

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Ing. Veronika Sabelová

Autoreferát dizertačnej práce

ŠTÚDIUM RADIČNEJ ODOLNOSTI Fe-Cr ZLIATIN

Evidenčné číslo: **FEI-10834-22760**

na získanie akademického titulu **philosophiae doctor, PhD.**
v doktorandskom študijnom programe

5.2.31 Jadrová energetika

Bratislava, júl 2014

Dizertačná práca bola vypracovaná v internej forme doktorandského štúdia na **Ústave jadrového a fyzikálneho inžinierstva** Fakulty elektrotechniky a Informatiky Slovenskej Technickej Univerzity v Bratislave.

Predkladateľ: Ing. Veronika Sabelová
Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva, FEI
STU,
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: Prof. Ing. Vladimír Slugeň, DrSc.
Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva, FEI
STU,
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: Prof. Ing. Jozef Janovec, DrSc.
Ústav materiálov, MTF STU, Bottova 25
917 24 Trnava

RNDr. Ondrej Šauša, CSc.
Fyzikálny ústav SAV
Slovenská akadémia vied
Dúbravská cesta 9, 845 11 Bratislava 45

Autoreferát bol rozoslaný:

.....
Obhajoba dizertačnej práce sa koná:.....o.....h,
na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave, Ilkovičova 3, v
zasadačke dekana, blok A, 1. poschodie.

Prof. RNDr. Gabriel Juhás, PhD.

dekan fakulty
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky

OBSAH

ZOZNAM SKRATIEK	4
ÚVOD	5
CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE	6
1. POUŽITIE MATERIÁLOV V NOVÝCH JADROVÝCH ZARIADENIACH	7
1.1 Vedecké výzvy	7
2. DEGRADAČNÝ PROCES MATERIÁLOV V PODMIENKACH JADROVÝCH ZARIADENÍ	8
2.1 Radiačné poškodenie	8
3. ŠTÚDIUM RADIČNÉHO POŠKODENIA POMOCOU POZITRÓNOVEJ ANIHILAČNEJ SPEKTROSKOPIE	9
4. EXPERIMENTÁLNA SIMULÁCIA RADIČNÝCH EFEKTOV POUŽITÍM IÓNOVEJ IMPLANTÁCIE	11
4.1 Železo – chrómové modelové zliatiny a implantácie	11
4.2 Simulácie implantačných profilov	12
4.5 Teoretické výpočty pozitrónovej anihilačnej spektroskopie DBS	14
4.6 Detekcia prítomnosti hélia v implantovaných materiáloch	15
4.7 Diskusia	16
5. EXPERIMENTÁLNA ŠTÚDIA EFEKTU ŽIHANIA NA MATERIÁLY OŽIARENÉ V SPALAČNÝCH PODMIENKACH	17
5.1 Skúmaný materiál (Eurofer 97) a jeho ožarovací program	17
5.2 Experiment	18
5.2.1 Žihanie materiálu Eurofer 97	18
5.2.2 Vickersove skúšky tvrdosti	18
5.2.3 Detekcia prítomnosti hélia v ožiarenom materiáli	19
5.4 Diskusia	20
6. ZÁVER	21
7. SUMMARY	23
8. REFERENCIE	24
9. ZOZNAM PUBLIKÁCIÍ	27

Zoznam skratiek

ADS	Accelerator driven system (Subkritický reaktor s urýchľovačom protónov)
appm	Atomic parts per million (Počet atómov na milión)
bcc	Body centered cubic (Priestorovo centrovaná kubická mriežka)
CDBS	Coincidence Doppler broadening spectroscopy (Koincidenčná spektroskopia Dopplerovho rozšírenia spektra)
DBS	Doppler broadening spectroscopy (Spektroskopia Dopplerovho rozšírenia spektra)
DEMO	Demonstration power plant fusion reactor (Typ fúzneho reaktora)
dpa	Displacement per atom (Presunutie na atóm)
FM	Ferriticko-martenzitická
Gen-IV	Generácia-IV
GFR	Gas-cooled fast reactor (Plynom chladený rýchly reaktor)
HPGe	High purity germanium (Vysoko-čistý germánionový)
HTR	High temperature reactor (Vysoko teplotný reaktor)
HV	Vickersove číslo tvrdosti
LFR	Lead-cooled fast reactor (Olovom chladený rýchly reaktor)
LT	Positron lifetime (Doba života pozitronov)
MSR	Molten salt reactor (Roztavenými soľami chladený reaktor)
ODS	Oxide dispersion strengthened (Oxidmi disperzne spevnený)
PAS	Pozitronová anihilačná spektroskopia
PSI	Paul Scherer institute (Inštitút Paula Scherrera)
RAFM	Redukovano aktivovateľné ferriticko - martenzitické
SCWR	Supercritical water-cooled reactor (Superkritický vodou chladený reaktor)
SEM	Scanning electron microscopy (Skenovacia elektrónová mikroskopia)
SFR	Sodium-cooled fast reactor (Sodíkom chladený rýchly reaktor)
SINQ	Swiss spallation neutron source (Švajčiarsky spalačný neutrónový zdroj)
SRIM	Stopping and range of ions in matter (Simulačný program)
STIP-II	Ožarovací experiment
V1	Jedna vakancia
V9	Deväť – vakančný klaster

Úvod

„Všetko je zložené z „atómov“, ktoré nie su fyzicky alebo geometricky viditeľné; medzi atómami sa nachádza prázdny priestor; atómy su nezničiteľné; vždy boli a vždy budú, v pohybe; existuje nekonečné množstvo atómov a druhov atómov, ktoré sa od seba líšia tvarom a veľkosťou.“

Democritus (cca. 460 BC – cca. 370 p. n. l.)

Veda o materiáloch prešla dlhú cestu od čias Democrita. Dnešné ľudské poznanie sa snaží vytvoriť najlepší materiál, ktorý by bol riešením pre mnohé pokročilé technológie. Dopyt energetiky sa zameriava na získanie lepších a odolnejších zliatin s dlhodobým použitím. V oblasti jadrových zariadení je navyše nutné zabezpečiť ich radiačnú odolnosť.

Nie je možné sa vyhnúť negatívnym vplyvom jadrových reakcií na konštrukčné materiály jadrových zariadení, ale optimalizácia materiálovej výroby môže viesť k dostatočným výkonom za daných prevádzkových podmienok. Použitím rôznych výskumných techník je možné monitorovať radiačné poškodenie v jednotlivých komponentoch a tým posúdiť bezpečnosť ich prevádzky do budúcnosti. Treba ale podotknúť, že nové jadrové zariadenia budú konfrontované s extrémnym vonkajším zaťažením.

V dizertačnej práci sú skúmané práve účinky žiarenia na konštrukčné materiály pre pokročilé jadrové zariadenia. Študované zliatiny sú určené pre použitie v Generácii-IV jadrových reaktorov, rovnako ako v zariadeniach termojadrovej fúzie.

Na výskum vlastností materiálov boli použité bežné mechanické a aj nedeštruktívne techniky. Nosná metóda práce bola pozitronová anihilácia Dopplerového rozšírenia spektra, ktorej výsledky boli doplnené teoretickými výpočtami a ďalšími dátami experimentálnych techník, ako napr. skúškou tvrdosti. Snažila som sa prispieť ku charakterizácii radiačného poškodenia vybraných vlastností konštrukčných materiálov vyvíjaných jadrových zariadení s ohľadom na očakávané prevádzkové, resp. havarijné podmienky zaťaženia.

Ciele dizertačnej práce

Dizertačná práca sa zaoberá týmito hlavnými cieľmi:

- ❖ Prehľad materiálov pre nové jadrové zariadenia (štiepne, fúzne a ADS) a porovnanie radiačného poškodenia ich konštrukčných zliatin (dpa a množstvo vytvoreného transmutačného hélia a vodíka).
- ❖ Zhodnotenie héliových implantácií, ako aj experimentálna simulácia radiačného poškodenia v Fe-Cr zliatinách. Podrobná charakteristika poškodenia rôznymi technikami - teoretické výpočty SRIM 2013, SEM pozorovania a merania pomalým zväzkom pozitronov.
- ❖ Charakteristika radiačného poškodenia indukovaného v RAFM - Eurofer 97 zliatine použitím spalačného terča (v ADS zariadení) pomocou metód pozitronovej anihilácie (PAS a CDBS technika) a skúšiek tvrdosti.
- ❖ Porovnanie experimentálnych dát so simulovanými výpočtami.
- ❖ Zhodnotenie héliového krehnutia a analýza ekvivalentnosti implantácie a ožarovania z hľadiska vytvorenia radiačného poškodenia.

1. Použitie materiálov v nových jadrových zariadeniach

Pokročilé materiály používané vo všetkých jadrových zariadeniach by mali zvýšiť výkon všetkých aplikácií pomocou zvýšených bezpečnostných aspektov a flexibility dizajnu. Výskum vo všetkých oblastiach záujmu zahŕňa zvýšenie pevnosti, tepelnej odolnosti, zlepšenie odolnosti voči korózii a voči radiačnému poškodeniu. A práve kvôli radiačnému poškodeniu sú na jadrové materiály kladené vyššie požiadavky. Za týmto účelom boli vyvinuté špeciálne zliatiny, ktorých výskum zaisťuje zvýšenie spoľahlivosti a bezpečnosti jadrových zariadení.

Tab. 1-1 Kandidátne konštrukčné materiály pre reaktory Gen-IV [1].

Reaktorový systém	F-M ocele	Austenitická nerezová oceľ	ODS ocele	Ni - zliatiny	Grafit	Nízko aktivovateľné zliatiny	Keramika
GFR	P	P	P	P	-	P	P
LFR	P	P	S	-	-	S	S
MSR	-	-	-	P	P	S	S
SFR	P	P	P	-	-	-	-
SCWR	P	P	S	S	-	-	-
VHTR	S	-	-	P	P	S	P

P = primárna voľba

S = sekundárna voľba

Kandidátne materiály pre rôzne zariadenia Gen-IV sú: feriticko-martenzitické ocele, austenitické nerezové ocele, oxidmi disperzne spevnené ocele, Ni - zliatiny, nízko aktivovateľné zliatiny, grafit a keramika. Potenciálny výber kandidátov z týchto materiálov pre rôzne reaktorové systémy je uvedený v tab. 1-1. Avšak si je potrebné uvedomiť, že výskum existujúcich a nových materiálov stále pokračuje.

1.1 Vedecké výzvy

Dôležitou výzvou pre zariadenia so štiepnou a fúznou reakciou, pre urýchľovače a tiež pre túto prácu je hélium, ktoré vzniká transmutáciou. Jeho množstvo je v rozmedzí od jednej do tisíc atómových častíc na milión (appm). Tieto hodnoty závisia na neutrónovom spektre, fluencii a na chemickom zložení zliatiny. Spolu s héliom má aj produkcia vodíka významný vplyv na ožiarený materiál. Väčšie množstvo

transmutačného vodíka v porovnaní s transmutačným héliom je kompenzované menšou schopnosťou zdržovania sa v materiáli. Produkcia dpa, hélia a vodíka v štiepnom, vo fúznom reaktore (prvá stena) a v spalačných podmienkach je uvedená v tab. 1-2.

Tab. 1-2 Hodnoty produkcie dpa, hélia a vodíka v štiepnom, vo fúznom reaktore a v spalačných podmienkach [2, 3].

Ožarovacie zariadenie	Štiepny reaktor	Fúzny reaktor, prvá stena	Spalačné terče
Rozsah dpa (Fe)	< 200 - 400	\leq 50 - 200	< 35
Pomer He k dpa (Fe)	< 1	~ 10	< 100
Pomer H k dpa (Fe)	< 1	~ 40	< 500
Teplota [°C]	270 - 950	300 - 800	50 - 600

Ako možno vidieť, problém s produkciou He a H v štiepných a vo fúzných reaktoroch nie je tak výrazný (tu sú v zreteli skôr problémy s vysokými teplotami a s následkami chemického prostredia na konštrukčné materiály) ako je to v prvej stene fúzných reaktorov a v spalačných terčoch. Medzi dôležité parametre vzťahujúce sa k transmutácii prvkov uvedených vyššie sú: rýchlosť tvorby dpa, pomer He (appm) k dpa (resp. vakanciam), He krehnutie a práve týmito javmi sa zaoberajú nasledujúce kapitoly.

2. Degradáčny proces materiálov v podmienkach jadrových zariadení

Mechanizmus degradácie počas ožiarenia je jednou z najdôležitejších aspektov výskumu jadrových materiálov nachádzajúcich sa v blízkosti aktívnej zóny reaktora. Tieto procesy majú podstatný vplyv na bezpečnosť a ekonomiku jadrových zariadení, a tým sa stávajú veľmi dôležitými vo všetkých oblastiach jadrového priemyslu. Niektoré podmienky, ako napr. tok častíc, teplota a chemické zloženie chladiva vplyvajú na mriežku konštrukčných zliatin.

2.1 Radiačné poškodenie

Vplyv žiarenia na kovové materiály môže mať vážny dôsledok na ich mikroštruktúru. To vedie k dynamickému narušeniu pravidelného

atómového usporiadania v kryštálovej mriežke. Tento proces je príčinou makroskopických štrukturálnych zmien vlastností a mriežkových porúch v mikroštruktúre.

Procesy radiačného poškodenia môžu byť príčinou zmien v kryštálovej mriežke nasledujúcimi spôsobmi [4]:

- ❖ Atómy mriežky sú posunuté z ich polôh (poškodenie premiestnením).
- ❖ Zmeny v chemickom zložení z dôvodu bombardovania časticami (implantácia iónov) alebo zachytenie častíc v atómovom jadre s následnou transmutáciou.
- ❖ Excitácia elektrónov a ionizácia atómov (ktoré nevytvárajú trvalé poškodenie v kovoch).

3. Štúdium radiačného poškodenia pomocou pozitronovej anihilačnej spektroskopie

Princíp pozitron – elektrónovej anihilácie poskytuje základ pre niekoľko nedeštruktívnych metód na skúmanie mikroštruktúry vzhľadom k citlivosti ich elektrónovej hustoty, alebo vzhľadom na distribúciu hybnosti elektrónov v materiáloch. Schéma pozitron-elektrónovej anihilácie od emisie z pozitronového zdroja až po konečnú premenu na energetické kvantá (žiarenia gama) je znázornená na obr. 3-1.

Doba života pozitronu v materiáli je menšia než nanosekunda. Napriek tomu je táto doba dostatočne dlhá na to, aby dokázala byť rozpoznaná atómová a elektrónová štruktúra prostredia. Po emisii zo zdroja pozitronov (väčšinou ^{22}Na), pozitron vstupuje do vzorky a rýchlo stráca svoju energiu v termalizačnom procese (~ 100 nm, 10 až 12 s). V dôsledku toho mu ostane len určitá tepelná energia a ďalej sa pohybuje difúziou (difúzna dĺžka $L_{+} \approx 100$ nm) [5], až do doby anihilácie. Proces pozitron – elektrónovej anihilácie je sprevádzaný emisiou (zvyčajne) dvoch energetických kvant $2 \times (511 \text{ keV} \pm \Delta E)$. Ak obe častice boli v klude, zachovanie hybnosti a energie spôsobí, že tieto dve energetické kvantá sú emitované do opačných smerov [6, 7].

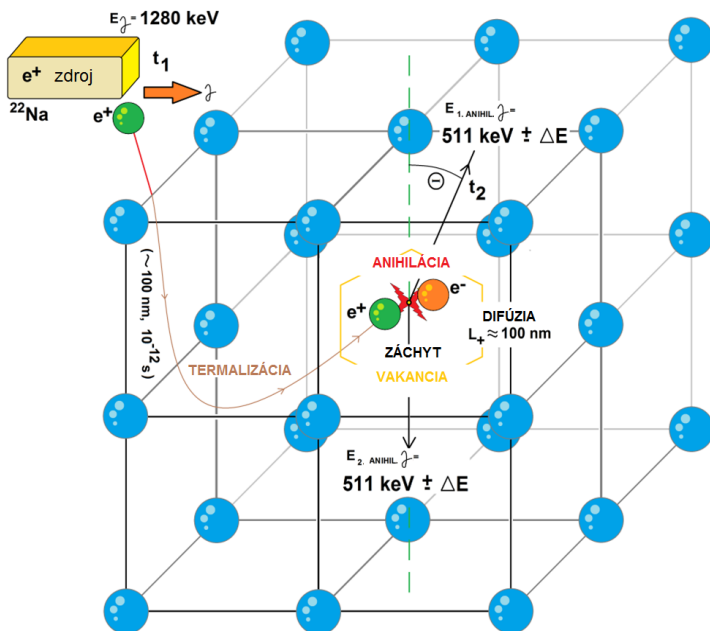


Fig. 3-1 Proces anihilácie pozitronu v materiáli od jeho vzniku v zdroji ^{22}Na .

Potenciál, ktorý má vplyv na pozitron, je nižší v defektoch, ktoré predstavujú prázdne miesto v mriežke (vakencie a vakančné klastre). Repulzívne interakcie pozitronov a kladných iónov v mriežke je dôvod daného javu. Tu nastáva prechod pozitronu z delokalizovaného stavu k lokalizovanému. Energetický rozdiel dvoch stavov je daný materiálom a určuje väzobnú energiu defektu na zachytenie pozitronu. Pozitronový záchyt je možný v kovových materiáloch s defektami, ktoré sú charakteristické nižšou hustotou kladných mriežkových iónov (zachytenie je možné v dislokáciách a na hranici zrn, ale nie je možný záchyt na intersticiálnych atómoch). Taktiež precipitáty a rôzne fázy tvoria prostredie pre možný záchyt pozitronov [5].

4. Experimentálna simulácia radiačných efektov použitím iónovej implantácie

Dôsledky ožiarovania konštrukčných materiálov sú jedným z najviac študovaných efektov v oblasti jadrového výskumu. Ožarovanie zahŕňa komplexné kombinácie rôznych typov poškodenia v rôznych rozmerových a časových škálach. Výskum ožarovania materiálov v reálnych podmienkach jadrového zariadenia je komplikovaný proces. Preto sa používa často aj dnes simulácia radiačného poškodenia pomocou implantáčnych zariadení alebo použitím urýchľovača. Budúce generácie ADS ponúkajú jedinečné riešenia pre oba problémy energetiky a nakladania s jadrovým odpadom. Ožiarenie v spalačnom prostredí môže byť použité na účely výskumu, pri výrobe elektrickej energie, ako aj pre transmutáciu dlho – žijúcich prvkov v jadrových odpadoch [8]. So zvyšujúcim sa vyhorením jadrového paliva môžu rôzne komponenty trpieť vysokou rýchlosťou produkcie hélia (napr. v aktívnej zóne). Héliové krehnutie je tiež dôležitý životnosť-limitujúci faktor komponentov, ktoré čelia plazme vo fúzných zariadeniach. Napriek silnému výskumu zameranému na porozumenie daného fenoménu [9-20] je mechanizmus héliového krehnutia ťažko rozpoznateľný experimentami a teoretickými výpočtami zároveň. V tejto štúdii bolo použité Dopplerove rozšírenie spektra na charakterizáciu poškodenia Fe-Cr binárnych zliatin implantovaných héliovými a vodíkovými iónmi. Interpretácia výsledkov je založená na teoretickom výpočte Dopplerových profilov.

Hoci boli niektoré pozitronové štúdie o héliových bublinách publikované už v minulosti [21, 22] tieto boli zamerané predovšetkým na výskum doby života pozitronov. Aplikácia techniky Dopplerovho rozšírenia spektra nebola v tomto smere detailne rozpracovaná. Táto práca poskytuje unikátny experimentálny dôkaz prítomnosti hélia pomocou Dopplerovho spektra meraných héliom-implantovaných materiálov.

4.1 Železo – chrómové modelové zliatiny a implantácie

Materiály použité v tejto práci sú Fe – Cr modelové zliatiny s 2,5% Cr (2,36% hm. Cr), 5% Cr (4,62% hm. Cr), 9% Cr (8,39% hm. Cr) a 12% Cr (11,62% hm. Cr) [23] získané tavením priemyselne čistého Fe a Cr (podrobné chemické zloženie je uvedené v tab. 4-1). Po odlíatí boli získané ingoty tvárené za studena v ochrannej atmosfére do podoby dosiek s hrúbkou 9 mm. Neskôr boli Fe – Cr modelové zliatiny stabilizované pri 1050 °C po dobu 1 hodiny vo vysokom vákuu. Potom bolo vykonané popúšťanie pri 730 °C po dobu 4 hodín, po ktorom nasledovalo chladenie vzduchom.

Tab. 4-1 Chemické zloženie (%hm.) skúmaných Fe-Cr zliatin [23].

Cr*	O*	N*	C*	Mn	P	Ni	Cu	V
2,36	0,0346	0,0117	0,0081	0,009	0,013	0,044	0,005	0,001
4,62	0,0656	0,0127	0,02	0,02	0,011	0,06	0,01	0,001
8,39	0,0667	0,0148	0,0211	0,03	0,012	0,07	0,01	0,002
11,62	0,0307	0,0237	0,0278	0,03	0,05	0,09	0,01	0,002

* merané po tepelnej úprave

Na implantáciu vzoriek vodíkom a héliom (H_2^+ , He^+) bol použitý lineárny urýchľovač iónov, ktorý bol umiestnený a prevádzkovaný na našom pracovisku na Slovenskej technickej univerzite v Bratislave. Na tento účel boli použité rôzne úrovne implantácie a energie (tab. 4-2). Teplota počas implantácie bola nižšia ako 80 °C.

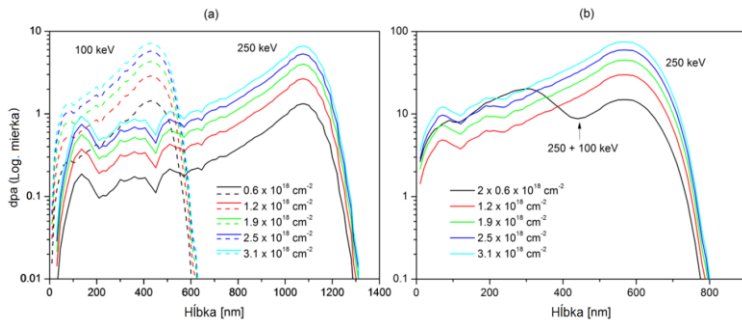
Tab. 4-2 Zoznam vzoriek s implantačnými úrovňami.

H_2^+					
Implantačná dávka [$\times 10^{16} \text{cm}^{-2}$]	0,6	1,2	1,9	2,5	3,1
Implantačná energia [keV]: (Fe-2,36 a 11,62%Cr)	100				
Implantačná energia [keV]: (Fe-4,62 a 8,39%Cr)	250				
He^+					
Implantačná dávka [$\times 10^{16} \text{cm}^{-2}$]	2 x 0,6*	1,2	1,9	2,5	3,1
Implantačná energia [keV]: (Všetky Fe-Cr zliatiny)	250 + 100	250			

* implantácia bola uskutočnená 2 x (1. na 250 keV, 2. na 100 keV)

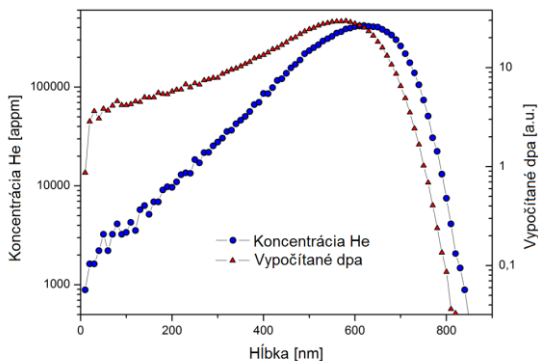
4.2 Simulácie implantačných profilov

Teoretické výpočty boli vykonané pomocou programu SRIM 2013 Monte Carlo simuláčného kódu s nasledujúcimi nastavenými parametrami: bola vybraný model Kinchin a Pease, odporúčaná prahová energia presunu bola 40 keV pre železnú aj chrómovú zložku a väzobná energia bola nastavená na nulovú hodnotu. Tento model bol použitý pre všetky typy implantácie (vodíkom a héliom s rôznymi implantačnými energiami). Vypočítané implantačné profily popisujú štrukturálne zmeny v materiáli. Tieto výpočty sa môžu použiť pre určenie spoločnej radiáčnej expozičnej škody - dpa. Hodnoty dpa môžu byť stanovené pomerom atómových presunov k počtu atómov v mriežke v zasiahnutej oblasti. Tieto hodnoty znázorňujú koľkokrát bol jeden atóm presunutý zo svojej pozície.



Obr. 4-1 Vypočítané dpa profily všetkých zliatin implantovaných iónmi (a) H_2^+ a (b) He^+ .

Vakančné profily sa skladajú z výpočtov poškodenia spôsobeného vyrazením atómov z ich pozície použitím odhadov metódy Kinchin-Pease. Ich lokálne maximum závisia od implantačnej energie. Vypočítané dpa profily (obr. 4-1) jasne ukazujú rozdiely medzi H_2^+ a He^+ implantáciou, implantačnými energiami a rôznymi implantačnými dávkami. Asi desaťnásobné hodnoty dpa zodpovedajú fyzikálnemu rozdielu H_2^+ a He^+ implantácie.



Obr. 4-2 Koncentrácia He [appm] and dpa hĺbkový profil získaný simuláciami v programe SRIM.

Na obr. 4-2 sú porovnané dva hĺbkové profily a to: koncentrácie hélia a hodnôt dpa. Z priebehov daných kriviek možno predpokladať určitú zmenu pomerov He/dpa v závislosti od hĺbky vzorky. Použitím daných pomerov boli vybrané dve oblasti s odlišným typom defektov. Prvá bola definovaná pre hĺbku vzoriek ~ 390 nm, ktorá popisuje región s vysokými hodnotami dpa a relatívne nízkou koncentráciou hélia. V druhej oblasti (~ 620 nm) sa predpokladá opačný efekt.

4.5 Teoretické výpočty pozitrónovej anihilačnej spektroskopie DBS

Teoretické výpočty boli vykonané za účelom stanovenia oblasti hybnosti v DBS spektrách, kde možno pozorovať účinok hélia. Vplyv He na hybnostné profily bol hodnotený pomocou výpočtov Dopplerových rozšírených profilov v rámci atómovej metódy superpozície [24, 25] využívajúce výpočtovú schému uvedenú v [26].

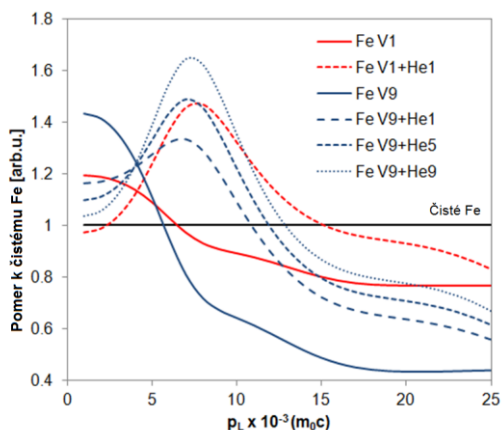


Fig. 4-3 Vypočítané DB - profily pre prázdne a He – naplnené vakancie a ich klastre. Pomery sú vyhodnotené k čistému, bezdefektnému bcc železu [27].

Prítomnosť hélia v implantovaných materiáloch bola simulovaná umiestnením héliových atómov do vakancií a ich klastrov v bcc - železnej mriežke. Týmto spôsobom boli atómy umiestnené na pôvodné pozície Fe atómov. Boli skúmané najmä umiestnenia jedného He atómu v jednej vakancii (V1) a jedného až deviatich atómov He v klastri deviatich vakancií (V9).

Vypočítané Dopplerové rozšírené profily pre rôzne vakančno - héliové komplexy a čisté vakancie a ich klastre sú uvedené na obrázku 4-3. Je vidieť prítomný zreteľný znak He a to v lokálnom maxime v oblasti hĺbky okolo $(6 - 7) \times 10^{-3} m_0c$.

4.6 Detekcia prítomnosti hélia v implantovaných materiáloch

Pomocou pomalého zväzku pozitronov na Univerzite Aalto v Helsinkách boli skúmané tri materiály s vyšším obsahom Cr. Ako zdroj pozitronov bol použitý ^{22}Na s aktivitou približne 20 mCi (740 MBq). Priemerná hĺbka vniku pozitronov bola stanovená v rozsahu energie (0,5 keV - 38 keV) monoenergetického zväzku. Maximálna hĺbka pozitronov bola približne 1,5 μm .

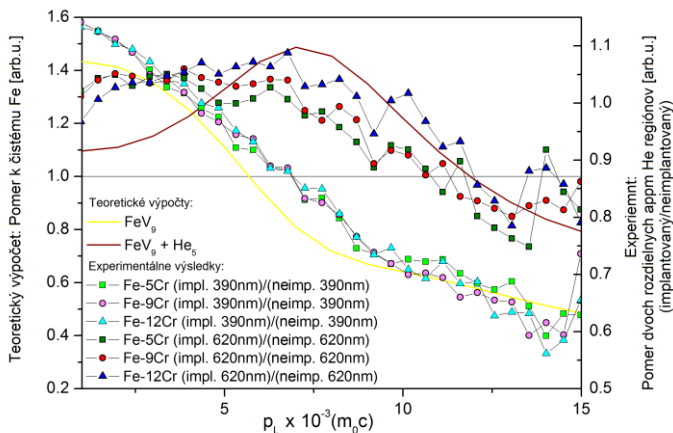


Fig. 4-4 Porovnanie meraní a teoretických výpočtov. Experimentálny pomer DBS hybnostných spektrí je vyhodnotený pre hĺbku implantácie 620 nm a 390 nm (implantované / neimplantované) skúmaných Fe - 5, 9 a 12% Cr materiálov; implantačná dávka bola $1,25 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ ($0,2 \text{ C/cm}^2$). Teoretické výpočty sú uskutočnené pre vakančné klastre s He ($\text{FeV}_9 + \text{He}_5$).

Na uskutočnenie merania bola zvolená konvenčná metóda s použitím jedného HPGe polovodičového detektora. Rozlíšenie spektra bolo pre S parameter $|E_\gamma - 511 \text{ keV}| < 0,83 \text{ keV}$ a W parameter $3 \text{ keV} < |E_\gamma - 511 \text{ keV}| < 7,6 \text{ keV}$. Na základe predchádzajúcich výsledkov (SRIM výpočet) boli identifikované dva odlišné regióny. Prvý z nich sa nachádza hĺbke vzoriek $\sim 390 \text{ nm}$ a popisuje región s vysokými hodnotami dpa a relatívne nízkou koncentráciou hélia. V druhej oblasti ($\sim 620 \text{ nm}$) je pomer He/dpa vyšší o faktor 5, v porovnaní s prvou oblasťou.

Korelácia teoretických výpočtov a experimentálne získaných dát je znázornená na obr. 4-4. Vypočítané krivky ($V_9 + He_5$) obsahujú héliový pík v oblasti okolo $7 \times 10^{-3} m_{0c}$, ako bolo popísané vyššie. Dve hĺbky meraní (390 nm a 620 nm) popisujú dva rôzne regióny s odlišným charakterom defektov. Pomocou pomeru profilov implantovaného a neimplantovaného spektra v hĺbkach 620 nm (vakancie s He) a 390 nm (vakancie s nízkou koncentráciou He) možno získať relatívny príspevok hélia a jednotlivých defektov. Experimentálny profil (pomer implantovanej k neimplantovanej krivke v hĺbke 620 nm - pomer v regióne, kde predpokladáme vysokú koncentráciu He k neimplantovanému materiálu v rovnakej oblasti) obsahuje takmer totožné lokálne maximum ako je na jednej krivke z teoretických výpočtov. Kombináciou rôznych defektov implantovaných Fe-Cr binárnych zliatin môže samozrejme dôjsť k drobným odchýlkam od teoretickej krivky ako sú napríklad odlišné amplitúdy héliového píku.

4.7 Diskusia

Implantácia vodíkom (H_2^+) a héliom (He^+) s rôznymi úrovňami dávok a energiou spôsobila zmeny mikroštruktúry implantovaných feritických Fe-Cr modelových zliatin s rôznym obsahom chrómu (2,36% hm. Cr, 4,62% hm. Cr, 8,39% hm. Cr a 11,62% hm. Cr). Braggov pík poškodenia dosahuje hodnoty až do 100 dpa implantáciou iónmi hélia, a do 10 dpa implantáciou vodíkových iónov.

Kombinácia teoretických výpočtov a experimentálnych meraní pozitronovej anihilačnej spektroskopie ukazuje, že táto metóda je vhodná pre charakterizáciu mikroštruktúry ožiarených materiálov, ktoré obsahujú hélium. Charakteristický héliový pík bol najprv predpovedaný teoretickým modelovaním defektov obsahujúcich hélium, kde boli vypočítané kombinácie množstva hélia s rôznym počtom vakancií, a následne bol pozorovaný v experimentálnych údajoch He-implantovaných modelových zliatin. Na základe získaných hĺbkových profilov je možné rozlíšiť dve rôzne zóny s rozdielnou povahou mikroskopického poškodenia. Zatiaľ čo prázdne vakančné klastre a klastre s nízkym pomerom He/vakancie sú dominantné v prvom ~ 390 nm regióne, zapĺňanie týchto defektov héliom sa vyskytuje v hĺbkach ~ 620 nm. Pomery kriviek implantovaných k neimplantovaným materiálom zobrazujú určitý príspevok pomeru He/vakancie v týchto dvoch rôznych hĺbkach, čo je jednoznačne v súlade s teoretickými výpočtami (väčšinou pre klastre deviatich vakancií v železe bez (390 nm) a (620 nm) s héliom pre všetky skúmané materiály).

Výsledky experimentov uvedených v tejto kapitole zobrazujú prvý úspešný dôkaz pozorovania hélia v meraných konštrukčných materiáloch pomocou techniky pozitronovej anihilačnej spektroskopie Dopplerovho rozšíreného spektra. Aj keď sa prítomnosť hélia jednoznačne potvrdila na implantovaných materiáloch, experimentálne podmienky v prostredí fúzie alebo v spalačných podmienkach, kde sú prítomné oveľa nižšie koncentrácie hélia, môžu byť náročné. S cieľom potvrdiť

všeobecnú realizovateľnosť techniky na vyšetrovanie transmutačného hélia bola do tohto výskumu zahrnutá ďalšia experimentálna časť, kde je skúmaná oceľ Eurofer 97 ožiarená v spalačných podmienkach.

5. Experimentálna štúdia efektu žihania na materiály ožiarené v spalačných podmienkach

Na základe výsledkov získaných v predchádzajúcej kapitole bola vypracovaná štúdia materiálu, ktorý je kandidátom pre fúzne aplikácie. Hlavným cieľom tohto experimentu je validovanie prístupu v predchádzajúcej kapitole na vyhodnocovanie efektu hélia a zhodnotenie správania sa materiálu ožiareného v kombinovanom neutrónovo-protónovom spektre. Pre tento účel bola zvolená kombinácia metód koincidenčného merania Dopplerového rozšírenia spektra pozitronovej anihilačnej spektroskopie a meranie tvrdosti materiálu v procese žihania.

Podmienky radiácie v spalačnom prostredí produkujú hélium rýchlosťou od 50 - 100 appm/dpa pri celkovej rýchlosti vzniku poškodenia 5 dpa/rok [28]. V porovnaní so žiarením v štiepnom reaktore, žiarenie v spalačných podmienkach spôsobuje väčšie krehnutie a významné tvrdnutie materiálu aj pri vyšších teplotách (> 400 °C). Toto správanie bolo z veľkej časti pripísané prítomnosti vysokého obsahu hélia v ožiarených vzorkách [29] a práve preto má veľký význam pochopenie jeho správania sa v konštrukčných materiáloch.

5.1 Skúmaný materiál (Eurofer 97) a jeho ožarovací program

Eurofer 97 (detailne popísaný v [30, 31]), ako pokročilá feriticko – martenzitická oceľ s redukovateľnou aktivovateľnosťou [28]. Je to perspektívna zliatina pre fúzne aplikácie (kandidát pre materiál prvej steny zariadenia DEMO). Materiál bol získaný z Forschungszentrum Karlsruhe vo forme tyče s priemerom 100 mm. Neskôr bol normalizovaný na 979 °C po dobu 1 h 51 min a potom chladený na vzduchu a temperovaný pri 739 °C po dobu 3 h 42 min a následne chladený na vzduchu. Jeho chemické zloženie v hm. % je 0,12C, 0,07Si, 8,93Cr, 0,007Ni, <0,001Mo, 0,44Mn, 0,009Ti, 0,19V, <0,001Nb, 1,10W, 0,14Ta, 0,022Cu, <0,005P, 0,004 S, <0,001B, 0,017N s rovnováhou Fe [32, 33]. Pre následné ožarovanie a experimentálny výskum boli vyrobené vzorky so špecifickými rozmermi ($2.5 \times 2.5 \times 0.5 \text{ mm}^3$) [34].

Ožarovanie bolo vykonané na SINQ v rámci ožiarovacieho programu STIP-II v roku 2000 a 2001. SINQ zariadenie využíva zmiešané spektrum protónov a spalačných neutrónov vysokých energií (590 MeV), ktoré produkujú kaskády vyrazených atómov a transmutačné jadrové reakcie [35]. V priebehu ožarovania materiálov v spalačnom prostredí sa vytvorilo veľké množstvo nečistôt, najmä transmutačného hélia a vodíka. Podrobné informácie o ožarovacom programe STIP-II sú uvedené v [34]. Vypočítané parametre ožarovania (vysoká produkcia transmutačných nečistôt - He a H) vzorky (ID: IJ15) sú nasledovné: $dpa = 7,4$, $appm(He) = 565$ a $appm(H) = 2240$, teplota pri ožarovaní bola v rozsahu 119 - 147 °C. Hmotnosť vzorky pred meraním bola 0.05189 ± 0.00020 g. Dávkový príkon bol v marci 2013 ~ 310 mSv/h vo vzdialenosti 2 cm.

5.2 Experiment

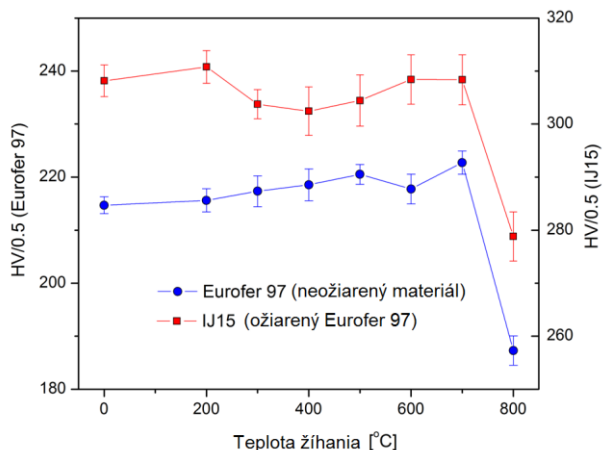
Štúdiá ocele Eurofer 97 bola založená na troch fázach. Prvá z nich zahŕňala meranie rozšírených spektier CDBS. Druhé bolo meranie tvrdosti podľa Vickersa a posledná etapa experimentu obsahovala žihanie vo vákuu. Výsledkom tejto praktickej časti bolo získanie pomerne komplexných informácií o správaní sa transmutačného hélia pri rôznych teplotách. K najdôležitejšej úlohe patrilo detekovanie prítomnosti He pomocou Dopplerovského rozšírenia spektra. Tento predpoklad je založený na výsledkoch o detekcii a sledovaní He v predchádzajúcej experimentálnej kapitole.

5.2.1 Žihanie materiálu Eurofer 97

Experiment bol založený na pozorovaní správania sa neožiareného a ožiareného materiálu Eurofer 97 počas tepelného žihania vo vákuu. Eurofer 97 sa žihal pri teplotách 200 až 800 °C, po 100 °C krokoch, po dobu jednej hodiny s následným chladením na vzduchu.

5.2.2 Vickersove skúšky tvrdosti

Vickersove teliesko počas skúšiek vytvára odtlačky ako funkciu skúšobného zaťaženia. Odtlačok v tvare štvorca je vytvorený pyramídovým tvarom diamantového hrotu s uhlami 136°. Vickersove číslo tvrdosti (HV) je sila, ktorá spôsobila odtlačok podelená plochou trvalého odtlačku [36]. Pre štúdium tvrdosti neožiareného a ožiareného materiálu Eurofer 97 bola zvolená skúška tvrdosti s hmotnosťou závažia 0.5 kg.



Obr. 5-1 Mikrotvrdosť zmeraná Vickersovou metódou neožiareného a ožiareného materiálu Eurofer 97 počas procesu žihania do 800 °C.

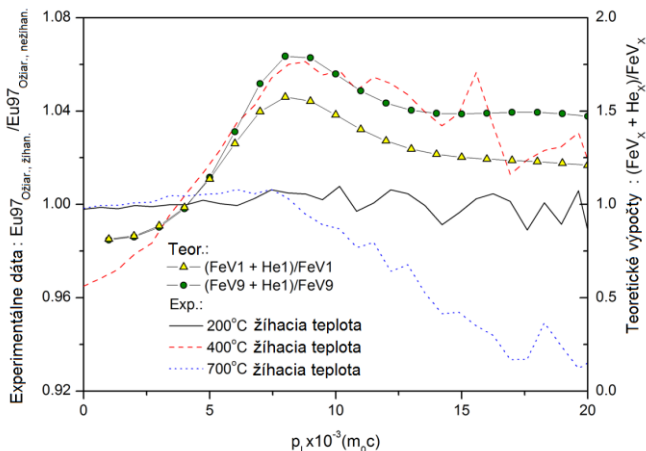
Na obr. 5-1 je zobrazená grafická závislosť mikrotvrdości od teploty žihania do 800 °C. Rozdiel medzi neožiareným a ožiareným nevyžihávaným stavom možno interpretovať ako tvrdnutie v dôsledku vzniknutých defektov vplyvom ožiarenia. Tvrdnutie neožiareného materiálu je pravdepodobne v dôsledku precipitácie prídavných prvkov. Mäknutie ožiarenej ocele Eurofer 97 od 200 °C do 400 °C, je v dôsledku vyžihania vakancií bez prítomnosti hélia a rekombinácie Frenkelových párov. Tvrdnutie nad 400 °C je spôsobené migráciou hélia do vakancií, ich klastrov a na hranice zŕn s následnou tvorbou bublín. Rast vakančných klastrov je sprevádzaný absorpciou vakancií (emisia vlastných intersticiálnych atómov), v dôsledku čoho sa znižuje pomer He/vakancia [37] a to spôsobuje tvrdnutie materiálu. Následné rozpúšťanie martenzitu a mäknutie nastáva v prípade oboch – ožiarenej a neožiarenej zliatiny nad 700 °C.

5.2.3 Detekcia prítomnosti hélia v ožiarenom materiáli

Dopplerove spektrá boli získané z koincidenčných meraní použitím dvoch HPGe polovodičových detektorov na inštitúte PSI. Chladienie detektorov bolo vykonané kvapalným dusíkom. Jednorozmerné hybnostné spektrá boli získané ako rez meraných 2D spektrier po uhlopriečke. Celková doba merania jedného CDBS spektra trvala menej než dva dni s celkovou početnosťou viac ako 160 mil.

Ako je vidieť z teoretických kriviek na obr. 4-3, prechod kriviek z prázdnych vakančných klastrov na klastre naplnené héliom je sprevádzaný

výrazným vrcholom v hybnosti pre hodnoty $(6 - 8) \times 10^{-3} m_0c$ [27]. Porovnanie teoretických výpočtov a experimentálnych výsledkov je znázornené na obr. 5-3. Teoretické krivky predstavujú pomer hybnostných spektier vakancií naplnených héliom ku spektrám vakancií bez hélia. Na zobrazenie rôznych fáz správania sa hélia v priebehu procesu žihania boli vybrané tri fázy žihania ožiareného materiálu (200 °C, 400 °C a 700 °C).



Obr. 5-2 Porovnanie pomerov experimentálnych a teoretických CDBS spektier.

Difúzia hélia z mriežky do vakančných klastrov (t. j. zvyšovanie pomeru He/vakancie) je dominantný mikroštruktúrálly proces v rozsahu žihacích teplôt 200 - 400 °C. Práve preto bol zhodnotený pomer hybnostných priebehov materiálu "ožiareného + žihaný stav" k "ožiarenému stavu". Daný pomer by mal poskytnúť jasné informácie o prítomnosti héliového píku. Ako je znázornené na obr. 5-3, pomery kriviek hybnosti experimentálnych dát sú vo výbornej zhode s vypočítanými profilmi, ale iba pri teplote žihania na 400 °C. To jasne potvrdzuje, že pri 400 °C pomer He/vakancie dosahuje najvyššie hodnoty.

5.4 Diskusia

Prezentované výsledky sú kombináciou troch experimentálnych fáz, ktoré poskytujú jedinečné informácie o radiačnom poškodení neožiarenej a ožiarenej feriticko - martenzitickej ocele Eurofer 97. Experimentálny prístup bol založený na kombinácii koincidenčného merania Dopplerových rozšírených spektier a skúšiek tvrdosti po jednotlivých krokoch žihania. Zariadenie SINQ poskytuje

zmiešané spektrum protónov a neutrónov, ktoré produkuje v materiáli (Fe) asi stokrát viac transmutačného hélia ako v prípade štiepnej reakcie.

Detekcia prítomnosti hélia bola založená na rôznych procesoch jeho správania sa pri žiahaní. Tento model je založený na teoretických výpočtoch, experimentálnych výsledkoch a odpublikovaných dátach. Tri fázy materiálu boli vybrané na porovnanie správania sa hélia po žiahaní (200 °C, 400 °C a 700 °C). Charakteristický pík hélia bol pozorovaný, keď bolo spektrum s najvyšším očakávaným pomerom He/dpa podelené spektrom s najnižším očakávaným pomerom He/dpa. Takto získané priebehy poukázali na relatívny účinok hélia so zníženým príspevkom pozitronového záchytu na prázdnych defektoch mriežky (vakencie a ich klastre bez prítomnosti hélia). Prezentované experimenty ukázali vynikajúcu zhodu s teoreticky získanými hybnostnými profilmi a s experimentálnymi dátami implantovaných vzoriek, ktoré sú uvedené v predchádzajúcej kapitole.

6. Záver

Teoretická časť práce poskytuje stručný úvod do súčasného materiálového výskumu a vývoja pre budúcu generáciu jadrových zariadení. Popisuje mechanizmus radiačnej degradácie materiálov a poskytuje prehľad o technikách pozitronovej anihilačnej spektroskopie. Radiačné krehnutie konštrukčných materiálov je kľúčovým mílnikom vo vývoji nových materiálov. Zrážky častíc (neutrónov a nabitých častíc) vyvolávajú celý rad fyzikálnych, mechanických a chemických zmien. Transmutácia nových prvkov je dôležitý efekt žiarenia, ktorý často vedie k nahromadeniu plynných prvkov, ako je napr. hélium, ktoré je zodpovedné za krehnutie materiálov.

Hlavným cieľom práce bolo využitie pozitronových anihilačných techník, najmä Dopplerovho rozšírenia spektra pre charakterizáciu radiačného poškodenia. Je to citlivá metóda, ktorá je založená na osobitom správaní sa vniknutého pozitronu do materiálu, ktorý sa zachytí na prázdnych defektoch (vakencie a ich klastre). Tento princíp sa používa na charakterizovanie mnohých mikroštruktúrnych procesov v pevných látkach.

Práca poukazuje na vysoký výpovedný potenciál metód pozitronovej anihilačnej spektroskopie pre vyšetrovanie radiačného poškodenia v konštrukčných materiáloch. V prvej časti experimentálnej kapitoly je simulované radiačné poškodenie implantáciou rôznych železo-chrómových modelových zliatin. Implantácia bola vykonávaná s použitím iónov hélia a vodíka. He - implantácia spôsobila pri vyšších dávkach blisteringový efekt, ktorý bol limitujúcim faktorom pre ďalší výskum. Na základe našich poznatkov navrhujeme limitovať úroveň budúcich implantácií hodnotou 0,1 C/cm².

Experimentálne merania DBS, použité pre charakterizáciu efektu hélia boli založené na výsledkoch teoretických výpočtov. Kombinácia teoretických a experimentálnych dát ukázala, že táto metóda môže byť použitá pre charakterizáciu mikroštruktúry ožiarených materiálov, ktoré obsahujú hélium. Výskum Dopplerovho

rozšírenia spektier bol založený na technike pomalého pozitronového zväzku, ktorá definovala jednotlivé oblasti v Braggovom píku. Charakterizácia konkrétnej hĺbky s rôznymi pomermi He/vakancie umožnila pozorovať prítomnosť hélia. Tento héliový pík bol najskôr predpovedaný pomocou teoretického modelovania mriežky s vakanciami obsahujúcimi atómy hélia, a neskôr pozorovaný v experimentálnych údajoch z meraní hélia implantovaných modelových zliatin. Pomery implantovaných k neimplantovaným materiálom zvyčajne zvyšujú príspevok pomeru He/vakancie v dvoch rôznych hĺbkach, čo je v súlade s teoretickými výpočtami, väčšinou pre klaster deviatich vakancií s a bez hélia. Výsledky zobrazujú prvý úspešný dôkaz prítomnosti hélia použitím Dopplerovho rozšírenia spektra pozitronovej anihilačnej spektroskopie.

Druhá experimentálna časť hovorí o vyšetrení RAFM - Eurofer 97 zliatiny, ožiarenej v spalačných podmienkach. Táto sekcia sa zaoberá kombináciou koincidenčnej Dopplerovej anihilačnej spektroskopie a skúšiek tvrdosti po jednotlivých krokoch žihania. Detekcia hélia bola založená na rôznych procesoch správania sa hélia pri žihaní. Výsledky CDBS charakterizovali nukleáciu a rast héliových bublín, ktoré sa stávajú dominantnými procesmi nad 400 °C. Charakteristický pík hélia bol úspešne pozorovaný pri pomere spektra s najvyššou hodnotou He/dpa k najnižšej. Uvedené experimenty taktiež potvrdili rovnaké vynikajúce výsledky v súlade s vypočítanými hybnosťmi profilmi, ako aj s experimentálnymi údajmi z meraní He - implantovaných vzoriek.

Výstupy dizertačnej práce je možné zhrnúť do nasledujúcich oblastí:

- ❖ Vytvorenie a testovanie novej metodiky pre štúdium hélia.
- ❖ Analýza dvoch odlišných mechanizmov vzniku radiačného poškodenia (implantácia iónmi a ožarovanie v kombinovanom neutrón-protónovom spektre).
- ❖ Zhodnotenie procesov správania sa hélia v ožiarenej FM oceli pre rôzne teploty žihania.

Získané dáta z oboch experimentálnych častí práce sú v korelácii s teoretickými výpočtami. Ako dôležitý limitujúci faktor jadrových komponentov bolo preskúmané héliové krehnutie a bola dosiahnutá dobrá zhoda medzi experimentom a teóriou.

7. Summary

The main aim of the doctoral thesis is the study of radiation resistance of alloys based on the Fe-Cr for nuclear facilities of Generation-IV. The thesis is divided into two parts – theoretical and experimental one. The theoretical section deals with perspective materials for future nuclear facilities. These structural alloys should fulfill the resistance conditions in challenging environments, where the fission and fusion reaction occurs; and in conditions of particles beam irradiation in accelerator driven system applications.

Degradation mechanism during radiation influence causes microstructural changes of structural materials. For that reason, the new types of alloys were developed (reduced activated ferritic - martensitic, oxide dispersion – strengthened, refractory, austenitic - stainless and other steels). These should be resistant against mechanical and radiation degradation.

The thesis is based on radiation resistance study, especially in terms of characterization of helium embrittlement of structural alloys, using destructive and non-destructive investigation methods. The experimental part is divided into two chapters. The first one deals with Fe-Cr binary alloys study after the hydrogen and helium ions implantation. This type of radiation damage simulation is less difficult than the irradiation and manipulation with active material, as it is in second experimental part, in which the ferritic – martensitic alloy Eurofer 97 was investigated. The unique compliance with theoretical calculations was enriched, using the new approach of experimental data evaluation. Finally, the comparison of results of implanted and irradiated materials was performed.

8. Referencie

- [1] Generation IV Roadmap Crosscutting Fuels and Materials R&D Scope Report. [online]. December 2002. [cit: 2014-01-10] Available at: <<http://catatanstudi.files.wordpress.com/2009/10/2002-gen-iv-roadmap-crosscutting-fuels-and-materials-rd-scope-report.pdf>>.
- [2] DIETZ, W., FRIEDRICH, B. C. Qualification of Structural Materials for Reactor Systems: Synergies in Materials for Fusion/Fission Reactors and Advanced Fission Reactors. In *OECD NEA NSC Workshop on structural materials for Innovative Nuclear Systems*. Karlsruhe, 2007, pp. 217-227.
- [3] MANSUR, L. K., et al., R&D for the Spallation Neutron Source mercury target. In *Journal of Nuclear materials*, ISSN 0022-3115, 2001, vol. 296, pp. 1-16.
- [4] KOUTSKÝ, J., KOČÍK, J., Radiation Damage of Structural Materials. Prague: Elsevier, 1994, ISBN: 0444987088.
- [5] ČÍŽEK, J. Měření doby života pozitronů a jeho využití při studiu kovových materiálů. In *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, ISSN 0032-2423, 1999, vol. 44, no. 3, pp. 201–217.
- [6] HAUTOJÄRVI, P. Positrons in solids. Verlag: Springer, 1979. 3 s. ISBN 3-540-09271-4.
- [7] KRAUSE-REHBERG, R., HARTMUT. S. L. Positron Annihilation in Semiconductors. Halle: Springer, 1999. ISBN: 3-540-64371-0.
- [8] HOFFELNER, W. Materials for nuclear plants. Oberrohrdorf: Springer, 2013. ISBN: 978-1-4471-2914-1.
- [9] GILLAM, S.B. et al, Retention and surface blistering of helium irradiated tungsten as a first wall material. In *Journal of Nuclear Materials*. ISSN 0022-3115, 2005, vol. 347, pp. 289–297.
- [10] KESTERNICH, W., ULLMAIER, H. Mechanical properties and microstructure helium-implanted beryllium. In *Journal of Nuclear Materials*. ISSN 0022-3115, 2003, vol. 312, pp. 212–223.
- [11] KARWASZ, G.P. et al. Application of positron annihilation techniques for semiconductor studies. In *Journal of Alloys and Compounds*. ISSN 0925-8388, 2004, vol. 382, pp. 244–251.
- [12] SUBRAHMANYAM, V. S., NAMBISSAN, P. M. G., SEN, P. Helium bubbles in tungsten studied by positron annihilation. In *Solid State Communications*. ISSN 0038-1098, 1994, vol. 89, no. 6, pp. 523-527.
- [13] XU, Q. et al. Coincidence Doppler broadening of positron annihilation radiation for detection of helium in irradiated Ni and Cu. In *Materials Transactions*. ISSN 1345-9678, vol. 47, no. 11, pp. 2885 – 2887.

- [14] FEDOROV, A.V., VAN HUIS, M.A., VAN VEEN, A. A hot implantation study on the evolution of defects in He ion implanted MgO(1 0 0). In *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. ISSN 0168-583X, 2002, vol. 191, pp. 452–455.
- [15] LABRIM, H. et al. Vacancy defects induced in sintered polished UO₂ disks by helium implantation. In *Applied Surface Science*. ISSN 0169-4332, 2006, vol. 252, pp. 3256–3261.
- [16] LABRIM, H. et al. Thermal evolution of the vacancy defects distribution in 1 MeV helium implanted sintered UO₂. In *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, ISSN 0168-583X, 2007, vol. 261, pp. 883–887.
- [17] DUO, X. et al. Comparison between the different implantation orders in H⁺ and He⁺ coimplantation. In *Journal of Physics D: Applied Physics*. ISSN 1361-6463, 2001, vol. 34, pp. 477–482.
- [18] UEDONO, A., TANIGAWA, S., SAKAIRI, H. Detection of helium implanted into nickel by slow positrons. In *Physics Letters A*. ISSN 0375-9601, 1988, vol. 129, no. 4, pp. 249-252.
- [19] ELDRUP, M., SINGH, B. N., GOLUBOV, S. I. Final Report on Investigations of the Influence of Helium Concentration and Implantation rate on Cavity Nucleation and Growth during Neutron Irradiation of Fe and EUROFER 97. Roskilde: Risø-R-1619(EN), 2010. ISBN 978-87-550-3623-9.
- [20] SABELOVÁ, V. et al. Defect Detection in Fe-Cr Alloys with Positron Annihilation Doppler Broadening Spectroscopy. In *Materials Science Forum*. ISSN 1662-9752, 2013, vol. 733, pp. 270-273.
- [21] SATO, K. et al. Positron annihilation lifetime measurements of austenitic stainless and ferritic/martensitic steels irradiated in the SINQ target irradiation program. In *Journal of Nuclear Materials*. ISSN 0022-3115, 2012, vol. 431, pp. 52–56.
- [22] KIMURA, A. et al. Annealing behavior of irradiation hardening and microstructure in helium-implanted reduced activation martensitic steel. In *Journal of Nuclear Materials*. ISSN 0022-3115, 2000, vol. 283-287, pp. 827-831.
- [23] MATIJASEVIC, M., ALMAZOUZI, A. Effect of Cr on the mechanical properties and microstructure of Fe–Cr model alloys after n-irradiation. In *Journal of Nuclear Materials*. ISSN 0022-3115, 2008, vol. 377, pp. 147–154.
- [24] SABELOVÁ, V., et al. Characterization of helium implanted Fe–Cr alloys by means of positron annihilation methods. In *Journal of Nuclear Materials*, ISSN 0022-3115, 2014, vol. 450, pp. 54-58.
- [25] PUSKA, M. J., NIEMINEN, R. M. Defect spectroscopy with positrons: a general calculational method. In *Journal of Physics F: Metal Physics*, ISSN 0305-4608, 1983, vol. 13, pp. 333-346.

- [26] SEITSONEN A. P., PUSKA, M. J., NIEMENEN, R. M. Real-space electronic-structure calculations: Combination of the finite-difference and conjugate-gradient methods. In *Physical review B*, ISSN 1098-0121, 1995, vol. 51, no. 20, pp. 14057-14062.
- [27] KURIPLACH, J., et al. Vacancies and vacancy-oxygen complexes in silicon: Positron annihilation with core electrons. In *Physical Review B*. ISSN 1098-0121, 1998, vol. 58, no. 16, pp. 10475-10483.
- [28] MANSUR, L.K., et al. Materials needs for fusion, Generation IV fission reactors and spallation neutron sources – similarities and differences. In *Journal of Nuclear Materials*, ISSN 0022-3115, 2004, vol. 329–333, pp. 166–172.
- [29] DAI, Y., et al. Neutron/proton irradiation and He effects on the microstructure and mechanical properties of ferritic/martensitic steels T91 and EM10. In *Nuclear Materials*, ISSN 0022-3115, 2011, vol. 415, pp. 306–310.
- [30] EHRlich, K., et al. European material assessment meeting. Karlsruhe: EFDA-T-RE-2.0, 2001.
- [31] RIETH, M., et al. Eurofer97. Karlsruhe: FZKA 6911, 2003.
- [32] LINDAU, R. Inspection certificate No. 029060, Boehler, Edelstahl. 1999. Personal communication.
- [33] ZHANG, H., LONG, B., DAI, Y. Metallography studies and hardness measurements on ferritic/martensitic steels irradiated in STIP. In *Journal of Nuclear Materials*. ISSN 0022-3115, 2008, vol. 377, pp. 122-131.
- [34] DAI, Y., et al. The second SING target irradiation program, STIP-II. In *Journal of Nuclear Materials*. ISSN 0022-3115, 2005, vol. 343, pp. 33-34.
- [35] BALUC, N. L. Reduced Activation Materials. [online]. [cit: 2014-01-12]]. Available at <http://gcep.stanford.edu/pdfs/qa4ScQlicx-kve2pX9D7Yg/baluc_fusion_05_06.pdf>.
- [36] ASTM standard E384 – 11/2011, Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials, ASTM International West Conshohocken PA, March 2012, DOI: 10.1520/E0384-11E01.
- [37] MORISHITA, K., et al. Thermal stability of helium–vacancy clusters in iron. In *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, ISSN 0168-9002, 2003, vol. 202, pp. 76-81.

9. Zoznam publikácií

Články vo vedeckých časopisoch:

2014:

- [1] SABELOVÁ, V., KRŠJAK, V., KURIPLACH, J., PETRISKA, M., SLUGEŇ, V., ŠIMEG VETERNÍKOVÁ, J. Characterization of helium implanted Fe–Cr alloys by means of positron annihilation methods. In *Journal of Nuclear Materials*, ISSN 0022-3115, 2014, vol. 450, pp. 54-58. **CC**
- [2] ŠIMEG VETERNÍKOVÁ, J., KORHONEN, E., SKARBA, M., DEGMOVÁ, J., SABELOVÁ, V., SOJAK, S., SLUGEŇ, V. Study of Oxide-Dispersion-Strengthened Ferritic Steels after Ion Implantation. In *Acta Physica Polonica A*, ISSN 0587-4254, 2014, vol. 125, no. 3, pp. 741-743. **CC**
- [3] ŠIMEG VETERNÍKOVÁ, J., SLUGEŇ, V., SOJAK, S., SKARBA, M., KORHONEN, E., STANČEK, S., DEGMOVÁ, J., SABELOVÁ, V., BARTOŠOVÁ, I. Application of slow positron beam for study of commercial oxide-dispersion-strengthened steels. In *Journal of Nuclear Materials*, ISSN 0022-3115, 2014, vol. 450, pp. 99-103. **CC**
- [4] ŠIMEG VETERNÍKOVÁ, J., DEGMOVÁ, J., SABELOVÁ, V., PETRISKA, M., SLUGEŇ, V. Surface study of radiation damaged oxide dispersion strengthened steels. In *Applied Surface Science*, in press, corrected proof, ISSN 0169-4332, 2014, available online: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433214004619>> **CC**
- [5] SOJAK, S., SLUGEN, V., EGGER, W., RAVELLI, L., PETRISKA, M., VETERNIKOVA, J., STACHO, M., SABELOVÁ, V. PLEPS study of ions implanted RAFM steels. In *Journal of Physics: Conference Series*, ISSN 1742-6588, 2014, vol. 505, pp. 1-4.

2013:

- [6] SLUGEŇ, V., HEIN, H., SOJAK, S., EGGER, W., PAVÚK, M., ŠIMEG VETERNÍKOVÁ, J., PETRISKA, M., SABELOVÁ, V., HINCA, R. Microstructural Examination of Reactor Pressure Vessel Steels by Positron Annihilation Point of View. In *Progress in Nuclear Energy*, ISSN 0149-1970, 2013, vol. 62, pp. 1-7. **CC**
- [7] SLUGEŇ, V., HEIN, H., SOJAK, S., ŠIMEG VETERNÍKOVÁ, J., PETRISKA, M., SABELOVÁ, V., PAVÚK, M., HINCA, R., STACHO, M. Evaluation of the Reactor Pressure Vessel Steels by Positron Annihilation. In *Journal of Nuclear Materials*, ISSN 0022-3115, 2013, vol. 442, pp. 490-506. **CC**
- [8] SABELOVÁ, V., PETRISKA, M., ŠIMEG VETERNÍKOVÁ, J., SLUGEŇ, V., DEGMOVÁ, J., KIPELÄINEN, S. Defect Detection in Fe-Cr Alloys with Positron Annihilation Doppler Broadening Spectroscopy. In *Materials Science Forum*, ISSN 1662-9752, 2013, vol. 733, pp. 270-273.
- [9] PETRISKA, M., SABELOVÁ, V., SLUGEŇ, V., SOJAK, S., STACHO, M., ŠIMEG VETERNÍKOVÁ, J. Software for Digital Coincidence Doppler Broadening Setup. In *Materials Science Forum*, ISSN 1662-9752, 2013, vol. 733, pp. 318-321.
- [10] ŠIMEG VETERNÍKOVÁ, J., KIPELÄINEN, S., SKARBA, M., TUOMISTO, F., SLUGEŇ, V., DEGMOVÁ, J., SABELOVÁ, V., SOJAK, S. Positron Annihilation Measurements Performed on Oxide-Dispersion Strengthened Steels. In *Materials Science Forum*, ISSN 1662-9752, 2013, vol. 733, pp. 278-281.

- [11] SOJAK, S., SLUGEŇ, V., KRŠJAK, V., WERNER, R., PETRISKA, M., STANČEK, S., SKARBA, M., PRIPUTEN, P., VITÁZEK, K., STACHO, M., ŠIMEG VETERNÍKOVÁ, J., SABELOVÁ, V. Thermal Annealing Influence on Ions Implanted Fe-Cr Model Alloys. In *Materials Science Forum*, ISSN 1662-9752, 2013, vol. 733, pp. 274-277.

2012:

- [12] PETRISKA, M., SLUGEŇ, V., SABELOVÁ, V., SOJAK, S., ŠIMEG VETERNÍKOVÁ, J. QtCDB2 Software for Coincidence Doppler Broadening Measurement System. In *Journal of Physics: Conference Series*, ISSN 1742-6588, 2012, vol. 443, pp. 012086.
- [13] ŠIMEG VETERNÍKOVÁ, J., SLUGEŇ, V., STANČEK, S., DEGMOVÁ, J., SABELOVÁ, V., SOJAK, S., PETRISKA, M., HINCA, R. Positron Study of Alpha Particles Effect on Oxide-Dispersion-Strengthened Steels. In *Journal of Physics: Conference Series*, ISSN 1742-6588, 2012, vol. 443, pp. 012016.
- [14] SLUGEŇ, V., KRYUKOV, A., PETRISKA, M., ŠIMEG VETERNÍKOVÁ, J., SOJAK, S., SABELOVÁ, V., HINCA, R. PALS Combined with Charpy-V Tests at WWER Reactor Pressure Vessel Steels. In *Journal of Physics: Conference Series*, ISSN 1742-6588, 2012, vol. 443, pp. 012012.
- [15] VETERNÍKOVÁ, J., CHUDÝ, M., SLUGEŇ, V., EISTERER, M., WEBER, H. W., SOJAK, S., PETRISKA, M., HINCA, R., DEGMOVÁ, J., SABELOVÁ, V. Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy Study of Neutron Irradiated High Temperature Superconductors YBa(2)Cu(3)O(7-delta) for Application in Fusion Facilities. In *Journal of Fusion Energy*, ISSN 0164-0313, 2012, vol. 31, pp. 89-95. **CC**

2011:

- [16] SOJAK, S., SLUGEŇ, V., KRŠJAK, V., EGGER, W., RAVELLI, L., PETRISKA, M., STANČEK, S., SKARBA, M., PRIPUTEN, P., VITÁZEK, K., STACHO, M., ŠIMEG VETERNÍKOVÁ, J., SABELOVÁ, V. Different Chromium Content and Thermal Annealing Influence on Ions Implanted Fe-Cr Model Alloys. In *Physics Procedia*, ISSN 1875-3892, 2011, vol. 35, pp. 80-85.
- [17] PETRISKA, M., SABELOVÁ, V., SLUGEŇ, V., SOJAK, S., STACHO, M. ŠIMEG VETERNÍKOVÁ, J. Digital Coincidence Doppler Broadening setup at FEI STU. In *Physics Procedia*, ISSN 1875-3892, 2011, vol. 35, pp. 117-121.

Články v odborných časopisech

2011:

- [18] DEGMOVÁ, J., KRŠJAK, V., VETERNÍKOVÁ, J., SABELOVÁ, V. Destructive & Non-Destructive Testing of Model Materials for NPP'S Applications. In *EE časopis pre elektrotechniku a energetiku*, ISSN 1335-2547, 2011, vol. 17, pp. 112-114.
- [19] SABELOVÁ, V., PETRISKA, M., VETERNÍKOVÁ, J., SLUGEŇ, V., KIPELÄINEN, S. PAS Doppler Broadening Spectroscopy Application in Defects Detection in Alloys. In *EE časopis pre elektrotechniku a energetiku*, ISSN 1335-2547, 2011, vol. 17, pp. 166-170.
- [20] VETERNÍKOVÁ, J., CHUDÝ, M., SLUGEŇ, V., SOJAK, S., PETRISKA, M., SABELOVÁ, V., DEGMOVÁ, J., HINCA, R. A Study of Radiation Resistance of High Temperature Superconductors for Fusion Reactors. In *EE časopis pre elektrotechniku a energetiku*, ISSN 1335-2547, 2011, vol. 17, pp. 185-188.

Príspevky v zborníkoch

2013

- [21] SOJAK, S., SLUGEŇ, V., PETRISKA, M., ŠIMEG VETERNÍKOVÁ, J., STACHO, M., SABELOVÁ, V. Study of Ions Implanted RAFM Steels with Application of Positron Annihilation Spectroscopy. In *NENE 2013*. Bled, Slovenia, 2013, pp.314-017. ISBN 978-961-6207-36-2.
- [22] ŠIMEG VETERNÍKOVÁ, J., SLUGEŇ, V., PETRISKA, M., SKARBA, M., SOJAK, S., SOJAK, S., SABELOVÁ, V., BARTOŠOVÁ, I. Study of Structural Anisotropy of Commercial Oxide-Dispersion Strengthened Steels. In *SLOPOS-13*. Munich, Germany, 2013, pp. 83.
- [23] ŠIMEG VETERNÍKOVÁ, J., SLUGEŇ, V., SABELOVÁ, V., SOJAK, S., PETRISKA, M. Non-Destructive Study of New Construction Materials for Advanced Nuclear Reactors. In *APCOM 2013*. Štrbské Pleso, Slovak Republic, 2013, pp. 74-77. ISBN 978-80-227-3956-6.
- [24] SOJAK, S., SLUGEŇ, V., EGGER, W., RAVELLI, L., PETRISKA, M., STACHO, M., ŠIMEG VETERNÍKOVÁ, J., SABELOVÁ, V. Application of Positron Annihilation Spectroscopy for Investigation of Reactor Steels. In *APCOM 2013*. Štrbské Pleso, Slovak Republic, 2013, pp. 70-73. ISBN 978-80-227-3956-6.
- [25] SABELOVÁ, V., KRŠJAK, V., PETRISKA, M., SLUGEŇ, V. Investigation of Highly Activated Materials by Conventional Positron Annihilation Spectroscopy. In *APCOM 2013*. Štrbské Pleso, Slovak Republic, 2013, pp. 131-134. ISBN 978-80-227-3956-6.
- [26] ŠIMEG VETERNÍKOVÁ, J., STANČEK, S., SABELOVÁ, V., SKARBA, M., DEGMOVÁ, J., SLUGEŇ, V. Hélioová implantácia ODS ocelí. In *Jaderná energetika v prácich mladé generace*. Brno: TUB, 2013, pp. 175-180. ISBN 978-80-02-02439-2.
- [27] SABELOVÁ, V., PETRISKA, M., SKARBA, M., VETERNÍKOVÁ, J., SLUGEŇ, V., DEGMOVÁ, J., SOJAK, S. Pozitronová štúdia Fe-Cr ocelí. In *Jaderná energetika v prácich mladé generace*. Brno: TUB, 2013, pp. 162-165. ISBN 978-80-02-02439-2.

2012:

- [28] SABELOVÁ, V., PETRISKA, M., ŠIMEG VETERNÍKOVÁ, J., SLUGEŇ, V., KIPELÄINEN, S. Detekcia defektov vytvorených He a H Implantáciou v zliatine Fe-9Cr. In *Jaderná energetika v prácich mladé generace*. Brno: TUB, 2012, pp. 202-207. ISBN 978-80-02-0236-9.
- [29] VETERNÍKOVÁ, J., SABELOVÁ, V., KIPELÄINEN, S., DEGMOVÁ, J., SLUGEŇ, V. Použitie nedeštruktívnych techník pri skúmaní konštrukčných materiálov pre palivové pokrytie GEN IV reaktorov. In *Jaderná energetika v prácich mladé generace*. Brno: TUB, 2012, pp. 155-160. ISBN 978-80-02-0236-9.
- [30] SOJAK, S., SLUGEŇ, V., EGGER, W., RAVELLI, L., PETRISKA, M., STANČEK, S., SAHUL, M., SKARBA, M., PRIPUTEN, P., STACHO, M., ŠIMEG VETERNÍKOVÁ, J., HINCA, R., SABELOVÁ, V. PLEPS Study of Ion Implanted and Annealed Fe-11.62% Cr Alloys. In *ICPA-16*. Bristol, United Kingdom, 2012, pp. 68.
- [31] VETERNÍKOVÁ, J., TUOMISTO, F., SLUGEŇ, V., DEGMOVÁ, J., PETRISKA, M., SABELOVÁ, V., SOJAK, S., STACHO, M., HINCA, R. Positron Study of Alpha Particles Effect on Oxide-Dispersion Strengthened Steels. In *ICPA-16*. Bristol, United Kingdom, 2012, pp. 69.

- [32] SLUGEŇ, V., KRYUKOV, A., PETRISKA, M., ŠIMEG VETERNÍKOVÁ, J., SOJAK, S., SABELOVÁ, V., HINCA, R. PALS Combined with Charpy-V Tests at WWER Reactor Pressure Vessel Steels. In *ICPA-16*. Bristol, United Kingdom, 2012, pp. 55.
- [33] SABELOVÁ, V., KRŠJAK, V., PETRISKA, M., VETERNÍKOVÁ, J., SLUGEŇ, V., TUOMISTO, F. Doppler Broadening Spectroscopy Application for Detection of Radiation Damage in Fe-Cr Alloys. In *ICPA-16*. Bristol, United Kingdom, 2012, pp. 144.
- [34] PETRISKA, M., SLUGEŇ, V., SABELOVÁ, V., SOJAK, S. Fully Software Based CDB Measurement System. In *ICPA-16*. Bristol, United Kingdom, 2012, pp. 100.
- [35] SLUGEŇ, V., KRYUKOV, A., SOJAK, S., PETRISKA, M., VETERNÍKOVÁ, J., SABELOVÁ, V., HINCA, R., STACHO, M. Application of PAS and Charpy-V Tests at WWER Reactor Pressure Vessel Steels. In *APCOM 2012*. Štrbské Pleso, Slovak Republic, 2013, pp. 341-344. ISBN 978-80-227-3720-3.
- [36] SABELOVÁ, V., PETRISKA, M., VETERNÍKOVÁ, J., SLUGEŇ, V., SOJAK, S. Application of Doppler Broadening Spectroscopy for Detection of Vacancy Defects. In *APCOM 2012*. Štrbské Pleso, Slovak Republic, 2013, pp. 75-78. ISBN 978-80-227-3720-3.
- [37] VETERNÍKOVÁ, J., SLUGEŇ, V., DEGMOVÁ, J., SABELOVÁ, V., PETRISKA, M., STANČEK, S. Positron Study of Implanted ODS Steels. In *APCOM 2012*. Štrbské Pleso, Slovak Republic, 2013, pp. 79-82. ISBN 978-80-227-3720-3.
- [38] SOJAK, S., SLUGEŇ, V., KRŠJAK, V., EGGER, W., RAVELLI, L., PETRISKA, M., STANČEK, S., SKARBA, M., PRIPUTEN, P., VITÁZEK, K., STACHO, M., VETERNÍKOVÁ, J., SABELOVÁ, V., PLEPS Study of Thermal Annealing Influence on Binary Fe-11.62%Cr Alloys. In *APCOM 2012*. Štrbské Pleso, Slovak Republic, 2013, pp. 91-94. ISBN 978-80-227-3720-3.
- [39] SABELOVÁ, V., PETRISKA, M., VETERNÍKOVÁ, J., SLUGEŇ, V., TUOMISTO, F. Aplikácia spektroskopie dopplerovského rozšírenia na detekciu radiačného poškodenia Fe-Cr zliatin. In *Odborná konferencia sekcie WIN a RO SNUS*. Častá, Slovakia, 2012, pp. 12. ISBN 978-80-969943-5-9.
- [40] SABELOVÁ, V., PETRISKA, M., SLUGEŇ, V. Microstructural Damage Detection Via Coincidence Doppler Broadening Spectroscopy. In *ELITECH'12*. Bratislava, Slovak Republic, 2012, pp. 4. ISBN 978-80-227-3705-0.
- [41] VETERNÍKOVÁ, J., SLUGEŇ, V., DEGMOVÁ, J., SABELOVÁ, V., PETRISKA, M., STANČEK, S. Study of Helium Implanted ODS Steels by Positrons. In *ELITECH'12*. Bratislava, Slovak Republic, 2012, pp. 4. ISBN 978-80-227-3705-0.
- [42] SLUGEŇ, V., HEIN, H., SOJAK, S., VETERNÍKOVÁ, J., PETRISKA, M., SABELOVÁ, V., PAVÚK, M., HINCA, R. Evaluation Reactor Pressure Vessel Steels by Positron Annihilation Point of View. In *2nd Joint IAEA-EC Topical Meeting*. Ispra, Italy, 2012, pp. 75.
- 2011:**
- [43] SABELOVÁ, V., PETRISKA, M., VETERNÍKOVÁ, J., SLUGEŇ, V., DEGMOVÁ, J., KIPELÄINEN, S. Defects Detection in Fe-Cr Alloys with Using Positron Annihilation Doppler Broadening Spectroscopy. In *PPC-10*. Smolenice, Slovakia, 2011, pp. 90.

- [44] PETRISKA, M., SABELOVÁ, V., SLUGEŇ, V., SOJAK, S., STACHO, M., VETERNÍKOVÁ, J. Software for Digital Coincidence Doppler Broadening Setup. In *PPC-10*. Smolenice, Slovakia, 2011, pp. 89.
- [45] SOJAK, S., SLUGEŇ, V., KRŠJAK, V., EGGER, W., RAVELLI, L., PETRISKA, M., STANČEK, S., VITÁZEK, K., STACHO, M., VETERNÍKOVÁ, J., SABELOVÁ, V. Thermal Annealing Influence on Ions Implanted Fe-Cr Model Alloys. In *PPC-10*. Smolenice, Slovakia, 2011, pp. 73.
- [46] SLUGEŇ, V., VETERNÍKOVÁ, J., SABELOVÁ, V., DEGMOVÁ, J., HINCA, R., PETRISKA, M., SOJAK, S. Vacancy Type Defects in Oxide Dispersion Strengthened Steels. In *PPC-10*. Smolenice, Slovakia, 2011, pp. 33.
- [47] SLUGEŇ, V., VETERNÍKOVÁ, J., SABELOVÁ, V., DEGMOVÁ, J., HINCA, R., -- PETRISKA, M., SOJAK, S. Study of Residual Stress and Vacancy Defects in Oxide Dispersion Strengthened Steels. In *PSD-11*. Delft: TU, Netherlands, 2011, pp. 47.
- [48] PETRISKA, M., SABELOVÁ, V., SLUGEŇ, V., SOJAK, S., STACHO, VETERNÍKOVÁ, J. Digital Coincidence Doppler Broadening Setup at FEI STU. In *PSD-11*. Delft: TU, Netherlands, 2011, pp. 43.
- [49] SOJAK, S., SLUGEŇ, V., KRŠJAK, V., EGGER, W., RAVELLI, L., PETRISKA, M., STANČEK, S., VITÁZEK, K., STACHO, M., VETERNÍKOVÁ, J., SABELOVÁ, V. Different Chromium Content and Thermal Annealing Influence on Ions Implanted Fe-Cr Model Alloys. In *PSD-11*. Delft: TU, Netherlands, 2011, pp. 14.
- [50] SABELOVÁ, V., PETRISKA, M., VETERNÍKOVÁ, J., SLUGEŇ, V., KIPELÄINEN, S. Comparison of He and H Effects in Fe-9Cr and Fe-12Cr Alloys with Using PAS Application in Defects Detection. In *PSD-11*. Delft: TU, Netherlands, 2011, pp. 70.
- [51] KIPELÄINEN, S., PETRISKA, M., SABELOVÁ, V., SLUGEŇ, V., VETERNÍKOVÁ, J. PAS Application in Defects Detection in Fe-9Cr and Fe-12Cr Alloys. In *ENYGF 2011*. Prague, Czech Republic, 2011, pp. 60. ISBN 978-80-02-02320-3.
- [52] SLUGEŇ, V., STACHO, M., SABELOVÁ, V., PETRISKA, M. Advanced Evaluation of Spent Fuel in Long Term VVER Storage in Slovakia. In *ICAPP 2011*. Nice, France, 2011, pp. 2136-2139.
- [53] SLUGEŇ, V., SOJAK, S., EGGER, W., KRŠJAK, V., VETERNÍKOVÁ, J., SABELOVÁ, V., STACHO, M. Influence of Chromium in Defects Production in Fe-Cr Alloys. In *ICAPP 2011*. Nice, France, 2011, pp. 2425-2429.
- 2010:**
- [54] SLUGEŇ, V., VETERNÍKOVÁ, J., DEGMOVÁ, J., KRŠJAK, V., PETRISKA, M., SOJAK, S., SABELOVÁ, V., HINCA, R., STACHO, M. Radiation Resistant Steels for HTRs. In *5th International Conference on High Temperature Reactor Technology*. Prague, Czech Republic, 2010.
- [55] SABELOVÁ, V., KLIMENT, T., SLUGEŇ, V., KVIZDA, B. Safety Analysis of the Initiating Event "Trip of Main" Circulation Pumps at Mochovce NPP Unit 1 Using Conservative and Best Estimates Approaches and Uncertainty Evaluation of Base Criterion Parameter. In *Jadrenata energija za chorata*. Nessebar, Bulgaria, 2010, pp. 16.
- [56] KUBAČKA, J., SLUGEŇ, V., JANČOVIČ, J., REMIŠ, J., BALÁŽ, J., SABELOVÁ, V. Dynamics of Hydrogen in the Containment of a Nuclear Unit during Severe Accidents. In *Jadrenata energija za chorata*. Nessebar, Bulgaria, 2010, pp. 16.

- [57] SABELOVÁ, V. Bezpečnostná analýza iniciačnej udalosti "Výpadok hlavných cirkulačných čerpadiel na 1. bloku JE Mochovce" konzervatívnym a realistickým prístupom a vyhodnotenie neurčitosti základných kritériálnych parametrov. In *ŠVOČ 2010*. Bratislava, Slovak Republic, 2010. ISBN 978-80-227-3286-4.
- [58] SABELOVÁ, V., SLUGEŇ, V. Bezpečnostná analýza iniciačnej udalosti "Výpadok hlavných cirkulačných čerpadiel". In *Jaderná energetika v prácich mladá generace*. Brno: TUB, 2013, pp. 40-50. ISBN 978-80-02-02288-6.