

Studie ocelí vhodných pro tlakovodní reaktorové nádoby

Marek Kovář

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Břehová 7, 115 19 Praha 1
kovar.ma@seznam.cz

Abstrakt

Práce je zaměřena na metody zkoumání ocelí vhodných pro tlakovodní reaktorové nádoby.

1 Úvod

V práci jsem uskutečnil kompletní metalografický rozbor oceli 24CrMoV5-5 (žárupevná Cr-Mo-V konstrukční ocel – vhodná pro reaktory bez radiačního křehnutí) a oceli 15Ch2MFA (ocel pro reaktorové nádoby typu VVER 440 – JE Dukovany), u kterých jsem stanovil teoretický výpočet životnosti pro tlakovodní reaktorové nádoby VVER 440 typu 213. V experimentech jsem se zabýval tepelným zpracováním ocelí a Charpyho zkouškou. Následně jsem stanovil přechodové křivky (respektive přechodové teploty) ocelí. Ocel 15Ch2MFA se nechala ozářit a po provedení Charpyho zkoušky jsem experimentálně stanovil její životnost vůči radiačnímu a tepelnému křehnutí.

2 Charpyho zkouška na neozářené oceli

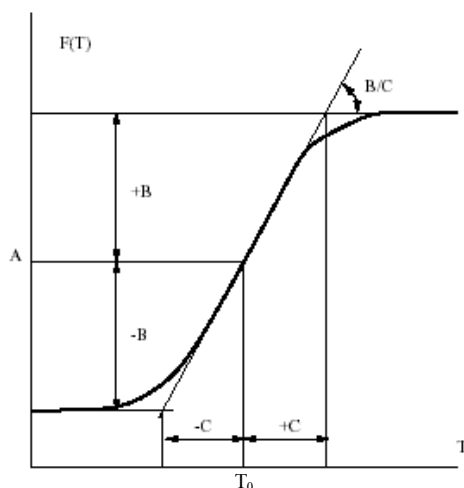
Jako první zkoumaný materiál jsem použil ocel 24CrMoV5-5 (žárupevná Cr-Mo-V konstrukční ocel). Tento materiál se využívá pro dodatkovou výzkumnou činnost v laboratořích místo drahých originálních vzorků z reaktorové oceli. Jako druhý zkoumaný materiál jsem měl ocel 15Ch2MFA, která se používá na tlakovodních nádobách typu VVER 440, tedy jako jaderná elektrárna Dukovany. Na obou materiálech jsem provedl totožnou mechanickou zkoušku – zkoušku vrubové houževnatosti.

Připravil jsem 12 vzorků z každého typu oceli, kde každý prošel různou tepelnou úpravou, buď byl zahříván na příslušnou teplotu v metalografické experimentální peci nebo naopak chlazen směsí kapalného dusíku a lihu na potřebnou teplotu. Přesný popis průběhu materiálové zkoušky je popsán v normě ČSN EN 10045-1^[4]. Používal jsem Charpyho kladivo o celkové energii 300 J. Stejně zatížení jako u zkoušek na ÚJV v Řeži pro ozářené vzorky. Při přenosu vzorku na opory Charpyho kladiva dochází k drobné tepelné ztrátě. Tuto tepelnou ztrátu jsem stanovil přibližně na 10°C, a tak se nechali vzorky předeheat na teplotu o 10°C vyšší, čímž se na oporách kladiva dosáhlo dané teploty pro přeražení.

Naměřená data jsem proložil křivkou ve tvaru

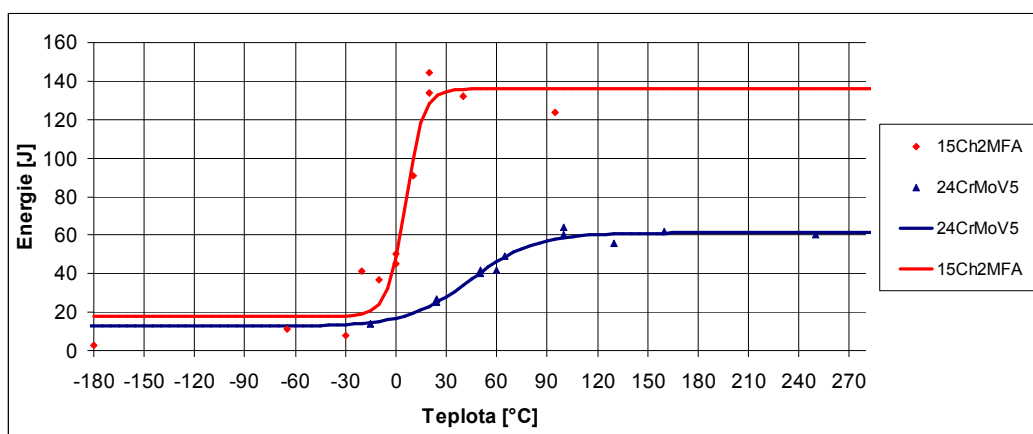
$$KV = A_0 + B_0 \operatorname{tgh} \left(\frac{T - T_0}{C_0} \right) \quad (1)$$

kde význam konstant A_0 , B_0 , C_0 , T_0 je znázorněn na Obr.1. Konstanta T_0 určuje přechodovou teplotu, tj. teplotu, kdy je energie lomu rovna polovině hodnoty energie mezi horním a dolním okrajem přechodové křivky.



Obr.1: Schéma pro ilustraci konstant obsažených ve vzorci (1), [7]

Pro lepší názornost jsem nanesl hodnoty přechodové křivky od obou ocelí do jednoho grafu (Obr.2), aby bylo možné lépe pozorovat rozdíl mezi kritickými teplotami (přechodová teplota).



Obr. 21: Porovnání naměřených přechodových křivek obou ocelí

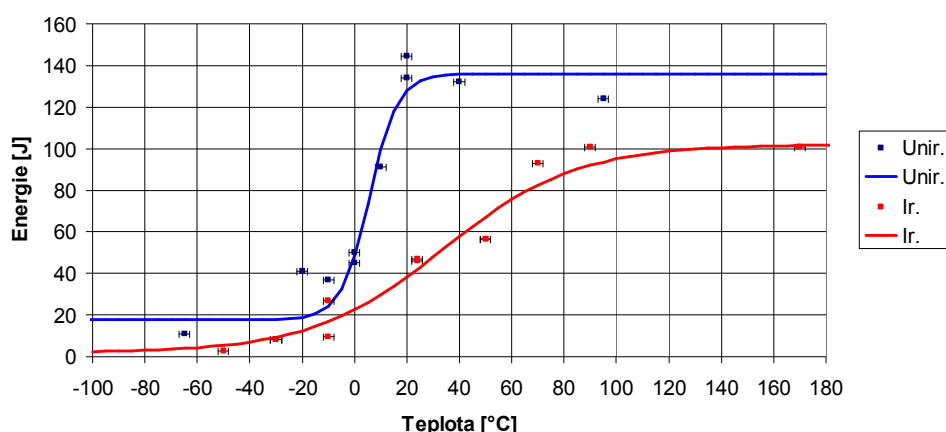
Pomocí metody nejmenších čtverců jsem získal z funkce (1) pro ocel 24CrMoV-5 následující parametry: $A_0 = 36,87344$ J; $B_0 = 24,28439$ J; $C_0 = 38,10506^\circ\text{C}$; $T_0 = 44,60474^\circ\text{C}$. **Hodnota přechodové teploty T_0 je tedy $44,5^\circ\text{C}$.** Hodnota energie horního plata se pohybuje kolem 60 J. Pro ocel 15Ch2MFA: $A_0 = 76,81483$ J; $B_0 = 59,064$ J; $C_0 = 10,88609^\circ\text{C}$; $T_0 = 5,639466^\circ\text{C}$. **Hodnota přechodové teploty T_0 je tedy $5,6^\circ\text{C}$.** Hodnota energie horního plata se pohybuje kolem 135 J.

2 Charpyho zkouška na ozářené oceli

Materiál 15Ch2MFA jsem nechal ozářit v reaktoru LVR-15 v Centru jaderného výzkumu a.s. v Řeži na fluenční hodnoty $F_\Phi = 3,3 \times 10^{23}$ neutronů/m² ($E > 1$ MeV). Ozáření probíhá tak, že se vzorky vloží do speciální obálky, která se umístí do příslušného kanálu v reaktoru, aby se experimentem neovlivnil neutronový tok pro výrobu radiofarmak a jiné experimenty probíhající delší dobu v reaktoru. Zpracování ozářených pouzder a demontáže materiálůvých

vzorků z ozařovacích sond jsou prováděny v horkých komorách, které se nacházejí v přízemí budovy reaktoru, pod úrovní podlahy haly reaktoru. Poté byly vzorky přesunuty do polohorkých komor, kde byla provedena Charpyho zkouška stejným způsobem, jakým jsem prováděl zkoušku na základním materiálu bez radiačního poškození. V polohorkých komorách (stínění komor - 150 mm olova pro manipulaci se zdroji ionizujícího záření do aktivity 37 GBq) je stále udržován podtlak a vzorky jsou přesouvány v rámci komor pomocí propojených pásových dopravníků.

Parametry pro ozářenou ocel 15Ch2MFA jsou: $A_0 = 51,94849 \text{ J}$; $B_0 = 50,03104 \text{ J}$; $C_0 = 50,7146^\circ\text{C}$; $T_0 = 34,13694^\circ\text{C}$. **Hodnota přechodové teploty T_0 je tedy 34°C .** Hodnota energie horního plata se pohybuje kolem 105 J. Rozdíly mezi naměřenými daty ozářené a neozařené oceli jsou vidět na Obr.3.



Obr.3: Přechodové křivky před ozářením (modrá) a po ozáření $F_2 = 3,3 \times 10^{23}$ neutronů/ m^2 (červená)

Přechodová teplota se posunula o $28,4^\circ\text{C}$ na ose x doprava a hodnota energie horního plata se snížila zhruba o 25 J.

3 Závěr

Práce na projektu „*Studie ocelí vhodných pro tlakovodní reaktorové nádoby*“ obsahovala především kompletní metalografický rozbor ocelí 24CrMoV5-5 (žárupevná Cr-Mo-V konstrukční ocel) a 15Ch2MFA (ocel používaná na reaktory typu VVER 440). Důležitou složkou bylo také experimentální stanovení a teoretický výpočet životnosti tlakovodní reaktorové nádoby VVER-440 typu 213 pro výše uvedené oceli.

Na základě Charpyho zkoušky jsem získal přechodovou křivku a určil přechodovou teplotu, se kterou jsem prováděl teoretický výpočet životnosti. Zjistil jsem, že velmi důležitý byl vliv tepelného zpracování materiálu na jeho mechanické a fyzikální vlastnosti. Důležité bylo také provedení v Centru jaderného výzkumu Řež zkoušky vrubové houževnatosti a následné stanovení přechodové teploty na oceli 15Ch2MFA po předchozím neutronovém ozáření. Tímto experimentem a porovnáním s přechodovou křivkou materiálu v základním stavu jsem stanovil její posun o $28,4^\circ\text{C}$ po ose x.

Všechny naměřené a vypočtené hodnoty jsem porovnával s materiálovým listem a vědeckými výzkumnými výsledky v daném oboru.

V závěru mohu konstatovat, že ocel 24CrMoV5-5 by v podmínkách panujících uvnitř reaktorové nádoby dlouho neodolávala, jelikož je to ocel určená pro tlakovodní nádoby,

ale bez radiačního zatížení. Naproti tomu ocel 15Ch2MFA splnila všechny podmínky pro využití v radiačním prostředí.

Obdobné práce jsou velmi důležité pro vytvoření nových lepších typů reaktorové oceli (pro reaktory IV. generace) jako například EUROFER, který je nyní ve fázi vývoje. Je v něm minimum niklu a všechny materiálové vlastnosti jsou vylepšeny, hlavně radiační křehnutí.

4 Poděkování

Závěrem bych chtěl poděkovat Gymnáziu Karla Sladkovského za poskytnuté zázemí, především učiteli fyziky Ing. Bc. Antonu Florkovi, CSc., Ph.D., bez kterého by tato práce nemohla vzniknout. Dále za financování Evropskému Sociálnímu Fondu, Hlavnímu městu Praha a FJFI, výslovně poté Katedře Materiálů FJFI ČVUT za poskytnuté zázemí pro experimenty, jmenovitě doktorandům Ing. Štěpánu Válkovi, Ing. Tomáši Skibovi a akademickému pracovníkovi Dr. Ing. Petru Haušildovi, CSc., a Katedře fyziky kondenzovaných látek MFF UK, jmenovitě doc. RNDr. Pavlu Svobodovi, CSc. V neposlední řadě poděkování patří předsedkyni SÚJB Ing. Daně Drábové, Ph.D. a Ing. Pavlu Šimákovi z JE Temelín. Zvláštní poděkování patří firmě Škoda JS a.s., jmenovitě technickému řediteli Ing. Janu Zdeborovi, dále Ing. Horákovi, Ing. Radku Konopovi a Ing. Blažkovi za dodání potřebné oceli a potřebných dat. Nemenší poděkování si zaslouží pracovníci z Centra jaderného výzkumu Řež s.r.o., jmenovitě ředitel Ing. Martin Ruščák, který nám poskytl možnost ozařování oceli.

Reference

- [1] V. Jareš: *Metalografie ocele*, ČSAV, Praha 1960
- [2] I. Saul: *Stereologie vnitřní struktury objektů*, Academia, Praha 1984
- [3] J. Sodomka: *Zkoušení a zpracování kovů slitin*, ČVUT v Praze 1981
- [4] *Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho – Část 1: Zkušební metoda (V a U vruby)*, ČSN EN 10045-1: 1998
- [5] J. Skálová, J. Koutský, V. Motýčka: *Nauka o materiálech*, Plzeň: ZČU, 2003, ISBN 80-7043-244-6
- [6] M. Zemandl: *Fraktografie únavových lomů kovových materiálů při mechanickém namáhání*, Plzeň: ZČU, 2002
- [7] L. Ptáček a kolektiv: *Nauka o materiálu I.*, Akademické nakladatelství CERM 2003, Brno
- [8] V. Frei: *Fyzika pevných látek*, Knížní výroba 1979, Brno
- [9] Asociace strojních inženýrů: *Normativně technická dokumentace*, Praha a Brno 2004
- [10] IAEA: *Application of surveillance programme results to reactor pressure vessel integrity assessment*, Vienna 2004
- [11] M. Kytka, M. Brumovský: *Programy svědečných vzorků TNR*, Praha 2008
- [12] M. Kytka, M. Brumovský: *Materials used for the design and construction of WWER components*, Praha 2008