

ALLEGRO - plynom chladený rýchly reaktor

Pecko Stanislav · Elektrotechnika, Študentské práce

16.11.2011



V tejto práci sa zaoberáme rýchlym plynom chladeným reaktorom (GFR) z IV. generácie, konkrétne plánovaným demonštračným prototypom GFR - Allegro. Venujeme sa hlavne problému pokročilých konštrukčných materiálov, ktoré budú využívané pri stavbe GFR reaktorov a budú musieť zniesť vysoké radiačné a tepelné namáhanie v prostredí s plynným chladiacim médiom. Zamerali sme sa na komerčné ODS ocele, konkrétne typy ODM751 a MA957, ktoré boli skúmané pomocou pozitronovej anihilačnej spektroskopie (PAS). Sledovali sme hustotu mriežkových defektov v čistých nepoškodených vzorkách ODS ocelí, čiže výskyt apriórnych defektov vzniknutých pri výrobe.

1. Úvod

Štvrtá generácia rýchlych jadrových reaktorov prinesie recykláciu zásob vyhoreného jadrového paliva, transmutáciu minoritných aktinoidov a lepšie využitie energetického potenciálu skrytého v uráne. Tak teoreticky vzrastie zabezpečenie elektrickej energie, so súčasne známymi ložiskami uránu, až na približne 1000 rokov. Táto práca je venovaná plynom chladeným rýchlym reaktorom IV. generácie a vplyvu rýchlych neutrónov na ich konštrukčné materiály. Konštrukčné materiály budú musieť zniesť omnoho vyššie radiačné poškodenie, vyššie teploty a tlak ako súčasné reaktory. Výskum týchto materiálov je prioritou pre realizáciu výstavby GFR.

Štúdium ODS materiálov, ako budúcich perspektívnych konštrukčných materiálov GFR, je súčasťou tejto vedeckej práce. Výskum a meranie vzoriek kandidátnych ocelí pre konštruovanie GFR prebehlo na Katedre jadrovej fyziky a techniky, Fakulty elektrotechniky a informatiky, Slovenskej Technickej Univerzity v Bratislave pomocou pozitronovej anihilačnej spektroskopie. Skúmali sme vzorky vysokochrómových ODS ocelí ODM751(16% Cr) a MA957 (14% Cr).

2. Rýchle jadrové reaktory IV. generácie

Rýchle jadrové reaktory využívajú na udržanie štiepnej reakcie rýchle neutróny, a preto nepotrebujú byť moderované. Použitím rýchlych neutrónov klesá účinný prierez jadier uránu, čo má za následok nutnosť zvýšiť obsah štiepneho materiálu alebo neutrónového toku, aby mohla byť jadrová reakcia udržateľná. Obohatenie paliva pre rýchly reaktor (FNR) môže dosahovať viac než 20% U^{235} alebo Pu^{239} [1]. Prítomnosť rýchlych neutrónov znamená väčšie energetické a tepelné nároky na reaktor oproti

tepelným reaktorom, čo značí vysoké nároky na chladivo a konštrukčný materiál použitý v FNR.

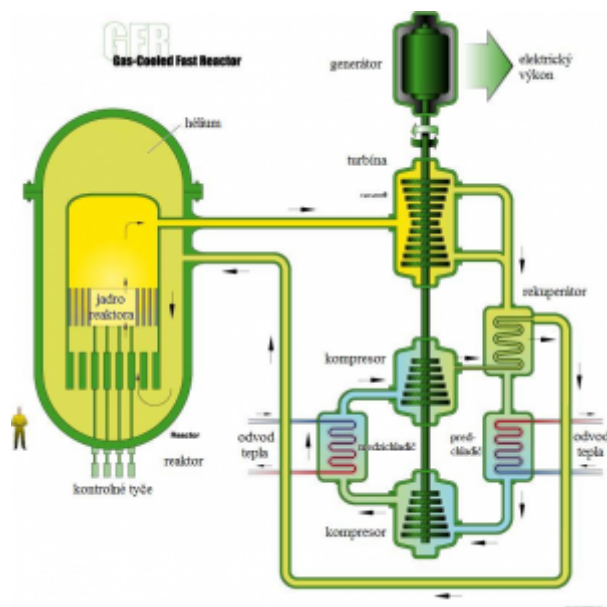
Výhodou FNR oproti tepelným reaktorom je ich schopnosť redukovať jadrový odpad a rapídne znížiť jeho dobu polpremeny. Rýchle neutróny dokážu transmutovať minoritné aktinoidy na typické štiepne produkty, ktoré majú maximálnu dobu polpremeny 27 rokov [2]. Nevýhody FNR sú prevažne technických príčin. Hlavnou z nich je samotné použitie rýchlych neutrónov ($E_n > 100 \text{ keV}$), čo zapríčiňuje značné namáhanie materiálov v aktívnej zóne. Problémom je taktiež chladenie, na ktoré nie je možné použiť zaužívané chladiace média, ale chladivá s vyššou účinnosťou chladenia aktívnej zóny (AZ, teplota $\sim 850^\circ\text{C}$).

Rýchle jadrové reaktory IV. generácie sú vyústením potreby efektívnejšej hospodárnosti prevádzky jadrových elektrární z hľadiska využitia, čo najväčšieho podielu energie ukrytej v jadrovom palive. Zvyšovanie cien uránu a dopytu po elektrickej energii vo svete, neutíchajúce otázky, ako naložiť s vyhoreným jadrovým palivom, sa odrazili v IV. generácií jadrových reaktorov. Ich základnými rysmi budú bezpečnosť, ekonomickosť, efektívnosť, spoľahlivosť, udržateľnosť a dobrá realizovateľnosť.

Plynom chladený rýchly jadrový reaktor (GFR) je len jeden z konceptov reaktorov 4. generácie. Ďalšie sú: sodíkom chladený rýchly reaktor (SFR) a olovom chladený rýchly reaktor (LFR). Každý z nich používa na chladenie iný typ chladiaceho média, ktoré ma svoje špecifické výhody aj nevýhody. Problémy tvorené radiačným poškodením materiálov rýchlymi neutrónmi majú ale v zásade identické.

3. Plynom chladené rýchle reaktory (GFR)

Základom je využitie rýchlych neutrónov na udržanie štiepnej reakcie, uzavretý palivový cyklus a chladenie plynom. Chladenie sa bude uskutočňovať pomocou hélia alebo superkritického oxidu uhličitého [3]. Záujem o chladenie plynom je najmä možnosť využitia vysokej teploty (okolo 850°C), ktorá sa dá výhodne použiť na efektívnejšiu výrobu elektrickej energie (účinnosť až 48% pri použití priamej Braytonovej turbíny) a ďalšie priemyselné využitie vďaka vysokému tepelnému prenosu (termochemická výroba vodíka) [4]. Prehľadnosť systému (jednoduchšia schéma), nižšia aktivita materiálov a nízke riziko nehôd so zásahom do okolia sú ďalšie z jeho výhod.



Obr. 1. Schéma GFR.

3.1 Chladienie plynom

Plynné chladiivo má svoje špecifické výhody a nevýhody oproti chladieniu tekutými kovmi, ktoré sú zatiaľ považované za referenčné chladiivo pre rýchle reaktory. Ako hlavné chladiivo sa uvažuje pri GFR použitie hélia, ktorého má nasledujúce výhody:

- Chemická kompatibilita s vodou.
- Zanedbateľná aktivácia chladiiva.
- Optická priehľadnosť - vyššia bezpečnosť.
- Plyn nemôže v reaktore zmeniť skupenstvo.
- Zníženie možných výkyvov reaktivity.
- Zníženie kladného dutinového efektu.
- Plynné chladiivo vo všeobecnosti umožňuje použiť vysoko energetické neutrónové spektrá.
- Vzhľadom na to, že plynné chladiivo má nižšiu hustotu, je v jadre možné použiť väčšie chladiace množstvo bez zvýšenia neprijateľných parazitných záchyto.
- Vysoký tepelný prenos (výroba vodíka).

Nevýhody chladienia plynom sú:

- Väčšia vlastná spotreba elektrárne (stlačiteľnosť plynu - veľký čerpací výkon).
- Potreba udržiavať vysoký tlak v systéme.
- Nutné náhradné zdrsnenie plášťa na udržanie prijateľnej teploty opláštenia.
- Vysoká rýchlosť prúdenia chladiiva (kmitanie palivových prúto - riziko poškodenia).
- Odber štiepneho tepla z jadra s vysokou hustotou výkonu (rýchla odozva, vysoká spoľahlivosť systémov).
- Difúzia hélia cez konštrukčné materiály a jeho únik z primárneho okruhu.

3.2 Konštrukčné materiály

Téma konštrukčných materiálov je pri navrhovaní GFR jedna z najdôležitejších. Vysoká teplota a vysoký neutrónový tok rýchlych neutrónov v jadre reaktora predstavujú skutočnú výzvu pre materiálový výskum. Špeciálne zliatiny, ktoré budú použité v GFR,

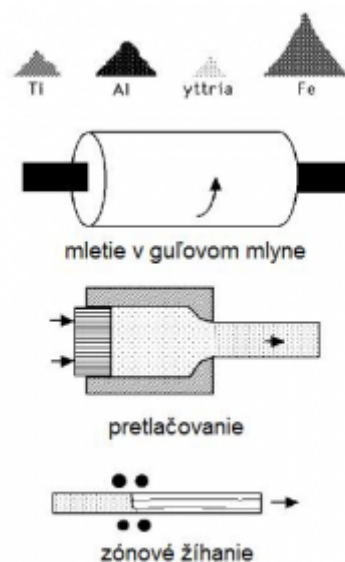
sú stále v štádiu výskumu a vývoja. Robia sa pokusy s ich odolnosťou voči rýchlym neutrónom, voči vysokej teplote, voči vplyvom hélia, korózii, starnutiu a iným vplyvom. Materiál napr. tlakovej nádoby reaktora bude musieť vydržať 60 rokov prevádzky jadrového zariadenia.

Ako najvhodnejšie materiály pre palivové pokrytie sa zatiaľ zdajú ODS ocele (Oxide Dispersion-Strengthened), ktoré nájdu široké využitie v reaktoroch IV. generácie. Rovnako sa s nimi uvažuje vo fúzných reaktoroch, turbínach, automobilových turbách alebo ako tepelná ochrana vesmírnych lodí.

3.3 ODS zliatiny

ODS zliatiny majú vylepšenú odolnosť proti vysokoteplotnej korózii a tlaku pri teplotách až do 1350°C [5]. Ich odolnosť je založená na legovaní prvkami (zvyšovanie prímiesových prvkov v oceli za účelom zlepšenia mechanických vlastností) - chróm (Cr), kremík (Si), hliník (Al) a vytvorením disperzného spevnenia v kryštalickej mriežke. Odolnosť sa ešte môže zvýšiť nanosením ochrannej vrstvy oxidov na povrch zliatiny. Na to sa využíva ochranná vrstva Y_2O_3 .

Zliatiny možno pripraviť nielen pomocou tavenia (bežné ocele), ale aj za použitia mechanickej sily deformáciou zmesí rôznych druhov materiálových práškov (Obr. 2) - disperziou. Použitím tejto metódy možno v mikroštruktúre relatívne homogénne prerozdeliť inertné oxidy. Disperzne spevnené legujúce prášky sú potom pomocou izostatického lisovania za tepla a pretlačovania formované do výslednej tuhej hmoty, ktorá sa vyznačuje veľmi jemnozrnnou štruktúrou. Následným rekryštalizačným žiňaním možno dosiahnuť hrubšie zrno, prípadne jemné rovnoosé zrná [6].



Obr. 2. Výrobný proces ODS zliatín.

ODS ocele majú značné výhody [5]:

- Môžu byť obrábané, spracované, zvarované, tvarované a strihané známymi technologickými postupmi.
- Vytvára sa ochranná oxidová vrstva, ktorá je samo-obnovovacia.

- Táto vrstva oxidov je stabilná a má vysoký emisný koeficient
- Umožňujú dizajn tenkostenných štruktúr.
- Odolnosť voči drsným poveternostným podmienkam v troposfére.
- Nízke náklady na údržbu.
- Nízke náklady na základný materiál.

Nevýhody ODS ocelí [5]:

- Majú väčšiu objemovú rozťažnosť ako iné materiály, čo spôsobuje vyššie tepelné namáhanie.
- Vyššia hustota a väčšia hmotnosť.
- Nižšia vrubová húževnatosť a vyššia teplota prechodu medzi krehkým a húževnatým lomom.

Mechanické vlastnosti ODS ocelí [5]:

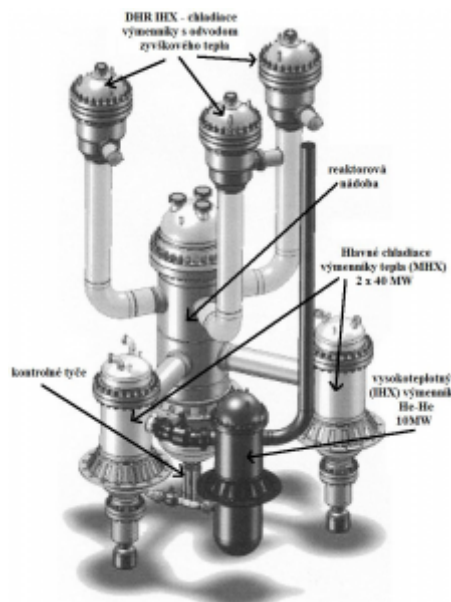
- Youngov modul pružnosti je cca o 50% vyšší ako v nezosilnených materiáloch.
- Pevnosť v ťahu je zvýšená dôsledkom radiačného spevnenia bez straty celkovej ťažnosti.
- Medza klzu - vynikajúca pevnosť pri zvýšených teplotách.
- Ťažnosť - vyššia odolnosť pred tlakom, ale s nižšou tvárnosťou.
- Vynikajúca tepelná stabilita.
- Rýchlosť tečenia - znížená o 6 rádo, čo je zásadný pokrok pre použitie feritických zliatin pre vysokotepelné štruktúrne použitie.
- Vynikajúce únavové vlastnosti v porovnaní s konvenčnými zliatinami vďaka rozdielom v mikroštruktúre.
- Nižšia radiačná a vyššia koróznna odolnosť.

ODS materiály nájdu široké uplatnenie v aktívnej zóne reaktora, v chladiacich potrubíach a prívodoch, a ako pokrytie palivových prúto. Okrem radiačného a tepelného namáhania konštrukčných materiálov majú nezanedbateľný vplyv na stabilitu a funkčnosť aj chemické vplyvy nečistôt v hélíu a nečistôt v oceli, ktoré vplyvom vysokej teploty difundujú do zliatin ľahšie.

4. Allegro

Projekt Allegro (Obr. 3) bude prvý rýchly plynom chladený reaktor na svete. Pôjde o experimentálny prototyp (primárne nebude vyrábať elektrickú energiu) určený na demonštráciu životaschopnosti technológie GFR ako alternatívnej technológie ku SFR a na testovanie a výskum pokročilých materiálov vplyvom rýchlych neutrónov. Výskum a testovanie bude prebiehať takmer na všetkých komponentoch Allegra, ktoré sú technologickými novinkami vyvinutými priamo pre GFR aplikácie.

Podstatná časť sa bude venovať výskumu nových zdokonalených palív z keramických kompozitov, transmutácií minoritných aktinoidov a vplyvom hélia, radiácie a vysokého tepla na jednotlivé komponenty. Dôležitým bodom bude taktiež poukázať schopnosť plynového chladiča dostatočne účinne a spoľahlivo odvádzať zvyškové rozpadové teplo pri odstávke. Reaktor bude ďalej slúžiť ako vedecké a výskumné centrum, ktoré je nevyhnutné v ďalšej etape výstavby reaktorov IV. generácie. Bude sa musieť zvládnuť a overiť doporučená bezpečnosť a konkurencieschopnosť prevádzky GFR.



Obr. 3. Schéma primárnych systémov Allegra.

Dôležitým bodom vývoja Allegra je využitie synergie s vývojom VHTR reaktorov. Pre oba systémy je spoločné využitie hélia ako chladiva a koncept plynovej turbíny na premenu energie. Materiálový výskum komponentov pre VHTR sa týka z väčšej časti aj GFR. Výhodou vývoja Allegra je, že je nutné vyriešiť len vývoj, ktorý je špecifický pre GFR. Keďže Allegra bude dosahovať relatívne malý výstupný výkon, tak by bolo neefektívne ho pripojiť do distribučnej siete elektrickej energie [7].

Allegra bude malý experimentálny reaktor s výkonom okolo 80 MW. Hustota výkonu je však porovnateľná s budúcimi komerčnými GFR a to 100 MW/m^3 . Maximálne radiačné poškodenie dosiahne až 30-100 dpa v tlakovej nádobe, na niektoré časti to môže byť aj viac ako 100 dpa [3]. Prevádzka Allegra bude mať tri odlišné fázy založené na rôznych konfiguráciách paliva v aktívnej zóne [8]:

1. Základný typ, založený na klasickom MOX palive, kde prevádzkové parametre aktívnej zóny budú nižšie: $T_{\text{vstup}}=260^\circ\text{C}$, $T_{\text{výstup}}=530^\circ\text{C}$, $T_{\text{maxMOX}}=1050^\circ\text{C}$.
2. Modifikovaný typ, založený na MOX palive, kde niektoré z palivových článkov budú nahradené za pokročilé žiaruvzdorné keramické články.
3. Plne keramický typ, kde sú všetky palivové články keramické, parametre aktívnej zóny dosahujú maximálne prevádzkové teploty: $T_{\text{vstup}}=400^\circ\text{C}$, $T_{\text{výstup}}=850^\circ\text{C}$.

5. Experiment

5.1 Popis meraných vzoriek

Pomocou pozitronovej anihilačnej spektroskopie som meral dva typy nádejných materiálov pre konštrukciu reaktorov IV. generácie, a to vzorky MA957 a ODM751. Oba typy sú zástupcovia ODS ocelí. Ide o komerčne vyrábané produkty, konkrétne vzorku MA957 vyrobila spoločnosť INCO Metals a ODM751 spoločnosť Dour Metal, s.r.o. Proces výroby oboch typov je rovnaký, a to mechanickým legovaním za tepla z práškových zmesí s prímiesou Y_2O_3 .

Vzorky pred meraním neboli nijak mechanicky upravované, ich povrch bol hladký a vyleštený, aby nedošlo ku skresleniu merania rôznymi nečistotami. Nominálne

chemické zloženie vzoriek je uvedené v tabulke (Tab. 1). Vzorky neboli pred meraním nijako mechanicky, tepelne alebo radiačne namáhané, ide o vzorky priamo z výroby. Našou úlohou bolo zistiť výskyt apriórnych defektov v nepoškodených vzorkách.

Tab.1. chemické zloženie meraných vzoriek.

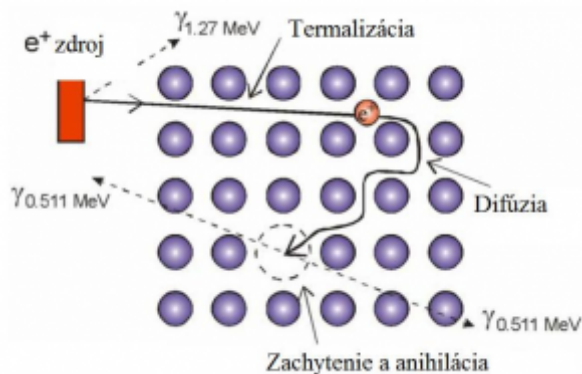
Prímesy/vzorka	MA957	ODM751
C	0,03	0,01
Cr	14	16
Al	-	4,5
Mo	0,3	1,5
Ti	1	0,6
N	0,012	-
Y₂O₃	0,27	0,5
Fe	zvyšok	zvyšok

Z chemického zloženia je zrejmé, že najväčší rozdiel vo vzorkách je v prímеси chrómu, hliníka a Y₂O₃. Prítomnosť chrómu zlepšuje tepelnú pevnosť, znižuje sa tepelná a elektrická vodivosť, teplotná rozťažnosť, vrubová húževnatosť a zvariteľnosť. Karbidy chrómu zvyšujú pevnosť ocelí a odolnosť voči oteru. Prísada Cr nad 13% robí oceľ odolnou voči korózii a iným chemickým vplyvom. Pevnosť v ťahu sa zvyšuje o 80 až 100 MPa na každé 1 % chrómu. Chrómové ocele sú odolnejšie proti popuštění.

Hliník je silný dezoxidačný prostriedok. Pôsobí aj proti starnutiu ocele a v malých dávkach podporuje jemnozrnnosť. Titán je feritotvorný prvok, ktorý pôsobí silne dezoxidačne, viaže síru a tvorí karbidy. Používa sa pre zjemnenie zrna. Dusík je nežiaduci prvok znižujúci húževnatosť a podmienujúci výskyt medzikryštalickej korózie [9]. Prímes Y₂O₃ zabezpečuje vyššiu pevnosť pri tečení ocele a zabraňuje odlupovaniu hliníkovej ochrannnej vrstvy záchytnom síry na rozhraní kryštalickej mriežky, a tým znižuje jej vylučovanie na rozhranie oxid/kov. Prerozdelenie Y₂O₃ je najväčšie na povrchu zliatiny (najväčšia hustota Y₂O₃ je 8-20 nm pod povrchom).

5.2 Pozitrónová anihilačná spektroskopia

Základom pozitronovej anihilačnej spektroskopie (PAS) je elektromagnetická interakcia medzi elektrónom a jeho antičasticou - pozitronom, pri ktorej dochádza k ich vzájomnej anihilácii. Pri tejto anihilácii sa vyžiarí dvoma na seba kolmými gamma lúčmi známa energia 511 keV ($E_0 = m_0 c^2$). Pozitron má v materiáli výbornú pohyblivosť a má sklon difundovať do oblasti so zníženou hustotou častíc látky, ktorá značí defekt materiálu (Obr. 4).



Obr. 4. Schéma pozitronovej anihilácie.

Princípom PAS je meranie dĺžky života pozitronu od vzniku pozitronu po jeho anihiláciu s elektrónom. Podľa dĺžky života častice je možné určiť veľkosť defektov a ich koncentráciu. Dlhšia doba života častice značí anihiláciu do miesta so zníženou hustotou častíc látky v meranom objekte, čo znamená prítomnosť defektu vakančného typu.

PAS je citlivá nedeštruktívna metóda, ktorá slúži na detekciu objemových defektov pevných materiálov v blízkosti povrchu. Hĺbka schopnosti detekcie PAS sa pohybuje rádovo už od desiatok nm až do stoviek μm pod povrchom látky. Rozlišovacia schopnosť je relatívne vysoká, dokáže rozoznať 1 defekt na 10^8 atómov.

Pomocou PAS meriame dobu života pozitronov LT (lifetime), ktorá závisí od elektrónovej hustoty meraného materiálu. Menej elektrónov v kryštalickej mriežke materiálu značí menšiu hustotu a nepravidelnosť v štruktúre. Dĺžka života pozitronov je teda väčšia a podľa jej veľkosti a intenzity môžeme posudzovať poškodenie a nepravidelnosti materiálu.

Výstupom PAS je spektrum dôb života pozitronov spracované pre milión meraní, ktoré je charakteristické exponenciálnym rozdelením nameraných dôb života. Správnosť merania sa zisťuje porovnaním s referenčným spektrom ideálne homogénneho bezdefektného materiálu, v prípade našej aparatúry na KJFT ide o kremík s minimálnym množstvom defektov.

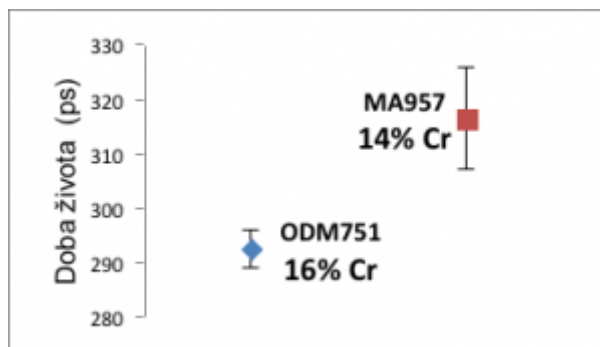
Namerané spektrum sa ďalej vyhodnocuje preložením lineárnymi funkciami, ktoré charakterizujú predpokladané časy doby života pozitronov v jednotlivých komponentoch v meranej vzorke (meraná oceľ, anihilácia vo vzduchu a predpokladané množstvo defektov). Keďže poznáme pre známe typy defektov k nim priradené doby života pozitronov, tak potom môžeme zistiť z nameraných údajov, aké priemerné defekty sa v štruktúre materiálu nachádzajú. Z intenzít pozitronovej anihilácie vieme vypočítať aj koncentráciu daného defektu, ktorá je intenzite priamo úmerná. S rastom defektov, rastie aj stredná doba života pozitronov - MLT (1).

$$MLT = \sum_i \tau_i I_i \quad [ps] \quad (1)$$

6. Výsledky merania

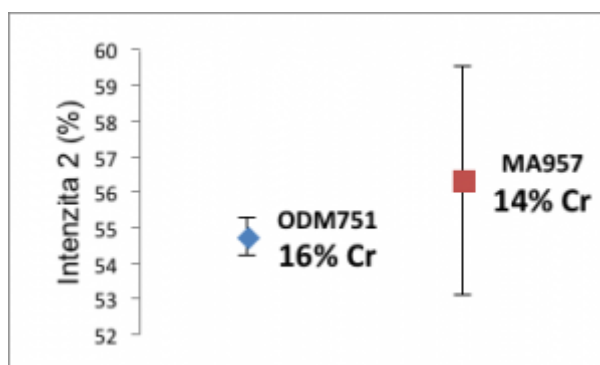
Namerané údaje som spracoval v programe Lifetime 9 a z vyhodnoteného spektra som v programe Microsoft Excel spracoval do grafov pre lepšiu prehľadnosť. Fit variance

(parameter charakterizujúci presnosť fitovania) bol pre obe vzorky nižší ako 1,07, čo značí relatívne presné výsledky s chybou vplyvom spracovania dát do 0,1%.



Graf 1. Dĺžka života pozitronov v defektoch.

Pre materiál ODM751 dosiahla doba života pozitronov v defektoch $LT_2 = 292$ ps, čo značí prítomnosť defektov vakančného typu o rozsahu 5-6 vakancií. Materiál MA957 mal dobu života pozitronov v defektoch 316 ps, čo značí väčšie zoskupenie defektov ako pri ODM751, konkrétne už môže ísť o zoskupenie 6-8 vakancií.



Graf 2. Intenzita defektov v materiáli.

Intenzita výskytu defektov (Graf 2.) sa pre jednotlivé materiály nelíšila výrazne, pre MA957 to bolo 56,3% anihilácií v defektoch a pre ODM751 54,73%.



Graf 3. Stredná doba života pozitronov.

Stredná doba života pozitronov MLT (Graf 3.) je priamo úmerná výskytu defektov v materiáli a z grafu je zrejmé, že materiál ODM751 má oproti MA957 menej defektov v kryštalickej mriežke. Ide o materiály nové, ktoré neboli radiačne alebo tepelne namáhané. Z pohľadu počiatočnej čistoty štruktúry je teda vhodnejší materiál ODM751. Ale pre spoľahlivú interpretáciu údajov by bolo nutné urobiť merania aj pri radiačnom poškodení. Vzhľadom na prítomnosť chrómu v zliatinách vychádza, že vyšší

obsah chrómu značí prítomnosť menších vakancií (lifetime) a aj ich menšiu koncentráciu (intenzita).

7. Záver

Rýchle plynom chladená reaktory IV. generácie sú veľmi perspektívnymi zariadeniami do budúcnosti, ktoré prispejú lepšou udržateľnosťou a účinnosťou palivového cyklu. Budú sa podieľať na odbúravaní minoritných aktinoidov zo súčasných zásob vyhoreného jadrového paliva a na likvidácii jadrových zbraní. Ich vysoká energetická účinnosť použitím priamej plynovej turbíny a vysoký tepelný prenos na výrobu vodíka sú nádejné cesty k prispeniu riešenia nedostatku energií.

ODS zliatiny sú veľmi perspektívne ocele, ktoré čaká široké využitie v tepelných a radiačných zariadeniach. Ešte je nutné spraviť veľa meraní a pokusov, hlavne pri radiačnom poškodení, ktoré ozrejmia správanie a životnosť ODS zliatin pri použití v rýchlych reaktoroch. V experimentálnom meraní sme zistili odlišnosť vzoriek MA957 a ODM751vzhľadom na obsah vakančných defektov v štruktúre. Zistili sme, že väčším obsahom chrómu v zliatine klesla hustota vakancií a mierne aj ich koncentrácia.

Literatúra

1. Nuclear Power Reactors, World Nuclear Association, WILSON, P.D., 1996, The Nuclear Fuel Cycle, OUP, Dostupné na internete <http://www.world-nuclear.org/info/inf32.html>
2. HANNUM, William H., MARSH, Gerald E. a STANFORD George S., Smarter Use of Nuclear Waste, Scientific American, December 2005.
3. CORWIN, W., SNEAD L., ZINKLE, S., The Gas Fast Reactor (GFR) Survey of Materials Experience and R&D Needs to Assess Viability, 30 April, 2004.
4. HUSSEIN Khalil, The Gas-cooled Fast Reactor System, Argonne National Laboratory
5. GHELANI, Rahim, Oxide Dispersion-Strengthened (ODS) Materials, Mechanical & Aerospace Engineering Department, UCLA, April 10, 2009.
6. BHADESHIA, Harry, Lecture 4: Mechanical Alloying, Case Study, Thermodynamics and Phase Diagrams, University of Cambridge, 2005.
7. STAINSBY, R., PEERS, K., MITCHELL, C., a ostatní, Gas cooled Fast Reactor Research and Development In European Union, Science and Technology of Nuclear Installations, Volume 2009 (2009), Article ID 238624.
8. COGNET, G., A first step towards Generation-4 Gas Fast Reactors (GFR), The ALLEGRO Project, CEA, 2010.
9. PULC, V., HRNČIAR, V., GONDÁR, E., Náuka o materiáli, STU Bratislava, 2004.

Spoluautori článku sú Ing. Jana Veterníková a Prof. Ing. Vladimír Slugeň, DrSc, Katedra jadrovej techniky a fyziky, Fakulta Elektrotechniky a Informatiky, Slovenská Technická Univerzita, Ilkovičova 3, Bratislava 812 19

Práca bola prezentovaná na Študentskej vedeckej a odbornej činnosti (ŠVOČ 2011) v sekcii Fyzikálne inžinierstvo II, ISBN 978-80-227-3508-7
