

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**TEZE
DISERTAČNÍ
PRÁCE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

Geomateriály v plazmovém střikání

Barbara Nevrlá

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Materiálové inženýrství

Školitel: *prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.*

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha

Duben 2021

Název anglicky: Geomaterials in plasma spraying

Disertační práce byla vypracována v kombinované formě doktorského studia na Ústavu materiálového inženýrství Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: *Mgr. Barbara Nevrlá*

Ústav materiálového inženýrství, Fakulta strojní ČVUT v Praze

Ústav fyziky plazmatu AV ČR, Oddělení materiálového inženýrství

Školitel: *prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.*

Ústav materiálového inženýrství, Fakulta strojní ČVUT v Praze

Školitel-specialista: *doc. Ing. Pavel Ctibor, Ph.D.*

Ústav fyziky plazmatu AV ČR, Oddělení materiálového inženýrství

Oponenti:

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod.

v zasedací místnosti Fakulty strojní ČVUT v Praze na Ú 12132,

před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Materiálové inženýrství.

S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.

předseda oborové rady oboru Materiálové inženýrství

Fakulta strojní ČVUT v Praze

| | |
|--|----|
| 1 Úvod / | 6 |
| 2 Plazmové stříkání / | 6 |
| 3 Cíle disertační práce / | 9 |
| 4 Experimentální část / | 9 |
| 4.1 Zirkon / | 10 |
| 4.2 Diopsid / | 10 |
| 4.3 Turmalín / | 10 |
| 4.4 Kaolín / | 11 |
| 4.5 Lupek / | 13 |
| Závěr / | 14 |
| Citovaná literatura / | 15 |
| Vlastní publikace k tématu disertace / | 16 |
| Anotace, Klíčová slova / | 17 |

1 Úvod

S rostoucími nároky na odolnost materiálů v dnešní technické praxi je i při jejich vývoji soustředěna pozornost od tradičních homogenních materiálů ke kompozitům a k materiálům se specifickou úpravou povrchu. Povrchová ochrana materiálu je podstatou i technologie plazmového stříkání (plasma spraying, PS), která je předmětem této disertační práce. Jako výchozí materiál jsou v PS používány kovové nebo keramické prášky, často finančně nákladná syntetika se špičkovými vlastnostmi, kterých pro řadu konečných aplikací není třeba. Tato práce je zaměřena na hledání lacinějších alternativ z přírodních zdrojů - geomateriálů, tedy anorganických materiálů přírodního původu, což je v oboru plazmového stříkání zatím jen málo prostudovaná problematika.

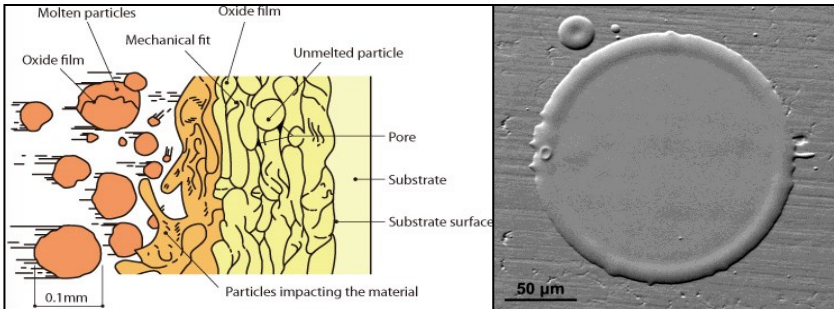
2 Plazmové stříkání

Plazmové stříkání je technologie z oboru žárových (termických) nástřiků a spočívá v nanesení roztaveného prášku na podložku (substrát) představující upravovaný povrch. Vytvořená vrstva (nástřik) na tomto povrchu zlepšuje jeho vlastnosti nebo plní ochrannou funkci. Plazmové stříkání je vhodné k nanášení velkých objemů materiálů v krátkém čase, a to i silnostěnných nástřiků na tvarově složitých površích, při vynaložení relativně nízkých nákladů.

Technologie využívá plazmový hořák, tzv. plazmatron, generující termické (rovnovážné) plazma. To je vytvářeno v elektrickém výboji stabilizovaným plynem (Atmospheric Plasma Spray, APS) nebo vodou, resp. vodní parou (Water Stabilized Plasma, WSP), které jsou ionizovány za vzniku plazmatu. V případě plynem stabilizovaného plazmatu hoří v komoře napuštěné plazmotvorným plynem elektrický oblouk a plyn - argon, dusík či vodík - je jím excitován do stavu plazmatu. Kapalinová stabilizace používá vodní vír rotující okolo elektrického oblouku, jehož tepelná energie odpařuje vodu, která se následně disociuje a ionizuje. Technologie WSP-H (Hybrid Water Stabilized Plasma) využívá obou systémů za použití směsi vodní páry a argonu. Tento kombinovaný design plazmového hořáku umožňuje vyšší procesní teploty i objemy materiálů než APS a zároveň zvyšuje životnost zařízení. Při experimentech v rámci této disertační práce byly používány systémy WSP a WSP-H.

Během procesu plazmového stříkání je nanášený materiál ve formě prášku, případně suspenze, podávacími trubičkami vnášen do proudu plazmatu o teplotě více než 20 000 K, kde jsou částice prášku taveny a urychlovány směrem k podložce, na které se rozstříknou, ztuhnou a zformují se do tzv. splaty. Splaty vytvoří charakteristickou anizotropní a nehomogenní strukturu plazmového nástřiku, která se vyznačuje relativně

vysokou pórovitostí (obr. 1). Kromě pórů může plazmový nástřík obsahovat také neroztavené a zoxidované částice (kovy) či naopak o kyslík ochuzené oxidy s porušenou stechiometrií (např. titaničitá keramika).



Obr. 1. Schéma plazmového nástříku [1] a detail ideálního splatu (keramika Eucor deponovaná vodním hořákem; elektronový mikroskop) [2].

Konečná podoba a složení výsledného nástříku nezávisí jen na složení originálního materiálu, ale i na jeho mikrostrukturu, zrnitosti, homogenitě nebo i na jeho tepelné vodivosti, ovlivňující stupeň natavení jednotlivých částic. Podstatný vliv na výsledek plazmového stříkání mají stříkácí parametry, jako je například geometrické nastavení podávání prášku, podávací vzdálenost (feeding distance, FD), stříkácí vzdálenost (spray distance, SD), druh podávacího média, rychlost unášení prášku směrem k podložce, její materiál i předehřev či chemické složení dřívě nanesené vrstvy. Je třeba, aby se celá částice natavila, nikoliv však natolik, aby se vypařila, a zároveň musí letět přiměřenou rychlostí. Tyto ideální parametry musí ladit s konkrétním chemickým složením sprejovaného prášku. Stříkácí parametry tak jsou jedinečné pro každý jeden materiál a obvykle se k vyhovujícím parametrům dojde experimentálně.

Plazmové stříkání zahrnuje rychlé ohřátí a tání materiálu, jeho chlazení i konsolidaci v jednom procesu, což často způsobuje metastabilní povahu výsledných nástříků. Zásadní vliv má i fyzikálně chemický charakter stříkaného materiálu. Jedná se například o obsah těkavých složek, strukturně vázané vody či rozklad materiálu v plazmatu a jeho selektivní odpařování, sublimaci, nevyhovující interval solidu a likvidu nebo inkongruentní tání. Například odstranění vázané vody ve stříkaném materiálu spotřebuje značný podíl energie plazmatu a řádné protavení částic je obtížnější. Každý z těchto faktorů či jejich kombinace činí daný materiál potenciálně problematickým v úsilí o kvalitní plazmový nástřík.

Výsledkem plazmového stříkání často bývají nestabilní a nestechiometrické materiály s fázovým či chemickým složením odlišným vůči původnímu. Stabilizaci jednotlivých fází, zvýšení krystalinity nebo zánik defektů krystalové mřížky může zajistit následné vyžihání nástříků. Žihání je výhodné i pro použití plazmově stříkaných vrstev v aplikacích zahrnujících tepelná zatížení, kdy může docházet ke změnám stechiometrie nebo i krystalinity, a tím i objemu materiálu.

Nástříky mohou být z keramiky, kovu i jejich kombinací - jako jsou cermety, gradované (functionally graded materials, FGM) či dvou a vícevrstvé nástříky, spojující více vlastností, kterými jediný materiál neoplyvá (např. spodní, k podložce dobře přilnavá vrstva, a svrchní sloužící jako tepelný izolant). Plazmové nástříky mohou být například vrstvy tvrdé a ořezuvzdorné (Cr_2O_3 , korund, spinel), odolné chemicky (korund, zirkonie, Cr_2O_3), vysoké teplotě nebo teplotním šokům (zirkonie, mullit) či s dobrými tepelně izolačními vlastnostmi (zirkonie, mullit). Keramické nástříky jsou obecně lepšími tepelnými izolátory a odolnější oxidaci, korozi a opotřebením než kovové. V řadě případů zajišťují elektricky vodivému kovovému podkladu vysoce odolnou elektrickou povrchovou izolaci (korund, syntetické silikáty, žíhaný TiO_2). Jedním z nejdéle a nejvíce používaných materiálů, které se používají k plazmovému stříkání, je syntetický korund ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, alumina). Korundové nástříky jsou tvrdé a erozně, korozně i chemicky stabilní. Zároveň je korund relativně dobře dostupný s výhodným poměrem kvality vůči ceně. Příznivé vlastnosti korundu jsou umocněny v eutektické keramice aluminium-zirkon-silikátu sestávající z korundu, baddeleyitu a skelné fáze ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2\text{-SiO}_2$). Tzv. Eucor se vyznačuje především vysokou tvrdostí, odolností vůči vysokým teplotám a ořezu a vysokou chemickou odolností. Dalším významným materiálem na tomto poli je syntetický oxid zirkoničitý, nacházející široké uplatnění v aplikacích pro tepelné bariéry (thermal barrier coatings, TBC). Materiály využívanými v plazmovém stříkání jsou mimo další oxidy (např. Cr_2O_3 , TiO_2) také některé silikáty, boridy nebo karbidy, které bývají chemicky a mechanicky odolné. Jiným perspektivním materiálem, který je v syntetické formě hojně využívaný napříč odvětvími je mullit ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$). Jde o silikát s nízkou hustotou a tepelnou vodivostí, vysokou teplotní i chemickou stabilitou a dobrou mechanickou pevností.

3 Cíle disertační práce

Základním cílem bylo připravit jeden či více plazmových nástřiků z přírodních materiálů. Práce je proto zaměřena především na testování vhodnosti vybraných geomateriálů pro použití v technologii plazmového stříkání a hledání optimálních stříkacích parametrů. Druhotným cílem bylo studium připravených nástřiků z hlediska mikrostruktury a základních, především tepelných vlastností. Dalším úkolem práce bylo při výběru materiálů klást zvýšený důraz na ty geomateriály, z nichž připravené nástřiky by mohly konkurovat nástřikům syntetického mullitu. Pozornost byla dále zaměřena na teplotní stabilitu nově připravených materiálů a vliv výpalu u vybraných perspektivních vzorků.

4 Experimentální část

Před samotnými experimenty byla provedena rozvaha o minerálech a horninách z pohledu jejich složení, fyzikálně-chemických vlastností a dostupnosti. Vytipované, potenciálně vhodné materiály byly získávány přímo v terénu nebo od dodavatelů. Suroviny byly drceny, případně tříděny (separace od nečistot), mlety a sítovány na zrnitost vhodnou pro plazmové stříkání (40 - 180 μm). Samotnému stříkání předcházela nutná optimalizace stříkacích parametrů pomocí studia prostříku a jednotlivých splatů nastříkaných za různých parametrů na podložní mikroskopická sklička.

K experimentům byly využívány technologie, kterými disponuje Ústav fyziky plazmatu AV ČR (ÚFP), tj. plazmové stříkání pomocí vodou stabilizovaného hořáku WSP[®] 500 s grafitovou katodou a od něj odvozeného hořáku s hybridní stabilizací voda-argon WSP[®]-H s wolframovou katodou.

Vzorky byly připraveny jako nástřiky na ocelových nebo keramických podložkách a/nebo jako samonosné subjekty. Na takto získaných nástřicích byla studována mikrostruktura a základní mechanické a tepelné vlastnosti. Vybrané vzorky byly podrobeny sekundární tepelné úpravě – žihání.

Koncept této disertační práce vychází z šesti odborných článků publikovaných v impaktovaných časopisech. Každá z kapitol se zabývá jedním studovaným materiálem, seřazeny jsou od nejjednoduššího po komplexnější, a to z pohledu chemického složení i fyzikálně-chemických vlastností ovlivňujících proces plazmového stříkání. Jmenovitě jsou to zirkon, diopsid, turmalín, kaolín a lupek.

Autorka se aktivně podílela na plánování experimentů, přípravě vzorků, prováděla termické a některé optické analýzy. Ostatní experimenty byly realizovány ve spolupráci se školitelem-specialistou a dalšími vědeckými pracovníky i techniky a laboranty především oddělení Materiálového inženýrství ÚFP.

4.1 Zirkon

Přírodní zirkonový písek byl pomocí WSP nastříkán kombinací dvou FD a tří SD a byla tak připravena sada samonosných nástřiků.

Mikrostruktura byla u všech vzorků velmi podobná nezávisle na měnících se stříkacích parametrech. XRD analýza zjistila přítomnost dvou fází zirkonia, a to monoklinickou (30 %) i tetragonální. Při sekundárním výpalu materiál rekrystalizoval do stabilnějších fází.

Výsledky analýz ukázaly, že se ve vzorcích projevuje kombinace mikrostrukturních jevů (splaty, jejich kontakty a defekty) s fenomény na úrovni velikosti krystalové mřížky, kde jsou atomy křemíku umístěny v matici ZrO_2 . Tento oxid zirkoničitý substituovaný křemíkem je velmi jemnozrný s krystalitami (tj. doménami koherentně rozptylujícími rentgenové záření) menšími než 20 nm. V této práci byl poprvé popsán plazmově stříkaný zirkon s krystaly stejně drobnými jako ve slinutém materiálu [3].

Takto připravený zirkonový materiál je potenciálně možné použít jako náhradu jiných běžně používaných syntetických silikátů, jako jsou korund, forsterit nebo steatit, ve formě nástřiků nebo samonosných objektů [4].

4.2 Diopsid

Výchozím materiálem pro tuto práci byl důležitý horninotvorný pyroxen, monoklinický inosilikát diopsid ($CaMgSi_2O_6$) s nečistotami (10 %) alkálií, cristobalitu a clinoenstatitu. Z daného materiálu byly pomocí WSP-H připraveny samonosné nástřiky více než 3 mm silné, vhodné k základním analýzám. Vrstvy byly po nastříkání amorfni, po vyžhání převažovaly fáze železitého i vápenatého diopsidu, i některé původní nečistoty.

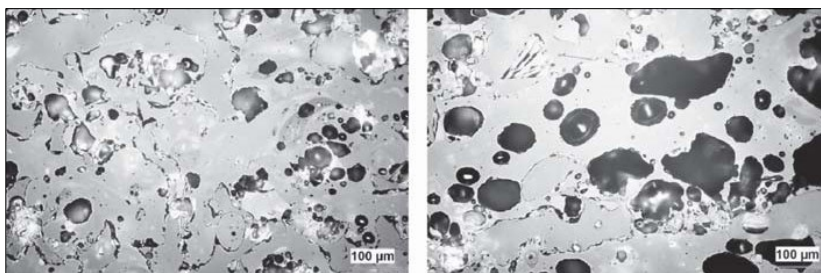
Plazmově stříkaný diopsid představuje ekonomicky nenáročný přírodní materiál vykazující lepší mechanické vlastnosti ve srovnání s jinými silikáty (např. forsterit [5]). Vytvoření diopsidového nástřiku pomocí technologie plazmového stříkání bylo popsáno vůbec poprvé [6].

4.3 Turmalín

Turmalín je komplexní klencový borosilikát se strukturně vázanou OH skupinou. Turmalín taje inkongruetně, přičemž teplota bodu tání klesá se vzrůstajícím obsahem železa či manganu. Inkongruetní tání je způsobeno především skupinou OH ve struktuře a vysokou teplotou tání bóru [7]. Inkongruetní tání podávaného materiálu představuje pro plazmové stříkání výzvu a snad i proto je plazmové stříkání turmalínu ojedinělým experimentem. Klíčovým úkolem bylo najít takové stříkací parametry, které by umožnily roztavení co největšího množství materiálu. Jistá výhoda turmalínu naopak spočívá v tom, že při průchodu materiálu plazmatem

dochází k evaporaci nejen OH skupiny, ale i těžkého fluoru a sodíku, které se vypařují mezi prvními ze všech prvků, čímž se materiál částečně pročistí od příměsí.

Navzdory zmíněným nevýhodám fyzikálně-chemické povahy se turmalín skoryl z pegmatitového lomu lokality U obrázku podařilo pomocí WSP-H plazmově nanést jako vrstvy na podložkách i do podoby samonosných nástřiků o tloušťce 2 mm. Vysoká pórovitost (až 40 %, obr. 2) je příčinou nevalných mechanických vlastností připravených vzorků bez momentálního příslibu na praktické využití turmalínových nástřiků. Nicméně byla zjištěna jejich chemická odolnost vůči kyselině dusičné a výrazné zvýšení mikrotvrdoti po výpalu. Po výpalu se jedná o keramická tělesa solidní kvality (přiměřená otěruvzdornost) jimž původní nástřik slouží spíše jen za polotovar. Skutečnost, že se podařilo nalézt vhodné procesní parametry pro nástřik takto fyzikálně-chemicky problematického materiálu, je nesporným úspěchem [8].



Obr. 2. Povrchová struktura plazmových nástřiků turmalínu (optický mikroskop)

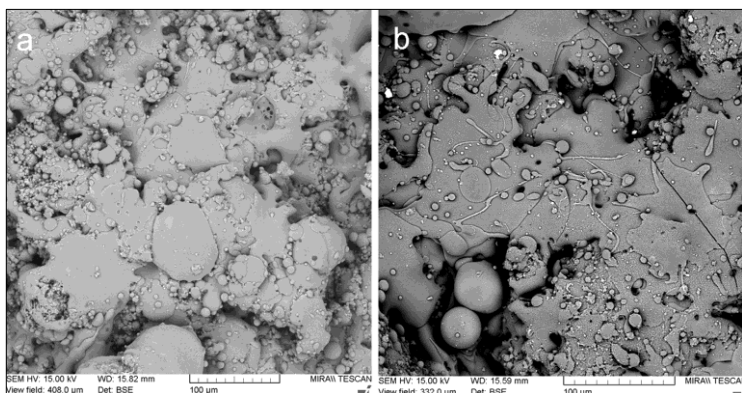
4.4 Kaolín

Dalším plazmově stříkaným materiálem této práce byl kaolinit, resp. kaolín. Kaolín je bílá sedimentární hornina většinou (nejméně 80 %) sestávající z jílového minerálu kaolinitu. Vzhledem k tomu, že kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ nebo $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) obsahuje strukturně vázanou vodu, je ho vhodné před některými aplikacemi upravit vypálením. Při teplotě kolem $600\text{ }^\circ\text{C}$ během tzv. dehydroxylace dochází k odstranění vázané vody za vzniku bezvodého a amorfního metakaolinitu. Je-li teplota výpalu vyšší a přesáhne $900\text{ }^\circ\text{C}$ z metastabilního metakaolinitu krystalizuje mullit společně s Al_2O_3 a amorfním SiO_2 v poměru závislém na původním obsahu jednotlivých oxidů.

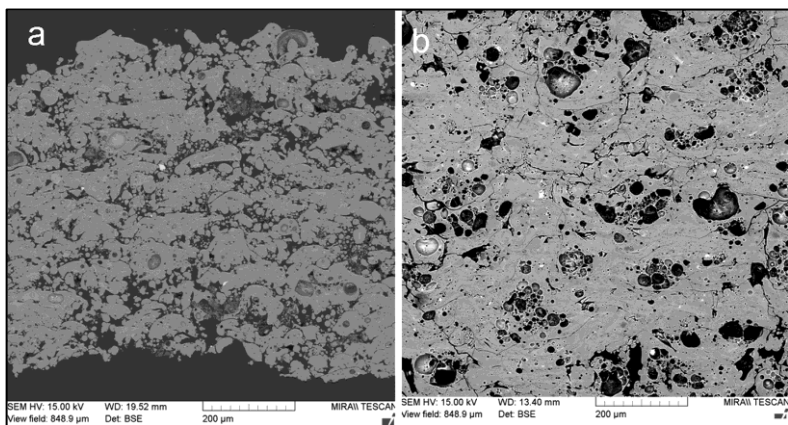
V rámci této práce byl plazmově stříkán kaolinit i metakaolinit. Výchozí surovinou byl kaolín pocházející z lomu Kaznějov. Hlavním

produktem tamní kaolínky je plavený kaolín, který byl po přesítování použit pro následující experimenty.

Plazmové stříkání kaolinitu ještě popsáno nebylo, snad také kvůli tomu, že strukturně vázaná voda kaolinitu je pro plazmové stříkání nevýhodná. Další komplikací byl vločkovitý charakter částic podávaného prášku, který měl silnou tendenci ke slepování a tvorbě větších aglomerátů, a to i po přesítování na požadovanou zrnitost. Charakter metakaolinitu byl z tohoto hlediska mírně lepší. Klastry se projevíly i v mikrostruktuře nástřiků (obr. 3 a 4).



Obr. 3. Povrchová struktura plazmových nástřiků (a) kaolinitu a (b) metakaolinitu (elektronový mikroskop)



Obr. 4. Průřez plazmových nástřiků (a) kaolinitu a (b) metakaolinitu (elektronový mikroskop)

Chemické složení vzorků připravených prostřednictvím WSP-H z obou typů materiálu bylo podobné s amorfní strukturou; z hlediska mechanických vlastností byly nástřiky metakaolinitu podle očekávání výrazně kvalitnější. Zvláště nástřiky neupraveného kaolinitu se vyznačovaly významnou porozitou a velmi nízkou měrnou hmotností, čímž mezi plazmově stříkanými materiály výrazně vybočují.

Muskovit přítomný v původním materiálu se během procesu PS rozložil a nově nalezenými fázemi jsou korund v nástřiku kaolinitu a mullit v metakaolinitu. Výpalem po dobu 4 h při 1150 °C došlo ke krystalizaci materiálu a ke zvýšení obsahu mullitu. Po interakci s prachem CMAS (Calcium-Magnesium-Alumina-Silicate) došlo po výpalu navíc ke krystalizaci labradoritu [9].

Nalezení vhodných procesních parametrů pro nástřik takto fyzikálně-chemicky problematického materiálu je významným přínosem disciplíně plazmového stříkání.

4.5 Lupek

Také z lupku je možné připravit mullit. Lupek je silikátová sedimentární hornina a obsahující převážně kaolinit, křemen a oxid hlinitý. Vyskytuje se v těsné blízkosti uhelných slojí a v ČR jde o typickou surovinu.

Před procesem plazmového stříkání (WSP) byla surovina vyžhána při 1350 °C. Díky takto vysoké teplotě předvýpalu, kdy materiál nejenže ztratil strukturně vázanou vodu, ale došlo i ke slinutí mikrokomponent prášku, byl proces plazmového stříkání méně komplikovaný a relativně úspěšnější než stříkání kaolínu. Získaný materiál se po interakci s horkým plazmatem rozkládá na mullit a SiO₂, procesní parametry byly proto vybrány nad teplotou tání mullitu (1840 °C), aby se roztavené částice po dopadu na podložku důkladně rozprostřely, a zároveň pod bodem varu SiO₂ (2230 °C), aby bylo zabráněno selektivní evaporaci materiálu.

Přírodní silikát lupek se ukázal pro plazmové stříkání jako velmi vhodný materiál. Výsledkem stříkání je amorfní vrstva stabilní až do teploty cca 800 °C. Připravený materiál obsahuje mullit a amorfní i krystalické fáze SiO₂. Krátkým žháním při teplotě nad 900 °C se dosáhne krystalické struktury materiálu, kdy velikosti krystalitů novotvořeného mullitu a cristobalitu jsou v řádu desítek nanometrů rozložené v amorfní silikátové matici a krystalinita dosahuje 60 %, což je podíl srovnatelný s výchozím materiálem. Plazmově deponovaný a následně vyžháný lupek tak může nahradit univerzální, často používaný, ale finančně náročnější syntetický mullit [10].

5 Závěr

Problematika nahrazování syntetických materiálů přírodními v oboru plazmového stříkání skýtá mnoho bílých míst. V jejich odkrývání se v rámci disertační práce začalo se zirkonem, diopsidem, turmalínem, kaolínem a lupkem. Ze všech byly připraveny kompaktní plazmové nástřiky, čtyři z nich v oboru plazmového stříkání vůbec poprvé. Kromě toho úspěšné zpracování kaolínu a turmalínu je kvůli složitým fyzikálně-chemickým vlastnostem na tomto poli unikátní.

Mezi nimi pouze turmalín je z testovaných materiálů pro tuto technologii spíše nevhodný kvůli vysoké porozitě nástřiků, která je příčinou nepříznivých mechanických vlastností. Plazmově deponované vrstvy nebo samonosné nástřiky z ostatních materiálů mohou být použity ve středně náročných vysokoteplotních aplikacích. Zirkonové a diopsidové nástřiky by mohly sloužit jako náhrada syntetických silikátů, například kordieritu či steatitu [11]. Sekundárně vypálené nástřiky kaolínu a především lupku by mohly být alternativou k mullitovým nástřikům.

Autorka této práce se specializuje na analyzování tepelných vlastností materiálů. Prostřednictvím DTA (diferenční termické analýzy) a dilatometrie se jí mj. podařilo stanovit teploty krystalizace nástřiků při sekundárním tepelném zatížení, tedy stabilitu materiálů pro případné vysokoteplotní aplikace (tab. 1, pro srovnání jsou uvedeny i další přírodní materiály plazmových nástřiků studované autorkou mimo rozsah této práce [12]).

Tab. 1. Maximální teplota použití as-sprayed nástřiků

| Materiál nástřiku | Teplota (°C) |
|--------------------------|---------------------|
| Zirkon | 730 |
| Diopsid | 800 |
| Granát | 800 |
| Lupek | 800 |
| Kaolín | 850 |
| Bazalt | 850 |
| Olivín | 890 |
| Turmalín | 890 |

Citovaná literatura

- [1] http://www.ofic.co.jp/en/r_and_d/thermalspraying/, 5.4.2020.
- [2] http://www.ipp.cas.cz/vedecka_struktura_ufp/materialove-inzenyrstvi/galerie/08-mikrostruktury.html, 5.4.2020.
- [3] Itoh T. Formation of polycrystalline zircon (ZrSiO_4) from amorphous silica and amorphous zirconia. *Journal of Crystal Growth*, 125 (1992) 223-228.
- [4] Ctibor P., Pala Z., Nevrlá B., Neufuss K. Plasma-sprayed fine-grained zirconium silicate and its dielectric properties. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26 (2017) 2388-2393.
- [5] Ctibor P., Kotlan J., Pala Z., Neufuss K., Soumar J. Plasma spraying of natural olivine and its dielectric, mechanical and optical characterization. *Romanian Reports in Physics*, 2 (2015) 600–616.
- [6] Ctibor P., Nevrlá B., Pala Z., Sedláček J., Soumar J., Kubatík T., Neufuss K., Vilémová M., Medřický J. Study on the plasma sprayed amorphous diopside and annealed fine-grained crystalline diopside. *Ceramics International*, 41 (2015) 10578-10586.
- [7] London D. Experimental synthesis and stability of tourmaline: A historical overview. *The Canadian Mineralogist*, 49 (2011) 117-136.
- [8] Ctibor P., Nevrlá B., Pala Z., Vrtiška L. Natural tourmaline as an efficient alternative to ceramic-type material for plasma spraying. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 118 (2018) 387-393.
- [9] Nevrlá B., Ctibor P., Koudelková V., Lukáč F., Neufuss K. Plasma spraying of natural kaolinite and metakaolinite. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica Y Vidrio*. *In press*. doi:10.1016/j.bsecv.2020.03.005.
- [10] Dubský J., Chráška T., Pala Z., Nevrlá B., Chráška P. Plasma spraying of silica-rich calcined clay shale. *Journal of Thermal Spray Technology*, 4 (2014) 732-741.
- [11] Rohan P., Neufuss K., Matějček J., Dubský J., Prehlik L., Holzgartner C. Thermal and mechanical properties of cordierite, mullite and steatite produced by plasma spraying. *Ceramics International*, 30 (2004) 597-603.
- [12] Ctibor P., Nevrlá B., Neufuss K., Petrášek J., Sedláček J. Plasma spray coatings of natural ores from structural, mechanical, thermal, and dielectric viewpoints. *Coatings*, 10 (2019) 1-16.

Vlastní publikace k tématu disertace

IF Časopisy

Nevrlá B., Ctibor P., Koudelková V., Lukáč F., Neufuss K. Plasma spraying of natural kaolinite and metakaolinite. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica Y Vidrio. In press.* doi:10.1016/j.bsecv.2020.03.005 [9]

Ctibor P., Nevrlá B., Neufuss K., Petrášek J., Sedláček J. Plasma spray coatings of natural ores from structural, mechanical, thermal, and dielectric viewpoints. *Coatings*, 10 (2019) 1 16. [12]

Ctibor P., Nevrlá B., Pala Z., Vrtiška L. Natural tourmaline as an efficient alternative to ceramic-type material for plasma spraying. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 118 (2018) 387-393. [8]

Ctibor P., Pala Z., Nevrlá B., Neufuss K. Plasma-sprayed fine-grained zirconium silicate and its dielectric properties. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26 (2017) 2388 2393. [4]

Ctibor P., Nevrlá B., Pala Z., Sedláček J., Soumar J., Kubatík T., Neufuss K., Vilémová M., Medřický J. Study on the plasma sprayed amorphous diopside and annealed fine-grained crystalline diopside. *Ceramics International*, 41 (2015) 10578 10586. [6]

Dubský J., Chráška T., Pala Z., Nevrlá B., Chráška P. Plasma spraying of silica-rich calcined clay shale. *Journal of Thermal Spray Technology*, 4 (2014) 732-741. [10]

Ostatní

Ctibor P., Nevrlá B., Pala Z., Sedláček J., Kubatík T., Neufuss K., Vilémová M., Medřický J. Study on the plasma sprayed diopside. *Konference Vrstvy a povlaky. Rožnov pod Radhoštěm, 2014.*

Anotace

Disertační práce si klade za cíl hledat alternativní materiály, které by nahradily drahé syntetické prášky používané k přípravě ochranných vrstev deponovaných pomocí plazmového stříkání. Pozornost je soustředěna na keramické vrstvy z geomateriálů. Práce je zaměřena na testování vhodnosti vybraných materiálů pro použití v technologii plazmového stříkání zejména ve zvýšených teplotách.

Klíčová slova: plazmové stříkání, geomateriály, zirkon, diopsid, turmalín, kaolín, kaolinit

Annotation

The thesis focuses on the selection and investigation of natural materials that will be proper as an alternative to the expensive synthetic powders used for plasma spraying of protective layers. The thesis is focused on the examination of ceramic coatings from geomaterials in plasma spraying applications especially at increased temperatures.

Key words: plasma spraying, geomaterials, zircon, diopside, tourmaline, kaolin, kaolinite

