovým tokem, například radiační růst zirkoniových slitin nebo vnějšími silami, například příčný tok. Potenciálním zdrojem deformací palivových proutků jsou i deformace kostry palivového souboru, které se mohou přenášet skrz distanční mřížky. Díky rozsahu rešerše bylo možné učit jak mechanismy vplývají na palivové proutky. Bylo zjištěno, že popsané mechanismy ovlivňují zejména vnější a vnitřní průměr pokrytí, délku palivového proutku a modul elasticity. Tato zjištění byla později použita, pro analýzu vlivu mechanismů na průhyb palivového proutku.

Deformace palivových proutků mohou vést přímo na průhyb palivového proutku nebo můžou podporovat jeho rozvoj. Průhyb palivového proutku má negativní dopad na provoz jaderného reaktoru. Průhyb způsobuje změny v průtoku chladiva kanály palivového souboru a moderaci neutronů. S tím souvisí generace tepla a vyhořívání paliva.

Jako důkaz vlivu jednotlivých mechanismů na průhyb palivového proutku by proveden jednoduchý analytický výpočet na výseči mezi dvěma distančními mřížkami. Pro analýzu mechanismů a parametrů palivových proutků na průhyb byl zvolen model nosníku s vetknutím na obou stranách a se spojitým zatížením. Palivový proutek byl simulován pomocí duté tyče, přičemž byly zanedbány palivové tablety uvnitř proutku a tření mezi pokrytím a palivovými tabletami. Spojité zatížení simulovalo příčnou sílu, které vzniká při průtoku chladiva palivovým souborem. Pro analýzu byly vybrány palivové proutky z korejského palivového souboru PLUS7 a z palivového souboru určeného pro americký reaktor AP1000. Na základě geometrie palivového souboru byl stanoven maximální možný průhyb palivového proutku a z toho bylo určeno maximální spojitě zatížení. Na základě maximálního spojitě zatížení je tedy možné určit, které palivové proutky lépe odolávají průhybu. Tato metoda byla použita i pro analýzu parametrů palivových proutků a mechanismů, které způsobují deformace. Na základě této analýzy bylo určeno, že délka je parametr, který nejvíce ovlivňuje průhyb. Zajímavým poznatkem bylo, že pro danou geometrii palivového souboru existuje ideální vnější průměr palivového proutku. Nejméně důležitým se ukázal modul pružnosti. Kvůli limitům zvolené metody bylo možné analyzovat pouze creep pokrytí a oxidaci. Dle navržené analýzy oxidace neměla významný vliv na průhyb za normálních podmínek. Creep měl dle navržené analýzy významný vliv

na průhyb palivového proutku.

# Bibliografie

- [1] Adamson, R., Griffiths, M. a Patterson, C. *Irradiation Growth of Zirconium Alloys*. 2017. URL: [https://www.antinternational.com/docs/samples/FM/04/ZIRAT22-IZNA17\\_Irradiation\\_Growth\\_of\\_Zirconium\\_Alloys\\_Sample.pdf](https://www.antinternational.com/docs/samples/FM/04/ZIRAT22-IZNA17_Irradiation_Growth_of_Zirconium_Alloys_Sample.pdf) (cit. 29.03.2022).
- [2] Association, World Nuclear. *Nuclear Fuel and its Fabrication*. URL: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/fuel-fabrication.aspx> (cit. 19.02.2022).
- [3] AZO Materials. *Zircaloy-4*. URL: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=7644> (cit. 27.02.2022).
- [4] AZOM. *Zirconium - Mechanical Properties And Material Applications*. URL: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=7645> (cit. 22.02.2022).
- [5] Baron, D. et al. *Fuel Performance of Light Water Reactors (Uranium Oxide and MOX)*. Oxford: Elsevier, 2020, s. 35–71. ISBN: 978-0-08-102866-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11707-2>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128035818117072>.
- [6] Berger, J. *Impact of fuel assembly bowing on the power density distribution and its monitoring in Siemens/KWU-PWR*. Diplomová práce. Hannover, 2017. URL: <http://www.diva-portal.se/smash/get/diva2:1141503/FULLTEXT01.pdf> (cit. 10.05.2022).
- [7] Bieder, U., Genrault, C. a Ledac, P. *Hydraulic forces acting on full cross section fuel assemblies with 17×17 fuel rods*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103515>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0149197020302638> (cit. 23.06.2022).
- [8] Blair, P. *Modelling of fission gas behaviour in high burnup nuclear fuel*. 2008. DOI: 10.5075/epfl-thesis-4084.
- [9] Bozzola, S. *Fundamentals of boiling water reactor (BWR)*. Italy. URL: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/15/025/15025513.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/15/025/15025513.pdf) (cit. 20.02.2022).
- [10] Brutzel, L. V., Dingreville, R. a Barte, T.J. *Nuclear fuel deformation phenomena*. 2015. URL: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/47/032/47032408.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/47/032/47032408.pdf) (cit. 19.04.2022).
- [11] Buongiorno, J. *BWR Description*. URL: [https://ocw.mit.edu/courses/nuclear-engineering/22-06-engineering-of-nuclear-systems-fall-2010/lectures-and-readings/MIT22\\_06F10\\_lec06b.pdf](https://ocw.mit.edu/courses/nuclear-engineering/22-06-engineering-of-nuclear-systems-fall-2010/lectures-and-readings/MIT22_06F10_lec06b.pdf) (cit. 17.02.2022).
- [12] Buongiorno, J. *PWR Description*. 2010. URL: [https://ocw.mit.edu/courses/nuclear-engineering/22-06-engineering-of-nuclear-systems-fall-2010/lectures-and-readings/MIT22\\_06F10\\_lec06a.pdf](https://ocw.mit.edu/courses/nuclear-engineering/22-06-engineering-of-nuclear-systems-fall-2010/lectures-and-readings/MIT22_06F10_lec06a.pdf) (cit. 25.02.2022).

- [13] Cazado, M. E. a Denis, A. C. *Model of nuclear fuel pellets densification under irradiation and isothermal conditions: Application to UO<sub>2</sub> fuels*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.08.029>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311518307700> (cit. 15.04.2022).
- [14] ČEZ, A.S. *Předprovozní bezpečnostní zpráva 1,2*. Temelín, 2011.
- [15] Fink, J.K. a Leibowitz, L. *Thermal conductivity of zirconium*. 1995. DOI: 10.1016/0022-3115(95)00110-7. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0022311595001107>.
- [16] Franzén, A. *Evaluation of Fuel Assembly Bow Penalty Peaking Factors for Ringhals 3. Based on a Cycle Specific Core Water Gap Distribution*. 2017. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1166550/FULLTEXT01.pdf> (cit. 06.06.2022).
- [17] Halabuk, D. a Martinec, J. *Calculation of stress and deformation in fuel rod cladding during pellet-cladding interaction*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.14311/AP.2015.55.0384>. URL: <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/index> (cit. 19.04.2022).
- [18] Hammad, A. M., El-Mashri, S. M. a Nasr, M. A. *Mechanical properties of the Zr-1% Nb alloy at elevated temperatures*. 1992. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(92\)90331-E](https://doi.org/10.1016/0022-3115(92)90331-E). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/002231159290331E> (cit. 23.02.2022).
- [19] Harada, Y. *UO<sub>2</sub> sintering in controlled oxygen atmospheres of three-stage process*. 19. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(96\)00755-6](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(96)00755-6). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311596007556> (cit. 30.05.2022).
- [20] Hu, J. *High resolution characterisation of corrosion and hydrogen pickup of Zr-Nb cladding alloys*. University of Oxford, 2016. URL: <https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:a986c6e5-bba4-48c2-8e30-7f77ebe5313e> (cit. 31.03.2022).
- [21] IAEA. *Corrosion of zirconium alloys in nuclear power plants*. Vienna, 1993. URL: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te\\_684\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_684_web.pdf) (cit. 17.04.2022).
- [22] Jeon, S. Y. et al. *An Investigation on the Bow Characteristics of the PWR Fuel Assembly*. Gyeongju, 2011. URL: [https://www.kns.org/files/pre\\_paper/5/161%5C%EC%5C%A0%5C%84%5C%EC%5C%83%5C%81%5C%EC%5C%9C%5C%A4.pdf](https://www.kns.org/files/pre_paper/5/161%5C%EC%5C%A0%5C%84%5C%EC%5C%83%5C%81%5C%EC%5C%9C%5C%A4.pdf) (cit. 10.05.2022).
- [23] Jones, J. *The effect of inter-fuel-assembly gap closure on pwr fuel thermohydraulics*. 2021. URL: [https://www.researchgate.net/publication/354103003\\_THE\\_EFFECT\\_OF\\_INTER-FUEL-ASSEMBLY\\_GAP\\_CLOSURE\\_ON\\_PWR\\_FUEL\\_THERMOHYDRAULICS](https://www.researchgate.net/publication/354103003_THE_EFFECT_OF_INTER-FUEL-ASSEMBLY_GAP_CLOSURE_ON_PWR_FUEL_THERMOHYDRAULICS).

- [24] K.Kim, Jang, Y. a Kim, J. *In-Reactor Performance of an Advanced PWR Fuel, PLUS7, for OPR1000s in Korea*. 2008. DOI: doi:10.1080/18811248.2008.9711485. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/18811248.2008.9711485> (cit. 03.06.2022).
- [25] KEPCO NF. *PLUS7*. URL: <https://www.knfc.co.kr/board?menuId=MENU00638%5C&siteId=null> (cit. 08.07.2022).
- [26] Kim, K. *Applicability of out-of-pile fretting wear tests to in-reactor fretting wear-induced failure time prediction*. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2012.10.018>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311512005533>.
- [27] Kon'kov, V. et al. *Assessment of E110 and E635 alloy Corrosion Behavior in VVER – 1200 Reactors*. URL: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/41/081/41081166.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/081/41081166.pdf) (cit. 21.02.2022).
- [28] Kopec, M. a Malá, M. *Fuel Assembly Deformation Measurements*. 2017. URL: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/50/006/50006707.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/50/006/50006707.pdf) (cit. 28.05.2022).
- [29] Kopec, M., Malá, M. a Klouzal, J. *Ultrasonic system for nuclear fuel geometrical changes evaluation*. Řež, Česká Republika. URL: <https://www.euronuclear.org/archiv/topfuel2018/fullpapers/TopFuel2018-A0092-fullpaper.pdf> (cit. 28.05.2022).
- [30] L. Cogez, W. Li a Woo, O. T. *Mechanical properties of Zircaloy-2 neutron irradiated to high fluence*. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.12943/CNR.2017.00011>. URL: <https://pubs.cnl.ca/doi/pdf/10.12943/CNR.2017.00011> (cit. 02.03.2022).
- [31] Lazarevic, S. et al. *Investigating grid-to-rod fretting wear of nuclear fuel claddings using a unique autoclave fretting rig*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.06.011>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164818304368> (cit. 23.06.2022).
- [32] Lenntech. *Zirconium - Zr*. URL: [https://www.lenntech.com/periodic/elements/zr.htm%5C#Zirconium\\_](https://www.lenntech.com/periodic/elements/zr.htm%5C#Zirconium_) (cit. 22.02.2022).
- [33] Li, J. et al. *Towards Analysis of the Bowing Effect on Burnt Nuclear Fuel Compositions Using SERPENT*. 2016. URL: [https://tendl.web.psi.ch/bib\\_rochman/2016ANS\\_JIAZHI%5C%20LI.pdf](https://tendl.web.psi.ch/bib_rochman/2016ANS_JIAZHI%5C%20LI.pdf) (cit. 05.06.2022).
- [34] MacDonald, E., P. a Thompson, L. B. *MATPRO: a handbook of materials properties for use in the analysis of light water reactor fuel rod behavior*. 1976. DOI: 10.2172/7284547. (Cit. 04.04.2022).
- [35] Molchanov, V. L., Ugryumov, A. V. a Samoilov, O. B. *TVSA-T fuel assembly for "Temelin" NPP*. Praha. URL: <https://www.slideshare.net/myatom/tvsat-fuel-assembly-for-temelin-npp-main-results-of-design-and-safety-analyses-trends-of-development> (cit. 17.02.2022).

- [36] Motta, A. T., Couet, A. a Comstock, R. J. *Corrosion of Zirconium Alloys Used for Nuclear Fuel Cladding*. 2015. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070214-020951.
- [37] Nuclear Engineering International. *Fuel review: Design data*. 2011. URL: <https://baixardoc.com/preview/neisept04p26-35-5ce1bccadd97a> (cit. 08.07.2022).
- [38] Nuclear Power. *Fuel Cladding - Cladding Tube | Definition*. URL: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-power-plant/nuclear-fuel/fuel-assembly/fuel-cladding-cladding-tube/> (cit. 22.11.2021).
- [39] Nuclear Power. *Fuel Pellets | Definition & Characteristics*. URL: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-power-plant/nuclear-fuel/fuel-assembly/fuel-pellets/> (cit. 22.11.2021).
- [40] Oneindustry. *Spékání, slinování*. URL: <https://www.oneindustry.cz/lexikon/spekani-slinovani/> (cit. 30.05.2022).
- [41] Rao, S. S. *The Finite Element Method in Engineering*. Šesté vydání. United States: ELSEVIER, 2018. ISBN: 978-0-12-811768-2. URL: [https://books.google.cz/books?hl=cs%5C&lr=%5C&id=XNOKDwAAQBAJ%5C&oi=fnd%5C&pg=PP1%5C&dq=finite+element+method+engineering%5C&ots=SAjIHxfqIH%5C&sig=Ht0iKsqx3WcNMf6NpsRY9HYE0vQ%5C&redir\\_esc=y%5C#v=onepage%5C&q%5C&f=false](https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=%5C&id=XNOKDwAAQBAJ%5C&oi=fnd%5C&pg=PP1%5C&dq=finite+element+method+engineering%5C&ots=SAjIHxfqIH%5C&sig=Ht0iKsqx3WcNMf6NpsRY9HYE0vQ%5C&redir_esc=y%5C#v=onepage%5C&q%5C&f=false) (cit. 12.06.2022).
- [42] Roberts, Adrian. *Structural materials in nuclear power systems*. 1. vydání. 233 Spring Street, New York, N.Y. 10013: Plenum Press, New York, 1981. ISBN: 0-306-40669.
- [43] Saadati, H., Hadad, K. a Rabiee, A. *Safety margin and fuel cycle period enhancements of VVER-1000 nuclear reactor using water/silver nanofluid*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2018.01.015>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1738573317306046>.
- [44] Shestopalov, A., Lioutov, K. a Yegorova, L. *Adaptation of USNRC's FRAPTRAN and IRSN's SCANAIR Transient Codes and Updating of MATPRO Package for Modeling of LOCA and RIA Validation Cases with Zr-1%Nb (VVER type) Cladding*. U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2003. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML0313/ML031340376.pdf> (cit. 23.02.2022).
- [45] Schettino, C. F. M. *Evaluation of spacer grid spring characteristics by means of physical tests and numerical simulation*. 2017. URL: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/48/094/48094778.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/48/094/48094778.pdf) (cit. 22.04.2022).
- [46] Schettino, C.F.M., Gouvêa, J.P. a Medeiros, N. *Analyses of spacer grids compression strength and fuel assemblies structural behavior*. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.03.008>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549313001507>.

- [47] Ševeček, M. *Mezní charakteristiky nových povlakových materiálů jaderného paliva typu ATF (Accident Tolerant Fuel)*. 2016. URL: <https://people.fjfi.cvut.cz/sevecmar/downloads/proposal.pdf> (cit. 28.02.2022).
- [48] Štamberg, K, Silber, R. a Drtinová, B. *Chemie provozu jaderných elektráren*. Prezentace. Praha.
- [49] Talia, J. E. a Povolo, F. *Tensile properties of Zircaloy-4*. Buenos Aires, Argentina, 1976. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(77\)90174-X](https://doi.org/10.1016/0022-3115(77)90174-X).
- [50] Teodoro, C. A. et al. *Comparison of the mechanical properties and corrosion resistance of zirlo and other zirconium alloys*. 2007. URL: [https://www.ipen.br/biblioteca/cd/inac/2007/pdf\\_dvd/R07\\_1570.pdf](https://www.ipen.br/biblioteca/cd/inac/2007/pdf_dvd/R07_1570.pdf) (cit. 02.07.2022).
- [51] U.S. Energy Information Administration EIA. *The nuclear fuel cycle*. URL: <https://www.eia.gov/energyexplained/nuclear/the-nuclear-fuel-cycle.php> (cit. 22.11.2021).
- [52] U.S.NRC. *AP1000 Design Control Document*. 2011. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML1117/ML11171A443.pdf> (cit. 08.07.2022).
- [53] Weidinger, H. G. *Design and Performance of PWR and BWR Fue*. 2005. URL: <http://indico.ictp.it/event/a04215/session/38/contribution/23/material/0/0.pdf> (cit. 17.02.2022).
- [54] Westinghouse. *Optimized ZIRLO™*. 2016. URL: <https://www.westinghousenuclear.com/Portals/0/operating%20plant%20services/fuel/fuel%20products/NF-FE-0046%20Optimized%20ZIRLO%20HP%20Fuel%20Clad%20Mtl.pdf> (cit. 28.02.2022).
- [55] Whitmarsh, C. L. *Review of Zircaloy-2 and Zircaloy-4 properties relevant to n.s. Savannah reactor design*. United States, 1962. DOI: 10.2172/4827123.
- [56] Wikipedia. *Zirkonium*. URL: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Zirkonium>.
- [57] Winter, T. C. et al. *Fretting wear comparison of cladding materials for reactor fuel cladding application*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.05.069>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311518300795>.