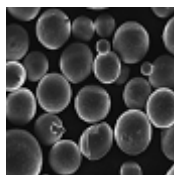


## Výskum konštrukčných materiálov štvrtej generácie jadrových reaktorov

Bartošová Iveta · Nezaradené

23.09.2011



Tento článok sa orientuje na novú generáciu jadrových reaktorov vyvíjaných v rámci medzinárodného výskumného programu GEN IV. S inovatívnymi reaktormi novej generácie musia napredovať aj materiály, ktoré by dokázali udržať vysoký štandard vlastností, v súlade so zvýšenými nárokmi na konštrukciu jadrových elektrární. V práci sú bližšie popísané tri rôzne typy ocelí: austenitická oceľ NF 709, ferito-martenzitická oceľ EUROFER a disperznými časticami spevnená oceľ ODS EUROFER.

Mikroštruktúra týchto ocelí bola skúmaná pomocou Pozitrónovej anihilačnej spektroskopie. Získané výsledky porovnáme so známymi výsledkami z meraní vrúbovej húževnatosti (Charpy test), čím si priblížime celkové správanie sa jednotlivých materiálov.

### 1. Úvod

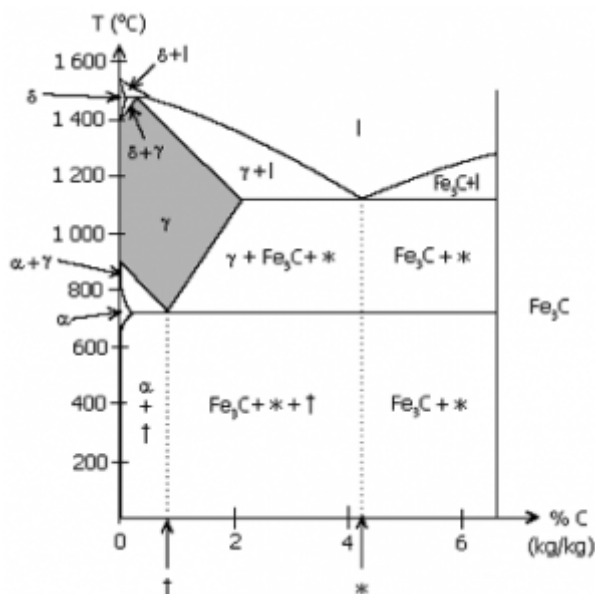
Šesť konceptov nových jadrových reaktorov bolo vybraných medzinárodným výskumným programom GEN IV spomedzi ostatných na ďalšie skúmanie a rozvoj. Medzi hlavné ciele GEN IV patrí zvýšená bezpečnosť, zamedzenie zneužitia jadrového paliva na výrobu zbraní, minimalizovanie rádioaktívneho odpadu a využitie prírodných zdrojov, rovnako ako zníženie nákladov na výstavbu a prevádzku jadrových elektrární.

Výhodami novej generácie JR v porovnaní so súčasnými jadrovými zdrojmi sú: podstatne nižšia doba rozpadu jadrového odpadu, zefektívnenie výroby (100 až 300 násobne) a možnosť využitia tóriového paliva a MOX paliva v uzavretom palivovom cykle [1]. Vysoké prevádzkové teploty, radiačné namáhanie a následné zmeny mechanických vlastností komponentov týchto reaktoroch, nútia vedcov na celom svete skúmať a zdokonaľovať konštrukčné materiály, aby odolávali nepriaznivým vplyvom s čo najmenšou zmenou mechanických vlastností.

### 2. Austenitické ocele

Austenit je tuhý roztok uhlíka v železe. Hovorí sa mu aj gama-železo. Jeho kryštály sú svetlosivej farby, mäkké, húževnaté a tvárne. Nie je magnetický. Austenit má kubickú plošne centrovanú štruktúru. V uhlíkových a nízkolegovaných austenitických oceliach sa austenit vyskytuje iba pri vysokej teplote (Obr. 1), len v niektorých vysokolegovaných oceliach (niklom a mangánom) zostáva v oceli aj pri izbových

teplotách. Austenitická chróm-niklová ocel je najpoužívanejším druhom antikorového materiálu s veľmi dobrou odolnosťou voči korózii, tvárnosťou za studena a zvárateľnosťou. Vyznačuje sa odolnosťou voči vode, vodnej pare, vlhkosti vzduchu, slabým organickým a anorganickým kyselinám.



Obr.1 Fázový diagram sústavy Fe-Fe<sub>3</sub>C. Oblasť austenitu je označená písmenom γ.

## 2.1. NF709

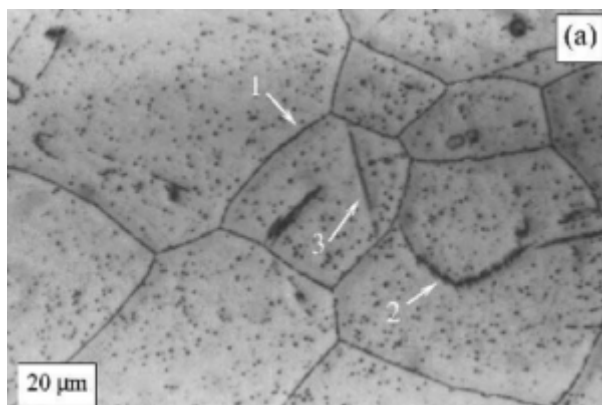
Materiál NF709 je vyrábaný v Nippon Steel (Tokyo, Japonsko). Je považovaný za jednu z najlepších austenitických ocelí kvôli jej odolnosti voči tečeniu a korózii pri vysokých teplotách. Chemické zloženie materiálu je zhrnuté v tabuľke 1.

Tabuľka 1. Chemické zloženie NF709 (% hmot.) [2].

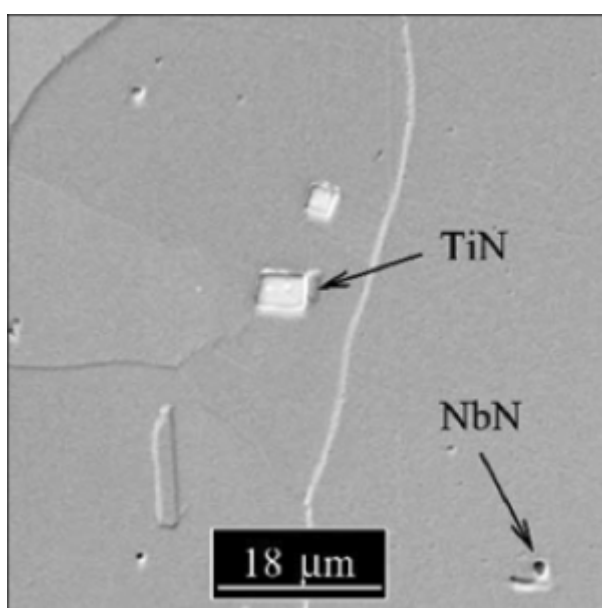
Element	NF709
Cr	20.28
Ni	24.95
Mn	1.00
Mo	1.50
Si	0.41
Nb	0.26
Ti	0.05
N	0.167
C	0.06
B	0.005
P	0.006

Skúmanie mikroštruktúry počas stárnutia materiálu pri zvýšených teplotách má nesmierny význam (Obr.2.). Treba sa uistiť, že nevznikajú nijaké fázy, ktoré podporujú tečenie materiálu, rovnako ako treba identifikovať precipitácie, ktoré sa nemusia vytvoriť v bežnej austenitickej oceli. NF709 sa zložením odlišuje od ostatných

20Cr/25Ni austenitických ocelí svojou jedinečnou kombináciou uhlíka a dusíka spolu s nióbbom a titánom (Obr.3.).



Obr. 2. NF709 leptaný počas 10 sekúnd v 10% roztoku oxalickej kyseliny vo vode po 200 hodinách pri teplote 1023 K [2].



Obr.3. Zvyšky TiN a NbN v NF709 [2].

### 3. Ferito-martenzitické ocele (FM)

Štruktúra dvojfázových ocelí pozostáva z feritickej matrice a častíc martenzitu. Obsah martenzitu zvyšuje pevnosť základného materiálu a feritická matrica zabezpečuje veľmi dobré tvárne vlastnosti. Vysoko chrómové 9 až 12 % FM ocele sú najlepšimi kandidátmi na výrobu komponentov, ktoré musia odolávať vysokej teplote do 552 °C. Práve koncentrácia chrómu je kľúčovým parametrom, ktorý zabezpečí najlepšiu koróznou odolnosť, odolnosť proti radiačnému zväčšeniu objemu a krehnutiu. Po prekročení určitého percenta obsahu chrómu je však materiál už náchylný k lámaniu. FM ocele môžu byť použité ako konštrukčný materiál reaktorových nádob a pri konštrukcii potrubí s prevádzkovou teplotou od 450 °C do 550 °C.

FM ocele sú vhodnými kandidátmi na konštrukciu komponentov pre nadkritický vodou chladený reaktor SCWR kvôli ich odskúšaným dobrým vlastnostiam v nadkritických fosílnych elektrárňach a viacerým výhodám v porovnaní s austenitickými nehrdzavejúcimi ocelami, akými sú: vyššia tepelná vodivosť, nižšia náchylnosť na praskanie v dôsledku napäťovej korózie a menšie zväčšenie objemu materiálu po

ožiarení. Majú však aj obmedzenia ako zvýšená korózia, nízka odolnosť voči tečeniu materiálu pri vysokých teplotách a krehnutie v dôsledku ožiarenia pri nízkych teplotách. [ 3, 4, 5].

Niektoré FM ocele po dlhodobom umiestnení v rádioaktívnom prostredí sú charakterizované nižšou hladinou aktivity. Takéto ocele sa nazývajú FM ocele so zníženým stupňom aktivovania (reduce activated ferrite-martensite steels - RAFM). Prvky zodpovedné za túto prínosnú vlastnosť sú železo (Fe), chróm (Cr), vanád (V), titán (Ti), volfrám (W) a kremík (Si). Výhodou RAFM ocelí je, že môžu byť vystavené neutrónovému toku alebo rádioaktívnemu žiareniu s následne menším rizikom spojeným pri vyradovaní elektrárne.

### 3.1. EUROFER 97

Pri konštrukčných komponentoch je nutnosť používať materiály s krátkou dobou aktivity (LA) ktoré môžu byť aplikované v budúcich štiepných reaktoroch kvôli ich environmentálnym a bezpečnostným výhodám [6]. Výskum v Európskej únii dospel k ferito-martenzitickej oceli - EUROFER 97 [7] ako k najperspektívnejšiemu LA materiálu hlavne pre fúzny reaktor (FR). Výskumy týkajúce sa aktivity zatiaľ prebehli len na primárnej stene FR, lebo je najviac vystavená neutrónovému toku [8].

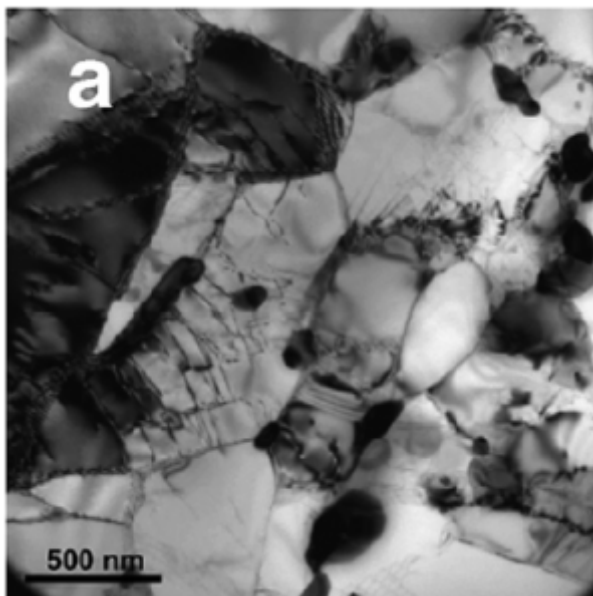
Keď sa skúma doba aktivity, musí sa brať do úvahy aj štruktúra vnútorného obalu reaktora (blanket), keďže neutrónové spektrum aj neutrónový tok sa výrazne mení v závislosti od zväčšujúcej sa vzdialenosti od primárnej steny. EUROFER má potenciál sa stať konštrukčným materiálom pre európsky DEMO blanket. Na skúmanie správania sa aktivity a určenie približných hodnôt kritických koncentrácií defektov v celom blankete sú určené tri rôzne miesta skúmania - primárna stena, stredná časť a zadná stena.

Chemické zloženie tohto materiálu je v tabuľke 2 a mikroštruktúra materiálu skúmanou transmisnou elektrónovou mikroskopiou (TEM) je na obrázku 4. Transmisný elektrónový mikroskop je náročným technickým zariadením, ktoré umožňuje pozorovanie tenkých preparátov (~ 100 nm) pri vysokej rozlišovacej schopnosti (~ 1 nm) a pri veľkom zväčšení. Informácie o štruktúre pozorovaného objektu získavame na základe prechodu (transmisie) elektrónového zväzku objektom.

Tab.2. Chemické zloženie EUROFERu 97 (% hmot.).

Element	EUROFER 97
Cr	9.25
W	1.1
Mn	0.4
Ta	0.07
V	0.2
N	0.06
C	0.105
N	0.167

S	<0.005
P	<0.005
Si	0.04
Cu	0.0016
Co	0.006



Obr.4. EUROFER 97 pozorovaný metódou TEM [9].

#### 4. Disperznými časticami spevnená oceľ (ODS)

ODS materiály sú kompozity, ktorých matrica je spevnená disperzne diskontinuálnou fázou. Majú polykryštalickú matricu, do ktorej sú injektované disperzné častice najčastejšie typu oxidov, ale aj karbidov alebo nitridov. Väčšinou sú legované prvkami ako sú chróm (Cr), kremík (Si), yttrium (Y) a hliník (Al).

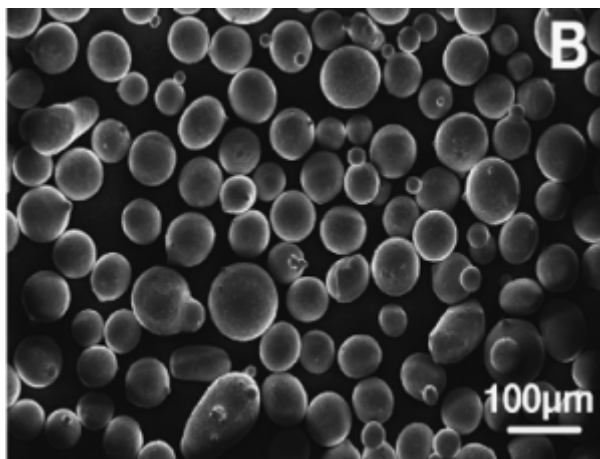
Vysokoteplotná korózna odolnosť sa dá dosiahnuť nielen legovaním, a tým vytvorením spevnenia v štruktúre, ale aj utvorením oxidačnej vrstvy na povrchu zliatiny. Táto oxidačná vrstva sa docieli nanosením ochrannej vrstvy z  $Y_2O_3$ ,  $TiO_2$ . V oceliach, ktoré obsahujú chróm (Cr) alebo hliník (Al) sa nanáša ochranná vrstva z  $Cr_2O_3$  prípadne  $Al_2O_3$ . Feritické ODS ocele sú najslubnejšie materiály pre novú generáciu rýchlych jadrových reaktorov ako aj pre budúci fúzny reaktor. Problémom vo vývoji ODS ocelí je nedostatok materiálu vyrábaného pomocou práškovej metalurgie a tepelným izostatickým lisovaním.

##### 4.1. ODS E97

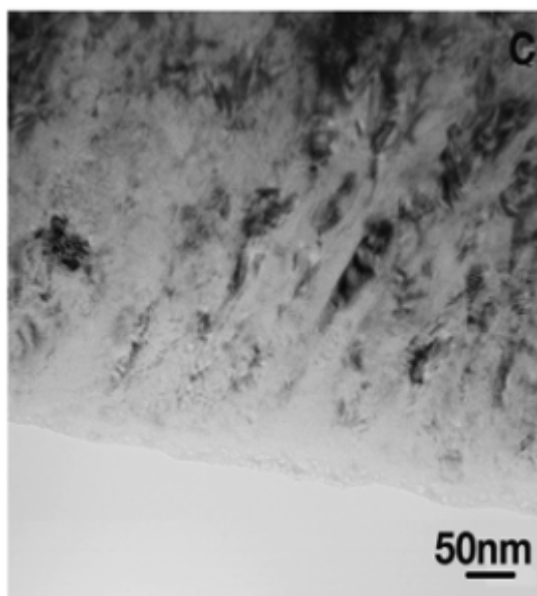
Spevňovanie disperznými časticami zvyšuje pevnosť FM ocelí pri vysokých teplotách ako aj odolnosť voči radiácii. ODS FM ocele s 0,3 % hmot. yttria vykazujú lepšie mechanické správanie, čo sa týka kritickej hodnoty napätosti, ako základný FM material do 500 °C a udržujú si priemerné vlastnosti až do 700°C [10-12]. Avšak teplota, kedy sa z ťažného materiálu stáva krehký (DBTT) sa zvyšuje s prídavkom spevňujúcich oxidov. [13]. Nová ODS oceľ na báze EUROFERu 97 je obohatená časticami yttria spolu s prídavkom titánu. Prídavok titánu znižuje veľkosť yttrievej častice a tým zabezpečuje rovnomernejšiu distribúciu v materiále [14]. Taktiež by mal

znižit segregáciu vodíka, ktorá zhoršuje mechanické vlastnosti.

Štruktúru materiálu ODS EUROFERu môžeme vidieť na obrázku 5 pozorovanou pomocou metódy SEM (Scanning electron microscopy). SEM využíva interakciu dopadajúcich elektrónov s materiálom vzorky. Pri pohybe lúča po vzorke sa mení podľa charakteru povrchu úroveň signálu zachytený detektorom. Z týchto signálov sa dá zostaviť topografia materiálu. Na obrázku 6 je snímaný pomocou metódy TEM. Z obrázkov je vidno ako veľmi sa líšia štruktúry FM ocelí od ODS ocelí.



Obr.5. Štruktúra ODS EUROFERu 97 pozorovaná metódou SEM.



Obr.6. Mikroštruktúra ODS EUROFERu 97 pozorovaná metódou TEM.

## 5. Príprava vzoriek

V materiále NF709 sa homogénna austenitická štruktúra získa rozpúšťacím žíhaním za teploty 1000 až 1100 °C a postupným ochladením. Skúmaná FM oceľ bola vyrobená klasickým spôsobom prípravy, ktorá zahrňuje austenitizačné žíhanie pri teplote okolo 1040 °C s pomalým chladením na vzduchu, ďalej kalenie ocele s vytvorením martenzitu a následné temperovanie. Vyrobené ingoty ocelí boli spracované metódami tvárnenia - valcovaním za tepla aj za studena a následne narezané na jednotlivé vzorky s rozmermi (10mm x 10mm x 6mm). Materiál ODS Eurofer bol vytvorený bežným postupom pre ODS ocele, ktorý nakoniec obsahoval horúce izostatické stlačenie (HIP)

[15].

## 6. Metódy testovania kovových materiálov

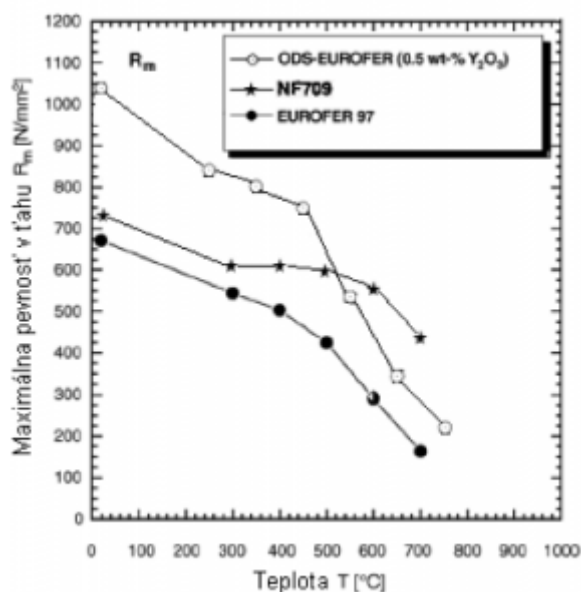
V tejto kapitole si povieme o dvoch metódach testovania kovových materiálov. Predmetom nášho záujmu bude nedeštruktívna pozitronová anihilačná spektroskopia (PAS) a Charpyho test.

### 6.1. Pozitronová anihilačná spektroskopia (PAS)

Princípom PAS je schopnosť pozitronu, emitovaného zo zdroja pomocou  $\beta^+$  premeny, vo veľmi krátkom čase termalizovať (spomaliť sa na rýchlosť okolitých častíc) a následne difundovať v hmotnom prostredí, kým nedôjde k anihilácii s elektrónom. PAS využíva proces anihilácie pozitronu s elektrónom v študovanom materiále na analýzu lokálnej elektrónovej hustoty a jej konfiguráciu v látke. Defekty spojené s voľným objemom ako dislokácie, vakancie, zhľuky vakancií, klastre a hranice zŕn predstavujú pre pozitron potenciálovú jamu, a preto môže dôjsť k záchytu pozitronu v týchto defektoch. PAS sa využíva pri pozorovaní technológie prípravy rôznych materiálov a tiež pri sledovaní vplyvu prostredia, technológie, teploty a radiácie na únavu a starnutie materiálov.

### 6.2. Charpyho skúška

Nárazová skúška je navrhnutá na zmeranie odolnosti voči zlyhaniu materiálu pri náhlom zaťažení. Skúška meria energiu nárazu, alebo absorbovanú energiu pred zlomom. Charpyho skúška sa najčastejšie používa na stanovenie relatívnej tvrdosti alebo odolnosti voči lomu materiálu. Energia nárazu odráža potrebnú prácu vynaloženú na prelomenie skúmanej vzorky. Na Obr. 7 je znázornená maximálna pevnosť v ťahu materiálov NF709, EUROFERu a ODS EUROFERu v závislosti od teplotného namáhania.

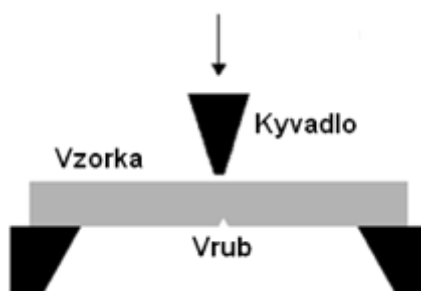


Obr.7 Maximálna pevnosť v ťahu materiálov NF709, EUROFERu a ODS EUROFERu v závislosti od teplotného namáhania. [16, 17].

Keď kyvadlo narazí na vzorku ako je znázornené na Obr. 8, vzorka bude absorbovať

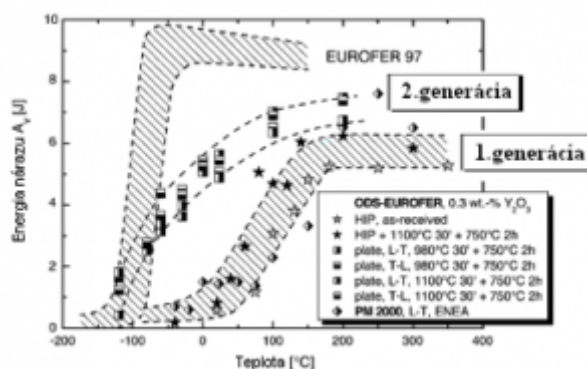
energiu až kým nezačne podliehať plastickej deformácii vo vrube. Plasticity znamená, že nevznikajú trhliny a materiál zostane rozťahnutý. Schopnosť materiálu byť plasticky natiahnutý sa nazýva ťažnosť alebo duktilita. Ťažné môžu byť všetky materiály, ktoré majú v kryštalickej mriežke dislokácie. Ideálna mriežka bez dislokácií nemá ťažnosť. Pri pôsobení vonkajšej sily sa dislokácie posúvajú v smere tzv. burgersovho vektora. Nakoniec sa dostanú na okraj vzorky. Opticky sa to prejaví napr. ako zmatnenie lesklého povrchu.

Keď vzorka naďalej absorbuje energiu, práca sa kumuluje v plastickej oblasti vrubu. Keď už nemôže absorbovať viacej energie, vzorka sa zlomí. Porovnanie potrebnej energie nárazu na prelomenie vzoriek z materiálu EUROFER a ODS EUROFER je na Obr. 9.



Obr. 8. Ilustrácia Charpyho skúšky.

Obrázok 8 popisuje aj pokrok vo výskume a zdokonaľovaní ODS EUROFERu. Najväčší pokrok sa dosiahol vo zvýšení potrebnej energie nárazu na prelomenie vzorky. Na prelomenie ODS EUROFERu prvej generácie bola potrebná nízka energia nárazu vzhľadom na EUROFER pri rovnakých teplotách. Druhá generácia tohto materiálu vykazuje pozoruhodné zlepšenie oproti jeho predchodcu. Napriek tomu ODS EUROFER nedosahuje nízku DBTT a vysokú energiu nárazu ako materiál EUROFER.



Obr. 9. Potrebné energie nárazu na prelomenie vzoriek z materiálu EUROFER a ODS EUROFER [16].

## 7. Spracovanie výsledkov

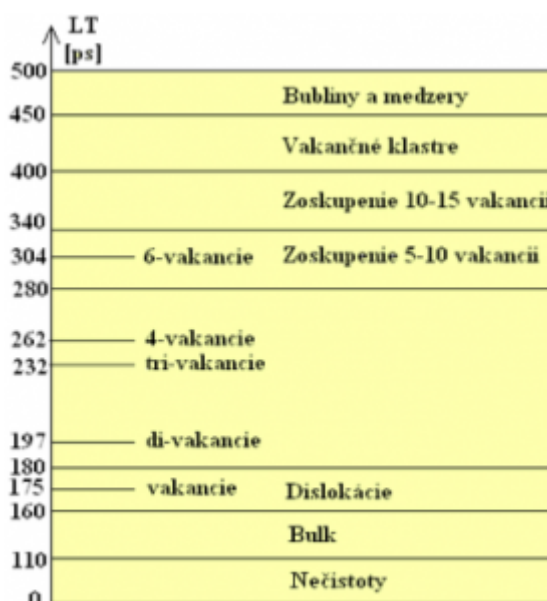
Pozitronovou anihilačnou spektroskopiou sme merali dobu života (LT) pozitronov, emitovaných zo zdroja do vzorky. Doba života je závislá od miestnej elektrónovej hustoty v materiále. Výsledkom merania je v našom prípade spektrum jedného miliónu pozitronov zobrazených histogramom.

Zdroj pozitronov obsahuje častice parazitne anihilujúce pozitrony, preto musíme daný

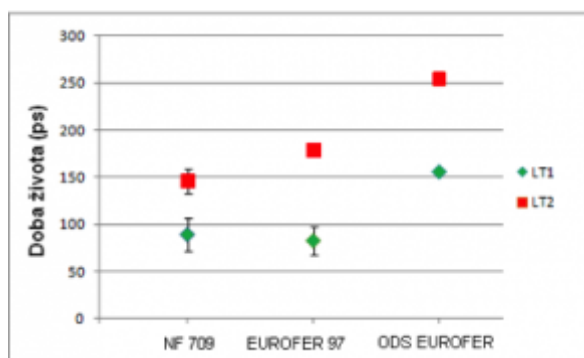


zdroj pred každým meraním kalibrovať- zistiť percento anihilácii pozitronov v zdroji. Kalibrácia sa vykonáva meraním spektra pre takmer bezdefektný referenčný materiál, pre ktorý poznáme charakteristickú dobu života (LT) pozitronov. Defekty sa však nachádzajú aj v referenčnej vzorke, lebo žiadna kryštalická mriežka nie je dokonalá. Referenčnou vzorkou nášho merania na Katedre jadrovej fyziky a techniky, Slovenskej Technickej Univerzity v Bratislave je kremík s minimálnym počtom defektov, ktoré možno zanedbať.

Po zmeraní kremíka odmeriame spektrum skúmaného materiálu. Každý materiál je popísaný dvoma LT. Parameter LT1 nám popisuje anihiláciu pozitronov v bezdefektnej štruktúre a LT2 anihiláciu pozitronov v defektoch. Nás bude najmä zaujímať údaj LT2. Teoretické hodnoty známych typov defektov (Obr.10) porovnáme s nameranými LT2 pozitronov (Obr.11). Koncentrácia daného typu defektu je tým vyššia, čím je väčšia intenzita výskytu pozitronov s danou LT2 (Obr.12).

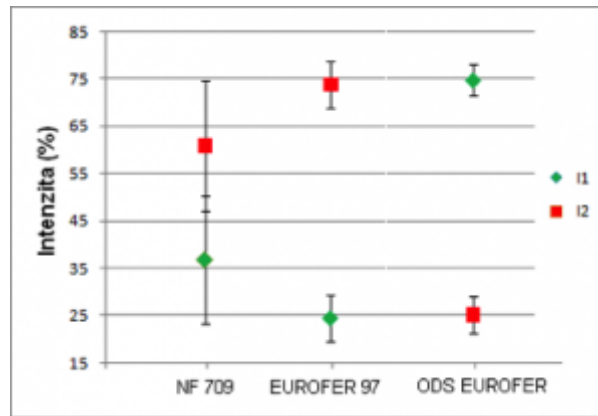


Obr.10. Teoretické hodnoty doby života pozitronov v defektoch [18].



Obr.11. Doby života pozitronov v defektoch.

Z nameraných dôb života a z teoretických hodnôt môžeme usúdiť, že v materiáli NF709 sa nachádzajú zanedbateľné defekty, v oceli E97 sa nachádzajú monovakancie spolu s dislokáciami a v ODS EUROFERi sa nachádzajú väčšie defekty typu trivakancie až 4-vakanie.



Obr.12.Intenzity pozitronov.

Obr.12 nám ukazuje intenzity defektov v jednotlivých vzorkách. Intenzita I1 referuje o výskyte pozitronov s dobou života LT1 a I2 o výskyte pozitronov s dobou života LT2. Hodnoty intenzity charakterizujúcej defekty sú: vo vzorke NF709 - 61%, v EUROFERi - 74% a v ODS EUROFERi - 25%.

## 8. Zhodnotenie a záver

Z našich meraní sa javí austenitická oceľ NF709 ako materiál s najmenším až zanedbateľným množstvom defektov. Maximálna pevnosť v ťahu tohto materiálu je podobná materiálu EUROFER avšak od 300 °C je výrazne pevnejší. EUROFER obsahoval prevažne malé defekty typu monovakancie a dislokácie. Ich intenzita sa však pohybovala okolo 74%. V Charpy testoch dosahuje nízke DBTT a vysokú potrebnú energiu nárazu na prelomenie.

V ODS EUROFERi sa nachádzajú pomerne veľké defekty typu trivakancie až 4-vakancie, aj keď v malom množstve. Publikácie popisujúce Charpyho testy preukázali, že materiál druhej generácie sa výrazne zlepšil oproti prvej generácii avšak stále nedosahuje vysoké energie nárazu ako EUROFER. ODS EUROFER však preukazuje vysokú odolnosť v ťahu. Nová generácia jadrových reaktorov je riešením blížiacej sa energetickej krízy. Ich výstavba a spustenie však závisí od nadštandardných vlastností materiálov, ktoré ich budú tvoriť. Netreba zabúdať, že každý z týchto materiálov poskytuje neoceniteľné vlastnosti, ktoré budú využité pri výrobe komponentov pre novú generáciu jadrových reaktorov.

## 9. Literatúra

1. US DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee, A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems, 2002, GIF-002-00.  
[http://nuclear.energy.gov/genIV/documents/gen\\_iv\\_roadmap.pdf](http://nuclear.energy.gov/genIV/documents/gen_iv_roadmap.pdf).
2. T. Sourmail and H.K.D.H. Bhadeshia, Microstructural Evolution in Two Variants of NF709 at 1023 and 1073 K, Metallurgical and materials transactions a, Vol. 36a, 2005
3. R.L. Klueh, D.R. Harries, High Chromium Ferritic and Martensitic Steels for Nuclear Applications, ASTM, Pennsylvania, 2001.
4. P. Ampornrat, C.B. Bahn, G.S. Was, In: Proceedings of the 12th International Conference on Degradation of Materials in Nuclear Power Systems - Water Reactors, American Nuclear Society, Utah, 2005.
5. G.S. Was et al., Corrosion and stress corrosion cracking in supercritical water, J. Nucl.

- Mater. Vol. 371, pp.176-201, 2007.
6. K. Ehrlich, S. Cierjacks, S. Kelzenberg, A. Möslang, The development of structural materials for reduced long-term activation, effects of radiation on materials, 17th International Symposium, , ASTM STP 1270, pp. 1109-1122, 1996.
  7. A. Lopatkin, V. Muratov, Activation analysis of ITER blanket first wall, Fusion Engineering and Design, Vol. 42, Issues 1-4, pp.349-358, 1998.
  8. M. K. Miller, D. Hoelzer, E.A. Kenik and K.F. Russell, Precipitation in MA/ODS Ferritic Alloy MA957, Microscopy and Microanalysis, Oak Ridge National Laboratory, Vol. 9, Issues 44-45, pp. 44-45, 2003.
  9. A. Zeman, L. Debarberis a, J. Kočík , V. Slugeň, E. Keilová , Microstructural analysis of candidate steels pre-selected for new advanced reactor systems, Journal of Nuclear Materials, Vol. 362, pp.259-267, 2007
  10. D.K. Mukhopadhyay, F.H. Froes, D.S. Gelles, J. Nucl. Mater.B, Vol. 258-263, pp. 1209-1215, 1998.
  11. G.R. Romanoski, L.L. Snead, R.L. Klueh, D.T. Hoelzer, J. Nucl. Mater. A , Vol. 283-287, pp. 642-646, 2000.
  12. R. Schaublin, T. Leguey, P. Spätig, N. Baluc, M. Victoria, J. Nucl. Mater., Vol. 307-311 pp. 778-782, 2002.
  13. R. Lindau, A. Möslang, M. Schirra, P. Schlossmacher, M. Klimenkov, J. Nucl. Mater., Vol. 307-311, 769, 2002.
  14. S. Ukai, M. Harada, J. Nucl. Mater., Vol 204, pp. 65-73, 1993.
  15. V. T. Nguyen, D. P. Doan, T. B. Tran, V. D. Luong, V. A. Nguyen, A. T. Phan, Microstructural evolution and some mechanical properties of nanosized yttrium oxide dispersion strengthened 13Cr steel, Nanoscience and Nanotechnology, Vol. 1, 2010.
  16. R. Lindau et al., Present development status of EUROFER and ODS-EUROFER for application in blanket concepts, Fusion Engineering and Design, Vol. 75-79, pp.989-996 , 2005.
  17. R. W. Swindeman, Stainless Steels With Improved Strength for Service at 760°C and Above, Paper for ASME Pressure Vessels and Piping Conference, San Diego, California, July 26-30, 1998
  18. K. Natesan, et al., Preliminary Materials Selection Issues for the New Generation Nuclear Plant Reactor Pressure Vessel. Laboratory report. Chicago: Argonne national laboratory,ANL/EXT-06/45,2006.

Spoluautorm článku sú Ing. Jana Veterníková, Prof. Ing. Vladimír Slugeň, DrSc, Katedra jadrovej fyziky a techniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenská Technická Univerzita, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava  
Práca bola prezentovaná na Študentskej vedeckej a odbornej činnosti (ŠVOČ 2011) v sekcii Fyzikálne inžinierstvo II. a získala Diplom dekana, ISBN 978-80-227-3508-7