**Zvýšení bezpečnosti jaderných reaktorů a prodloužení životnosti jaderného paliva pokrytím povrchu palivových prvků antikorozními polykrystalickými diamantovými vrstvami**



Zirkoniové palivové prvky pokryté antikorozními ochrannými polykrystalickými diamantovými (PCD) vrstvami byly v roce 2017 na základě výsledků řady testů vybrány firmou Westinghouse jako možní kandidáti na palivo odolné proti nehodám (Accident Tolerant Fuel) v komerčně provozovaných reaktorech v roce 2020. V únoru 2017 začaly dlouhodobé testy PCD vrstvami pokrytého jaderného paliva (Zr palivové prvky naplněné UO2 peletami) v aktivním prostředí výzkumného jaderného reaktoru v norském Haldenu. Účinná metoda ochrany zirkoniových slitin polykrystalickými diamantovými vrstvami byla navržena odborníky z Fyzikálního ústavu AV ČR, Fakulty strojní ČVUT a firmy Westinghouse. Český patent č. 305059 : „*Vrstva, chránící povrch zirkoniových slitin užívaných v jaderných reaktorech“* byl udělen v březnu 2015. Zároveň byla zaregistrována v mezinárodní databázi PCT aplikace (WO2015039636-A1 ) pod názvem *"Layer protecting the surface of zirconium alloys used in nuclear reactors"* <https://www.google.com/patents/WO2015039636A1?cl=en>. V roce 2016 byly podány přihlášky u patentových úřadů EU, USA, Japonska a Jižní Koreje.

Kompozitní polykrystalické diamantové vrstvy byly připraveny v laboratořích Fyzikálního ústavu AV ČR metodou depozice z plynné fáze. Vrstvy byly testovány po simulaci havarijních i standardních podmínek jaderného reaktoru na zařízeních FS ČVUT, VŠCHT Praha, FZÚ AV ČR, Karlsruhe Institute of Technology a Westinghouse Electric. PCD pokrytí výrazně snížilo korozi zirkoniových prvků nejen za standardních pracovních podmínek, ale i při havarijním zvýšení teplot do 1000oC. V návaznosti na velmi dobré výsledky neaktivních testů byly vzorky pokryté PCD ozařovány Fe2+ (3 MeV, 1.95 × 1016 at/cm2) na urychlovačích v Texas AM, USA.  Krátkodobé ozařování relativně těžkými ionty se standardně používá k simulaci poškození materiálu dlouhodobým ozařováním termálními neutrony a v případě PCD materiálu nedošlo po ozařování Fe2+ k významným změnám strukturní integrity vrstvy. O výzkumu informovaly m.j. časopisy Science Daily a Materials Performance (2015):

<https://www.sciencedaily.com/releases/2015/10/151019104151.htm>, http://www.fzu.cz/en/scientists-help-safeguard-nuclear-reactors

Kromě toho, že mohou PCD vrstvy sloužit jako pasivní prvek pro zvýšení jaderné bezpečnosti, prodlouží pokrytí PCD životnost jaderného pláště a následně i dobu bezpečného použití jaderného paliva. Dlohodobé testy (40-170 dní) v  autoklávech  laboratoří Westinghouse Electric (dle normy ASTM) ukázaly, že pokrytí PCD vrstvami sníží oxidaci Zr vzorků o 40% oproti standardům. Výrazným snížením koroze obalu lze prodloužit dobu použití jaderného paliva, které se v současnosti odstraňuje z reaktoru především z důvodu vysoké koroze obalu (Zr slitiny) a nikoli z důvodu dostatečného vyhoření.

Na rozdíl od obvyklých způsobu antikorozní ochrany povrchů Zr slitin kompaktními vrstvami s minimální propustností, brání nehomogenní PCD vrstvy korozi Zr slitin komplexnějším způsobem. PCD se skládá se ze dvou odlišných fází uhlíku a to tvrdé diamantové a měkké grafitické. Jsou tedy pružné a zároveň pevné, díky čemuž vydrží teplotní zátěž v průběhu pracovního cyklu reaktoru. Kromě toho, že PCD vrstva brání přímému kontaktu Zr slitin s okolním prostředím, uhlík z PCD vrstvy proniká do podkladového materiálu a mění ho tak, že výrazně zhoršuje podmínky pro korozi zirkoniových slitin v jaderném reaktoru.

**Výsledky byly publikovány v**

**Scientific Reports**/Nature Publishong Groups *Scientific Reports* **7**, Article number: 6469 (2017) „Nanocrystalline diamond protects Zr cladding surface against oxygen and hydrogen uptake: Nuclear fuel durability enhancement“ https://www.nature.com/articles/s41598-017-06923-4.

**Applied Surface Science** 359 (2015) 621-628 *Thin polycrystalline diamond films protecting Zirconium alloys surfaces: from technology to layer analysis and application in nuclear facilities*,

**J. Mater. Process. Technol**. 214 (2014) 2600 - 2605: *Nanosized polycrystalline diamond cladding for surface protection of zirconium nuclear fuel tubes*,