

Studený kelímek

Experimentální výzkum těžkých jaderných havárií v Řeži

Jana Žďárská

Fyzikální ústav AV ČR, Na Slovance 2, 182 21 Praha 8; zdarskaj@fzu.cz

Centrum výzkumu Řež se zaměřuje mimo jiné na simulace nestandardních stavů jaderných elektráren – především na těžké havárie reaktorů, při kterých dochází k protavení tlakové nádoby jaderného reaktoru a úniku aktivního jaderného paliva. Tým Jana Hrbka sleduje a analyzuje fyzikální a chemické vlastnosti oxidických směsí tavenin na bázi koría, které je produktem roztaveného paliva a komponent aktivní zóny lehkovodních reaktorů, a jeho chování při míchání s obětním materiálem.

V Řeži nedaleko od Prahy, v sevřeném skalnatém údolí řeky Vltavy, leží areál Ústavu jaderného výzkumu¹. Vlák kopíruje břeh řeky i její zákruty a na zastávce Řež se k výstupu chystá nečekaně mnoho cestujících. Velká většina z nich jsou vědečtí pracovníci, kteří sem dojíždějí. A každý jejich příchod do zaměstnání začíná na praktickém, pod kroky se mírně chvějícím mostku pro pěší, který spojuje zdejší vlakové nádraží a zmiňovaný výzkumný ústav.

Výzkum v ÚJV Řež je orientován především na podporu bezpečného a efektivního provozu energetických zdrojů, zejména

na jaderných. Vědci se zde zabývají také bádáním v oblasti nakládání s radioaktivními odpady či vyřazování jaderných zařízení z provozu včetně souvisejících inženýrských prací. Další výzkumnou oblastí jsou vodíkové technologie a také oblast nukleární medicíny – kde probíhá vývoj, výroba a distribuce radiofarmak a do této vývojové skupiny patří i výstavba a provoz center pro pozitronovou emisní tomografii². Výzkum, kterému se budeme v tomto článku věnovat, probíhá v Centru výzkumu Řež, které je dceřinou společností ÚJV, sídlí v areálu ÚJV (stejně

1 ÚJV Řež, a. s.

2 PET



Obr. 1 Ústav jaderného výzkumu leží v malebně sevřeném skalnatém údolí řeky Vltavy.



Jan Hrbek (*1988) získal titul Ph.D. na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. V disertační práci se zabýval metodami výzkumu vlastností a chování materiálů při teplotách vyšších než 2000 °C se zaměřením na použití při studiu těžkých havárií jaderných reaktorů. Tomuto tématu se věnuje nadále. Za disertační práci obdržel cenu České nukleární společnosti a Skupiny ÚJV. Absolvoval pobyty na Leibnizově univerzitě v Hannoveru, Sibiřské federální univerzitě v Krasnojarsku a Institutu Jožefa Stefana v Lublani. V letech 2014 a 2015 působil jako pracovník vývoje a výzkumu Elektrotechnické zkušebny ETD TRANSFORMÁTORY a.s. Roku 2015 nastoupil do Centra výzkumu Řež, kde od roku 2020 vede vědecko-výzkumnou skupinu zabývající se experimentálním výzkumem těžkých havárií jaderných reaktorů. Od roku 2019 působí zároveň v Centru energetického výzkumu Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

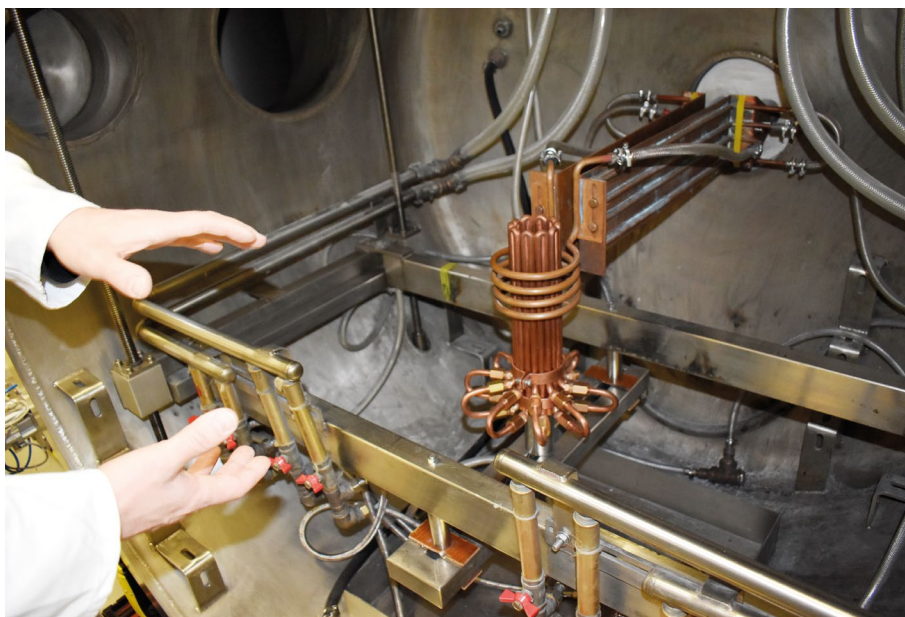
Foto: Jana Žďárská

ně jako ÚACH AV ČR a ÚJF AV ČR) a jedná se o výzkumnou organizaci zaměřenou na výzkum, vývoj a inovace.

Po precizní kontrole na vrátnici mířím v doprovodu Jana Hrbka do laboratoře, v níž pod jeho vedením tým jaderných odborníků experimentálně studuje děje probíhající při těžkých jaderných haváriích a další fyzikální a chemické procesy, probíhající za vysokých teplot (do 3 200 °C). Laboratoř je poměrně unikátní v celosvětovém měřítku – existuje pouze několik dalších podobných laboratoří na světě – ve Francii, Jižní Koreji a USA. Při experimentech zde badatelé používají prototypické korium, které svým složením odpovídá předpokládanému průběhu havárie, a to včetně oxidu uranitického – v ochuzené nebo přírodní formě. Při simulacích jaderných havárií tým Jana Hrbka nepoužívá jaderné štěpení nebo radioaktivní rozpad pro tavení koría, ale využívá indukční ohřev. „*Pracovat v takové laboratoři je pro mě motivující, ale zároveň zavazující. Výzkumnou práci si doslova užívám, a to hned z několika důvodů. Pracujeme na jedinečných projektech, které mají potenciál přispět ke zvyšování bezpečnosti jaderných reaktorů. Unikátní výzkumné projekty ve velké míře znamenají mezinárodní spolupráci, která nás posouvá dál, ať jako jednotlivce, nebo celý tým. Totéž platí i pro spolupráci na národní úrovni – mám zkušenost, že v České republice je mnoho chytrých a schopných lidí, kteří jsou ochotní své znalosti a zkušenosti propojit s ostatními. A asi nejdůležitějším faktorem, který ovlivňuje můj vztah k našemu výzkumu, je tým. Tým je složen ze skvělých lidí, odborně*



Obr. 2 V laboratoři probíhá experimentální studium dějů vznikajících při těžkých jaderných haváriích a dalších fyzikálních a chemických procesech, probíhajících za vysokých teplot (do 3 200 °C).



Obr. 3 Pohled do pracovní komory, kde lze provádět experimenty v inertní atmosféře, vakuu nebo za přítomnosti vzduchu. Komora má za účel také chránit zdraví výzkumníků zapojených do experimentální činnosti. Komora i téměř všechny komponenty v ní jsou intenzivně chlazené vodou, aby nedocházelo k jejich tepelnému namáhání způsobenému sálavým teplem z hladiny taveniny. Ve středu pracovní komory je na rámu usazen měděný studený kelímeček, kolem něhož je navinutý induktor.

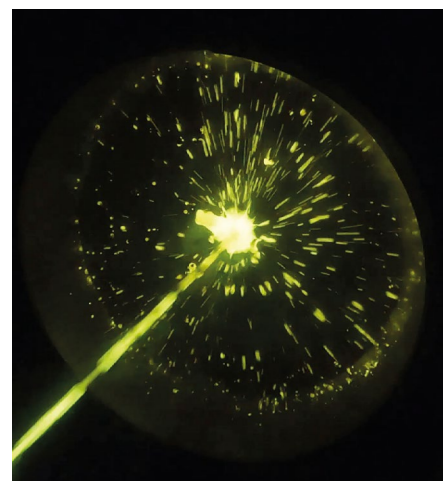
i lidsky, kterým mohu plně důvěřovat. Pracovat s nimi je radost. Do našeho výzkumu se zapojují i studenti, a to je také obohacující, protože mnohdy přicházejí s neotřelými řešeními různých problémů a to mě baví,“ vysvětluje Jan Hrbek, „*a i v osobní rovině pro mě tento výzkum znamená mnoho. Práce v této oblasti vedla k tomu, že jsem měl možnost seznámit se se zajímavými lidmi z České republiky, ale i ze zahraničí. S některými z nich jsme si vybudovali přátelství i mimo pracovní rovinu. Rozhodně mě tento výzkum ovlivňuje i v mém vnímání světa kolem nás. A v neposlední řadě také neustále vyvolává onu pověstnou radost z poznání.*“

I při vstupu do laboratoře je třeba dodržet náročná bezpečnostní pravidla a také se důsledně obléci do pláště, návleků a rukavic. V době exkurze se nesmějí v laboratoři nacházet zdroje ionizujícího záření a laboratoř je před exkurzí proměřena dozimetrickou kontrolou pro zajištění naší bezpečnosti.

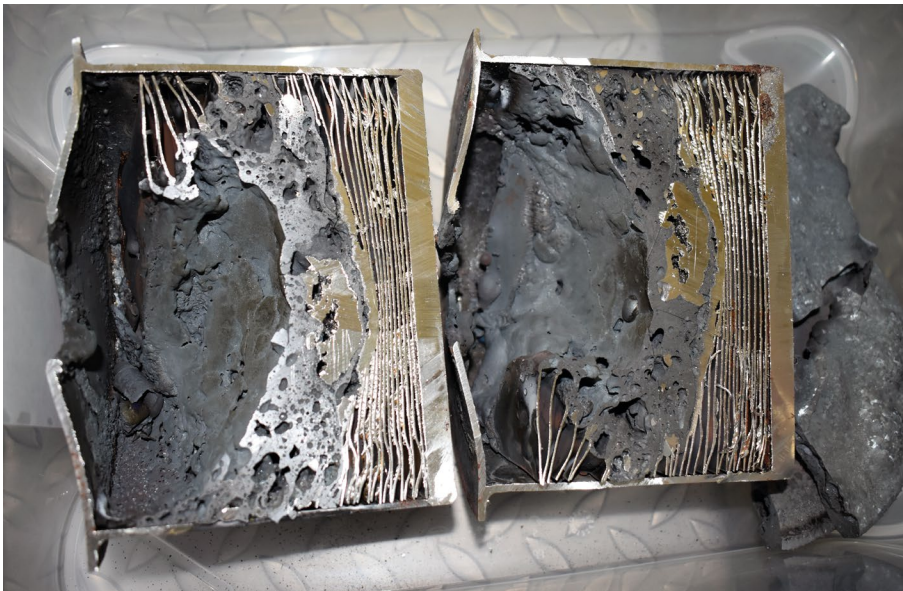
Laboratoř studených kelímků, která byla v rámci projektu SUSEN zařazena ve výzkumném programu 3 – Jaderný palivový cyklus, byla v rámci investiční akce vybavena dvěma komplety indukčních systémů se studenými kelímky. Prvním o výkonu 160 kW a druhým o výkonu 240 kW. V rámci projektu SUSEN byla laboratoř zařízena i systémem sběru dat, přístroji pro bezkontaktní měření a analýzu teploty, výpočetní technikou pro rozsáhlé výpočty a dalšími přístroji potřebnými pro podobný druh výzkumu.

A co si vlastně můžeme pod pojmem *Studený kelímeček* představit a jakým způ-

sobem s ním tým pod vedením Jana Hrbka v Centru výzkumu Řež pracuje? „*Jedná se o zařízení pro vysokofrekvenční indukční ohřev, zaměřené na tavení různých materiálů. Kelímeček sestává z trubkovitých – většinou měděných – dílů, kolem kterých jsou umístěny závitů induktoru generující elektromagnetické pole, které vznikajícími vířivými proudy ohřívá materiál umístěný uvnitř kelímku. Stávající ,experimentální‘ konstrukce studených kelímků umožňují pracovat s teplotami v rozmezí cca od 1 000 °C do 3 200 °C při hmotnosti vsáz-*

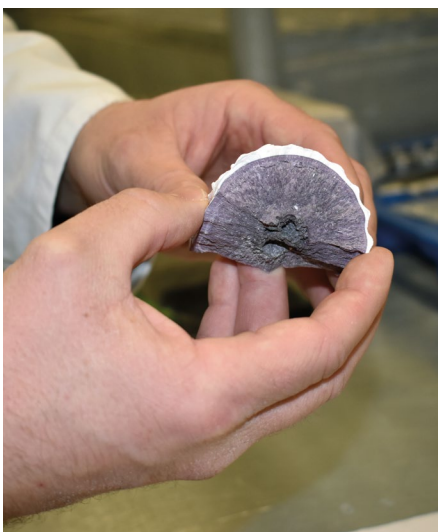


Obr. 4 Výzkum interakce koría s různými materiály lze provádět několika způsoby – přimícháním materiálu do směsi před zahájením experimentu, ponořením materiálu do taveniny nebo jejím vypuštěním na vzorek. Fotografie znázorňuje vypuštění roztaveného koría na desku vyrobenou z nově navrženého žáruvzdorného materiálu, jehož předpokládané použití je v jaderné energetice.



Obr. 5 Pohled na řez vzorkem tepelného stínění na podlaže šachty reaktoru temelínského reaktoru VVER-1000 po experimentu, při němž byl na vzorek vypouštěn vysokoteplotní simulant koria. Ten je využíván pro otestování systémů před experimentem s prototypickým koriem – jedná se o neaktivní směs s podobnými vlastnostmi, jaké má korium. Obě poloviny vzorku jsou umístěny na snímku vedle sebe. Vzorek sestával z 30 lamel z nerezové oceli, mezi nimiž byly vzduchové mezery, a jeho rozměry byly poměrově zmenšeny oproti skutečnému tepelnému stínění. Z fotografie je patrné, že vysokoteplotní simulant koria (černá barva) lamely (lesklá stříbrná barva) zdeformoval a částečně roztavil.

ky převážně do 3 kg (maximální hmotnost v prvním generátoru je cca 30 kg a u druhého generátoru cca 50 kg), a frekvenci od 1 MHz do 2 MHz s výkonem cca 100 kW,“ objasňuje Jan Hrbek a dodává, „princip kelímku spočívá v tom, že zdroj tepla je soustředěn přímo u ohřivaného materiálu a vlastní tavicí nádoba (studený kelímek) je vnitřně chlazená vodou. Od toho plyne i název zařízení. Studený kelímek si na všech svých částech udržuje stálou pracovní teplotu přibližně 200 °C, přestože materiál uvnitř kelímku dosahuje teploty až 3 200 °C.“



Obr. 6 Na horizontálním řezu polovinou ingotu je patrná tenká vrstva (bílá barva), vznikající vlivem intenzivního chlazení studeného kelímku mezi jeho stěnou a taveninou (fialová barva). Tato vrstva zůstává v pevném skupenství i v době, kdy tavenina je v kapalně fázi.

Indukční ohřev má oproti konvenčnímu ohřevu některé nesporné výhody. Jelikož teplo nevstupuje do ohřivaného materiálu jeho povrchem, ale vzniká přímo v materiálu, je samotný proces ohřevu velmi rychlý. Další výhodou je skutečnost, že volbou kmitočtu generátoru je možno volit rozložení tepla u ohřivaném materiálu – vsázce. Třetí výhodou studeného kelímku je jeho bezvzdívková konstrukce, což znamená, že roztavený materiál se přímo nedotýká stěn kelímku ani jiného materiálu, který by se vlivem extrémní teploty mísil s taveninou. Ta proto dosahuje vysoké čistoty ve všech fázích tavy. Na rozhraní roztaveného materiálu a kelímku se vlivem intenzivního ochlazování vytvoří slabá, asi milimetrová křusta z vlastního taveného materiálu, která prakticky nahrazuje nádobu pro roztavený materiál.

V laboratoři jsou studené kelímky využívány pro výzkumné účely zejména v oblastech materiálového výzkumu těžkovatelných oxidů a jejich směsí a při zkoumání stavových diagramů těchto látek. Tým Jana Hrbka se dále zaměřuje na simulace nestandardních stavů jaderných elektráren, kterými mohou být těžké havárie reaktorů, při nichž jde o sledování fyzikálních a chemických vlastností oxidických směsí tavenin na bázi koria. Korium je totiž právě produktem roztaveného paliva a komponent aktivní zóny lehkodivných reaktorů. Důležitá je i znalost jeho vlastností a chování při míchání s obětním materiálem³,

³ Obětní materiál – směs látek navržena tak, aby při smíchání s koriem upravila jeho fyzikální vlastnosti požadovaným způsobem. Cílem je dosáhnout snazšího ochlazení koria.

případně při napadání tlakové nádoby reaktoru nebo betonu. „V souvislosti s jadernými elektrárnami je dalším využitím studeného kelímku vitrifikace radioaktivního odpadu, tedy jeho fixace do skelných matic, v nichž může být skladován v hlubinných úložištích po dobu až několik tisíc let,“ podotýká Jan Hrbek.

„Hlavní důležitost našeho výzkumu vidím v tom, že jsme schopni experimentálně navodit podmínky, jež obvykle nenastávají. Takto můžeme studovat chování materiálů, které se běžně jen simulují pomocí výpočetních kódů. Získávání nových znalostí s využitím výpočtů je jednoznačně užitečné, ale je důležité výsledky porovnávat s realitou. My umíme realitu simulovat v laboratorních podmínkách. V tom vidím největší důležitost našeho výzkumu – poskytovat vstupní data pro výpočty, případně poskytovat data pro porovnání výpočtů s laboratorní simulací. Další význam naší práce vidím v pozorování chování materiálů, ať běžně používaných, nebo nově navrhovaných, při podmínkách havárie jaderného reaktoru nebo jen při vysokých teplotách či různých rychlostech chlazení,“ vysvětluje důležitost tohoto výzkumu Jan Hrbek.

Všichni z nás bychom si přáli, aby se havárie jaderných zařízení nestávaly. To by jistě byla ideální situace. Ale kupříkladu zcela očekávaná havárie jaderné elektrárny Fukušima I – již se v rámci mezinárodních aktivit tým Jana Hrbka taktéž zabývá – nás přesvědčuje o tom, že i přes všechnu snahu a péči se takové nehody stát mohou. A proto je tak důležité, aby lidstvo dobře znalo mechanismy poškození jaderného reaktoru při úniku roztaveného paliva mimo tlakovou nádobu reaktoru a jeho chování v kontejnmentu a tyto své znalosti dokázalo následně využít při budování a zabezpečení jaderných reaktorů.



Obr. 7 Indukční tavení ve studeném kelímku lze využít i pro růst krystalů. Tomuto tématu se tým v Centru výzkumu Řež taktéž věnuje. Fotografie zachycuje nevybroušený krystal kubické zirkonie, která se hojně využívá ve šperkařství jako napodobenina diamantu.