

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV ENERGETIKY



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Regenerační žíhání jako možný způsob obnovy
mechanických vlastností vnitřních částí reaktorů
VVER 440**

Autor: Bc. Ondřej Buršík

Vedoucí práce: Ing. Václav Železný

Praha, 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bursík** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **410474**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Jaderná energetická zařízení**
Studijní obor: **Jaderná energetická zařízení**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Regenerační žihání jako možný způsob obnovy mechanických vlastností vnitřních částí reaktorů VVER 440

Název diplomové práce anglicky:

Thermal annealing as a possible method to restore mechanical properties of the WWER 440 reactor pressure vessel internals

Pokyny pro vypracování:

Základní body práce:

- 1) Rešerše na téma reaktor VVER 440, jeho tlaková nádoba a vnitřní vestavby, změny vlastností materiálů v důsledku ozáření, degradační mechanismy, regenerační žihání, způsoby ověření úspěšnosti regeneračního žihání
- 2) Návrh experimentu
- 3) Stanovení vhodné technologie pro výrobu zkušebních těles
- 4) Návrh možných režimů regeneračního žihání materiálů vnitřních částí VVER 440
- 5) Stanovení kritérií a metodiky pro hodnocení změn mechanických vlastností materiálů vnitřních částí (efektivita žihání)
- 6) Výběr optimálních režimů regeneračního žihání pro vnitřní části reaktoru VVER 440

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Václav Železný, ústav energetiky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **30.10.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **04.01.2019**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Václav Železný
podpis vedoucí(ho) práce

_____ podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne 3.1.2019

.....
Ondřej Buršík

Poděkování

Děkuji vedoucímu této práce panu Ing. Janu Železnému za vedení mé diplomové práce a za cenné rady a připomínky, které tuto práci obohatily. Velké poděkování rovněž patří i konzultantům Ing. Radimu Kopřivovi a panu Ing. Václavu Bláhovi za mnoho odborných postřehů a připomínek, které mi byly velkou pomocí v této pro mě nové problematice.

V neposlední řadě bych na tomto místě chtěl poděkovat i všem kolegům z ÚJV Řež, a. s. z oddělení Mechanické vlastnosti a z oddělení Vysokoaktivní laboratoř a ozařovací experimenty. Zejména bych chtěl poděkovat paní Ing. Barboře Marešové za odbornou podporu, dále Ing. Petře Petelové, panu Ing. Milanu Pěnkavovi a Michaelu Rappovi za provádění experimentálních prací. Jedině díky společnému úsilí a odborné a náročné každodenní práci mne a mých kolegů mohl tento text vzniknout.

Název práce: **Regenerační žihání jako možný způsob obnovy mechanických vlastností vnitřních částí reaktorů VVER 440**

Autor: Bc. Ondřej Buršík

Obor: Jaderně energetická zařízení

Druh práce: Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Václav Železný, Ústav energetiky, Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze

Konzultant: Ing. Radim Kopřiva, ÚJV Řež, a. s.

Abstrakt: Tlaková nádoba lehkovodního reaktoru a jeho vnitřní části patří mezi nejdůležitější komponenty jaderné elektrárny a zajištění jejich bezpečného a spolehlivého provozu je klíčové pro řízení životnosti elektrárny jako celku. Tlaková nádoba i její vnitřní části jsou za provozu vystaveny vysokým teplotám, tlakům a intenzivnímu neutronovému toku. Tyto náročné podmínky vedou k degradaci materiálů – zejména k jejich tvrdnutí a křehnutí.

Tato diplomová práce představuje regenerační žihání jako možný způsob zachování či spíše obnovy původních vlastností vnitřních částí v průběhu jejich provozu. Úvodní část práce je věnována vnitřním částem reaktoru, přehledu degračních mechanismů a regeneračnímu žihání obecně. Hlavní část práce je poté věnována problematice návrhu vhodných žihacích režimů pro korozivzdorné oceli a experimentům na bázi mechanických zkoušek, které slouží pro hodnocení úspěšnosti regeneračního žihání. Projekt TH02020565 – „Zajištění dlouhodobého provozu vnitřních částí tlakových nádob reaktorů jaderných elektráren“ je řešen s finanční podporou TA ČR.

Klíčová slova: žihání, vnitřní části reaktoru, defekty, nerezová ocel

Title: Thermal annealing as a possible method to restore the mechanical properties of the WWER 440 reactor pressure vessel internals

Author: Bc. Ondřej Buršík

Abstract: Reactor pressure vessel of LWR and its internals are the most important components of any NPP and assurance of their safe and reliable operation is one of the key points in the frame of NPP life management. RPV and its internals are exposed to high temperatures, pressures and intensive neutron flux during the operation. These conditions lead up to material degradation – especially radiation hardening and embrittlement.

Thesis presents the annealing treatment as one of the possible solutions to provide and re-establish sufficient mechanical properties of RPV internals during the operation. The first part of the thesis is dedicated to RPV internals and to mechanisms of material degradation and to the thermal annealing in general. The main part of the thesis is focused on current progress in the issue of austenitic stainless-steel thermal annealing regimes designing and mechanical testing experiments used for evaluation of annealing efficiency. Project TH02020565 - "Assurance of Safe and Long Term Operation of Nuclear Reactor Pressure Vessel Internals" is supported by the Technology Agency of the Czech Republic.

Key words: annealing, reactor pressure vessel internals, defects, stainless steel

Obsah

Seznam symbolů, indexů a zkratk	8
Seznam použitých obrázků	10
Seznam použitých tabulek.....	12
Úvod	13
1 Rešeršní část	15
1.1 <i>Jaderný reaktor VVER 440.....</i>	<i>15</i>
1.2 <i>Vnitřní části reaktoru</i>	<i>18</i>
1.3 <i>Materiály použité pro vnitřní části reaktoru</i>	<i>30</i>
1.4 <i>Počáteční vlastnosti.....</i>	<i>31</i>
1.5 <i>Degradace kovových materiálů.....</i>	<i>33</i>
1.6 <i>Regenerační žihání.....</i>	<i>40</i>
1.7 <i>Metody pro hodnocení stupně obnovení.....</i>	<i>44</i>
2 Příprava experimentu	48
2.1 <i>Návrh experimentu</i>	<i>48</i>
2.2 <i>Žihací pec</i>	<i>50</i>
2.3 <i>Tvrdoměr</i>	<i>54</i>
2.4 <i>Zařízení pro zkoušky ABIT</i>	<i>56</i>
2.5 <i>Příprava vzorků.....</i>	<i>59</i>
3 Experimenty a výsledky.....	62
3.1 <i>Žihání zkušebních těles.....</i>	<i>62</i>
3.2 <i>Měření tvrdosti</i>	<i>64</i>
3.3 <i>Zkouška instrumentované tvrdosti</i>	<i>65</i>
Závěr	67
Použitá literatura	70
Seznam příloh.....	73
Přílohy.....	74
<i>Příloha č. 1: Výsledky tvrdosti HV5</i>	<i>74</i>
<i>Příloha č. 2: Výsledky instrumentované tvrdosti</i>	<i>74</i>

Seznam symbolů, indexů a zkratek

3D	třidimenzionální
A ₅	tažnost – dolní index označuje poměr měřené délky ku průměru tyče
ABIT	Automated Ball Indentation Test – zkouška instrumentované tvrdosti
AISI	American Iron and Steel Institute, označení oceli, například AISI 304
AO	austenitická ocel
AZ	aktivní zóna
bcc	krychlová tělesově středěná soustava
BOT	blok ochranných trub
BP	bodová porucha
BWR	Boiling Water Reactor, varný reaktor
c _p	tepelná kapacita při konstantním tlaku
CRISM	Central Research Institute for Special Machinery, Ruský výzkumný institut pro speciální strojírenství
ČR	Česká republika
ČSN	česká státní norma
d	průměr
dpa	displacement per atom, průměrný počet přemístění na jeden atom
E	Youngův modul pružnosti
EELS	Electron Energy Loss Spectroscopy, druh mikroskopie využívající měření ztráty energie elektronů
el.	elektrický
EN	označení evropského standardu
EPRI	Electric Power Research Institute, výzkumný institut zaměřený na energetiku
eV	elektronvolt
fcc	plošně středěná krychlová soustava
GOST	označení ruské normy
GSM	Global System for Mobile, globální systém pro mobilní komunikaci
h	výška
HCP	hlavní cirkulační potrubí
hm %	hmotnostní procenta
HV	tvrdost dle Vickerse
IASCC	radiačně indukované korozní praskání pod napětím
IGSCC	interkrystalické korozní praskání pod napětím
ISO	mezinárodní standard
JE	jaderná elektrárna
KCU	vrubová houževnatost
LOCA	Loss of Coolant Accident, havárie se ztrátou chladiva
LWR	Light Water Reactor, lehkovodní reaktor
mCT	typ zkušebního tělesa o rozměrech 10x10x4 mm.
min.	minimální
MKK	mezikrystalová koroze
n	neutron
N	newton, jednotka síly
Obr.	obrázek
ORNL	Oak Ridge National Laboratory, největší americká laboratoř pro jaderný výzkum
PC	počítač
PG	parní generátor

pH	záporně vzatý logaritmus koncentrace H^+ iontů, vyjadřující kyselost/zásaditost
PKA	Primary Knock-on Atom, primárně vyražený atom
PWR	Pressurized Water Reactor, tlakovodní reaktor
Ra	typ drsnosti povrchu
RBMK	ruský typ jaderného varného reaktoru využívající grafitu jako moderátoru (Reaktor Bolšoj Moščnosti Kanalnyj)
R_m	mez kluzu
$R_{p0,2}$	mez pružnosti
s	sekunda, jednotka času
SANS	Small Angle Neutron Scattering, technika využívající pružného rozptylu neutronů
SEM	Scanning Electron Microscope, řádkovací elektronový mikroskop
SHCHZ	systém havarijního chlazení aktivní zóny
t	tuna, jednotka hmotnosti
tab.	tabulka
TA ČR	Technologická agentura České republiky
TNR	tlaková nádoba reaktoru
T_k	teplota křehkosti
ÚJV Řež, a. s.	firma, dříve Ústav jaderného výzkumu Řež, a. s.
UPS	Uninterruptible Power Supply, zařízení pro havarijní napájení zařízení elektřinou
USA	United States of America, Spojené státy americké
VČR	vnitřní části reaktoru
VVER	tlakovodní reaktor východního typu (Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor)
α	teplotní součinitel roztažnosti
λ_t	tepelná vodivost
ρ	hustota
Ω	Ohm, jednotka elektrického odporu

Seznam použitých obrázků

OBR. 1: DISPOZIČNÍ SCHÉMA PRIMÁRNÍHO OKRUHU JE S REAKTOREM VVER 440 [24]	15
OBR. 2: SCHEMATICKÝ NÁKRES TLAKOVÉ NÁDOBY REAKTORU VVER 440 [24]	17
OBR. 3: VNITŘNÍ ČÁSTI REAKTORU VE ŠKOLÍCÍM CENTRU PAKS V MAĎARSKU	18
OBR. 4: ZJEDNODUŠENÝ MODEL VNITŘNÍCH ČÁSTÍ REAKTORU VVER 440, VYTVOŘENO V ÚJV ŘEŽ, A. S.	19
OBR. 5: SCHÉMA REAKTORU VVER 440, VYTVOŘENO V ÚJV ŘEŽ, A. S.	20
OBR. 6: SCHEMATICKÝ NÁKRES ŠACHTY REAKTORU VVER 440 [24]	21
OBR. 7: SCHÉMATICKÝ OBRÁZEK DNA ŠACHTY REAKTORU, VLEVO LIDSKÁ POSTAVA PRO SROVNÁNÍ [24]	22
OBR. 8: MODELOVÝ OBRÁZEK DNA ŠACHTY REAKTORU, VYTVOŘENO V ÚJV ŘEŽ, A. S.	22
OBR. 9: FOTOGRAFIE DNA ŠACHTY REAKTORU VVER 440 (ŠKOLÍCÍ STŘEDISKO PAKS)	23
OBR. 10: POHLED NA PERFOROVANOU HORNÍ DESKU DNA ŠACHTY REAKTORU (ŠKOLÍCÍ STŘEDISKO PAKS)	23
OBR. 11: NÁKRES KOŠE AKTIVNÍ ZÓNY, VLEVO LIDSKÁ POSTAVA PRO SROVNÁNÍ [24]	24
OBR. 12: TROJROZMĚRNÝ SCHEMATICKÝ OBRÁZEK KOŠE AZ, VYTVOŘENO V ÚJV ŘEŽ, A. S.	25
OBR. 13: POHLED SHORA DO KOŠE AKTIVNÍ ZÓNY (ŠKOLÍCÍ STŘEDISKO PAKS)	25
OBR. 14: DETAIL NOSNÉ DESKY KOŠE AKTIVNÍ ZÓNY S OTVORY	26
OBR. 15: A) ŘEZ KOŠEM AKTIVNÍ ZÓNY B) SEGMENT VYŘÍZNUTÝ Z KOŠE AZ [8]	27
OBR. 16: DETAIL UPEVNĚNÍ HRANĚNÉHO PLECHU NA HRANĚNÝ PÁS KOŠE AKTIVNÍ ZÓNY	27
OBR. 17: NÁKRES KONSTRUKCE BLOKU OCHRANNÝCH TRUB, VLEVO LIDSKÁ POSTAVA PRO SROVNÁNÍ [24]	28
OBR. 18: BLOK OCHRANNÝCH TRUB BEZ VNĚJŠÍHO PLÁŠTĚ (ŠKOLÍCÍ STŘEDISKO PAKS)	29
OBR. 19: ZJEDNODUŠENÉ SCHÉMA KASKÁDY VYRAŽENÝCH ATOMŮ [18]	35
OBR. 20: PRŮBĚH KONCENTRACÍ JEDNOTLIVÝCH PRVKŮ V MÍSTĚ HRANICE DVOU ZRN [17, 30]	36
OBR. 21: SCHÉMA SPOLEČNÉHO PŮSOBENÍ HLAVNÍCH FAKTORŮ PRO INICIACI IASCC [17, 30]	38
OBR. 22: VLIV OZÁŘENÍ NA PRŮBĚH TAHOVÉ KŘIVKY [17, 30]	39
OBR. 23: PŘEHLED DEGRADAČNÍCH MECHANIZMŮ [17, 30]	39
OBR. 24: PRŮBĚH ŽÍHACÍHO EXPERIMENTU PRO OCEL 316L, OZÁŘENO ELEKTRONKY NA 1 DPA [9]	41
OBR. 25: ZMĚNA HUSTOTY JEDNOTLIVÝCH DRUHŮ PORUCH MATERIÁLU [27]	42
OBR. 26: MIKROTVRDOT MATERIÁLU 08CH18N10T [10]	44
OBR. 27: TAHOVÉ DIAGRAMY AUSTENITICKÉ FE-25CR-20NI OCELI PRO RŮZNÉ ŽÍHACÍ TEPLoty	47
OBR. 28: TĚLESO PECE	51
OBR. 29: SCHÉMA NAKLÁDÁNÍ VZORKŮ DO PECE, UZAVŘENÁ PEC (VLEVO), PLNĚ OTEVŘENÁ PEC (VPRAVO)	51
OBR. 31: OTEVŘENÁ ŽÍHACÍ PEC (DOLNÍ VÍKO)	52
OBR. 30: POHLED DO ŽÍHACÍ PECE	52
OBR. 32: OVLÁDACÍ SYSTÉM PECE	53
OBR. 33: PNEUMATICKÝ SYSTÉM PECE	53
OBR. 34: ČELNÍ POHLED NA TVRDOMĚR INDENTEC ZVH 30	55
OBR. 35: MĚŘENÍ TVRDOTI POMOCÍ TVRDOMĚRU ZVH30 [32]	55
OBR. 36: ZKUŠEBNÍ APARATURA PRO PROVÁDĚNÍ ZKOUŠEK ABIT	57
OBR. 37: POHLED DO TEPLONÍ KOMORY	58
OBR. 38: MĚŘENÍ REÁLNÉ HODNOTY PRŮMĚRU INDENTORU NA ZAŘÍZENÍ VERTEX, ÚJV ŘEŽ, A. S.	58
OBR. 39: TYPICKÝ GRAFICKÝ VÝSTUP ZE ZKOUŠKY INSTRUMENTOVANÉ TVRDOTI	59

OBR. 40: FOTODOKUMENTACE VÝROBY ZKUŠEBNÍCH TĚLES	60
OBR. 41: POHLED NA TŘI ZKUŠEBNÍ TĚLESA NA DNĚ PECE	62
OBR. 42: PŘEHLED ŽÍHACÍCH REŽIMŮ	63
OBR. 43: ZKUŠEBNÍ TĚLESA 15X15X17 MM PRO JEDEN Z PODOBNÝCH EXPERIMENTŮ; NEVYŽÍHANÝ	64
OBR. 44: ZKUŠEBNÍ TĚLESA 15X15X17 MM PRO JEDEN Z PODOBNÝCH EXPERIMENTŮ; VYŽÍHANÝ	64

Seznam použitých tabulek

TAB. 1: CHEMICKÉ SLOŽENÍ MATERIÁLU 08CH18N10T	31
TAB. 2: CHEMICKÉ SLOŽENÍ MATERIÁLU SV-04CH19N11M3	31
TAB. 3: MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLU 08CH18N10T	32
TAB. 4: MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLU 08CH18N10T ZA ZVÝŠENÉ TEPLoty	32
TAB. 5: MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLU 08CH18N10T ZA ZVÝŠENÉ TEPLoty, POKRAČOVÁNÍ	33
TAB. 6: FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI MATERIÁLU 08CH18N10T	33
TAB. 7: PŘEHLED ŽÍHACÍCH EXPERIMENTŮ; OZNAČENÍ ZKOUŠENÝCH VZORKŮ VE TVARU 8TA_XY	50

Úvod

Jaderná energetika nejen v České republice čelí celé řadě výzev moderní doby. Mezi hlavní výzvy patří udržení schopnosti ekonomicky konkurovat ostatním zdrojům energie, z nichž některé jsou více či méně podporované prostřednictvím různých dotací a grantů – a to nejen na poli základního či aplikovaného výzkumu.

Stavět nové jaderné bloky v zemích Evropy je složitý a náročný proces s nejistým výsledkem, a proto se pozornost řady provozovatelů těch stávajících upíná spíše k možnosti prodloužení životnosti těch stávajících nad rámec původního projektu. Prodloužení životnosti jaderné elektrárny někdy i o několik desítek let má celou řadu úskalí a otázek, které je třeba vyřešit.

Jaderná elektrárna je složitý organismus složený z mnoha orgánů – zařízení. Tato zařízení přirozeně stárnou, zhoršují se jejich vlastnosti a taková zařízení je třeba pravidelně udržovat, opravovat, repasovat a někdy i vyměnit. V některých případech však ale není možné zařízení jednoduše nahradit novým. Jde třeba o tlakovou nádobu reaktoru, jejíž životnost rozhoduje o životnosti celé elektrárny a je považovaná za nevyměnitelnou.

V minulosti už však bylo prokázáno, že existuje způsob, jak náročnými podmínkami poškozené – zkrhlé reaktorové nádobe téměř dokonale navrátit její původní vlastnosti, které měla, když byla nová. Slovem „způsob“ je myšleno regenerační žíhání. Regenerační žíhání je jednoduše řečeno tepelný proces, při kterém se žíhaná komponenta zahřeje na požadovanou teplotu a při této teplotě je udržovaná po stanovenou dobu. V případě starších jaderných reaktorů VVER to typicky bylo 475 °C a 100-170 hodin.

Tato diplomová práce má za cíl zmapovat možnosti toho, jestli by podobný způsob regeneračního žíhání mohl v dostatečné míře navrátit počáteční vlastnosti i ocelovým součástem uvnitř reaktoru – vnitřním částem. Tyto vnitřní části plní své specifické funkce a jsou vyrobené z korozivzdorné austenitické oceli. V současné době (2018) se stále jedná o nepříliš prozkoumanou problematiku. Podobný výzkum byl proveden v ruském Kurčatovově institutu, ovšem zaměřený byl spíše na vnitřní části reaktoru VVER 1000.

Výchozím úkolem tak je rozsáhlá rešerše problematiky vnitřních částí a možností jejich žíhání. Je třeba vědět, jak jsou vnitřní části zkonstruované, jaké funkce plní a jaký materiál byl použit pro jejich výrobu. Zvolený materiál vnitřních částí má své počáteční vlastnosti, nicméně tyto mechanické parametry se postupně mění, tak jak v něm probíhají

degradační mechanismy. Součástí rešerše je i podstata regeneračního žíhání a na základě čeho lze ověřit úspěšnost jeho provedení. Teprve poté je možné přikročit k dalším krokům – k naplánování experimentů, jejich přípravě, provedení, vyhodnocení jejich výsledků a zhodnocení úspěšnosti celé práce.

Problematikou regeneračního žíhání se zabývá společnost ÚJV Řež, a. s. jako hlavní řešitel projektu TH02020565: „Zajištění dlouhodobého provozu vnitřních částí tlakových nádob reaktorů jaderných elektráren“, který je řešen s finanční podporou Technologické agentury České republiky. Díky tomuto projektu mohla vzniknout i tato diplomová práce. Hlavním cílem tohoto výzkumného projektu je vytvoření certifikovaného postupu regeneračního žíhání vnitřních částí reaktoru VVER 440 s cílem prodloužení jejich životnosti.

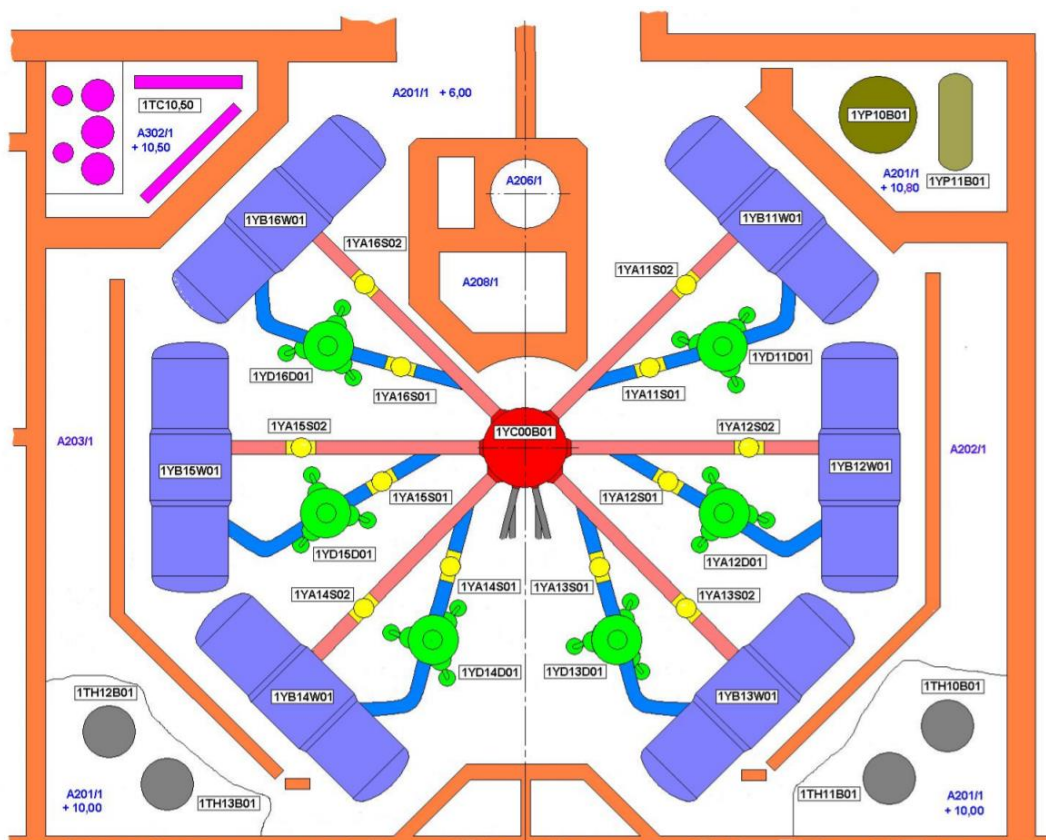
Výstupy z tohoto unikátního projektu zároveň umožní podstatně snížit množství radioaktivního odpadu, který by vznikl prostou náhradou vnitřních částí novými v případě, že by tato situace nastala.

1 Rešeršní část

1.1 Jaderný reaktor VVER 440

Vývoj jaderných reaktorů na sovětském území probíhal v dosti odlišných podmínkách oproti západním zemím a byl tak o několik let opožděn. V Sovětském Svazu bylo přistoupeno k realizaci dvou koncepcí – tlakovodního reaktoru VVER a varného reaktoru RBMK s grafitem jako moderátorem. Specializovaný závod na výrobu tlakových nádob reaktorů VVER – Atommaš ve Volhodonsku byl spuštěn až s desetiletým zpožděním, proto výstavba grafitových reaktorů proběhla v mnohem větším rozsahu, než bylo původně zamýšleno. [13]

Primární okruh jaderné elektrárny s reaktorem VVER 440 (Obr. 1) využívá šesti horizontálně uložených parních generátorů, které zajišťují odvod tepla z aktivní zóny prostřednictvím šesti cirkulačních smyček (horká větev růžově, studená větev modře). Cirkulaci chladiva zajišťuje šest hlavních cirkulačních čerpadel (zeleně), přičemž je možné reaktor provozovat i při výpadku některého z nich. Tlaková nádoba reaktoru měří na výšku 11 800 mm, váží 200,8 tun (suchá) a vnitřní průměr nádoby je 3 560 mm. [23]

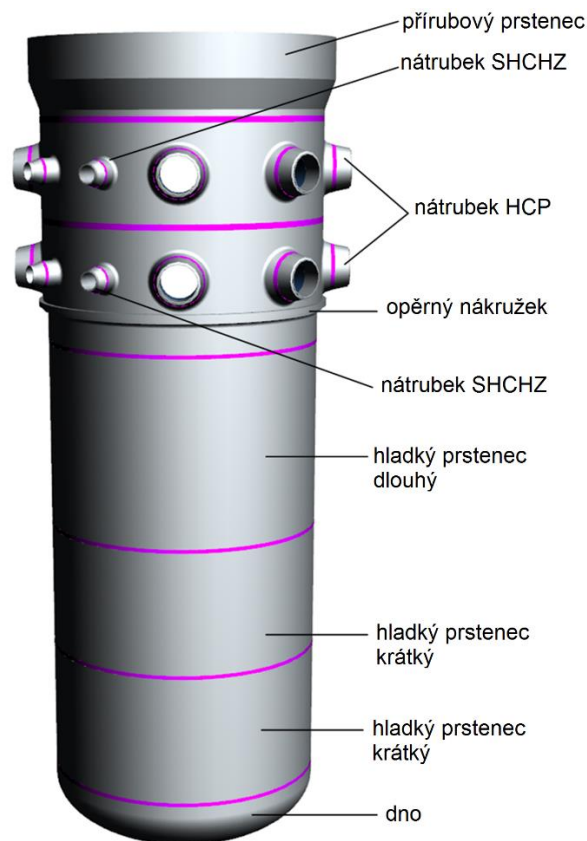


Obr. 1: Dispoziční schéma primárního okruhu JE s reaktorem VVER 440 [24]

Prvá generace těchto reaktorů projektovaná před rokem 1970 nese označení V-230 a v současné době jsou již téměř všechny tyto jednotky odstaveny. Bloky s reaktorem VVER 440 typ V-230 se nacházejí mj. v německém Greifswaldu, slovenských Bohunicích, na ruské Kole či třeba v Arménii. Právě dva bloky JE Kola s reaktory typu V-230 na území Ruska jsou těmi posledními sloužícími a jejich vyřazení je plánováno na 2018 a 2019. Hlavním důvodem pro odstavování těchto reaktorů je z dnešního hlediska zastaralá koncepce jaderné bezpečnosti – tyto reaktory nemají ani kontejnment ani barbotážní věž, nouzové dochlazování reaktoru počítá pouze s jednoduchým zálohováním a při případné havárii by docházelo k řízenému vypouštění nízkoaktivního chladiva. [13]

Druhá generace reaktoru VVER 440 nese označení V-213 a vychází z generace první. Upravený návrh odráží zkušenosti s výstavbou a provozem starších bloků a představuje posun zejména v otázce bezpečnosti. Schematický náčrt tlakové nádoby reaktoru VVER 440 je na Obr. 2. Při návrhu byly implementovány i některé západní bezpečnostní požadavky, jelikož bylo počítáno s vývozem těchto jaderných reaktorů i do zahraničí. Západní bezpečnostní požadavky bylo nutné respektovat při výstavbě finské elektrárny Loviisa. Jedním z hlavních zlepšení je zahrnutí prasknutí hlavního cirkulačního potrubí jako maximální projektové havárie (LOCA, z angl. Loss of Coolant Accident, havárie se ztrátou chladiva způsobená prasknutím primárního potrubí). Jde o typ havárie, na kterou je elektrárna navržena a musí ji zvládnout. Pozitivní je rovněž velká zásoba vody v primárním okruhu, která přispívá ke zmírňování případných nehod. Všechny postavené jednotky rovněž používají buď sprchové systémy a barbotážní věž nebo v případě právě finské Loviisa dokonce kontejnment s potlačením tlaku. [23]

Reaktory typu V-213 využívají obohacené palivo ve formě pelet UO_2 , které jsou umístěné v proutcích ze zirkoniových slitin. Tyto tzv. palivové proutky jsou uspořádané do hexagonálních palivových souborů s obálkou, která usměrňuje proudění chladiva. Do jednoho reaktoru je uloženo přibližně 42 tun uranu. Jako chladivo a zároveň moderátor slouží demineralizovaná voda, která se při průchodu skrz palivové soubory ohřeje ze vstupních 269 na výstupních 300 °C. Tlak v primárním okruhu činí 12,26 MPa. Hrubý elektrický výkon jednoho bloku činil 440 MWe a po případných úpravách využívajících projektových rezerv je možné výkon zvýšit až na cca 510 MWe. [13]



Obr. 2: Schematický náčrt tlakové nádoby reaktoru VVER 440 (HCP= hlavní cirkulační potrubí, SHCHZ= systém havarijního chlazení aktivní zóny) [24]

V České republice jsou v provozu čtyři reaktory novějšího provedení VVER 440 typ V-213 poblíž obce Dukovany a dva bloky VVER 1000 v jaderné elektrárně Temelín. Jaderná elektrárna Dukovany dokončená v letech 1985–1987 pokrývá přibližně 1/5 spotřeby elektřiny v ČR. Elektrárna má projektovou životnost 30 let, nicméně v současné době probíhá proces, jehož cílem je prodloužení této životnosti. Součástí tohoto procesu jsou investiční opatření a rozsáhlé kontroly, které musí prokázat způsobilost jaderné elektrárny k dalšímu dlouhodobému provozu.

V jaderném reaktoru při jeho provozu panují velmi náročné podmínky. Vysoký tlak, průtok a teploty chladiva v kombinaci s radioaktivním zářením kladou velké nároky na kvalitu jednotlivých komponent, které těmto podmínkám musejí odolávat. Pro jaderná zařízení se tak používají speciální materiály, které těmto náročným podmínkám snáze odolávají. Ani speciální materiály však nedokáží těmto podmínkám čelit neomezeně dlouho. Při provozu dochází k postupnému zhoršování jejich vlastností, které je třeba sledovat, vyhodnocovat a v krajním případě provést výměnu poškozených součástí za nové. Některé komponenty však prakticky vyměnit nelze – jedná se zejména o samotnou tlakovou nádobu

reaktoru, jejíž výměna by byla příliš ekonomicky nákladná. Prodloužení provozu nad rámec předpokládané životnosti také zákonitě přispěje k většímu poškození těchto komponent.

Mezi další komponenty, které čelí nejnáročnějším podmínkám patří zejména vnitřní části reaktoru, které jsou vystaveny přímo účinkům ionizujícího záření z jaderného paliva, jež na ně působí v kombinaci s vysokými teplotami, tlakem, průtokem chladiva a případně i vibracemi.

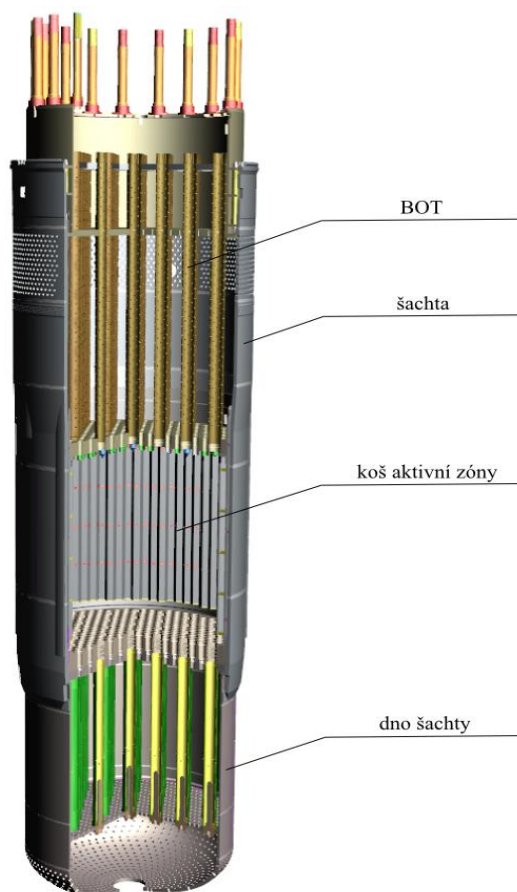
1.2 Vnitřní části reaktoru

Vnitřní části reaktoru (VČR) zahrnují komponenty umístěné uvnitř jaderného reaktoru, které plní následující funkce: usměrňování průtoku chladiva primárního okruhu, tepelné a radiační stínění tlakové nádoby, definování geometrie uspořádání aktivní zóny.

Mezi vnitřní části reaktoru VVER 440 se řadí šachta a dno šachty reaktoru, blok ochranných trub a koš aktivní zóny (AZ). Z hlediska radiačního namáhání je nejvíce ohrožen koš AZ, ve kterém je přímo umístěno jaderné palivo a je tak nejvíce vystaven působení neutronového záření. Vyjmuté vnitřní části reaktoru je možné vidět na Obr. 3, který byl pořízen ve školicím středisku v Maďarské JE Paks. Z obrázku je možné si udělat dobrou představu o rozměrech VČR, díky srovnání s lidskými postavami. Celý soubor vnitřních částí reaktoru je pak ve smontované podobě vyobrazen na Obr. 4. [23, 30]



Obr. 3: Vnitřní části reaktoru ve školicím centru Paks v Maďarsku, zleva blok ochranných trub, dno šachty reaktoru, koš AZ a šachta reaktoru (blok ochranných trub je vidět jen částečně)



Obr. 4: Zjednodušený model vnitřních částí reaktoru VVER 440, vytvořeno v ÚJV Řež, a. s.

Vnitřní části reaktoru VVER 1000 V-320 se v několika ohledech od těch starších odlišují. Kromě celkově větších rozměrů a menšího počtu pozic pro jaderné palivo je zejména koš AZ nahrazen pláštěm aktivní zóny, který u VVER 1000 slouží k uložení palivových souborů.

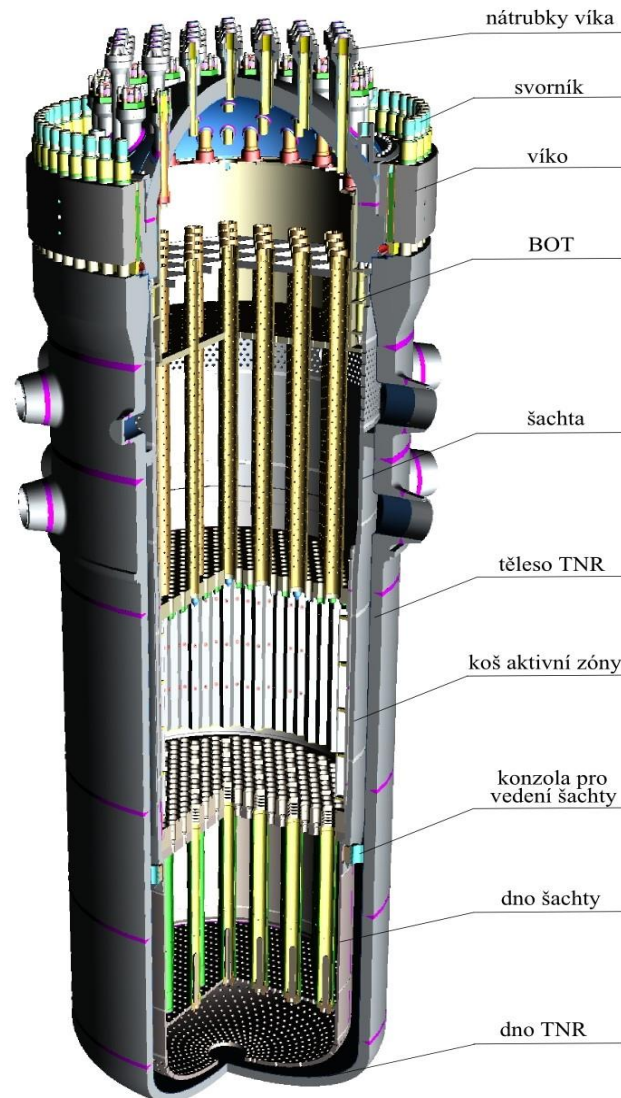
Západní provedení vnitřních částí tlakovodních reaktorů jsou si navzájem velmi podobná, hlavním znakem je čtvercová mříž pro uspořádání paliva v AZ a odlišné řešení šachty reaktoru, jelikož jsou všechny nátrubky u PWR v jedné rovině.

Šachta reaktoru

Základním dílem vestavby reaktoru VVER 440 je šachta reaktoru, která odděluje vstupní a výstupní prostor chladiva. V literatuře je též možné se setkat s označením nosný plášť či nosný válec.

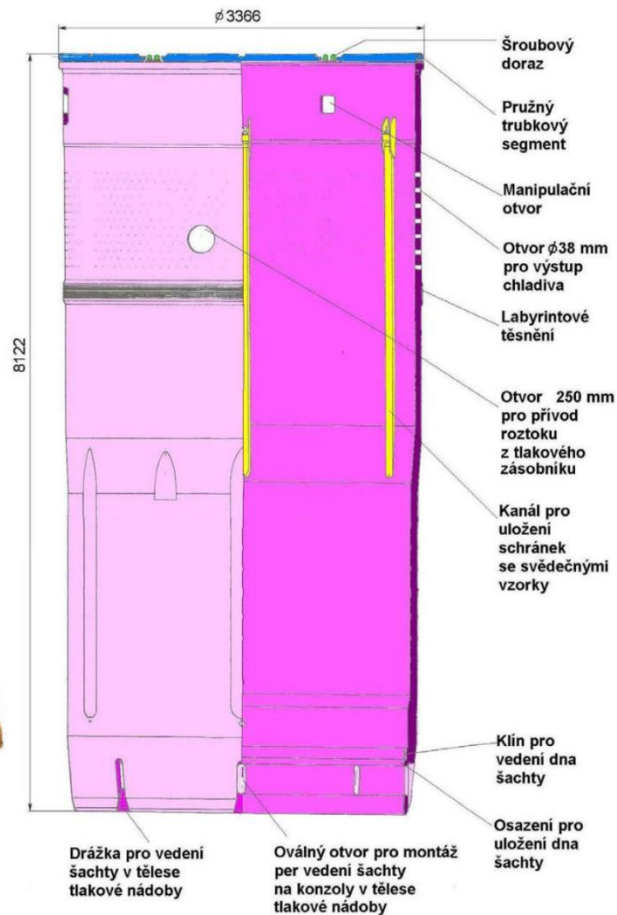
Průtok chladiva je při vstupu studenou větví usměrněn směrem dolů, přičemž protéká právě mezi šachtou reaktoru a samotnou tlakovou nádobou. V dolní části reaktoru se proudění obrací směrem vzhůru a chladivo prostupuje perforovaným dnem šachty reaktoru

s otvory o průměru 40 mm dále do aktivní zóny. [31] V AZ se chladivo ohřívá a pokračuje dále skrz blok ochranných trub (opět přes otvory v šachtě reaktoru, průměr 38 mm) do horké větve. Způsob průtoku chladiva reaktorem je zřejmý z Obr. 5.



Obr. 5: Schéma reaktoru VVER 440, vytvořeno v ÚJV Řež, a. s.

Samotná šachta reaktoru je tenkostěnný válec svařený z prstenců z nerezavějícího plechu o tloušťce stěny v místě AZ 60 mm. Schematický náčrt šachty reaktoru je níže na Obr. 6.

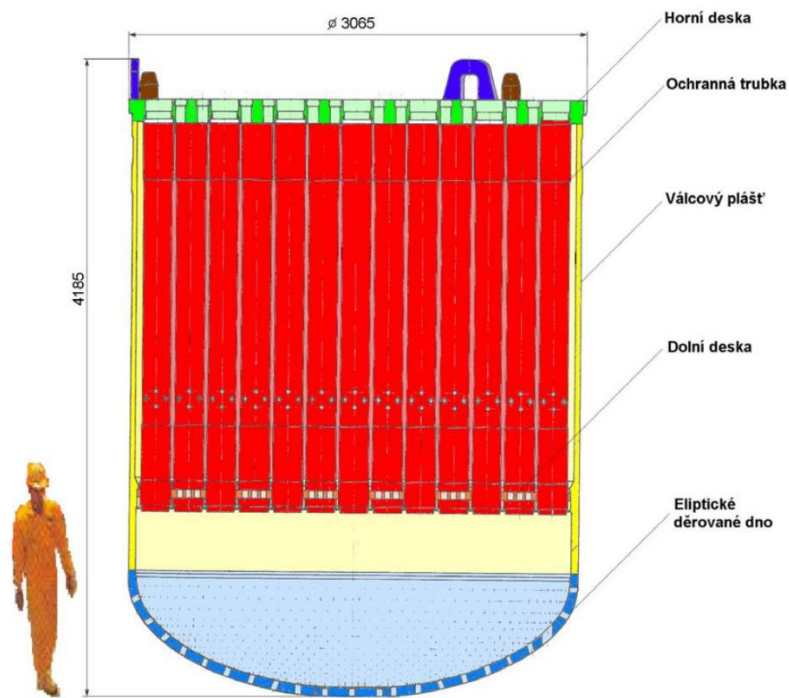


Obr. 6: Schematický náčrt šachty reaktoru VVER 440, vlevo lidská postava pro srovnání [24]

U novějšího typu reaktoru V-213 jsou na boku šachty umístěny i kanály (6 dvojic) pro uložení řetězců svědečných vzorků. Na spodní části šachty je možné najít drážky pro vedení v TNR, což zabraňuje možnému pootočení šachty a také zmírňuje vibrační namáhání šachty reaktoru. [31]

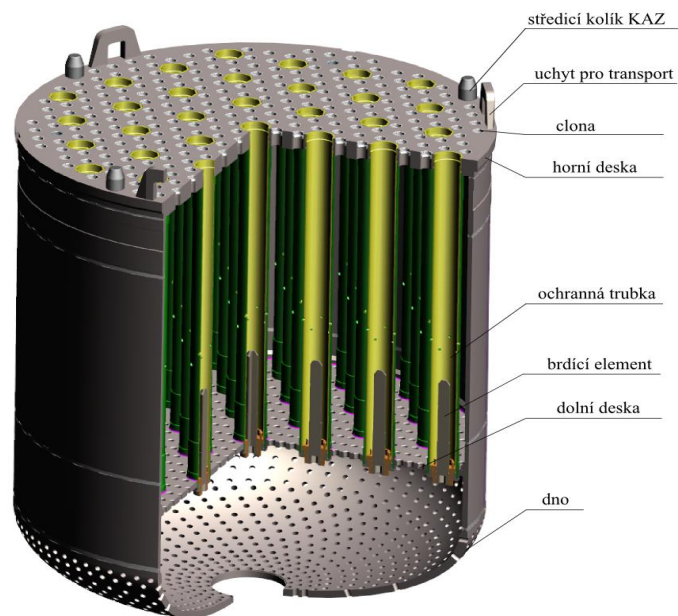
Dno šachty reaktoru

Hlavním úkolem dna šachty reaktoru je uklidnění a zrovnoměrnění proudu chladicí vody před vstupem do samotné AZ reaktoru. Do prostoru dna šachty jsou rovněž zasouvány palivové části regulačních kazet, jelikož jsou tyto regulační kazety tandemového typu (horní část kazety je regulační – obsahuje absorbátor a dolní část naopak obsahuje jaderné palivo).



Obr. 7: Schématický obrázek dna šachty reaktoru, vlevo lidská postava pro srovnání [24]

Pro ztlumení pádu regulační tyče v případě náhlého zásahu operátora či řídicího systému jsou ve dně šachty umístěny rovněž hydraulické tlumiče. Po obvodu dna šachty reaktoru je plášť, na který je přivařeno eliptické dno s velkým počtem otvorů o průměru 40 mm. Dolní deska pak v sobě má stejně velké otvory také. Obrázek 3D modelu dna šachty reaktoru (označený jako Obr. 8) je níže spolu s fotografií reálného tělesa (Obr. 9) a pohledem na horní desku (Obr. 10). [23]



Obr. 8: Modelový obrázek dna šachty reaktoru, vytvořeno v ÚJV Řež, a. s.



Obr. 9: Fotografie dna šachty reaktoru VVER 440 (školicí středisko Paks)



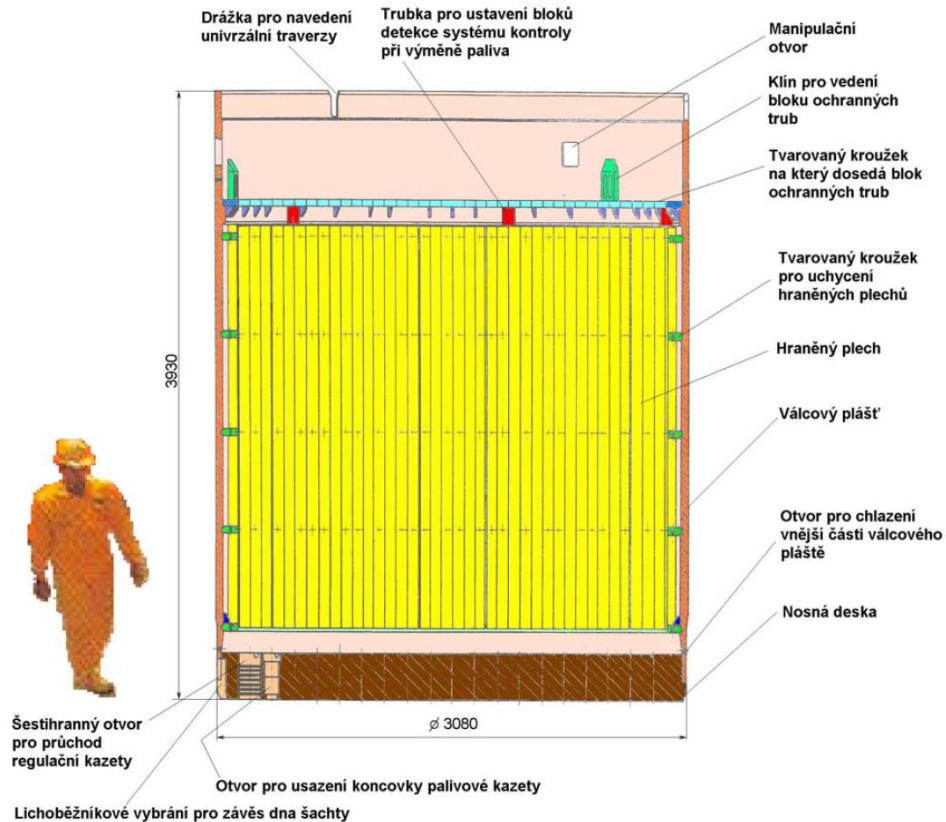
Obr. 10: Pohled na perforovanou horní desku dna šachty reaktoru (školicí středisko Paks)

Koš aktivní zóny

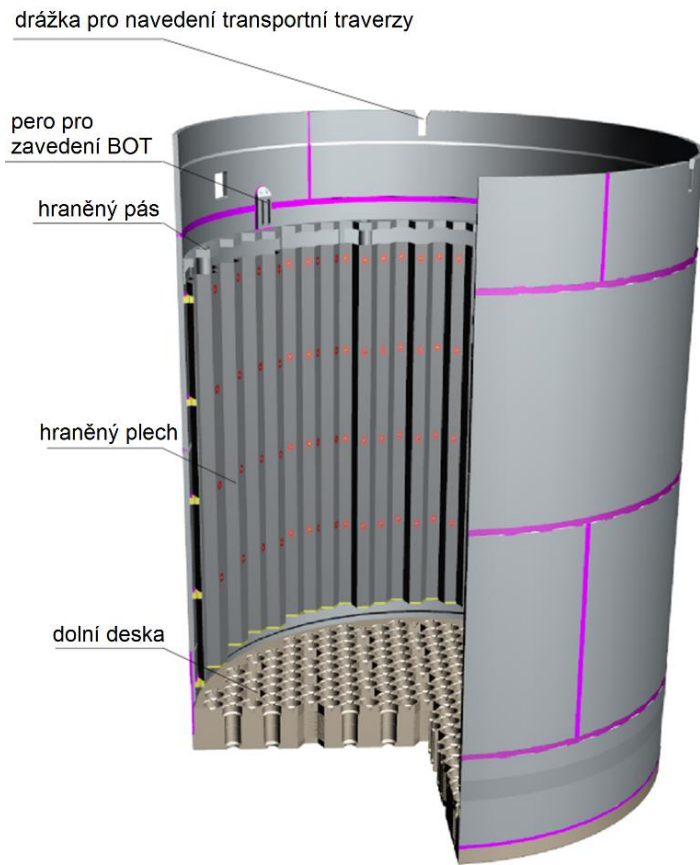
Koš AZ spolu se šachtou reaktoru tvoří stínění, které chrání samotnou TNR před účinky tepla a neutronového toku. V koši AZ jsou uloženy palivové soubory, které vytváří šestiúhelníkovou mříž. Samotný koš AZ se skládá z nosné desky, válcového pláště, hraněných plechů a 312 ks šroubů M12, které tyto plechy upevňují. [31]

V nosné desce je 312 otvorů o průměru 125 mm, do kterých se zasunují spodní konce palivových kazet a také 37 větších šestihranných otvorů pro průchod regulačních kazet do dna šachty, viz Obr. 14. Tyto šestihranné otvory jsou vybaveny labyrintovým těsněním. V dolním povrchu nosné desky jsou po obvodu vyvrtány 3 montážní otvory, do kterých se později zasunou vodící čepy umístěné na horní části dna šachty. [23]

Celá nosná deska je vyrobená z jednoho kusu. Při výrobě desky jsou nejprve vyvrtány otvory, které jsou poté zabroušeny do tvaru pravidelných šestihranů. Po tepelně-mechanickém obrábění se deska žihá na snížení vnitřního pnutí. [12] Výška celého koše AZ je 3 930 mm a vnější průměr 3 080 mm. [23]



Obr. 11: Nákres koše aktivní zóny, vlevo lidská postava pro srovnání [24]



Obr. 12: Trojrozměrný schematický obrázek koše AZ, vytvořeno v ÚJV Řež, a. s.



Obr. 13: Pohled shora do koše aktivní zóny (školicí středisko Paks)



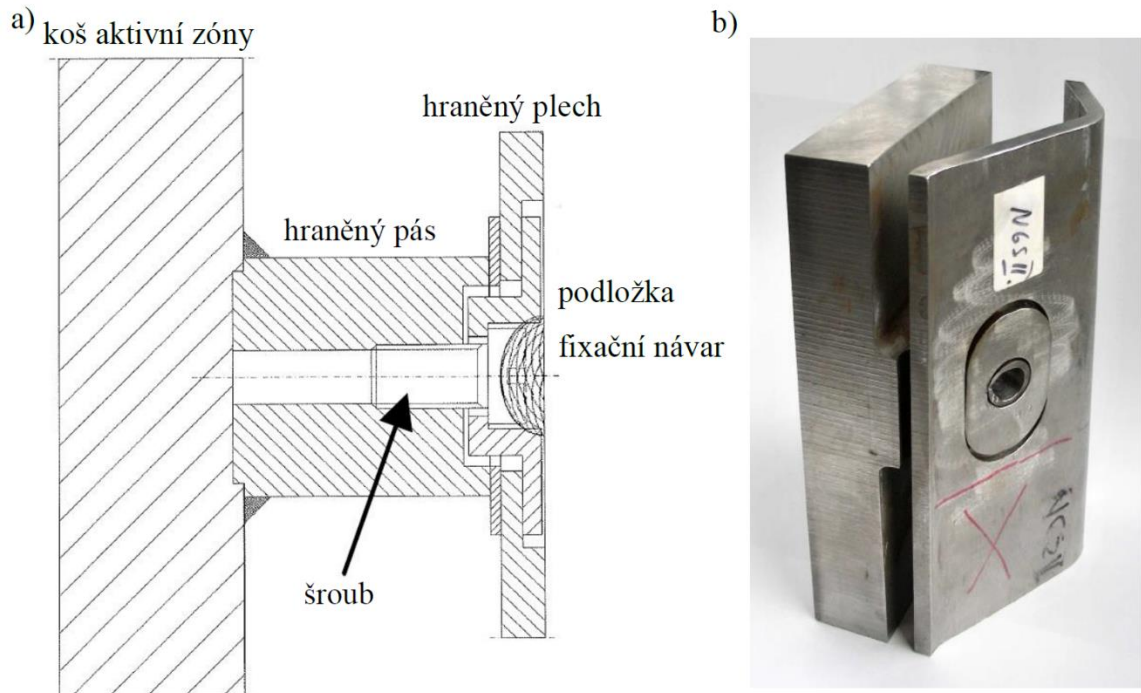
Obr. 14: Detail nosné desky koše aktivní zóny s otvory, uprostřed otvor pro zajištění regulační kazety (školící středisko Paks)

Při provozu dochází k zahřívání ocelových částí nejrůznějších komponent vlivem radiace. Stejně tak tomu je i u koše AZ, který musí být ochlazován, proto jsou v plášti nad nosnou deskou vyvrtány otvory o průměru 10 mm a jejich počet činí 42 ks. Tím je zajištěno rovnoměrné ochlazování vnější části pláště. [13]

Po výšce koše AZ jsou v pěti řadách přivařeny segmenty, na které se dále 312 šrouby M12 připevňují hraněné plechy. Radiální profil segmentů hraněných plechů odpovídá profilu aktivní zóny. Způsob připevnění hraněných plechů je zřejmý ze zjednodušeného schématu na Obr. 15 a detail samotného šroubu je na Obr. 16.

I v mezeře mezi hraněným plechem a pláštěm je třeba provádět chlazení, které je realizováno opět otvory o průměru 10 mm, a to v jednotlivých segmentech. Nosnost hraněného pásu je zvýšena trojúhelníkovými výztuhami přivařenými ke koši AZ i k hraněnému pásu. [17]

Montážní otvory pro upevňovací šrouby k připevnění hraněného plechu jsou vyhotovovány až při sestavování. Hraněný plech se skládá z více částí, které jsou následně svařovány dohromady. Všechny komponenty VČR procházejí po svém dokončení ultrazvukovou kontrolou. [17, 23]



Obr. 15: a) Řez košem aktivní zóny a jeho vnitřní vestavbou v místě upevnění šroubem, b) segment vyříznutý z koše AZ bloku JE Greifswald [8]

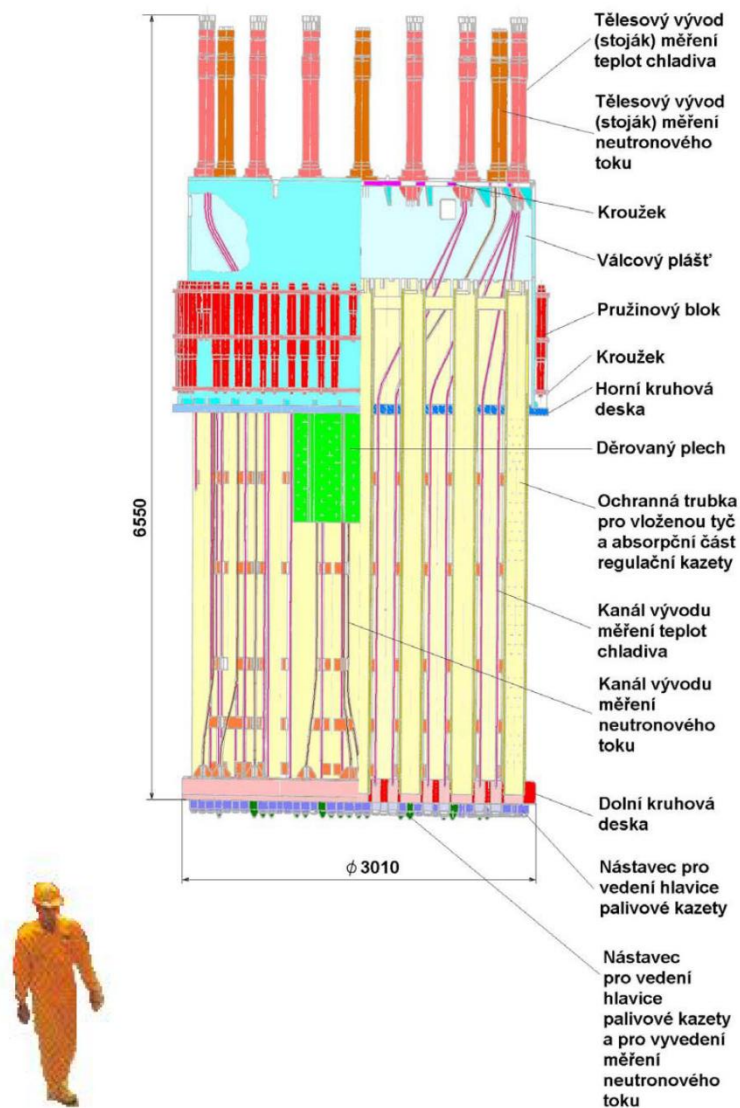


Obr. 16: Detail upevnění hraněného plechu na hraněný pás koše aktivní zóny pomocí šroubu M12 (školicí středisko Paks)

V prostoru po obvodě mezi hraněným plechem a pláštěm koše AZ je symetricky umístěno šest trubek o rozměrech 89 x 4,5 mm pro ustavení ionizačních komor systému kontroly při výměně paliva s výstupem na blokovou dozornu, zavážecí stroj a jeho rezervní pult. Tyto detektory tedy při běžném provozu nejsou instalovány. [23]

Blok ochranných trub

Na koš aktivní zóny shora dosedá blok ochranných trub. Blok ochranných trub (BOT) zajišťuje axiální pozici koše AZ v šachtě reaktoru a spolu s tím vymezuje polohu palivových kazet tím, že je přitlačuje směrem dolů k nosné desce koše AZ. Blok ochranných trub rovněž vede 37 regulačních kazet s vloženými tyčemi, vnitroreaktorová měření teploty chladiva a samonapájecí detektory měření neutronového toku. [31]



Obr. 17: Nákres konstrukce bloku ochranných trub, vlevo lidská postava pro srovnání [24]

BOT je svařená konstrukce tvořená horní a dolní deskou, které jsou vzájemně propojeny prostřednictvím 37 ochranných trub. Celou konstrukci z vnější strany obepíná válcový plášť, který je upevněn na horní desku. Na plášť je v dolní části přivařen pružinový blok a na horní části pak kroužek s 18 tělesy vývodů vnitroreaktorových měření. Vývody se

sbíhají do ochranných trubek o průměru 20 a 25 mm, které svádějí všechna měření z AZ. Tyto ochranné trubky jsou přivařeny prostřednictvím konzol. Po montáži BOT do tlakové nádoby reaktoru přitlačuje víko TNR na pružinový blok, a tím přitlačuje BOT na koš aktivní zóny a zároveň přitlačuje odpružené koncovky palivových souborů.



Obr. 18: Blok ochranných trub bez vnějšího pláště (školící středisko Paks)

Chladivo protéká dolní deskou bloku ochranných trub 312 otvory o průměru 85 mm. Dolní kovaná deska bloku ochranných trub má průměr 3 010 mm a tloušťku 200 mm. Kromě otvorů pro průchod chladiva je do desky vyvrtáno dalších 37 otvorů pro průchod a upevnění ochranných trub. Jednotlivé palivové kazety jsou vycentrovány pomocí 312 vodících pouzder – nástavců, které jsou přivařeny na spodní desku a zasahují tak přímo do hlavic palivových kazet. [31]

Z hlediska vlivu neutronů je koš aktivní zóny nejohroženější komponentou vnitřních částí reaktoru. Logicky je na vnitřním povrchu největší neutronový tok – $20 \cdot 10^{21}$ n/cm² pro energie $E > 0,5$ MeV. Zatímco na stěně šachty reaktoru je fluence desetinová – $2 \cdot 10^{21}$ n/cm² - opět neutronů o energii vyšší než 0,5 MeV. [1]

U reaktorů VVER 1000 je fluence na vnitřní straně pláště AZ $45 \cdot 10^{21}$ n/cm² ($E > 0,5$ MeV), což odpovídá 100 dpa. V případě šachty reaktoru VVER 1000 je fluence na stěnu $6 \cdot 10^{21}$ n/cm² ($E > 0,5$ MeV). Blok ochranných trub je pak vystaven fluenci o poznání nižší – jen $0,065$ n/cm² ($E > 0,5$ MeV). Všechny tyto hodnoty fluence jsou vypočítané z maximální projektové fluence na stěnu tlakové nádoby reaktoru na konci své životnosti. Využití uspořádání paliva v aktivní zóně s nízkým únikem a další opatření aplikovaná většinou elektráren však tyto hodnoty ještě snižují. [1]

1.3 Materiály použité pro vnitřní části reaktoru

Pro výrobu vnitřních částí jaderných reaktorů se používají austenitické korozivzdorné oceli. Tyto oceli dosáhly tak širokého uplatnění, jelikož úspěšně odolávají nejrůznějším korozním prostředím. Austenitické oceli mají krychlovou plošně středěnou strukturu a toto těsné uspořádání dále determinuje řadu jejich vlastností, zejména mechanických. Vyznačují se dobrou tvárností, tažností a houževnatostí při zachování svařitelnosti. Vysokou korozní odolnost mají zejména díky zvýšenému obsahu chromu. Na povrchu oceli dochází k utváření ochranné pasivační vrstvy bohaté právě na chrom, a tato vrstva se utváří v mnoha chemických prostředích – vodních, vzdušných apod. a to při teplotách od pokojové až do přibližně 400 °C. [4]

Při teplotách 500 °C a více poskytuje chrom oxidační odolnost díky vrstvě Cr₂O₃. V jaderných reaktorech je možné se setkat s oceliemi tříd AISI 304, 316, 321 a 347. V praxi se využívá více způsobů pro výrobu nejrůznějších komponent z těchto ocelí – válcování (za studena i za tepla), ohýbání, kování, vytlačování a další. Austenitické oceli rovněž vykazují dobrou odolnost vůči únavě. [4]

V západních reaktorech se nejčastěji využívají nestabilizované oceli AISI 304 a AISI 316 popřípadě stabilizovaná Nb AISI 347, která se využívala zejména v německých reaktorech. V případě AISI 316 se jako legující prvek využívá molybden, který dále zvyšuje její korozní odolnost. Nicméně molybden a chrom jsou oba feritotvorné prvky, tedy pro zachování plně austenitické struktury je třeba obnovit rovnováhu mezi austenito-tvornými (C, N, Ni, Mn, Co) a feritotvornými (Cr, Mo, Si, Ti, Nb, Al, V, W) prvky. V případě oceli

316 je zvýšen obsah niklu. Pro jaderné aplikace je nezbytné udržet podíl kobaltu na co nejnižší úrovni, jelikož by jinak došlo k silnému nárůstu indukované radioaktivity materiálu zejména vlivem rozpadu ^{60}Co . [3]

Reaktory VVER pro vnitřní části využívají austenitické korozivzdorné oceli stabilizované titanem s označením 08Ch18N10T, která svým chemickým složením odpovídá AISI 321. Pro svary se využívá svarový kov Sv-04Ch19N11M3. Svary jsou vyhotovovány v argonové ochranné atmosféře. Chemické složení obou hlavních materiálů pro výrobu vnitřních částí je uvedeno v Tab. 1. a Tab. 2. [1]

Tab. 1: Chemické složení materiálu 08Ch18N10T [4]

Materiál	C	Mn	S	P	Ni	Cr	Ti	Fe	Norma
08Ch18N10T	≤0,08	1,0 – 2,0	≤0,02	≤0,035	9,0 – 11,0	17,0 – 19,0	≥5C ≤0,6	zbytek	GOST 5632

Tab. 2: Chemické složení materiálu Sv-04Ch19N11M3 [4]

Materiál	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	Fe	Norma
Sv-04Ch19N11M3	≤0,06	1,0 – 2,0	≤0,6	≤0,018	≤0,025	10,0 – 12,0	18,0 – 20,0	2,0 – 3,0	zbytek	GOST 2246

1.4 Počáteční vlastnosti

Bez vlivu radiačních a dalších druhotných poruch a poškození si austenitické oceli udržují své metalurgické vlastnosti od pokojové teploty až po cca 550 °C. Vlastnosti oceli 08Ch18N10T jsou popsány českou státní normou ČSN 41 7247 respektive ruskou normou GOST 5632. [5]

Odolnost proti plošné korozi je zaručená vůči kyselině dusičné (kromě koncentrované za varu), proti slabým roztokům anorganických kyselin a silným organickým kyselinám. Odolnost proti mezikrystalové korozi je zaručena podle ČSN 03 8169, se zcitlivěním odolává ocel při dlouhodobé expozici v agresivních prostředích v celém rozsahu kritických teplot. Na vzduchu by měla tato ocel vykazovat odolnost vůči oxidaci až do teploty 850 °C a v páře až do 750 °C. [5]

Tepelné zpracování může být realizováno mnoha způsoby. Teplota pro žhání na snížení pnutí byla stanovena v rozmezí 850-950 °C při výdrži na teplotě přibližně 10 až 15 minut s postupným ochlazováním na vzduchu. Rozpouštěcí žhání bývá realizováno při 1 000 až 1 050 °C po dobu 5-20 minut a na vyšší teplotě 1100-1150 °C po dobu 10 až 30 minut, v obou případech je médiem pro ochlazení voda. Tvářitelnost za tepla je třídy 4 a teploty tváření v rozsahu 1100-800 °C při ochlazování na vzduchu. Svařitelnost je dle ČSN 05 1310 zaručená. [5]

Ocel 08Ch18N10T je možné používat na stavbu tepelných, energetických a chemických zařízení do teplot 800 °C včetně tlakových nádob dle ČSN 69 0010. Použití je možné rovněž v takových prostředích, kde je hlavním kritériem nikoliv korozní odolnost, ale spíše vysoká čistota produktu (farmaceutický a potravinářský průmysl). Vhodná je i pro konstrukci vysokotlakých zařízení. [5]

Tab. 3: Mechanické vlastnosti materiálu 08Ch18N10T [5]

Polotovár	Tyče tvářené za tepla	Plechý válcované za tepla	Tlusté plechý válcované za tepla
Rozměr t, d (mm)	≤ 60	≤ 10	30–80
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa] min	205	205	205
Mez pevnosti R_m [MPa]	500-750	500-750	500-750
Tažnost A_5 [%] min	40	30	34
Vrubová houževnatost [J.cm ⁻²] min KCU 3	120 podél	-	90/70 podél/napříč
Modul pružnosti E [GPa]	200	200	-

Tab. 4: Mechanické vlastnosti materiálu 08Ch18N10T za zvýšené teploty [5]

Teplota [°C]	100	200	300	350	400	450	500	550
Nejnižší mez kluzu $R_{p0,2}$ d≤100 [MPa]	176	155	136	130	125	121	119	118

Tab. 5: Mechanické vlastnosti materiálu 08Ch18N10T za zvýšené teploty, pokračování [5]

Teplota [°C]	100	200	400	600	800
Modul pružnosti E [GPa] za zvýšených teplot	194	186	172	155	135

Tab. 6: Fyzikální vlastnosti materiálu 08Ch18N10T [5]

Hustota ρ [kg.m ⁻³]	Měrná tepelná kapacita c_p [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Teplotní součinitel roztažnosti λ [K ⁻¹]	Tepelná vodivost λ_t [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Rezistivita ρ [Ω.m]
7 900	500	$16,0 \cdot 10^{-6}$	15	$730 \cdot 10^{-9}$

1.5 Degradace kovových materiálů

Provoz jaderného reaktoru je nutně spojený s ozařováním vnitřních částí reaktoru ionizujícím zářením, které vzniká v důsledku štěpné řetězové reakce uvnitř jaderného paliva. Při štěpení jader uranu se kromě jiného uvolňují neutrony o vysoké energii a také gama záření. Tyto částice pak dopadají na všechny okolní kovový materiál a interagují s ním. Při dopadu částice vznikají nejčastěji bodové poruchy – vakance a intersticiály v krystalické mříži. [3]

Z hlediska dopadu na výsledné vlastnosti austenitických ocelí používaných pro výrobu vnitřních částí jsou nejdůležitější Frankovy dislokační smyčky, vrstevné chyby a čtyřstěny vrstevných chyb. Dislokační smyčky jsou častěji způsobovány intersticiálními atomy než vakancemi, a tak mají silný vliv na další rozvoj radiačně poškozené mikrostruktury. [30] U ozářených materiálů je pak s rostoucí koncentrací vakancí možné pozorovat šplhání dislokací i za nižších teplot, než je obvyklé. Frankovy dislokační smyčky budou blíže popsány na závěr této kapitoly. [29]

V některých případech byl pozorován vznik dutin a bublin, ty však v případě vnitřních částí reaktorů VVER 440 pozorovány nebyly. Tyto kavity ale mají obecně velký dopad na mechanické vlastnosti materiálu a s jejich růstem dochází k tzv. bobtnání neboli swellingu, který se s rostoucí ozařovací teplotou dostává do popředí, což se vlivu na mechanické vlastnosti tyče. Ke swellingu dochází při ozařovacích teplotách v rozmezí 0,3 – 0,5 teploty tání při střední až vysoké neutronové dávce. [17] Swelling je tak nutné brát v potaz v případě reaktorů VVER 1000, kdy k tomuto jevu přispívá i mohutnější konstrukce vnitřních částí.

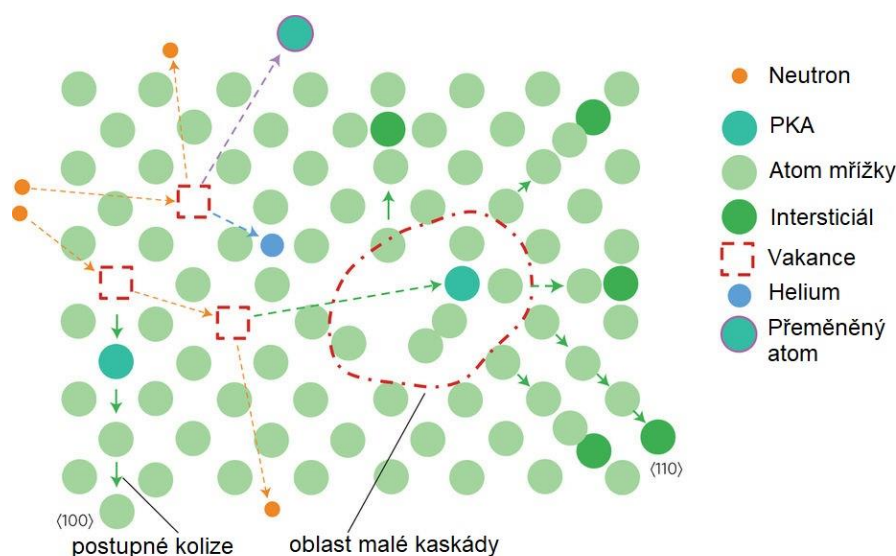
Ke swellingu dochází v důsledku nahromadění vakancí v jednom místě ozářeného materiálu. [22]

Mřížkové poruchy mají dopad na vlastnosti ozařovaného materiálu, jeho mikrostrukturu, ale také třeba na korozní vlastnosti. Míra radiačního poškození je charakterizována pomocí tzv. *dpa*, které vyjadřuje, kolikrát došlo k přemístění jednoho (hypotetického) atomu v mřížce. Pro hodnocení ozáření se jedná o velice důležité kritérium. Atomy, které jsou vyraženy dopadajícími částicemi jsou označovány jako primárně vyražené atomy. Pokud tyto primárně vyražené atomy mají energii desítek nebo stovek či více eV, pokračují v pohybu krystalovou mříží a naráží do dalších a vzniká tzv. kaskáda vyražených atomů. [15, 17]

Kaskáda vyražených atomů

Na počátku vzniku kaskády má primárně vyražený atom (označován zkratkou PKA z anglického Primary Knock-on Atom) relativně vysokou energii – řádově keV a vzdálenosti mezi jednotlivými srážkami jsou větší. S poklesem kinetické energie klesá i dráha atomu mezi jednotlivými srážkami. Vyražením atomu z místa vzniká v daném bodě mřížky vakance. V průběhu kaskády je koncentrována značná energie ve velmi malém objemu, jde asi řádově o eV na jednu srážku v kaskádě. Po skončení jedné kaskády srážek může být počet přemístěných atomů i deset tisíc, a to vlivem jediné primárně vyražené částice, která je na počátku. Zjednodušené schéma kaskády je uvedeno níže na Obr. 19. [15, 29]

Nahromaděná energie je následně disipována ve formě tepla. Vyražené atomy tvoří zónu poškození, kde jsou nahromaděné bodové poruchy, shluky defektů, dislokační smyčky, dutiny a precipitáty. Celkově dochází k velké lokální proměně mikrostruktury ozářeného materiálu.



Obr. 19: Zjednodušené schéma kaskády vyražených atomů [18]

Radiačně indukované precipitáty

Ozáření má na poškozený materiál i ten vliv, že dochází k rozpouštění, formování a ke změnám fází. Lokální obohacení či ochuzení o rozpuštěnou látku mají vliv na fázovou stabilitu, a to ještě společně se vznikem nekoherentních vad. Tyto změny mají ve výsledku značný vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti ozářeného materiálu. Ochuzení či přesycení může vést k precipitaci, je-li dosažena a překonána mez rozpustnosti. Přesycení danou látkou je hnací silou precipitace. [26]

Ozáření způsobuje vznik fází, které by jinak nebylo možné za totožných okolností získat. Zároveň ozáření předchází vzniku stabilních fází. Rozdíl mezi koherentními a nekoherentními precipitáty je patrný v interakcích těchto precipitátů s bodovými poruchami. Koherentní precipitát se vzhledem k těmto poruchám chová jako past (k anihilaci precipitátu nedochází), zatímco nekoherentní vykazuje chování opačné. [17]

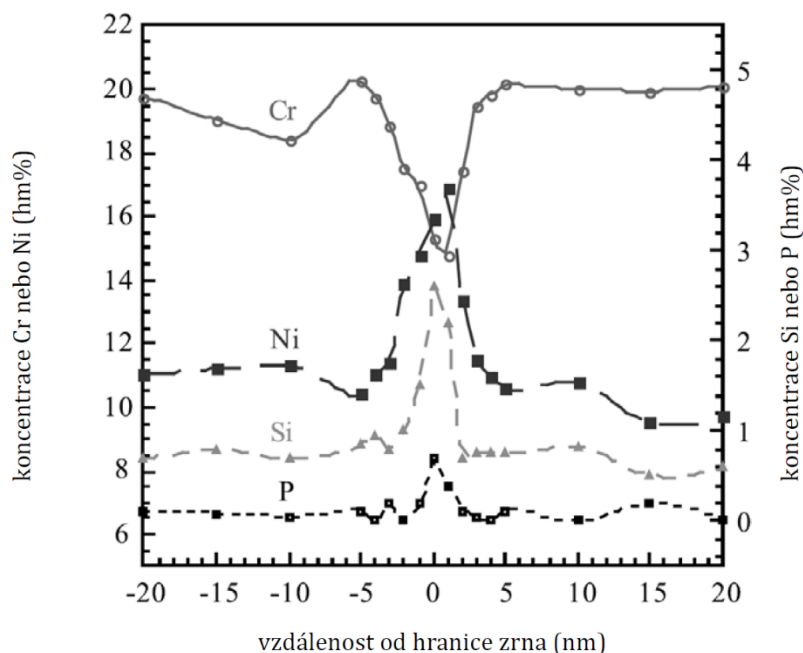
Při ozařování nenasyceného roztoku je možná precipitace už při nižších teplotách, kdy precipitát nemůže být teplotně stabilní. Teplota a dávkový příkon tak mají velký vliv na radiačně indukovanou segregaci. [17]

Radiačně indukovaná segregace

Z důvodu upřednostněného transportu atomů radiačně rozpuštěných prvků prostřednictvím trvalého toku bodových poruch k pastem dochází ke vzniku radiačně

indukované segregace. Tyto procesy vedou k nerovnovážné koncentraci gradientů a k tvorbě metastabilních fází, čím je zapříčiněna termodynamická nerovnováha. [15]

S rostoucí teplotou je tak pro vakance stále snazší pronikat napříč atomovou mřížkou. Legující prvky tak migrují a dochází k jejich redistribuci. Tato redistribuce vede buď k obohacení nebo naopak k ochuzení materiálu o legující prvky v blízkosti povrchu, na rozhraní zrn, fází nebo dutin. Tento jev je ilustrován na následujícím Obr. 20, kde je patrný průběh profilů koncentrací jednotlivých prvků na hranici zrna v korozivzdorné oceli při nízkém ozáření několik dpa při ozařovací teplotě 300°C. Dobře patrné je zejména ochuzení o chrom a obohacení o křemík v místě hranice dvou zrn. [15, 16, 30]



Obr. 20: Průběh koncentrací jednotlivých prvků v místě hranice dvou zrn korozivzdorné ocele ozářen na několik dpa při 300 °C [30]

Tyto a další podobné nepravidelnosti v mikrostruktuře materiálu brání v pohybu dislokací a tím přispívají ke zvýšení meze kluzu, snížení plasticity a způsobují tzv. radiační křehkost – stav, kdy dochází ke snazšímu rozvoji trhlin.

Míra radiačního poškození je závislá na ozařovacích podmínkách, jako jsou teplota, rychlost a způsob ozařování. Jedním z hlavních degradačních mechanismů austenitických ocelí v jaderném reaktoru je vliv prostředí, které je charakterizované chemickými a mechanickými parametry. U VVER je chladivem demineralizovaná voda s rozpuštěnou kyselinou boritou, do které se ještě dávkuje hydroxid draselný a amonný pro úpravu pH chladiva. Chladivo proudí reaktorem VVER 440 maximální rychlostí 4,1 m/s v aktivní

zóně. Na výstupu z aktivní zóny má chladivo střední teplotu 292 ± 2 °C a při odstávce klesá teplota až na cca 30–40 °C. Pravidelné změny teploty chladiva reálně mohou přispívat k nízkocyklové únavě VČR. [17, 23, 30]

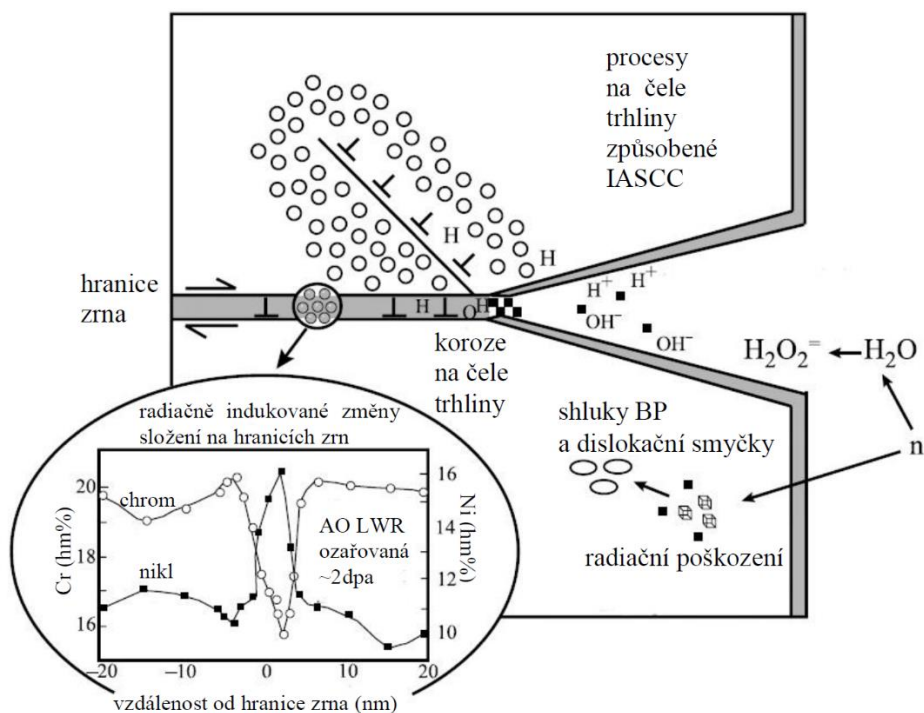
Radiačně indukované korozní praskání pod napětím (IASCC)

Hlavním příkladem, kdy dochází k prostředím ovlivněné degradaci, je radiačně indukované korozní praskání pod napětím označované zkratkou IASCC (z anglického Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking, které je příkladem interkrystalického korozního praskání pod napětím. Koroze je proces chemicko-fyzikální či chemický, který má za následek degradaci vlastností materiálu. Pokud současně na materiál působí agresivní chemické prostředí a mechanické napětí, dochází k většímu poškození, než které by odpovídalo prostému součtu obou jevů samostatně působících. Toto současné dvojí působení vede k tzv. koroznímu interkrystalickému lomu pod napětím (IGSCC – z anglického Intergranular Stress Corrosion Cracking). [17, 26, 29]

IASCC vzniká kombinací radioaktivního záření, mechanického napětí a agresivního chemického prostředí. IASCC je tak jedním z hlavních problémů pro austenitické materiály v lehkododních reaktorech obecně. Pokud však jeden ze dvou faktorů (napětí, radiační působení) není přítomen, jsou dopady eliminovány či výrazně omezeny. [30]

Za praskáním vlivem vodního prostředí stojí podobné procesy jak u ozařovaných, tak i neozařovaných materiálů. Rychlost růstu trhliny je úměrná koroznímu potenciálu, který roste s obsahem nečistot ve vodě. U ozařovaných vzorků je patrný vliv radiačně indukované segregace (spojované často s obsahem křemíku), ale také vliv radiačního zpevnění a s ním spojených mikrostrukturních změn. [26, 27]

Určení vlivu jednotlivých mechanismů je obtížné, jelikož jsou dány součtem více spolupůsobících faktorů. Následující Obr. 21 ilustruje vznik IASCC za společného působení chemie vody a materiálových vlastností austenitické oceli. Současné teorie pro popis IASCC je možné strukturovat do pěti kategorií – zářením vyvolané snižování chrómu na hranicích zrn, radiační zpevnění, lokalizované deformace, selektivní oxidace a tečení vlivem záření. [30]



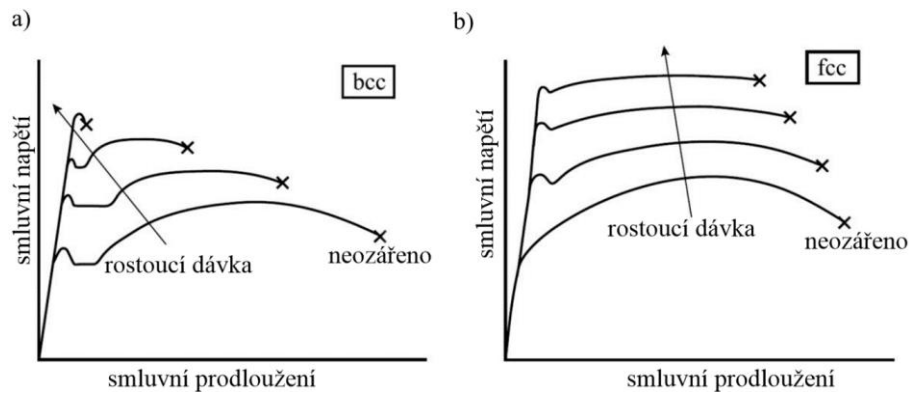
Obr. 21: Schéma společného působení hlavních faktorů pro iniciaci IASCC u austenitických ocelí [17]

Radiační křehnutí

S rostoucím ozářením austenitické oceli roste mez kluzu, a to mnohem více, než roste mez pevnosti. Nejvýrazněji je tento efekt patrný při teplotách do 0,3násobku teploty tavení. Mez kluzu roste až do té míry, že dojde úplnému zpevnění materiálu a ke ztrátě schopnosti deformovat se – ztrátě tažnosti a plasticity. V takovém případě se pak mluví o radiačním křehnutí. V austenitických ocelích je hlavním zdrojem zpevnění materiálu zastoupení radiačně indukovaných shluků bodových poruch, které zvyšují napětí pro pohyb dislokačních smyček. [30]

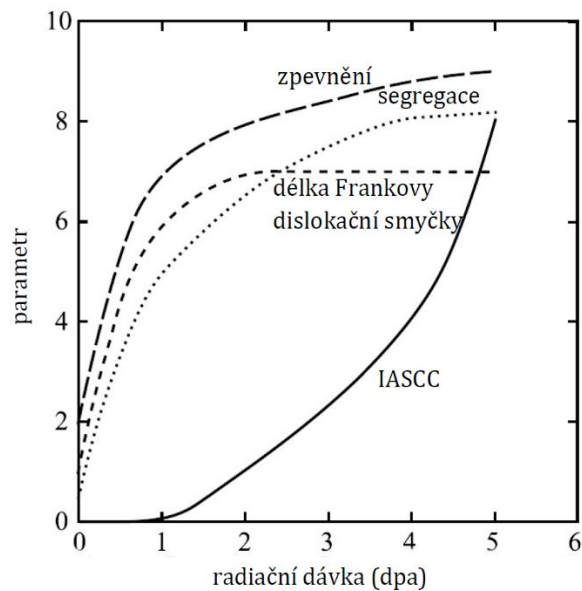
S ozářením rovněž dochází ke ztrátě lomové houževnatosti, kdy ozářený materiál ztrácí svoji schopnost čelit růstu trhlin a může dojít i ke křehkému porušení – úplnému prasknutí. Ozáření tedy snižuje dobu do lomu pro nízkocyklovou únavu v důsledku snížení tažnosti a v důsledku zvýšené pevnosti naopak roste mez pro porušení vysokocyklovou únavu. [17]

Tahové křivky feritické a austenitické oceli se s rostoucí dávkou posouvají a mění svůj tvar, jak je patrné z Obr. 22, který ilustruje změny průběhů tahových křivek s ozářením.



Obr. 22: Vliv ozáření na průběh tahové křivky pro a) feritickou (fcc), b) austenitickou (bcc) ocel [17]

Jednotlivé degradační mechanismy jsou porovnány na Obr. 23, kde je vynesena jejich závislost na míře ozáření v dpa.



Obr. 23: Přehled degradačních mechanismů ukazující nárůst všech parametrů (radiačně indukovaná segregace, dislokační smyčky atd.) v závislosti na ozáření v dpa [17]

Dislokační smyčky

Jak již bylo popsáno, nejdůležitější z hlediska rozvoje radiačního poškození austenitických ocelí je tvorba Frankových dislokačních smyček. Jelikož za dislokačními smyčkami stojí častěji intersticiální atomy než vakance, mají tyto atomy velký vliv na rozvoj radiačně degradované mikrostruktury. Nepoměr mezi vakancemi a intersticiály je patrný i z Obr. 19.

Dislokací se rozumí čárová porucha jinak pravidelné struktury krystalové mřížky, která sama tvoří hranici mezi posunutou a neposunutou částí krystalu. Čárových dislokací

jsou dva základní druhy – hranová a šroubová. Dislokace nemusí být obecně jen přímka, ale často bývá ve formě křivky, která vybíhá na povrch krystalu, popřípadě tvoří uvnitř krystalu uzavřenou křivku. Dislokace nejsou pevně zafixované v krystalové mřížce a mohou se tak pohybovat – buď skluzem nebo šplháním. Rychlost pohybu dislokací je dána jejich hustotou a difúzním koeficientem. U neozářených materiálů ve výchozím stavu tak je rychlost pohybu dislokací ovlivněna pouze teplotou a k významnému pohybu tedy dochází pouze za vyšších teplot. S rostoucím ozářením je pohyb dislokací možný i za nižších teplot než u výchozího stavu. [30]

Ke vzniku Frankových smyček často dochází v místě kolizní kaskády, kdy dojde ke kolapsu shluku bodových poruch. Při kolapsu shluku vakancí vzniká úbytková vrstevná chyba a při kolapsu shluku intersticiálů se rodí naopak přebytková vrstevná chyba. Vrstevnou chybou je rozuměna nepravidelnost v řazení krystalografických rovin. Uskupením chyb ve třech rozměrech vzniká čtyřstěn vrstevných chyb, který je nepohyblivý a za svůj vznik pravděpodobně vděčí shlukům vakancí po kaskádě srážek nebo dislokačním smyčkám. [17, 25]

Geneze dutin a bublin

Dutiny a bubliny jsou souhrnně označovány jako kavity a mají velký vliv na mechanické vlastnosti, jak už bylo popsáno výše. Vznik dutin je teplotně závislý proces. Za nízkých teplot tyto dutiny vykazují jen minimální pohyblivost, protože vakance jsou málo pohyblivé a snadno může dojít k zachycení na pohyblivějších intersticiálních atomech, čímž nedochází ke vzniku dutiny. [30] Ovšem při vyšších teplotách je situace jiná. Při teplotách 0,25 – 0,5 teploty tání je pohyb vakancí již dostatečný pro genezi drobných shluků. [15] Vznikající mikrodutiny a mikrobublinky přecházejí do dutin a ty dále rostou s přibýváním vakancí. Bubliny vznikají obdobně, jen v nich dochází ke koncentrování interního plynu – helia či třeba vodíku, které se uvolňují transmutací ozářených kovových materiálů, jak je patrné i z Obr. 19, který popisuje vznik kaskády vyražených atomů. [15, 18, 30]

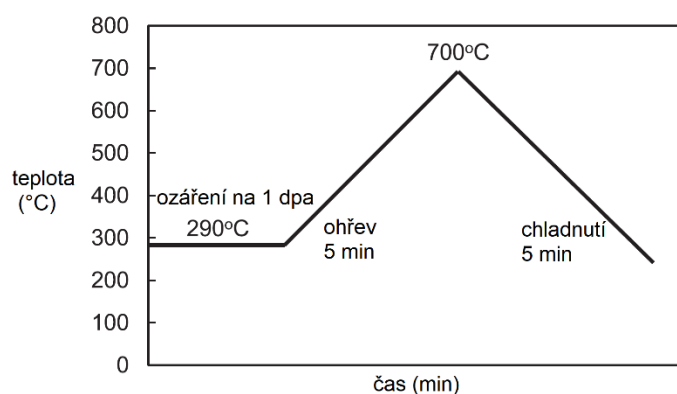
1.6 Regenerační žihání

Regenerační žihání je jednou z možností, jak zvrátit výše popsané nepříznivé degradační procesy a obnovit tak původní vlastnosti materiálu namísto nákladné výměny za nový kus.

Cílem regeneračního žíhání je odstranění předchozího poškození a obnovení výchozích vlastností materiálů. V případě VČR reaktoru typu VVER 440 se jedná o austenitickou korozivzdornou ocel stabilizovanou titanem. Z literatury je však známo, že není možné využít mechanismu změny krystalové mřížky jako u materiálů tlakových nádob reaktoru, které byly v minulosti již úspěšně regeneračně žíhány. [3]

V případě materiálu VČR by však mělo být možné použít mechanismus difuze chromu a uhlíku, ke kterému by mělo dojít při teplotách 650 až 700 °C. Při teplotách okolo 650 °C však hrozí zcitlivění vůči mezikrystalické korozi (MKK), jemuž je možné předejít následným rozpouštěcím žíháním na teplotách okolo 1100 °C. Nicméně ocel 08Ch18N10T je stabilizovaná titanem, který právě oné mezikrystalické korozi zabraňuje. Svými vlastnostmi je tato ocel velmi blízká ocelím AISI 304 či 304L, avšak právě díky titanu vykazuje větší odolnost vůči MKK. [9]

Problematikou regeneračního žíhání austenitických korozivzdorných ocelí se celosvětově zabírá řada institucí, nicméně většina prací se týká materiálů vnitřních částí pro reaktory západního typu (PWR i BWR). Například v Japonsku byla ocel 316L, která se běžně používá pro výrobu VČR, ozářena ve speciálním elektronovém mikroskopu a následně vyžíhána při teplotě 700 °C. Pro účely tohoto experimentu byly vyrobeny miniaturní vzorky, které byly ozářeny elektrony o vysokém napětí na 1 dpa při ozařovací teplotě 290 °C. Průběh žíhacího procesu je uveden na Obr. 24. [9, 10]



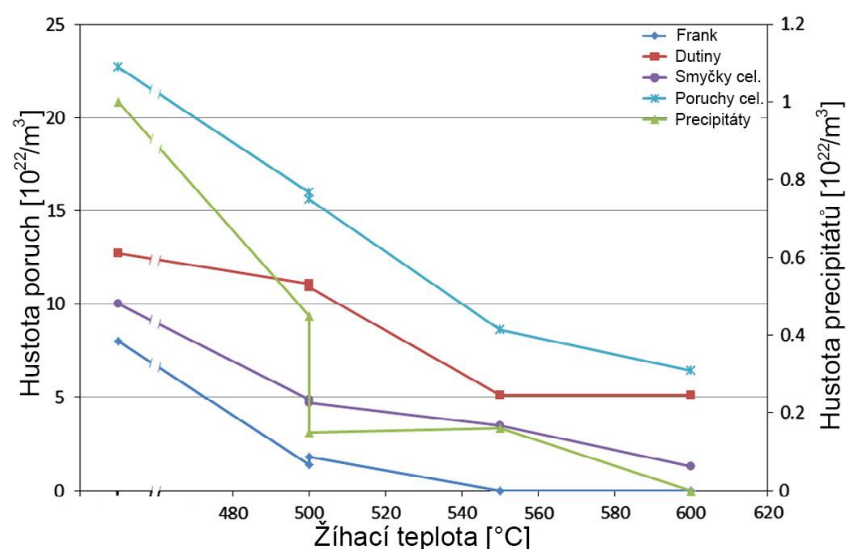
Obr. 24: Průběh žíhacího experimentu pro ocel 316L, ozářeno elektrony na 1 dpa [9]

Ve zkoumaném materiálu byly i po tak relativně nízkém ozáření 1 dpa pozorovány Frankovy dislokační smyčky, dutiny a černé tečky typu intersticiál. Následný proces vyžíhání měl za následek zmenšení průměrné velikosti a hustoty Frankových dislokačních smyček, černých teček a dutin (přičemž objemový podíl dutin narostl).

Dle některých zdrojů by měla dostatečně vysoká teplota žíhání vést k částečnému nebo až k úplnému odstranění Frankových dislokačních smyček. Dle Fukuya se množství smyček nezměnilo, byla-li použita teplota pouze 400 °C a doba výdrže 1 hodina. Při teplotě 550 °C a stejné výdrži však již došlo k redukci hustoty smyček o celých 20 %. Pro experimenty byl použit materiál AISI 316 ozářený v PWR reaktoru na 25 dpa. [9]

Obdobné výsledky zaznamenala v roce 2013 i studie belgického centra pro jaderný výzkum, která prokázala, že odstranění Frankových smyček je podmíněno především žíhací teplotou. Experimenty probíhaly na zastudena tvářené oceli 316 ozářené na 80 dpa při 320 °C. Ozářený materiál byl vyžhán na 500, 550 a 600 °C a sledovány byly právě Frankovy dislokační smyčky. Při žíhání na 500 °C došlo k redukci jejich hustoty o 19 % a při 550 °C dokonce došlo k jejich úplnému vymizení. Doba výdrže byla v obou případech 6 hodin. [19] Prodloužení doby výdrže ze šesti na 19,5 hodin při teplotě 500 °C nemělo pozorovatelný vliv na hustotu dislokací. [10]

V případě oceli AISI 304 je teplota pro odstranění Frankových smyček o 50 °C nižší – tedy 500 °C. [27] Na Obr. 25 je znázorněn průběh hustoty poruch materiálu v závislosti na žíhací teplotě. Vliv žíhací teploty je rovněž patrný v případě kavit. Žíhání při teplotě 500 °C má jen velmi omezený dopad na hustotu kavit, která oproti ozářenému vzorku téměř neklesla. Při žíhací teplotě 550 °C však již došlo ke značnému poklesu hustoty dutin – v materiálu jich zůstala polovina. Při dalším zvýšení žíhací teploty na 600 °C už k dalšímu poklesu výskytu dutin nedošlo. [27]



Obr. 25: Změna hustoty jednotlivých druhů poruch materiálu v závislosti na žíhací teplotě [27]

Žihací teplota má stejně tak dopad i na nejrůznější precipitáty. V případě zastudena tvářené oceli AISI 316 došlo ke snížení na poloviční množství při žihací teplotě 500 °C a výdrži 6 hodin. Oproti tomu regenerační žihání ozářené oceli AISI 304 při stejné teplotě odstranilo ze struktury všechny precipitáty. [27]

Obdobný výzkum probíhal i v USA, kdy byl procesu regeneračního žihání podroben materiál AISI 304L, který byl ozářen na 5,9 dpa ve Švédském reaktoru typu BWR Barsebäck. Žihání bylo provedeno celkem ve čtyřech režimech – 500 °C, 1 hod; 550 °C, 1 hod; 550 °C, 5 hod; 550 °C, 20 hod. [14]

Žihání při 550 °C po dobu 20 hodin vedlo k téměř úplné anihilaci všech dislokačních smyček. U radiací indukovaných shluků typu Ni-Si a Al-Cu došlo žiháním ke snížení jejich hustoty, zvětšení velikosti a zachování stejného objemového podílu. Při žihání 500 °C/5 hod došlo k podstatné redukci segregovaných prvků chromu a niklu z hranic zrn. Ani při žihání 550 °C/20 hod však nedošlo k úplnému odstranění těchto segregátů z hranic zrn. [14]

K anihilaci dislokačních smyček docházelo při teplotách 550 °C rychleji než k redukci chromu a křemíku z hranic zrn a clusterů. Podobné závěry přináší i práce [27], která se věnuje regeneračnímu žihání austenitické oceli AISI 304. Závěry této studie jsou, že žihání při 400 °C po dobu šesti hodin nemělo žádný větší dopad na tvrdost a houževnatost materiálu, i přes to, že došlo ke snížení podílu mezikrystalického lomu. Žihání při teplotě 500 °C pak snížilo tvrdost a obnovilo houževnatost. Mezikrystalický lom byl podstatně redukován již po 3,5 hodinách žihání a téměř eliminován po 6 hodinách žihání. [27]

V Rusku byl regeneračnímu žihání podroben materiál vnitřních částí reaktoru VVER 1000, který se používá i pro vnitřní části reaktoru VVER 440 – 08Ch18N10T. Materiál byl ozařován na dvou místech: ve výzkumném reaktoru BOR-60 na výsledných až 145 dpa, při 330-400 °C a v reaktoru VVER 1000 (12-14 dpa, při ozařovací teplotě 320 °C). Regenerační žihání probíhalo na vzduchu za různých teplot. Materiál byl zkoumán především z pohledu bobtnání (swellingu), které však v případě reaktoru typu VVER 440 nebylo prokázáno. [10]

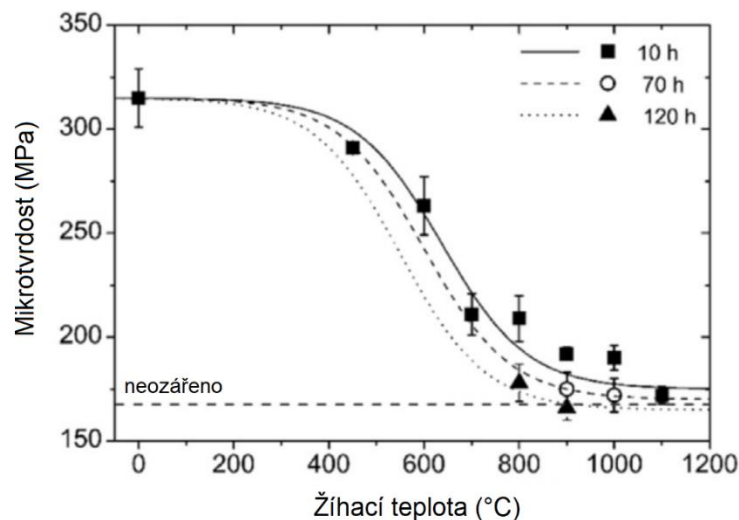
Vzorek ozářený na 100 dpa při 330-400 °C byl žihán při různých teplotách: 450–1100 °C po dobu 10–120 h. Odstranění dislokačních smyček pomocí žihání značně závisí nejen na teplotě, ale také na době žihání. Kompletního odstranění dislokačních smyček bylo

dosaženo při žíhání na teplotě 600 °C/10 hod, a také při 700 °C/1 hod. Další zvyšování žíhací teploty vede ke vzniku parciálních dislokací. [10]

Při žíhání na teplotách nad 800 °C dochází ke vzniku malých karbidů titanu (TiC; velikost 4-8 nm) hlavně uvnitř zrn materiálu. Další zvyšování teploty žíhání a výdrže na dané teplotě vede ke zvětšování průměrné velikosti těchto karbidů zároveň se zmenšováním jejich hustoty. Nicméně toto významně nepřispívá ke změnám vlastností materiálu vzhledem k nízké hustotě právě těchto TiC karbidů. [10]

Radiačním působením dochází k segregaci zejména niklu na hranicích zrn. Při teplotách žíhání 600 °C a 700 °C (10 h) došlo k obnovení chemického složení na hranicích zrn. Regenerační žíhání při teplotách mezi 700–900 °C vede k odstranění radiačně indukovaných defektů, sekundárních fází, a radiací indukované segregace. Jako možný vhodný žíhací režim byl pro materiály VČR VVER 1000 určen režim při teplotě 1000 °C po dobu 120 hodin. [10]

Na Obr. 26 je diagram znázorňující závislost mikrotvrdomosti na žíhací teplotě a době žíhání. Z grafu je patrné téměř úplné obnovení výchozích hodnot mikrotvrdomosti po žíhání při teplotách nad 900 °C. Vzorky ozařované ve výzkumném reaktoru BOR-60 byly také odzkoušeny pro získání mechanických vlastností. [9]



Obr. 26: Mikrotvrdomost materiálu 08Ch18N10T v závislosti na žíhací teplotě a délce výdrže [10]

1.7 Metody pro hodnocení stupně obnovení

Radiačně poškozená struktura obsahuje velké spektrum defektů nejrůznějších rozměrů a typů. Téměř všechny defekty jsou s obtížemi pozorovatelné, a to i pomocí transmisní

elektronové mikroskopie. Z toho důvodu je studium degradačních mechanismů a samotného procesu obnovování vlastností složitým oborem, ve kterém nachází uplatnění moderní zobrazovací metody. Velká složitost nezávislých jevů, které probíhají při ozařování a žíhání zatím prakticky vylučuje reálnou možnost přesného odhadu či výpočtu stupně obnovy vlastností u materiálu VČR. [3, 22]

Pro stanovení efektivity žíhacího procesu – míry obnovy vlastností je ale možné využít řadu experimentálních způsobů. Jedny z nejčastěji používaných metod jsou měření statické lomové houževnatosti a tahové zkoušky (v ozářeném a vyžíhaném stavu). Často se též využívá zkoušek rázem v ohybu prováděných pomocí Charpyho kladiva s určením přechodové teploty. Porovnání stupňů regenerace z jednotlivých zkoušek je uvedeno např. v [3]. Z výsledků vyplývá, že při použití metody lomové houževnatosti a tahových zkoušek pro stanovení stupně regenerace jsou tyto výsledky obecně nižší, a tedy i konzervativnější než výsledky predikované pomocí ostatních metod.

Zkouška rázem v ohybu

Již zmíněná zkouška rázem v ohybu dle Charpyho byla využita např. při stanovování vlivu niklu na křehnutí ocelí TNR VVER 1000 v ORNL a v ruském Kurčatovově Institutu. [19] Charpyho zkouška byla aplikována i při určování efektivity žíhání oceli TNR 2. bloku Kozlodujské elektrárny. Celkem bylo vytvořeno 15 malých zkušebních těles (5x5 a 4x3 mm) pro zkoušku rázem v ohybu. Tyto zkoušky byly doplněny spektrometrickou analýzou a měřením tvrdosti. Efektivita žíhání jako prostředku pro obnovu původních vlastností byla prokázána. U svarového kovu byl snížen posun kritické teploty o 85 %. Úspěšné žíhací experimenty posloužily jako základ pro vyžíhání 14 tlakových nádob reaktorů VVER 440. [3, 22]

Z mechanického hlediska jsou mechanismy radiačního poškození dvojího druhu – způsobující a nezpůsobující vytvrzování. Za zpevnováním a vytvrzováním materiálů nejčastěji stojí mřížkové poruchy, jako jsou precipitáty, které brání v pohybu dislokací. Jako

nepřímý důkaz vytvrzování může sloužit lineární závislost mezi posunem T_k^1 a nárůstem meze kluzu.

Tvrдост

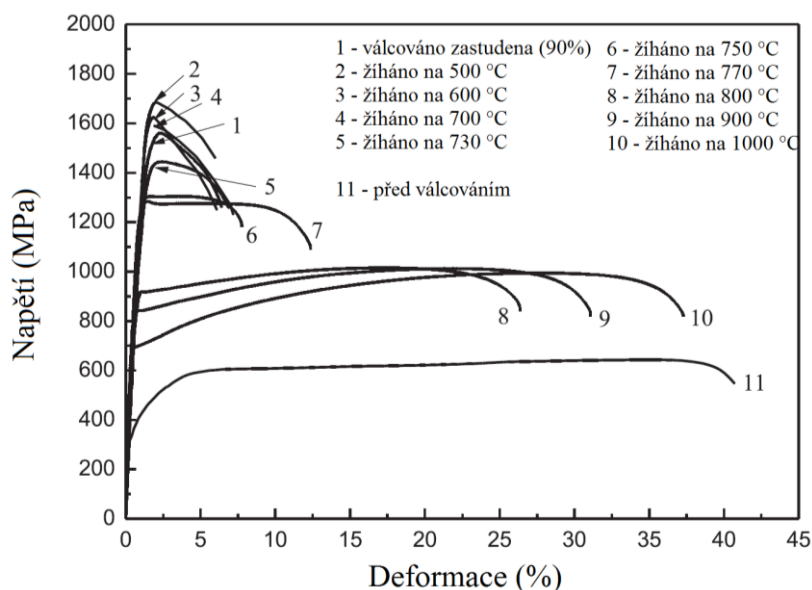
Jednou z nejjednodušších metod určení míry regenerace vlastností je měření tvrdosti, resp. mikrotvrđosti. [30] Jako nespolehlivé však bývá označováno určování zbytkové křehkosti. To se týká zejména křehnutí způsobeného křehkostí hranic zrn. Výsledky měření tvrdosti tak mohou sice svědčit o dokonalé obnově, ovšem i přesto, že zbytkový posuv tranzitní teploty je znatelně velký. Měření tvrdosti je tak vhodnější při určování neúplné regenerace vlastností, tj. pokud není dosažena původní tvrdost, není s velkou pravděpodobností dosažena ani původní tažnost. [22]

Měření mikrotvrđosti pro posuzování efektivity regeneračního žíhání kovových materiálů bylo použito v např. osmdesátých letech v horkých komorách EPRI (Electric Power Research Institute) s využitím korelací mezi mikrotvrđostí a Charpyho tranzitní teplotou. [16] Měřena rovněž byla i v ruském federálním institutu strukturálních materiálů (CRISM „Prometey“) s využitím hrotu ve tvaru čtyřhranné pyramidy o čtvercové základně při zatížení 1,98 N po dobu 10 s. Efektivitu žíhání je možné znázornit graficky – s rostoucí žíhací teplotou klesá mikrotvrđost, jak již bylo uvedeno (Obr. 26).

Statická zkouška tahem

Statická tahová zkouška slouží k určení následujících parametrů: mez kluzu, mez pevnosti, relativní prodloužení, kontrakce atd. Tahová zkouška patří k základním mechanickým zkouškám. Při návrzích experimentů je nutné vycházet zejména z množství dostupného materiálu, které je omezené. V podobných případech bylo použito např. zkušebních těles 15 x 0,2 mm. [9] Porovnání tahových diagramů pro různé žíhací teploty s výchozím stavem je na Obr. 27.

¹ T_k označuje teplotu křehkosti, která odpovídá předepsané vrubové houževnatosti, předepsanému podílu houževnatého lomu či předepsanému příčnému rozšíření. Způsob určení této teploty je popsán příslušnými normami, podle kterých se provádějí zkoušky (např. v normě ČSN 42 0350).



Obr. 27: Tahové diagramy austenitické Fe-25Cr-20Ni oceli pro různé žhací teploty (výchozí stav je označen číslem 11) [9]

Ostatní metody

Pro kvalitativní popis ozářených materiálů lze využít mikrostrukturní analýzu např. pomocí atomové tomografie umožňující odhalení precipitátů o velikosti 1-2 nm. Pro atomovou tomografii je nutná speciální příprava vzorků zahrnující řezání a elektrolytické leštění. Samotný experiment pak probíhá v pulzním režimu při 200 kHz a 60 K více viz [3, 19]. Podobné možnosti nabízí i transmisní elektronová mikroskopie či metoda SANS (Small Angle Neutron Scattering). V Rusku byla mj. použita i metoda EELS (Electron Energy Loss Spectroscopy). Pomocí této metody bylo určováno chemické složení fází, také sloužila pro identifikaci hranic zrn a pro tvorbu distribučních map jednotlivých prvků. [19] Nejen při fraktografické analýze lomových ploch zkušebních těles bývá uplatňována skenovací elektronová mikroskopie (SEM). Větší zvětšení – řádově desítky tisíc až sta tisíc umožňují bližší charakterizaci zákonitostí vzorků ozářených na 100 dpa. [10]

Z dostupné literatury je patrné, že mezi vhodné metody pro ověřování efektivity žhacího procesu patří široce používané a ověřené – tahové zkoušky, zkoušky statické lomové houževnatosti a měření tvrdosti, resp. mikrotvrdosti. Vzhledem malému dostupnému množství ozářeného materiálu bude nutné tyto zkoušky provádět na miniaturizovaných tělesech v omezeném počtu. Jako vhodný doplněk mechanických zkoušek pak může sloužit analýza lomových ploch na SEM. [27-30]

2 Příprava experimentu

2.1 Návrh experimentu

Cílem celého projektu „Zajištění dlouhodobého provozu vnitřních částí tlakových nádob reaktorů jaderných elektráren“ podpořeného Technologickou agenturou České republiky je vytvoření certifikovaného postupu pro obnovení výchozích vlastností materiálů vnitřních částí reaktorů typu VVER 440 metodou regeneračního žíhání. Aby bylo možné vytvořit postup pro obnovení výchozích vlastností, je nutná celá řada dílčích kroků, které postupu předcházejí.

Zejména v úvodní fázi bylo nutné: provést rozsáhlou rešerši možných postupů regeneračního žíhání, analyzovat degrační mechanismy v poškozeném materiálu, vybrat několik vhodných postupů regeneračního žíhání a definovat metody, které budou použity pro hodnocení stupně obnovení původních vlastností materiálu. V neposlední řadě je třeba určit jaké typy zkušebních těles budou vyráběny a také vybrat vhodnou metodu výroby těchto zkušebních těles.

V návaznosti na tuto počáteční „rešeršní“ fázi je možné přikročit k druhé části, která již zahrnuje prvotní experimenty. V druhé fázi neaktivních experimentů jsou vyrobena zkušební tělesa z neaktivního materiálu identického tomu, který byl použit pro výrobu vnitřních částí reaktorů VVER 440. Rozebrány jsou rovněž parametry regeneračního žíhání a vybráno pět režimů regeneračního žíhání, které jsou následně realizovány na neaktivních vzorcích v žíhací peci. Vyžíhané vzorky jsou následně podrobeny experimentům s cílem určit změny vlastností oproti počátečnímu stavu.

Samotné experimenty je třeba nejdříve provést na zkušebních vzorcích mimo jiné pro ověření reálné proveditelnosti všech operací a odstranění případných kritických míst. Teprve po provedení těchto úvodních experimentů a důkladném odzkoušení všech funkcí zařízení bude možné přistoupit k dalším krokům. Po dokončení této úvodní série experimentů na neozářených vzorcích bude celá žíhací pec rozebrána na jednotlivé komponenty a připravena na přemístění do stíněné horké komory.

Teprve v závěrečné experimentální fázi bude možné přikročit k využívání vzorků vyrobených z ozářených materiálů. V této fázi již bude celý postup dostatečně odzkoušený a ověřený. Experimenty již budou probíhat ve stíněných horkých a polohorkých komorách umístěných v kontrolovaném pásmu. Z toho důvodu je nutná důkladná příprava a nacvičení

všech postupů předem na neaktivních tělesech a mimo náročné podmínky horkých a polohorkých komor. Hlavním důvodem je omezený přístup k experimentálnímu vybavení, které je umístěno ve stíněné komoře – experimenty musí být ovládány na dálku pomocí mechanických manipulátorů a zařízení je možné sledovat jen pomocí průzorů z olovnatého skla či kamer.

Na základě rozsáhlé rešerše možných režimů regeneračního žíhání, která byla uvedena v první kapitole, bylo možné stanovit několik možných postupů regeneračního žíhání materiálu vnitřních částí reaktoru typu VVER 440.

Jako minimální teplota vhodná pro regenerační žíhání oceli 08Ch18N10T byla vybrána teplota 550 °C. Maximální teplotou pak je teplota 900 °C. Doba výdrže při samotném žíhání ozářeného materiálu by měla být alespoň 6 hodin. Pro další experimenty pak bylo vybráno 5 různých teplot, při kterých se bude žíhání realizovat. Vybrané teploty jsou 550, 600, 700, 800 a 900 °C a se stanovenou dobou výdrže 6 hodin.

Z těchto pěti zvolených režimů pak bude vybrán jeden až dva režimy, které budou hlouběji zkoumány a dále rozpracovány. Jako médium pro žíhání byl po úvaze vybrán vzduch.

Žíhání na vzduchu odpovídá asi nejvíce možnostem a podmínkám, které budou panovat při hypotetickém žíhání skutečných ozářených vnitřních částí v prostorách jaderné elektrárny typu VVER 440. Druhou případnou možností by bylo využití nějakého inertního plynu – nejspíše argonu. Rychlost ohřevu vzorků v žíhací peci je stanovena na 10 °C za minutu. Žíhání probíhá za konstantního průtoku vzduchu válcovou komorou v žíhací peci. Rychlost průtoku vzduchu je stanovena na 1,5 až 2 litry vzduchu za minutu.

Po skončení doby výdrže, kdy je v peci udržována konstantní teplota, následuje fáze chladnutí, kdy jsou tělesa ponechána v uzavřené peci. Chladnutí probíhá rovněž na vzduchu (použito stejné médium jako pro ohřev a udržování vzorku na žíhací teplotě). Rychlost ochlazování není pevně stanovena a odpovídá přirozenému chladnutí žíhací pece ochlazované proudícím médiem. Po dosažení teploty 50 °C je možné žíhací pec otevřít a tělesa se dochlazují již při otevřené peci.

Tři žíhací režimy byly vybrány pro žíhání jak nedeformovaných, tak i deformovaných těles. Provedení deformace bude mít za důsledek vytvoření podobného poškození vnitřní struktury těles, jaké odpovídá i radiačnímu poškození. Teploty, při nich budou žíhány i

deformovaná tělesa jsou 550, 700 a 900 °C. Sledovány budou dva módy deformace – o 10 % tloušťky vzorku a o 20 % tloušťky vzorku. Dohromady tedy bylo určeno 6 zkušebních vzorků pro provedení deformačního zpevnění. Celkem bylo určeno, že je třeba vyrobit 12 zkušebních vzorků včetně rezervy. Celkový plán žíhacích experimentů je uvedený v Tab. 7.

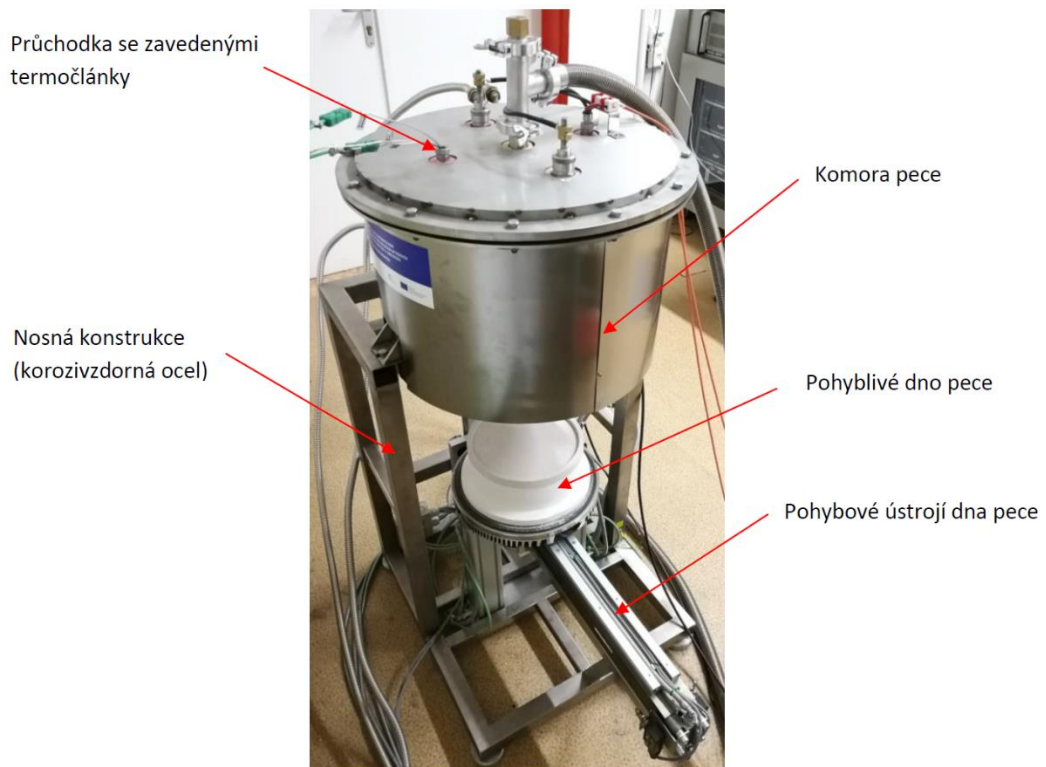
Tab. 7: Přehled žíhacích experimentů; označení zkoušených vzorků ve tvaru 8TA_xy, kde „xy“ značí pořadové číslo vzorku; vzorek s označením 8TA_04 ponechán jako rezervní

Způsob zpracování	nežíháno	550 °C	600 °C	700 °C	800 °C	900 °C
nezpracováno	8TA_10		8TA_08	8TA_11	8TA_09	8TA_12
10 % deformace	8TA_01			8TA_02		8TA_03
20 % deformace	8TA_05			8TA_06		8TA_07

Jako výchozí metoda pro hodnocení stupně obnovení vlastností byla zvolena tvrdost HV5 a k ní vybrána metoda ABIT jako doplňkový způsob analýzy vlastností vzorků. Obě metody budou blíže popsány v navazujících částech práce.

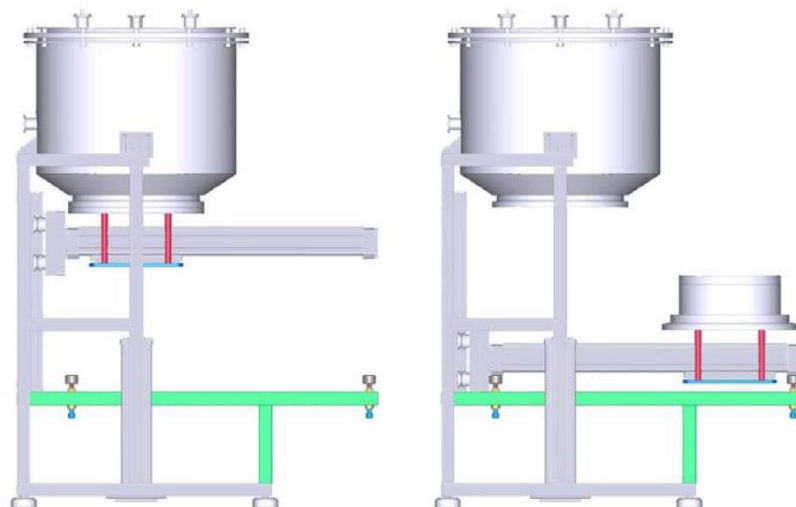
2.2 Žíhací pec

Pro provádění žíhacích experimentů je stěžejním zařízením žíhací pec. Pro možnost provádění žíhání na ozářených materiálech je nezbytné tuto pec umístit do speciální stíněné horké komory, která umožní její bezpečnou obsluhu prostřednictvím mechanických manipulátorů. Speciální žíhací pec byla v rámci náročného procesu návrhu vyvinuta v ÚJV Řež, a. s. Pec obecně slouží k žíhání kovových materiálů v ochranné atmosféře při vysokých teplotách. Vnitřní komora pece, do které se vkládají vzorky má válcový tvar. Po obvodu válcové stěny jsou umístěny topné elementy pro zajištění rovnoměrného ohřevu v celém objemu pece.



Obr. 28: Těleso pece

Vzorky se do pece zakládají jednoduchým způsobem – stačí je položit na vysunuté spodní dno žíhací pece, které se pohybuje prostřednictvím stlačeného vzduchu v horizontálním a vertikálním směru. Po umístění všech vzorků na dno pece je možné dálkově spustit mechanismus zavírání pece a spodní dno celou pec uzavře i se vzorky uvnitř. Pec je možné obsluhovat dálkově, což je klíčové při práci s ozářenými materiály. Vnitřní objem pece je cca 7,5 litru.



Obr. 29: Schéma nakládání vzorků do pece, uzavřená pec (vlevo), plně otevřená pec (vpravo)

Před samotným žháním je nutné provést pročištění pece, které se provádí prostřednictvím vakuové vývěvy, která celý vnitřní objem pece evakuuje, a to i několikrát v závislosti na zadání experimentu. Každé evakuování je následováno proplachem prostoru pece a vzorků s možností využití inertního plynu – typicky argonu.

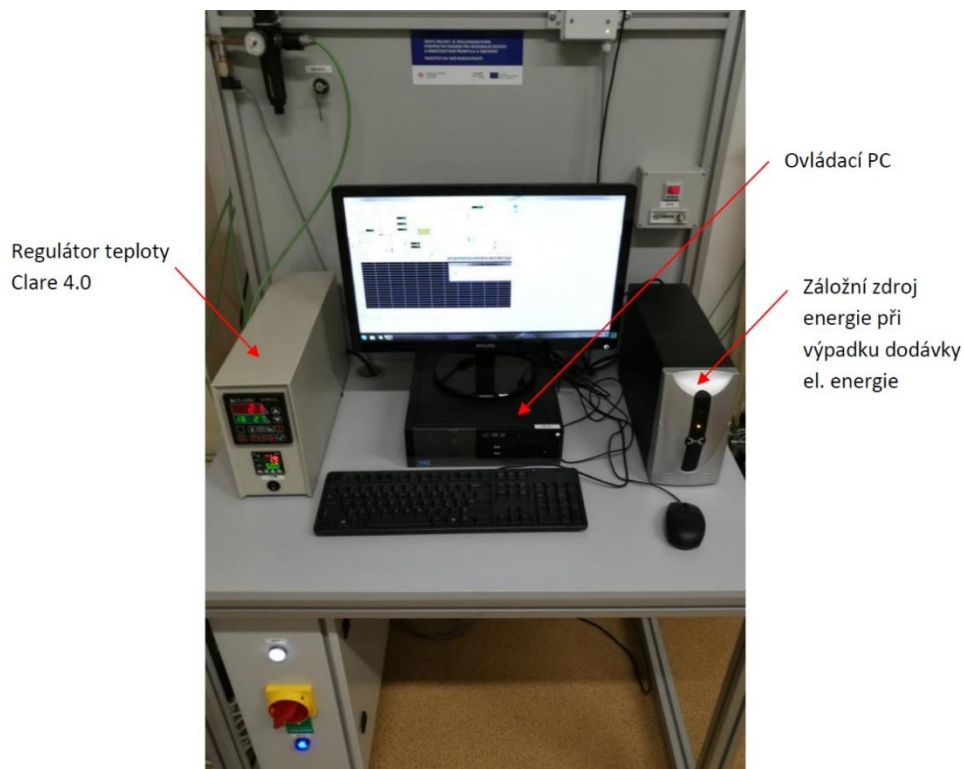


Obr. 30: Otevřená žhací pec (dolní víko), v horní části dobře patrné měděné spirály vodního chlazení.



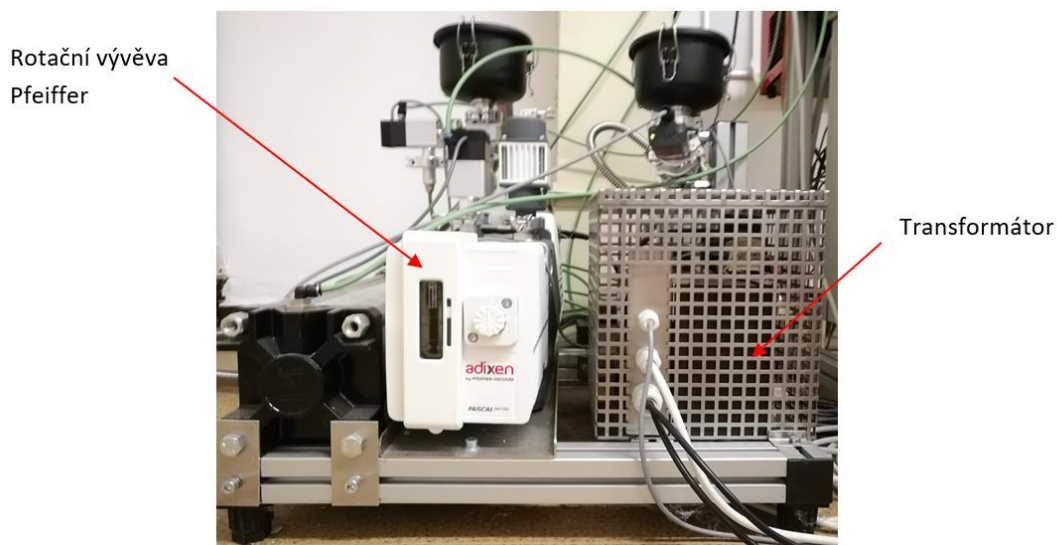
Obr. 31: Pohled do žhací pece, v levé části 3 termočlánky a po obvodu topné elementy. Stěny pece vyrobené z keramického materiálu.

Samotný ohřev je regulován regulátorem *Clare* s nezávislým omezovačem, který hlídá maximální požadovanou teplotu. Pec je rovněž vybavena chladícím okruhem *Telwin*, který je nezávislý na ostatních zařízeních. Jako chladící médium je použito běžné destilované vody. Teplota v peci je kontinuálně snímána prostřednictvím tří termočlánků, ze kterých je ukládán záznam. Dále je zaznamenáván průběh tlaku, který se ukládá po celou dobu měření. Pro regulaci teploty jsou v peci umístěny ještě další dva nezávislé snímače teploty, které slouží zejména pro regulaci ohřevu.



Obr. 32: Ovládací systém pece

Pro záznam dat slouží PC, které je vybaveno záložním napájením prostřednictvím UPS. Rozvaděč s řídicím systémem, PC, regulátor *Clare*, regulátor průtoku plynu a GSM modul pro zasílání zpráv jsou umístěny na ovládacím stole pece. Mezi řídicím systémem a pecí jsou dále napojena další nezbytná zařízení – vakuová vývěva, vzdušník, elektropneumatické ventily, vakuové ventily, filtry, tlaková měrka a transformátor topení. Tyto díly jsou vybaveny nehořlavými elektrickými kabely, hadicemi a ocelovými vlnovci.



Obr. 33: Pneumatický systém pece

Maximální dosažitelná teplota je 1 000 °C při příkonu pece 5 kW. Celá pec váží cca 90 kg a hlavním konstrukčním materiálem je korozivzdorná ocel. Pro zajištění ochranné atmosféry je použito argonu 4,6 z tlakové lahve o tlaku 0,15 – 0,20 MPa. Pro ovládání posuvu dolního víka slouží stlačený vzduch o tlaku 0,6 – 0,7 MPa. Vzduch vhání do tlakového zásobníku kompresor. Při vypnutém kompresoru vystačí zásoba stlačeného vzduchu na cca 2-3 hodiny, poté dojde k samovolnému otevření žíhací pece. Kompresor je tak nutné po celou dobu žíhání mít v pohotovostním režimu. Při poklesu tlaku v zásobníku vzduchu pak dojde k jeho automatickému spuštění a opětovnému nárůstu tlaku v zásobníku.

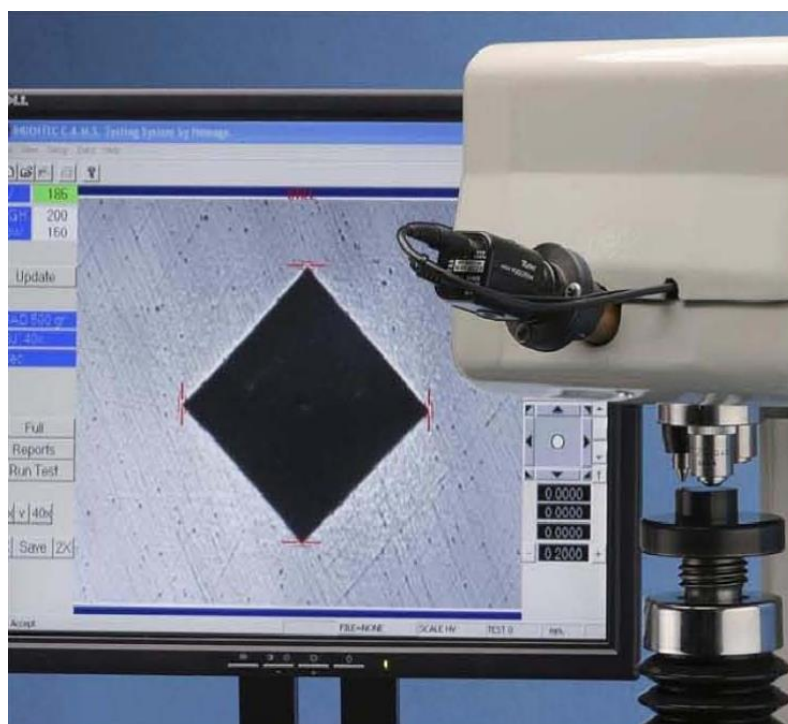
2.3 Tvrdoměr

Jako metoda pro ověření stupně obnovení vlastností kovového materiálu bylo vybráno měření tvrdosti dle Vickerse. Jedná se o jednoduchou a široce rozšířenou zkoušku používanou celosvětově řadu let. Samotné měření tvrdosti bylo prováděno na tvrdoměru ZHV30 od společnosti Zwick/Roell Indentec – Hardness Testing. Tento tvrdoměr je umístěn v olovem stíněné polohorké komoře laboratoře oddělení Mechanické vlastnosti (Obr. 34). Tvrdoměr ZHV30 byl uveden do provozu v roce 2006 a slouží pro zkoušení jak ozářených, tak i neaktivních vzorků. Zkoušky tvrdosti jsou prováděny dle normy ČSN EN ISO 6507-1 „Zkouška tvrdosti dle Vickerse – Část 1: HV 5 až HV 100“. Samotné provádění experimentů a údržby zařízení je předepsáno v interních pracovních postupech oddělení Mechanické vlastnosti. [7, 32]

Měření tvrdosti dle Vickerse patří mezi vnikací metody měření tvrdosti. Do zkoušeného tělesa je vtlačován diamantový jehlan s vrcholovým úhlem 136° předepsanou silou, které je dosaženo správnou volbou závaží. Následně je měřena velikost úhlopříčky vrypu na povrchu zkoušeného tělesa. Pro účely zkoušení vzorků z materiálu 08Ch18N10T byla vybrána zkouška HV5, kdy je použito závaží o hmotnosti 5 kg. Pro pravidelnou kalibraci zařízení se využívají speciální kalibrační destičky o stanovené tvrdosti.



Obr. 34: Čelní pohled na tvrdoměr Indentec ZVH 30 umístěný v polohorké komoře (fotografie pořízena skrze průzor do komory vyrobený z olovnatého skla žluté barvy)



Obr. 35: Měření tvrdosti pomocí tvrdoměru ZVH30, obrázek pochází z prospektu k ZHV30, patrný je zde způsob optického vyhodnocování tvrdosti pomocí měření délek úhlopříček [32]

Zkouška musí být provedena tak, že rozdíl dvou na sebe kolmých měření jednoho vtisku v případě rovných povrchů nesmí přesáhnout 5 %. Zároveň také musí platit, že vzdálenost středu vtisku od okraje vzorku nesmí být menší než 2,5násobek rozměru pro ocel, měď a slitiny mědi a trojnásobek pro lehké kovy, olovo, cín, a jejich slitiny. Měření by rovněž bylo neplatné, pokud by vzdálenost středů vtisků byla menší než trojnásobek rozměru vtisku pro ocel, měď a slitiny mědi a šestinásobek pro lehké kovy, olovo, cín, a jejich slitiny. Zkoušku rovněž limituje to, že tloušťka vzorku musí být minimálně 1,5násobek úhlopříčky a na protilehlé straně nesmí být stopy deformace. S ohledem na tyto požadavky bylo nutné navrhnout podobu zkušebních těles – testovaných vzorků.

2.4 Zařízení pro zkoušky ABIT

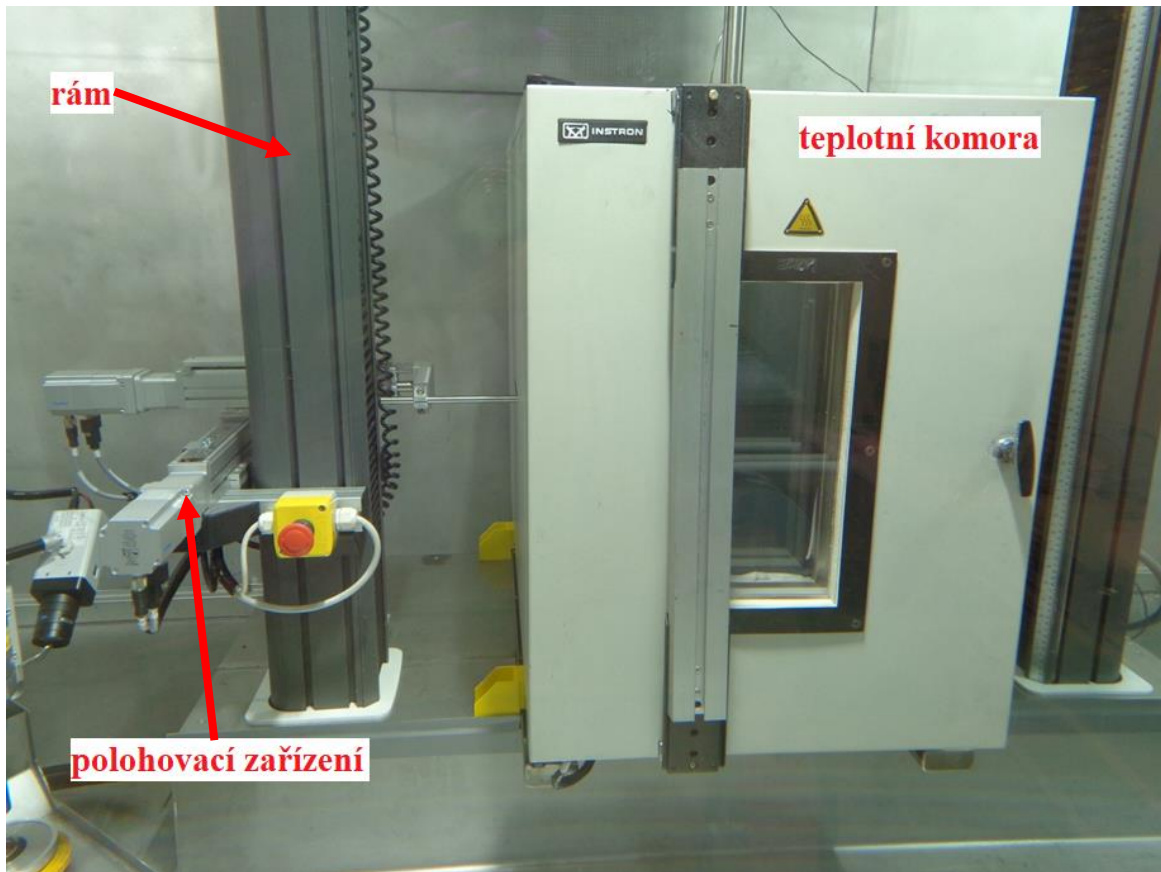
Konvenční zkoušky tvrdosti vycházejí z měření odporu materiálu proti trvalému vniknutí jiného, tvrdšího materiálu. Výsledky zkoušek dle Brinella, Rockwella či právě Vickerse se určují po odlehčení. Vliv pružné deformace je tak zanedbán. Oproti tomu zkouška tzv. instrumentované tvrdosti (ABIT, zkratka z anglického „Automated Ball Indentation Test“) je navržena tak, aby uživatel mohl vyhodnotit vtisky do materiálu s ohledem na zatížení a posun vnikajícího tělesa v průběhu plastické i elastické deformace. Podstatné je u této zkoušky to, že je možné stanovit kromě klasických hodnot tvrdosti (jako u konvenčních způsobů) i další vlastnosti materiálu, jako je vtiskový modul a pružně-plastická tvrdost. K tomu všemu není třeba využívat optické proměřování vtisku. [6]

Zkouška je prováděna na zařízení INSTRON 5967 umístěném v polohorké komoře. Jedná se o elektromechanický trhací stroj, který je běžně využíván pro široké spektrum zkoušek mechanických vlastností. Na podobných strojích se běžně provádějí tahové zkoušky, zkoušky lomové houževnatosti, ale i méně obvyklé zkoušky např. „*small punch test*“.

Princip elektromechanického trhacího stroje je velmi jednoduchý. Stroj pohání elektromotor, jehož otáčivý pohyb je převáděn na posuv závěsu nahoru nebo dolů. Tento píst pak působí na založený vzorek požadovaným způsobem – tahem či tlakem a případně i krutem.

Kapacita tohoto konkrétního univerzálního trhacího stroje je 30 kN a pro jeho ovládání je využíván software Bluehill. V této konkrétní konfiguraci je stroj vybaven siloměrnou hlavou 10 kN (případně 2 kN pro experimenty, kde jsou potřeba malé síly). Kalibrace siloměrných hlav probíhá v předepsaných ročních intervalech. Celé zařízení

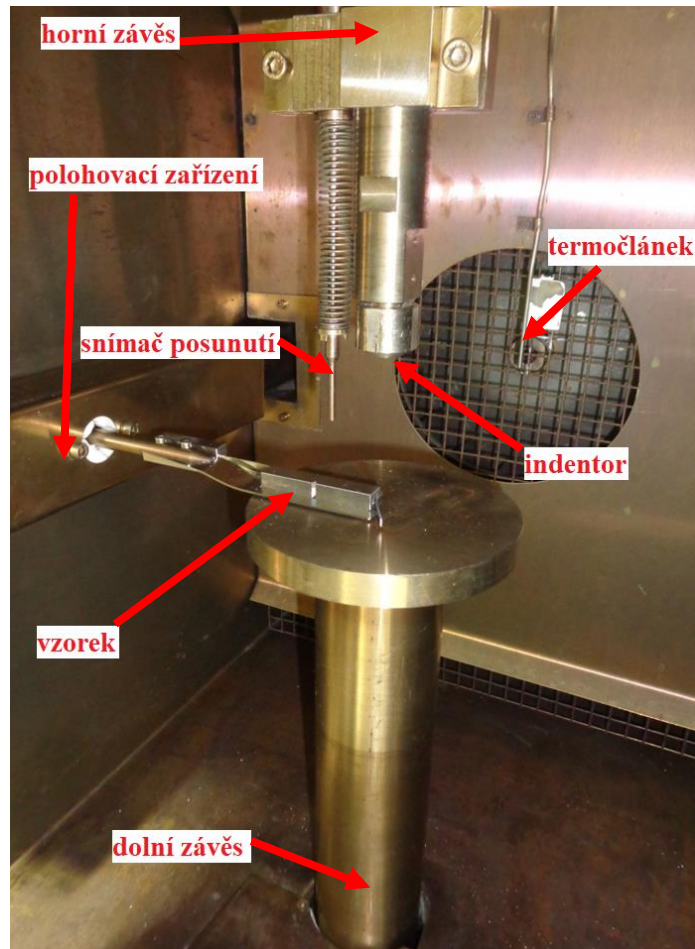
je vybaveno teplotní komorou INSTRON – SFL EC1657, která umožňuje provádění zkoušek za teplot od -196 °C až do 350 °C. Záporných teplot je dosaženo pomocí chlazení, které využívá kapalný dusík z připojené Dewarovy nádoby.



Obr. 36: Zkušební aparatura pro provádění zkoušek ABIT

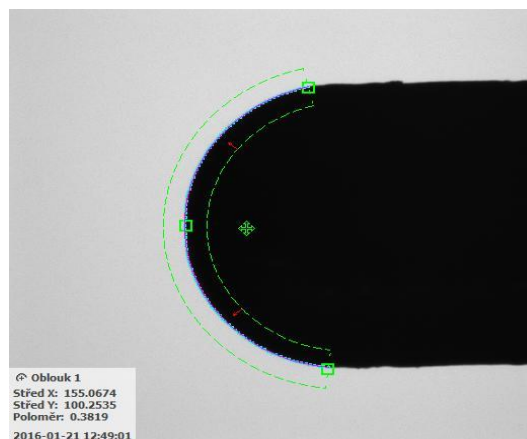
Pohyb vzorku je realizován ve vodorovné rovině pomocí polohovacího zařízení ovládaného dálkovým ovládním řízeným operátorem polohovací komory. Polohovací zařízení umožňuje variabilní nastavení parametrů četnosti vpichů do vzorku, jak manuálně na ovládacím pultu, tak i za pomoci čítače kroků, tak i softwarově po připojení PC. Celý souřadnicový systém je nainstalován na nosné konstrukci zavěšené na zkušebním zařízení INSTRON 5967 (viz Obr. 36).

Samotný vzorek je zasazen do speciálního přípravku s planžetou, který zajišťuje jeho upevnění ve stroji. Polohovací zařízení garantuje opakovatelnou přesnost najetí do požadované polohy 0,02 mm. Pohled na aparaturu umístěnou v teplotní komoře je i s popisovými vyobrazen na Obr. 37.



Obr. 37: Pohled do teplotní komory

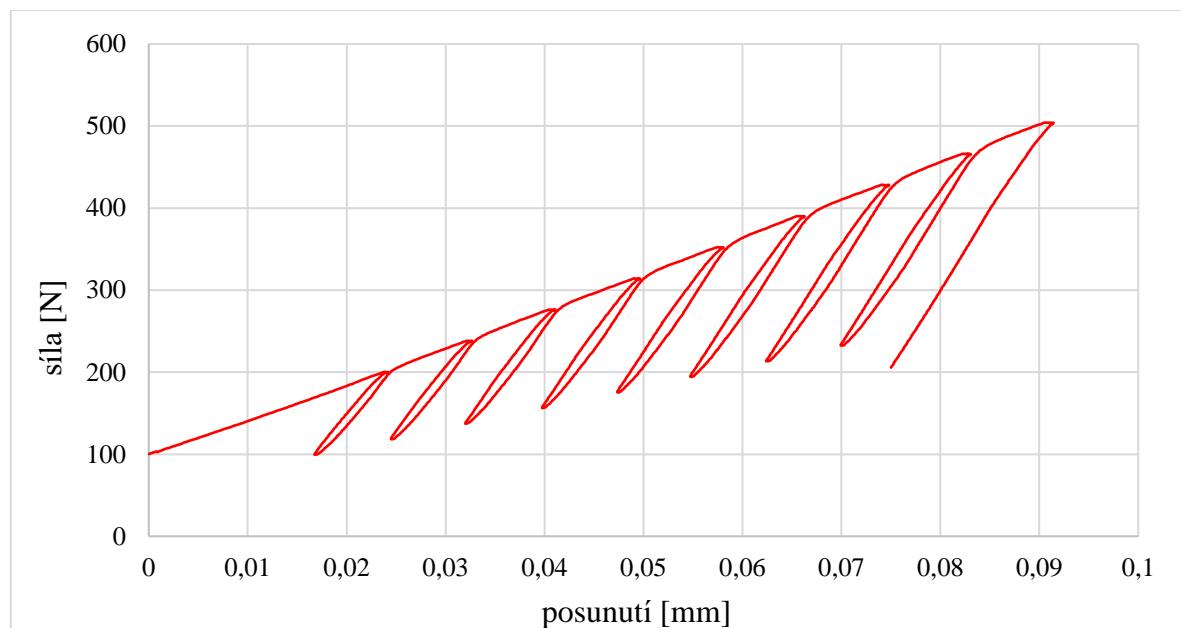
Pro provádění vpichů slouží indentor, který může být v několika provedeních s různými průměry (2,500; 1,575; 0,762 a 0,508 mm). Pro přesnější představu o tvaru indentoru je na následujícím Obr. 38 uvedený boční pohled na indentor, obrázek pochází z měření poloměru indentoru na zařízení Vertex, které je nutné pro správné provádění zkoušek. Průběžná kvalita zkoušek je zajištěna periodickou kontrolou indentoru.



Obr. 38: Měření reálné hodnoty průměru indentoru na zařízení Vertex, ÚJV Řež, a. s.

Předpokladem pro provedení zkoušky je také přesné změření rozměrů zkušebního tělesa a jeho rovný povrch, v některých případech je nutná dodatečná úprava povrchu vzorku před jeho odzkoušením. Samotný snímač posunutí je každoročně kalibrován, pro kalibraci snímače pro zkoušku instrumentované tvrdosti se využívá mikrometrický šroub s přesností 0,001 mm.

Typický záznam zkoušky instrumentované tvrdosti je uveden na následujícím Obr. 39. Pro každý z vpichů vzniká obdobný graf.



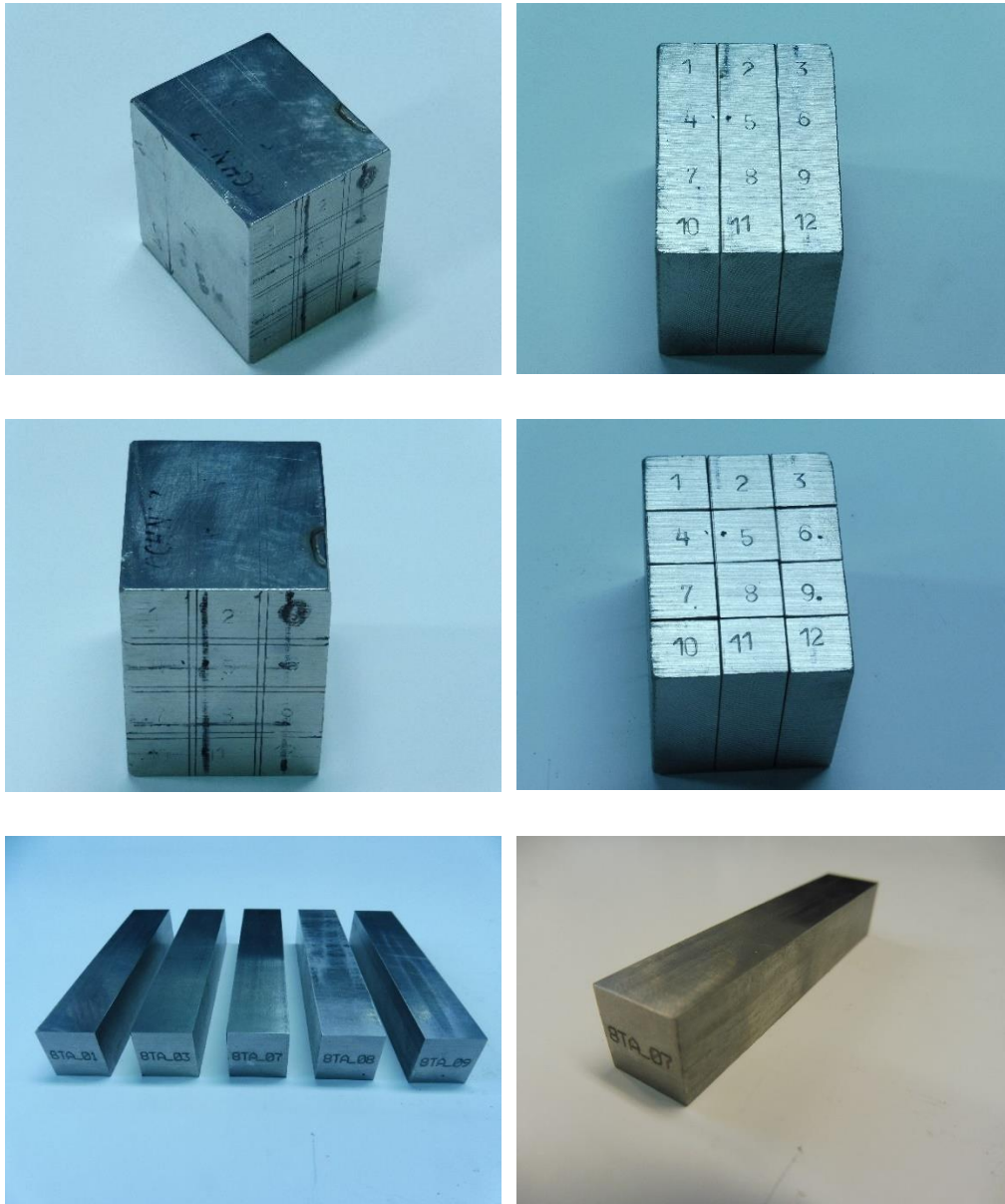
Obr. 39: Typický grafický výstup ze zkoušky instrumentované tvrdosti – jeden vpich; materiál 08Ch18N10T, těleso 8TA_01, teplota zkoušky +24 °C; průměr indentoru 0,757 mm;

Během zatížení je provedeno osm částečných odtížení indentoru. Postup použitého vyhodnocení výsledků zkoušek je popsán v Haggagově patentu a článku [11, 12], resp. v dokumentu [2]. Pro stanovení tahových vlastností (smluvní meze kluzu a meze pevnosti) byly použity kalibrační vztahy získané v souladu s postupem definovaným v rámci [20]. Uvedená metoda je založena na modifikaci původního Haggagova postupu [12, 21].

2.5 Příprava vzorků

Vzorky pro první fázi experimentů byly vyrobeny z bloku neozářeného materiálu 08Ch18N10T. Blok materiálu o rozměrech 64x69x54 mm byl nejprve ofrézován tak, aby byly srovnány povrchové nerovnosti a dosaženo požadované jakosti povrchu pro další zpracování. Blok byl poté ještě orýsován a následně bylo vyraženo číselné označení jednotlivých vzorků, dle plánu experimentů.

Samotný rozřez bloku byl realizován kotoučovou pilou s prořezem cca 2 mm. Po úpravě povrchu jednotlivých těles broušením byla tělesa přeznačena. Takto bylo vyrobeno celkem 12 zkušebních těles o rozměrech 12x12x60 mm. Každé těleso bylo označeno unikátním označením pro zabránění záměny vzorku. Drsnost povrchu těles byla upravena na Ra 1,6. Jednotlivé kroky výroby byly dokumentovány pomocí fotografií.



Obr. 40: Fotodokumentace výroby zkušebních těles

Jak již bylo popsáno v podkapitole o plánování experimentu, část těles byla deformována na vysokokapacitním hydraulickém lisu tak, aby se o 10 resp. 20 % snížila jejich tloušťka. Tato deformace byla provedena skupinou tváření na Ústavu strojírenské technologie Fakulty strojní Českého vysokého učení technického v Praze.

Takto deformovaná tělesa by pak měla vykazovat znaky deformačního zpevnění projevující se jako nárůst tvrdosti oproti výchozímu stavu. Deformační zpevnění lisovaných vzorků tak v této fázi výzkumu nahrazovalo radiační poškození. Tělesa z materiálu, který byl skutečně vystaven provozním podmínkám jaderného reaktoru VVER 440, budou zkoušena až v následujících letech řešení projektu.

U zkušebních těles podrobených deformaci bylo třeba ještě broušením vyrovnat jejich povrch před provedením samotného žíhání. U všech těles po žíhacím experimentu došlo k leštění povrchu na brusném papíře P1200, aby bylo dosaženo optimálního stavu povrchu pro zkoušení tvrdosti.

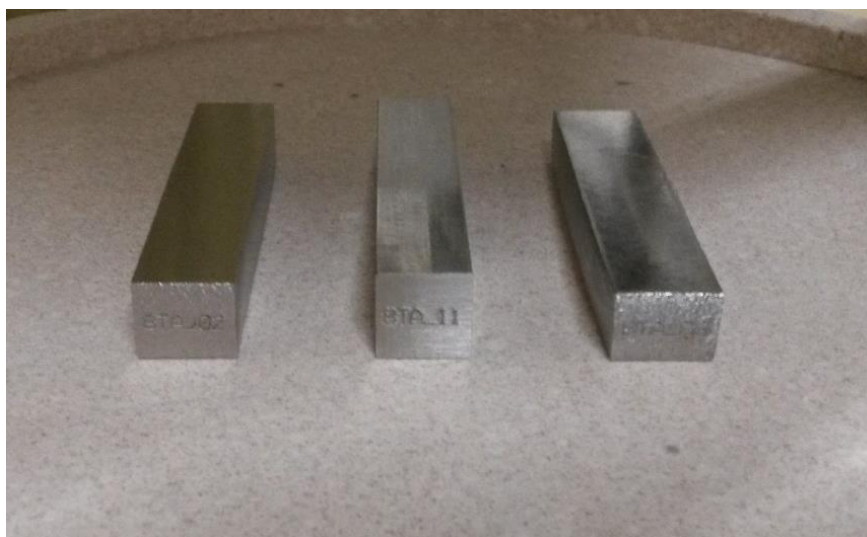
3 Experimenty a výsledky

3.1 Žihání zkušebních těles

Samotné žihání bylo realizováno ve výše popsané žihací peci umístěné v samostatné místnosti s možností umístění tlakové lahve. Pro účely experimentů byla všechna zařízení schválena pro trvalý provoz (a bylo tak možné je provozovat i přes noc).

Vždy před provedením experimentu byla zkušební tělesa určená k žihání otřena lihem a buničitou vatou z důvodu eliminace vlivu otisků prstů, nečistot, mastnoty apod. Všechny následné manipulace byly prováděny v latexových rukavicích a pomocí pinzety.

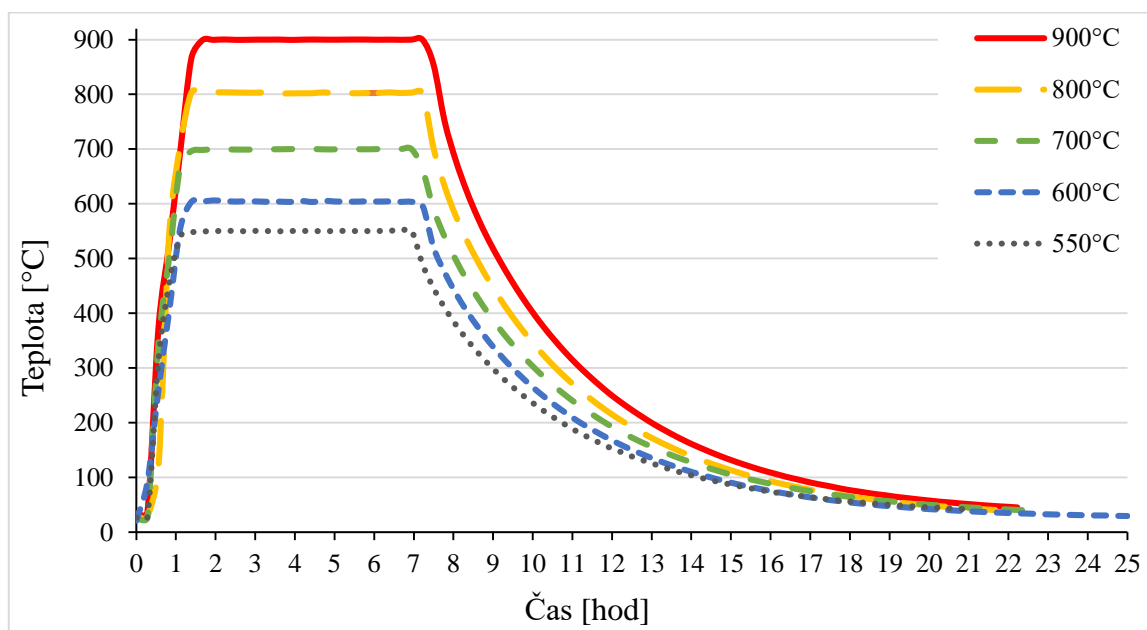
Očištěné těleso bylo umístěno na dno pece do ležaté polohy uprostřed. V případě žihání více těles současně, byla tělesa umístěna do středu dna pece a mezi nimi ponechán odstup alespoň na šířku jednoho tělesa, viz Obr. 41 níže.



Obr. 41: Pohled na tři zkušební tělesa na dně pece; zleva deformace 10 %, nedeformované, deformace 20 %; před žiháním na 700 °C

Průběh experimentů byl dokladován do laboratorního deníku. Po založení jednoho či více zkušebních vzorků do pece následovalo uzavření pece pomocí pneumatického systému a evakuace prostoru žihací komory. Takto byl prostor pece jednou až dvakrát vypláchnut a opětovně naplněn žihacím médiem, kterým byl vzduch. Po nastavení regulátoru na požadovanou žihací teplotu a navolení ostatních parametrů žihání jako rychlost ohřevu, limitní hodnoty pro vypnutí pece atd. bylo možné zahájit ohřev. Rychlost ohřevu byla ve všech případech shodná – 10 °C za minutu. Stejně tak i doba výdrže činila pokaždé šest hodin.

Průběhy teplot při žíhacích experimentech jsou vyneseny do grafu na Obr. 42, kde je možné porovnat jednotlivé žíhací režimy mezi sebou. Jak je patrné, každý z experimentů trval od založení vzorku do jeho dochlazení na vzduchu cca 20-25 hodin.



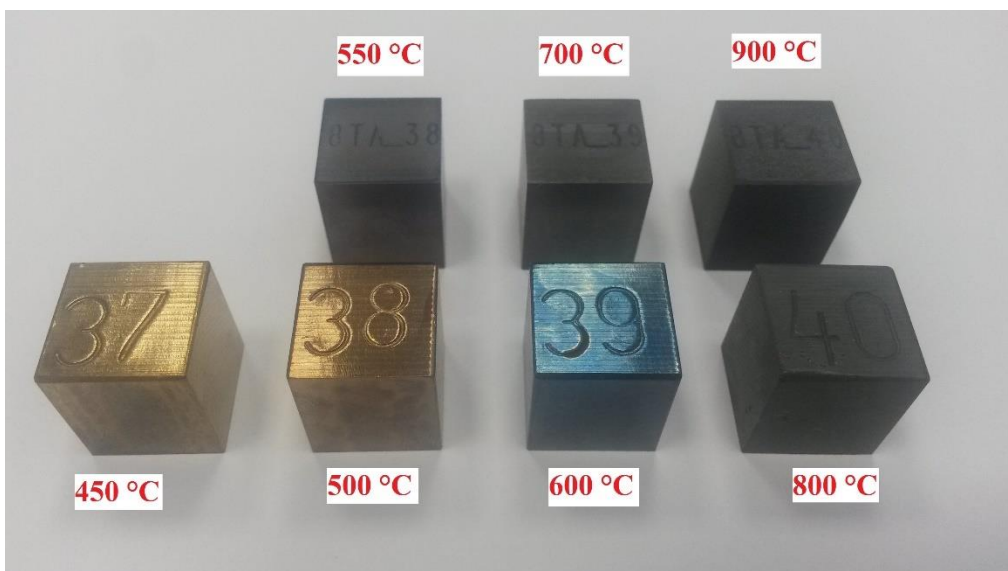
Obr. 42: Přehled žíhacích režimů

Jednotlivé kroky žíhacích experimentů byly také dokumentovány fotografiemi. Na některých jsou patrné změny povrchu těles i na první pohled. Např. u tělesa 8TA_08 žíhaného na 600 °C bylo zřejmé zabarvení domodra.

To, jak se mění barvy se žíhací teplotou je možné pozorovat na následujících dvou obrázcích Obr. 43 a Obr. 44, kde jsou vyfotografována zkušební tělesa z jednoho z dalších žíhacích experimentů. Fotografovaná tělesa pocházejí ze stejného materiálu – ovšem vyrobeného v rámci jiné tavby.



Obr. 43: Zkušební tělesa 15x15x17 mm pro jeden z podobných experimentů; nevyžiháný stav; materiál 08Ch18N10T, odlišná tavba; zdroj = kolektor PG



Obr. 44: Zkušební tělesa 15x15x17 mm pro jeden z podobných žihacích experimentů; vyžiháný stav; žihací teplota dle popisků u jednotlivých těles; materiál 08Ch18N10T, odlišná tavba; zdroj = kolektor PG

3.2 Měření tvrdosti

Měření tvrdosti již zmíněných neozářených zkušebních těles probíhalo jak před žiháním, tak i po provedení žihání pro určení změny mechanických vlastností vlivem různých žihacích teplot. Pro měření byl použit dříve popsany tvrdoměr Zwick/Roell Indentec ZHV30 určený pro měření tvrdosti dle Vickerse. Použitá zátěžná síla byla 49,03 N. Tvrdost HV5 byla zvolena z toho důvodu, že při takto nízkém zatížení vznikají jen malé vtisky, kterých je možné umístit na plochu větší množství a nedochází k ovlivnění materiálu pro případnou další výrobu těles z tělesa původního.

Předpokladem je také to, že pro zkoušení ozářených vzorků budou vyrobena výhradně malá tělesa například typu mCT, aby bylo možné maximálně využít omezené množství ozářeného materiálu. U takto malých těles by pak velké vtisky byly rovněž problematické. Větší počet vtisků na jednom tělese vede k většímu počtu výsledků. S větší počtem výsledků na jedno těleso zároveň klesá jejich směrodatná odchylka, a tedy roste přesnost.

Pro zajištění optimálního stavu povrchu zkoušených těles bylo před měřením tvrdosti provedeno jejich leštění na brusném papíře P1200. U některých těles bylo třeba před leštěním provést i zbroušení, aby bylo dosaženo rovného povrchu. Broušení bylo třeba zejména u vzorků, které byly podrobeny deformaci – redukci tloušťky o 10 či 20 % a rovněž také u vzorků žíhaných při vyšších teplotách, kde došlo ke vzniku okují (zejména 800 a 900 °C).

V případě zkoušky tvrdosti bylo očekáváno, že žíhání nebude mít příliš velký vliv na těleso, které nebylo předem nijak deformováno. Oproti tomu u těles deformovaných byl předpoklad, že počáteční tvrdost bude vyšší než u tělesa nedeformovaného. Tato počáteční tvrdost by poté měla se stoupající žíhací teplotou klesat až na hodnoty tvrdosti typické pro deformaci nepoškozené vzorky. Výsledky jsou uvedené v první příloze této práce.

Na každém vzorku bylo provedeno osm vrypů a z nich určena průměrná hodnota tvrdosti, se kterou bylo dále pracováno. Směrodatné odchylky naměřených dat byly nevýznamné – dosahovaly maximálně několika jednotek (maximum bylo 4,94 v případě tělesa 8TA_05). Výsledky jsou uvedené v první příloze této práce.

3.3 Zkouška instrumentované tvrdosti

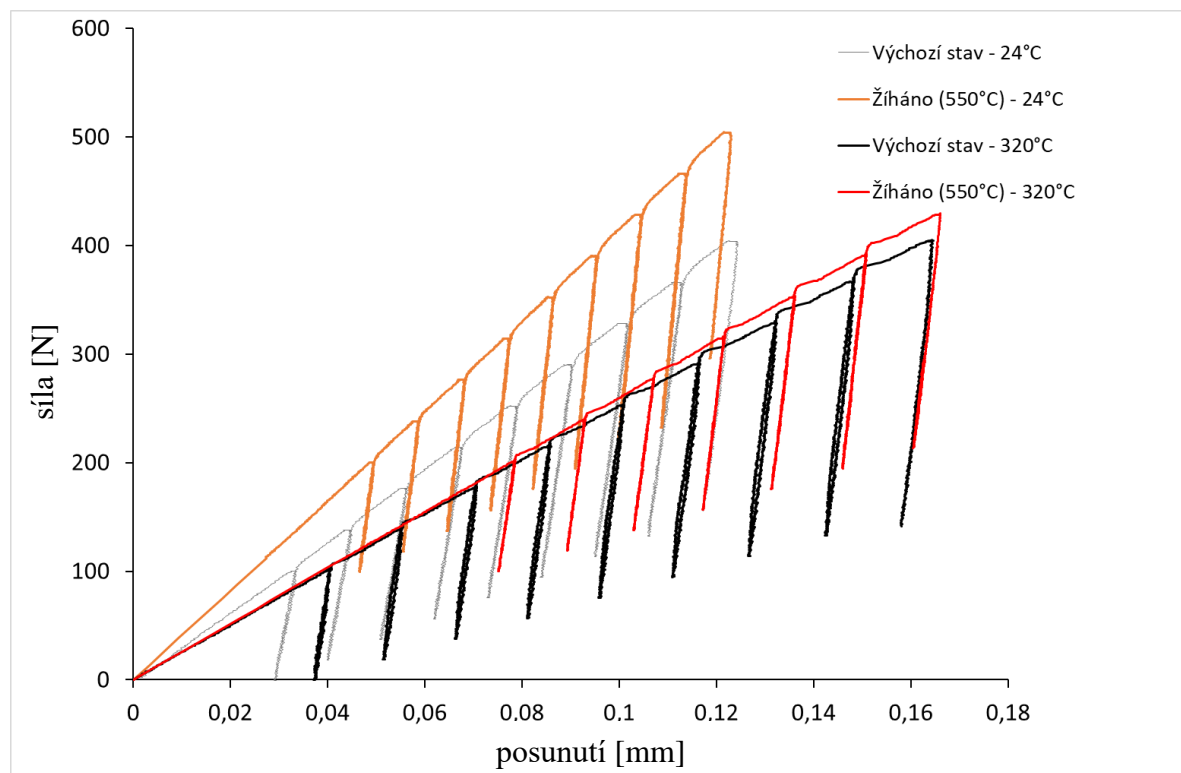
Jako doplňková metoda byla použita zkouška instrumentované tvrdosti označovaná zkratkou ABIT (ABIT = zkratka z anglického „Automated Ball Indentation Test“). Při zkoušce byl použit indentor o průměru 0,762 mm. Zkoušky byly prováděny při teplotách 24 °C a 320 °C. Teplota 320 °C byla zvolena jako referenční teplota, jelikož zhruba této teplotě jsou vystaveny některé díly vnitřních částí reaktoru při provozu. Veškeré experimenty probíhaly na popsaném zařízení INSTRON 5967, které je umístěné v polohorké komoře laboratoře. [6]

Na každém tělese bylo realizováno celkem šest vpichů – tři za pokojové teploty a tři za teploty +320 °C. Z každých těchto třech vpichů byla určena průměrná hodnota $R_{p0,2}$ a R_m . Před zkoušením byl povrch tělesa vyleštěn na brusném papíře P1200 pro dosažení

požadované jakosti povrchu. U některých těles však také bylo nutno povrch nejprve vyrovnat broušením. To se týkalo stejně jako v případě měření tvrdosti těles deformačně zpevněných. Naměřené výsledky jsou uvedeny v druhé příloze této práce.

V případě vzorků, které nebyly deformovány, bylo očekáváno, že se při obou teplotách zkoušky nebude jejich mez kluzu a pevnosti příliš měnit. Oproti tomu u vzorků deformovaných bylo předpokládáno, že se deformace projeví jako nárůst meze kluzu i pevnosti oproti nepoškozenému tělesu. U žíhaných těles poté bylo očekáváno, že se hodnoty meze kluzu a pevnosti budou navracet zpět k hodnotám typickým pro nedeformovaný materiál. I zde v případě zkoušky instrumentované tvrdosti byla tato očekávání naplněna. Opět jen v případě teploty 700 °C docházelo ve všech případech k nárůstu meze kluzu a meze pevnosti.

Na následujícím Obr. 45 je pro ilustraci uveden záznamový diagram ze zkoušky ABIT, pro zkušební těleso ve výchozím – nedeformovaném stavu, kdy zkouška ABIT probíhala při pokojové teplotě i při provozní teplotě na vzorcích před i po žíhání.



Obr. 45: Srovnání čtyř zatěžovacích křivek zkoušky ABIT tělesa 8TA_05 před a po vyžhání na 550 °C; zkouška prováděna jak při 24 °C tak i při provozní teplotě vnitřních částí – při 320 °C

Závěr

Úvodním cílem této diplomové práce bylo zmapovat problematiku vnitřních částí reaktoru a jejich žíhání. V počáteční fázi výzkumu tak byla provedena rozsáhlá rešerše problematiky regeneračního žíhání a souvisejících témat. Získány byly poznatky o jaderném reaktoru VVER 440 V-213 a podmínkách, kterým jsou vystaveny jeho vnitřní části. Samotným vnitřním částem reaktoru byla věnována značná pozornost, zejména pak jejich funkční skladbě, konstrukci a dalším provozním aspektům i s ohledem na nejvíce ohrožené komponenty VČR. V samostatné podkapitole „1.4 Počáteční vlastnosti“ byly probrány vlastnosti materiálu vnitřních částí. Důkladně byly rovněž popsány mechanismy nejen radiačního poškození, které probíhají v materiálu vnitřních částí při pobytu v reaktoru. Zejména jde o mechanismy vzniku bodových poruch, precipitátů, segregace na hranicích zrn a další. Úvodní část práce uzavírá problematika regeneračního žíhání a studie možných postupů, jak pomocí mechanických zkoušek vyhodnotit jeho úspěšnost.

Důkladná rešeršní fáze pak posloužila jako základ pro další praktické kroky. Zvoleno bylo pět režimů regeneračního žíhání materiálu vnitřních částí o teplotách 550, 600, 700, 800 a 900 °C s výdrží na dané teplotě šest hodin a rychlostí ohřevu 10 °C za minutu. Pro žíhací experimenty byla využívána speciální žíhací pec s pneumatickým ovládním zakládání vzorků a regulátorem teploty Clare. Veškeré experimentální práce byly dopředu naplánovány zejména s ohledem na dostupné vybavení laboratoře a praktické zkušenosti s podobnými zkouškami. Pro úvodní fázi experimentů bylo vyrobeno 12 zkušebních těles o rozměrech 12x12x60 mm, z nichž tři byly vybrány a jejich tloušťka byla hydraulickým lisem snížena o 10 % a u dalších tří těles o 20 %. Redukce tloušťky vzorků posloužila jako způsob pro vytvoření dalších stavů materiálu, na kterých bylo možné hodnotit odezvu na žíhací podmínky.

Vyžíhaná tělesa byla následně podrobena mechanickým zkouškám. Zvoleny byly dvě metody. První metodou bylo měření tvrdosti HV5 (dle Vickerse). Tato klasická metoda byla doplněna metodou instrumentované tvrdosti ABIT, která patří mezi relativně nové inovativní metody mechanického zkoušení kovových materiálů. U nedeformovaných vzorků bylo očekáváno, že počáteční tvrdost materiálu bude s rostoucí žíhací teplotou přibližně konstantní či že bude jen mírně klesat. Oproti tomu u vzorků deformovaných bylo předpokládáno, že se deformace projeví jako nárůst počáteční tvrdosti, která pak s rostoucí teplotou žíhání bude klesat zpět k původním hodnotám typickým pro nepoškozený materiál. Obdobná očekávání panovala i ohledně zkoušky instrumentované tvrdosti, kde byl u

žíhaných deformovaných vzorků předpokládán návrat hodnoty meze kluzu i pevnosti s rostoucí teplotou žíhání zpět k počátečnímu stavu nedeformovaného materiálu.

Tato očekávání byla naplněna, jen v případě teploty 700 °C nedošlo ve všech případech ke snížení tvrdosti, resp. meze kluzu a meze pevnosti. Pravděpodobně se jedná o efekt také nazývaný jako sekundární tvrdost. Tato tvrdost může být dokonce vyšší než počáteční tvrdost (tzv. prvotní – primární tvrdost). Toto je pravděpodobně způsobeno precipitací karbidů legur v oceli (zřejmě Cr) a také rozpadem austenitu. U vyšších žíhacích teplot byl navíc pozorován vznik okují – oxidických vrstev, které vznikají za zvýšené teploty působením atmosférického kyslíku. Není třeba zvláště dodávat, že v případě žíhání vnitřních částí by tyto dopady byly nežádoucí.

Oblast žíhání okolo teploty 700 °C tak bude muset být dále prověřena, aby byl určen interval teplot, který nebude pro regenerační žíhání materiálů VČR vhodný. Vhodná teplota žíhání vnitřních částí pravděpodobně bude nižší než zmíněných 700 °C. V tomto intervalu teplot by mělo dojít k obnově původních vlastností a zároveň zde nedochází ke vzniku okují. Důležité bude rozklíčovat, při jaké teplotě blíží se 700 °C ještě nedochází ke vzniku zmíněné sekundární tvrdosti. Jako kompenzace relativně nízké teploty žíhání může sloužit prodloužení doby výdrže.

Navazující experimenty využívající i nově získané znalosti popsané v této diplomové práci by měly pro žíhání využívat i teploty nižší, než současných 550°C. Do dalšího experimentu bude vhodné zařadit žíhání při 450 a 500 °C. Tyto navazující experimenty by měly potvrdit závěry této diplomové práce a také určit parametry optimálního žíhacího režimu, při kterém dochází ke změně mechanických vlastností tak, že se blíží těm počátečním. Zároveň však nesmí docházet ke vzniku okují, popřípadě dalších nežádoucích efektů. Očekáváno tedy je, že optimální žíhací režim bude využívat žíhací teplotu nižší, než je 700 °C tak, aby zároveň bylo dosaženo maximální obnovy počátečních vlastností a také nedocházelo ke vzniku okují na povrchu vzorků.

Pro bližší pochopení změn v materiálu s ohledem na teplotu žíhání bude nutné provést mikrostrukturní analýzu, která může více napovědět i o chování titanu v souvislosti se sekundární tvrdostí. Titan zřejmě za určitých podmínek ztrácí svoji stabilizační funkci, pro kterou je do materiálu vnitřních částí přidáván. Tyto podmínky, resp. interval teplot, při kterých k tomuto jevu dochází, bude třeba určit. V dalších fázích řešení budou zařazeny i

zkoušky statické lomové houževnatosti na neozářených vzorcích před a po žíhání. Zvolený optimální žíhací režim poté bude aplikován na ozářený materiál.

Úspěšné dokončení této úvodní části čtyřletého výzkumného projektu podpořeného TA ČR, které se věnovala tato diplomová práce je důležitým milníkem v jeho řešení. V rámci této diplomové práce bylo prokázáno, že provedení regeneračního žíhání má vliv na mechanické vlastnosti poškozeného žíhaného materiálu a může dokonce přispět k obnově jeho počátečních vlastností. Aby však bylo dosaženo hlavního cíle celého výzkumu – vytvoření certifikovaného postupu žíhání vnitřních částí reaktoru VVER 440, bude třeba provést další experimenty, jelikož teprve ty určí nejvhodnější režim regeneračního žíhání.

Regenerační žíhání vnitřních částí umožní podstatně snížit množství radioaktivního odpadu, který by vznikl prostou náhradou těchto vnitřních částí novými, v případě, že by tato situace nastala.

Použitá literatura

- [1] Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety: PWR vessels internals [online]. 2007 update. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2007 [cit. 2018-05-25]. ISBN 978-920-1051-073, Dostupné z:<www.pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1556_web.pdf>.
- [2] ASTM draft, Tests Methods for Automated Ball Indentation (ABI) Testing of Metallic Samples and Structures to Determine Tensile Properties and Stress – Strain Curves, ISO/TC 164/SC 3 N1109, 2001-02-25.
- [3] BRUMOVSKY, M., AHLSTRAND R., BRYNDA J., DEBARBERIS L., KOHOPAA J. a SERVER W.: Annealing and re-embrittlement of reactor pressure vessel materials: State of the art report ATHENA WP-4 AMES Report N. 19. Petten: Institute for Energy, 2008.
- [4] Comprehensive Nuclear Materials. Elsevier, 2012. ISBN 978-0-08-056027-4.
- [5] ČSN 41 7247. Ocel 17 247 Cr-Ni-Ti. 1. 1976.
- [6] ČSN EN ISO 14577-1 (420378). Kovové materiály – Instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů – Část 1: Zkušební metoda. 2016.
- [7] ČSN EN ISO 6507-1 (420374). Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část 1: Zkušební metoda. 2018.
- [8] ERNESTOVA, M., HOJNA, A., KEILOVA, E., KOCIK, J., a MICHALICKA, J.: Results on irradiated austenitic stainless steel bolts of reactor core internals. Fontevraud 7 - Contribution of materials investigations to improve the safety and performance of LWRs, France, 2011.
- [9] FUKUYA, K., NAKANO M., FUJII K., TORIMARU T. a KITSUNAI Y.: Separation of Microstructural and Microchemical Effects in Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking using Post-irradiation Annealing. Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY. 2004, 41(12), 1218-1227.
- [10] GUROVICH, B.A., KULESHOVA, E.A., FROLOV, A.S., MALTSEV, D.A., PRIKHODKO, K.E., FEDOTOVA, S.V., MARGOLIN, B.Z. a SOROKIN, A.A.: Investigation of high temperature annealing effectiveness for recovery of radiation-induced structural changes and properties of 18Cr–10Ni–Ti austenitic stainless steels. Journal of Nuclear Materials [online]. 2015, 465, 565-581 [cit. 2018-05-27]. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2015.06.045. ISSN 00223115. Dostupné z: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022311515300714>>.
- [11] HAGGAG, F. M.: Field indentation microprobe for structural integrity evaluation, U.S. patent no. 4 852 397 (1989).
- [12] HAGGAG F.M., WANG J.A., SOKOLOV M.A. a MURTY K.L.: Use of portable/in situ stress-strain microprobe system to measure stress-strain behavior and damage in metallic materials and structures, in Nontraditional methods of sensing stress, strain and damage in materials and structures, ASTM STP 1318, Lucas and Stubbs eds. ASTM, Philadelphia, 1997.
- [13] HEŘMANSKÝ, B.: Jaderná zařízení. Praha: ČVUT, 1990.

- [14] JIAO, Z., HESTERBERG, J. a WAS, G.S.: Effect of post-irradiation annealing on the irradiated microstructure of neutron-irradiated 304L stainless steel [online]. *Journal of Nuclear Materials*. 2018, 2018(500), 220-234 [cit. 2018-05-25]. ISSN 0022-3115. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002231151731>>.
- [15] KOUTSKÝ, J. – KOČÍK, J.: *Radiation Damage of Structural Materials*. 1. vyd., Praha, Academia, 1994, 362 s. ISBN 80-200-0462-9 (ACADEMIA), ISBN 0-444-98708-8 (ELSEVIER).
- [16] MAGER, T. R.: Thermal annealing of an embrittled reactor vessel: feasibility and methodology. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 1990, 124(1-2), 43-51 [cit. 2018-05-27]. DOI: 10.1016/0029-5493(90)90351-W. ISSN 00295493. Dostupné z: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/002954939090351W>>.
- [17] MAREŠOVÁ, B.: *Aspekty degradace austenitických nerezových ocelí ozářených neutrony*, bakalářská práce, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Katedra materiálů. 2014.
- [18] *Materials research for fusion* [online]. *Nature Physics*. 2016, 12(12), 424–434 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <<https://www.nature.com/articles/nphys3735>>.
- [19] MILLER, M.K., CHERNOBAEVA, A.A., SHTROMBAKH, Y.I., RUSSELL, K.F., NANSTAD, R.K., ERAK, D.Y. a ZABUSOV, O.O.: Evolution of the nanostructure of VVER-1000 RPV materials under neutron irradiation and post irradiation annealing [online]. *Journal of Nuclear Materials*. 2009, 385(3), 615-622 [cit. 2018-05-27]. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2009.01.299. ISSN 00223115. Dostupné z: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022311509003225>>.
- [20] NOVÁK, J.: Ball indentation testing as a method for nondestructive evaluation of mechanical properties of ferritic steels, NRI Řež, DITE 301/198 (2002).
- [21] NOVÁK, J.: GRETE project indentation testing. Results of measurement and their analysis (intermediate report), NRI Řež, DITE 301/192 (2002).
- [22] PELLI, R. a TÖRRÖNEN K.: *STATE-OF-THE-ART REVIEW ON THERMAL ANNEALING*. Espoo: European Network on Ageing Materials Evaluation and Studies, 1995.
- [23] *Primární část JE VVER 440 s reaktorem V - 213: Základní zařízení primárního okruhu - textová část*. 1. Brno, 2007.
- [24] *Primární část JE VVER 440: Obrázková část*. 1. Brno, 2011.
- [25] PTÁČEK, L.: *Nauka o materiálu I.*, 2.vyd., Brno, Akademické nakladatelství CERM, 2003, 516 s., ISBN 80-7204-283-1.
- [26] PTÁČEK, L.: *Nauka o materiálu II.*, 2. vyd., Brno, Akademické nakladatelství CERM, 2002, 392 s., ISBN 80-7204-248-3.
- [27] RENTERGHEM, W., MAZOUZI A. A. a VAN DYCK S.: Influence of post irradiation annealing on the mechanical properties and defect structure of AISI 304 steel. 2011, 2011(413), 95-102. ISSN 0022-3115.
- [28] RENTERGHEM, W., KONSTANTINOVIC, M.J. a VANKEERBERGHEN, M.: Evolution of the radiation-induced defect structure in 316 type stainless steel after post-irradiation annealing. *Journal of Nuclear Materials*. 2014, 2014(452), 158-165.

- [29] TIPPING, P. G. (2010). Understanding and mitigating ageing in nuclear power plants: Materials and operational aspects of plant life management (PLiM). Oxford: Woodhead.
- [30] WAS, G. S.: Fundamentals of Radiation Materials Science, Springer Berlin Heidelberg New Yourk, 2007, 227 p., ISBN 978-3-540-49471-3.
- [31] ZDEBOR, J.: PRIMÁRNÍ OKRUH JADERNÉ ELEKTRÁRNY: Téma č. 4 Hlavní technologické celky I.O. JE. 2017, s. 46.
- [32] ZwickRoell Indentec Hardness Testing: Product Information: ZHV30 [online]. [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: <<https://www.zwickroell.com/en/vickers-hardness-testers/zhv30>>.

Seznam příloh

Příloha č. 1: Výsledky tvrdosti HV5

Příloha č. 2: Výsledky instrumentované tvrdosti

Přílohy

Příloha č. 1: Výsledky tvrdosti HV5

Tato příloha je k dispozici na vyžádání, jsou v ní obsaženy citlivé údaje.

Příloha č. 2: Výsledky instrumentované tvrdosti

Tato příloha je k dispozici na vyžádání, jsou v ní obsaženy citlivé údaje.