



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

ANALÝZA NEJČASTĚJŠÍCH PŘÍČIN POŠKOZOVÁNÍ JADERNÉHO PALIVA ZA PROVOZU REAKTORU

ANALYSIS OF THE MOST COMMON CAUSES OF NUCLEAR FUEL FAILURES DURING
OPERATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MARTIN JEŽEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. KAREL KATOVSKÝ, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Bc. Martin Ježek

ID: 125234

Ročník: 2

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Analýza nejčastějších příčin poškození jaderného paliva za provozu reaktoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Provést analýzu nejčastějších příčin poškození palivových souborů ve světě (PWR, BWR a VVER).
2. Provést analýzu poškození paliva se zaměřením na poškození konstrukce palivového souboru.
3. Provést analýzu dostupných dat z oprav palivových souborů na jaderných elektrárnách ve světě (PWR, BWR a VVER).
4. Porovnat metody oprav palivových souborů a metody měření deformací konstrukce palivového souboru ve světě s podmínkami na JE Temelín a provést analýzu přenositelnosti zkušeností na podmínky ETE.
5. Navrhnout metodu pro měření deformace palivových souborů aplikovatelnou na JE Temelín.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího a konzultantky práce

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 23.5.2014

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

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

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

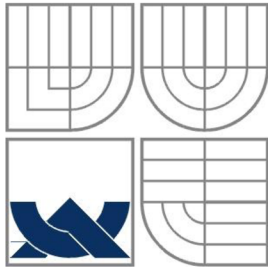
Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných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

Bibliografická citace práce:

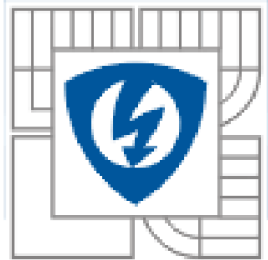
JEŽEK, M. *Analýza nejčastějších příčin poškození jaderného paliva za provozu reaktoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 68 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Katovský, Ph.D..

Jako autor uvedené diplomové (bakalářské) práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové (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.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky**

Diplomová práce

**Analýza nejčastějších příčin
poškození jaderného paliva
za provozu reaktoru**

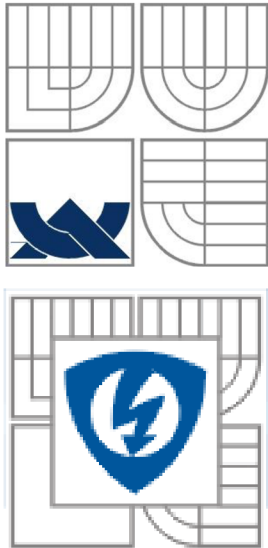
Bc. Martin Ježek

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**

Master's Thesis

Analysis of the most common causes of nuclear fuel failures during operation

by

Bc. Martin Ježek

Supervisor: Ing. Karel Katovský, Ph.D.

Co-supervisor: Ing. Martina Malá

Brno University of Technology, 2014

Brno

ABSTRAKT

Poškozování paliva během provozu reaktoru je ve světě celkem běžným jevem. Teoretická část této práce se věnuje příčinám tohoto poškozování a jsou zde uvedeny mechanismy vzniku poškození a případná opatření proti jejich dalšímu výskytu. Vhodnou metodou sledování paliva během provozu je možné včas podchytit nepříznivé trendy v chování paliva, které by mohly mít vliv na bezpečnost provozu elektrárny. Tím může být například nadměrný průhyb palivového souboru, případně palivového kanálu, který ovlivní funkci kontrolních a regulačních orgánů. Inspekčním a opravám paliva se věnuje další část práce, kde jsou popsány běžně používané inspekční metody. Práce se blíže orientuje na jadernou elektrárnu Temelín, kde byl zaveden poradiační inspekční program z důvodu ověření kompatibility paliva společnosti Westinghouse s chemickým režimem reaktoru typu VVER. Program zůstal zachován i po změně dodavatele paliva. V praktické části práce je pak proveden předběžný návrh nové ultrazvukové metody měření deformace palivového souboru pro jadernou elektrárnu Temelín. Tento návrh je podpořen měřeními na experimentálním zařízení pro detekci polohy distanční mřížky vyvinutém v Centru výzkumu Řež.

KLÍČOVÁ SLOVA: Poškozování paliva; inspekce paliva; opravy paliva; Temelín, ultrazvuk

ABSTRACT

Nuclear fuel failures during the reactor operation happen quite often in the world. The theoretical part of this thesis is dedicated to the most common causes of nuclear fuel failures. It describes failure mechanism and corrective actions. The unfavorable trends in nuclear fuel behavior are prevented by suitable method of nuclear fuel monitoring. Some of them may affect the safety of the power plant. For example, the fuel assembly bow affects the function of rod cluster control assembly. Another part, which describes inspection methods, is devoted to inspection and repair of nuclear fuel. The thesis concentrates on the Temelin NPP, where there was implemented post-irradiation inspection program for checking compatibility between Westinghouse's fuel assemblies and water chemistry of reactor VVER. This program continues even after the change of nuclear fuel supplier. Practical part of this thesis is dedicated to proposal of a new method of fuel assembly bow measurement for Temelin NPP based on ultrasound. This proposal is supported by measurement on the experimental device for detection of spacer grid position developed by Research Centre Rez.

KEY WORDS: Fuel failure; fuel inspection; fuel repair; Temelin; ultrasound

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	12
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
1 ÚVOD.....	14
2 NEJČASTĚJŠÍ PŘÍČINY POŠKOZOVÁNÍ PALIVA	15
2.1 OTĚR PALIVOVÉHO PROUTKU O DISTANČNÍ MŘÍŽKU	15
2.2 OTĚR NEČISTOTAMI.....	16
2.3 KOROZE	17
2.4 INTERAKCE PALIVOVÝCH TABLET S POKRYTÍM.....	19
2.5 VÝROBNÍ VADY.....	20
2.6 PŘÍČNÝ TOK.....	21
2.7 HYDRIDACE	23
2.7.1 PRIMÁRNÍ HYDRIDACE.....	24
2.7.2 SEKUNDÁRNÍ HYDRIDACE.....	24
2.8 ZHROUCENÍ POKRYTÍ	25
3 POŠKOZOVÁNÍ KONSTRUKCE PALIVOVÉHO SOUBORU.....	26
3.1 PRŮHYB PALIVOVÉHO SOUBORU.....	26
3.1.1 PWR.....	26
3.1.2 VVER	28
3.2 DEFORMACE PALIVOVÉHO KANÁLU	31
4 INSPEKCE A OPRAVY PALIVOVÝCH SOUBORŮ.....	33
4.1 INSPEKCE.....	33
4.1.1 SIPPING	33
4.1.2 KONTROLA INTEGRITY POKRYTÍ.....	35
4.1.3 VIZUÁLNÍ INSPEKCE.....	40
4.1.4 KONTROLA ROZMĚRŮ A DEFORMACE.....	42
4.1.5 DALŠÍ INSPEKCE.....	46
4.2 OPRAVY PALIVA	49
4.3 JADERNÁ ELEKTRÁRNA TEMELÍN	50
4.3.1 INSPEKCE PALIVA.....	51
4.3.2 OPRAVY PALIVA	51
5 MĚŘENÍ DEFORMACÍ NA ETE.....	54
5.1 SOUČASNOST	54
5.2 NOVÁ METODA	54
5.2.1 ULTRAZVUK.....	54
5.2.2 MĚŘENÍ	57
6 ZÁVĚR.....	61

POUŽITÁ LITERATURA	63
PŘÍLOHA A – TABULKY NAMĚŘENÝCH HODNOT	67

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1: Příklad otěru proutku o distanční mřížku (grid to rod fretting).....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 2-2: Poškození palivového proutku cizím předmětem</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 2-3: Příklad anti - debris filtru (TripleWave od firmy Westinghouse)</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 2-4: Příklad koroze</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2-5: Stínová koroze</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 2-6: Interakce paliva s pokrytím a následné korozní praskání (SCC).....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 2-7: Modifikované pokrytí paliva.....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 2-8: Původní design vnitřní vestavby.....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 2-9: Upravený design vnitřní vestavby</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 2-10: Hydridace pokrytí.....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 2-11: Poškození pokrytí hydridací</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 2-12: Příklad zhroucení pokrytí.....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 3-1: Příklad průhybu palivového souboru.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 3-2: Příklad průhybu souboru na Ringhals 4 a Ringhals 3</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 3-3: Typické rozložení průhybu pro EDF 1300 MW</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 3-4: Průhyb a vyboulení kanálu u BWR</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 4-1: Vylepšený systém TELESCOPE Sipping pro AP1000.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 4-2: Zařízení pro kontrolu integrity pokrytí vířivými proudy</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 4-3: Výstup metody vířivých proudů pro různé defekty</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 4-4: Detekce primárního a následného sekundárního defektu</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 4-5: Zařízení pro kontrolu řídicích a regulačních orgánů</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 4-6: Schematické znázornění funkce ultrazvukové kontroly PP společnosti WEC.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 4-7: Zařízení pro ultrazvukovou kontrolu společnosti Areva</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 4-8: Princip ultrazvukové kontroly palivového proutku</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 4-9: Zařízení pro ultrazvukovou kontrolu pro rektory VVER 1000.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 4-10: Tubusová kamera Visatec VT 4065 RR.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 4-11: Mezera mezi sousedními palivovými proutky.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 4-12: 4-Face inspekční systém pro fuel building.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 4-13: 4-Face inspekční systém.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 4-14: LVDT senzor.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 4-15 : Zařízení SICOM-DIM</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 4-16: Zařízení pro ultrazvukové měření deformace palivového kanálu</i>	<i>45</i>

<i>Obr. 4-17: Software pro měření průhybu.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 4-18: Schematické znázornění měření mezery mezi pokrytím a palivem.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 4-19: Diagram zatěžovací síly</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 4-20: Schematické znázornění měření oxidické vrstvy</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 4-21: Zařízení pro měření tloušťky oxidické vrstvy periferních proutků SICOM-COR</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 4-22: Zařízení pro opravu palivových souborů společnosti FRAMATOME</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 4-23: Poškození proutku otěrem o distanční mřížku.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 5-1: Konstrukce palivového souboru TVSA-T</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 5-2: Zařízení pro měření pozice distanční mřížky</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 5-3: Naměřené hodnoty posunutí distanční mřížky</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 5-4: Naměřené hodnoty pootočení distanční mřížky</i>	<i>60</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 3-1 Počet nedosednutých klastrů v letech 2005 - 2008 pro oba bloky JE Temelín</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 4-1: Seznam uměle vytvořených defektů</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 4-2: Cena paliva vztážená na 1kg</i>	<i>52</i>
<i>Tab. A-1: Naměřené hodnoty posunutí distanční mřížky</i>	<i>67</i>
<i>Tab. A-2: Naměřené pootočení distanční mřížky</i>	<i>68</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

AFA	Advanced Fuel Assembly
AFIS	Automated Fuel Inspection System
AZ	Aktivní zóna
BWR	Boiling Water Reactor
CCD	Charge-Coupled Device
CICL	Crud Induced Localized Corrosion
CVŘ	Centrum výzkumu Řež
EDF	Électricité de France
ETE	Elektrárna Temelín
H ₂ O	Voda
HVB 1	Hlavní výrobní blok 1
HVB 2	Hlavní výrobní blok 2
JE	Jaderná elektrárna
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
PP	Palivový proutek
PS	Palivový soubor
PWR	Pressurized Water Reactor
SCC	Stress Corrosion Cracking
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
TIG	Tungsten Inert Gas
UO ₂	Oxid uraničitý
USA	United States of America
VVER	Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor
WEC	Westinghouse Electric Company
ZrO ₂	Oxid zirkoničitý

1 ÚVOD

Elektrická energie se stala nedílnou součástí lidského života, a to především proto, že ji lze relativně snadno vyrobit, přenést a přeměnit v jinou formu energie. S růstem životního komfortu roste i spotřeba elektrické energie, kterou bude nutné pokrýt vhodnými zdroji. Použití obnovitelných zdrojů je možné jen v omezené míře a zásoby fosilních paliv se tenčí. Jejich spalováním se navíc do atmosféry uvolňuje nezanedbatelné množství skleníkových plynů. Jako vhodný zdroj se tedy jeví jaderné elektrárny, které neprodukují téměř žádné skleníkové plyny a v jejich prospěch hraje i cena vyrobené elektřiny. Zásoby materiálu pro výrobu jaderného paliva bez recyklace vystačí asi na 85 let. Pokud by se ale vyhořelé jaderné palivo recyklovalo, vystačí zásoby přibližně na 2,5 tisíce let. To dělá z jaderné energetiky velmi perspektivní zdroj do budoucna. [1]

Jednou z nejsledovanějších součástí jaderné energetiky je otázka bezpečnosti. Bezpečnostní a řídicí systémy se neustále vyvíjejí, což umožňuje spolehlivější a bezpečnější provoz jaderných zařízení. Jedním ze základních požadavků pro bezpečný a spolehlivý provoz je zachování hermetičnosti paliva. Během provozu však může dojít k poškození paliva z různých příčin. Každý projekt jaderné elektrárny počítá se vznikem určitého počtu netěsností. Jejich počet je omezen bezpečnostními analýzami a schopnostmi čistících systémů a je stanoven v limitech a podmínkách bezpečného provozu. [2]

Vhodnými metodami sledování paliva během provozu je možné předcházet stavům, které by mohly ovlivnit bezpečnost provozu elektrárny a včas zachytit nepříznivé trendy v chování paliva během provozu reaktoru. K těmto technikám sledování paliva patří například sipping, vizuální inspekce, kontroly hermetičnosti palivových proutků ultrazvukovou metodou nebo měření deformace palivových souborů, případně palivových kanálů. Tyto metody navíc mohou poskytovat zpětnou vazbu výrobcům paliva a pomoci tak ke zdokonalení jejich produktů. Mohou také poskytnout zpětnou vazbu provozovatelům elektrárny, na základě které mohou být zlepšeny provozní podmínky.

2 NEJČASTĚJŠÍ PŘÍČINY POŠKOZOVÁNÍ PALIVA

Poškození paliva během provozu v jaderném reaktoru je celkem běžný jev. Spolehlivost pokrytí se neustále zvyšuje s vývojem nových materiálů a nových designů palivových souborů. V této kapitole jsou stručně shrnuty hlavní známé příčiny poškození palivových souborů.

2.1 Otěr palivového proutku o distanční mřížku

Otěr palivového proutku o distanční mřížku (grid-to-rod fretting) je jedním z nejčastějších typů poškození paliva. Jako hlavní příčina tohoto poškození byla shledána nedostatečná podpora palivového proutku v distanční mřížce kvůli jejímu nepříliš vhodnému návrhu nebo provedení. V důsledku turbulencí proudění chladicí kapaliny pak dochází k vibracím proutku a následnému otěru o distanční mřížku.



Obr. 2-1: Příklad otěru proutku o distanční mřížku (grid to rod fretting) [4]

Turbulence jsou přítomny vždy, zejména ve spodní části palivového souboru, kde vstupuje chladicí kapalina přes spodní mřížku. K poškození paliva dojde, pokud tyto turbulence vzniknou ve vyšším místě, než se předpokládalo při návrhu, nebo pokud není dostatečná podpora distanční mřížky. Většinou byl tento jev zaznamenán na souborech v plánovaném posledním cyklu, kdy byly umístěny v okolí středu aktivní zóny. [7]

Tento jev klade velké nároky na designéry jaderného paliva, především z důvodů požadavků do budoucna na vyšší vyhoření. Výskyt otěru palivového proutku o distanční mřížku je závislý na mnoha fyzikálních faktorech, které nejsou během provozu reaktoru konstantní. Ze zdrojů [5], [6] a [7] vyplývá, že tento typ opotřebení závisí hlavně na několika parametrech. Jedním z nich je velikost průtoku chladiva, který může vyvolat vibrace palivových proutků. Jeho velikost se odvíjí od designu reaktoru. Dalšími parametry jsou pak vlastnosti distanční mřížky. Konkrétně materiál, ze kterého je vyrobena, velikost styčné plochy s palivovým proutkem, přitlačná síla pružiny a její změna během provozu vlivem relaxace. To znamená, že při větším toku chladiva, který způsobí vibrace, při větší mezeře mezi distanční mřížkou a palivovým proutkem, při menší ploše dotyku mřížky a proutku a při měkčím materiálu pokrytí, je pravděpodobnost výskytu otěru mnohem větší. [7]

Řešením tohoto problému je změna designu paliva, zejména v jeho spodní části, za účelem zlepšení podpory palivových proutků a zamezení jejich vibracím.

2.2 Otěr nečistotami

Otěr nečistotami (debris fretting) se vyskytuje u všech typů jaderných reaktorů. U tlakovodních reaktorů je to druhá nejčastější příčina selhání paliva. U reaktorů varných se však v posledních letech jedná o dominantní příčinu selhání paliva. [7]

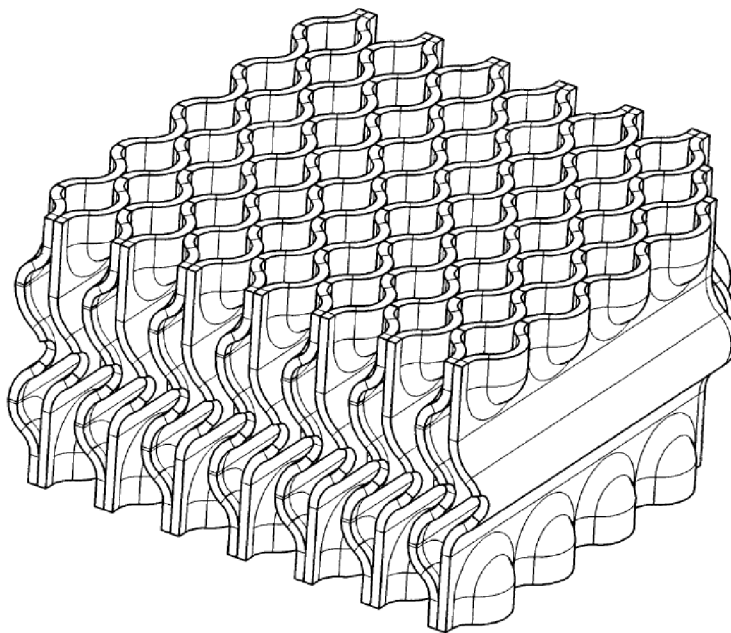
Nečistoty, které způsobují poškození paliva, se do systému dostávají nejčastěji při otevřené technologii primárního okruhu. Jedná se o různé kovové piliny nebo úlomky, které vznikají z prací na primárním okruhu. V ojedinělých případech se může jednat i o větší předměty. Tyto úlomky nebo předměty jsou pak unášeny proudem chladiva a mohou být zachyceny v palivovém souboru. Většinou je to v jeho spodní části nebo mezi palivovými proutky a distanční mřížkou. Zachycení nečistot výše v souboru je méně časté. Vlivem proudění chladiva mohou zachycené úlomky vibrovat a způsobit tak rychlou erozi povrchu paliva. V případě větších předmětů může dojít k poškození již při zachycení předmětu. Debris fretting je na rozdíl od jiných druhů defektů nezávislý na výkonu. Záleží pouze na velikosti úlomku nebo jiného cizího předmětu a na místě, kde se zachytí. Příklad poškození palivového proutku cizím předmětem můžeme vidět na Obr. 2-2.

Tento snímek byl pořízen na druhém bloku americké elektrárny Sequoyah. Jedná se o elektrárnu o elektrickém výkonu 1,126 MW s reaktorem typu PWR. [8]



Obr. 2-2: Poškození palivového proutku cizím předmětem [8]

Jako prevence před tímto typem poškození paliva byly zavedeny tzv. anti-debris filtry. Úkolem těchto filtrů je zachytit případné úlomky nebo cizí předměty a zabránit tak poškození paliva. Účinnost těchto filtrů však není 100 %, neboť je nutné zachovat dostatečný průtok chladiva. Každý výrobce paliva využívá vlastního, mírně odlišného designu anti-debris filtrů. Na následující obrázku je zobrazen design společnosti Westinghouse nazvaný TripleWave. [9]



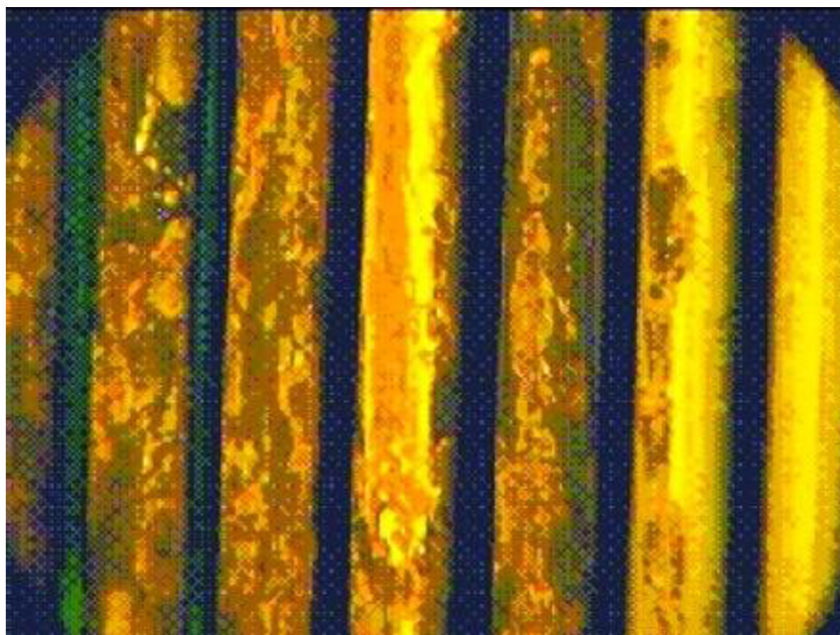
Obr. 2-3: Příklad anti - debris filtru (TripleWave od firmy Westinghouse) [9]

Bylo zjištěno, že těmito defekty trpí převážně palivové soubory na začátku své životnosti. Palivo s větším vyhořením je odolnější proti otěru nečistotami, jako možné vysvětlení se jeví vytvoření povlaku oxidu, který se vytvoří na povrchu pokrytí, který je mnohem tvrdší než základní slitina. S využitím toho poznatku implementovala firma Westinghouse do nových návrhů palivových souborů povlak na spodní části palivových tyčí z oxidu zirkoničitého ZrO_2 za účelem zvýšit odolnost paliva právě v prvních cyklech. [7]

2.3 Koroze

U tlakovodních reaktorů západní koncepce PWR je nadměrná koroze vedoucí k selhání paliva velmi vzácným jevem, za normálních podmínek jsou zirkoniové slitiny velmi odolné proti korozi. Koroze vzniká při vysokém tepelném toku, vyšším než je stanovený limit, nebo pokud je nevyhovující chemický režim chladiva v primárním okruhu. U varných reaktorů byla v 80. letech koroze jednou z hlavních příčin selhávání paliva v důsledku nepříznivého chemického režimu vody, usazením nečistot vyvolávající korozi nebo kombinací nepříznivého chemického režimu chladicí vody a náchylností použitého materiálu pokrytí ke korozi. Bylo zjištěno, že ke zrychlení celkové koroze dochází při vysokém vyhoření. Je to dáno tím, že během provozu se na povrchu pokrytí tvoří vrstva oxidu s nízkou tepelnou vodivostí a zpětnovazebním účinkem na další oxidaci pokrytí. Další příčinou může být shlukování hydridů na vnějším povrchu pokrytí. Je známo, že oxidace hydridů probíhá rychleji než u materiálu pokrytí. K selhání paliva v důsledku nadměrné koroze u tlakovodního reaktoru typu PWR došlo v roce 1991 na konci devátého cyklu na elektrárně Blayais 1 ve Francii, kde bylo jako netěsných označeno pět souborů. Mezi lety 1997 a 2005 bylo v Koreji identifikováno asi 40 případů selhání paliva vlivem koroze. [7]

Na čtvrtém bloku Novoroněžské jaderné elektrárny došlo v důsledku zvýšení lokálního výkonu ke zvýšení teploty pokrytí na $490\text{ }^{\circ}\text{C}$ a pravděpodobně i k lokálnímu varu. Bylo zaznamenáno zvýšení aktivity chladiva primárního okruhu a následně pak odhaleno intenzivní poškození vlivem koroze ve formě silné, drolící se vrstvy oxidu. V některých místech již byla poškozena stěna pokrytí. [7]



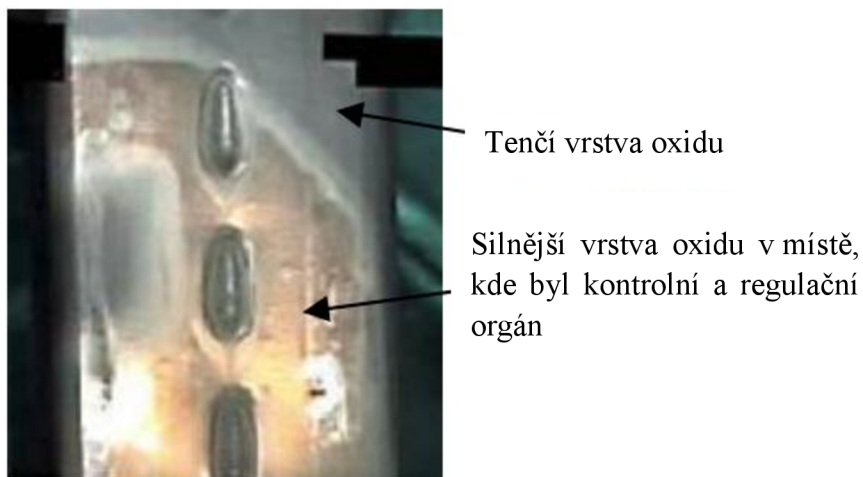
Obr. 2-4: Příklad koroze [10]

Reaktory varné a tlakovodní se liší chemickým režimem chladiva, který velmi ovlivňuje korozi. U reaktorů tlakovodních je navíc možné pro kompenzaci velké reaktivity na začátku kampaně využít kyselinu boritou. To u varných reaktorů nelze. U tlakovodních reaktorů jsou zdrojem korozních produktů zejména parogenerátory. U varných reaktorů je voda čištěna v demineralizérech a odplyněna v kondenzátorech. Vzhledem ke tvorbě kyslíku radiolýzou se liší chemie vody v aktivní zóně a vně aktivní zóny. Hlavním zdrojem korozních produktů u reaktorů varných je napájecí potrubí. [12]

Jak již bylo zmíněno výše, korozi vyvolávají i různé nečistoty v chladivu, které se zachytí na pokrytí (crud induced corrosion). Z této příčiny došlo k selhání paliva například na elektrárnách s varnými reaktory River Bend v Louisianě a Browns Ferry v Alabamě. Tento problém se ale vyskytl i na několika tlakovodních reaktorech, například na prvním bloku Three Mile Island v Pensylvánii roku 1995. [7]

V roce 1979 byla na některých elektrárnách GE s varnými reaktory nalezena nečistotami vyvolaná lokální koroze (crud induced localized corrosion – CILC). Bylo to na elektrárnách, které měly kondenzátory z měděných trubek. U elektráren, které neměly měděné části, se tento typ koroze nevyskytoval. Lepším sledováním chemického režimu chladiva a koncentrace mědi, ale především nahrazením materiálu trubek kondenzátoru, byl výskyt tohoto druhu koroze omezen. [12]

Dalším typem koroze typickým pro varné reaktory je tzv. stínová koroze. Ta byla zaznamenána nejen u lehkovodních varných reaktorů, ale i u některých tlakovodních reaktorů typu PWR. Jedná se o zvýšenou korozi zirkoniových slitin v blízkosti distančních mřížek nebo jiných konstrukčních částí z nerezové oceli. Svým vzhledem připomíná stín, proto označení stínová koroze. Tento jev je patrný z Obr. 2-5. Silnější vrstva oxidu se na palivovém kanálu nachází v místech, kde byl kontrolní a regulační orgán. [13]

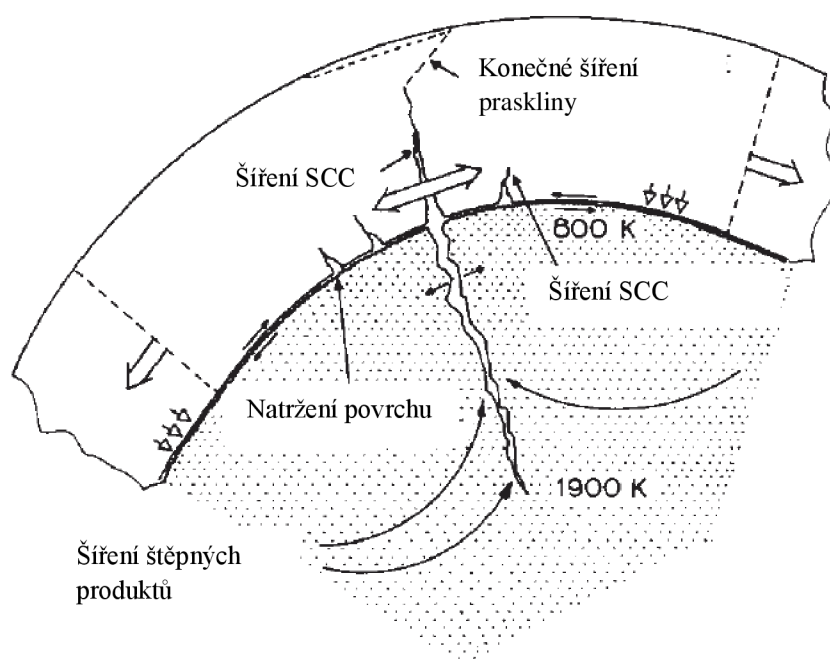


Obr. 2-5: Stínová koroze [14]

Mechanismy vzniku tohoto typu koroze nejsou zcela známy a nabízí se několik možných vysvětlení. Pomocí experimentů byly odhaleny možné příčiny, a to galvanická vazba mezi materiálem pokrytí a další elektrodou, radiolýza vody a v menší míře také ošetření povrchu. [15]

2.4 Interakce palivových tablet s pokrytím

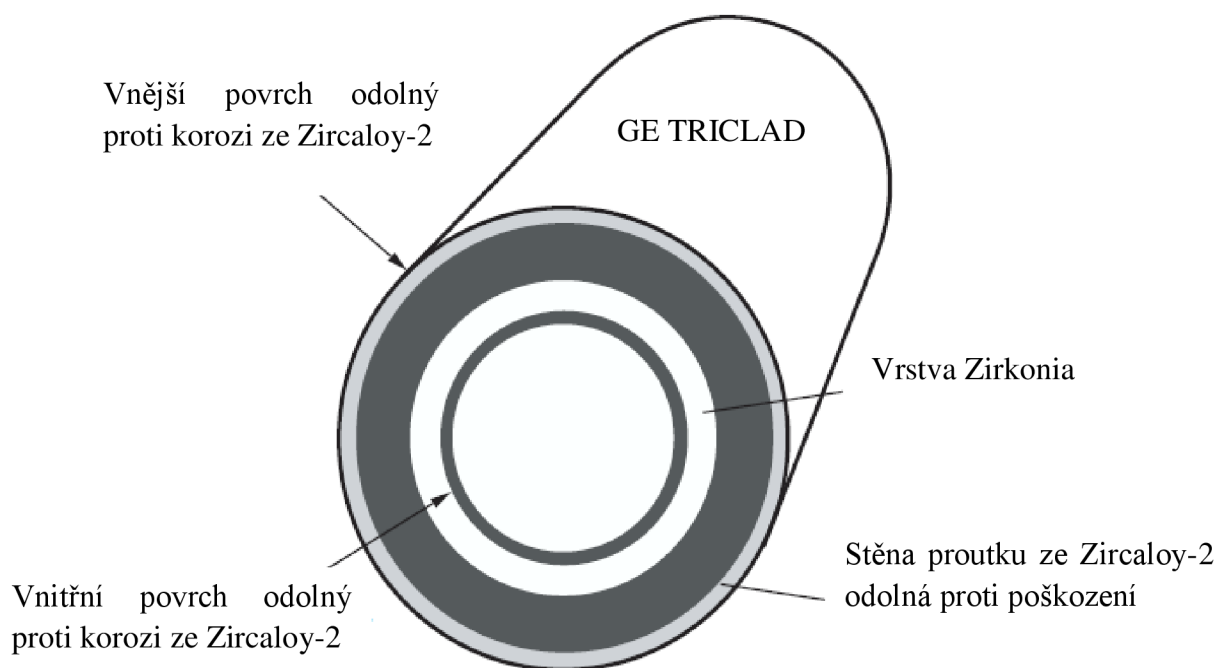
Jedná se o druhou nejčastější příčinu selhání paliva u varných reaktorů. U tlakovodních reaktorů byla zaznamenána jen velmi zřídka. Tato porucha je spojena s lokálním nárůstem výkonu například během spouštění reaktoru nebo změny polohy řídicích tyčí. Při lokálním nárůstu výkonu dochází k tepelné dilataci palivové tabletky, která pak působí na pokrytí. Zda dojde k selhání paliva, je závislé na několika faktorech jako je vyhoření, rozdíl výkonů před a po nárůstu výkonu, maximální výkon, průměrný výkon během nárůstu a doba trvání. Pokud jsou všechny tyto parametry v kritických hodnotách, je pravděpodobnost selhání velká. [17]



Obr. 2-6: Interakce paliva s pokrytím a následné korozní praskání (SCC) [17]

Vznik tohoto typu poškození je dán kombinací vlivu tepelné dilatace palivové tablety, která pak působí na pokrytí, a velmi nepříznivého prostředí způsobeného štěpnými produkty, zejména jódem a kadmíem, které způsobují korozní praskání (SCC). Mechanismus vzniku poruchy je naznačen na Obr. 2-6.

Vliv jódu na způsobování korozního praskání byl objeven již v roce 1969. Od té doby proběhlo mnoho výzkumů a laboratorních testů, ze kterých je patrné, že všechny běžně používané slitiny zirkonia jsou náchylné k této poruše. Bylo také zjištěno, že čisté zirkonium dokáže odolávat lépe a k jeho praskání je potřeba velká deformace. Tohoto poznatku bylo využito a na vnitřní povrch pokrytí byla nanášena vrstva čistého zirkonia, což zajistilo dobrou odolnost proti SCC. Ale z některých elektráren byly hlášeny problémy selhání paliva, při kterém došlo k únikům plynných štěpných produktů v takové míře, že muselo dojít k odstavení reaktoru. Ukázalo se, že vnitřní povlak z čistého zirkonia je velmi náchylný na sekundární hydridaci a při poškození a následné netěsnosti palivového proutku (především otěrem nečistotami) pak dochází k rychlému křehnutí. Výrobci tedy museli své produkty modifikovat přidáním další vnitřní vrstvy zirkoniové slitiny zajišťující odolnost proti sekundárním poruchám paliva. Příklad takového pokrytí je zobrazen na Obr. 2-7. [7], [17]



Obr. 2-7: Modifikované pokrytí paliva [17]

2.5 Výrobní vady

Postupným vyvíjením a zdokonalováním výrobního procesu a především zdokonalením metod kontrol kvality byl snížen počet poškození vyplývajících z výrobních vad. I přesto se mohou nějaké vyskytnout, například v oblasti svarů, zátek a v některých případech i samotného pokrytí. Vadné svary a netěsnící koncové zátky se vyznačují tím, že primární defekt je malý a nemusí být zjištěn, dokud nedojde k jeho zvětšení nebo vzniku sekundárních defektů. Běžně se ale tyto poruchy projeví již v průběhu první kampaně.

Vada svaru může být způsobena například jeho kontaminací. Svary se provádí svařovací metodou TIG (tungsten inert gas) buď v inertním plynu, nebo ve vakuu. Při nedostatečné kontrole kvality ochranné atmosféry inertního plynu nebo při špatné těsnosti vakuových svařovacích komor dojde ke kontaminaci dusíkem obsaženým ve vzduchu a v důsledku toho potom k porušení integrity svaru. Řešením tohoto problému je zlepšení kontroly kvality ochranné atmosféry, případně vakua. Několik těchto poškození bylo pozorováno na pokrytí ze slitiny M5 společnosti AREVA. Společnost se rozhodla řešit tento problém změnou technologie svařování. [7]

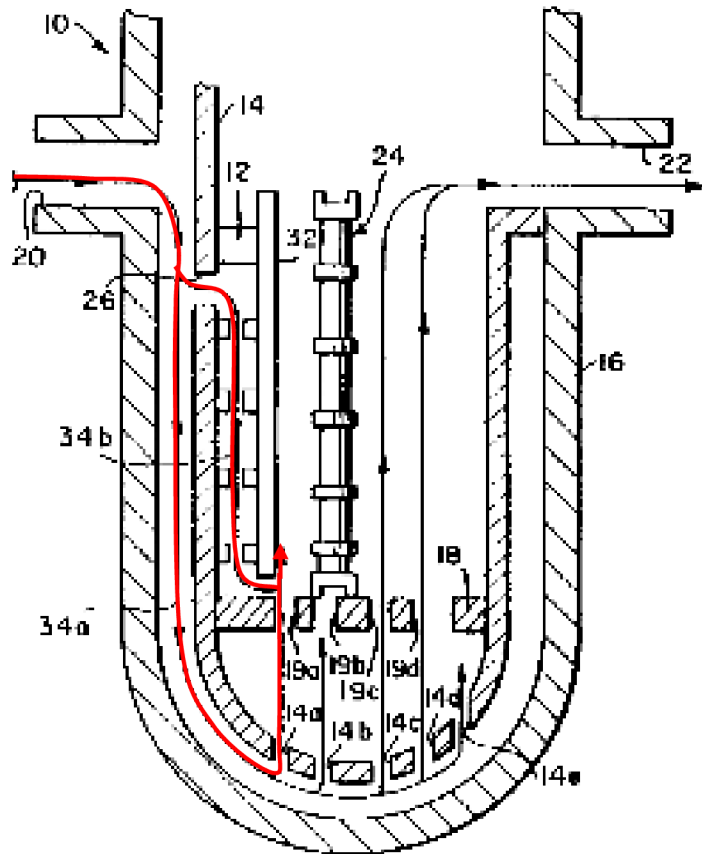
Mezi výrobní vady je možné řadit i nedostatečné vysušení palivových tablet a trubek pokrytí. Zbytková vlhkost pak může způsobit primární hydridaci. Hydridaci a možným příčinám jejího vzniku je věnována kapitola 2.7.

2.6 Příčný tok

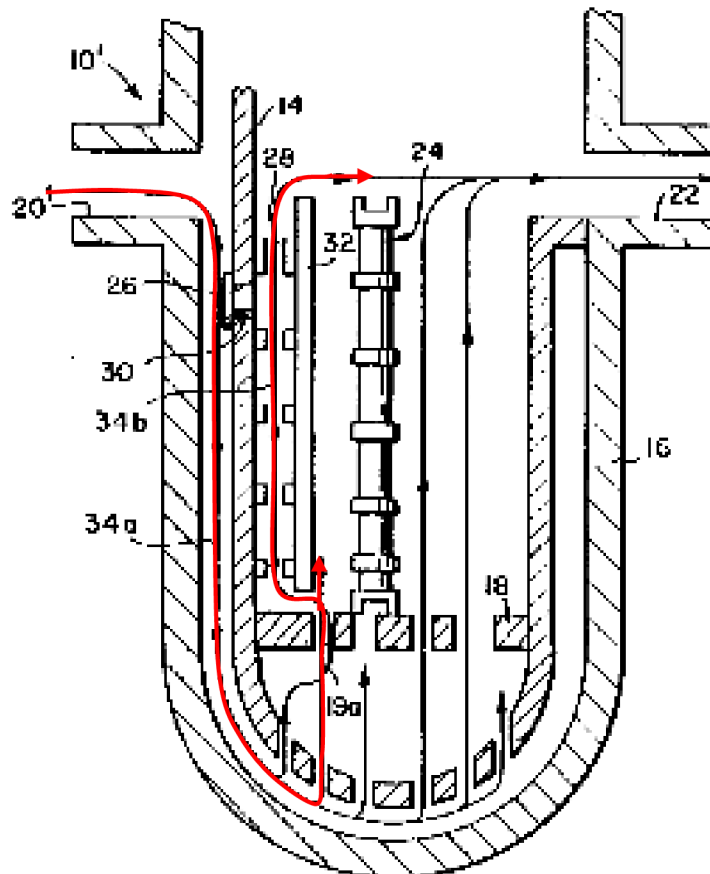
Tento typ poškození se v minulosti objevil na několika reaktorech typu PWR, kde byl použit takzvaný „down flow“ design, kde část vstupního toku chladiva teče mezi reaktorovou nádobou a košem aktivní zóny a část mezi košem aktivní zóny a bočním pláštěm aktivní zóny, který je zhotovený z pravoúhlých segmentů. Na rozhraní dvou sousedních segmentů může vzniknout během provozu reaktoru mezera, kterou pak vlivem diference tlaků uniká část toku chladiva. Vlivem tohoto příčného toku je v tomto místě ovlivněn tok chladiva aktivní zónou. Proudění se zde stává turbulentním a vyvolá vibrace palivových proutků v bezprostředním okolí. Vlivem těchto vibračních dochází k otěru palivových proutků o distanční mřížky a tím pádem k poškození paliva.

Tento problém byl řešen mechanickými úpravami za účelem zmenšit mezery mezi jednotlivými segmenty bočního pláště aktivní zóny. Toto řešení se však ukázalo jako nepříliš účinné a výskytu tohoto problému nezamezilo. Dalším řešením byla úprava konstrukce palivových souborů, které se nacházely na periférii aktivní zóny a hrozilo tak u nich poškození vlivem vibračních způsobených příčnými toky. Jednou z možností bylo nahradit palivové proutky v okolí spoje dvou segmentů bočního pláště aktivní zóny proutky z nerezové oceli, která je odolnější proti vibracím. Dalším způsobem bylo použití speciálních antivibračních svorek vyvinutých firmou Advanced Nuclear Fuel Corporation. [7], [15]

Konečné řešení tohoto problému přinesla úprava vnitřní vestavby reaktorové nádoby. Tok části chladiva mezi košem aktivní zóny a bočním pláštěm aktivní zóny byl obrácen, aby byl ve stejném směru jako tok chladiva aktivní zónou. To přineslo snížení rozdílů tlaků a zamezení vzniku příčných toků způsobujících vibrace. Tato úprava je patrná na následujících dvou obrázcích. Na Obr. 2-8 je zobrazený původní design s vyznačeným tokem chladiva a na Obr. 2-9 je zobrazen upravený design vnitřní vestavby reaktorové nádoby s vyznačeným změněným tokem chladiva.



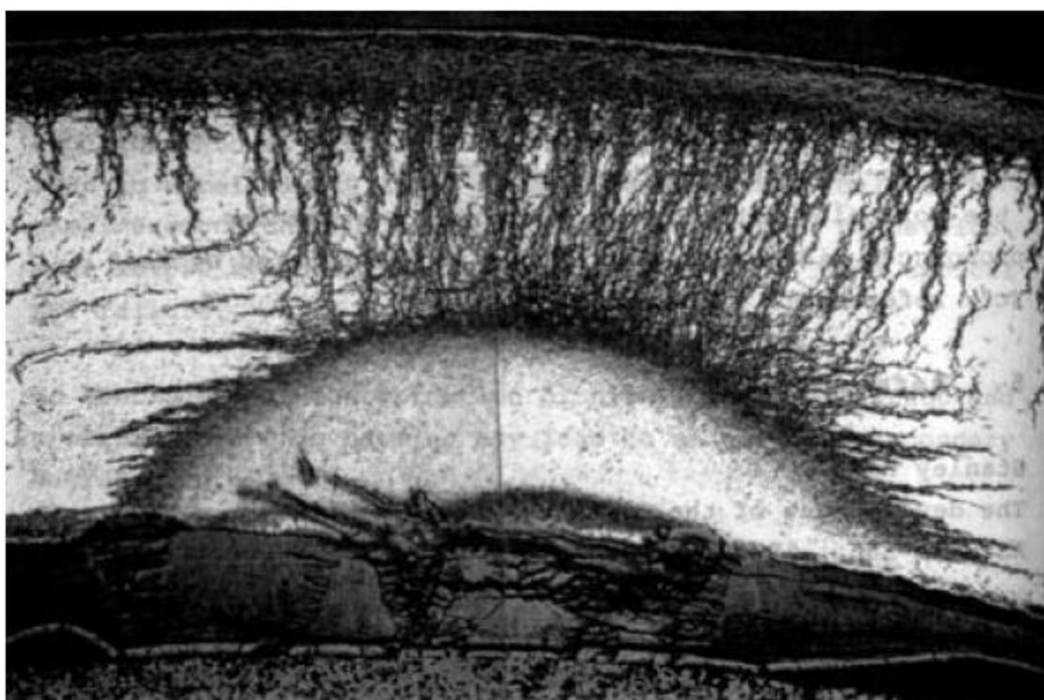
Obr. 2-8: Původní design vnitřní vestavby [15]



Obr. 2-9: Upravený design vnitřní vestavby [15]

2.7 Hydridace

Vodík obsažený v palivových proutcích způsobí hydridaci pokrytí ze zirkoniových slitin bez ohledu na jejich předchozí chemický stav. Dokud je vstřebávání vodíku pokrytím rovnoměrné a v malé míře, nehrozí žádné vážné následky. Problém nastává v případě lokálního zvýšení vstřebávání vodíku a následné tvorbě hydridu zirkonia. Vlivem většího objemu hydridu se tvoří v pokrytí puchýř, který je pozorovatelný i zvnějšku palivového proutku. Tvorba takového puchýře je patrná na Obr. 2-10. V tomto místě jsou výrazně zhoršeny mechanické vlastnosti pokrytí, v důsledku čehož se materiálem mohou snadno šířit trhliny a dochází k lokálnímu protržení pokrytí. Toto protržení je urychleno termodifuzí vodíku, hydridy mají tendenci přecházet z horké vnitřní strany pokrytí na chladnější vnější. Místo vzniku lokální hydridace pokrytí je spíše náhodným jevem, jako citlivější pro vznik hydridace se jeví svary a jejich okolí. [12]



Obr. 2-10: Hydridace pokrytí [7]

Bylo zjištěno a experimenty prokázáno, že vstřebání vodíku do pokrytí je mnohem pomalejší u pokrytí s předoxidovaným, „autoklávovaným“, povrchem než u pokrytí s pískovaným povrchem. Vstřebání vodíku je dále závislé na poměru mezi vodíkem a vodní parou. Různými prameny jsou udávány různé kritické poměry. Obecně se dá ale říci, že hydridace může začít, pokud koncentrace H_2O klesne pod kritickou úroveň, kdy již nedochází k potřebnému obnovování ochranné vrstvy oxidu na vnitřní straně pokrytí. V důsledku toho tak často dochází k lokálnímu vstřebávání vodíku do pokrytí. [7], [12]

Existují dva možné způsoby vysvětlení, jakým způsobem vodík proniká ochrannou vrstvou oxidu zirkonia. Prvním z nich jsou mechanická poškození. Například poškození vrstvy oxidu po kontaktu pelety s pokrytím, ale i mikrotrhliny nebo póry, jejichž vlivem je vodíku umožněno přijít do styku se zirkoniem. Druhý způsob se týká rozpustnosti vodíku a jeho difuzivity filmem oxidu. Ve skutečnosti oba tyto mechanismy fungují současně. Několikrát bylo pozorováno, že ochrannou vrstvu oxidu mohou narušit i agresivní produkty štěpení, zejména cesium a jód. [7]

Hydridaci zirkoniových slitin používaných na pokrytí paliva můžeme rozdělit jako primární a sekundární. Primární hydridace patří v podstatě do kategorie výrobních vad. K sekundární hydridaci pokrytí pak dochází jako následek vniknutí chladiva při porušení těsnosti pokrytí palivového proutku.

2.7.1 Primární hydridace

Jak je již zmíněno výše, primární hydridace je v podstatě výrobní vada. Největším zdrojem vodíku způsobujícím primární hydridaci je zbytková vlhkost v palivových tabletkách z oxidu uranu UO_2 . Do nich se dostane při výrobním postupu, například při mokřém broušení. Absorbovaná vlhkost závisí na pórovitosti peletek, tu ovlivňují vlastnosti prášku UO_2 a aditiva. Vlhkost může být do peletek absorbována i při skladování na vzduchu. I zde hraje roli pórovitost tabletek, ale také záleží na relativní vlhkosti prostředí a teplotě. Množství absorbované vlhkosti bude nižší při vyšší teplotě. [12]

Odstranění absorbované vody vysoušením palivových tablet a vnitřního prostoru pokrytí je velmi efektivní a v praxi běžně využívané řešení tohoto problému. Při teplotě vysoušení $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ je snížena absorbovaná vlhkost v peletách o 60 %. [7], [12]

Příčinou hydridace pokrytí může být i kontaminace organickými materiály při výrobě, například kapky oleje nebo zbytky organického těsnění. Z uhlovodíků se radiolýzou uvolňuje vodík, který pak způsobuje hydridaci. [7]

2.7.2 Sekundární hydridace

Sekundární hydridace vzniká jako následek vniknutí chladiva do palivového proutku způsobeného některým z primárních defektů. V podstatě kterýkoliv z defektů (otěr palivového proutku o distanční mřížku, případně otěr nečistotami, interakce pokrytí s palivem nebo výrobní vada) může způsobit sekundární hydridaci.

Voda, která vnikne do pokrytí palivového proutku primárním defektem, se začne měnit na páru a reagovat s vnitřním povrchem pokrytí. Pára vzniká, dokud tlak uvnitř palivového proutku není v rovnováze s tlakem primárního okruhu. Reakcí páry s palivem a materiálem pokrytí vzniká vodík. Pára také podléhá radiolýze a směs plynu je tak stále obohacována vodíkem. [7]

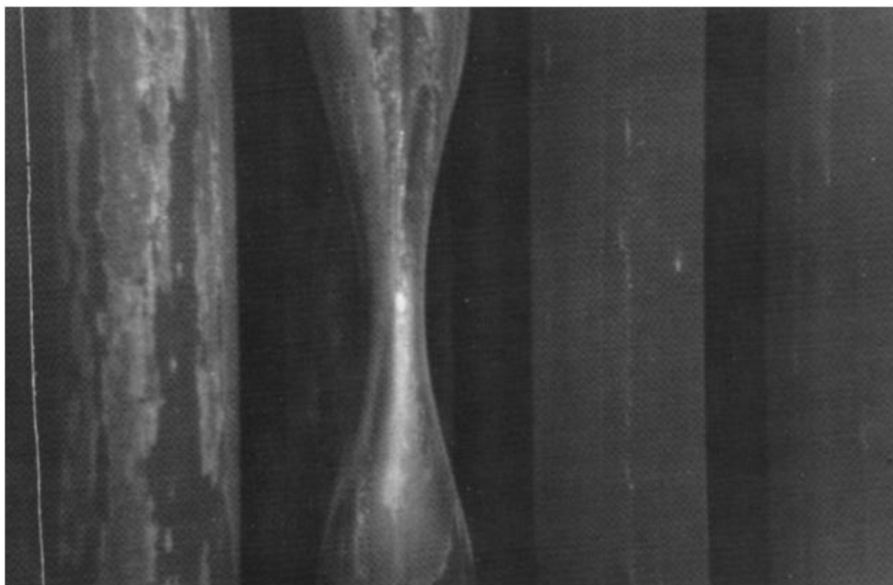
Následující průběh je velice podobný jako u primární hydridace. Pokud koncentrace vodíku dosáhne kritické hodnoty, je pak rychle absorbován do pokrytí a způsobuje jeho křehnutí a další poškození tak, jak je to zmíněno v úvodu této kapitoly. Jak může takové poškození vypadat ukazuje Obr. 2-11.



Obr. 2-11: Poškození pokrytí hydridací [18]

2.8 Zhroucení pokrytí

Tento typ poruchy byl poprvé zaznamenán v roce 1971 na prvním bloku švýcarské jaderné elektrárny Beznau. Po prvním cyklu bylo během výměny paliva nalezeno několik palivových proutků, které byly ve své horní polovině zploštělé. V dalších letech se tento problém objevil i na dalších elektrárnách. Příčinou tohoto problému bylo vytvoření mezery v palivovém sloupci. Pod tlakem chladiva v primárním okruhu následně došlo v tomto místě k deformaci pokrytí. Definitivně byl tento problém vyřešen natlakováním palivových proutků a již nedošlo k jeho dalšímu výskytu. [12]



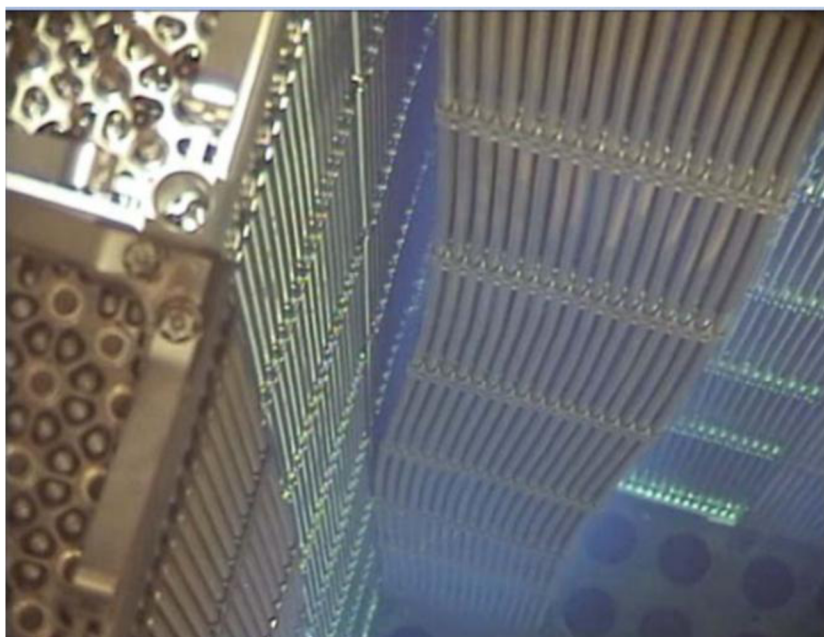
Obr. 2-12: Příklad zhroucení pokrytí [19]

3 POŠKOZOVÁNÍ KONSTRUKCE PALIVOVÉHO SOUBORU

K poškození konstrukce palivového souboru může dojít vlivem provozního namáhání souboru během provozu v reaktoru, ale i během manipulací se souborem. Následující část je věnována poškození souboru během provozu reaktoru.

3.1 Průhyb palivového souboru

Průhyb souboru může přinášet bezpečnostní rizika, protože při větším průhybu může být ovlivněna funkce kontrolních a regulačních orgánů, které se do něj, v případě tlakovodních reaktorů, zasouvají. V případě varných reaktorů může být správná funkce kontrolních a regulačních orgánů ohrožena nadměrnou deformací kanálů, ať už jde o průhyb nebo vyboulení.



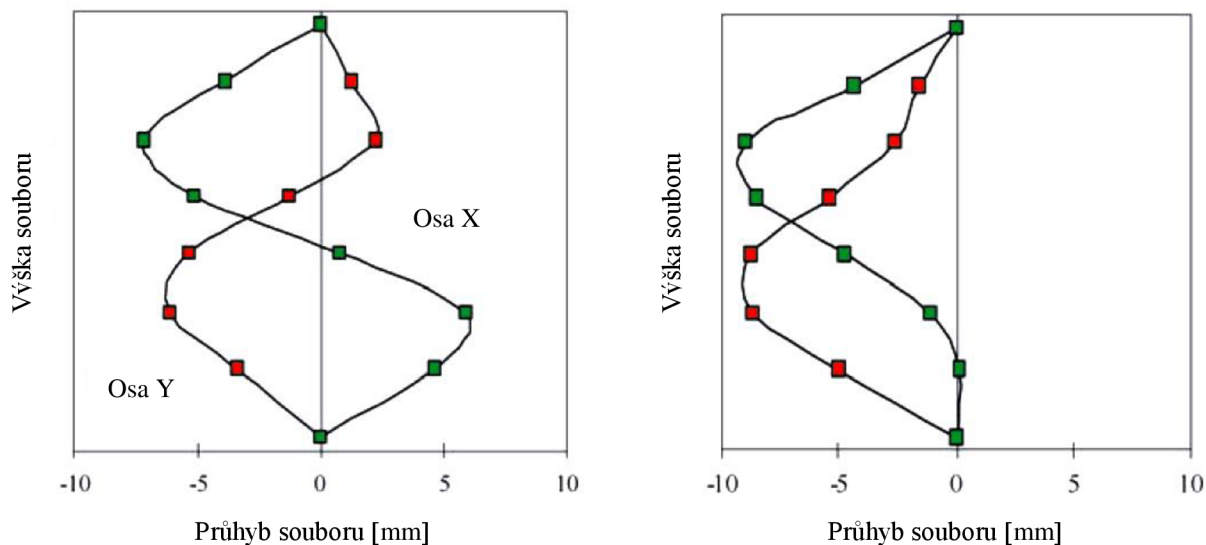
Obr. 3-1: Příklad průhybu palivového souboru [4]

3.1.1 PWR

V polovině 90. let došlo k problémům s nedosednutím řídicích a kontrolních tyčí do koncové polohy během odstavování nebo během kontrolních testů. Tento problém nastal i ve švédské jaderné elektrárně Ringhals. Jako první se tyto problémy objevily na čtvrtém bloku této elektrárny v roce 1994. [20]

Po rozsáhlém průzkumu bylo zjištěno, že nedosednutí klastrů do koncové polohy je způsobeno zakřivením palivového souboru. V důsledku zakřivení dochází ke zvýšení tření mezi kontrolními tyčemi a vodicími trubkami palivového souboru, do kterých se regulační orgán zasouvá. Při velkém prohnutí může dojít k poškození kontrolních řídicích tyčí. Měřením souboru, na kterém došlo k nedosednutí klastru, byl zjištěn tvar průhybu písmene S a hodnota průhybu 20 mm. Také bylo zjištěno, že všechny soubory v aktivní zóně byly postiženy průhybem. [20]

Na Obr. 3-2 je příklad průhybu tvaru písmene S, který je typický pro čtvrtý blok elektrárny Ringhals. Pro druhý a třetí blok převažuje průhyb souboru ve tvaru písmene C. Často jsou ale oba typy průhybu kombinovány. Průhyb ve tvaru písmene S má menší poloměr ohybu, a tak představuje větší riziko nedosednutí regulačních klastrů. [20]



Obr. 3-2: Příklad průhybu souboru na Ringhals 4 a Ringhals 3 [20]

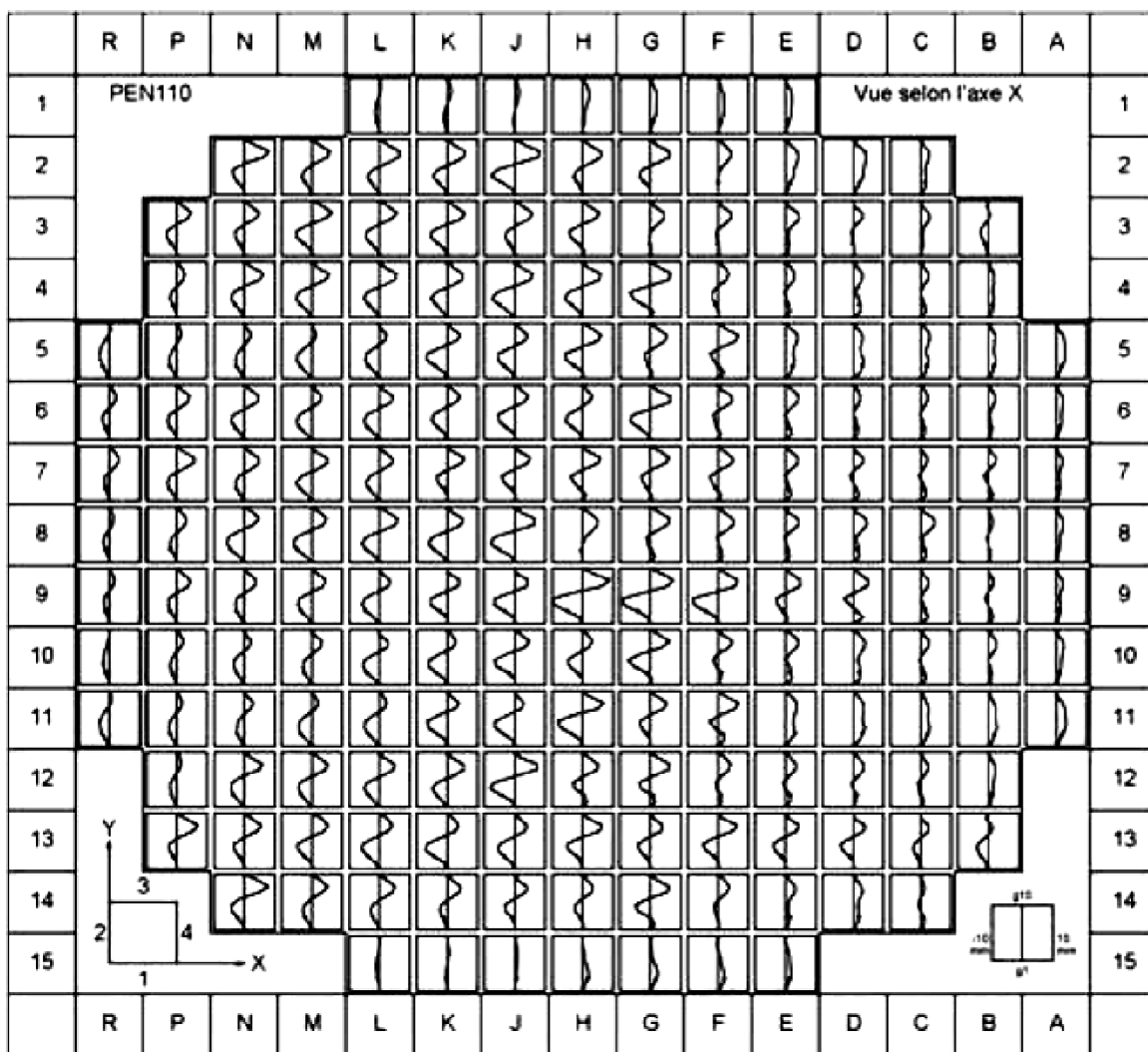
Později byly tyto příznaky pozorovány i na dalších elektrárnách ve světě, například na elektrárně Wolf-Creek v Kansasu a dalších. [7]

Ohýbání palivových souborů může mít velký vliv na bezpečnost elektrárny, jelikož v jeho důsledku nemusejí být schopny klastry zastavit štěpnou řetězovou reakci. Během řešení tohoto problému bylo zavedeno několik opatření omezujících riziko jeho vzniku. Mezi taková opatření patří například omezení hodnoty vyhoření souborů na pozicích, kde se nachází klastry a optimalizace návrhu zavážení souborů podle měření tažné síly a doby pádu klastrů na konci předcházející kampaně a provádění pádových zkoušek klastrů i během kampaně.

Příčiny ohýbání palivových souborů jsou velmi složité a stále ještě nejsou zcela známy. Podle výzkumů a simulací pravděpodobně souvisí s celkovým tečením palivového souboru a tečením vodících trubek. Deformace způsobená radiačním tečením je závislá na několika parametrech: vyhoření, axiálních a hydraulických silách působících na soubor, tuhosti souboru, růstu vodících trubek a palivových proutků, počáteční deformaci a náchylnosti materiálu k tečení. [7]

U různých elektráren a různých designů paliva se může některá vlastnost projevit více. Například v případě elektrárny Wolf Creek bylo zjištěno, že hlavní příčina ohýbání souborů spočívá v nadměrném radiačním růstu u souborů s velkým vyhořením. Kdežto na elektrárně Ringhals bylo analyticky zjištěno, že hlavní příčina spočívá v nadměrném tečení materiálu a snížení pevnosti souboru vlivem změny designu paliva. [7]

Na následujícím obrázku je zobrazeno typické rozmístění souborů elektrárny EDF 1300 MW. Z tohoto obrázku je patrné, že soubory ohnuté do tvaru písmene S se nacházejí v levé části aktivní zóny, kdežto soubory ohnuté do tvaru písmene C se nacházejí na pravé straně aktivní zóny.



Obr. 3-3: Typické rozložení průhybu pro EDF 1300 MW [7]

Z toho vyplývá, že průhyb souborů je závislý na umístění souboru v aktivní zóně reaktoru. Vyhoření paliva nemá na průhyb palivového souboru výrazný efekt. Soubor se během své životnosti neprohýbá pouze jedním směrem, jak je řečeno výše, závisí to na umístění souboru v aktivní zóně. Díky tomuto poznatku byly některé nástroje pro návrh aktivní zóny upraveny tak, aby se snížila náchylnost palivových souborů na deformaci. Pro zamezení nadměrných deformací palivových souborů výrobci zavedli změny v designu svých paliv. Změnil se design přítlačné pružiny souboru za účelem redukce sil působících na soubor, za účelem zvýšit pevnost souboru jako celku se změnily i vodící trubky a byly použity distanční mřížky snižující mezeru mezi sousedními soubory. Výrobci použili nových speciálních slitin, se zvýšenou odolností proti radiačnímu růstu a tečení materiálu, na pokrytí i vodící trubky. Areva svojí slitinu nazývá M5, Westinghouse ji nazývá ZIRLO. Provedené změny v návrzích pomohly ke snížení výskytu neúplného dosednutí regulačních orgánů do koncové polohy na minimum. [7], [20]

3.1.2 VVER

Na některých elektrárnách s reaktory VVER-1000 byly pozorovány problémy s ohýbáním souborů již v letech 1992-1993. Jednalo se o elektrárny pracující v tříletém palivovém cyklu v Rusku, Ukrajině a Bulharsku. Na těchto elektrárnách byly naměřeny doby pádů regulačních

orgánů přesahující čtyři sekundy a v některých případech zůstaly regulační orgány zaseknuty ve spodní části souboru. První studie tohoto problému byly provedeny na druhém bloku ruské elektrárny Balakovo, kde byly zjištěny nadměrné třecí síly při zasouvání regulačního orgánu. Na ukrajinské elektrárně Zápороžská, kde se problém také vyskytl, byly vybrány dva poškozené soubory a odeslány na inspekci do horkých komor výzkumného ústavu v Dimitrogradu, kde byly zjištěny maximální průhyby 18-20 mm. Vznikly obavy, že takový průhyb může mít vliv na bezpečnost provozu. Zejména proto, že zde hrozilo riziko zvýšeného lokálního výkonu vlivem zvýšené mezery mezi sousedními soubory, kde by díky většímu množství vody docházelo k lepší moderaci. V těchto místech však nebyly nalezeny žádné důkazy jako zvýšená koroze, radiální růst ani změny mechanických vlastností. [7]

Mechanismus vzniku poškození je stejný jako v případě reaktorů typu PWR. Tvar průhybu byl též podobný, jednalo se opět buď o průhyb ve tvaru písmene C, nebo písmene S. Na všech elektrárnách s reaktory typu VVER-1000 bylo zavedeno kontrolní měření doby pádu klastrů a potažmo velikosti třecích sil. První a třetí blok elektrárny Zápороžská a druhý blok elektrárny Jihoukrajinská musely být přechodně převedeny do provozu pouze na tři chladicí smyčky a 67% výkon reaktoru. [7]

Za účelem odstranění těchto problémů došlo ke změně designu palivových souborů a regulačních orgánů i použitých materiálů. Byly použity nové, těžší regulační orgány a došlo k dalším úpravám zajišťujícím nižší hydrodynamický odpor při jejich zasouvání do vodících trubek palivového souboru. Na skeleton palivového souboru byly použity zirkoniové slitiny, s cílem odstranit ocelové části s různou tepelnou roztažností a tím pádem odstranit různá vnitřní pnutí při provozních teplotách. Tyto změny se v provozních podmínkách osvědčily a výskyt nadměrně dlouhé doby pádu regulačních orgánů či jejich neúplné dosednutí bylo výrazně omezeno.

Příkladem takto zdokonalené konstrukce je soubor TVSA od společnosti TVEL. Tento typ souboru byl poprvé zavezen v roce 1998 na ruské elektrárně Kalinin. Konstrukce tohoto souboru se vyznačuje vysokou pevností, která je zajištěna pomocí takzvaných úhelníků. Toto palivo se osvědčilo a nyní je v provozu přibližně na 60 % elektráren s reaktory VVER-1000. Z tohoto typu vychází palivové soubory s označením TVSA-T, které jsou nyní používány na jaderné elektrárně Temelín.

3.1.2.1 Jaderná elektrárna Temelín

Jaderná elektrárna Temelín je ohledně paliva jedinečná mezi reaktory typu VVER-1000. Prvních deset let provozu dodávala palivo americká firma Westinghouse, která se do té doby specializovala pouze na reaktory typu PWR a BWR, tedy na reaktory se čtvercovou geometrií paliva. Během provozu s palivem VVantage 6 od této společnosti se začaly objevovat problémy. Docházelo k poškození povrchu palivových proutků o distanční mřížku (grid-to-rod fretting) a také docházelo k ohýbání (bow), kroucení (twist) a prodlužování (growth) palivových souborů. [21]

Vzniklé netěsnosti způsobovaly spíše provozní omezení. Nadměrné ohýbání souborů, které způsobovalo nedosednutí bezpečnostních klastrů, již bylo bezpečnostním problémem. V Tab. 3-1 jsou uvedeny počty nedosednutých klastrů zjištěných při pádových zkouškách. [21]

Palivové soubory byly na základě provozních poznatků dále vyvíjeny. Největší změny přinesla vývojová fáze Phase1X, kdy došlo ke změně materiálu povrchu palivových proutků a vodících trubek ze Zircaloy4 na ZIRLO. Došlo také ke zpevnění konstrukce zlepšením napojení

distančních mřížek na vodící trubky. Také došlo k nahrazení předposlední distanční mřížky, která byla vyrobena ze slitiny Zircaloy-4, modifikovanou Inconelovou mřížkou. Byla upravena i přítlačná síla pružinek okrajových buněk horní Inconelové mřížky. Tab. 3-1 ukazuje, že po nasazení výše zmíněné modifikace paliva v roce 2007 již nedošlo k žádnému nedosednutí klastrů. [21]

Provozovatel elektrárny se přesto rozhodl ke změně dodavatele paliva, kterým se stal ruský výrobce TVEL. Palivové soubory TVSA-T jsou zdokonalenou verzí paliva TVSA tohoto výrobce, jak je zmíněno již výše. Ke změnám muselo dojít hlavně z důvodu kompatibility s původním palivem od firmy Westinghouse tak, aby bylo možné palivo měnit postupně. K tomuto kroku nakonec nedošlo a byla vyměněna celá palivová vsázka. Během provozu s tímto palivem zatím nebyly zjištěny žádné problémy s deformací palivových souborů. [22]

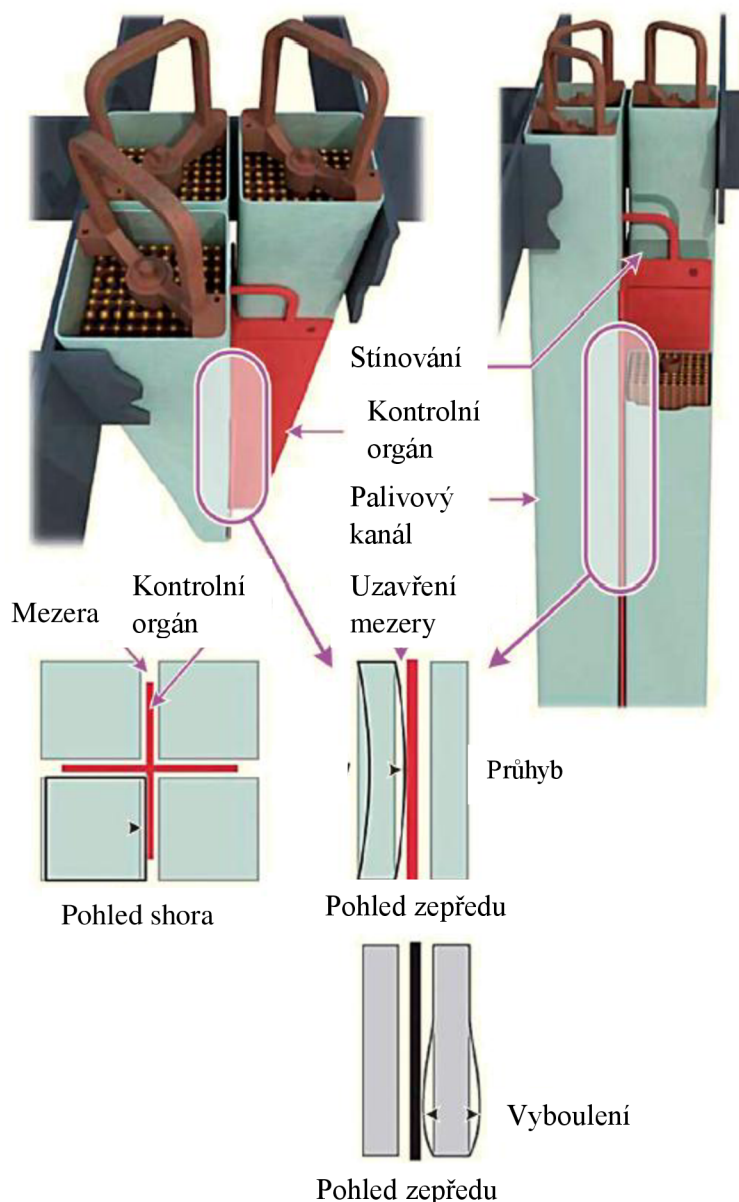
Tab. 3-1 Počet nedosednutých klastrů v letech 2005 - 2008 pro oba bloky JE Temelín [2]

HVB 1			HVB 2		
Cyklus	Datum	Počet	Cyklus	Datum	Počet
3. Palivový cyklus	27. 3. 2005	12	2. Palivový cyklus	5. 2. 2005	14
	30. 3. 2005	12		12. 3. 2005	14
	14. 6. 2005	21		9. 4. 2005	17
	30. 7. 2005	30	3. Palivový cyklus	15. 7. 2006	0
4. Palivový cyklus	4. 10. 2005	2		3. 9. 2006	0
	19. 11. 2005	13		6. 1. 2006	0
	30. 12. 2005	18		1. 5. 2006	0
	25. 2. 2006	32		8. 7. 2006	1
	17. 3. 2006	33		26. 8. 2006	6
	7. 5. 2006	45	4. Palivový cyklus	8. 11. 2007	0
2. 6. 2006	51	17. 2. 2007		0	
5. Palivový cyklus	4. 8. 2006	2		5. 5. 2007	2
	10. 9. 2006	7	8. 7. 2007	0	
	14. 10. 2006	13	5. Palivový cyklus	6. 10. 2008	0
	11. 11. 2006	19		5. 1. 2008	0
	9. 12. 2006	24		1. 3. 2008	0
	6. 1. 2007	32			
	27. 1. 2007	36			
Palivový cyklus 5A	9. 4. 2007	0			
	13. 4. 2007	0			
	26. 4. 2007	0			
	19. 5. 2007	0			
	4. 8. 2007	3			
6. Palivový cyklus	20. 9. 2007	0			
	22. 12. 2007	0			
	16. 2. 2008	0			
	19. 3. 2008	0			

3.2 Deformace palivového kanálu

U varných reaktorů vzniká pára pro pohon turbíny přímo v reaktorové nádobě, v její horní části jsou tak umístěny vysoušeče a nemohou zde být zařízení pro ovládání kontrolních a regulačních orgánů. Ty se do aktivní zóny zasouvají zespodu a nezasouvají se přímo do souborů, jako je to u palivových souborů reaktorů typu PWR a VVER-1000. Regulační orgán varných reaktorů je ve tvaru kříže a zasouvá se mezi čtyři palivové soubory. Regulační orgán a jeho poloha vůči palivovým kanálům je zobrazena na Obr. 3-4

Palivové soubory jsou umístěny v obálce ze zirkoniové slitiny, tzv. palivovém kanálu. Ten poskytuje konstrukční oporu samotným palivovým článkům a navádí regulační orgány při zasouvání do aktivní zóny. Navržená životnost palivového kanálu bývá větší, než životnost jednoho palivového souboru. Jejich deformace, jako průhyb, zkroucení nebo vyboulení, může vést k lokálnímu zvýšení výkonu, protože se zvětší šířka vodní mezery a více vody znamená lepší moderaci. Při nadměrných deformacích je také ohrožena schopnost správné funkce regulačních a kontrolních orgánů, což znamená bezpečnostní riziko. [7], [24]



Obr. 3-4: Průhyb a vyboulení kanálu u BWR [24]

Průhyb kanálu vzniká vlivem nerovnoměrného růstu jeho protilehlých stran. Ten může být způsoben gradienty neutronového toku, které vznikají vlivem nesymetrického rozložení obohacení nebo obsahu gadolinia. Vliv má také pozice kanálu v aktivní zóně reaktoru během celé jeho životnosti. Dalšími příčinami průhybu kanálu může být například nerovnoměrné radiační tečení materiálu na protilehlých stranách. Velký vliv má také absorpce vodíku, jejímž následkem dojde k prodloužení souboru, protože měrný objem hydridu zirkonia je větší, než samotné zirkoniové slitiny. Pokud tedy bude u dvou protějších stran kanálu rozdílná absorpce vodíku, u každé z těchto stran dojde k rozdílnému prodloužení a to povede k průhybu kanálu. [24]

Vyboulení vzniká v důsledku tečení a rozdílného tlaku uvnitř a vně kanálu. Tento rozdíl je nejvyšší ve spodní části palivového souboru a v horní části kanálu se snižuje k nule. Tečení je také ovlivněno dalšími faktory, jako jsou velikost neutronového toku, tloušťka stěny kanálu nebo teplota. Při větším vyboulení palivového kanálu směrem ke kontrolnímu a regulačnímu orgánu dochází ke zvýšení tření mezi nimi. Při velkých vybouleních nebo průhybech může být činnost kontrolních orgánů ohrožena. [7], [24]

Ke kroucení kanálu uvolněním zbytkových napětí z výrobního procesu by díky optimalizovanému procesu nemělo docházet. Může však dojít k průhybu. Při větším průhybu směrem ke kontrolnímu orgánu dochází, podobně jako u vyboulení, ke zvýšení tření mezi kanálem a kontrolním orgánem. Při velkých průhybech může dojít též k ohrožení její funkce, což s sebou nese bezpečnostní rizika. Příklady vyboulení i průhybu jsou zobrazeny na Obr. 3-4. [24]

4 INSPEKCE A OPRAVY PALIVOVÝCH SOUBORŮ

Inspekce paliva jsou důležité, protože jejich přínos je hlavně v oblasti určování kořenových příčin jeho poškození během provozu v reaktoru. Jsou zpětnou vazbou nejen pro výrobce paliva, ale i pro provozovatele elektrárny, neboť na spolehlivost paliva mají vliv i provozní podmínky. Inspekce slouží také k určení rozsahu případného poškození a možnosti opravy palivového souboru.

Opravy palivových souborů jsou na západních typech reaktorů poměrně běžné přibližně od 90. let. Snahou je minimalizovat náklady na palivo a zvýšit jeho využití. Pokud nějakým z výše popsaných defektů dojde k porušení těsnosti jednoho nebo více proutků, mohou být vyjmuty a nahrazeny proutkem z nerezové oceli. Takto opravený palivový soubor je možné znovu použít, ovšem pokud projde zkouškou těsnosti, a nemusí být nahrazen celý soubor. Kvůli zachování symetrie aktivní zóny by bylo nutné v takovém případě vyměnit souborů více, což výhodnost oprav ještě zvyšuje.

4.1 Inspekce

Inspekce palivových souborů se provádí v bazénu vyhořelého paliva, případně ve speciálních prostorech k tomu určených, na speciálně vyvinutých stendech, které umožňují potřebné manipulace s palivem. Mezi hlavní části inspekci patří vizuální kontrola palivových souborů, kdy se soubory detailně kontrolují pomocí kamery na přítomnost různých defektů nebo případně zachycených nečistot nebo cizích předmětů.

Součástí inspekci jsou různá měření. Kontroluje se geometrická deformace souboru, jestli nedochází k nadměrnému průhybu nebo zkrutu. Je možné měřit tloušťku oxidických vrstev na pokrytí palivových proutků. Pomocí vířivých proudů lze zkontrolovat, zda se v pokrytí palivového proutku nenachází žádné trhliny. Používané jsou také ultrazvukové metody, a to jednak k identifikaci netěsných palivových proutků, tak i k měření rozměrů a deformace palivových souborů, případně palivových kanálů.

4.1.1 Sipping

K identifikování netěsných palivových souborů slouží metoda sipping. Tato metoda je založená na detekci plynných štěpných produktů, a to odplyněním z odebíraných vzorků vody nebo přímo ze vzduchu, podle toho o jaký typ systému se jedná.

4.1.1.1 TELESCOPE

Tento systém je evolucí předchozích systémů společnosti ABB Atom Systems a je použitelná pro reaktory PWR i BWR a je implementována v zavážecím stroji.

Při zvedání souboru během manipulací se vytvoří tlaková diference mezi vnitřním a vnějším tlakem na pokrytí a z netěsných proutků začnou unikat plynné štěpné produkty, zejména ^{133}Xe a ^{85}Kr . Vzorky vody z horní části souboru jsou čerpány do měřicího zařízení, kde je voda odplyněna a je monitorována úroveň aktivity plynů. [27]



Obr. 4-1: Vylepšený systém TELESCOPE Sipping pro AP1000 [27]

Společnost Westinghouse tuto technologii provozuje na 41 reaktorech typu BWR a na 24 reaktorech typu PWR s celkovou úspěšností nalezení netěsných souborů 99,9 %. [27], [47]

4.1.1.2 IN-CORE

Metodou IN-CORE se z horní části testovaného souboru odeberou vzorky vody, které se pak vyhodnotí v laboratoři na elektrárně. Pro uvolnění štěpných produktů z poškozených souborů se využívá zvýšení teploty. Tato metoda se používá u reaktorů typu BWR. [47]

4.1.1.3 ELEVATE

Tento systém, jak jeho název napovídá, využívá k uvolnění štěpných produktů vyzvednutí palivového souboru do výšky čtyř metrů. Vlivem tlakové diference pak dojde u netěsného paliva k úniku štěpných produktů. V kombinaci s nakláněním souboru je tato technologie asi desetkrát citlivější než IN-CORE. Nevýhodou je však její vyšší cena a riziko poškození souboru nakláněním. Tato metoda se používá u reaktorů typu BWR. [47]

4.1.1.4 CANISTER

U metody CANISTER se testovaný palivový soubor se umístí do speciálního pouzdra v bazénu vyhořelého paliva. Uvolnění štěpných produktů je dosaženo zvýšením teploty nebo snížením tlaku, nebo kombinací obojího. Ke zvýšení teploty je využit zbytkový výkon a k regulaci tlaku vzduchový polštář v horní části pouzdra. Odebrané vzorky se pak vyhodnotí v laboratoři na elektrárně, ale je možná i online detekce plynů. [47]

4.1.1.5 IN-MAST

V tomto případě je zařízení pro sipping implementováno přímo do zavážecího stroje. Palivové soubory jsou tak testovány během manipulací při odstávce. Kontrola těsnosti spočívá v detekci plyných štěpných produktů v obsahu vzduchu nasávaného nad palivovým souborem.

Tento vzduch je po detekci přiveden pod spodní část souboru a jako proud bublin prochází přes soubor a obíhá tak v uzavřeném cyklu. [28]. [47]

4.1.2 Kontrola integrity pokrytí

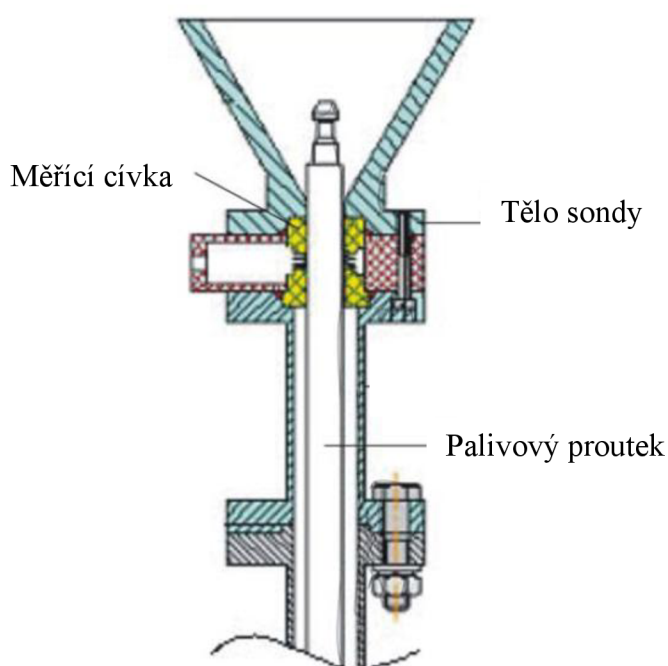
Pokud je metodou sipping identifikován netěsný soubor, je dále nutné určit, které konkrétní palivové proutky jsou netěsné. Pro hledání netěsných palivových proutků se používá například ultrazvuk. Pomocí ultrazvukových sond je možné odhalit, zda palivový proutek obsahuje vodu a tím pádem je netěsný. Integritu pokrytí je ale možné zkontrolovat například i pomocí vířivých proudů.

4.1.2.1 Vířivé proudy

Kromě kontroly integrity pokrytí je možné pomocí vířivých proudů měřit i tloušťku oxidické vrstvy, tomuto měření je věnována kapitola 4.1.5.2.

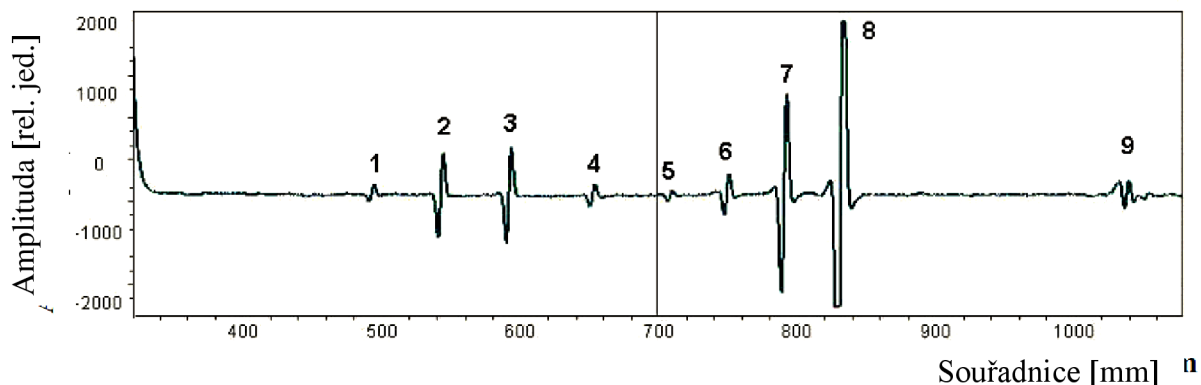
Metoda vířivých proudů je běžně používaná metoda i v jiných odvětvích průmyslu. Pomocí cívky jsou do testovaného materiálu naindukovány vířivé proudy. Magnetické pole vytvořené vířivými proudy působí proti magnetickému poli, které tyto proudy vyvolalo. Případné defekty v materiálu vyvolají změny v magnetickém poli vyvolaném vířivými proudy, na základě této změny jsou pak defekty detekovány. Povrchová vada, například trhlina, kolmá ke směru vířivých proudů ovlivňuje výsledné pole nejvíce. [29], [30]

Pro kontrolu integrity pokrytí palivového proutku pomocí vířivých proudů je nutné proutek vyjmout z palivového souboru a vložit jej do speciálního kontejneru, ten je znázorněn na Obr. 4-2. V horní části je umístěna sonda zařízení pro kontrolu integrity vloženého palivového proutku. Vytahováním proutku směrem nahoru, skrz tuto sondu koaxiálního tvaru, je postupně zkontrolován celý povrch pokrytí. Sonda se skládá z jedné cívky, která je napájena střídavým proudem a vytváří magnetické pole, a ze dvou měřicích cívek, které vyhodnocují rozdíl mezi magnetickým polem vyvolaným cívkou a magnetickým polem vyvolaným naindukovanými vířivými proudy. [31]



Obr. 4-2: Zařízení pro kontrolu integrity pokrytí vířivými proudy [31]

Na Obr. 4-3 je zobrazen průběh výstupních signálů sondy pro různé, uměle vytvořené defekty na neozářeném palivovém proutku.



Obr. 4-3: Výstup metody vířivých proudů pro různé defekty [31]

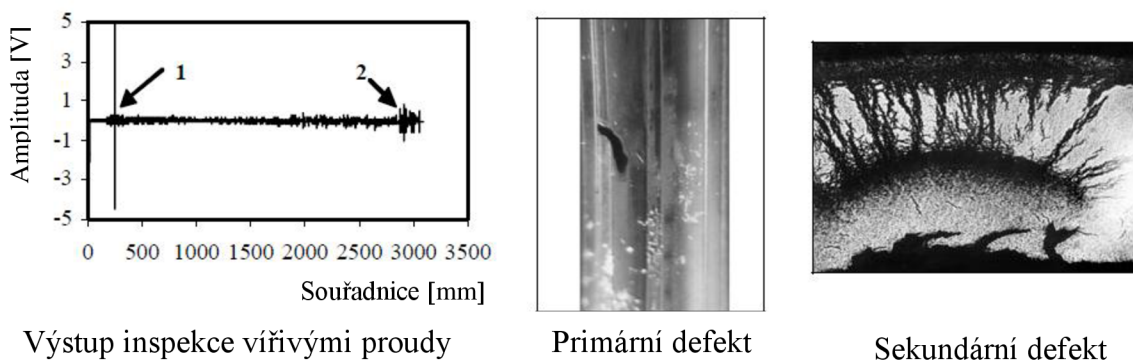
K jednotlivým signálům je v Tab. 4-1 stručný popis defektu uměle vytvořeného defektu na pokrytí palivového proutku.

Tab. 4-1: Seznam uměle vytvořených defektů [31]

Číslo defektu	Popis defektu
1	Vnější otvor o průměru 0,7 mm a hloubce 0,3 mm
2	Vnější obvodový vryp o hloubce 0,06 mm a šířce 0,08 mm
3	Vnější obvodový vryp o hloubce 0,10 mm a šířce 0,14 mm
4	Vnější otvor o průměru 0,7 mm a hloubce 0,5 mm
5	Otvor v pokrytí o průměru 0,4 mm
6	Otvor v pokrytí o průměru 0,8 mm
7	Otvor v pokrytí o průměru 1,5 mm
8	Otvor v pokrytí o průměru 2,5 mm
9	Vnitřní obvodový vryp o hloubce 0,20 mm a šířce 0,25 mm

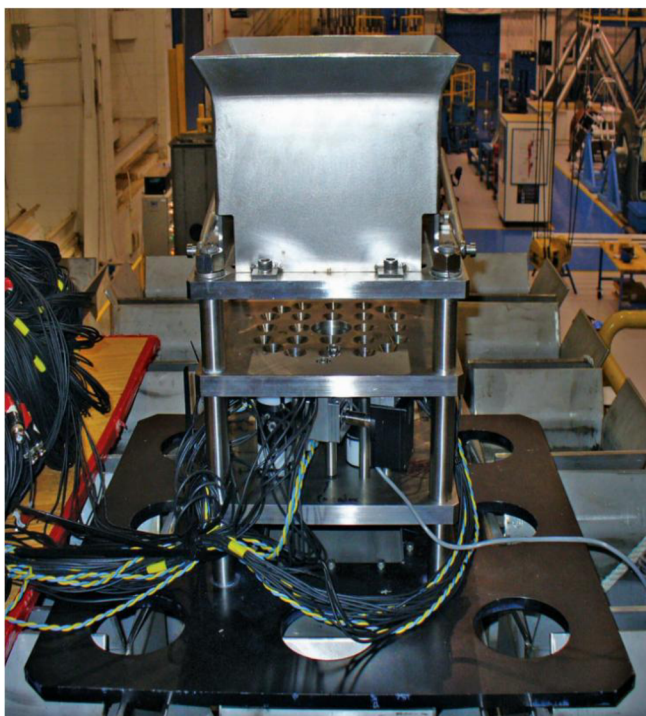
Tato metoda dosahuje velké spolehlivosti identifikace defektu, ale je nutné palivový soubor rozebrat a zkontrolovat jednotlivě každý proutek, což je časově náročné a je zde riziko poškození při manipulacích.

Touto metodou je možné odhalit i vznik sekundárního defektu pokrytí. Jak dokazuje Obr. 4-4, kde je vidět detekce primárního defektu vlivem otěrem nečistoty nebo cizího předmětu v dolní části proutku a v horní části proutku je detekována hydridace pokrytí na vnitřní straně proutku.



Obr. 4-4: Detekce primárního a následného sekundárního defektu [31]

Metoda vířivých proudů může mít i další využití v podobě kontroly stavu klastrů. Společnost Westinghouse vyvinula zařízení pro kontrolu řídicích a kontrolních tyčí založené na vířivých proudech. Zařízení testuje 5 nebo 6 tyčí najednou, to podle rozměru palivového souboru, pro které je svazek kontrolních tyčí určen. Pro soubory 15x15 má svazek 20 tyčí, pro soubory 17x17 má 24 tyčí. Najednou je tedy testováno 5 z 20 nebo 6 z 24 tyčí. Tyč, která vykazuje největší poškození, je vybrána a podrobena bližšímu zkoumání pomocí ultrazvuku. Po dokončení kontroly prvních 5 nebo 6 tyčí je svazek pootočen a stejným způsobem se kontrolují další tyče, dokud není zkontrolován celý svazek. Zařízení pro kontrolu svazků regulačních a kontrolních tyčí je zobrazeno na Obr. 4-5. [32]



Obr. 4-5: Zařízení pro kontrolu řídicích a regulačních orgánů [32]

4.1.2.2 Ultrazvuk

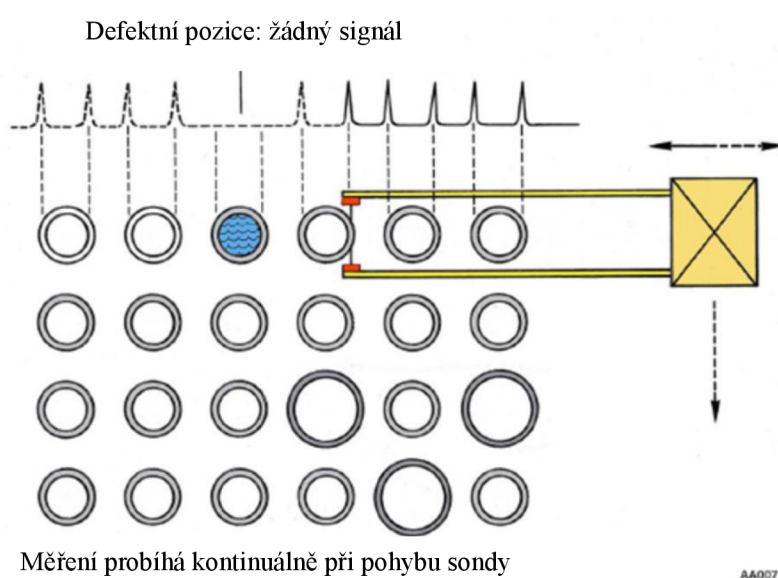
Ultrazvuková metoda je také nedestruktivní. V případě západního designu paliva není nutné soubor rozebírat, je to tedy metoda časově méně náročná a je nižší riziko poškození souboru při manipulacích. U paliva pro reaktory VVER-1000 je však nutné ze souboru demontovat hlavici.

Princip spočívá v detekci vody uvnitř kontrolovaného palivového proutku, odražená ultrazvuková vlna se liší v případě, zda palivový proutek obsahuje plyn nebo vodu. Způsob detekce netěsného proutku pomocí ultrazvuku se u reaktorů PWR a VVER liší. Principiálně je však stejný.

PWR

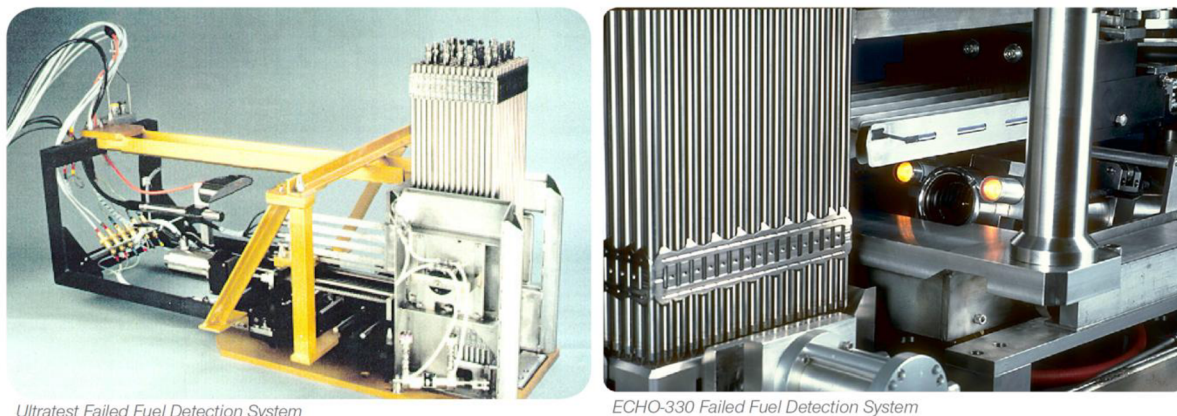
Pro tlakovodní reaktory typu PWR byly vyvinuty speciální sondy o malých rozměrech, které se vejdou do mezery mezi sousedními proutky. To umožňuje plně zautomatizování měření a jeho zrychlení. Zařízením pro automatizované měření disponují například společnosti Westinghouse nebo AREVA.

Westinghouse své zařízení pro automatizované detekování netěsných palivových proutků nazývá AFIS II (Automated Fuel Inspection System). Toto zařízení bylo vyvinuto z původního zařízení ABB. Skládá se z vysílací a přijímací ultrazvukové sondy. Sondy jsou uloženy na dvou ramenech tak, aby je bylo možné z boku zasunout do palivového souboru a proměřit každý palivový proutek. Sondy se do souboru vsouvají zpravidla ve spodní části palivového souboru nad první distanční mřížkou. Ultrazvukový puls vyslaný vysílací sondou je přijímán přijímací sondou. Vyhodnocuje se amplituda přijatého pulsu i doba přenosu. Pokud je mezi sondami palivový proutek, doba přenosu se zkrátí vlivem rychlejšího šíření ultrazvukových vln v materiálu pokrytí. Pokud je proutek defektní a obsahuje vodu, projeví se to na změně amplitudy a době přenosu pulsu. Schematické znázornění měření je zobrazeno na Obr. 4-6. [33]



Obr. 4-6: Schematické znázornění funkce ultrazvukové kontroly PP společnosti WEC [33]

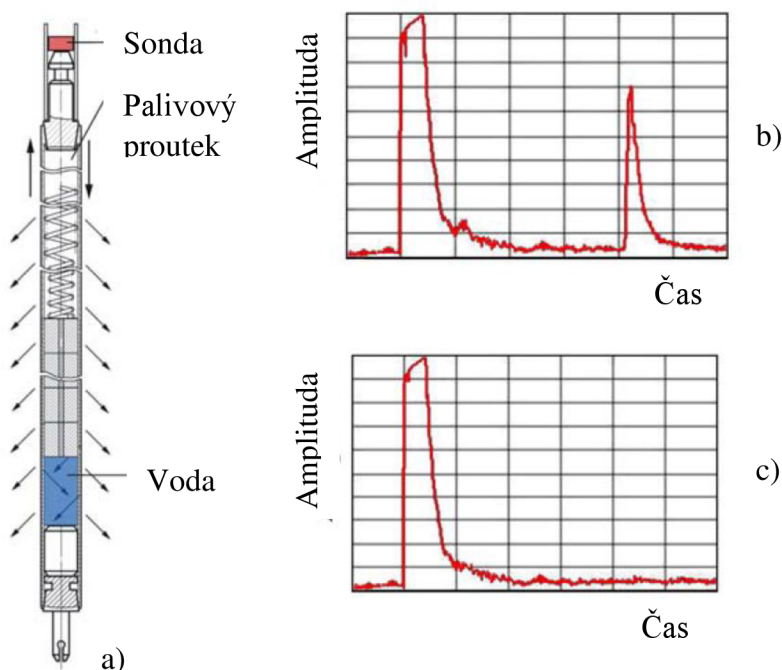
AREVA disponuje dvěma systémy plně automatizované ultrazvukové kontroly palivových proutků. Jedná se o systémy ECHO-330[®] a Ultratest[™]. Zařízení jsou vybavena více sondami pro zrychlení měření a disponují počítačovou kontrolou a zpracováním naměřených dat. Každá sonda je vybavena vysílačem a přijímačem ultrazvukového signálu a je umístěna na pružném rameni. Vyslaný ultrazvukový signál prochází pokrytím, přijímačem je potom zachycen a vyhodnocen. Podle množství prošlé energie je pak vyhodnocena integrita palivového proutku. Oba zmíněné systémy jsou zobrazeny na Obr. 4-7. [34]



Obr. 4-7: Zařízení pro ultrazvukovou kontrolu společnosti Areva [34]

VVER

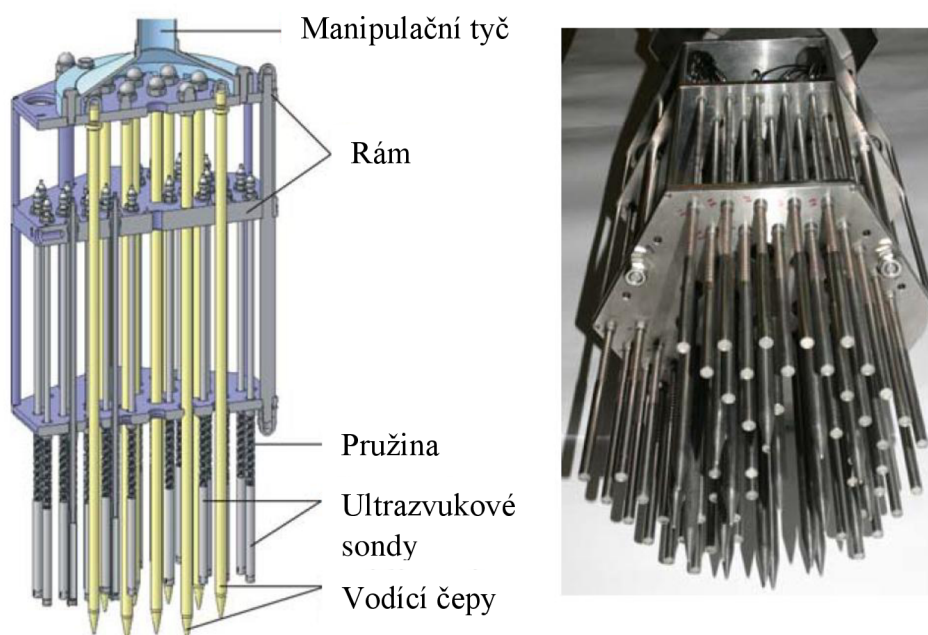
Ultrazvukové vlny jsou generovány sondou přiloženou k horní zátce palivového proutku. Vlny se šíří pokrytím až ke spodní zátce, kde se odrazí a jsou detekovány tou samou sondou, kterou byly vyslány. Pokud proutek obsahuje vodu, energie vln se rozptýlí a amplituda odražené vlny se zmenší natolik, že je menší než šum. Schematické znázornění a příklady výstupu měření těsného a netěsného proutku jsou zobrazeny na Obr. 4-8. Část obrázku označená písmenem „a“ zobrazuje schematické znázornění měření, část obrázku označená písmenem „b“ ukazuje výstup z měření, kdy je proutek těsný. Na části „c“ je pak zobrazen výstup z měření netěsného proutku, který obsahuje vodu. [31]



Obr. 4-8: Princip ultrazvukové kontroly palivového proutku [31]

Pro reaktory VVER-1000, konkrétně pro palivové soubory typu TVSA, byl vyvinut speciální manipulátor s 52 sondami, které musí být pohyblivé v axiálním směru, aby mohly kopírovat nerovnoměrný růst palivových proutků. Po demontování hlavice souboru se tento manipulátor usadí na vrchní část souboru a provede se měření. Poté je manipulátor otočen o 60° a provede se

další měření. Aby bylo proměřeno všech 312 palivových proutků v souboru, je nutné s manipulatorem šestkrát otočit. [31]



Obr. 4-9: Zařízení pro ultrazvukovou kontrolu pro rektory VVER 1000 [31]

4.1.3 Vizuální inspekce

Vizuální kontrola palivového souboru je velmi důležitou součástí inspekce. Její pomocí je možné lokalizovat například zaklíněný cizí předmět, poškození konstrukce palivového souboru a periferních proutků. Pouhým pohledem kamery se případně dají odhalit výrazné geometrické deformace, jak je to patrné například na Obr. 3-1.

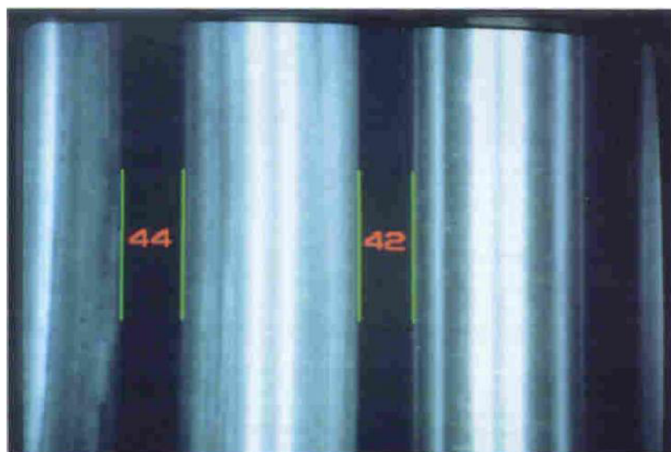
Vizuální inspekce se provádí pomocí speciálních vodotěsných a radiačně odolných kamer. Používají se tubusové nebo CCD kamery. Kamery využívající CCD senzor jsou použitelné v prostředí s omezenou radiací. Bývají vodotěsné a je tedy možné jejich použití pod vodou. Tubusové kamery jsou také vodotěsné a velmi radiačně odolné. Hodí se tedy pro využití při vizuálních inspekcích a lze s nimi provádět i detailní vizuální kontroly palivových proutků. [35]



Obr. 4-10: Tubusová kamera Visatec VT 4065 RR [36]

S využitím softwaru pro zpracování obrazu je možné pomocí vizuální inspekce měřit i některé rozměry palivového souboru. Tohoto využívá například zařízení SICOM vyvinuté společnostmi Tecnomat a ENUSA. Toto zařízení bylo vyvinuto již v roce 1995 pro reaktory se západním typem paliva a bylo vybaveno pro měření rozměrů palivových souborů i proutků a také pro měření oxidické vrstvy pomocí vířivých proudů.

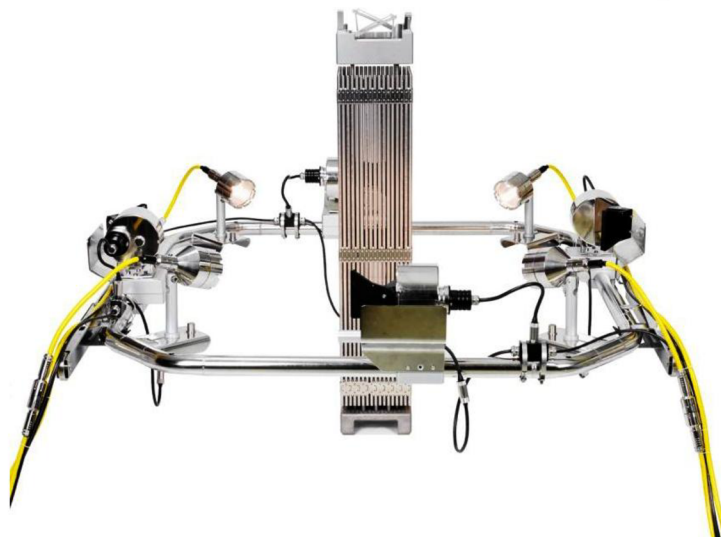
Zařízení je zkonstruováno tak, aby bylo možné zkontrolovat všechny strany palivového souboru. S využitím výše zmíněného softwaru pro zpracování obrazu a automatického výpočtu požadovaných parametrů je možné pomocí vizuální inspekce měřit tyto parametry: vzdálenost mezi spodní a horní částí souboru, délku periferních palivových proutků, vzdálenost mezi periferními proutky a dolní a horní částí souboru, mezeru mezi palivovými proutky, zkrut a průhyb palivového souboru, výšku pružin v horní části souboru, šířku distanční mřížky. [37]



Obr. 4-11: Mezera mezi sousedními palivovými proutky [37]

Pro zrychlení vizuální inspekce palivových souborů vyvinula švédská společnost Ahlberg Electronics systém 4-Face inspection system pro kontrolu všech čtyř stran palivového souboru najednou. Tento systém se používá například na švédské elektrárně Ringhals, na blocích 2,3 a 4 s reaktory typu PWR, a také na dalších elektrárnách v Koreji anebo USA. [38]

Systém využívá čtyři nebo pět kamer. Na každé stěně palivového souboru je jedna kamera a pátá kamera se využívá pro kontrolu spodní části souboru. Tento systém existuje v několika konstrukčních verzích v závislosti na tom, kde je instalován. Může být instalován ve speciální budově pro práci s palivem (Fuel Building) nebo v přepravním koridoru mezi touto budovou a kontejmentem. Na následující obrázku je zobrazeno zařízení pro použití ve speciální budově pro nakládání s palivem. [38]



Obr. 4-12: 4-Face inspekční systém pro fuel building [38]

Nahrávané video je ve vysoké kvalitě a jednotka ovládání a zpracování obrazu umožňuje kromě nahrávaného videa ukládat i snímky všech čtyř stran souboru synchronizované do jednoho velkého snímku. Zařízení je také vybaveno softwarem pro zpracování obrazu, díky němuž je možné získat některé rozměry souboru. Výstup z kamer inspekčního systému je zobrazen na Obr. 4-13. [38]



Obr. 4-13: 4-Face inspekční systém [38]

4.1.4 Kontrola rozměrů a deformace

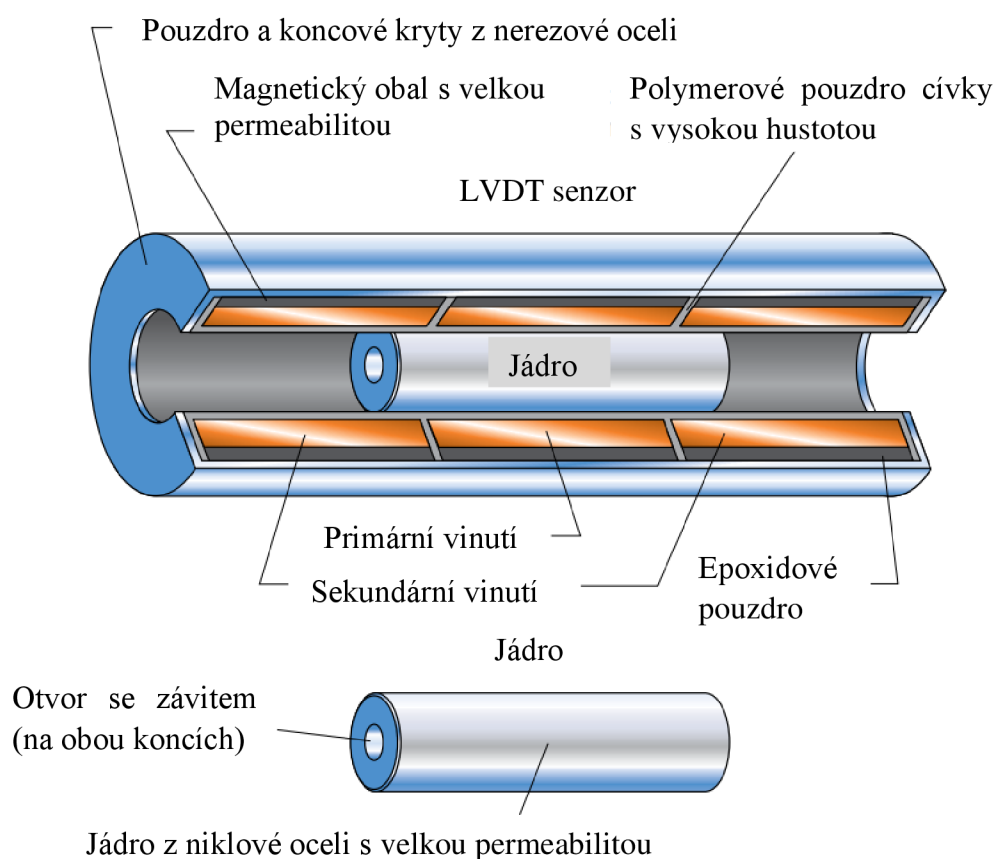
Kontrola geometrických rozměrů je důležitou součástí inspekci palivových souborů. Jejich nadměrná deformace by mohla způsobit selhání klastrových regulačních orgánů, v případě deformace palivových kanálů varných reaktorů selhání křížových regulačních orgánů. Více o deformaci palivových souborů a palivových kanálů je napsáno v kapitole 3.

Ke kontrole deformace palivového souboru je možné využít hned několik technologií a postupů. Kontrola deformace je možná i pomocí kamery během vizuální inspekce palivového souboru. Tato metoda však nepatří k nejpřesnějším a je časově náročnější.

Následující odstavce jsou proto věnovány dvěma modernějším metodám měření rozměrů a deformace palivových souborů případně palivových kanálů varných reaktorů. Jedná se měření pomocí ultrazvuku a LVDT senzorů.

4.1.4.1 LVDT senzory

LVDT (Linear Variable Differential Transformer) snímač je v podstatě speciální typ transformátoru. Kolem pohyblivého jádra je navinuto jedno primární vinutí a dvě sekundární. Do primárního vinutí je přiveden střídavý proud. Pohyb jádra způsobí změnu magnetického toku, a tím ovlivní velikost indukovaného napětí v sekundárních vinutích. Sekundární vinutí jsou zapojena antisériově. V nulové pozici je napětí indukované na obou sekundárních vinutích stejné a výsledné napětí bude tedy nulové. Při posunu jádra se velikost indukovaného napětí na jednom sekundárním vinutí zvýší a na druhém sníží. Výsledné napětí už nebude nulové a jeho velikost se mění lineárně s posunem jádra. Součásti běžného LVDT senzoru jsou zobrazeny Obr. 4-14. [39]



Obr. 4-14: LVDT senzor [39]

LVDT senzory se v průmyslu používají běžně. Slouží k měření polohy, případně měření geometrie různých výrobků v automatických měřicích zařízeních. Tyto senzory disponují poměrně velkou přesností a velkým rozlišením měření, jehož omezujícím faktorem bývá hlavně šum v elektronice vyhodnocovacího obvodu při dnes nejběžnějším digitálním zpracování.

LVDT senzorů využívá například zařízení SICOM-DIM vyvinuté společnostmi Tecatom a ENUSA. Toto zařízení slouží k měření rozměrů palivových souborů a k odhalení případné deformace souboru, jako je zkrut nebo průhyb. Zařízení je vybaveno 12 LVDT senzory, po třech na každé straně palivového souboru. Senzory jsou umístěny na podpěrné desce, která se pohybuje podél celého souboru. Měření probíhá na úrovni každé distanční mřížky a změření jednoho souboru zabere přibližně 20 minut. Zařízení je zobrazeno na Obr. 4-15. [37]



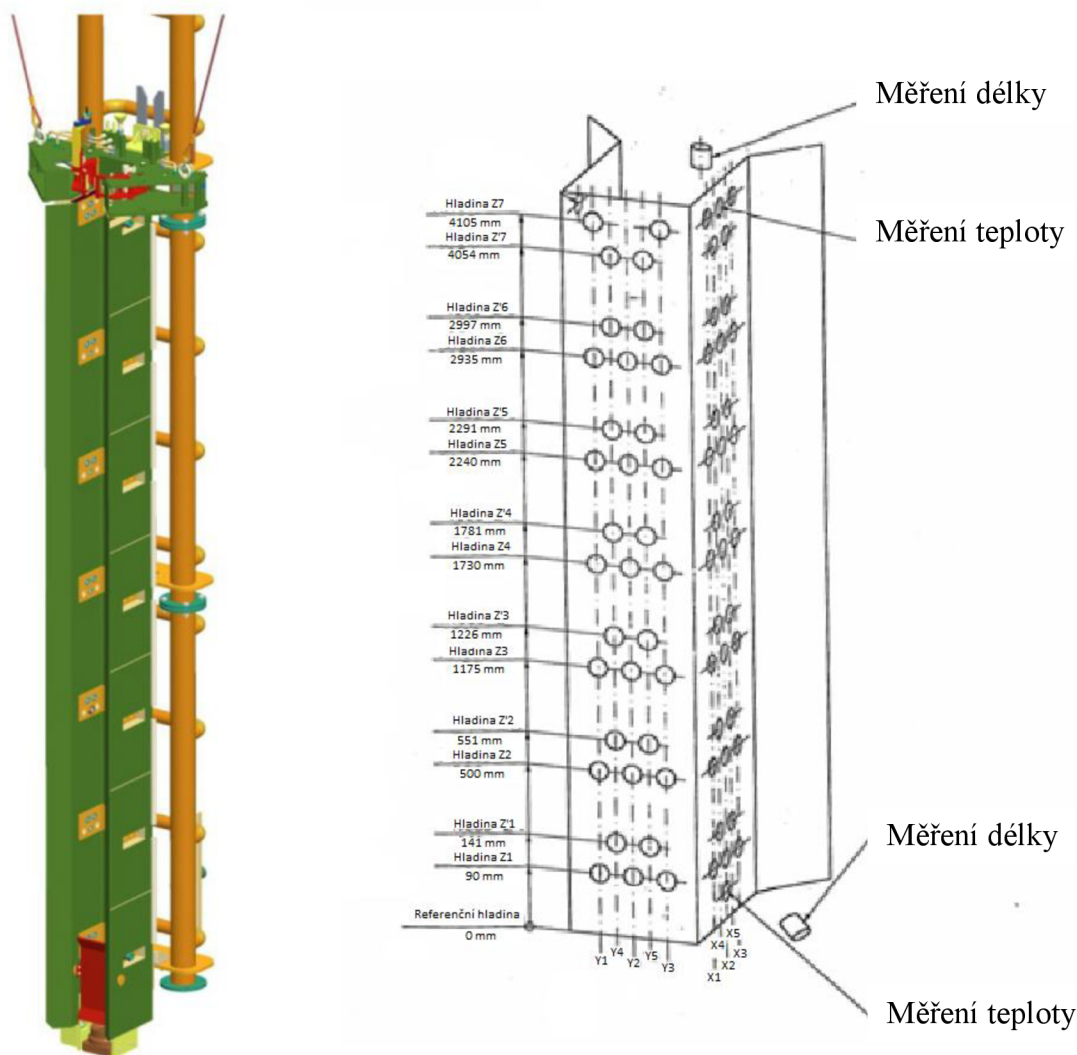
Obr. 4-15 : Zařízení SICOM-DIM [40]

4.1.4.2 Ultrazvuk

Princip této metody spočívá v měření vzdálenosti mezi konstrukcí, na které jsou ultrazvukové sondy umístěny, a vloženým palivovým souborem případně kanálem. Měření deformace a rozměrů palivového souboru, případně palivového kanálu u varných reaktorů ultrazvukovou metodou je výhodné zejména proto, že systém neobsahuje žádné pohyblivé části, což má vliv na jeho přesnost a odolnost celého zařízení.

Ultrazvukovým zařízením pro měření deformace palivového kanálu disponuje například společnost Westinghouse. Pomocí tohoto zařízení je kontrolován průhyb, zkrut, vyboulení a délka palivového kanálu.

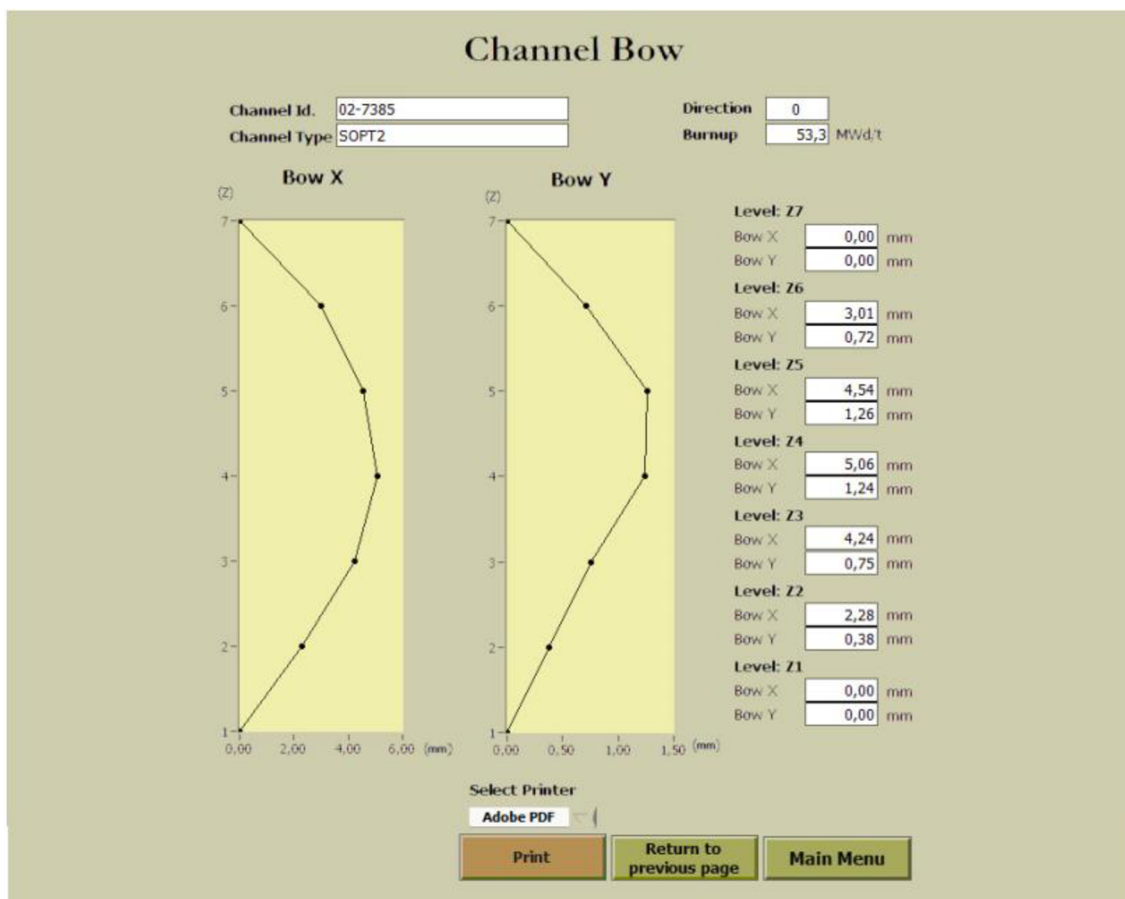
Zařízení je vybaveno, v závislosti na vývojovém stupni nebo přizpůsobení konkrétní elektrárně, 57 až 73 ultrazvukovými sondami. Současná verze systému používá 72 nebo 73 ultrazvukových sond. Sondy jsou instalovány na ocelové konstrukci, která je umístěna v bazénu vyhořelého paliva, kde měření probíhá. Měření probíhá na 7 úrovních palivového kanálu ze dvou jeho stran. Na každé úrovni a každé straně je umístěno 5 ultrazvukových sond. Jejich rozmístění je patrné z Obr. 4-16. Pro správnou kalibraci měřicího zařízení je nutné měření teploty podél palivového kanálu. K měření stačí 2 senzory umístěné ve spodní a horní části, protože průběh teploty podél palivového kanálu je téměř lineární. Kalibrace se provádí vždy před příslušným měřením, ale také kontinuálně v závislosti na naměřených teplotách. [41]



Obr. 4-16: Zařízení pro ultrazvukové měření deformace palivového kanálu [41]

Měření délky palivového kanálu se provádí pomocí dvou snímačů. Jeden je umístěn v horní části a druhý v dolní části, který je skloněný pod úhlem 45° . To umožňuje měření délky všech typů kanálů. Pomocí horního senzoru je detekován celkový růst kanálu. U typů kanálů, které nejsou ve spodní části fixovány, slouží k měření růstu v této oblasti spodní senzor.

Zařízení je ovládáno pomocí speciálního LabVIEW programu, který zobrazuje výsledky jak číselně, tak i graficky. Navíc umožňuje přímé srovnání dříve naměřených dat konkrétního kanálu se současně naměřenými daty a zobrazí tak vývoj průhybu, zkrutu nebo vybočení od posledního měření. Příklad výstupu z měření průhybu je zobrazen na následujícím obrázku Obr. 4-17.



Obr. 4-17: Software pro měření průhybu [42]

Tento systém měření dosahuje přesnosti $\pm 0,2$ mm pro průhyb, zkrut a vyboulení. Pro délku kanálu je to pak $\pm 0,5$ mm.

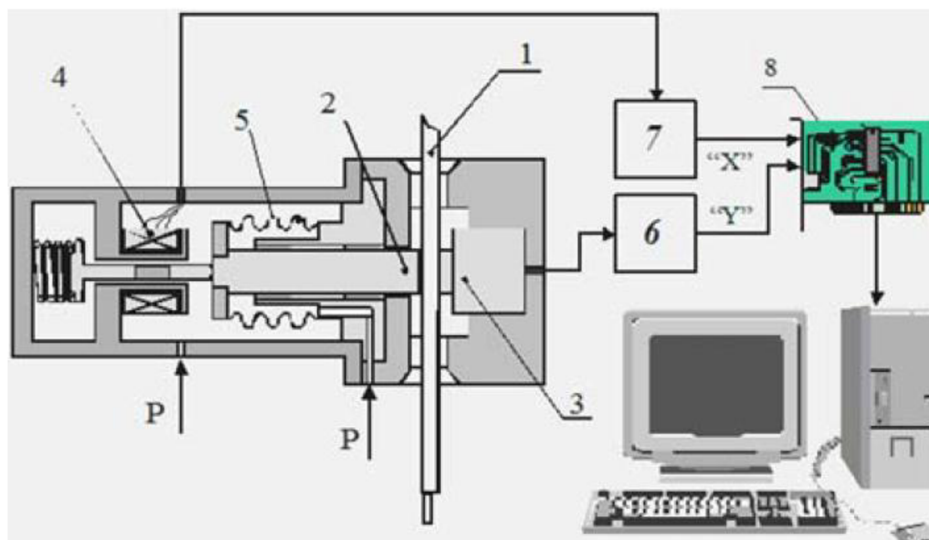
4.1.5 Další inspekce

Stendy inspekce a oprav mohou být, kromě výše uvedených, vybaveny zařízeními i pro další kontroly, jako například zařízením pro měření mezery mezi palivovou tabletkou a pokrytím palivového proutku nebo měření tloušťky oxidické vrstvy na povrchu pokrytí.

4.1.5.1 Měření mezery mezi palivem a pokrytím

Zařízením pro měření šířky mezery mezi palivovou tabletkou a pokrytím palivového proutku je vybaven například stend inspekce a oprav jaderné elektrárny Kalinin.

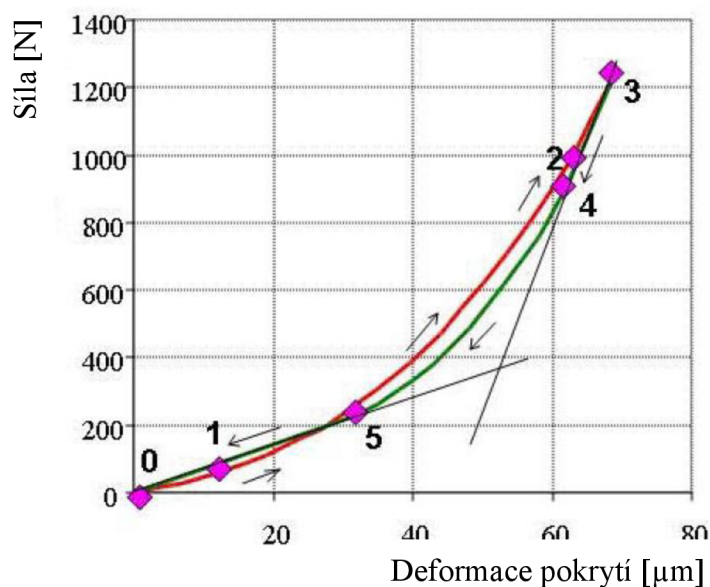
Princip této metody spočívá v lokálním stlačení palivového proutku, dokud nedojde ke kontaktu pokrytí s peletou a následně je vyhodnocen průběh k tomu potřebné síly. Stlačení proutku je provedeno pomocí čepu o průměru 20 mm, na který je přítlačná síla vyvinuta pomocí pneumatického systému. Posun čepu je kontrolován pomocí elektromagnetického snímače. Palivový proutek je vložen mezi tento čep a piezoelektrický senzor zatížení. Schematické znázornění zařízení je parné z Obr. 4-18. [31]



- 1 – Palivový proutek; 2 – Zatěžovací čep; 3 – Senzor zatížení;
 4 – Snímač vychýlení; 5 – Měch; 6 – Převodník zatížení, 7 – Převodník;
 8 – Analogově digitální převodník

Obr. 4-18: Schematické znázornění měření mezery mezi pokrytím a palivem [31]

Příklad diagramu průběhu sil při stlačování a uvolňování je na Obr. 4-19. Oblast mezi body 0 a 1 odpovídá pružné deformaci palivového proutku. Délka této oblasti je závislá na poloze palivového sloupce vzhledem k pokrytí. Nelineární část diagramu mezi body 1 a 2 se dá vysvětlit jako počátek deformace materiálu pokrytí, centrování palivového sloupce případně posunutí fragmentů pelet. Kombinované deformaci pokrytí a pelet odpovídá lineární část diagramu mezi body 2 a 3. Posunutí pelet a jejich fragmentů je neelastické, proto jsou oba lineární úseky diagramu delší a přechodová křivka mezi nimi nižší. Z tohoto důvodu je výsledná mezera mezi palivem a pokrytím určena ze zpětné zatěžovací křivky průmětem lineární části mezi body 5 a 0 na vodorovnou osu. [31]



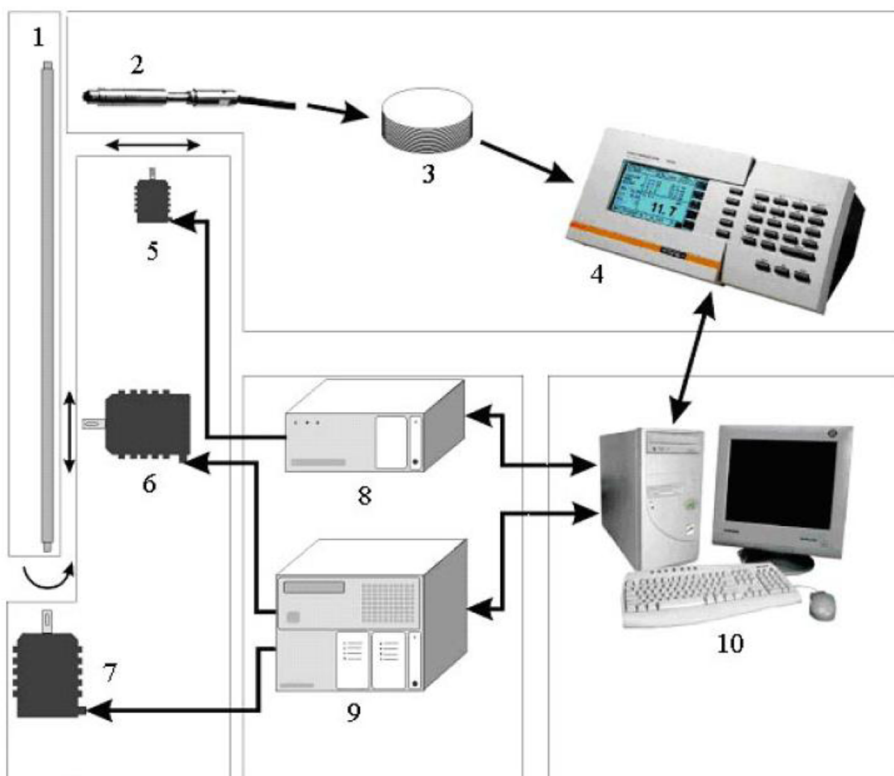
Obr. 4-19: Diagram zatěžovací síly [31]

4.1.5.2 Měření tloušťky oxidické vrstvy

Během provozu reaktoru vzniká na povrchu pokrytí palivových proutků oxidická vrstva. Ta má za následek snížení tepelné vodivosti, a tím pádem dojde ke zvýšení teploty povrchu pokrytí. Zvýšená teplota pak přispívá k rychlejší korozi pokrytí. Tloušťka oxidické vrstvy je v řádech mikrometrů, a tak k jejímu měření je třeba metoda, která dosahuje vysoké přesnosti.

Jako vhodná metoda k měření tloušťky oxidické vrstvy se jeví metoda vířivých proudů, jak již bylo zmíněno v kapitole 4.1.2.1. Princip této metody je poměrně jednoduchý. Pokud cívkou prochází střídavý proud, vytvoří se kolem ní magnetické pole. Pokud je v tomto magnetickém poli umístěn vodivý materiál, naindukují se do jeho povrchu vířivé proudy, které vytvoří magnetické pole v opačném směru proti poli původnímu. To způsobí změnu impedance cívky. Čím větší je vzdálenost mezi cívkou a vodivým materiálem, tím je změna impedance větší. Zvětší se také vzájemná indukčnost mezi cívkou a vodivým materiálem. Při měření tloušťky oxidické vrstvy je sonda přiložena těsně na palivový proutek a vzdálenost mezi sondou a vodivým materiálem pokrytí je rovna měřené oxidické vrstvě. [30]

Schematické znázornění zařízení pro měření oxidických vrstev, které bylo vyvinuto pro pokrytí palivových proutků reaktorů typu VVER, je zobrazeno na Obr. 4-20. Toto zařízení dosahuje přesnosti měření v rozmezí $\pm 4 \mu\text{m}$. [31]



- 1 – Palivový proutek; 2 – Sonda pro měření vířivými proudy;
 3 – Převodník; 4 – Jednotka pro zpracování signálu;
 5,6,7 – Krokové motory; 8,9 – Řídící jednotky krokových motorů;
 10 – Počítač;

Obr. 4-20: Schematické znázornění měření oxidické vrstvy [31]

Zřízení pro měření tloušťky oxidické vrstvy vyvinuly společnosti Tecatom a ENUSA v roce 2000. Jejich zařízení nese název SICOM-COR. Toto zařízení bylo vyvinuto speciálně pro měření tloušťky oxidické vrstvy periferních palivových proutků. Mezi přednosti tohoto zařízení patří malá velikost, nízká hmotnost, snadná instalace. Výhodou je jistě i krátká doba inspekce, která trvá přibližně kolem 10 minut. [37], [43]

Pro detailní kontrolu jednotlivých palivových proutků vyvinuly tyto dvě společnosti zařízení SICOM-ROD, které kromě měření tloušťky oxidické vrstvy umožňuje i kontrolu integrity pokrytí pomocí vířivých proudů, umožňuje provádět profilometrii palivového proutku pomocí dvou LVDT senzorů. Toto zařízení bylo použito poprvé v roce 2006. [37]

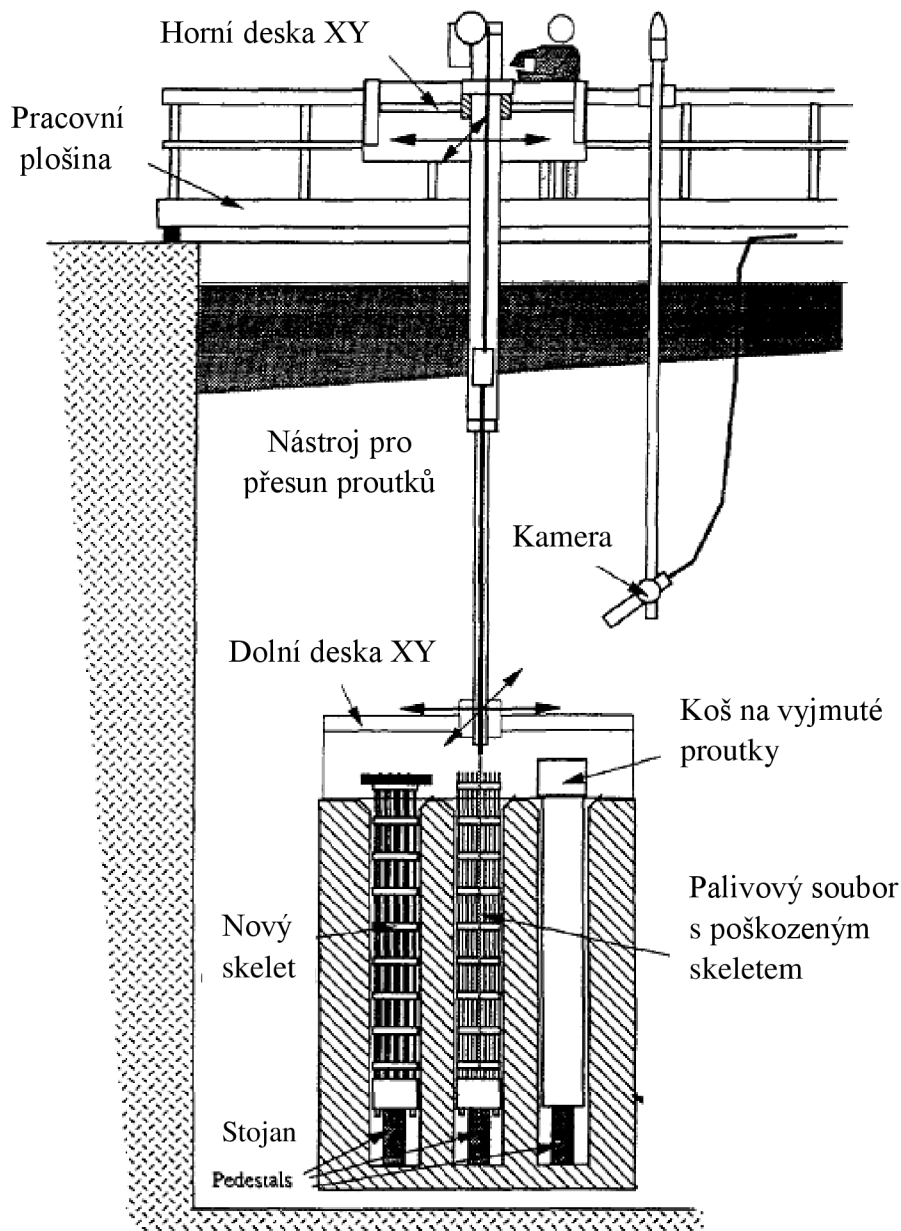


Obr. 4-21: Zařízení pro měření tloušťky oxidické vrstvy periferních proutků SICOM-COR [43]

4.2 Opravy paliva

Pokud dojde k poškození paliva a porušení hermetičnosti vlivem některé z výše uvedených příčin, je možné takový soubor opravit výměnou poškozeného proutku za maketu z nerezové oceli. Takové opravy jsou na reaktorech typu PWR a BWR běžné přibližně od konce osmdesátých let. Palivové soubory na těchto elektrárnách jsou rozebíratelné a po sundání hlavice je možné poškozený proutek vyjmout a nahradit maketou z nerezové oceli. Vyjmutý netěsný palivový proutek je vložen do speciálního koše na vyjmuté proutky, který je uložen v bazénu skladování vyhořelého paliva. Takto opravila společnost Westinghouse od roku 1988 již přes 700 souborů. [44]

Může ovšem dojít i k poškození skeletu palivového souboru, především se jedná o poškození při manipulacích. Již v roce 1985 vyvinula společnost FRAMATOME¹ vybavení pro opravu palivových souborů. A to jak pro náhradu netěsných proutků maketami z nerezové oceli, tak i výměnu skeletu souboru. Jednalo se o soubory AFA (Advanced Fuel Assembly), které měly odnímatelné jak hlavice, tak spodní opěrné uzly. Zmíněné zařízení a průběh opravy souboru jsou patrné z Obr. 4-22. [46]



Obr. 4-22: Zařízení pro opravu palivových souborů společnosti FRAMATOME [46]

4.3 Jaderná elektrárna Temelín

Inspekce paliva probíhají na jaderné elektrárně Temelín od počátku jejího provozu s palivem americké firmy Westinghouse v rámci poradiačního inspekčního programu. Ten byl implementován z důvodu ověření spolehlivosti a kompatibility použitých materiálů s chemickým režimem reaktorů VVER. V roce 2006 se uskutečnilo výběrové řízení na nového dodavatele

¹ V roce 2001 se stala společnost FRAMATOME součástí francouzské národní korporace AREVA

paliva, ve kterém zvítězila ruská společnost TVEL. Poradiační inspekční program byl však zachován a implementován na nový typ paliva.

4.3.1 Inspekce paliva

Od počátku provozu jaderné elektrárny Temelín bylo používáno palivo americké firmy Westinghouse, takže se zde kombinovala východní koncepce tlakovodního reaktoru se západním výrobcem paliva. V průběhu provozu se začaly objevovat provozní problémy, zejména nadměrné kroucení, ohýbání a netěsnosti. Vlivem nadměrného ohýbání docházelo k prodlužování časů pádu regulačních klastrů nebo jejich nekompletnímu dosednutí do koncové polohy. Jak již bylo zmíněno výše, palivové soubory byly modifikovány za účelem zvýšení tuhosti konstrukce. Po příchodu poslední modifikace PhaseIX byly problémy s nedosedáním klastrů minimalizovány, jak je uvedeno v předchozí kapitole. Netěsnosti způsobené otěrem palivových proutků o distanční mřížku však i přes provedené změny nadále přetrvávaly.

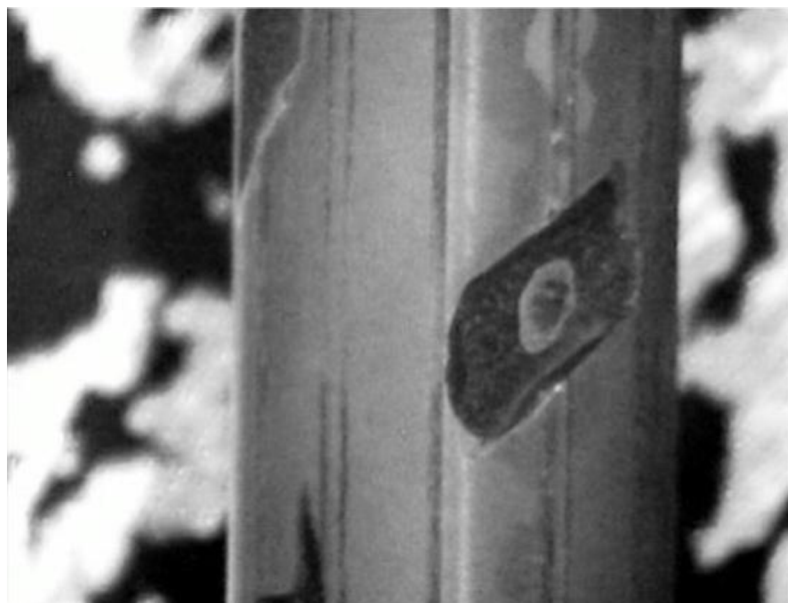
Pokud během provozu dojde k porušení hermetičnosti paliva, projeví se to na aktivitě chladiwa. Sleduje se zejména výskyt štěpných produktů, například Xe nebo Kr. Pokud aktivita chladiwa nepřekročí limitní hodnoty, není nutné odstavovat reaktor. Každý projekt jaderné elektrárny počítá s možným vznikem určitého počtu netěsností. Během plánované odstávky reaktoru je celá aktivní zóna vyvezena z reaktoru do bazénů vyhořelého paliva. Při této manipulaci se kontrolují jednotlivé palivové soubory metodou online sipping přímo na zavážecím stroji. Opět se kontroluje výskyt plyných štěpných produktů. [2]

Jestliže je vybraný soubor pomocí metody sipping označen jako netěsný, je zavezen do mobilního stendu inspekci a oprav, kde je provedena jeho podrobná kontrola, a pokud je to možné, i jeho oprava. Netěsný palivový proutek je identifikován pomocí ultrazvuku. Ultrazvukový systém se u původního amerického a nového ruského paliva liší. Americké palivo využívalo dvou sond, vysílací a přijímací. U ruského paliva se prozvučuje odrazovou metodou, každá sonda obsahuje vysílač i přijímač. Pokud je palivový proutek netěsný, došlo k vniknutí chladiwa dovnitř proutku. Obsažená voda způsobí změnu výstupního ultrazvukového signálu a netěsný proutek je tak identifikován. Ultrazvuková metoda je blíže popsána v kapitole 4.1.2.2 [23]

Mobilní stend inspekci a oprav je ještě dále vybaven pro měření průhybu, zkrutu, délky a pro detailní vizuální inspekce. [23]

4.3.2 Opravy paliva

Během provozu s americkým palivem VVantage-6 bylo na prvním bloku použito 491 souborů a na druhém 470. Celkově bylo zjištěno 67 netěsných palivových souborů. Všechny prověřené netěsnosti byly způsobeny otěrem palivových proutků o distanční mřížku (grid to rod fretting). Většina netěsností byla pouze plynového charakteru. Některé z nalezených netěsností však byly závažnějšího charakteru a došlo k výraznému narušení pokrytí. Jedno z takových poškození je zobrazeno na následujícím obrázku. [21]



Obr. 4-23: Poškození proutku otěrem o distanční mřížku [23]

Jak již bylo zmíněno výše, opravy probíhají na mobilním stendu inspekce a oprav, kam se netěsný palivový soubor zaveze. Ze souboru se demontuje hlavice a netěsný palivový proutek je vyjmut a nahrazen maketou z nerezové oceli. Aby bylo možné opravit palivový soubor, musí splňovat určité podmínky. Například pokud by bylo pokrytí palivového proutku poškozeno, například jeho hydridací, mohlo by během jeho vyjímání dojít k jeho přetržení.

Celkem bylo opraveno 27 palivových souborů, z toho jich 24 bylo metodou sipping označeno jako těsných. Celková efektivita oprav tak dosáhla 93 %. Pouze v jednom případě nebyla správně vyhodnocena míra poškození palivového proutku a při vytahování došlo k jeho přetržení. [21]

4.3.2.1 Výhodnost oprav

Pro názornost výhodnosti oprav palivového souboru je možné z volně dostupných dat určit přibližnou cenu palivového souboru pro reaktor VVER-1000 jaderné elektrárny Temelín.

Cena jaderného paliva se skládá z několika položek a to z ceny samotné uranové rudy, její úpravy, konverze na UF_6 , obohacení a následně výroby peletek, palivových proutků a souborů. Pro výpočet orientační ceny palivového souboru byly použity ceny uvedené v Tab. 4-2. Jedná se o ceny z června roku 2013, pro tuto ilustraci to ovšem postačuje.

Tab. 4-2: Cena paliva vztážená na 1kg [48]

Položka	Poznámka	Cena
Uranová ruda a její úprava	8,9 kg U_3O_8 x \$130	US\$ 1160
Konverze na UF_6	7,5kg U x \$11	US\$ 83
Obohacení	7,3 SWU x \$120	US\$ 880
Výroba paliva		US\$ 240
Celková cena na 1kg paliva		US\$ 2360

Z hodnot uvedených v Tab. 4-2 můžeme vypočítat orientační cenu palivového souboru. Při uvažování středního obohacení 4,29 % dostaneme pomocí kalkulátoru, dostupného na [49] přibližnou cenu jednoho palivového souboru, která je po přepočtu 22 098 691 Kč. Zde je nutné podotknout, že jde o cenu opravdu jen orientační a vypočtenou z volně dostupných dat na uvedených odkazech. Nicméně jako ilustrace pro hodnotu palivového souboru je postačující.

Celkové ekonomické zhodnocení výhodnosti opravy palivového souboru však závisí na dalších parametrech. Jako například kolik plánovaných cyklů má opravovaný soubor ještě absolvovat. Dalším důležitým faktorem je doba opravy souboru, pokud by se kvůli opravě měla prodloužit odstávka o delší dobu, nemusí se oprava souboru vyplatit. Z volně dostupných dat je možné vypočítat přibližnou hodnotu ušlého zisku za jednu hodinu, když elektrárna nebude vyrábět. Při výkupní ceně 1000 Kč za jednu megawatthodinu a při elektrickém výkonu elektrárny 1050 MW vychází hodnota ušlého zisku za jednu hodinu na 1 050 000 Kč. V neposlední řadě je nutné vzít při výměně souboru v úvahu nutnost znovu navrhnout aktivní zónu reaktoru tak, aby splňovala všechna bezpečnostní kritéria, což pravděpodobně bude mít za následek výměnu více souborů. Toto zvýšení nákladů pak hovoří ve prospěch opravy palivového souboru.

Pro představu výhodnosti opravy palivového souboru tedy můžeme použít modelovou situaci, kdy byl pomocí sippingu identifikován jeden netěsný palivový soubor, který se zaveze do mobilního stendu inspekci a oprav, kde bude po sundání hlavice souboru provedena ultrazvuková zkouška za účelem identifikace defektních proutků, tak jak je to popsáno v kapitole 4.1.2.2.. V rámci této modelové situace bude jako výsledek ultrazvukové zkoušky uvažován jeden netěsný proutek. Pokud se po vyhodnocení jeho míry poškození dospěje k závěru, že je tato míra přijatelná, může být zahájena oprava. Poškozený proutek se vytáhne a nahradí se nerezovou maketou.

Pokud by se tedy vlivem těchto operací prodloužila doba odstávky například o 10 hodin, z vypočítané ceny jedné hodiny odstávky je možné určit ušlý zisk na výrobě za tuto dobu, který činí 10 500 000 Kč. V porovnání s cenou nového souboru 22 098 691 Kč jde tedy o značnou úsporu. Pokud by se v rámci nového návrhu vsázky měnilo souborů více, byla by tato úspora ještě výraznější.

I zde je potřeba uvést, že cena je vypočítána z volně dostupných dat bez návaznosti na ETE a toto jednoduché ilustrativní zhodnocení není detailní ekonomickou analýzou.

5 MĚŘENÍ DEFORMACÍ NA ETE

Nadměrné geometrické deformace palivového souboru, případně kanálu, mohou mít vliv na bezpečnost provozu jaderné elektrárny. Jak je uvedeno ve třetí kapitole, pokud průhyb palivového souboru nebo kanálu dosáhne kritických hodnot, může být ohrožena funkce kontrolních a regulačních orgánů.

5.1 Současnost

V současné době jsou inspekce paliva na jaderné elektrárně Temelín prováděny pomocí mobilního stendu inspekci a oprav palivových souborů, kde se provádí vizuální inspekce palivových souborů a pomocí tohoto zařízení jsou také kontrolovány rozměry a geometrické deformace vybraných souborů. Vizuální inspekce je důležitou součástí inspekci paliva, je však poměrně časově náročná, proto je během odstávky kontrolováno pouze několik vybraných souborů. [23]

Pro představu časové náročnosti vizuální inspekce uvažujme rychlost pohybu kamery, která snímá jednu stranu palivového souboru, 20 mm/s. Při délce palivového souboru přibližně 4,5 metru můžeme odhadnout dobu potřebnou pro vizuální inspekci. V případě, že kamera bude snímat celou stranu palivového souboru, potrvá vizuální inspekce 22,5 minuty, pokud by snímala například jen polovinu strany pro detailnější zobrazení, potrvá inspekce 45 minut. Tyto časy jsou jen odhadem čisté doby, kdy kamera snímá soubor, nezahrnují potřebné manipulace, které umožní zkontrolovat všechny strany palivového souboru. Vizuální inspekce tak trvá déle než výše uvedené časy.

Pro samostatné měření rozměrů a kontroly deformace palivových souborů by tedy bylo vhodné využít nějakou jinou, časově méně náročnou metodu. Tím pádem by bylo možné během jedné odstávky zkontrolovat více souborů na průhyb, zkrut a případně délku palivového souboru za stejný časový úsek. S větším počtem změřených souborů se zlepšuje představa o chování palivových souborů v aktivní zóně reaktoru z hlediska geometrických deformací.

5.2 Nová metoda

Pro měření deformace je možné využít například LVDT senzorů nebo ultrazvuku. Jedná se o ve světě již používané metody měření, viz kapitola 4.1.4. A právě ultrazvuku budou věnovány následující odstavce. Jde o nedestruktivní metodu měření s dobrou přesností a rychlostí měření, což dokazuje například zařízení pro měření deformace palivového kanálu varných reaktorů používaného společností Westinghouse, podrobněji rozebraného v kapitole 4.1.2.2. Proti zařízení se senzory LVDT spočívá výhoda ultrazvukového měření v tom, že měřící zařízení neobsahuje žádné pohyblivé části.

V následujících odstavcích je proveden návrh, který nastiňuje možnou podobu měření deformace palivového souboru. Návrh je podpořen měřením na měřicím zařízení pro měření pozice distanční mřížky, které bylo vyvinuto a vybudováno v Centru výzkumu Řež. Pro toto zařízení bylo přijato několik zjednodušujících předpokladů, aby zařízení bylo možné realizovat v laboratorních podmínkách. Toto zařízení je blíže popsáno dále v této kapitole.

5.2.1 Ultrazvuk

Měření deformace palivového souboru musí probíhat v bazénu skladování vyhořelého paliva pod vodní hladinou. Voda slouží k odvodu poměrně velkého zbytkového výkonu palivových

souborů, ale také jako stínění a chrání tak obsluhu před zářením. Je tedy nutné použít ultrazvukové sondy, které mohou být používány pod vodní hladinou.

Princip této metody měření deformace palivového souboru je poměrně jednoduchý. Spočívá v měření vzdálenosti mezi ultrazvukovou sondou a měřeným povrchem. V tomto případě se tedy jedná o distanční mřížku, případně spodní opěrný uzel palivového souboru. Z naměřených vzdáleností je pak možné dopočítat posun distanční mřížky, který se projeví při průhybu souboru, nebo pootočení mřížky, které se objeví při zkrutu souboru.

5.2.1.1 Konstrukce zařízení

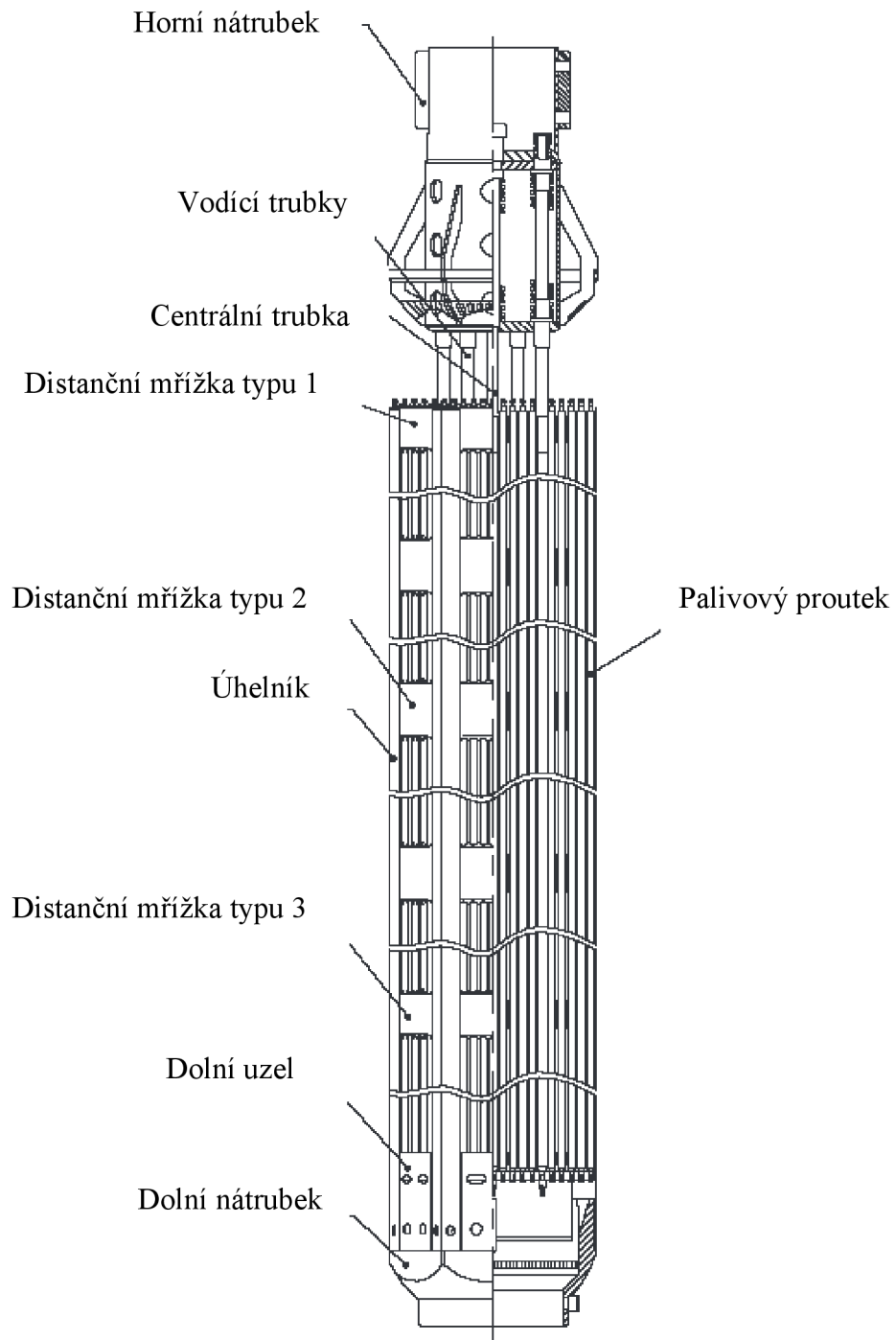
Nevýhodou elektráren s reaktory VVER, oproti některým elektrárnám PWR a BWR, je absence speciální budovy pro operace s palivem tzv. fuel building. V této budově mohou probíhat inspekce paliva i za provozu bloku a nejsou tak omezeny pouze na odstávky. Z důvodu absence této budovy bude pravděpodobně nutné pro novou ultrazvukovou metodu měření deformace palivového souboru navrhnout speciální mobilní konstrukci pro použití přímo v bazénu skladování vyhořelého jaderného paliva. Podobně jako je mobilní stand inspekce a oprav, na kterém jsou v současnosti prováděny vizuální inspekce a pomocí kamerového systému i měření deformace palivového souboru. Jeden mobilní stand by mohl být využitý pro oba bloky, což by jistě mělo pozitivní ekonomický efekt. Na druhou stranu by ale vyvstaly problémy například s dekontaminací zařízení a také s časovou náročností instalace zařízení při každé odstávce. Světlady by tak mělo i zařízení, které by v bazénu mohlo být instalováno trvale. Odpadly by například nutné dekontaminace zařízení, které by po vyjmutí z bazénu byly nutné, ale i další problémy spojené například s instalací při každé odstávce. Návrh takového zařízení by však byl komplikovanější, zejména z důvodu prostorového uspořádání v bazénu. A ultrazvukové sondy by byly neustále vystaveny radiaci, což by mohlo mít negativní vliv na jejich životnost.

5.2.1.2 Měřicí hladiny

Nosný skelet palivového souboru TVSA-T je tvořen z 6 úhelníků, 18 vodicích trubek 8 distančních mřížek a spodního opěrného uzlu. Soubor obsahuje 3 druhy distančních mřížek. Jejich rozmístění a celková konstrukce palivového souboru je zobrazena na Obr. 5-1.

Pro nejlepší představu o průhybu palivového souboru by bylo vhodné provádět měření na všech distančních mřížkách a spodním opěrném uzlu. Tedy celkem by bylo měření prováděno na 9 výškových hladinách.

Jak je zmíněno v kapitole 4.1.4.2 o ultrazvukovém měřicím zařízení palivového kanálu společnosti Westinghouse, průběh teploty podél palivového souboru se předpokládá téměř lineární. Proto je tedy dostačující měření teploty v jeho spodní a horní části a na základě tohoto měření pak provést tepelnou kompenzaci ultrazvukových sond. Nicméně provedení teplotní kompenzace je nutné, protože jinak by sondy v horních částech souboru s větší teplotou při stejné vzdálenosti naměřily jinou vzdálenost než sondy ve spodních částech. To vyplývá z principu měření vzdálenosti pomocí ultrazvuku. Při různých teplotách se ultrazvukové vlny budou prostředím šířit různou rychlostí, to pak ovlivní čas, za který se vrátí odražený signál. Na základě tohoto času je pak vyhodnocena vzdálenost.



Obr. 5-1: Konstrukce palivového souboru TVSA-T [50]

5.2.1.3 Počet sond

Z předpokladu tvarové stálosti distanční mřížky pro detekci změny její pozice teoreticky stačí měření vzdálenosti na dvou jejích stranách. To znamená, že na jednu měřicí hladinu by byly instalovány 2 ultrazvukové sondy, na celý soubor pak celkem 18 ultrazvukových sond.

Pro správnou detekci pootočení distanční mřížky bude pravděpodobně vhodné použití více ultrazvukových sond na jedné měřicí hladině, například přidáním další sondy na jednu z měřených stran. V takovém případě by na jedné měřicí hladině byly sondy tři. Celkově by pak na soubor připadlo 27 ultrazvukových sond. Což by ovšem zvýšilo pořizovací náklady takového

zařízení. Zde by bylo vhodné provést detailnější analýzu a ověření dalšími měřeními, zda by toto řešení přineslo očekávané výsledky.

5.2.1.4 Vyhodnocení měření

Podobně jako na zařízení popsaném v 4.1.4.2 i zde by bylo vhodné využití multiplexoru pro připojení ultrazvukových sond. Měření by tak probíhalo postupně po jedné nebo dvou sondách současně. Zároveň by se tím eliminovalo vzájemné ovlivnění sousedních sond.

Naměřená data by následně mohla být zpracována například programem LabVIEW nebo podobným softwarem. Ten by také umožnil okamžité vykreslení deformace souboru a v případě, že by se již jednalo o v minulosti měřený soubor, i zobrazení vývoje deformace souboru. Navíc by umožňoval automatizaci měření, což by eliminovalo faktor lidské chyby při měření.

5.2.2 Měření

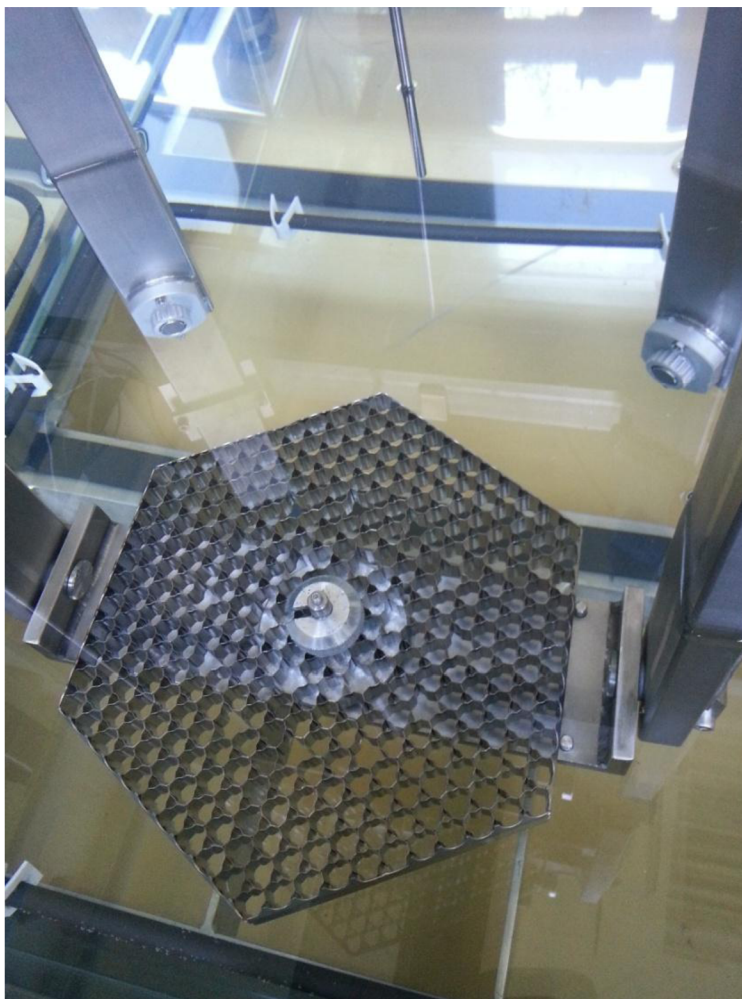
Vhodnost navrhované metody není možné ověřit přímo na elektrárně, ale dobrou příležitostí poskytuje experimentální měřicí zařízení pro měření pozice distanční mřížky vyvinuté v Centru výzkumu Řež. Toto zařízení a výsledky měření jsou popsány dále.

5.2.2.1 Měřicí zařízení

Měření za účelem ověření vhodnosti této metody bylo provedeno na experimentálním zařízení v Centru výzkumu Řež. Jedná se o zařízení pro měření pozice jedné distanční mřížky palivového souboru pro reaktory VVER-1000, tedy šestihranné geometrie. Zařízení je vybaveno vychylovacím systémem, který umožňuje nastavit požadovanou polohu distanční mřížky, která je následně detekována pomocí dvou ultrazvukových sond. Na zařízení je tedy možné simulovat průhyb posunem distanční mřížky v osách x a y , ale také je možné natočením distanční mřížky simulovat zkrut palivového souboru.

Měřicí zařízení se snaží co nejdříve napodobit podmínky panující v bazénu skladování vyhořelého paliva. Aby bylo zařízení realizovat v laboratorních podmínkách, musela být přijata jistá zjednodušující opatření, např. pro simulaci souboru je použita pouze jedna distanční mřížka, měření probíhalo ve vodě bez obsahu kyseliny borité, hydrostatický tlak neodpovídá tlaku u dna bazénu vyhořelého paliva a měření probíhalo bez přítomnosti radiace.

Na Obr. 5-2 je zobrazeno měřicí zařízení. Je zde vidět šestihranná distanční mřížka uchycená ke konstrukci, která umožňuje nastavování polohy mřížky, a dvě ultrazvukové sondy, které pak detekují polohu mřížky. Sondy jsou připojeny k defektoskopu, který zobrazuje rovnou naměřenou vzdálenost oběma sondami. Z těchto vzdáleností je pak dopočítáno posunutí nebo natočení distanční mřížky.



Obr. 5-2: Zařízení pro měření pozice distanční mřížky

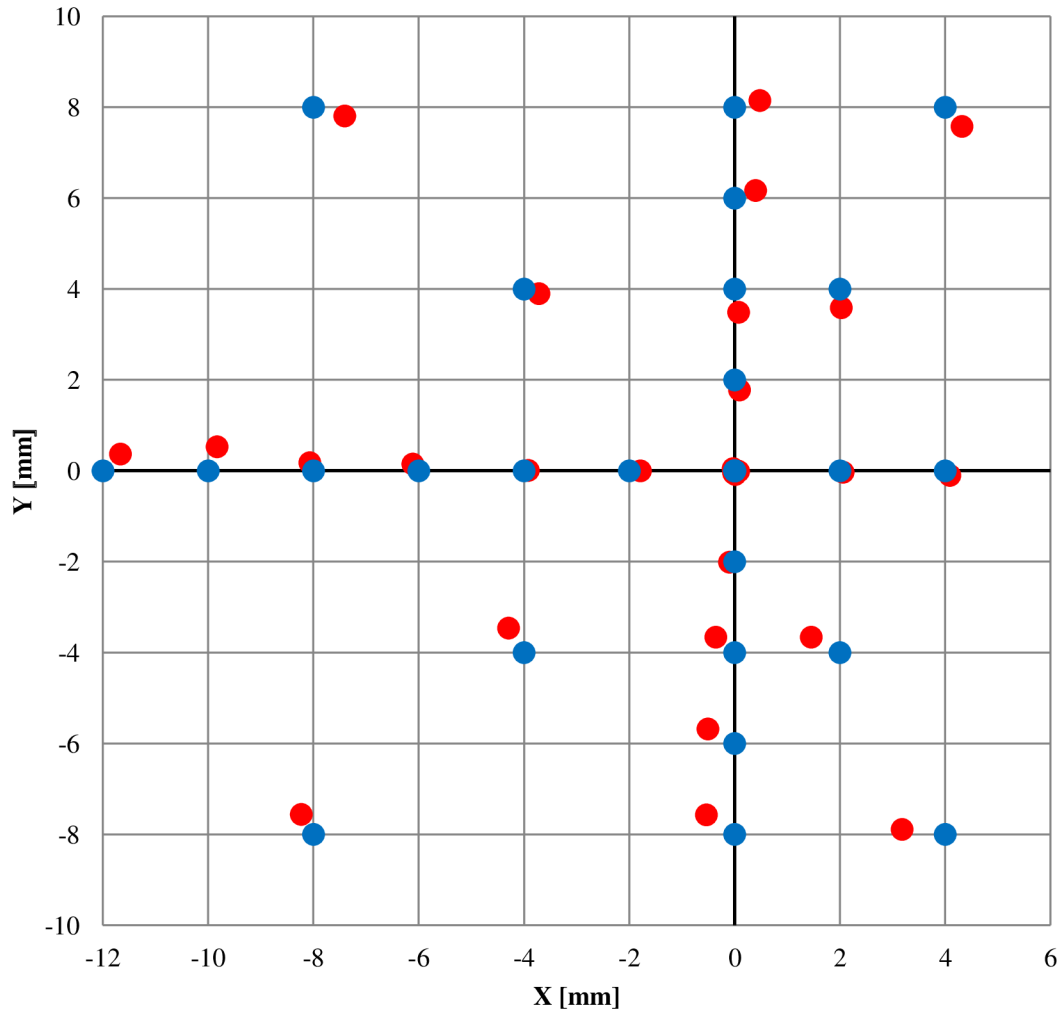
5.2.2.2 Výsledky měření

Posunutí

Jak je již zmíněno výše, posunutí distanční mřížky v ose x nebo y se uplatní při průhybu souboru. Ve skutečnosti se při průhybu souboru uplatní i sklon mřížky, ale ten při tomto měření není uvažován. Pomocí vychylovacího zařízení byly na experimentálním zařízení nastavovány různé hodnoty posunu mřížky v osách x a y . Nejprve byly proměřeny posuny pouze v jednotlivých osách a následně pak kombinované posuny v obou osách současně.

Na Obr. 5-3 jsou graficky zobrazeny výsledky měření. Modrou barvou jsou vyznačeny hodnoty nastavené, červenou barvou pak hodnoty detekované pomocí ultrazvukových sond. Veškeré naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze v Tab. A-1.

Posunutí distanční mřížky



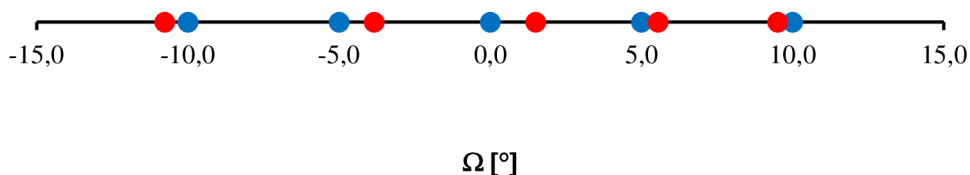
Obr. 5-3: Naměřené hodnoty posunutí distanční mřížky

Teoreticky by se měly nastavené hodnoty a změřené hodnoty překrývat. Z grafického znázornění hodnot na Obr. 5-3 je ale patrné, že se na nastavené hodnoty ne vždy s nastavenými překrývají. Maximální odchylka nastavené a naměřené hodnoty činí 0,83 mm. Tato odchylka může být způsobena volným uchycením distanční mřížky, malou tuhostí konstrukce zařízení, která se při použití síly prohýbá. Nezanedbatelný vliv na nepřesnosti při měření má také lidský faktor při nastavování pozice vychýlení a při odečítání hodnot. Hlavní příčiny nepřesnosti měření jsou tedy způsobeny samotnou konstrukcí experimentálního zařízení a v případné průmyslové aplikaci se neuplatní. V případě automatického sběru, by byl eliminován i lidský faktor.

Pootočení

Pootočení distanční mřížky se uplatní při zkrutu souboru. Grafické znázornění naměřených hodnot je na Obr. 5-4, naměřené hodnoty jsou v příloze v Tab. A-2. Nastavené hodnoty pomocí vychylovacího zařízení jsou vyznačeny modrou barvou. Červenou barvou jsou vyznačeny detekované hodnoty. Distanční mřížka je natačena podél svislé osy, která prochází jejím středem.

Pootočení distanční mřížky



Obr. 5-4: Naměřené hodnoty pootočení distanční mřížky

Maximální odchylka mezi nastaveným úhlem natočení a detekovaným činila $1,5^\circ$. Příčiny vzniku nepřesností při měření se shodují s předchozím měřením, tedy v samotné konstrukci experimentálního zařízení a v lidském faktoru nastavování a odečítání hodnot. Zejména nastavení požadovaného úhlu je složité z důvodu spíše orientačního charakteru stupnice. K těmto příčinám se přidává navíc nedokonalá rovina bočního plechu distanční mřížky a vliv má také zjednodušení při výpočtu. Maximální odchylka mezi nastaveným úhlem natočení a detekovaným činila $1,5^\circ$.

5.2.2.3 Celkové shrnutí měření

Vzhledem k tomu, že příčiny vzniku nepřesností v samotné konstrukci experimentálního zařízení a vnesení lidského faktoru do měření by se v průmyslové aplikaci tohoto měření neuplatnily, prokázala ultrazvuková metoda měření pozice distanční mřížky celkem dobrou přesnost v případě simulace průhybu souboru posunutím distanční mřížky. Při simulaci zkrutu souboru pootočením distanční mřížky je odchylka mezi nastavenými a detekovanými hodnotami celkem velká. Zlepšení přesnosti měření pootočení by se dalo dosáhnout přidáním další měřicí sondy na jednu ze stran, případně na obě. Celkově by tedy byly 3, případně 4, sondy na jednu měřicí hladinu.

Při tomto měření byl zvlášť simulován průhyb a zvlášť zkrut palivového souboru. Ve skutečnosti ale tyto deformace mohou nastávat současně, a tak je nutné zapracovat na detekci polohy s kombinovaným posunem a pootočením distanční mřížky palivového souboru.

Pro průmyslovou aplikaci této metody je však nutné ještě ověřit další různé parametry, které byly při konstrukci experimentálního zařízení zjednodušeny. Jedná se například o radiační odolnost ultrazvukových sond, vliv chemie vody v bazénu skladování vyhořelého paliva, hydrostatický tlak u dna bazénu, vliv by také mohl mít zbytkový výkon měřeného souboru a ohřev vody v jeho těsném okolí.

6 ZÁVĚR

Během provozu reaktoru dochází k poškození paliva z různých příčin. Příčiny poškození paliva se liší u jednotlivých typů reaktorů. V minulých letech byla jako nejčastější příčina poškození u tlakovodních reaktorů identifikována poškození otěrem o distanční mřížku, případně otěrem nečistotami nebo cizím předmětem. U reaktorů varných byla identifikována jako nečastější příčina koroze.

Poškození konstrukce palivového souboru může mít vliv na bezpečnost jaderné elektrárny. Pokud průhyb souboru dosáhne kritických hodnot, bude ovlivněna funkce klastrových regulačních orgánů, které pak v extrémních případech nemusí být schopny zastavit řetězovou štěpnou reakci. Podobné bezpečnostní riziko hrozí i u varných reaktorů při deformaci palivového kanálu. Při jeho nadměrném průhybu nebo vyboulení je ovlivněna funkce kontrolního a regulačního orgánu ve tvaru kříže, který se zde zesponu zasouva mezi čtyři palivové kanály.

Vhodnými metodami sledování paliva během provozu je však možné tyto nepříznivé trendy včas zachytit. Navíc je možné poskytnout zpětnou vazbu výrobcům paliva, ti pak mohou provést nápravná opatření. Takovými metodami jsou například vizuální inspekce, ultrazvuková metoda, sipping atd. Vizuální inspekce jsou důležitou součástí inspekce paliva. Mohou odhalit například zachycený cizí předmět nebo nadměrnou korozi. Se softwarem pro zpracování obrazu mohou být pomocí vizuální inspekce měřeny i některé rozměry palivového souboru. Vizuální inspekce je však celkem časově náročná a pro měření deformace palivového souboru je výhodné použít nějakou další metodu, například LVDT senzory nebo ultrazvukovou metodu. Obě tyto metody poskytují dobrou přesnost měření. Výhoda ultrazvukové metody spočívá v absenci pohyblivých částí a velké rychlosti měření.

Pokud vznikne z nějaké příčiny poškození paliva a jeho následná netěsnost, je možné takový soubor opravit. Opravy palivových souborů na západních typech elektráren jsou poměrně běžnou záležitostí. Analýzou aktivity chladiva primárního okruhu je možné odhalit případnou netěsnost. Netěsný soubor je pak určen pomocí metody sipping. Pokud se má netěsný soubor opravit, je nutné zjistit, který konkrétní proutek je netěsný. K tomu je vhodné použít například ultrazvukovou metodu, která rozpozná, zda proutek obsahuje vodu a je tedy netěsný. Tento proutek je pak ze souboru vyjmut a nahrazen maketou z nerezové oceli. Společnost FRAMATOME, nyní AREVA, vyvinula zařízení, na kterém je možné provést i opravu poškozeného skeletu souboru, ke kterému může dojít například při manipulacích se souborem.

V závěru práce byl proveden předběžný návrh nové metody měření deformace palivového souboru pro jadernou elektrárnu Temelín. Jedná se o ultrazvukovou metodu. Tato metoda je již ve světě používána, výhradně však pro reaktory západní koncepce, tedy se čtvercovou geometrií paliva. Tyto reaktory mohou mít ve svých projektech zahrnutu speciální budovu pro operace s palivem tzv. fuel building, ve které mohou probíhat inspekce, opravy nebo další operace i za provozu bloku elektrárny. Kdežto elektrárny bez této budovy jsou při těchto operacích omezeny dobou odstávky. Jelikož jaderné elektrárny VVER-1000 ve svých projektech fuel building nemají, bude nutné pro měření touto metodou navrhnout speciální mobilní konstrukci pro použití přímo v bazénu skladování vyhořelého paliva.

Vhodnost této metody byla ověřena měřeními na experimentálním zařízení pro určení pozice distanční mřížky, které se nachází v CVŘ. Toto zařízení se snaží napodobit podmínky panující v bazénu skladování vyhořelého paliva. Bylo však nutné přijmout zjednodušující opatření, aby ho bylo možné realizovat v laboratorních podmínkách. Kdy například palivový soubor je

reprezentován pouze jednou distanční mřížkou, nebyl brán v úvahu obsah kyseliny borité ve vodě, hydrostatický tlak neodpovídal hodnotám v bazénu skladování a měření probíhalo bez přítomnosti radiace. Bylo provedeno měření posunu distanční mřížky, které se projeví při průhybu palivového souboru, a pootočení distanční mřížky, které se projeví při zkrutu souboru. Posun distanční mřížky byl detekován s maximální odchylkou 0,83 mm a pootočení mřížky s odchylkou 1,5°. Tyto odchylky byly způsobeny nízkou tuhostí konstrukce měřicího zařízení, vůlemi v uchycení distanční mřížky a lidským faktorem při nastavování hodnot a odečítání vychýlení.

Cílem tohoto měření tedy bylo prokázat vhodnost ultrazvukové metody pro měření deformace palivového souboru se šestihrannou geometrií. Odchylky při měření byly vyšší než očekávané, ale vzhledem k jejich příčinám a k tomu, že se při průmyslové aplikaci neuplatní, nejsou překážkou pro další vývoj této metody. Pro ten bude nutné ověřit parametry, které nebyly při konstrukci experimentálního zařízení vzaty v úvahu. Jedná se tedy zejména o vliv obsahu kyseliny borité nebo vliv radiace na životnost a přesnost měření ultrazvukových sond.

Na vývoji této metody a na dalších měřeních se bude autor dále podílet v rámci pokračující spolupráce s CVŘ, do které je zahrnuta také účast při inspekcích paliva na jaderné elektrárně Temelín.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Jaderná energetika. *Skupina ČEZ* [online]. 2014 [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika.html>
- [2] Státní úřad pro jadernou bezpečnost. *K problematice paliva na ETE (aktualizováno k 21.3.2008)* [online]. 2008 [cit. 2014-01-04]. Dostupné z: <http://www.sujb.cz/aktualne/detail/clanek/k-problematice-paliva-ete-aktualizovano-k-2132008/>
- [3] RAČEK, Jiří. *Jaderná zařízení*. Vyd. 1. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, 2009, 239 s. ISBN 978-80-214-3961-0.
- [4] MONTGOMERY, Rose. *Nuclear Fuel Performance Nuclear Fuel Performance , Simulation and UQ* [online]. 2011 [cit. 4.1.2014]. Dostupné z: http://www.samsi.info/sites/default/files/Montgomery_september2011.pdf
- [5] KIM, Kyu-Tae. The study on grid-to-rod fretting wear models for PWR fuel. *Nuclear Engineering and Design*. 2009, vol. 239, issue 12, s. 2820-2824. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549309004221>
- [6] PERNICE, Michael. *Considerations for Sensitivity Analysis, Uncertainty Quantification, and Data Assimilation for Grid-to- Rod Fretting*. Idaho National Laboratory, 2012. Dostupné z: <http://www.inl.gov/technicalpublications/Documents/5561098.pdf>
- [7] IAEA NUCLEAR ENERGY SERIES NO. NF-T-2.1. *Review of Fuel Failures in Water Cooled Reactors*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010. ISBN 978-920-1026-101
- [8] Leaker leaders look back. *Nuclear Engineering International* [online]. 2009 [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: <http://www.neimagazine.com/features/featureleaker-leaders-look-back>
- [9] SODERLUND, A., R. EKLUND a S. HELMERSSON. Mechanical Design of the Triplewave Debris Filter. In: *Fuel failure in water reactors: Causes and mitigation : proceedings of a Technical Committee meeting held in Bratislava, Slovakia, 17-21 June 2002*. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, 2003, s. 87-91. ISBN 9201017030.
- [10] MCALPINE, Kate. How crud forms on nuclear fuel. *University of Michigan* [online]. 2012 [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: <http://www.engin.umich.edu/college/about/news/stories/2012/november/nuclear-crud>
- [11] IAEA NUCLEAR ENERGY SERIES NO. NP-T-3.13. *Stress Corrosion Cracking in Light Water Reactors: Good Practices and Lessons Learned*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2011. ISBN 978-920-1172-105.
- [12] GARZAROLLI, F., F. VON JAN a R. STEHLE. ATOMIC ENERGY REVIEW 17 1. *The main causes of fuel element failure in water-cooled power reactors*. 1979.
- [13] RAMASUBRAMANIAN, N. Shadow corrosion. *Journal of Nuclear Materials*. 2004, vol. 328, 2-3, s. 249-252. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311504004829>

- [14] CHIANG, Ren-Tai a Aylin YILMAZBAYHAN. Radiation Interaction Analysis for BWR Channel Shadow Corrosion. In: *Mathematics and computations and supercomputing in nuclear applications M: April 15-19, 2007, Monterey Marriott Hotel, Monterey, CA, USA*. La Grange Park, IL: American Nuclear Society, 2007. ISBN 0894480596.
- [15] BUTTIN, P., B. MALKI, P. BARBERIS a B. BAROUX. Numerical analysis of the galvanic coupling in the shadow corrosion of zirconium alloy. *Journal of Nuclear Materials*. 2012, vol. 420, 1-3, s. 79-79-17. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311511009524>
- [16] BENCLOSKI, William A., Angelo J. CASSETE, Frank G GALLO, John L. MANO, Edward A. PARLAK a Clark E. SWENSON. WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION. *Tooling apparatus for modifying nuclear reactors* [patent]. USRE33373 E, US 07/231,403. Uděleno 9.10.1990. Dostupné z: <http://www.google.com/patents/USRE33373>
- [17] EDSINGER, Kurt a K. Linga MURTY. LWR pellet-cladding interactions: Materials solutions to SCC. *JOM*. 2001, vol. 53, issue 7, s. 9-13.
- [18] PARISOT, Jean-François. *Nuclear fuels*. Paris: CEA, 2009, 149 p. ISBN 978-228-1113-457. Dostupné z: <http://www.materials.cea.fr/en/PDF/MonographiesDEN/Nuclear-fuels-CEA-en.pdf>
- [19] FRANKLIN, David G., Ronald B. ADAMSON. Implications of Zircaloy creep and growth to light water reactor performance. *Journal of Nuclear Materials*. 1988, vol. 159, s. 308-356. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022311588900827>
- [20] ANDERSSON, T., J. ALMBERGER a L. BJÖRNKVIST. A Decade of Assembly Bow Management at Ringhals. In: PROCEEDINGS OF A TECHNICAL MEETING HELD IN CADARACHE, France. *Structural behaviour of fuel assemblies for water cooled reactors*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2005, s. 129-136. ISBN 9201051050.
- [21] ERNST, René, Daniel ERNST a Lukáš MILISDÖRFER. *Bezpečnost jaderné energie: Palivo Westinghouse - r. 2000 až 2010*. Praha: Úřad pro jadernou bezpečnost ČR, 2010, roč. 2010, 11/12. ISSN 1210-7085.
- [22] VESELÝ, Pavel, Svatobor ŠTECH. *Bezpečnost jaderné energie: Nové palivo TVSA-T v Temelíně*. Praha: Úřad pro jadernou bezpečnost ČR, 2010. ISSN 1210-7085.
- [23] MALÁ, Martina, Marek MIKLOŠ. *Bezpečnost jaderné energie: Inspekce a opravy jaderného paliva na JE Temelín*. Praha: Úřad pro jadernou bezpečnost ČR, 2011, roč. 2011, 11/12. ISSN 1210-7085.
- [24] GARZAROLLI, Friedrich, Ron ADAMSON, Peter RUDLING a Alfred STRASSER. ADVANCED NUCLEAR TECHNOLOGY INTERNATIONAL. *BWR Fuel Channel Distortion*. Mölnlycke, 2011. Dostupné z: https://www.antinternational.com/wp-content/uploads/ZIRAT16_STR_ChannelDistortion_sample1.pdf
- [25] Nuclear Engineering International. *Avoiding BWR channel distortion* [online]. [cit. 2014-01-04]. Dostupné z: <http://www.neimagazine.com/features/featureavoiding-bwr-channel-distortion/>
- [26] ANDERSON, T. Fuel Failure Mitigation at The Ringhals Plant. In: *Fuel failure in water reactors: Causes and mitigation : proceedings of a Technical Committee meeting held in Bratislava, Slovakia, 17-21 June 2002*. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, 2003, s. 123-133. ISBN 9201017030.

- [27] WESTINGHOUSE. *Refueling for PWR/BWR TELESCOPE Sipping™ Services* [online]. 2012 [cit. 4.1.2014]. Dostupné z: http://www.westinghousenuclear.com/Products_&_Services/docs/flysheets/NS-FS-0053.pdf
- [28] WESTINGHOUSE. *In-mast Sipping* [online]. 2009 [cit. 4.1.2014]. Dostupné z: http://www.westinghousenuclear.com/Products_&_Services/docs/flysheets/NS-FS-0046.pdf
- [29] BRUS, Jiří. Zkoušky vířivými proudy. *Zkušební laboratoř Jiří Brus* [online]. 2010 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: <http://www.bvd-ndt.cz/cz/virivky.php>
- [30] KUBEŠ, Matěj. *Diagnostika vodivých materiálů vířivými proudy*. Praha, 2010. Bakalářská práce. České vysoké učení technické. Vedoucí práce Ing. Jakub Král.
- [31] PAVLOV, S.V., S.V. AMOSOV, S.S. SAGALOV a A.N. KOSTYUCHENKO. *Express diagnostics of WWER fuel rods at nuclear power plants*. 2009. Dostupné z: <http://library.sinap.ac.cn/db/yuanjian201104/%E5%85%A8%E6%96%87/14-41081129.pdf>
- [32] WESTINGHOUSE. *RCCA Eddy Current and Ultrasonic Inspection* [online]. 2009 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: http://www.westinghousenuclear.com/Products_&_Services/docs/flysheets/NS-FS-0047.pdf
- [33] WESTINGHOUSE. *Automated Fuel Inspection System Services* [online]. 2012 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: http://www.westinghousenuclear.com/Products_&_Services/docs/flysheets/NS-FS-0157.pdf
- [34] AREVA. *Ultrasonic Failed Fuel Detection Systems* [online]. 2012 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: http://us.areva.com/home/liblocal/docs/Catalog/PWR/ANP_U_165_V4_12_ENG_ultrasonic.pdf
- [35] Inspection Camera Systems. *Visatec* [online]. 2014 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: http://www.visatec.net/EN/01_Produkte/Inspektionssysteme/Produkte_Inspektionssysteme.php
- [36] VT 4065 RR. *Visatec* [online]. 2014 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: http://www.visatec.net/EN/01_Produkte/Inspektionssysteme/Produktblaetter/VT_4065_RR.php
- [37] FERNÁNDEZ MÍGUEZ, JOSÉ ROMÁN a JUAN JOSÉ SERNA GALÁN. EXPERIENCE ON FUEL INSPECTION SYSTEM. In: *TopFuel 2006* [online]. 2006 [cit. 18.4.2014]. Dostupné z: <http://www.euronuclear.org/events/topfuel/transactions/Topfuel-Technical-Session.pdf>
- [38] Ahlberg Electronics. *Online 4-Face Fuel Inspection System*. [online]. 2013 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.ahlberg-electronics.com/products/product/u/Online-4-Face-Fuel-Inspection-System?cat=15>
- [39] AST Macro sensors. *LVDT Basics* [online]. 2014 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.macrosensors.com/>
- [40] Tecnatom. *Fuel Elements: SICOM-DIM Dimensional characterisation system* [online]. 2014 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.tecnatom.es/>

- [41] FRISTEDT-ÅBLAD, Andreas, Jan MÖLLER a Per COLIN. ENSURING FUEL ECONOMY AND SAFE BWR CONTROL ROD MOVEMENTS THROUGH BWR FUEL CHANNEL MEASUREMENTS. In: *TopFuel 2006* [online]. 2006 [cit. 18.4.2014]. Dostupné z: <http://www.euronuclear.org/events/topfuel/transactions/Topfuel-Technical-Session.pdf>
- [42] WESTINGHOUSE. *Boiling Water Reactor Fuel Channel Measurement System* [online]. 2012 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: http://www.westinghousenuclear.com/Products_&_Services/docs/flysheets/NF-FE-0039.pdf
- [43] SERNA, J.J., M. QUEDECO a J.R. FERNÁNDEZ. SICOM: On-site inspection systems. In: *Advanced post-irradiation examination techniques for water reactor fuel*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2002, s. 33-40.
- [44] WESTINGHOUSE. *Fuel Assembly Repair* [online]. 2009 [cit. 4.1.2014]. Dostupné z: http://www.westinghousenuclear.com/Products_&_Services/docs/flysheets/NS-FS-0043.pdf
- [45] WESTINGHOUSE. *Lower Internals Upflow Conversion* [online]. 2006 [cit. 4.1.2014]. Dostupné z: http://www.westinghousenuclear.com/Products_%26_Services/docs/flysheets/NS-ES-0064.pdf
- [46] LEROY, G. Framatome Experience in Fuel Assembly Repair and Reconstitution. In: *Poolside inspection, repair and reconstitution of LWR fuel elements*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1998, s. 61-69.
- [47] DELERYD, R. TELESCOPE Sipping: The Optimum Fuel Leak Detection System. In: *Poolside inspection, repair and reconstitution of LWR fuel elements*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1998, s. 53-58.
- [48] World Nuclear Association. *The Economics of Nuclear Power* [online]. 2014 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/>
- [49] The Ux Consulting Company. *UxC Fuel Quantity & Cost Calculator* [online]. 2014 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.uxc.com/>
- [50] ČEZ A.S. *Předprovozní bezpečnostní zpráva 1,2 - revize 1: Díl 4*. Temelín, 2011.

PŘÍLOHA A – TABULKY NAMĚŘENÝCH HODNOT

Tab. A-1: Naměřené hodnoty posunutí distanční mřížky

Posunutí distanční mřížky						
Nastavená hodnota		Změřená vzdálenost		Vypočtená hodnota		Odchylka
X [mm]	Y [mm]	S ₁ [mm]	S ₂ [mm]	X [mm]	Y [mm]	Δ [mm]
0	0	99,90	99,94	0,08	-0,01	0,08
2	0	98,19	98,21	2,06	-0,03	0,07
4	0	96,47	96,42	4,09	-0,10	0,13
0	0	99,83	99,90	0,01	-0,03	0,03
-2	0	101,51	101,56	-1,79	0,00	0,21
-4	0	103,35	103,41	-3,92	0,01	0,08
-6	0	105,18	105,38	-6,11	0,15	0,19
-8	0	106,86	107,09	-8,07	0,18	0,19
-10	0	108,21	108,79	-9,83	0,53	0,56
-12	0	109,88	110,3	-11,67	0,37	0,50
0	0	99,92	99,97	0,05	0,00	0,05
0	2	98,99	100,82	0,09	1,78	0,24
0	4	98,15	101,69	0,08	3,49	0,52
0	6	96,53	102,75	0,40	6,17	0,43
0	8	95,47	103,67	0,48	8,15	0,50
0	-2	101,05	99,09	-0,10	-2,01	0,10
0	-4	102,10	98,49	-0,36	-3,66	0,49
0	-6	103,24	97,61	-0,51	-5,68	0,60
0	-8	104,21	96,69	-0,54	-7,57	0,69
0	0	100,00	100,00	-0,02	-0,05	0,05
2	2	99,27	99,17	2,04	1,85	0,15
2	4	96,41	100,05	2,03	3,59	0,41
2	6	95,47	101,00	2,02	5,48	0,52
2	8	94,10	101,84	2,33	7,69	0,45
4	8	92,43	100,60	4,32	7,58	0,53
4	6	93,79	99,26	3,99	5,42	0,58
4	4	94,64	98,31	4,05	3,62	0,38
4	2	95,61	97,45	3,99	1,79	0,21
0	0	99,96	100,06	-0,03	0,05	0,06
2	-4	100,53	96,92	1,46	-3,66	0,64
0	0	99,97	100,04	-0,02	0,02	0,03
4	-8	101,15	93,31	3,18	-7,89	0,83
0	0	99,97	99,98	0,01	-0,04	0,04
-4	4	101,23	105,18	-3,72	3,90	0,30
-8	8	102,47	110,33	-7,40	7,81	0,62
0	0	100,00	100,00	-0,02	-0,05	0,05
-4	-4	105,41	102,00	-4,26	-3,46	0,62
-8	-8	110,87	103,36	-8,2	-7,56	0,50

Tab. A-2: Naměřené pootočení distanční mřížky

Pootočení distanční mřížky				
Nastavený úhel	Změřené vzdálenosti		Vypočtený úhel	Odchylka
Ω [°]	S_1 [mm]	S_2 [mm]	Ω [°]	Δ [°]
10	107,37	91,46	9,51	0,49
5	105,70	96,47	5,55	0,55
0	100,23	99,74	1,50	1,50
-5	96,38	102,76	-3,84	1,16
-10	91,58	109,65	-10,77	0,77