

# Materiály pro MSR

*Jana Rejková, VŠCHT Praha, petruj@vscht.cz*

*Marie Kudrnová, VŠCHT Praha, hubickom@vscht.cz*

## Souhrn

*Jednou z významných výhod reaktorů IV. generace je vyšší efektivita využití jaderného paliva, a tudíž menší množství jaderného odpadu oproti současným reaktorům a dále také použití přepracovaného štěpného jaderného materiálu z externích zdrojů. Tento příspěvek se věnuje výzkumu materiálů pro jeden z typů reaktorů IV. generace – reaktor s roztavenými solemi. Pro výzkum korozní odolnosti bylo navrženo a sestaveno experimentální zařízení umožňující expozice za vysokých teplot bez přístupu kyslíku v proudící atmosféře inertního plynu. Zkoumanými materiály byly niklové slitiny Inconel 601, 617 a 625, které umístěné v solné tavenině za dobu trvání experimentu prokázaly zanedbatelné hmotnostní změny a schopnost vytvořit velmi tenkou vrstvu oxidů na povrchu.*

**Klíčová slova:** *roztavené soli, koroze, jaderný reaktor, niklové slitiny*

## Charakteristika reaktorů s roztavenými solemi

Pro další vývoj jaderných reaktorů je nezbytné uvažovat takové technologie, které umožňují efektivní využití jaderného paliva, zpracování radioaktivních odpadů a budou ze své podstaty bezpečnější. Toto by měla IV. generace jaderných reaktorů plnit a jedním z typů nových reaktorů jsou reaktory s roztavenými solemi. Nejčastěji se v kontextu MSR (Molten Salt Reactor) objevují směsi fluoridových solí, avšak zkoumány jsou také chloridové a dusičnanové soli.

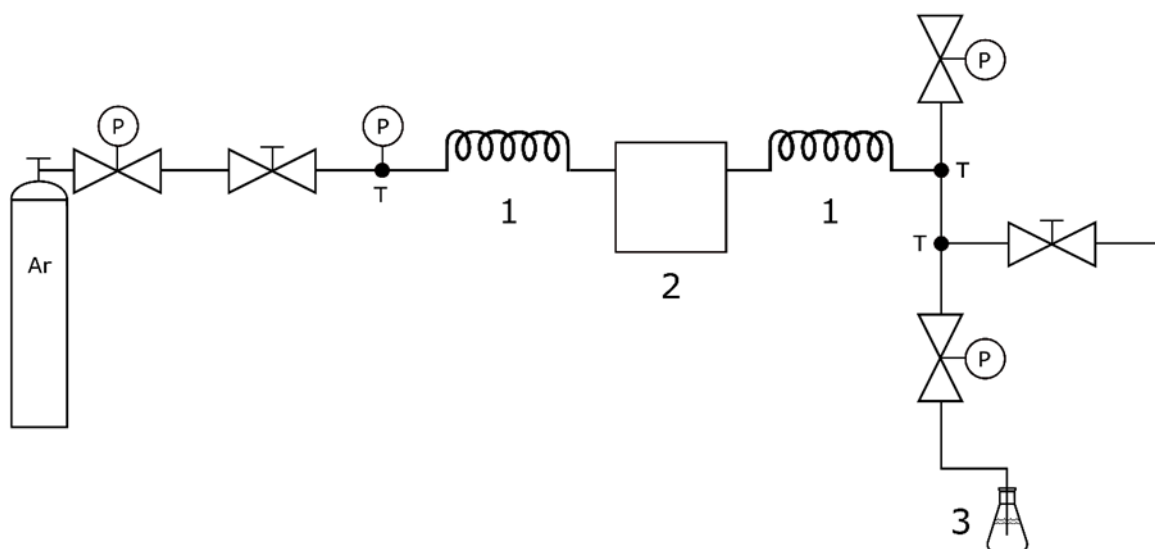
Výzkumy Národních laboratoří v Oak Ridge demonstrují zvýšení účinnosti paliva díky vyššímu stupni vyhoření v reaktorech s roztavenými solemi, a to až dvojnásobně. Vyšší vyhoření, znamená víc energie získané z paliva a obecně i méně vyprodukovaného odpadu. V běžných lehkovodných reaktorech je stupeň vyhoření pevného paliva limitována tvorbou štěpných produktů uvnitř paliva, ty mají pak vliv na jeho tepelnou vodivost. Zvýšená teplota a radiace mohou vést k vyšší náchylnosti k poruchám konstrukčních prvků a hromadění štěpných produktů ke snížení výkonu aktivní zóny pohlcováním neutronů. V reaktorech s palivem v kapalné formě nemůže docházet ke změnám ve tvaru paliva a tím ke strukturálním poruchám v aktivní zóně a nedochází ani k otravě reaktoru vzhledem k průběžnému čištění palivové/chladicí taveniny.

Další nespornou výhodou v oblasti jaderných odpadů je možnost využití již použitého paliva ze současných jaderných reaktorů. U běžného paliva pro PWR je možné použít palivo s obohacením nejvýše 5 % uranu 235 (nízko-obohecený uran). Palivo v tekuté formě dokáže snížit výslednou produkci odpadů až o 53 % oproti běžné pevné palivové matici. Pro uran obohacený na úroveň 20 % může dojít ke snížení vyprodukovaného jaderného odpadu až o 83 % [1]. Moderní reaktory dokáží snížit objem produkovaného jaderného ale i typem spalovaného paliva snížit množství dlouhodobých radionuklidů v odpadu.

Jednou z předností roztavených solí, aplikovaných jako chladivo v reaktorech, je možnost práce za relativně nízkého tlaku, na rozdíl od chlazení vodou anebo plyny. V porovnání s chlazením tekutými kovy, které také umožňují nižší operační tlaky, mají solné taveniny menší sklony k chemickým reakcím. Životnost použitých konstrukčních materiálů je limitována operačními teplotami reaktoru a obsahem nečistot v solích [2].

## Experimentální část

Pro účely studia korozní odolnosti materiálů v prostředích solných tavenin byla navržena a sestavena experimentální aparatura (viz Obr. 1) umožňující vysokoteplotní expozice (cca do teplot 600 °C) s vnitřním prostředím bez přístupu vzduchu a s protékajícím inertním plynem argonem. Aparatura svou konstrukcí umožňuje i mírný přetlak (v rámci našich expozic cca 0,2MPa). V autoklávové části aparatury byly vzorky niklových slitin umístěny v korundových lodičkách a zasypány 10 g modelové směsi LiCl – KCl (58,2 - 41,8 hm. %). Vzorky byly exponovány po dobu 500hodin za konstantní teploty 440 °C a tlaku 0,2 MPa v inertní proudící atmosféře (argon). Vzorky niklových slitin Inconel 601, 617 a 625 (viz Tab. 1) o rozměrech cca 10 x 10 x 3 mm byly před expozicí vyleštěny brusným papírem o hrubosti P2500, odmaštěny v ultrazvukové lázni a zváženy pro gravimetrické stanovení korozních úbytků. Po expozici byla provedena gravimetrie a analýza XPS povrchu vzorků.



**Obr. 1: Schéma experimentální aparatury (1 – chlazení vzduch/vodní lázeň; 2 – vysokoteplotní autokláv s vnitřním prostorem pro vzorky; 3 – vodní uzávěr).**

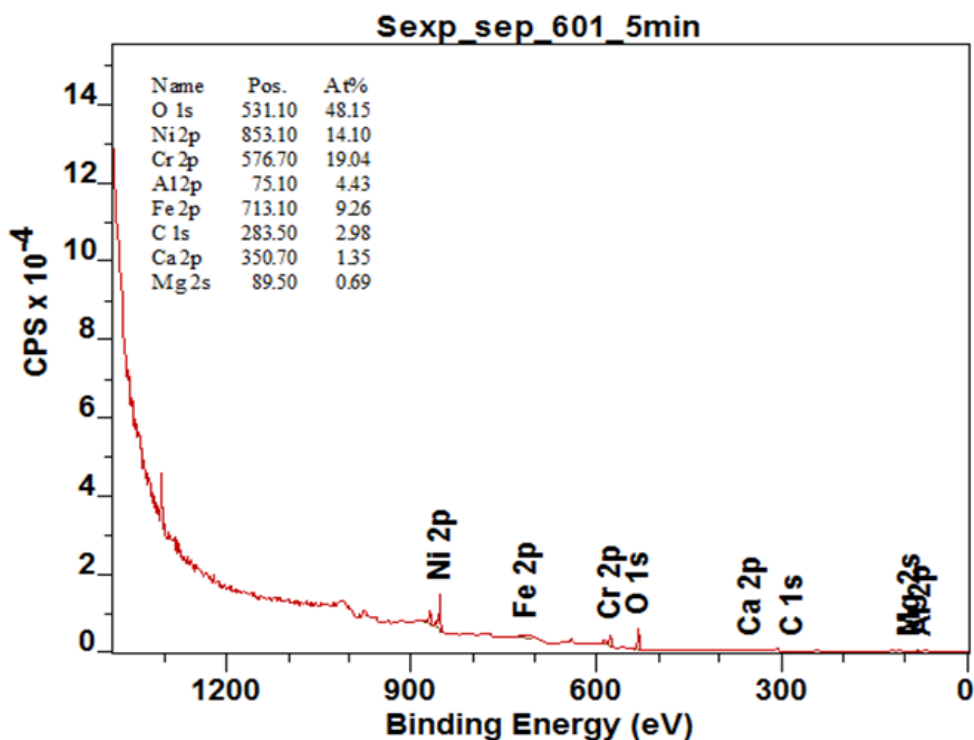
**Tab. 1: Složení exponovaných materiálů [3,4,5]**

	Cr	Ni	C	Mn	Fe	Si	Mo	Ti	Al	Co	Cu	Nb	S	ostatní
Alloy 601	21-25	58-63	0-0,1	0-1	8-20	0-0,5	-	-	0-0,015	-	0-1	-	0-0,015	
Alloy 617	20-24	44,5-61	0,05-0,15	0-1	0-3	0-1	8-10	0-0,6	0,8-1,5	10-15	0-0,5	-	0-0,015	B (0-0,006)
Alloy 625	20-23	58-69	0-0,1	0-0,5	0-5	0-0,5	8-10	0-0,4	0-0,4	0-1	-	3,15-4,15	0-0,015	P (0-0,015)

## Závěr

V průběhu expozice niklových slitin vznikly problémy se vzlínáním solí z nízkých korundových lodiček. Pro další expozice byl problém vyřešen umístěním lodiček do kovové izolační cely. Dále bylo optimalizováno víko autoklávu pro snadnější výměnu vzorků.

Gravimetrické hodnocení neprokázalo relevantní změny hmotností po expozicích. Bylo provedeno srovnání složení povrchu exponovaných vzorků se základním stavem. Z tabulky výsledků XPS spekter (Tab. 2) je patrný vznik oxidů na povrchu exponovaných materiálů. Především se jedná o oxidy niklu, u vzorku Inconelu 601 je to dále převažující oxid chromu a na povrchu vzorku Inconel 617 je přítomno významnější množství molybdenu. Detailnější popis XPS spekter obsahuje příspěvek Kudrnová M., Rejková J., Golubko A.: XPS analýza materiálů pro pokročilé jaderné reaktory. Příklad přehledového spektra exponovaného vzorku je na Obr. 2.



Obr. 2: Přehledové XPS spektrum exponovaného materiálu Inconel 601

		Ni	Cr	C	Fe	Mo	O	Co	Nb
In 601	ZS	44,8	13,3	13,3	20	-	7,7	-	-
	EXP	14,1	19	3,0	9,3	-	48,1	-	-
In 617	ZS	31,7	12,7	23,8	6,1	6,1	9,0	10,6	-
	EXP	35,8	9,3	7,2	3,8	6,5	26,3	7,6	-
In 625	ZS	44,9	10,9	27,2	1,3	6,3	8,9	-	1,3
	EXP	54,8	6,9	7,5	4,2	8,9	14,4	-	0,6

Tab. 2: Výsledek složení povrchů vzorků metodou XPS (ZS – základní stav, EXP – exponovaný stav), Složení je uvedeno v atomárních procentech.

## Poděkování

Tato práce byla realizována jako součást projektu ADAR (Accelerator Driven Advanced Reactor) díky finanční podpoře MŠMT ČR v rámci výzkumného programu INTER-ACTION (projekt č. LTAUSA18198).

## Literatura

- [1] <https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/tpc-predstavila-parametry-sveho-reaktoru-s-roztavenymi-solemi>
- [2] DOLAN, T. J. *Molten Salt Reactors and Thorium Energy*. 1st. Woodhead Publishing, 2017. 840 s. ISBN 9780081012437.
- [3] INCONEL Alloy 601; CAS Registry Number 12631-43-5. [online]. [cit. Dostupné z: <<https://scifinder-cas-org.ezproxy.vscht.cz/scifinder/view/scifinder/scifinderExplore.jsf>>].
- [4] INCONEL Alloy 617; CAS Registry Number 37322-28-4. [online]. [cit. Dostupné z: <<https://scifinder-cas-org.ezproxy.vscht.cz/scifinder/view/scifinder/scifinderExplore.jsf>>].
- [5] INCONEL Alloy 625; CAS Registry Number 12682-01-8.