

(19)  
ČESKÁ  
REPUBLIKA



ÚŘAD  
PRŮMYSLOVÉHO  
VLASTNICTVÍ

(21) Číslo přihlášky: 2019-330  
(22) Přihlášeno: 28.05.2019  
(40) Zveřejněno: 26.08.2020  
(Věstník č. 35/2020)  
(47) Uděleno: 15.07.2020  
(24) Oznámení o udělení ve věstníku: 26.08.2020  
(Věstník č. 35/2020)

C23C 16/27 (2006.01)  
C23C 16/511 (2006.01)  
C23C 14/14 (2006.01)  
C23C 14/35 (2006.01)  
G21C 3/07 (2006.01)  
C23F 11/00 (2006.01)  
B82Y 30/00 (2011.01)

(56) Relevantní dokumenty:  
(Advanced Coatings of Nuclear Fuel Cladding, Jan Škarohlíd, dizertační práce, <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/79206>) 18.12.2018;  
(Polycrystalline diamond coating protects Zr cladding surface against corrosion in water-cooled nuclear reactors: Nuclear fuel durability enhancement; Irena Kratochvílová, Radek Škoda, František Fendrych; Advanced Coating Materials, Publisher: John Wiley & Sons, pp.123-154; [https://www.researchgate.net/publication/329911685\\_Polycrystalline\\_diamond\\_coating\\_protects\\_Zr\\_cladding\\_surface\\_against\\_corrosion\\_in\\_water-cooled\\_nuclear\\_reactors\\_Nuclear\\_fuel\\_durability\\_enhancement](https://www.researchgate.net/publication/329911685_Polycrystalline_diamond_coating_protects_Zr_cladding_surface_against_corrosion_in_water-cooled_nuclear_reactors_Nuclear_fuel_durability_enhancement)) 2018; (Preparation, structure, and properties of high-entropy alloy multilayer coatings for nuclear fuel cladding: A case study of AlCrMoNbZr/(AlCrMoNbZr)N; W.Zhang, R.Tang, Z.B.Yang, C.H.Liu, H.Chang, J.J.Yang, J.L.Liao, Y.Y.Yang, N.Liu; Journal of Nuclear Materials Volume 512, ISSN: 0022-3115) 15.12.2018.  
DE 4100548 A1; CZ 305059 B6; US 2013306989 A1; US 5750195 A.

(73) Majitel patentu:  
Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i., Praha 8, Libeň, CZ

(72) Původce:  
doc. Ing. Irena Kratochvílová, Ph.D., Praha 8,  
Libeň, CZ  
Ing. Jan Škarohlíd, Ph.D., Praha 8, Libeň, CZ  
Mgr. Petr Ashcheulov, Ph.D., Praha 8, Libeň, CZ  
doc. Ing. Radek Škoda, Ph.D., Praha 8, Libeň, CZ

(74) Zástupce:  
Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i./CITT, Karel Bauer,  
Za Radnicí 835, 252 41 Dolní Břežany

(54) Název vynálezu:  
**Povlak vhodný pro ochranu vnějšího  
povrchu pokrytí jaderného paliva, použití  
povlaku, způsob výroby povlaku a jaderné  
palivo**

(57) Anotace:  
Povlak vhodný pro ochranu vnějšího povrchu pokrytí jaderného paliva, výhodně zirkoniové trubky, obsahuje vrstvu polykrystalického diamantu, PCD, na níž je umístěna vodou nepropustná vrstva ze slitiny Cr a Al. Řešení spočívá ve strategii ochrany zirkoniových obalů jaderného paliva proti korozi kombinací aktivní a pasivní vrstvy tvořící jediný povlak, který může být obecně použit pro velmi účinnou ochranu různých kovových materiálů proti vysokoteplotní korozi. Řešení se rovněž týká použití tohoto povlaku, pokrytí jaderného paliva a způsobu výroby povlaku.

## **Povlak vhodný pro ochranu vnějšího povrchu pokrytí jaderného paliva, použití povlaku, způsob výroby povlaku a jaderné palivo**

### 5 Oblast techniky

Předkládaný vynález se týká ochrany jaderného paliva, konkrétně pokrytí paliva v podobě tenkostěnných trubek, vyrobených z kovových podkladů, zejména zirkoniových slitin, umístěného v jaderném reaktoru, proti korozním změnám za standardních i havarijních podmínek v prostředí energetických lehkovodních a těžkovodních jaderných reaktorů. Předkládaný vynález se zejména 10 týká tenkého povlaku, použití povlaku a způsob ochrany jaderného paliva povlakováním.

### Dosavadní stav techniky

15 Zirkoniové slitiny, hořčíkové slitiny anebo slitiny nerezové oceli jsou základním konstrukčním materiálem používaným ve vodou chlazených jaderných reaktorech, zejména jako materiál na pokrytí jaderného paliva. Pokrytí jaderného paliva představuje tenkostěnnou trubku např. ze zirkoniové slitiny, která je zcela zásadním prvkem v reaktoru a která představuje jednu z bariér 20 proti úniku jaderného materiálu do primárního okruhu. Zirkoniové slitiny, jako typické materiály pro pokrytí paliv, musí kromě nízkého účinného průřezu pro termální neutrony mít i vysokou tepelnou vodivost, rozměrovou stabilitu, odolnost proti korozi a radiační odolnost.

Na povrchu zirkoniového pokrytí jaderného paliva, tj. palivové trubce nebo rovněž známé jako 25 palivové tyče, dochází v prostředí energetických lehkovodních (PWR, BWR, VVER) a těžkovodních (CANDU) jaderných reaktorů, a to za pracovních i havarijních podmínek, k disociaci vody a následné oxidaci zirkonia, přičemž uvolněný plynný vodík difunduje do zirkoniové slitiny. Již z výroby mají zirkoniové slitiny přirozenou tenkou vrstvu  $ZrO_2$  o tloušťce 3 až 5  $\mu m$ . Rychlost oxidace v prostředí vodou chlazeného jaderného reaktoru Zr je limitována rychlostí difúze kyslíku 30 skrze vrstvu  $ZrO_2$ . Pokrytí jaderného paliva ze slitin zirkonia vystavené oxidaci a difúzi vodíku je mechanicky poškozené (dochází ke křehnutí Zr slitin), což ohrožuje integritu tohoto pokrytí. Jedním z bezpečnostních kritérií pro provoz pokrytí jaderného paliva v komerčních reaktorech je tloušťka zoxidovaného povrchu (povrchová vrstva  $ZrO_2$ ). Oxidace slitiny Zr a tvorba vodíku omezují tedy provoz jaderného paliva, typicky dochází dle bezpečnostních norem k výměně 35 nedostatečně vyhořelého paliva z důvodu přílišné oxidace povrchu Zr palivového pokrytí. [P.C. Burns, R. et al, Science, 335:1184-1188 (2012); R.A. Causey et al Sandia National Laboratory Report SAND2005-6006 (2006); Vujic et al ENERGY, Small modular reactors: Simpler, safer, cheaper (2012), 45, 288; S.A. Brown, ASTM Spec. Tech. Publ., 780, Westminister, PA (1981); M.P. Puls, Metallurgical & Materials Transactions, (1990), 21, 2905; Dostal V et al Progress in Nuclear Energy, (2008), 50, 631; K.M. Song and S. B. Lee, Journal of Power and Energy Systems, 40 (2008), 2, 47; M. Steinbruk, Oxid. Metals, DOI: 10.1007/s11085-011-9249-3 (2011)].

Běžné provozní teploty v reaktoru jsou 300 až 400 °C. V případě havárií dochází při teplotách nad 45 850 °C k tzv. vysokoteplotní korozi Zr pokrytí jaderného paliva, následkem čehož toto pokrytí rychle degraduje, což nakonec může vést až k jeho zničení a následnému úniku vysoce aktivních štěpných produktů do primárního okruhu.

Standardně se jako ochrana proti korozi kovových materiálů a slitin používají vrstvy 50 nepropouštějící molekuly vody. Ideální, pro vodu nepropustná vrstva bez defektů perfektně brání přímému kontaktu kovového podkladu s vodním prostředím. Typicky ale při pracovních a zejména havarijních teplotách následkem změn objemu podkladového materiálu dojde k popraskání vodou nepropustné ochranné vrstvy. V místech nových prasklin nastává velmi rychlý rozvoj koroze podkladového kovového materiálu. Stupeň koroze podkladového kovového materiálu je v okolí prasklin ochranného povlaku ještě vyšší než u nechráněného kovového materiálu. To je v případě 55 antikorozi ochrany povrchu zirkoniového pokrytí jaderného paliva značný problém i za

pracovních teplot, ale zejména pak v případě havarijního nárůstu teplot. Při havarijních teplotách nad 850 °C nastává tzv. vysokoteplotní koroze, při níž dochází k rychlému růstu vrstvy oxidu zirkoničitého, množství vodíku a uvolnění velkého množství tepla, které komplikuje chlazení aktivní zóny a posiluje další průběh vysokoteplotní oxidace zirkoniové slitiny.

5

Dizertační práce „Pokročilé povlaky pokrytí jaderného paliva, Jan Škarohlíd, ČVUT – den obhájení 18. 12. 2018“ odhaluje dvě provedení. První provedení se týká povlaku z PCD umístěného na kovovém podkladu a druhé provedení se týká povlaku tvořeného vodou nepropustné keramické vrstvy na kovovém substrátu. Disertační práce dále teoreticky diskutuje seznam možných kombinací vrstev, avšak neobsahuje žádné konkrétní provedení, resp. důvody vedoucí ke kombinaci, které by překonaly stav techniky.

10

### Podstata vynálezu

15

Úlohou předkládaného vynálezu je poskytnout povlak vhodný pro vnější povrch pokrytí jaderného paliva, vyrobeného např. ze zirkoniové slitiny, který chrání vnější povrch jaderného paliva proti korozi v prostředí energetických lehkovodních (PWR, BWR, VVER) a/nebo těžkovodních (CANDU) jaderných reaktorech. V jistých provedeních představuje vynález výhodu při pracovních i havarijních teplotách v jaderných reaktorech. Při provozu při pracovních teplotách, tj. do 400 °C představuje vynález výhodu v prodloužení životnosti jaderného paliva. Při havarijních podmínkách, které představují teplotu nad 850 °C, představuje vynález výhodu jako ochranný prvek. Synergický technický efekt představuje tak účinnou ochranu povrchu kovového, zejména zirkoniového pokrytí jaderného paliva proti korozi v prostředí jaderných reaktorů. Povlak podle vynálezu může prodloužit životnost jaderného paliva, např. v parovodním jaderném reaktoru jak za standardních, tak za havarijních podmínek. Palivo s ochranou proti korozi za standardních i havarijních podmínek povede k vyšší bezpečnosti a levnějšímu provozu jaderného reaktoru. V jistých provedeních může povlak představovat výhodu ochrany proti otěru jaderného paliva.

20

25

V jistém provedení je vynálezem povlak vhodný pro vnější povrch pokrytí jaderného paliva, kde podstata vynálezu spočívá v tom, že vnější povrch pokrytí jaderného paliva, např. vnější povrch palivové trubky vyrobené ze zirkoniové slitiny, je opatřen vrstvou polykrystalického diamantu, na níž je nanášena vodou nepropustná vrstva ze slitiny Cr a Al, přičemž její tloušťka je do 30 μm. Pokrytí jaderného paliva může být např. vyrobeno z následujících materiálů: různé slitiny hořčíku, slitiny zirkonu, nerezavějící ocel.

30

35

Výše definovaný dvouvrstvý povlak umístěný na povrchu pokrytí jaderného paliva, výhodně palivové trubky ze zirkoniové slitiny, se skládá z vrstev s různými a doplňujícími se antikorozními funkcemi. Spodní vrstva je polykrystalický diamant (PCD), heterogenní materiál, propustný pro molekuly vody, který aktivně brání v korozi kovového podkladu. PCD má vysokou tepelnou vodivost a stabilitu, nízkou chemickou reaktivitu, nedegraduje s časem a má vhodný účinný průřez pro interakci s neutrony. Bylo ukázáno, že neutronové ozáření zachovává krystalickou strukturu diamantové vrstvy stabilní.

40

Hlavní antikoroziční efekt PCD povlaku spočívá v tom, že uhlík z diamantové vrstvy při pracovních a vyšších teplotách postupně proniká do povrchu podkladového kovového materiálu, např. do Zr materiálu (vrstvy zoxidovaného Zr-ZrO<sub>2</sub> vrstvy) a mění jeho fyzikální a chemické vlastnosti tak, že významně snižuje pravděpodobnost koroze Zr slitin. PCD vrstva tak aktivně brání oxidaci kovového podkladu i v případě vzniku poruch a trhlin v PCD pokrytí.

45

50

Na povrchu PCD vrstvy představující aktivní ochranu proti korozi je nanášena vodou nepropustná vrstva představující pasivní ochranu proti korozi. Dvouvrstvý ochranný povlak brání přímému kontaktu vnějšího povrchu pokrytí jaderného paliva s vysokoteplotním prostředím vodou chlazeného jaderného reaktoru. Pokud vodou nepropustná vrstva při vysokých teplotách popraská, bude právě spodní PCD vrstva bránit oxidaci kovového podkladu.

55

Ve výhodném provedení se vrstva polykrystalického diamantu sestává z 96 %  $sp^3$  (diamant) a 4 %  $sp^2$  (grafit) hybridizovaného uhlíku.

- 5 Při teplotně vyvolaných změnách objemu podkladu je výhodou směsný charakter ochranné uhlíkové vrstvy, který kromě krystalických diamantových zrn  $sp^3$  hybridizovaného uhlíku obsahuje i pružnou amorfní fázi  $sp^2$  hybridizovaného uhlíku, schopnou dobře sledovat objemové změny/expanzi kovového podkladu.
- 10 V dalším výhodném provedení je tloušťka polykrystalické diamantové vrstvy mezi 200 až 700 nm. V rámci testování bylo ověřeno, že optimální tloušťka polykrystalické diamantové vrstvy je v rámci tolerance přesnosti 500 nm. Pro získání tloušťky této vrstvy se výhodně využije způsob výroby PCD vrstvy pomocí chemické depozice z plynné fáze v mikrovlnném plazmatu.
- 15 Podle předkládaného vynálezu je na povrchu PCD vrstvy nanášena vrstva ze slitiny obsahující Cr a/nebo slitiny Cr a Al, s převahou Cr (dále označováno jako Cr/Al), a to nanášenou vhodnou technologickou metodou, například metodou pulzního magnetronového naprašování nebo pulzní laserovou depozicí. Povlak je připraven tak, aby byl pro vodu nepropustný. Neporušený povlak Cr anebo Cr a Al brání přímému kontaktu kovového podkladu s vysokoteplotním prostředím vodou chlazeného jaderného reaktoru.
- 20

V souladu s předchozím tvrzením, pokud výše uvedená slitina při vysokých teplotách popraská, bude právě spodní PCD vrstva bránit oxidaci Zr podkladu. Zpočátku je povrch Zr slitiny chráněn především pro vodu nepropustnou horní Cr anebo Cr/Al vrstvou (pasivní ochrana). Spodní vrstva PCD také díky své pružnosti snižuje počet trhlin v Cr anebo Cr/Al, a tím prodlužuje funkční dobu pasivní ochrany Cr anebo Cr/Al vrstvy. Později, až dojde následkem teplotních změn objemu podkladového Zr pokrytí jaderného paliva k narušení integrity Cr anebo Cr/Al, bude oxidace Zr snížena zejména uhlíkem nadifundovaném z PCD do povrchu Zr pokrytí jaderného paliva ( $ZrO_2$  vrstvy) - aktivní ochrana.

25

30 Kombinace dvou vrstev aktivně (PCD) a pasivně (obecně vodou nepropustná vrstva – např. Cr anebo Cr/Al slitiny) bránící oxidaci Zr podkladu prodlouží snížením oxidace Zr slitiny provozuschopnost jaderného paliva, u něhož v současnosti typicky dochází k výměně nedostatečně vyhořelého paliva z důvodu přílišné oxidace povrchu Zr palivového pokrytí. Kombinace vrstev aktivně a pasivně bránící oxidaci podkladu také prodlouží životnost jaderného paliva za havarijních podmínek ve vodou chlazených jaderných reaktorech. Ochrana pokrytí paliva proti korozi za standardních i havarijních podmínek vodou chlazeného reaktoru tak povede k vyšší bezpečnosti a ekonomičtějšímu využití jaderného paliva.

35

40 V dalším provedení představuje vynález samotné pokrytí jaderného paliva, zejména palivovou tyč vyrobenou ze zirkoniové slitiny, vhodné pro umístění do jaderného reaktoru, kde podstata vynálezu spočívá v tom, že vnější povrch jaderného paliva je opatřen výše definovaným povlakem nebo jakýmkoliv jeho výhodným provedením.

45 V dalším provedení představuje vynález jaderný palivový element, který obsahuje pokrytí jaderného paliva, přičemž tloušťka PCD vrstvy je mezi 200 až 700 nm.

Výše definovaný jaderný palivový element lze použít pro prodloužení životnosti paliva ve vodou chlazeném jaderném reaktoru a/nebo jako ochranný prvek při jaderných haváriích.

50

Další provedení vynálezu představuje způsob výroby výše definovaného povlaku, kde podstata vynálezu spočívá v tom, že způsob obsahuje kroky:

- 55 - depozice PCD vrstvy na kovový, výhodně zirkoniový, podklad; a  
- depozice vodou nepropustné vrstvy na PCD vrstvu.

Ve výhodném provedení způsobu výroby se depozice PCD vrstvy provede prostřednictvím chemické depozice z plynné fáze v mikrovlnném plazmatu; a

- 5 depozice vodou nepropustné vrstvy se provede prostřednictvím metodou pulzního magnetronového naprašování.

#### Objasnění výkresů

10

Obr. 1 představuje schématické znázornění průřezu palivové trubky obsahující povlak podle předkládaného vynálezu.

15

Obr. 2 představuje záznam transmisní elektronové mikroskopie vzorku ZIRLO pokrytí jaderného paliva povlakovaného kombinací PCD a Cr/Al vrstev po 60 minutách v 1000°C parním autoklávu. Obrázek ukazuje praskliny ve slitině Cr.

20

Obr. 3 je graf závislosti přírůstků hmotnosti na plochu v čase. Graf ukazuje přírůstky hmotnosti ZIRLO v závislosti na druhu použitého povlaku. Na grafu vidíme kinetiku oxidace vzorků ZIRLO pokrytí jaderného paliva povlakovaných PCD vrstvou, Cr/Al a kombinací PCD a Cr/Al autoklávovaných při 1000 °C. Kinetika oxidace vzorků ukázala odlišný způsob ochrany proti korozi oběma povlakovými materiály. Po dobu kratší než 10 minut v autoklávu fungovala vrstva Cr/Al jako plná bariéra a PCD postupně uvolňoval uhlík do vrstvy ZrO<sub>2</sub>. Po delší době v autoklávu (více než 20 minut) trhliny ve vrstvě Cr/Al sice umožňují korozi slitiny Zr. Uhlík ve vrstvě ZrO<sub>2</sub> chrání slitinu Zr proti korozi. Veličina na svislé ose udává normalizovaný/relativní hmotnostní přírůstek autoklávovaného vzorku, který koreluje s korozi Zr slitiny.

25

Obr. 4 představuje schématické znázornění pokrytí jaderného paliva opatřený povlakem podle vynálezu.

30

#### Příklady uskutečnění vynálezu

35

Příklad uskutečnění zobrazený na obr. 1 představuje dvouvrstvý povlak, který byl deponován na vnější povrch 1 pokrytí 4 jaderného paliva. Povlak byl nanesen na zirkoniovou slitinu, která představuje pokrytí 4 jaderného paliva, které bez povlaku podléhá korozi. Povlak obsahuje vrstvu 2 polykrystalického diamantu a slitinu Cr, která představuje vodou nepropustnou vrstvu 3.

40

V rámci experimentálního měření byla měřena koroze vzorků ZIRLO pokrytí 4 jaderného paliva (ZIRLO trubek) s ochrannými povrchovými povlaky:

45

1. 500 nm silnou PCD vrstvou 2;
2. 2 μm silnou vrstvou 3 slitiny Cr; a
3. dvouvrstvý povlakem tvořeným kombinací 500 nm PCD (spodní vrstva 2) a 2 μm slitiny Cr (horní vrstva 3).

50

Vzorky byly testovány v autoklávech při teplotě 1000 °C po dobu 30 minut v parním autoklávu; a při teplotě 400 °C po dobu 4 dnů ve vodním autoklávu. PCD vrstva 2 byla připravena metodou depozice z plynné fáze v mikrovlnném plazmatu.

55

Podle výsledku experimentu kombinace PCD vrstvy 2 a vrstvy 3 Cr slitiny snížila korozi pokrytí 4 jaderného paliva ZIRLO o více než 85 % po 4 dnech v autoklávu při teplotě 400 °C. V autoklávu při havarijních teplotách 1000 °C a době 30 minut byla sledována korozi dynamika vzorků ZIRLO trubek. V počátečním stadiu, tj. době menší než 10 minut, Cr slitina s nízkým počtem trhlín fungovala jako bariéra. Po době v autoklávu delší než 20 minut došlo díky prasklinám ve vrstvě 3

Cr slitiny ke korozi trubky ze zirkoniové slitiny. V této fázi uhlík z PCD vrstvy 2 pronikl do povrchu 1 ZIRLO vzorků a zhoršil podmínky pro oxidaci Zr u PCD pokrytých Zr trubek (obr. 2). Spodní PCD vrstva 2 u dvouvrstvého povlaku Zr trubky také díky své pružnosti snížila počet trhlin v Cr slitině a tím prodloužila funkční dobu pasivní ochrany Cr vrstvy 3.

5

Jak je zobrazeno na obr. 3, po 10 min. v parním autoklávu při teplotě 1000 °C byla koroze ZIRLO trubek pokrytých Cr slitinou a ZIRLO vzorků pokrytých dvouvrstevným PCD a Cr povlakem pomalejší ve srovnání s nepokrytým ZIRLO a ZIRLO pokrytým pouze PCD povlakem. V tomto stadiu Cr slitina fungovala jako bariéra proti průniku vody. PCD vrstva 2 postupně uvolňovala uhlík do povrchové ZrO<sub>2</sub> vrstvy vnějšího povrchu 1 pokrytí 4. Po 10 minutách v 1000 °C autoklávu povlak Cr slitiny a povlak PCD a Cr slitiny snížily korozi oproti nepovlakovanému/standardnímu vzorku ZIRLO trubky na 42 %, resp. 28 %. Povlakování vzorku ZIRLO PCD vrstvou 2 snížilo korozi po 10 minutách v 1000 °C autoklávu oproti nepovlakovanému vzorku ZIRLO trubky velmi mírně.

15

Pokud byly vzorky v autoklávu o teplotě 1000 °C po dobu delší než 20 minut, situace se změnila: trhliny v povlaku Cr slitiny umožnily vyšší korozi ZIRLO trubky. Naproti tomu více uhlíku z PCD vrstev 2 proniklo do zoxidované čisti Zr trubky-ZrO<sub>2</sub> a změnilo její fyzikálně-chemické vlastnosti tak, že podmínky pro další oxidaci Zr se výrazně zhoršily. Po 30 minutách v autoklávu za teploty 1000 °C byla koroze ZIRLO trubek povlakovaných PCD a povlakovaných dvouvrstvou PCD a Cr slitinou nižší oproti korozi nepovlakovaných vzorků ZIRLO vystavených stejným korozním podmínkám v autoklávu. Šlo o 83 %, resp. 85 % oproti korozi nepovlakovaného vzorku ZIRLO. Koroze pokrytí 4 jaderného paliva ZIRLO pokrytého vrstvou 3 Cr slitiny po 30 minutách v 1000 °C horké páře byla 96% koroze nepovlakovaných ZIRLO vzorků, které byly vystaveny stejným korozním podmínkám v autoklávu.

25

Normalizovaná hmotnost (g/dm<sup>2</sup>) povlaku PCD na vnějším povrchu 1 ZIRLO trubek představuje méně než 2 % normalizovaného přírůstku hmotnosti vzorků ZIRLO, korodovaných v horké páře při 1000 °C po dobu 30 minut.

30

Obrázek 4 dále schématicky znázorňuje pokrytí 4 jaderného paliva obsahující povlak podle vynálezu. Vnější povrch 1 pokrytí 4 je opatřen dvouvrstvou obsahující PCD vrstvou 2 a vodou nepropustnou vrstvou 3.

35

#### Průmyslová využitelnost

40

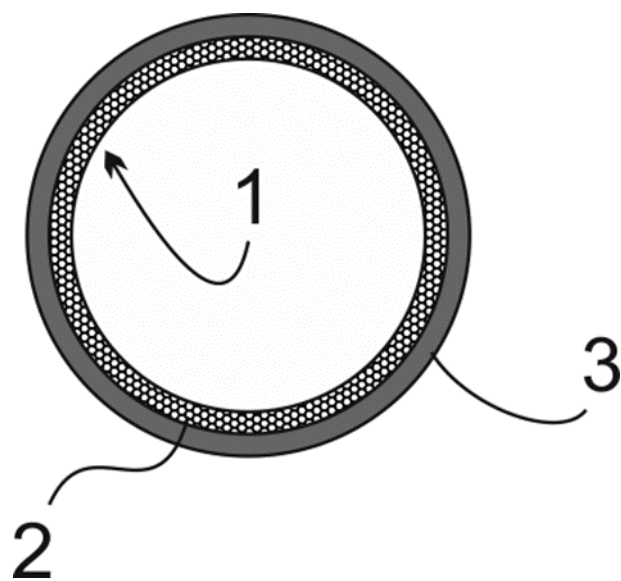
Výše uvedená ochrana povrchů zirkoniového pokrytí jaderného paliva může být aplikována v komerčně provozovaných energetických lehkovodních reaktorech PWR, BWR, VVER anebo těžkovodních reaktorech CANDU. Dvouvrstvý povlak podle vynálezu, aktivně a zároveň pasivně chrání zirkoniové slitiny proti korozním změnám za standardních a havarijních podmínek ve vodou chlazených jaderných reaktorech, výrazným způsobem zvyšuje bezpečnost provozu a prodlužuje dobu využitelnosti jaderného paliva.

45

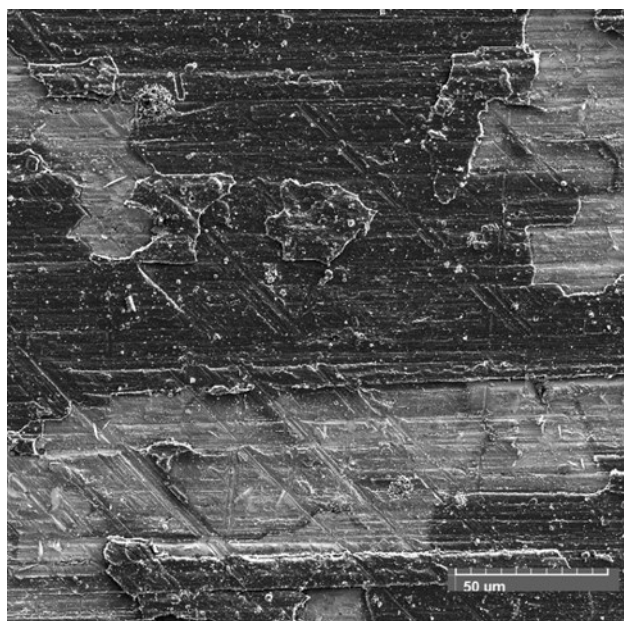
## PATENTOVÉ NÁROKY

- 5 1. Povlak, vhodný pro ochranu vnějšího povrchu (1) pokrytí (4) jaderného paliva, obsahující vrstvu (2) polykrystalického diamantu, na niž je nanesena vodou nepropustná vrstva (3), **vyznačující se tím**, že vodou nepropustná vrstva je slitina Cr a Al, přičemž její tloušťka je do 30  $\mu\text{m}$ .
- 10 2. Povlak podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že vrstva (2) polykrystalického diamantu se sestává z 96 %  $\text{sp}^3$  a 4 %  $\text{sp}^2$  hybridizovaného uhlíku.
3. Povlak podle kteréhokoliv z výše uvedených nároků, **vyznačující se tím**, že tloušťka polykrystalické diamantové vrstvy (2) je mezi 200 až 700 nm, výhodně je tloušťka 500 nm.
- 15 4. Použití povlaku podle kteréhokoliv z výše uvedených nároků pro ochranu kovových podkladků vůči korozi, zejména vysoko-termální korozi.
5. Pokrytí (4) jaderného paliva, zejména palivová trubka vyrobena ze zirkoniové slitiny, vhodné pro umístění do jaderného reaktoru, **vyznačující se tím**, že vnější povrch (1) pokrytí (4) jaderného paliva je opatřen povlakem podle kteréhokoliv z nároků 1 až 3.
- 20 6. Jaderný palivový element, **vyznačující se tím**, že obsahuje pokrytí (4) jaderného paliva podle nároku 5, přičemž tloušťka polykrystalické diamantové vrstvy (2) je 200 až 700 nm.
- 25 7. Použití jaderného palivového elementu podle nároku 6 pro prodloužení životnosti jaderného paliva v jaderném reaktoru a/nebo jako ochranného prvku při jaderných haváriích.
8. Způsob výroby povlaku podle kteréhokoliv z nároků 1 až 3 pro úpravu vnějšího povrchu (1) pokrytí (4) jaderného paliva, **vyznačující se tím**, že způsob obsahuje kroky:
- 30 a) depozice PCD vrstvy (2) na kovový, výhodně zirkoniový povrch (1) pokrytí (4) jaderného paliva;
- b) depozice vodou nepropustné vrstvy (3) ze slitiny Cr a Al, přičemž její tloušťka je do 30  $\mu\text{m}$ , na PCD vrstvu (2).
- 35 9. Způsob výroby podle nároku 9, **vyznačující se tím**, že
- 40 - depozice PCD vrstvy (2) se provede prostřednictvím chemické depozice z plynné fáze v mikrovlnném plazmatu; a
- depozice vodou nepropustné vrstvy (3) se provede prostřednictvím metodou pulzního magnetronového naprašování.
- 45

2 výkresy

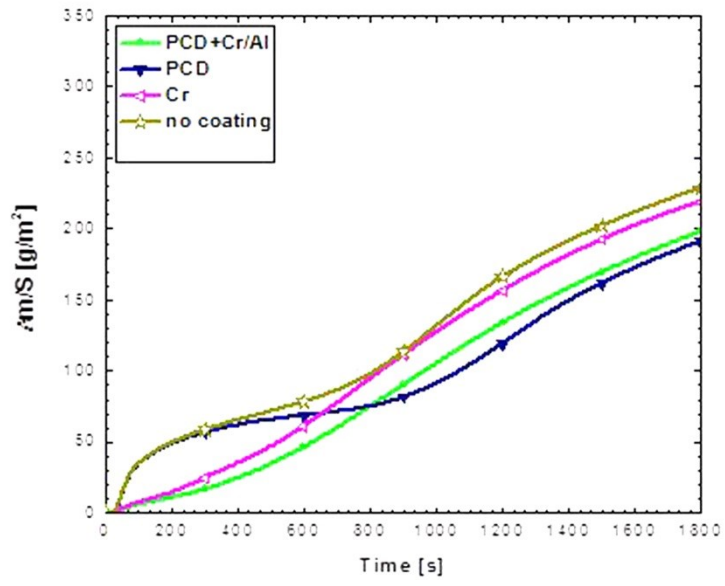


Obr. 1

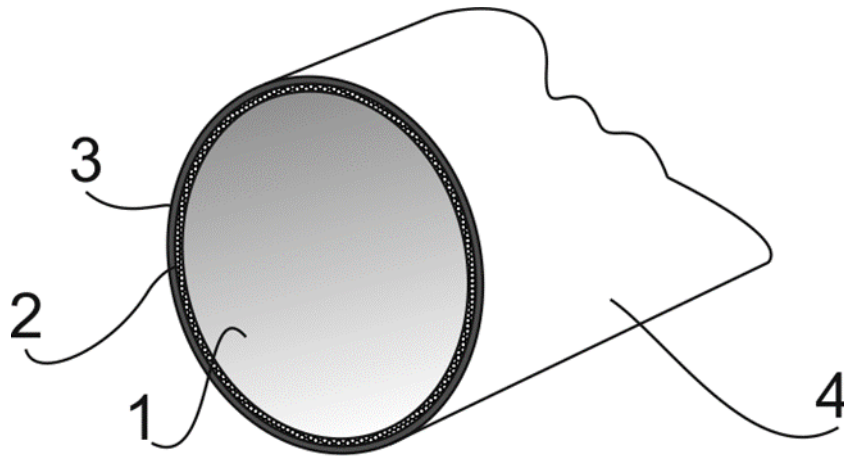


Obr. 2





Obr. 3



Obr. 4