

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING**

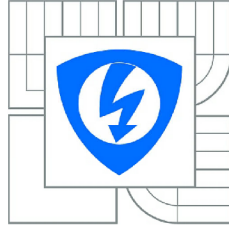
**SOUČASNÝ STAV INSPEKČÍ PALIVOVÝCH
SOUBORŮ NA JADERNÝCH ELEKTRÁRNÁCH
VE SVĚTĚ**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE
AUTHOR**

MICHAELA FENDRYCHOVÁ

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Studentka: Michaela Fendrychová

ID: 140225

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

**Současný stav inspekcí palivových souborů na jaderných elektrárnách
ve světě**

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Zpracovat detailní přehled metod inspekcí ozářených palivových souborů (PWR, BWR a VVER).
2. Porovnat metody používané ve světě s metodami používanými v ČR.
3. Provést analýzu použití nových nebo inovovaných metod inspekcí palivových souborů aplikovatelných na JE Temelín.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího a konzultantky práce

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 30.5.2014

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

Konzultanti bakalářské práce: Ing. Martina Malá, Centrum výzkumu Řež, s. r. o.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Bibliografická citace práce:

FENDRYCHOVÁ, M. Současný stav inspekci palivových souborů na jaderných elektrárnách ve světě. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 44s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Katovský, Ph.D.

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

Ráda bych na tomto místě poděkovala Ing. Martině Malé a Ing. Karlu Katovskému, Ph.D., za rady a pomoc při psaní této práce.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky**

Bakalářská práce

Současný stav inspekcí palivových souborů na jaderných elektrárnách ve světě

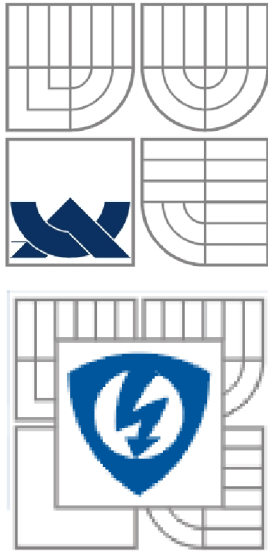
Michaela Fendrychová

vedoucí: Ing. Karel Katovský, Ph.D.

konzultant: Ing. Martina Malá

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2014

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Bachelor's Thesis

Current Status of Nuclear Fuel Assemblies Inspections at Nuclear Power Plants World-Wide

by

Michaela Fendrychová

Supervisor: Ing. Karel Katovský, Ph.D.

Co-supervisor: Ing. Martina Malá

Brno University of Technology, 2014

Brno

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá problematikou poradiačního testování paliva jaderných elektráren. Testování ozářeného paliva je oblastí, které se dostává stále větší pozornosti kvůli její důležitosti pro zajištění bezpečného provozu elektrárny. Práce se zaměřuje na nejvýznamnější mechanismy vedoucí k poruchám paliva, metody inspekce paliva využívané při testování ozářeného paliva v prostorách jaderné elektrárny. Další oblastí práce jsou metody používané pro testování ozářeného paliva na elektrárně Temelín a návrh na jejich vylepšení.

KLÍČOVÁ SLOVA: poradiační inspekce; jaderné palivo; poruchy paliva; nedestruktivní testování; vířivé proudy; hydridace;

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with post irradiation examination (PIE) of spent nuclear fuel. The document briefly introduces basic light water reactor types (BWR, PWR, VVER) and construction of nuclear fuel for these reactors. Typical fuel failure types are described as well as methods for detection of such defects or failures. Consequently inspection methods suitable for commercial nuclear power plants are described. The primary goal of this thesis was to analyze existing inspection methods and to propose improvement of existing PIE at Temelín nuclear power plant. Therefore part of this thesis is devoted to description of fuel used at Temelín power plant, inspection methods currently applied at Temelín power plant and discussion of possible improvements of PIE.

KEY WORDS: Post Irradiation Examination; nuclear fuel; fuel failure; nondestructive testing;

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM ZKRATEK.....	11
1 ÚVOD.....	12
2 TYPY REAKTORŮ.....	14
2.1 BWR.....	14
2.2 PWR.....	14
3 PALIVO PRO VODOVODNÍ REAKTORY.....	16
4 POŠKOZENÍ PALIVA.....	18
4.1 OHYB.....	18
4.2 ROZMĚROVÉ ZMĚNY.....	19
4.3 SWELLING (NAPUCHÁNÍ PELET).....	20
4.4 RŮST PALIVOVÝCH PROUTKŮ A KAZET.....	20
4.5 NETĚSNOST PALIVOVÉHO PROUTKU.....	21
4.5.1 GRID-TO-ROD FRETTING.....	21
4.5.2 DEBRIS FRETTING.....	21
4.6 OXIDACE POVRCHU PALIVOVÝCH PROUTKŮ.....	22
4.7 HYDRIDACE PALIVOVÝCH PROUTKŮ.....	22
4.8 ÚSADY.....	24
5 METODY INSPEKCE PALIVA.....	25
5.1 VIZUÁLNÍ KONTROLA A ROZMĚROVÉ MĚŘENÍ.....	26
5.2 SIPPING.....	28
5.2.1 MAST SIPPING (IN-MAST SIPPING).....	28
5.2.2 ELEVATE SIPPING.....	28
5.2.3 CANNISTER SIPPING (IN-CAN SIPPING).....	28
5.2.4 IN-CORE SIPPING.....	28
5.3 DIAGNOSTIKA NA BÁZI VÍŘIVÝCH PROUDŮ.....	28
5.3.1 TEORIE VÍŘIVÝCH PROUDŮ.....	29
5.3.2 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ INDUKOVANÉ VÍŘIVÉ PROUDY.....	30
5.3.3 KONSTRUKCE SNÍMAČE.....	33
5.3.4 ZPŮSOBY MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ.....	33
5.4 ULTRAZVUKOVÉ TESTOVÁNÍ.....	34
5.5 RADIOGRAFIE.....	35
6 METODY PIE POUŽÍVANÉ VE SVĚTĚ.....	37
6.1 INSPEKCE PALIVA NA JADERNÝCH ELEKTRÁRNÁCH VE SVĚTĚ.....	37
6.2 ŘÍZENÉ NÁRODNÍ TESTOVÁNÍ.....	37

7 PORADIAČNÍ INSPEKCE PALIVA NA JE TEMELÍN	39
7.1 PALIVO V ELEKTRÁRNĚ TEMELÍN	39
7.2 CHEMIE.....	40
7.2.1 V PRŮBĚHU KAMPANĚ- Γ A A SPEKTROSKOPIE	40
7.2.2 BĚHEM Odstávky-SIPPING.....	41
7.3 PIE ZA POUŽITÍ MSIO.....	41
7.3.1 VIZUÁLNÍ KONTROLA A ROZMĚROVÉ MĚŘENÍ.....	41
7.3.2 ULTRAZVUKOVÉ MĚŘENÍ.....	41
8 ZÁVĚR.....	44
CITOVANÁ LITERATURA.....	46

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Příčinný řetězec „Chyba – Porucha – Selhání – Havárie“ [1]	12
Obrázek 2 Jednoduché schéma BWR [3]	14
Obrázek 3 Jednoduché schéma PWR [3]	15
Obrázek 4 Konstrukce palivového proutku lehkovodního reaktoru, upraveno z [6]	17
Obrázek 5 Ohnuté palivové proutky [7]	18
Obrázek 6 Prohnutá palivová kazeta [4]	18
Obrázek 7 Radiální růst uranové tyče A-po ozáření B-před ozářením [5]	19
Obrázek 8 Základní měřená místa palivové kazety, převzato z [11] a upraveno	21
Obrázek 9 Postupný proces selhání pokrytí vlivem primární vnitřní hydridace [16]	22
Obrázek 10 Radiální hydridace v pokrytí s vysokým obsahem vodíku (600-700 ppm) [18]	23
Obrázek 11 axiální hydridace v pokrytí s nízkým obsahem vodíku [18]	24
Obrázek 12 Úsady na palivových proutcích [19]	24
Obrázek 13 Stanoviště pro PIE [21]	26
Obrázek 14 Princip zařízení měřícího ohnutí kanálů regulačních tyčí [2]	27
Obrázek 15 Generování vířivých proudů ve vzorku a zakřivení siločar vlivem defektu [20]	30
Obrázek 16 Citlivost detekce při různé poloze nespojitosti vůči siločarám vířivých proudů [20]	32
Obrázek 17 Zapojení jedné cívky pro diferenciální metodu. Převzato a upraveno z [20]	34
Obrázek 18 a) Odrazová metoda b) Průchodová metoda [20]	35
Obrázek 19 Rozlišovací schopnosti neutronové radiografie při použití různých filmů [22]	36

SEZNAM ZKRATEK

a	-	šířka sondy
b	-	šířka defektu
BWR	-	varný vodovodní reaktor
CRUD-		úsady
EDU	-	elektrárna Dukovany
ETE	-	elektrárna Temelín
f	-	frekvence střídavého pole
F_r	-	frekvenční odezva měřicího zařízení
IAEA	-	Mezinárodní agentura pro atomovou energii
MSIO	-	mobilní stend inspekcí a oprav
NDT	-	nedestruktivní testování
PCMI	-	kontakt palivových peletek s pokrytím
PIE	-	poradiační inspekce
PWR	-	tlakovodní reaktor západní koncepce
v	-	rychlost pohybu sondy
VVER	-	tlakovodní reaktor východní koncepce
μ_o	-	permeabilita vakua
μ_r	-	relativní permeabilita materiálu
δ	-	hloubka vniku
π	-	Ludolfovo číslo
ρ	-	elektrická vodivost

1 ÚVOD

Tato práce se zabývá metodami inspekce ozářených palivových souborů, konkrétně pro reaktory lehkou vodou chlazené a lehkou vodou moderované, tedy pro tzv. vodovodní reaktory.

Význam inspekce palivových souborů je dán skutečností, že poškození nebo selhání palivového souboru má přímý dopad na radiační bezpečnost personálu elektrárny i jejího technického vybavení. V případě závažných poruch palivového souboru může rovněž dojít k zásadnímu snížení schopnosti regulovat výkon reaktoru, přičemž selhání tohoto charakteru již může vyústit i ve velmi závažnou havárii. Z uvedeného důvodu je nutné analyzovat příčiny poruch paliva, hledat metody, které minimalizují pravděpodobnost poruch paliva a tedy minimalizují riziko selhání komponent palivového souboru. Rovněž je nutné zkoumat a rozvíjet metody inspekce palivového souboru, které umožní detekovat případná poškození tak, aby lokální poškození (defekt) bylo odhaleno dříve, než dojde k poruše palivového souboru nebo jeho selhání s potenciálně závažnými následky. Význam včasné detekce defektů z hlediska bezpečnosti a spolehlivosti technických systémů ilustruje sekvence na Obrázek 1, přičemž v případě inspekce palivového souboru lze materiálové defekty považovat za „chyby“ ve struktuře nebo složení materiálu.



Obrázek 1: Příčinný řetězec „Chyba – Porucha – Selhání – Havárie“ [1]

Vzhledem k tomu, že poruchu hermetičnosti paliva může zapříčinit celá řada technických a fyzikálně-chemických mechanismů, je v praxi za účelem detekce defektů a poruch palivového souboru užívána celá škála různých detekčních metod.

Jako hlavní kořenové příčiny porušení hermetičnosti paliva byly identifikovány [2]:

- nežádoucí objekty v chladiivu reaktoru,
- interakce palivových pelet a jejich pokrytí (PCMI),
- výrobní vady (primární hydridace, vadné svary, ...).
- vibrace palivového souboru způsobené průtokem chladiiva a vibracemi vyvolaná mechanická interakce komponent palivového souboru způsobující nežádoucí vzájemný otěr materiálu (grid-to-rod fretting),
- nesprávná manipulace s palivem a to jak při výrobě a transportu, tak při následné provozní manipulaci,
- malá odolnost palivového souboru vůči sekundární degradaci (koroze).

Ačkoliv je v provozu přijímána celá řada technických opatření kladoucích si za cíl eliminovat nebo alespoň snížit výskyt výše uvedených příčin, je zřejmé, že výskyt vad paliva nelze za současného stavu vědy a techniky v provozu zcela vyloučit. Proto je nutné provádět inspekce palivového souboru, a to metodami, které jsou vhodné pro daný typ reaktoru, dané

konstrukční a technologické provedení palivového souboru, se zohledněním konkrétních provozních, bezpečnostních, ale i ekonomických podmínek příslušné jaderné elektrárny.

Předložená práce si proto klade za cíl:

- stručně popsat dva základní typy reaktorů (BWR a PWR) – kapitola 2,
- stručně popsat palivový soubor, a jeho složení – kapitola 3
- popsat nejvýznamnější poškození paliva - kapitola 4,
- popsat metody inspekce paliva, které jsou používány ve světě - kapitoly 5 a 6,
- popsat palivo a metody inspekce používané na ETE – kapitoly **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** a 7,
- navrhnout možné vylepšení PIE pro ETE – kapitola 0.

Posledním cílem práce je na základě výsledků srovnání metod používaných ve světě a metod používaných na ETE navrhnout případné možné vylepšení poradiační inspekce palivových souborů na ETE. Při srovnání metod používaných ve světě a metod aplikovaných na ETE bylo zjištěno, že je (minimálně teoreticky) možné stávající metody inspekce vylepšit zejména v oblasti detekce míry hydridace palivového proutku a to s využitím detekčních metod na bázi vířivých proudů. Případné ekonomické zhodnocení přínosu takového vylepšení již je mimo rámec této práce¹.

Terminologická závislost této práce na cizojazyčné literatuře a zahraničních zdrojích se i v domácí (českojazyčné) literatuře projevuje přebíráním zahraniční terminologie (fretting, stend, sipping aj.). V této práci proto nebude možné se vyhnout takovým tvarům a názvům, pro které zřejmě neexistují ustálené české ekvivalenty.

¹ Ekonomické parametry PIE systémů jsou pro účely bakalářské práce z veřejných informačních zdrojů prakticky nedostupné.

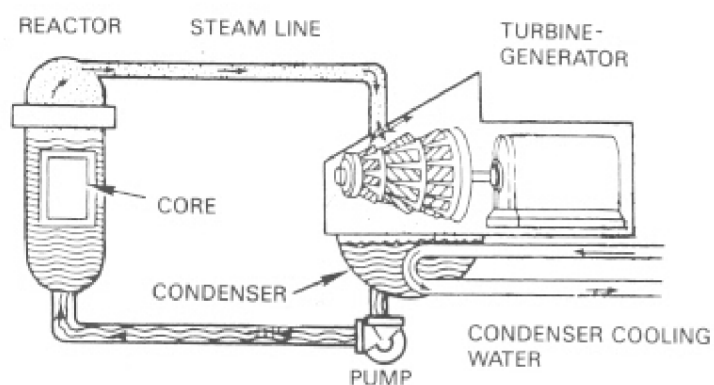
2 TYPY REAKTORŮ

Rozlišujeme dva typy vodovodních reaktorů podle skupenství média procházejícího aktivní zónou reaktoru. Jsou to varné reaktory (BWR, boiling-water reactor) a tlakovodní (PWR, pressurized-water reactor). Reaktory CANDU, které pracují s těžkou vodou, jsou mimo zaměření této práce, a proto nebudou dále popisovány.

2.1 BWR

Varný reaktor je vodovodní reaktor s jednookruhovým oběhem. Napájecí voda hnaná oběhovým čerpadlem prochází aktivní zónou reaktoru s palivem a mění se na páru. Radioaktivní pára je přiváděna na turbínu. Po průchodu turbínou je zchlazena v kondenzátoru a čerpadlem opět přiváděna do reaktoru.

Orientační parametry páry v reaktoru jsou: teplota 290 °C, tlak 7,2 MPa [3].



Legenda:

<i>Reactor</i>	- reaktorová nádoba
<i>Steam Line</i>	- parovod
<i>Turbine-Generator</i>	- turbína s generátorem
<i>Core</i>	- jádro reaktoru
<i>Condenser</i>	- kondenzátor
<i>Condenser Cooling Water</i>	- chladicí voda
<i>Pump</i>	- čerpadlo

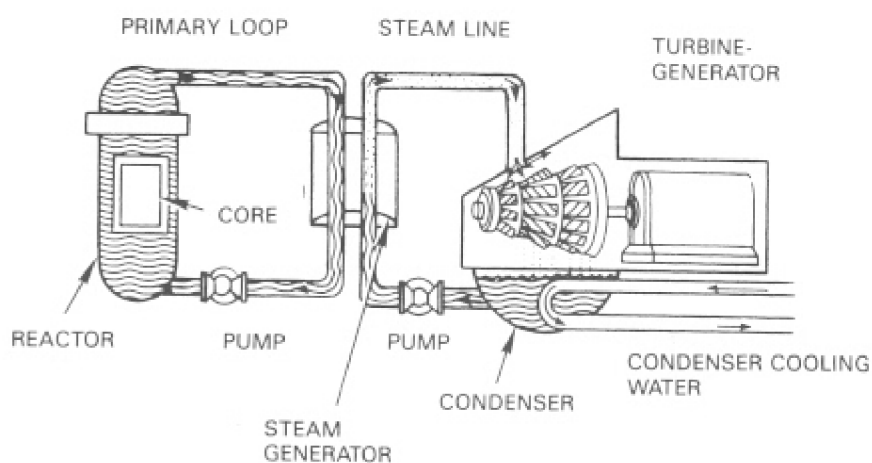
Obrázek 2 Jednoduché schéma BWR [3]

2.2 PWR

Tlakovodní reaktor je vodovodní reaktor s dvouokruhovým oběhem. Voda procházející aktivní zónou reaktoru má orientační parametry: teplota 340 °C a tlak 15,5 MPa [3]. Z fázového

diagramu vody (t, p) pro uvedené parametry vyplývá, že ačkoliv má voda vysokou teplotu, je díky vysokému tlaku stále v kapalném skupenství. Voda o těchto parametrech je hnána do tepelného výměníku (parogenerátoru), kde je tepelná energie vody primárního okruhu předávána médiu sekundárního okruhu, kterým je rovněž voda, přičemž voda sekundárního okruhu mění své skupenství na páru. Tato pára je následně přivedena na turbínu. Orientační parametry páry při vstupu na turbínu jsou: teplota 290°C a tlak $7,2\text{ MPa}$ [3]. Z turbíny je voda přiváděna do kondenzátoru a následně do parogenerátoru.

Mezi reaktory PWR se řadí i reaktory typu VVER, které jsou konstrukčně reaktorům PWR velmi podobné, avšak využívají horizontální uspořádání parogenerátoru.



Legenda:

<i>Reactor</i>	- reaktorová nádoba
<i>Primary Loop</i>	- primární okruh
<i>Steam Generator</i>	- parogenerátor
<i>Steam Line</i>	- parovod
<i>Turbine-Generator</i>	- turbína s generátorem
<i>Core</i>	- jádro reaktoru
<i>Condenser</i>	- kondenzátor
<i>Condenser Cooling Water</i>	- chladicí voda
<i>Pump</i>	- čerpadlo

Obrázek 3 Jednoduché schéma PWR [3]

3 PALIVO PRO VODOVODNÍ REAKTORY

Palivové soubory pro oba typy reaktorů jsou si velmi podobné. Základem je lehce obohacený oxid uraničitý (do 5% U-235) UO_2 ve formě malých válcových peletek. Rozměry peletek závisí na konkrétním provedení paliva.

Peletky, jsou vloženy do trubiček ze slitiny zirkonia (tloušťka stěny trubičky je cca. 0,5 mm). Trubičky pro reaktory BWR bývají často z vnitřní strany vybaveny měkčím potahem z čistého Zr nebo Zr s příměsí Fe a O. Tento potah se nazývá liner a jeho tloušťka je 40-70 μm . Úkolem lineru je zmírňovat následky kontaktu peletky s pokrytím² [4], [5]. Trubičky jsou následně vyplněny inertním plynem - heliem a jsou hermeticky utěsněny. Trubičky brání úniku štěpných produktů do reaktorové nádoby. Aby se zabránilo volnému pohybu peletek v trubičce jsou tyto na obou koncích upevněny pružinami. Trubičky s peletkami se nazývají palivové proutky. Palivové proutky jsou uchyceny do distančních mřížek čtvercového nebo šestiúhelníkového tvaru a jsou na svých koncích zasazeny do hlavice a patice³.

Palivové proutky, distanční mřížky, hlavice, patice a další bezpečnostní prvky⁴ tvoří dohromady palivový soubor. Palivový soubor je při zavážce vložen do aktivní zóny reaktoru.

Další součástí aktivní zóny jsou regulační tyče. Ty jsou vyrobeny z oceli s přidavkem bóru (pevný absorbátor) a slouží k regulaci výkonu reaktoru a především k jeho rychlému odstavení. Podle typu reaktoru mají tyto tyče buď pouze absorpční část (VVER-1000), nebo jsou složeny z části palivové a absorpční (VVER-400). Dále rozlišujeme, zda jsou zasouvány přímo do souboru (VVER-1000), nebo mají podobu celého souboru (VVER-400) a jsou zasouvány namísto jednoho souboru [6].

Konstrukce paliva pro reaktory BWR, PWR a VVER se značně liší, proto následuje jejich přehled.

Konstrukce paliva BWR

Základní geometrie paliva pro varný reaktor je čtvercová (např. 8x8 proutků) mezi tyto čtverce zajíždí regulační tyč ve tvaru kříže. Jednotlivé soubory jsou umístěny v ochranné obálce ze zirkoniové slitiny (podobně jako palivo pro VVER-400), která zaručí, že voda nebude proudit napříč mezi jednotlivými soubory, čímž by mohlo dojít k lokálním nepřítomnostem chladiva [3].

Konstrukce paliva PWR

Základní geometrie paliva je stejně jako u varného reaktoru čtvercová (např. 17x17 proutků). Palivo však nemá obálku a kromě palivových proutků jsou zde také kanály pro regulační tyče a centrální manipulační kanál [3].

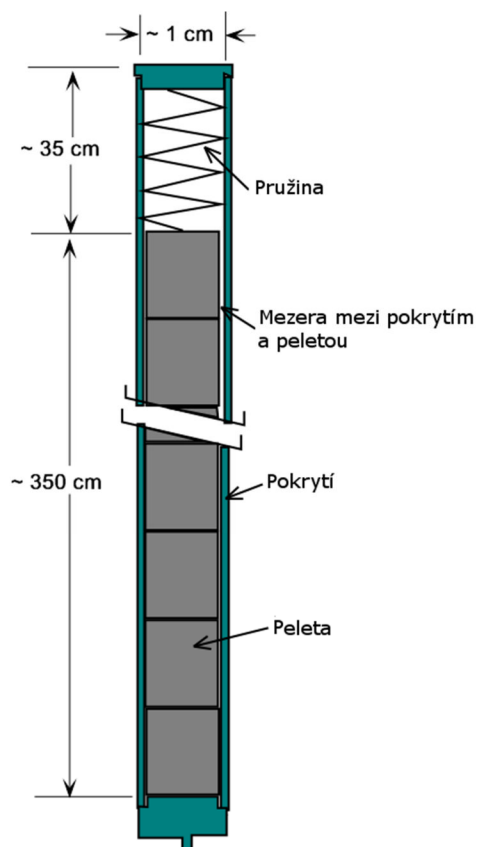
Konstrukce paliva VVER

² Tím, že je materiál lineru měkčí se při kontaktu s peletkou deformuje bez vytvoření trhliny.

³ Patice je nesnímatelná. Hlavice může být snímatelná pro účely oprav palivového souboru.

⁴ Můžou se vyskytovat např. vodící trubky pro řídicí tyče (např. palivo pro VVER-1000), centrální trubka či prostor pro řídicí kříž (palivo BWR).

Základní geometrie paliva je hexagonální s počtem proutků podle typu reaktoru. VVER-400 má 126 palivových proutků a palivové proutky jsou pokryty obálkou. VVER-1000 má 312 proutků v jednom palivovém souboru. Detailní popis paliva pro VVER-1000 je uveden v kapitole **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**, která se zabývá palivem pro ETE.



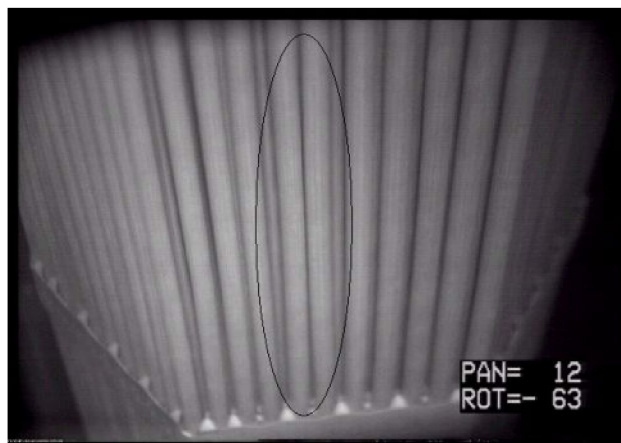
Obrázek 4 Konstrukce palivového proutku lehkovodního reaktoru, upraveno z [7]

4 POŠKOZENÍ PALIVA

Poškozování palivových proutků či celých palivových souborů je způsobeno řadou faktorů, mezi něž patří teplotní vlivy, včetně vlivu změn v rozložení vývinu tepla v aktivní zóně, vliv termohydrauliky chladiva, dále vliv štěpných produktů, vliv ozáření, mechanické vlivy na palivo, interakce palivo – pokrytí, vliv vyhořívajících absorbátorů, vliv obklopujícího prostředí, vodíkové zkřehnutí, a další.

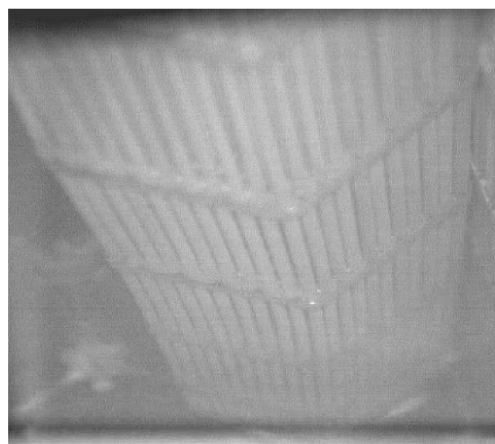
4.1 Ohyb

Při pobytu v aktivní zóně může docházet k ohybu jak jednotlivých proutků, tak celých souborů. V případě přiblížení palivových proutků může docházet vlivem sníženého průtoku vody k nedostatečnému odvodu tepla z daného místa palivového souboru, což vede k lokálnímu přehřátí a hrozí lokální dosažení teplot, které jsou pro palivový soubor nepřijatelné.



Obrázek 5 Ohnuté palivové proutky [8]

Při ohybu celého souboru hrozí problémy při manipulaci se souborem, neboť geometrický tvar deformovaného souboru již neodpovídá tvaru projektovanému.



Obrázek 6 Prohnutá palivová kazeta [4]

Problémy při manipulaci nenastávají pouze u kazet, ale deformace paliva má dopad i na funkci regulačních tyčí. Regulační tyče mohou být zasouvány jakoby namísto jednoho ze souborů, mezi soubory, nebo jsou zasouvány přímo do souboru.

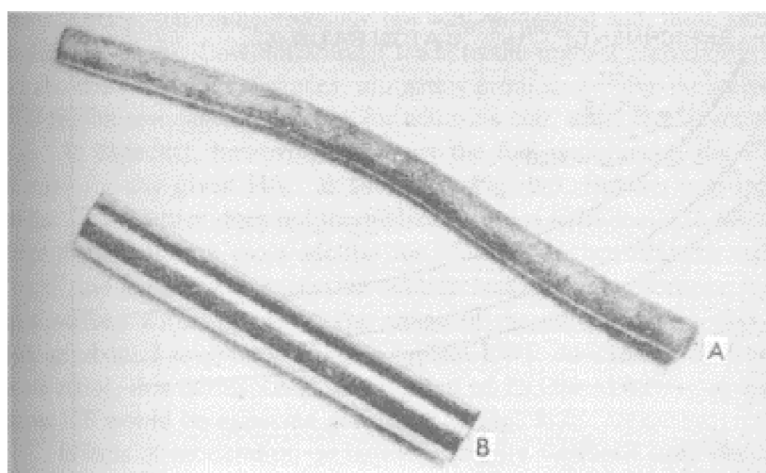
V případě ohybu souboru nemohou regulační tyče přes ohnuté palivové soubory zajet až na konec aktivní zóny, což ohrožuje schopnost rychlého odstavení reaktoru [9], [10]. Tento problém znamená, že nejsou splněny limity a podmínky pro provoz reaktoru a ten se nesmí provozovat.

4.2 Rozměrové změny

Neutronové záření uvnitř jaderného reaktoru způsobuje změny ve velikosti palivového souboru a jeho komponent. Dle [11] je všeobecně akceptované vysvětlení tohoto makroskopického zvětšování objemu ozářeného materiálu následující:

Při průchodu neutronů s vysokou energií pevným materiálem dochází ke kolizím těchto neutronů s atomy pevného materiálu. Při těchto kolizích může dojít k vyražení atomu z jeho místa v krystalické mřížce. Tyto vyražené atomy často disponují takovou energií, že mohou vyrazit ještě další atomy z krystalické mřížky. Mobilita vyražených atomů a vakancí v krystalické mřížce je za nízkých teplot nízká, bodové defekty migrují relativně pomalu, a proto po jejich vniku dochází k jejich rekombinaci a tedy zániku. Podobně za vysokých teplot, kdy je mobilita těchto poruch naopak velmi vysoká, dochází k relativně rychlému zániku těchto poruch. Nicméně za středních teplot (tedy za provozních teplot, které jsou v reaktoru), jsou objemové změny největší, neboť mobilita poruch je již významná a poruchy se ve zvýšené míře šíří z místa jejich vzniku, ale současně mobilita poruch ještě není dostatečně vysoká na to, aby poruchy rychle zanikaly.

Z hlediska poruch paliva rozlišujeme několik typů těchto změn [12]. Jde buď o swelling (napuchání peletek), růst palivového proutku nebo růst palivové kazety. Se změnou rozměrů jednotlivých komponent je při projektování paliva do jisté míry počítáno, nicméně díky vysokému stupni obohacení a vyhoření nelze vyloučit, že za provozu dojde k tak velkým rozměrovým změnám, při kterých dojde k ohrožení bezpečnosti provozování reaktoru.



Obrázek 7 Radiční růst uranové tyče A-po ozáření B-před ozářením [5]

4.3 Swelling (napuchání pelet)

V případě rozpínání jednotlivých peletek dochází ke zmenšování mezery mezi palivem a jeho pokrytím, přičemž pokrytím (Cladding) je míněna stěna palivového proutku. V krajním případě může dojít až ke kontaktu peletek s pokrytím tzv. Pellet-Cladding Mechanical Interaction (PCMI).

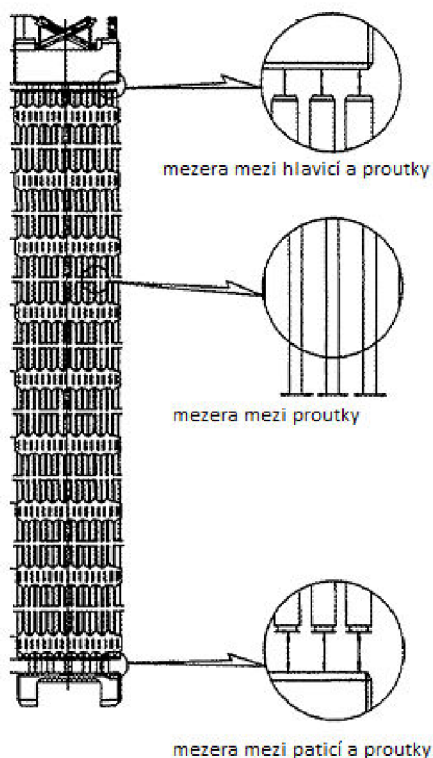
Zvětšená peleta jednak zapříčiňuje odlišnou tepelnou vodivost v místě přiblížení pelety k pokrytí, což způsobuje tepelnou nehomogenitu v daném místě, jednak v místě styku vyvolává nadměrný tlak na pokrytí, což snižuje jeho životnost. Dalším projevem interakce paliva a pokrytí je Stress-Corrosion Cracking (korozní praskání pod napětím), přičemž vznik korozních prasklin je podmíněn vysokým mechanickým napětím a dlouhým působením vysoké koncentrace agresivních štěpných produktů, ke které dochází při popraskání peletky [13], [14].

PCMI je jednou z nejčastějších příčin selhání paliva v reaktorech typu BWR [15], což ukazuje důležitost zkoumání tohoto jevu.

4.4 Růst palivových proutků a kazet

Stejně, jako se mění rozměry pelet, tak se mění i rozměry palivových proutků a palivového souboru. Při kontrolách během odstávek (PIE) se sledují změny v mezerách mezi hlavicí a palivovými proutky, mezi patičí a palivovými proutky a mezi proutky navzájem. Nebezpečím při přílišném růstu je poškození proutku a také přílišný nárůst tepla ve zmenšených mezerách mezi proutky [5].

Růst palivových proutků je výsledkem tří faktorů: radiačního růstu, tečení materiálu (creep) a mechanickým kontaktem mezi palivem a pokrytím (PCMI) [8]. Proutky tak mohou růst až o několik mm za rok, proto je konstrukčně nezbytná dostatečná mezera mezi palivovým proutkem a hlavicí, aby nedošlo ke kontaktu a proutek se nezačal prohýbat.



Obrázek 8 Základní měřená místa palivové kazety, převzato z [12] a upraveno

4.5 Netěsnost palivového proutku

Nebezpečí zapříčiněné netěsností palivových proutků spočívá v uvolňování štěpných produktů do chladiva primárního okruhu. Dále voda pronikající do proutku reaguje se štěpnými produkty a výsledné agresivní sloučeniny se opět dostávají do chladiva. Další radioaktivní látky se uvolňují ve formě plynů. Tyto uniklé radioaktivní látky jsou následně zodpovědné za zvýšené dávky ozáření obsluhy jaderné elektrárny a zařízení elektrárny [16]. Dále vodní pára reaguje s pokrytím za vzniku hydridací, čímž pokrytí křehne a hrozí jeho prasknutí. Příčinou netěsnosti palivového proutku jsou mechanismy označovány jako *grid-to-rod fretting* a *debris fretting*. Oba tyto mechanismy jsou stručně popsány níže.

4.5.1 Grid-to-rod fretting

Názvem *Grid-to-rod fretting* se označuje mechanické poškození (odření až prodření) palivového pokrytí, ke kterému dojde v místech, kde dochází ke styku distanční mřížky (*grid*) a palivového proutku (*rod*). Příčinou vzniku mechanického poškození povrchů jsou vibrace součástí palivových souborů, ke kterým dochází za provozu [15], významným faktorem umožňujícím vznik tohoto typu poškození je nebo zejména v minulosti býval nevhodný konstrukční návrh palivového souboru.

4.5.2 Debris fretting

Názvem *Debris fretting* je označována nehoda, při níž je mechanicky poškozeno pokrytí paliva vinou předmětů pohybujících se v chladivu. Jedná se například o předměty spadlé do

reaktorové nádoby v průběhu odstávek, nebo odlomené části palivového souboru (část distanční mřížky etc.).

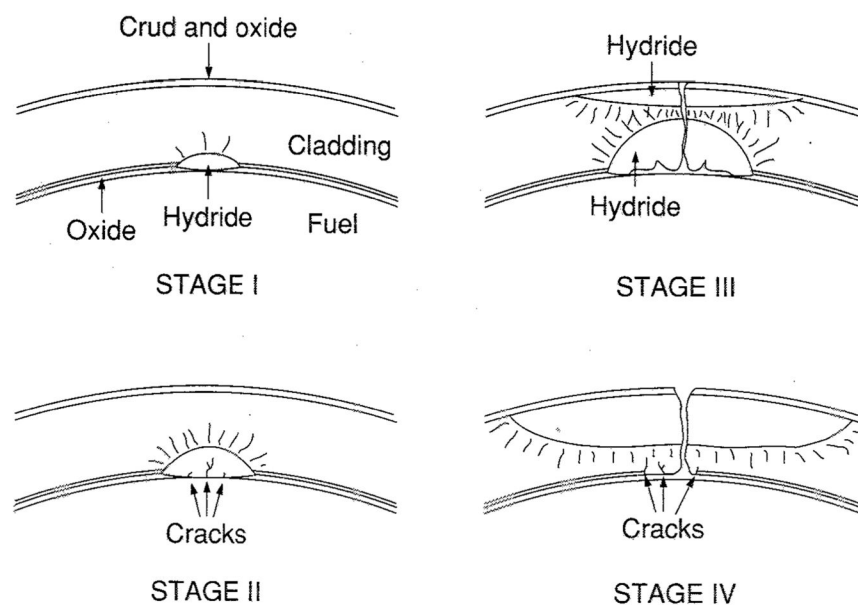
4.6 Oxidace povrchu palivových proutků

Při provozu reaktoru dochází k oxidaci povrchu palivových proutků. Vrstva oxidů v důsledku změněné tepelné vodivosti materiálu následně způsobuje horší přestup tepla mezi proutkem a chladičem, čímž v místě oxidace dochází k lokálnímu nárůstu teploty. Tento lokální nárůst teploty má za následek rychlejší oxidaci a konečným důsledkem je vznik poškození povrchu palivového proutku [14]. Oxidací může dojít až k proděravění pokrytí.

4.7 Hydridace palivových proutků

Hydridace pokrytí palivových proutků je jednou z nejčastějších příčin selhání paliva v lehkovodních reaktorech [17]. Tento problém si zaslouží stále větší pozornost z důvodu vyššího obohacení paliva a jeho vyhoření. Pokrytí paliva je vystaveno vysokému tlaku a teplotě na vnější straně a velmi horkému palivu na straně vnitřní.

Hydridaci rozlišujeme dvojího druhu: vnější a vnitřní. Vnější je způsobena zdrojem vodíku mimo palivový proutek a vnitřní naopak zdrojem uvnitř palivového proutku. Vnitřní hydridaci dále dělíme na primární a sekundární.



Legenda:

Crud and oxide	- nános a oxidy
Cladding	- pokrytí
Cracks	- praskliny
Fuel	- palivo
Hydride	- hydridy
Oxide	- oxidy
Stage	- stádium

Obrázek 9 Postupný proces selhání pokrytí vlivem primární vnitřní hydridace [17]

Primární hydridace je proces vnitřní hydridace nepoškozeného palivového proutku (již z výroby), zatímco sekundární hydridace je hydridace vnitřní strany pokrytí z důvodu vniknutí chladiva do poškozeného proutku.

Zdrojem vodíku pro primární vnitřní hydridaci jsou:

- nečistoty v plnicím plynu (helium),
- vodík obsažený v pórech pelet,
- vlhkost v peletách.

Při sekundární vnitřní hydridaci se navíc uplatňuje oxidace pelet vyvolaná vodní párou nebo peroxidem vodíku vzniklým při radiolýze vody [17] [18].

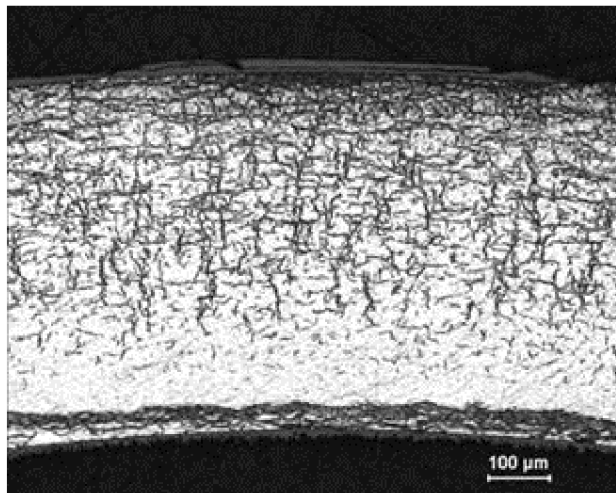
Zdroje vodíku pro vnější hydridaci jsou:

- koroze zirkoniové slitiny ve vodě, jejíž průběh popisuje rovnice $Zr + 2H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2H_2$,
- rozpuštěný vodík v chladivu,
- radiolýza vody.

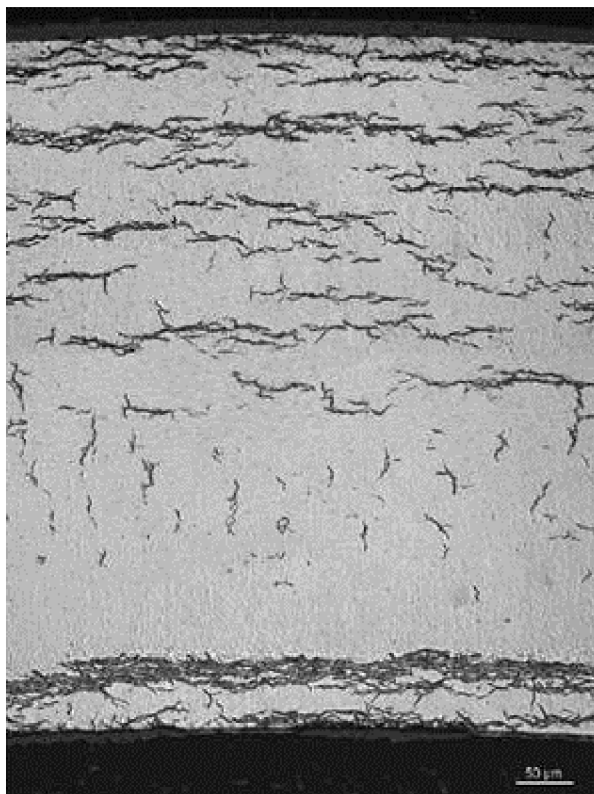
Podle závažnosti se hydridace dělí na tři kategorie:

- očekávanou (způsobenou běžnou korozí zirkonia),
- zrychlenou,
- masivní.

Dále rozlišujeme hydridace podle jejich orientace v pokrytí paliva na radiální a axiální, rozdíl mezi radiální a axiální hydridace je zřejmý z níže uvedených obrázků.



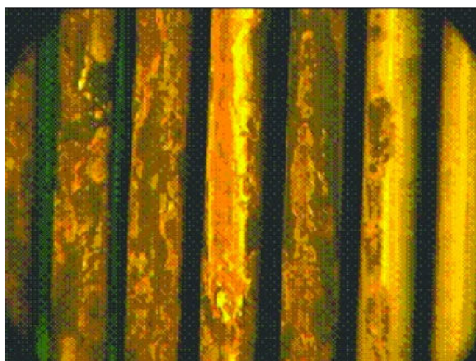
Obrázek 10 Radiální hydridace v pokrytí s vysokým obsahem vodíku (600-700 ppm) [19]



Obrázek 11 Axiální hydridace v pokrytí s nízkým obsahem vodíku [19]

4.8 Úsady

Jde o usazené shluky částic obsažených v chladivu. Úsady v místě, kde se zachytí, způsobují lokální přehřívání a urychlenou oxidaci pokrytí. Jedním z možných projevů úsad je také snížený výkon reaktoru v důsledku pohlcování neutronů v úsadách. Pozorované úsady jsou tvořeny zejména niklem a železem, nicméně v pórech těchto úsad se ukládá lithium, které je používáno na řízení pH chladicí kapaliny. Na lithium se následně váže bór, který je zodpovědný za pohlcování neutronů. V literatuře je tento jev označován jako tzv. CRUD (Chalk River Unidentified Deposit) a pojmenován byl podle kanadského výzkumného zařízení (Chalk River Laboratories), kde se tento problém vyskytoval [20]. Výskyt úsad, jejich množství i složení závisí na chemickém režimu daného reaktoru.



Obrázek 12 Úsady na palivových proutcích [20]

5 METODY INSPEKCE PALIVA

Úlohou poradiačnich inspekci paliva je zvyšování bezpečnosti jaderného zařízení. V současné době dochází k nárůstu obohacení paliva i jeho vyhoření. Tímto procesem dochází k vyššímu zatěžování paliva a tím pádem k vyššímu riziku jeho selhání. Poradiační inspekce paliva tudíž nabývají větší důležitosti pro bezpečnost a tím pádem i pro ekonomický provoz jaderného zařízení.

Z hlediska praktického nasazení v komerčně provozovaných jaderných elektrárnách pro účely kontroly při tzv. pool-side inspekci jsou významné zejména metody nedestruktivní defektoskopie a diagnostiky (NDT). Jde o fyzikální metody, které slouží k testování vad materiálů a komponent bez vlivu na možnost dalšího užívání testovaného vzorku v provozu.

Podle IAEA je možné nedestruktivní metody rozdělit na běžně užívané (commonly used) a občasné (non-commonly used). Do skupiny běžně užívaných jsou řazeny:

- vizuální a optické inspekce,
- kontrola těsnosti – tzv. sipping,
- diagnostika na bázi vířivých proudů,
- radiografie,
- ultrazvukové testování,
- spektroskopie.

Do skupiny druhé jsou řazeny metody, které jsou uplatňovány hlavně ve výzkumných reaktorech, mezi tyto metody patří např. neutronová radiografie [21].

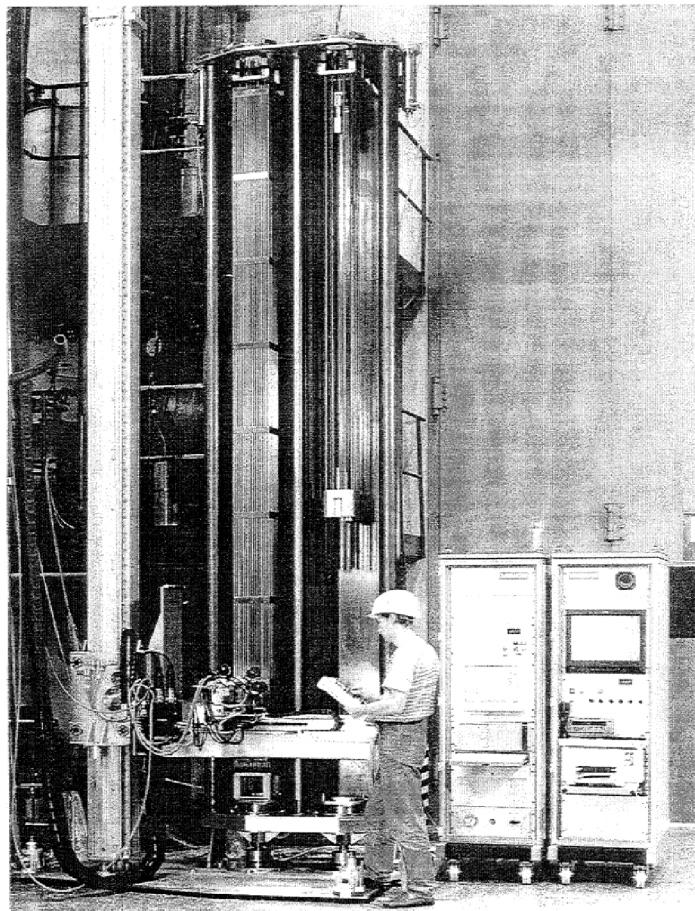
Kontroly palivového souboru probíhají buď v bazénu skladování vyhořelého paliva (typ VVER) na speciálním stanovišti s přípravkem, který má za úkol bezpečně uchytit palivový soubor a potřebná zařízení, nebo jsou příslušná testovací zařízení přímo součástí zavážecího stroje. Zařízení jsou ručně nebo dálkově ovládána z manipulační plošiny nad bazénem. Další konstrukční možností je řešení, kdy je elektrárna vybavena zvláštní budovou pro nakládání s palivem (tzv. fuel building), která je umístěna vedle budovy reaktoru. S budovou reaktoru je spojena trasou, po které je možné převážet palivové soubory. V budově nakládání s palivem je umístěn bazén na ozářené palivo. Vyhořelé palivo je v této budově možno testovat kdykoliv a jakkoliv dlouho a to bez omezení provozu v reaktorovém sále.

Nedestruktivní testování je rozšířené prakticky v jakémkoliv technickém oboru. Testování ozářeného jaderného paliva má však výrazná specifika, která brání použití zařízení zkonstruovaného pro jiné aplikace. Hlavními specifiky při nedestruktivním testování ozářeného jaderného paliva jsou:

- Radiace - velmi vysoká aktivita paliva znamená výrazné zkrácení životnosti zařízení (zvláště elektroniky).
- Voda s kyselinou boritou - zařízení musí být konstruováno jako vodotěsné z materiálů, které dobře odolávají působení slabého roztoku kyseliny borité, která je součástí vody v bazénu.
- Rozdílná teploty vody ve spodní a horní části palivového souboru – palivový soubor má výšku několik metrů a zbytkovým tepelným výkonem ohřívá vodu, ve které je při inspekci ponořen. Voda je v bazénu uměle cirkulována a rozdíl teplot vody ve spodní a

horní části palivového souboru může být několik desítek stupňů. Z tohoto rozdílu teplot vyplývá také rozdílná hustota vody v horní a spodní části palivového souboru, což je třeba vzít v úvahu například při návrhu měření ultrazvukem.

- Délka testování – parametr ovlivňující testování především na reaktorech typu VVER, kde není k dispozici budova pro nakládání s palivem. V současné době lze pozorovat snahu provozovatelů jaderných elektráren snížit dobu odstávky na minimum (každá hodina, kdy je reaktor odstavený, znamená hodinu, kdy nevyrábí elektřinu) a proto je potřeba zvažovat při návrhu testování také časové hledisko.
- Cena zařízení - cena zařízení je velmi vysoká jak z důvodu náročnosti prostředí, tak z důvodu jeho složitosti. Je proto potřeba dobře uvážit celkové náklady a přínosy jeho použití.



Obrázek 13 Stanoviště pro PIE [22]

Následující kapitoly popisují jednotlivé metody využívané při inspekcích ozářeného jaderného paliva.

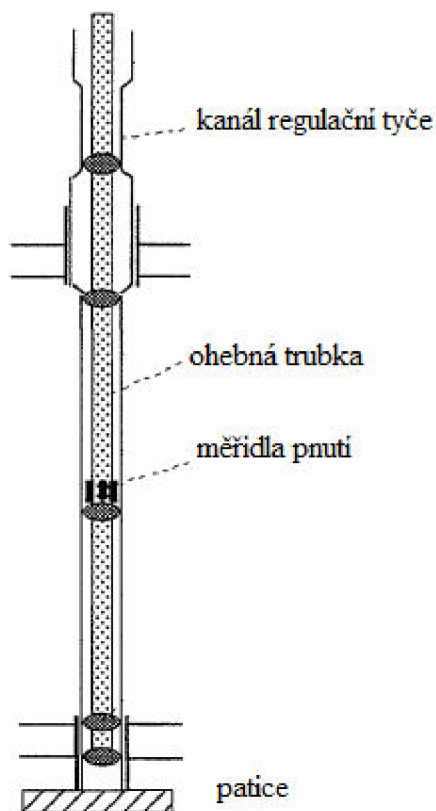
5.1 Vizuální kontrola a rozměrové měření

Cílem vizuální kontroly je zhodnocení povrchového stavu palivových souborů a periferních proutků [14]. Ke sledovaným parametrům dále patří například měření délek krajních proutků, měření délek palivového souboru a měření šířky mezery mezi sousedními proutky. Probíhá také zhodnocení zkroucení palivového souboru a jeho jednotlivých částí [23]. Měření délek je možné

provádět více způsoby. První z nich využívá umístění kalibračního měřidla vedle měřeného objektu a určení délky pomocí porovnání délek z kamerového záznamu [24]. Dále je možné použít speciálně vytvořený kamerový záznam, za kterého jsou délky určeny pomocí automatizovaného zpracování obrazu [12]⁵, [21]. Pro měření délek, ale například i pro měření průhybu palivového souboru, je vhodná metoda, při které kamera zaznamená krajní souřadnice měřeného objektu a délka je vypočtena jejich odečtením [23].

Důležitou informací je zjištění míry zkroucení vodičích trubek pro regulační klastry. Na toto lze usuzovat ze sledování pokřivení samotné palivové kazety, nebo lze měřit samostatně změnu profilu kanálu regulační kazety. Samostatné měření je možno provádět např. zasunutím ohebné trubky se snímači pnutí do kanálu regulačního klastru, viz Obrázek 14. Případný ohyb trubky v materiálu trubky vyvolá pnutí, které je následně měřeno snímači rozmístěnými po obvodu trubky [9].

Zakřivení palivového souboru je možno měřit také pomocí ultrazvuku [10]. Měří se vzdálenosti mezi ultrazvukovými sondami a měřeným objektem, z čehož se pak softwarově stanoví změna v geometrii palivového souboru.



Obrázek 14 Princip zařízení měřícího ohnutí vodičích trubek pro regulační klastry [2]

⁵ Detailní popis procesu viz (6)

5.2 Sipping

Jde o metodu kontroly těsnosti pokrytí paliva, při které jsou vyhledávány štěpné produkty (rozpuštěné ve vodě a plynné) unikající z netěsných proutků do okolí. Hledány mohou být izotopy jódu a cesia ve vodě nebo kryptonu a xenonu v unikajících plynech. Konkrétní metody mohou analyzovat jak vodu, tak plyny, nebo oboje dohromady [14], [25].

5.2.1 Mast sipping (In-Mast sipping)

Jde o testování těsnosti palivových proutků probíhající při vyzdvihování paliva z reaktoru. Proces využívá snižování tlaku, ke kterému dochází při vyzdvižení palivových souborů aktivní zóny reaktoru. Výsledný rozdíl tlaků umožňuje vodorozpuštěným nebo plynným štěpným produktům uniknout z poškozených palivových proutků. Když je palivo vysunuto na nejvyšší bod, je odebrán vzorek vody z manipulačního zařízení (v blízkosti manipulovaného palivového souboru). Vzorek vody je následně zanalyzován na přítomnost štěpných produktů. Naměřená data jsou analyzována okamžitě po odebrání vzorku, což znamená značnou úsporu času [25] [22] [26]. V jiné variantě jsou analyzovány unikající plyny, přičemž na poškození paliva je usuzováno z výskytu izotopů xenonu a kryptonu, případně dalších prvků [27].

5.2.2 Elevate sipping

System, který je používán pro testování v bazénu vyhořelého paliva vyvinutý společností ABB Atom. Na palivovou kazetu je umístěna speciální hlavice a kazeta je vyzdvižena do výšky čtyř metrů, což u poškozeného souboru má za následek únik štěpných produktů. Výhodou metody je vysoká citlivost. Nevýhodou je možnost poškození paliva při manipulaci a doba trvání celého testování (je nutné soubor přepravit z reaktoru a následně s ním manipulovat) [26].

5.2.3 Cannister sipping (In-Can sipping)

Pro reaktory typu BWR i PWR je používán i způsob detekce netěsnosti palivových proutků za pomoci uzavřené nádoby v bazénu vyhořelého paliva. V nádobě stoupá teplota díky zbytkovému výkonu kazety. Dále je v nádobě snižován tlak na přibližně 0,4 baru. Tímto mechanismem je usnadněn případný únik štěpných produktů z poškozených proutků. Ze vzorků vody z nádoby se následně detekují uniklé izotopy [26], [14].

5.2.4 In-Core sipping

Pro reaktory typu BWR je možné použít systém založený na nasátí vody z palivového souboru za pomoci speciální hlavice. V horní části hlavice je použit vzduchový polštář, který zabrání průtoku chladicí vody. Díky tomu lokálně naroste teplota, což vyvolá vyplavení štěpných produktů. V některých aplikacích je pro lepší vyplavení štěpných produktů použito nadzvednutí kazety o 0,5 m [26].

5.3 Diagnostika na bázi vířivých proudů

Pro napsání této části jsem čerpal z [21] [28] [29] [30], protože jde o obecné informace, které se u jednotlivých zdrojů shodují, nelze je od sebe přesně odlišit v napsaném textu.

Jedná se o metodu v literatuře označovanou jako Eddy-current Testing (ET). Velkou výhodou tohoto druhu testování je široké množství aplikací této metody pro účely různých testů.

Metoda spočívá ve vytváření vířivých proudů v testovaném materiálu za pomoci přiblížení cívky, kterou prochází střídavý proud. Magnetické pole cívky je následně ovlivňováno magnetickým polem vířivých proudů, viz Obrázek 15. Tímto dojde ke změně impedance⁶ cívky. Výsledná impedance záleží na stavu měřeného materiálu a je odečítána z měřicího přístroje [14], [30], [28]. Pro posouzení naměřených změn v impedanci je používáno srovnání se změnami v impedanci referenčních vzorků s přesně definovanými vadami, které byly proměřeny za stejných podmínek, za jakých je měřen testovaný objekt. Jedná se tedy o metodu komparativní.

ET testování je vhodné k:

- vyhledávání prasklin,
- měření tloušťky vrstvy elektricky nevodivého materiálu na materiálu vodivém,
- určení druhu materiálu a hloubky měřeného objektu (s omezením).

Výhody použití této metody spočívají v dobré přesnosti při detekci malých prasklin, samotná obsluha přístroje je jednoduchá, měření je velmi dobře opakovatelné, a je rychlé s okamžitým výsledkem. Nevýhodou je možnost testování pouze elektricky vodivých materiálů, přičemž hloubka měření je omezena. Díky vysoké citlivosti je možno tuto metodu použít pouze na vzorky s kvalitní povrchovou úpravou. Další nevýhodou je, že prasklina rovnoběžná s orientací magnetické siločáry nebude detekována⁷. Metoda také klade vysoké požadavky na odborné znalosti u osob, které měření provádí a vyhodnocují protože je třeba znát

5.3.1 Teorie vířivých proudů

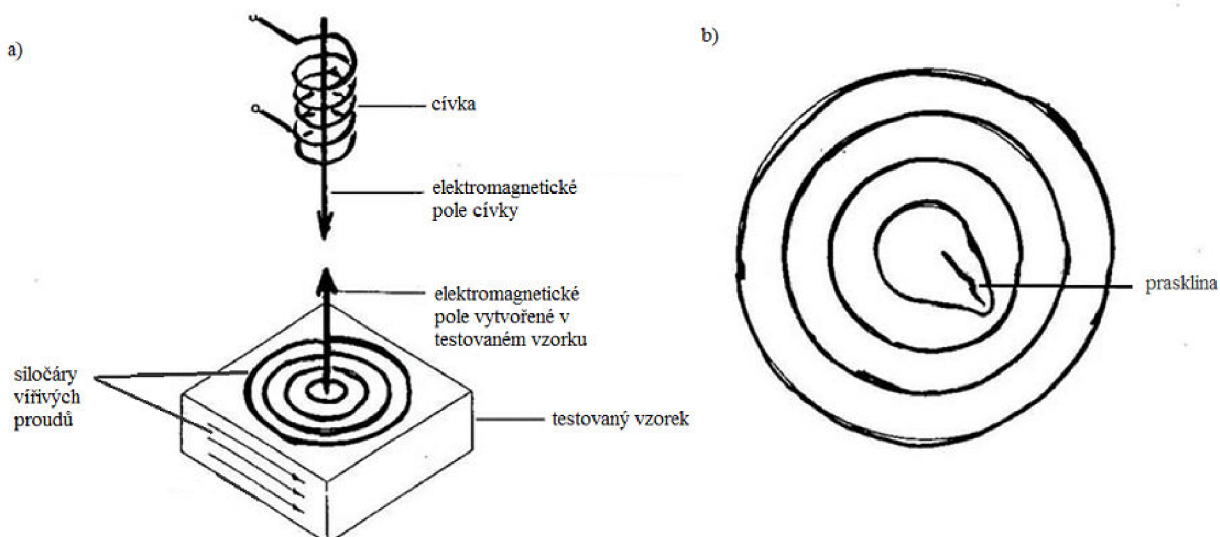
Při průchodu magnetického pole uzavřenou smyčkou tvořenou elektricky vodivým materiálem dochází v této smyčce ke vzniku elektrického proudu. Střídavý proud procházející cívkou vytváří v okolí cívky střídavé magnetické pole. Je-li tato cívka umístěna do blízkosti vodiče, vniká magnetické pole generované cívkou do vodiče a ve vodiči se v důsledku tohoto pole indukují vířivé proudy. Tyto kolem sebe vytváří vlastní magnetické pole. Směr indukovaných vířivých proudů je takový, že magnetické pole vytvářené těmito proudy (sekundární pole) je opačného směru, než pole původní, což vyplývá z Lenzova zákona⁸. Toto sekundární pole následně indukuje proud v cívce, která generuje primární pole, což se projeví jako změna v impedanci generující cívky. Měřením změn fyzikálních (elektrických) veličin na cívce lze určit vlastnosti testovaného materiálu. Hloubka vniku primárního pole do materiálu je omezena skin efektem⁹, který je důsledkem sekundárního magnetického pole, které redukuje celkový magnetický tok uvnitř testovaného materiálu.

⁶ Pro vyhodnocení měření je důležitá nejen velikost impedance, ale i fázový posun mezi generujícím signálem a signálem detekovaným.

⁷ Tuto nevýhodu lze omezit tvarem použité sondy a způsobem testování.

⁸ Lenzův zákon říká, že proud indukovaný v uzavřené smyčce je takového směru, že vytváří magnetické pole, které působí proti změně magnetického indukčního toku plochou uzavřené smyčky [40].

⁹ Skin efekt je jev nastávající při průtoku střídavého proudu vodičem. Jde o vytlačení elektrického proudu k okrajům vodiče, takže proudová hustota ve vodiči není rovnoměrná.



Obrázek 15 Generování vířivých proudů ve vzorku a zakřivení siločar vlivem defektu [21]

5.3.2 Faktory ovlivňující indukované vířivé proudy

Pro návrh měřicího zařízení a postupu měření je třeba určit faktory, které ovlivňují vířivé proudy a tím i měření.

Elektrická vodivost testovaného materiálu

Ačkoliv je základní vlastní vodivost materiálu proutku vždy stejná (pokrytí proutku je homogenní), může v materiálu dojít k nežádoucím změnám, které se projeví změnou vodivosti. Jde například o změny tvrdosti (často jsou způsobena nesprávným tepelným zatížením), přítomnost zbytkových mechanických napětí a teplotní nehomogenity. Tyto změny, které se projeví změnou vodivosti, jsou tudíž detekovatelné metodami na bázi vířivých proudů.

Permeabilita testovaného materiálu

V případě, že se intenzita magnetického pole procházejícího testovaným vzorkem v různých místech vzorku liší v důsledku nehomogenity v permeabilitě materiálu v daném místě vzorku, tak se tyto nehomogenity projeví velmi výraznou změnou impedance cívky. Změny v permeabilitě mohou souviset s konstrukčním provedením palivového souboru v daném místě souboru, a tedy nemusí být projevem poruchy. Tyto konstrukční dané nehomogenity v permeabilitě mohou být natolik značné, že zamaskují případné nežádoucí materiálové změny či poruchy.

Frekvence

Frekvencí primárního střídavého pole ovlivňujeme hloubku vniku, frekvence má vliv na proudovou hustotu a na fázi indukovaných vířivých proudů. Vyšší frekvence jsou používány pro povrchové měření a nižší frekvence jsou užívány pro podpovrchové měření. Dalším hlediskem pro výběr frekvence je testovaná vlastnost materiálu (praskliny na povrchu či uvnitř materiálu, tloušťka, vodivost etc.). Hloubka vniku δ je definována jako vzdálenost od povrchu vodiče, ve které klesne proudová hustota na $1/e$ (cca 37%) povrchové hodnoty, a vypočte se podle následujícího vztahu:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot f}},$$

kde

- δ - hloubka vniku,
- ρ - elektrická vodivost,
- π - Ludolfovo číslo,
- μ_0 - permeabilita vakua,
- μ_r - relativní permeabilita materiálu,
- f - frekvence střídavého pole.

Vzdálenost od vzorku

Protože impedanci cívky ovlivňuje vzdáleností cívky od testovaného vzorku (magnetické pole je tím silnější, čím blíže je cívka), je nezbytné během měření udržovat konstantní vzdálenost mezi cívkou a testovaným vzorkem. Jelikož je třeba měření ozářeného paliva provádět na dálku pomocí měřicího systému, je vyloučením lidského faktoru zároveň vyloučen i problém s proměnnou vzdáleností mezi cívkou a testovaným vzorkem, tzv. lift-off.

Tvar a rozměry vzorku

Použitelnost testování vířivými proudy výrazně závisí na tloušťce měřeného materiálu. Geometrické rozměry vzorku jsou podstatným faktorem nejen proto, že metoda má vlivem skin efektu velmi omezenou hloubku vniku, ve které je možné materiál testovat. Pokud je tloušťka materiálu menší než hloubka, kterou je možné měřit, tak jakákoliv změna v tloušťce materiálu ovlivní indukované vířivé proudy. Další změnu v proudech zapříčiňuje blízkost okrajů testovaného materiálu, protože mimo okraje nemohou téct vířivé proudy tak jako by tekly zkoumaným materiálem. Výsledkem měření v blízkosti okraje proto může být signál, který by odpovídal podstatně vadě, navíc případná blízkost okraje tímto způsobem může zabránit odhalení skutečné materiálové vadě. Podobné problémy vytváří rovněž místo styku dvou různých materiálů, kde jsou v důsledku materiálové nehomogenity nehomogenní i indukované vířivé proudy.

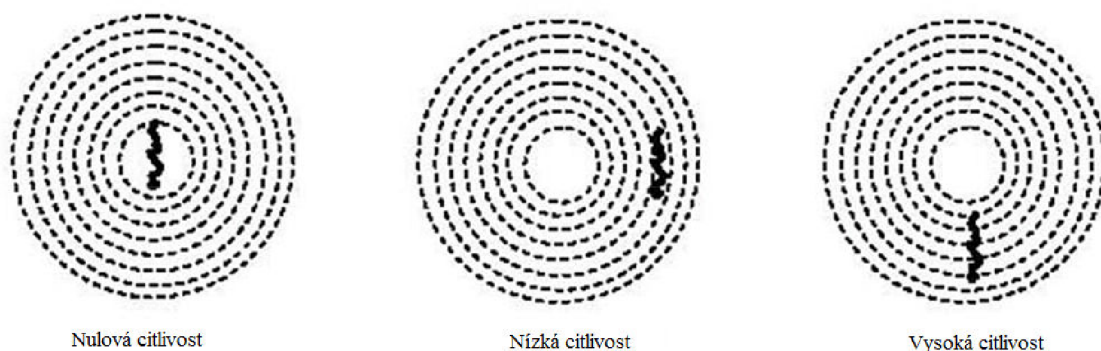
Při testování palivového souboru není omezená hloubka vniku do materiálu problém, protože tloušťka pokrytí je přibližně 0,5 mm [31]. Naopak schopnost detekovat změny v tloušťce materiálu je výhodou. Protože chceme testovat povrch trubiček, je třeba zvolit takový tvar sondy, který zajistí ideální vazbu mezi sondou a povrchem trubičky.

Manipulace se sondou

Jak již bylo uvedeno, při testování ozářených palivových souborů není možné, aby přímo se sondou manipuloval lidský operátor. Důvodem je silná radiace a skutečnost, že palivo musí být během měření umístěno pod vodou. Vzhledem k rozměrům palivového proutku a konstrukci palivového souboru musí navíc toto měření probíhat i v relativně velké hloubce pod hladinou. Proto je měřicí zařízení se sondou ovládáno strojově, měření je automatizováno a nesprávná manipulace se sondou způsobená chybou lidské obsluhy by tak měla být vyloučena.

Nespojitosti materiálu

Nespojitosti v testovaném vzorku způsobují změny v proudění vířivých proudů tím, že indukované proudy musí téci okolo těchto nespojitostí. Nespojitost (např. prasklina) zvyšuje odpor smyčky, kterou protéká vířivý proud, což zmenšuje velikost indukovaného vířivého proudů. Důležitou roli hraje při detekci materiálůvých nehomogenit orientace nespojitosti vůči siločárám vířivých proudů. Ideální případ je, pokud je nespojitost k siločárám kolmá. V případě, že je nespojitost se siločárami rovnoběžná, nemusí být touto metodou detekována, viz Obrázek 16.



Obrázek 16 Citlivost detekce při různé poloze nespojitosti vůči siločárám vířivých proudů převzato z [21] a upraveno

Teplota

Materiály testované metodou vířivých proudů jsou elektricky vodivé. Rezistivita těchto materiálů s rostoucí teplotou stoupá. Je potřeba si uvědomit, že tato závislost platí nejen pro testovaný materiál, ale i pro měřicí cívkou. Protože měření vířivými proudy je měřením komparativním, je třeba, aby referenční vzorky byly měřeny ve stejných podmínkách, v jakých probíhá měření vyhodnocovaného objektu, nebo aby rozdíly v teplotách byly během měření kompenzovány. Při návrhu měřicí metody je třeba také vzít v úvahu rozdíl v teplotě vody ve spodní a horní části palivového souboru, kdy tento rozdíl může dosahovat až desítky stupňů.

Rychlost provádění měření

Rychlost, s jakou je možné posouvat sondou, souvisí s testovací frekvencí, šířkou sondy a šířkou předpokládaných nespojitostí. Parametrem, kterým je vyjádřena možná rychlost měření v závislosti na velikosti defektu a rozměru sondy je rychlost odezvy, která bývá vyjádřena v podobě frekvenční odezvy měřicího zařízení. Ta je popsána rovnicí

$$F_r = \frac{v}{a+b},$$

kde:

- F_r - frekvenční odezva měřicího zařízení v Hz,
- v - rychlost pohybu sondy v mm/s,
- a - šířka sondy v mm,
- b - šířka defektu v mm.

Výsledná rychlost posuvu sondy je dána normou¹⁰ v závislosti na hodnotě F_r . Podle [21] je v praxi šířka defektu uvažována jako nulová a určujícím faktorem je tedy šířka sondy.

5.3.3 Konstrukce snímače

První možné konstrukční uspořádání je takové, kdy je vysílací cívka zároveň cívkou přijímací. Toto provedení je vhodné pro měření všech parametrů, které ovlivňují impedanci cívky. Výsledná impedance je součtem impedance cívky v daném prostředí a impedancí testovaného materiálu z hlediska průchodu vířivých proudů.

Druhé konstrukční uspořádání je takové, kdy je vinutí vysílací cívky oddělené od vinutí přijímacího a sonda tedy obsahuje dvě cívky. V tomto případě je vyhodnocováno napětí indukované na přijímací cívky. Vysílací vinutí je napájeno konstantním proudem, jím vyvolané magnetické pole je konstantní, tzn. je nezávislé na impedanci vysílací cívky. Díky tomuto konstrukčnímu řešení je metoda se dvěma nezávislými cívkami a konstantním generujícím proudem vhodná pro ta měření, při kterých je potřeba eliminovat teplotní vlivy.

5.3.4 Způsoby měření a vyhodnocení

Základní metody měření na bázi vířivých proudů jsou založeny na absolutním, nebo diferenciálním vyhodnocení měřené veličiny.

Absolutní metoda

Sonda je tvořena jednou cívkou, nebo jejím ekvivalentem, který může být složený z více cívek. Měříme přímo hodnotu impedance nebo indukovaného napětí. Při této metodě měříme pouze oblast pod cívkou a nedochází k automatické komparaci s referenčním standardem.

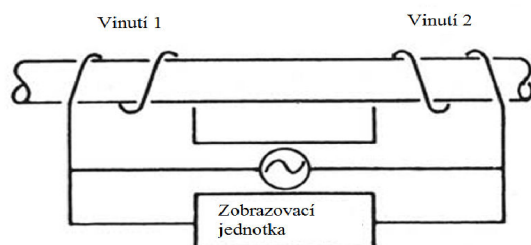
Výhodou této metody je skutečnost, že je citlivá jak na pozvolné, tak na prudké změny ve vlastnostech měřeného vzorku. Další výhodou je, že lze výstupní signál poměrně snadno interpretovat. Naopak nevýhodou této metody je citlivost na změny teploty a citlivost na kmity a vibrace samotné sondy.

Diferenciální metoda

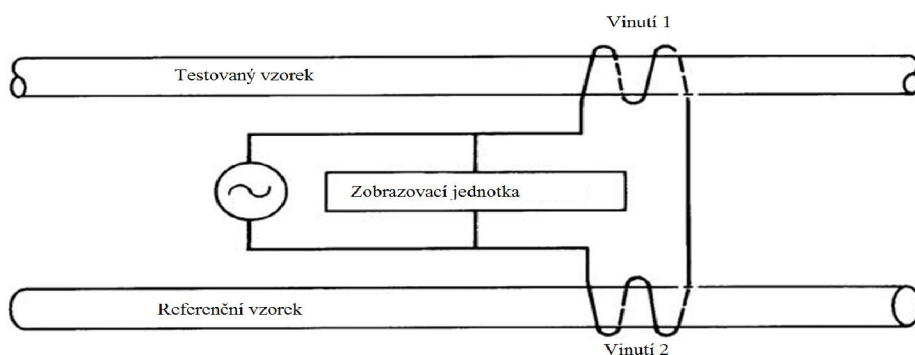
Sonda je složena ze dvou cívek (nebo jedné ekvivalentně zapojené). Tyto dvě cívky jsou zapojeny v opačném směru tak, že jejich celková naměřená impedance nebo indukované napětí jsou nulové v případě, že jsou obě cívky vystaveny stejným podmínkám. Nenulová hodnota bude naměřena pouze v případě, že se testovaný materiál odlišuje od referenčního (nebo jiného místa

¹⁰ Podle [21] existují mezinárodně uznávané normy např. ASME BPVC Section V–Nondestructive Examination

testovaného materiálu) materiálu viz Obrázek 17. Výhodou této metody je, že veškerá rušení ovlivňují oba materiály nebo obě cívky a rušivé vlivy jsou tudíž z měření eliminovány. Nevýhodou této metody je v některých konstrukčních uspořádáních malá citlivost na pozvolné změny vlastností měřeného vzorku.



Diferenciální zapojení jedné cívky, kde referenční signál poskytuje testovaný vzorek



Diferenciální zapojení jedné cívky s použitím referenčního vzorku

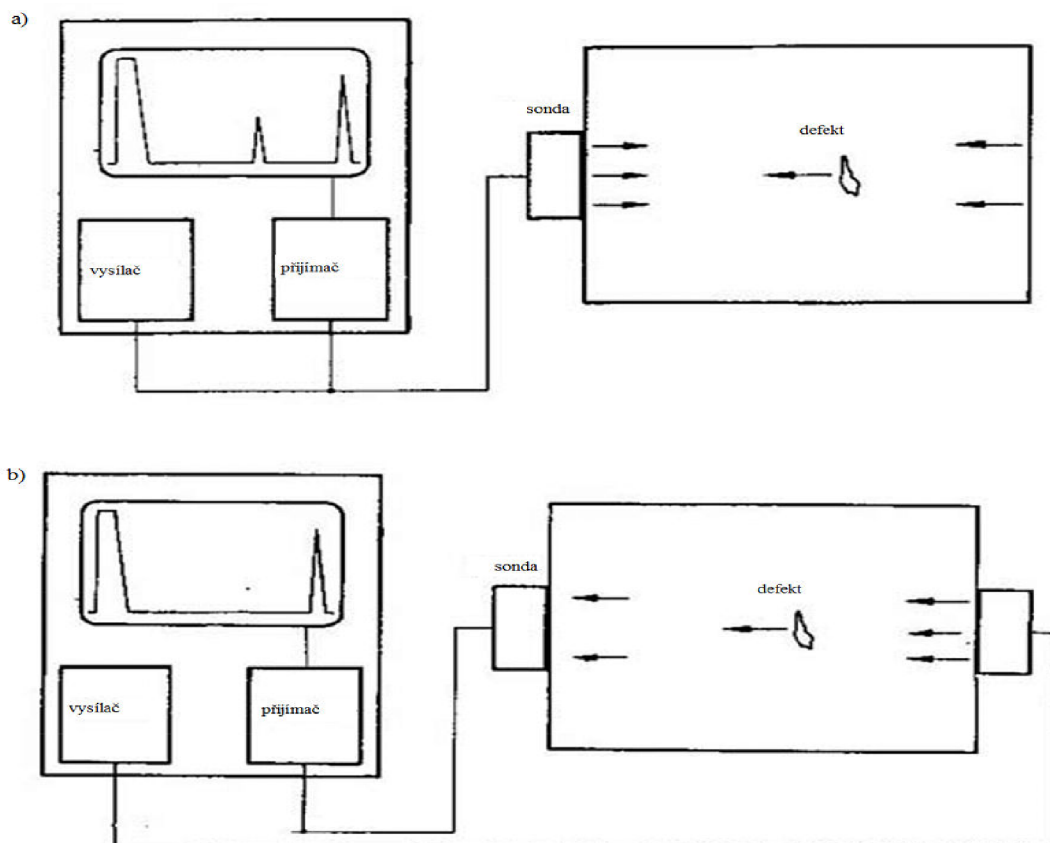
Obrázek 17 Zapojení jedné cívky pro diferenciální metodu. Převzato z [21] a upraveno

5.4 Ultrazvukové testování

Jde o nedestruktivní testovací metodu, která je založena na prozvučování materiálu vysokofrekvenčními zvukovými vlnami (frekvence 0,5-20 MHz). Ultrazvukové testování je používáno buď samostatně, pro ověření zjištění ze sippingu nebo jako přesné určení netěsností zjištěných pomocí diagnostiky na bázi vířivých proudů (ET) [14]. Jsou používány dva různé systémy ultrazvukového prozvučování. V prvním se na testovaný proutek k bočním stěnám připojí dvě sondy, z nichž jedna slouží jako vysílač a druhá jako přijímač – jde o tzv. průchodovou metodu prozvučování. Druhý způsob používá jednu sondu umístěnou na horní část proutku, přičemž tato sonda slouží zároveň jako vysílač i jako přijímač – jde o tzv. odrazovou metodu [32] [13].

„Ultrazvukový signál se šíří prostředím pevným, kapalným i plynným. Pokud signál naráží na rozhraní mezi dvěma prostředími, dochází mimo jiné k odrazu signálů. Tak lze detekovat vadu v daném materiálu, v našem případě netěsnost palivového proutku, kdy je v palivovém proutku přítomno chladivo a tedy další rozhraní. Signál se od tohoto rozhraní odráží a v přijímači detekujeme vadné echo. Pomocí ultrazvuku lze také stanovit tlak a složení plynu v proutku a také lze tuto metodu použít pro inspekci povrchu prozvučením plíživou či povrchovou vlnou, kdy lze takto stanovit vady v povrchové vrstvě.“ [13].

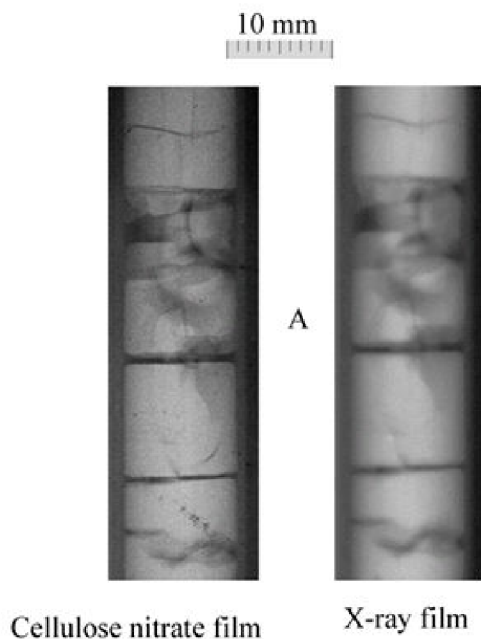
Výhodami jsou vysoká citlivost, největší dosah při průniku ze všech NDT metod, vysoká přesnost v určení místa defektu a možnost použití při přístupu pouze z jedné strany testovaného vzorku. Naopak nevýhodou je různý stupeň citlivosti pro různě orientované defekty, vysoké pořizovací náklady zařízení a nezbytná vysoká kvalifikace obsluhy [21].



Obrázek 18 a) Odrazová metoda b) Průchodová metoda [21]

5.5 Radiografie

Metoda používaná pro zjištění vad materiálu. Podle druhu záření je za zkoumaný vzorek umístěn film určený pro radiografický osvit. Zkoumaný vzorek je následně vystaven určenému druhu záření. Při průchodu záření materiálem se snižuje intenzita záření podle druhu materiálu a v závislosti na struktuře, kterou záření prochází. Záření vystupující ze zkoumaného vzorku pak vytváří stínový obraz reprezentující strukturu vzorku. Pro radiografii je používáno rentgenové, gama nebo neutronové záření. Gama záření je vytvořeno radioisotopy Co-60 (emituje 1,33 a 1,17 MeV) a Ir-192 (emituje 0,31; 0,47 a 0,60 MeV) [21], [33]. Rozlišovací schopnost radiografie závisí na druhu použitého zářiče a filmu [34], vhodnou volbou a optimalizací komponent lze dosáhnout podstatného zvýšení rozlišovací schopnosti, viz Obrázek 19.



Obrázek 19 Rozlišovací schopnosti neutronové radiografie při použití různých filmů [22]

S výhodou je možné radiografii použít při zkoumání rozsáhlejších oblastí. Problematický může být požadavek pro přístup k oběma stranám měřeného vzorku. Další nevýhodou je vysoká cena zařízení a neschopnost určit hloubku defektu v materiálu (ačkoliv je možné určit jeho rozměry [35]).

6 METODY PIE POUŽÍVANÉ VE SVĚTĚ

Většina provozních informací z komerčních elektráren není veřejně přístupná, je proto problematické sestavovat seznamy či tabulky shrnující informace o tom, které metody se kde ve světě využívají. Vzhledem k možnosti čerpat informace pouze z veřejných zdrojů (zejména odborné články v časopisech, konferenční sborníky a marketingové či technické materiály výrobců paliva) by takové přehledy byly velice neúplné, navíc v mnohých případech jsou dostupné informace zastaralé. Z uvedeného důvodu byly v předchozích kapitolách popsány jednotlivé používané metody, aniž by bylo konkretizováno, kde konkrétně se tyto metody v praxi v současné době používají. Nicméně z provedené rešerše je možné alespoň vyvodit celkové trendy v oblasti PIE jaderného paliva v areálu jaderných elektráren.

Jedním z důvodů obtížné dostupnosti konkrétních informací o poradiačních inspekcích na elektrárnách ve světě je skutečnost, že pravidelné a velmi často jediné testování paliva při odstávce provádí dodavatel paliva, který také většinou vlastní testovací zařízení. Dodavatelem paliva je komerční subjekt, který nemá žádnou motivaci informace o palivu, problémech s palivem a jeho testování veřejnosti poskytovat jednak z toho důvodu, že značná část informací má charakter obchodního tajemství, jednak z důvodu, že veřejnost je na informace o jakýchkoliv potenciálních provozních problémech v oblasti jaderné energetiky citlivá.

6.1 Inspekce paliva na jaderných elektrárnách ve světě

Stávající praxe ve světě je taková, že provozovatel elektrárny většinou vlastní testovací zařízení pro sipping a také jej obsluhuje, nicméně velmi často je i toto zařízení dodáváno výrobcem paliva, neboť palivo je často vyráběno pro konkrétní reaktor a tedy i testovací zařízení musí být vyvinuto pro konkrétní technické provedení paliva. Výrobce paliva většinou nabízí provozovateli možnost odkoupit jím vyvinuté zařízení a provozovat jej. Testy při pool-side inspekcích jsou prováděny dodavatelem paliva a využívají metody uvedené v kapitole 8.

V případě, že je při pool-side inspekcích rozpoznán nějaký závažný problém s palivem nebo jeho částí, může dodavatel paliva přistoupit k tomu, že je konkrétní část paliva převezena z prostoru elektrárny do externí laboratoře vybavené prostorami a zařízením pro bezpečnou manipulaci s částmi vyhořelého paliva (horké komory). Zde mohou být tyto komponenty dále detailně zkoumány pomocí metod, které nejsou při pool-side inspekcích dostupné. K tomuto kroku se však přistupuje pouze výjimečně.

Detaily k testovacímu zařízení pro pool-side inspekce i samotná metodologie jsou většinou chráněny dodavatelem a není tedy možné se k těmto informacím běžně dostupnými prostředky dostat a zveřejnit je.

6.2 Řízené národní testování

Zatímco pool-side inspekce probíhají v režii dodavatele paliva nebo provozovatele elektrárny, tak v některých zemích bylo zavedeno ještě centrálně řízené národní testování paliva. V případě tohoto testování se jedná o vytipování souborů a proutků, u kterých je žádoucí převoz k detailnímu zkoumání v horkých komorách. Program tohoto druhu probíhá např. ve Francii a Rusku.

Systematické testování třetí stranou přímo v elektrárně, tak jak probíhá na ETE, kde se na testování paliva podílí Centrum Výzkumu Řež s.r.o., je ve světě neobvyklý. Pokud ve světě dochází k testování paliva třetí stranou, jedná se většinou o výzkum v horkých komorách prováděný mimo areál elektrárny na základě účelového požadavku dodavatele paliva (případně provozovatele elektrárny).

7 PORADIAČNÍ INSPEKCE PALIVA NA JE TEMELÍN

Detekce poškozeného paliva probíhá v první řadě na základě aktivity chladiva, přičemž analýza je zaměřena na detekci přítomnosti štěpných produktů ve formě vzácných plynů (xenon, krypton), dále je detekována přítomnost izotopů jódu a cesia. Na mechanické poškození pokrytí z důvodu otěru (fretting) je usuzováno měřením koncentrace Zr a Nb v chladivu.

Při vyvážení paliva je pak každý palivový soubor kontrolován metodou využívající sipping. Palivový soubor, u kterého je metodou sippingu detekováno podezření na poškození hermetičnosti některého z palivových proutků, je přemístěn do stendu, kde je následně podroben detailní inspekci.

Dále jsou kontrolovány palivové soubory, které jsou vytipovány pro dlouhodobé sledování.

Všechny soubory určené pro kontrolu na stendu jsou nejdříve podrobeny vizuální kontrole. Pro nalezení netěsného palivového proutku v rámci zkoumaného palivového souboru je na stanovišti s mobilním stendem využíván ultrazvuk, kterým je detekována přítomnost chladiva v palivovém proutku.

V případě, že má být opravený palivový soubor znovu zavezen do aktivní zóny, je celý palivový soubor podroben detailní vizuální kontrole, při které se kontroluje mj. i míra hydridace. Po provedení opravy palivového souboru je před jeho umístěním do aktivní zóny opět provedena kontrola hermetičnosti palivových proutků metodou sippingu.

Detekční metody, kterých ETE využívá pro účely PIE, tedy zahrnují:

- analýzu aktivity chladiva a přítomnosti štěpných produktů v chladivu,
- sipping, jako součást zavážecího stroje i zvlášť
- vizuální inspekce paliva
 - zhodnocení stavu konstrukce a pokrytí,
 - kontrola hlavice palivového souboru,
 - měření ohybu a zkrutu a růstu palivového souboru a palivových proutků
- ultrazvukové měření

7.1 Palivo v elektrárně Temelín

Aktivní zónu JE Temelín tvoří 163 hexagonálních palivových souborů, přičemž každý palivový soubor obsahuje 312 palivových proutků. Původním dodavatelem paliva byla firma Westinghouse, od roku 2010 je dodavatelem paliva firma TVEL. Jelikož palivo firmy Westinghouse vykazovalo při provozu poškození, byla konstrukce paliva firmou Westinghouse opakovaně vylepšována - konstrukce palivového souboru byla mechanicky zpevnována a rovněž docházelo ke změně použitého konstrukčního materiálu.

Poškození, které byly u původního paliva firmy Westinghouse i jeho následných modifikací pozorovány, zahrnovaly:

- kroucení palivového souboru,
- růst a prohýbání palivového proutku,

- grid-to rod fretting v místech kontaktu palivového proutku s distanční mřížkou,
- porušení hermetičnosti palivového proutku.

Požadavky na nové palivo tedy zdůrazňovaly tuhost a rozměrovou stálost palivových souborů, kompatibilitu s dosavadním zařízením elektrárny a provozní pružnost [36]. Palivo je možno v reaktoru využívat po dobu pěti až šesti let a kampaň se může pohybovat mezi jedním rokem a osmnácti měsíci. Obohacení paliva je variabilní a také se proměňuje počet proutků s gadoliniem jako vyhořívajícím absorbátorem. Palivový soubor je konstruován jako rozebíratelný pro účely oprav netěsných proutků.

„Palivový soubor je hexagonálního průřezu a má délku cca 4,5m a obsahuje cca 524 kg UO_2 ve 312 palivových proutcích rozmístěných v trojúhelníkové mříži s krokem 12,75 mm. Skládá se ze 4 hlavních částí: svazku palivových proutků, tzv. silového karkazu, snímatelné horní hlavice a dolní patice se zabudovaným debris filtrem pevně spojeným s karkazem.“ [36].

Metody inspekce paliva, které byly na ETE postupně uváděny do provozu, byly navrhovány tak, aby umožnily detekci výše uvedených vad.

7.2 Chemie

Chemická analýza má významné místo při kontrole bezpečnosti paliva. Chemická analýza vody chladiva primárního okruhu je jediný zdroj informací o těsnosti paliva během kampaně.

7.2.1 V průběhu kampaně- γ a α spektroskopie

V průběhu kampaně se každých 24 hodin provádí γ polovodičová spektroskopie. Využívá se germaniový detektor. Tímto způsobem se vyhodnocuje přítomnost radioaktivních izotopů (nejvýznamnější ^{131}I [37]) i celková aktivita chladiva. Pro potvrzení výsledků γ polovodičové spektroskopie se používá α spektrometrie. Podle skupenství radioaktivních částic se usuzuje na druh netěsnosti paliva. Netěsnost může být:

- Plynová – jedná se o drobnou netěsnost, kterou projdou pouze plyny (sledovaným plynem je xenon). Plynová netěsnost se může sama uzavřít po snížení tlaku v proutku, ke kterému dojde po odpuštění plynu do chladiva. Tímto způsobem dojde ke krátkému zvýšení obsahu xenonu v chladivu, ten ovšem rychle vymizí a proutek se po zbytek svého působení v reaktoru může chovat zcela normálně. V případě, že množství xenonu neklesne, tzn., netěsnost se neuzavřela, je potřeba při odstávce najít vadný soubor a tento buď opravit výměnou netěsnícího proutku, nebo vyřadit.
- Otevřená netěsnost – v chladivu je detekována přítomnost kapalných (I, Xe, Cs) nebo pevných částic.

Ke konci kampaně se sledují izotopy cesia a jejich poměr pro určení vyhoření paliva, ze kterého unikly. Z těchto dat následně fyzici určí šestici souborů, ve které se nachází netěsný soubor [38] [37] [38].

7.2.2 Během odstávky-sipping

Při odstávce se u všech palivových souborů provede měření těsnosti metodou sipping. Měřicí zařízení je součástí zavážecího stroje. Toto zařízení odebírá plyny uvolněné z netěsného proutku. Tomuto uvolnění napomáhá změna tlaku při manipulaci se souborem. Zařízení obsahuje NaI detektor (čítač) pro detekci ^{133}Xe . Jde o velmi rychlou (výsledky jsou do dvou minut) a jednoduchou metodu. V případě potřeby dalšího měření je možné provést sipping i pomocí dalšího měřicího zařízení. Toto zařízení nedetekuje Xe, ale Kr. Důvodem je krátký poločas rozpadu ^{133}Xe (5,243 dní [39]). Také doba měření je výrazně delší (okolo dvou hodin) [38] [37] [38].

7.3 PIE za použití MSIO

Jelikož na ETE byla uváděna do provozu unikátní kombinace západní a východní technologie, byl vytvořen *Program poradiačního hodnocení paliva*, který si za primární cíl kladl potvrdit kompatibilitu „západních“ materiálů palivového souboru s „východní“ technologií reaktoru VVER. Sekundárním cílem pak bylo umožnit lepší využití paliva formou oprav palivových souborů, neboť palivo firmy Westinghouse pro VVER 1000 bylo konstruováno jako rozebíratelné. Již vyvinutá technologie inspekce paliva byla po přechodu na palivo od nového dodavatele adaptována na nové palivo.

Pro účely poradiační inspekce na ETE slouží *Mobilní stend inspekci a oprav*. Tento stend byl původně provozován firmou Westinghouse. Stend je konstruován jako mobilní a proto bývá během odstávek využíván na obou blocích. Mezi odstávkami je mobilní stend demontován a jeho části jsou uskladněny ve skladu čerstvého paliva.

Tento mobilní stend je vybaven:

- kamerovým systémem pro účely vizuální kontroly,
- měřicím systémem pro rozměrová měření

7.3.1 Vizuální kontrola a rozměrové měření

Při vizuální kontrole se pomocí kamery prohlédnou všechny strany palivového souboru. V rámci rozměrových měření se měří délka za pomoci kamery a počítačového zpracování podle souřadného systému vozíku. Za pomoci referenčních pravítek umístěných na stendu se měří průhyb. A posledním rozměrovým měřením je měření zkrutu, při kterém je hlavice napevno uchycená a vyhodnocuje se, jak je natočená patice palivového souboru vůči hlavici [4].

7.3.2 Ultrazvukové měření

Ultrazvukové měření provádí dodavatel paliva za pomoci ultrazvuku, který má 52 sond, které pracují zároveň (pro změření všech proutků jednoho palivového souboru je třeba změnit šestkrát polohu). Pro měření je třeba sundat hlavici souboru a mechanicky umístit měřicí zařízení se sondami na vršky palivových proutků.

Měření má výhody v tom, že je možné změřit každá palivový proutek pomocí rychlé a přesné měřicí metody. Nevýhodou je nutnost sundání hlavice palivového souboru (roste riziko poškození souboru a časová náročnost manipulace) [4].

Návrh na vylepšení PIE na ETE

Při návrhu zlepšení stávajícího stavu inspekci probíhajících na ETE je třeba vycházet ze současného stavu testování paliva na ETE, který byl popsán v kapitole 7. Z porovnání ve světě používaných metod uvedených v kapitole 5 a metod používaných v současné době na ETE tak, jak byly uvedeny v kapitole 7, vyplývá, že metodou v současné době na ETE nevyužívanou je metoda vířivých proudů.

Metodu vířivých proudů je možné použít k testování různých vad palivového pokrytí, přičemž významnou výhodou této metody je její schopnost odhalovat lokální defekty dříve, než jsou tyto defekty detekovatelné metodami optickými a především dříve, než se tyto lokální defekty projeví selháním hermetičnosti palivového souboru.

V dalším textu budou uvedeny možnosti využití metod na bázi vířivých proudů za účelem detekce konkrétních vad se shrnutím jejich případné vhodnosti pro zdokonalení poradiační inspekce v ETE.

- Vyhledávání prasklin: Jedná se o běžné použití metody vířivých proudů, přičemž metoda vířivých proudů vykazuje v oblasti detekce prasklin velmi dobré výsledky. V případě nasazení v ETE je pro účely vyhledávání prasklin je však třeba uvážit, že netěsnosti v palivu vznikají především otěrem palivového pokrytí o distanční mřížku a tudíž se praskliny nejčastěji nachází v prostoru pod distanční mřížkou. Použití metody pro identifikaci těchto prasklin by bylo velmi náročné a vzhledem k tomu, že je na ETE pro účely vyhledávání prasklin již využíván ultrazvuk, bylo by zřejmě nadbytečné.
- Měření tloušťky oxidických vrstev: Vzhledem k chemickému režimu chladiva primárního okruhu jsou proutky prakticky bez úsad. Při současném chemickém režimu není třeba takové měření provádět.
- Měření vodivosti: Měřením vodivosti lze identifikovat změny v druhu materiálu pokrytí. Takovou změnou je např. hydridace materiálu pokrytí. Vodivost je charakteristická vlastnost materiálu a jako taková bude odlišná pro materiál pokrytí a jeho hydridů. Tuto metoda nelze použít pro feromagnetika, ale relativní permeabilita materiálu Zircaloy je $\mu_r=1$ [29] a tedy je možné tuto metodu pro stanovení míry hydridace využít. Jak již bylo uvedeno v kapitole 4.7, představuje hydridace pokrytí palivových proutků jednu z nejčastějších příčin selhání paliva v lehkovodních reaktorech [17]. Lze se tedy pracovat s hypotézou, že měření míry hydridace palivových proutků bude pro ETE přínosem.

Z výše uvedeného souhrnu je zřejmé, že pro doplnění stávajícího programu testování ozářeného paliva na ETE se jako nejvhodnější jeví vyhledávání hydridací měřením vodivosti s využitím vířivých proudů.

Samotné měření by mohlo probíhat za pomoci n sond spojených dohromady tak, že by bylo možné testovat vždy jednu stranu hexagonu naráz. Pracovní frekvence obvyklá pro tento typ měření je $f=60$ kHz, protože palivové pokrytí je velmi tenké, je třeba volit frekvenci vyšší. V praxi se volí nejnižší možná hodnota tak, aby hloubka vniku odpovídala zamýšlené aplikaci. Přesnou velikost pracovní frekvence je třeba určit za pomoci experimentálního ověření. Dalším

důležitým aspektem výběru sondy je zakřivení testovaného povrchu. Pro povrchy s velmi malým průměrem je potřeba zavést vhodnou korekci. Signál naměřený sondou by následně prošel zpracováním a výsledná podoba signálu by poté byla vyhodnocena proti databázi referenčních signálů.

Výše navržená testovací metoda je z prostorových důvodů omezena na testování okrajových proutků palivového souboru, nicméně z provozních zkušeností provozovatele je zřejmé, že k poruše dochází ve většině případů u krajních proutků. Možnost testovat pouze krajní proutky proto nepředstavuje zásadní problém z hlediska praktické použitelnosti navržené metody.

Dalšími důležitými aspekty, které bude nutné při záměru zdokonalit PIE na ETE nezbytné analyzovat, jsou časové a finanční náklady vylepšení v porovnání s potenciálním přínosem nově zavedeného testování. Ekonomickou stránku zavedení měření na bázi vířivých proudů není možné v rámci této práce určit, protože nezbytné informace nejsou veřejně dostupné.

8 ZÁVĚR

Cílem práce bylo zpracovat detailní přehled metod inspekci ozářených palivových souborů (PWR, BWR a VVER), porovnat metody inspekce používané ve světě s metodami používanými v ČR a následně na základě uvedeného porovnání provést analýzu možností inovovat inspekce na ETE.

Rešeršní část práce byla zaměřena pouze na takové poruchy paliva a metody jejich detekce, které jsou relevantní pro provoz komerčních lehkou vodou chlazených a lehkou vodou moderovaných reaktorů. Případné experimentální metody, které jsou vhodné pro nekomerční (např. výzkumné) jaderné reaktory, nebyly zvažovány, neboť cílem práce bylo hledat možné zdokonalení inspekci na ETE.

Během postupného seznamování se s problematikou poradiačních inspekci paliva a také během návštěvy závodu na výrobu jaderného paliva firmy Westinghouse ve Švédském Västerås změnila část práce zaměřená na rešerši ve světě používaných inspekčních metod výrazně svou podobu, neboť se ukázalo, že většina provozních informací z komerčních elektráren není veřejně přístupná. Původní záměr sestavit seznam či tabulku shrnující informace o tom, které metody se kde ve světě využívají, se ukázal jako velmi problematický. Vzhledem k možnosti čerpat informace pouze z veřejných zdrojů by takový přehled byl velice neúplný, navíc v mnohých případech jsou veřejně dostupné informace zastaralé. I přes uvedenou komplikaci se mi však z dostupných informací podařilo vytvořit souhrn diagnostických metod inspekce paliva, které jsou ve světě používány, aniž by však bylo možné konkretizovat zahraniční elektrárny, na kterých se daná metoda v současné době skutečně užívá.

Ze studia informací o inspekčních metodách používaných na ETE vyplynulo, že vzhledem k vysokým nákladům na palivo i vysokým nárokům na radiační bezpečnost byl již od počátku provozu JE Temelín kladen velký důraz na optimalizaci procesů souvisejících s opravami paliva. Již provedená důsledná implementace metod poradiační inspekce paliva na ETE zřejmě rovněž souvisí se skutečností, že původní palivo dodávané firmou Westinghouse bylo opravitelné. Z hlediska ekonomiky provozu ETE bylo od počátku žádoucí, aby byly metody inspekce paliva koncipovány s cílem identifikovat konkrétní vadné palivové proutky. Po přechodu na palivo dodavatele TVEL byly metody poradiační inspekce adaptovány na toto nové palivo. Z provedené rešerše metod používaných ve světě a metod používaných na ETE lze usuzovat, že na ETE je využívána většina významných, ve světě běžně používaných detekčních metod. Prostor pro další zlepšení je relativně malý. Nicméně ukázalo se, že možné zlepšení inspekčních procesů lze nalézt v oblasti využití detekčních metod na bázi vířivých proudů.

Navržené doplnění stávajícího programu testování ozářeného paliva na ETE o diagnostiku na bázi vířivých proudů umožní vyhledávání hydridací palivového proutků. Navržená testovací metoda je z prostorových důvodů omezena na testování okrajových proutků palivového souboru. Možnost testovat pouze krajní proutky však nepředstavuje zásadní problém, neboť z provozních zkušeností provozovatelů elektráren je známo, že k poruše dochází ve většině případů u krajních proutků.

Ekonomickou rozvahu navrženého zlepšení nebylo možné v rámci této práce zpracovat, neboť nezbytné informace nejsou veřejně dostupné.

CITOVANÁ LITERATURA

- [1] P. Kučera, *Fault Tolerant Systémy*. Květen: CAK VUT Brno, 2014, <http://sciotech.cz/tc/mrts.php>.
- [2] P. Darilek and Alonso J.M. Pacheco, "SESSION I: GENERAL OVERVIEW OF PRESENT STATUS OF EXPERIENCE," in *Fuel failure in water reactors: Causes and mitigation. Proceedings of a Technical Meeting held in Bratislava, Slovakia, 17-21 June 2002*. Vídeň: IAEA, 2003, pp. 1-2.
- [3] Ronald Allen Knief, *Nuclear Engineering: Theory and technology of Commercial Nuclear Power*. La Grange Park, IL: American Nuclear Society, Inc., 2008.
- [4] M. Malá, *Konzultace*, Březen 2014.
- [5] Knief R. A., *Nuclear Engineering: Theory and technology of Commercial Nuclear Power*. La Grange Park, IL: American Nuclear Society, Inc., 2008.
- [6] J. Raček, *Jaderná zařízení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Ústav elektroenergetiky Technická 2848/8, 616 00 Brno, 2009.
- [7] Donald R. Olander, "Nuclear Fuels: present and future," *Engineering Journal*, vol. 13, no. 1, pp. 1-27, Leden 2009, <http://www.engj.org/index.php/ej/article/viewFile/30/25>. [Online]. <http://www.engj.org/index.php/ej/article/viewFile/30/25>
- [8] M. Malá and M. Mikloš, *The role of CVR in the fuel inspection at Temelin NPP*. Smolenice, Slovakia, 2011.
- [9] T. Sato and T. Matsuoka, "Development of RCC guide thimble distortion inspection equipment," in *Poolside inspection, repair and reconstitution of LWR fuel elements*. Vídeň: IAEA, Listopad 1998, pp. 35-39.
- [10] X. Yuanhuan and N. Yong, "Distortion measurement for fuel assemblies with ultrasonic technique," in *Post-Irradiation Examination and In-Pile Measurement Techniques for Water Reactor Fuels*. Vídeň: IAEA, 2009.
- [11] Savage a kol., "Radiation-Induced Swelling in Stainless Steel Weld Metal," no. February, pp. 25-36, Únor 1981.
- [12] T. Matsuoka, "Fuel Assembly configuration image analyzer," in *Poolside inspection, repair and reconstitution of LWR fuel elements*. Vídeň: IAEA, Listopad 1998, pp. 29-34.
- [13] M. Malá, *Inspekce a opravy paliva na JE Temelin*. Řež, 2010.
- [14] S. Basu and P. Narasimha Rao, "Poolside inspection facility for PWR fuel assemblies," in *Poolside inspection, repair and reconstitution of LWR fuel elements*. Vídeň: IAEA, Listopad 1998, pp. 71-80.
- [15] W. Klinger and A. Bykov, "Session II: Mitigation of failures by design and manufacturing," in *Fuel failure in water reactors: Causes and mitigation*. Vídeň: IAEA, 2003, p. 3.
- [16] Pastoushin a kol., "Thermophysical instruments for non-destructive examination of tightness and internal gas pressure of irradiated power reactor fuel rods," in *Poolside inspection, repair and reconstitution of LWR fuel elements*. Vídeň: International Atomic Energy Agency, Listopad 1998, pp. 41-51.
- [17] D. R. Olander and S. Vaknin, *Secondary hydriding of defected zircaloy-clad fuel rods*. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 1993.
- [18] Evdokimov a kol. (2014, Květen) NEA Nuclear Energy Agency. [Online]. <https://www.oecd-nea.org/science/wprs/fuel/Secondary%20hydriding.pdf>
- [19] *Poskytnuto firmou Westinghouse Electric Sweden*.

- [20] K. McAlpine. (2014, Květen) Michigan Engineering University of Michigan. [Online]. <http://www.engin.umich.edu/college/about/news/stories/2012/november/nuclear-crud>
- [21] IAEA, *Eddy current testing at level 2: Manual for the syllabi contained in IAEA-TECDOC-628.Rev. 2 "Training Guidelines for non destructive testing techniques"*. Vienna: IAEA, 2011, vol. Training Course Series 48.
- [22] K. Knecht, "New inspection and reconstitution techniques for fuel assemblies increase power plant efficiency," in *Poolside inspection, repair and reconstitution of LWR fuel elements*. Vídeň: IAEA, Listopad 1998, pp. 15-27.
- [23] Serna a kol., "SICOM: On-site inspection systems," in *Advanced post-irradiation examination techniques for water reactor fuel*: IAEA, Březen 2002.
- [24] A. Zawerucha and G. Ruggirello, "Applied monitoring methods for the control of fuel elements and reactor internals in Argentine nuclear power plants poolsides facilities," in *Poolside inspection, repair and reconstitution of LWR fuel elements*. Vídeň: International Atomic Energy Agency, Listopad 1998, pp. 7-12.
- [25] Deng a kol., "The research and development of the in-mast sipping test device," in *Poolside inspection, repair and reconstitution of LWR fuel elements*. Vídeň: International Atomic Energy Agency, Listopad 1998, pp. 117-121.
- [26] R. Deleryd, "Telescope sipping: The optimum fuel leak detection system," in *Poolside inspection, repair and reconstitution of LWR fuel elements*. Vídeň: IAEA, Listopad 1998, pp. 53-58.
- [27] (2009, Květen) Westinghouse: Products and Services. [Online]. http://www.westinghousenuclear.com/Products_&_Services/docs/flysheets/NS-FS-0046.pdf
- [28] Joseph M. Buckley. (2014, Květen) An introduction to eddy current testing theory and technology. [Online]. <http://joe.buckley.net/papers/eddyc.pdf>
- [29] Honji a kol., *On Zirconium Liner Tubes*. Philadelphia, PA: ASTM, 1989, http://books.google.cz/books?id=FwKsj0NjoR8C&pg=PA395&lpg=PA395&ots=ebZwpmWP r9&focus=viewpport&dq=zircaloy+permeability&hl=cs&output=html_text.
- [30] (2013, Prosinec) NDT Resource Center. [Online]. http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/cc_ec_index.htm
- [31] Westinghouse Electric Company Sweden, *Řednáška o výrobě paliva*. Švédsko: 25.4.2014.
- [32] S. Pavlov and V. Smirnov, "Experience of development of the methods and equipment and the prospects for creation of WWER fuel examination stands," in *Poolside inspection, repair and reconstitution of LWR fuel elements*. Vídeň: IAEA, Listopad 1998, pp. 89-100.
- [33] (2013, Prosinec) NTD Resource Center. [Online]. http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/cc_rad_index.htm
- [34] B. C. Oberlinder and H. K. Jenssen, "Improvements in PIE-techniques at the IFE hot-laboratory: Neutron radiography, three dimensional profilometry and image compilation of PIE data for visualization in an omage based user-interface," in *Advanced post-irradiation examination techniques for water reactor fuel*. Vídeň: IAEA, 2002, pp. 49-72.
- [35] Chaudhary a kol., "Defect sizing of post-irradiated nuclear fuels using grayscale thresholding in their radiographic images," *Nuclear Engineering and Design 240*, pp. 3455-3461, May 2010.
- [36] P. Veselý and S. Štech, "Nové palivo TVSA-T v Temelíně," *Bezpečnost` jadrovej energie*, no. 18, 2010.
- [37] M. Andrlík, Z. Pávková, and M. Martykán, "Hodnocení těsnosti pokrytí paliva na jaderné elektrárně Temelín," in *Lectures of the workshop on radioanalytical methods IAA 10*: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/42/039/42039992.pdf (28.5.2014), 2010.

- [38] Z. Pávková, *Konzultace.*, Únor 2014.
- [39] (2014, Květen) Nuclear data. [Online].
<http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/listnuc.asp?sql=&A1=133&A2=133>
- [40] J. W. Jewett and R. A. Serway, *Physics fo Scientists and Engineers with Modern Physics*, International Student Edition ed. Kanada: BROOKS/COLE CENGAGE Learning, 2010.