Testování mechanických vlastností Inconelu 713 a 738 pro pokročilé reaktory

Testing of mechanical properties of 713 and 738 inconels for advanced reactors

Daniela Marušáková^{1,2}, Jan Berka^{1,2}, Petr Sajdl¹

¹ Ústav energetiky, VŠCHT Praha

² Centrum výzkumu Řež, s.r.o.

E-mail: marusakd@vscht.cz

Mezi kovové konstrukční materiály pro komponenty pokročilých plynem chlazených reaktorů patří niklové superslitiny Inconel 713 a 738. V rámci projektu aplikovaného výzkumu řešeného na VŠCHT Praha a CV Řež byly testovány mechanické vlastnosti těchto slitin ve výchozím stavu a po expozici vzorků v heliu obsahujícím stopové nečistoty (CO , H_2 , CH_4 , H_2O) při teplotě 900 °C po dobu 1000 hod. Vzorky testovaných slitin byly vyrobeny: a) z původního litého materiálu (virgin), b) přepracovaného materiálu z výroby (revert 100R) a c) materiálu získaného slitím těchto materiálů v poměru 50V/50R. K určení mechanických vlastností materiálů po expozicích byly provedeny tahové zkoušky a strukturní analýza pomocí SEM. Porovnány byly změny vlastností po expozici jednotlivých testovaných slitin i stejné slitiny vyrobené různými postupy. Zatímco mez kluzu a mez pevnosti poklesly u Inconelu 713 jen zlehka, u Inconelu 738 poklesly výrazně. Stav 50V/50R vykazoval lepší mechanické vlastnosti než stav revert 100R.

Nickel superalloys Inconel 713 and 738 belong among metallic construction materials used for components of advanced gas cooled reactors. The project of applied research solved by the UCT Prague and RC Řež tested mechanical properties of these alloys in the starting phase and after the exposure to helium containing trace pollutants (CO , H_2 , CH_4 , H_2O) at the temperature of 900°C for a period of 1000 hours. The samples of tested alloys were made from: a) the virgin cast material, b) remanufactured material (revert 100R) and c) casting of previous materials in the ratio of 50V/50R. To identify mechanical properties of the materials after exposure, tensile tests and structural analyses by SEM were carried out. The changes of properties after the exposure of tested alloys and the same alloys made in various procedures were compared. While the yield and tensile strengths dropped insignificantly for Inconel 713, the plummeted for Inconel 738. The 50V/50R state showed better mechanical properties than the revert 100R state.

ÚVOD

Obsahem tohoto příspěvku je zhodnocení mechanických vlastností dvou niklových slitin - Inconel 713 a Inconel 738 po tahových zkouškách. Oba tyto materiály se hojně využívají v energetických zařízeních jako konstrukční prvky – lopatky turbíny, výměníky tepla a další komponenty. Moderní reaktory a parní generátory využívají různých pracovních podmínek teplot, tlaků a druhů media. Momentálně zvažované reaktory IV. generace, jako velmi vysoko-teplotní reaktor (V/HTR) a plynem chlazený rychlý reaktor (GFR) budou chlazeny heliem (helium s nečistotami simuluje korozní prostředí V/HTR). Operační teplota v reaktorech by měla dosahovat hodnot kolem 850°C-1000°C. Konstrukční prvky reaktoru jsou obecně vystaveny jak vysokým teplotám, tak vysokému tlaku, které mohou způsobit v přítomnosti

nečistot, solí a vlhkosti korozní praskání pod napětím (SCC), ale především se předpokládá změna struktury materiálu vlivem vysoké teploty a s tím spojenou změnu mechanických vlastností. Proto je velmi důležité zvolit ke konstrukci vysoce teplotně i mechanicky odolný materiál, jako například niklové slitiny – Inconel 713 a 738 [1-6].

Expozice a materiálové zkoušky

Tahové vzorky byly vyrobeny jako přesné odlitky metodou vytavitelného modelu ze dvou stavů, z obou materiálů. Stav revert 100R je plně přepracovaný zbylý materiál po prvním lití. Stav 50V/50R se skládá z 50% virgin stavu a 50% revert 100R stavu. Složení virgin stavu je uvedeno v Tabulce 1.

Tab. 1. Složení slitin IN 713 a IN 738 / *Composition of alloys IN 713 and IN 738*

Inconel	C	Cr	Ni	Co	Mo	Ti	Al	W	Ta	Nb	Zr
713	0,05	12	base	0,5	4,5	0,7	6	–	–	2	0,01
738	0,11	16	base	8,5	1,75	3,45	3,45	2,6	1,75	0,85	0,035

Expozice v heliu + nečistoty

Všechny tahové vzorky byly exponovány ve vysokoteplotní peci při teplotě plynu 900 °C/1000 h, při tlaku 4-5 bar. Plyn byl složen z He a nečistot (Tab. 2), který simuluje prostředí chladiva ve VHTR a GFR reaktorech.

Tab. 2. Složení expozičního media při atmosférickém tlaku (HTF křemenná retorta) / *Composition of the treatment medium at atmospheric pressure (HTF silicone retort)*

Složka	Koncentrace [vppm]	Parciální tlak [Pa]
CH ₄	100	10
CO	500	50
H ₂	100	10
Helium	Bal.	Bal.

Experimentální zařízení se skládá z trubkové pece, křemenné retorty, plynového potrubí a tlakové lahve. V jednom plynovém potrubí je obsažen vlhkoměr, který je situován právě před vstupem do pece. Celý tento systém umožňuje detekci vlhkosti od koncentrace 1 ppm [1,2].

Tahové zkoušky

Po expozici byly provedeny tahové zkoušky na tahovém stroji Instron 1362. Mechanické vlastnosti virgin stavu jsou známy z výroby. Pro IN 713 je mez kluzu

820 MPa a mez pevnosti 1003 MPa. Pro IN 738 je mez kluzu 833 MPa a mez pevnosti 1099 MPa.

Jak je vidět v Tab. 3, mechanické vlastnosti stavů revert 100R a 50V/50R jsou vyšší pro IN 738 před expozicí, avšak po expozici tyto vlastnosti výrazně klesají. U IN 713 však klesají jen lehce, a obě tyto vlastnosti jsou v závěru po expozici vyšší u IN 713. V porovnání ke stavu materiálu, 50V/50R má vyšší mechanické vlastnosti než stav revert 100R. Celkově nejvyšší hodnoty po expozici má IN 713, stav 50V/50R, jehož mez kluzu se od původního materiálu liší jen v jednotkách MPa a mez pevnosti dokonce vzrostla.

SEM analýza

SEM analýza byla provedena po tahových zkouškách. K lomu došlo podél struktury dendritů, jak ukazuje Obr. 1 a Obr. 2.

Mezi stavy 50V/50R a revert 100R není patrný žádný významný rozdíl před expozicí – výchozí stav (obrázky nalevo) a je pozorovatelné pouze drobné zhrubnutí dendritické struktury po expozici v heliu (obrázky na pravé straně). Tato dendritická segregace vytváří heterogenní místa v materiálu a iniciuje tak lom. Po zvětšení jsou patrné staženiny podél dendritů, Obr. 3, výrazné staženiny jsou pak především ve středu vzorků, což také iniciuje lom. Tyto staženiny pravděpodobně vznikly během výrobního procesu litím.

Detailní analýza ukázala, že stav revert 100R obsahuje více staženin než stav 50V/50R. Možný je vliv expozice na nárůst objemu těchto staženin [7, 8].

Tab. 3. Mez kluzu a mez pevnosti Inconelu 713 a 738, před a po expozici / *Yield strength and breaking strength of Inconel 713 and 738, before and after the exposure*

Materiál	Mez kluzu - Rp 0,2 [MPa]	Mez pevnosti – Rm [MPa]
IN 713 – 50V/50R - neexponovaný	829,5	936,5
IN 713 – 50V/50R - exponovaný	708,8	867,3
IN 713 – revert 100R - neexponovaný	796,5	931,8
IN 713 – revert 100R - exponovaný	714,5	851,2
IN 738 – 50V/50R - neexponovaný	862,7	986,2
IN 738 – 50V/50R - exponovaný	691,0	864,8
IN 738 – revert 100R - neexponovaný	835,2	976,0
IN 738 – revert 100R - exponovaný	687,4	773,6

Obr. 1. Lomová plocha IN 713
Fig. 1. Fracture surface of IN 713

Obr. 2. Lomová plocha IN 738
Fig. 2. Fracture surface of IN 738

Obr. 3. IN 738, revert – výchozí stav před (vlevo) a po (vpravo) expozici v He (režim zpětně odražených elektronů)

Fig. 3. IN 738, revert – before (left) and after (right) the exposure in He (backscattered electrons mode)

ZÁVĚR A DISKUZE

Niklové slitiny materiálu IN 713 a IN 738 byly exponovány v heliu s nečistotami – 900°C/1000 h. Z výsledků po tahových zkouškách bylo zjištěno, že mez kluzu a mez pevnosti poklesly jen zlehka u IN 713. Oproti tomu u IN 738 poklesy tyto hodnoty významně, což ukazuje vyšší vliv expozice na vlastnosti tohoto materiálu. V porovnání ke stavům lití: stav 50V/50R vykazuje vyšší mechanické vlastnosti než stav revert 100R. SEM analýza prokázala lom materiálu po dendritické struktuře s částečnou iniciací ve staženinách ve středu vzorků, které zřejmě vlivem expozice nabyly na objemu. Nejobjemnější staženiny pak byly pozorovány u stavu revert 100R po expozici.

Poděkování

Práce byla podporována specifickým vysokoškolským výzkumem (MSMT No 20/2015), IGS VSCHT 218 88 1504, ve spolupráci s Monikou Vilémovou z Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i.

Tato práce vznikla za finanční podpory projektu SUSEN CZ.1.05/2.1.00/03.0108, který je realizován v rámci Evropského fondu regionálního rozvoje (ERDF).

Príspevek je součástí projektu TAČR – Alfa projekt TA03010849.

LITERATURA

1. Berka, J., Hlinčík, T., Víden, I., Hudský, T., Vít, J. *Progress in Nuclear Energy* **2015**, 85, 156–163.
2. Berka, J., Matěcha, J., Černý, M., Víden, I., Sus, F., Hájek, P. *Nuclear Engineering and Design* **2012**, 251, 203–207.
3. Natesan K., Purohit, A., Tam S. W.: report NUREG/CR-6824: *Materials Behavior in HTGR Environments* 2003, Office of Nuclear Regulatory Research, Washington.
4. Yun, M. H., Ennis, J. P., Nickel, H., Schuster, H. *Journal of Nuclear Materials* **1984**, 125, 258–272.
5. Graham, W. L. *Journal of Nuclear Materials* **1990**, 171, 76–83.
6. Cabet, C., Duprey, B. *Nuclear Engineering and Design* **2012**, 251, 139–145.
7. Řičánková, V., Němec K.: *The image analyses utilization at nickel-base superalloy degradation classification* 2008, Diploma thesis, Brno.
8. Otáhal V.: *Vady odlitků, atlas vad: železné a neželezné slitiny*, MetalCasting and Foundry Consult, Brno.