



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

VYUŽITÍ TECHNOLOGIE COLD SPRAY PRO BALISTICKÉ APLIKACE

UTILIZATION OF COLD SPRAY TECHNOLOGY FOR BALLISTIC APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Adam Kuník

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Řehořek, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství
Student: **Adam Kuník**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Materiálové inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Lukáš Řehořek, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Využití technologie cold spray pro balistické aplikace

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Studená kinetická depozice (Cold Spray) je nová metoda nanášení vrstev kovů, založená na vysoké kinetické energii dopadajících částic. Celý proces probíhá v tuhém stavu bez natavování vstupního materiálu, což je hlavní rozdíl od ostatních metod termálních nástřiků. Takto vytvořené kompaktní vrstvy mají unikátní mechanické vlastnosti, zejména pak vysokou tvrdost. Na tomto poli však chybí literární zdroje a práce na tomto tématu slibují vysoký podíl nových poznatků.

Cíle bakalářské práce:

Zpracovat rešerši na téma materiálů v balistické ochraně, principů technologie cold spray a jeho využití v balistice.

V praktické části práce bude cílem vytvořit deponovanou vrstvu na zvolený substrát a vyhodnotit vhodnost vytvořeného kompozitu pro dynamické zatěžování a stanovit základní parametry nástřiku.

Seznam doporučené literatury:

PAPYRIN, A. Cold spray technology. First edition. London: Elsevier, 2007. ISBN 00-804-5155-1.

VILLAFUERTE, J. ed. Modern cold spray: materials, process, and applications. First edition. Cham: Springer, 2015. ISBN 978-3-319-16771-8.

MORIDI, A., HASSANI-GANGARAJ, S., GUAGLIANO, M. a DAO, M. Cold spray coating: review of material systems and future perspectives. Surface Engineering. 2014, 36(6), 369-395. DOI: 10.1179/1743294414Y.0000000270. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/1743294414Y.0000000270>

YIN, S., CAVALIERE, S., ALDWELL, B. Cold spray additive manufacturing and repair: Fundamentals and applications. Additive Manufacturing. 2018(21), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.017>.

BUCHAR, Jaroslav a Josef VOLDŘICH. Terminální balistika. Praha: Academia, 2003. ISBN 80-200-1222-2.

BUCHAR, Jaroslav a Josef VOLDŘICH. Terminální balistika. Praha: Academia, 2003. ISBN 80-200-1222-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

CÍL:

Zpracovat rešerši na téma materiálů v balistické ochraně, principů technologie cold spray a jeho využití v balistice. V praktické části práce bude cílem vytvořit deponovanou vrstvu na zvolený substrát a vyhodnotit vhodnost vytvořeného kompozitu pro dynamické zatěžování a stanovit základní parametry nástřiku.

Charakteristika problematiky:

Studená kinetická depozice (Cold Spray) je nová metoda nanášení vrstev kovů, založená na vysoké kinetické energii dopadajících částic. Celý proces probíhá v tuhém stavu bez natavování vstupního materiálu, což je hlavní rozdíl od ostatních metod termálních nástřiků. Takto vytvořené kompaktní vrstvy mají unikátní mechanické vlastnosti, zejména pak vysokou tvrdost. Na tomto poli však chybí literární zdroje a práce na tomto tématu slibují vysoký podíl nových poznatků.

ABSTRAKT:

Cílem této bakalářské práce je obeznámení s technologií cold spray, jakožto alternativou na poli jak nanášení povlaků, tak i mj. její využití na opravu některých tvarově složitých dílů v rámci aditivní výroby. Dále se pak zabývá základními principy této metody, užívanými kovovými prášky, charakteristika přístroje, seznámení s problematikou balistické ochrany a terminální balistiky.

V druhé, experimentální části, je hodnocena kvalita a mechanické vlastnosti (zejména pak tvrdost, porozita a tloušťka nástřiku) této vrstvy vyrobené výše uvedenou metodou, jakožto součást balistické ochrany pro lehká pancéřová vozidla.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Cold spray, balistická ochrana, titan, hliník, vrstvené pancíře, vojenská technika, kinetická depozice

ABSTRACT:

The goal of this bachelor's thesis is to get familiar with cold spray technology, as an alternative in the field of both coating application and, among other things, its use for the repair of some parts with complex shapes within additive manufacturing. It then covers the basic principles of this method, the metal powders used, the characteristics of the device, familiarization with the issue of ballistic protection and terminal ballistics.

In the second, experimental part, the quality and mechanical properties (especially the hardness, porosity, and coating thickness) of this layer produced by the above-mentioned method, as part of ballistic protection for light armored vehicles, are evaluated.

KEY WORDS:

Cold spray, ballistic protection, titanium, aluminum, layered armor, military technology, kinetic deposition

BIBLIOGRAFICÁ CITACE:

KUNÍK, Adam. Využití technologie cold spray pro balistické aplikace [online]. Brno, 2024 [cit. 2023-11-08]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157338>.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Lukáš Řehořek.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Využití technologie cold spray pro balistické aplikace vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou součástí této práce.

V Brně dne:

Podpis:

Poděkování:

Poděkování: Tímto bych chtěl poděkovat všem, kdo mi pomohli ke studiu i na mé cestě studiem. Rodině, spolužákům a kamarádům. Děkuji svému vedoucímu, že mi s touto prací pomohl, stejně tak Marku Doubravovi, který byl ochotný pomoc mi, kdykoli to bylo potřeba. Děkuji Klárce Koběrské. Díky Bohu, že jsem se při studiu dostal tak daleko, protože vlastními silami, jak věřím, bych se nedostal tam, kde jsem.

OBSAH

1.	ZÁKLADY TECHNOLOGIE COLD SPRAY	9
1.1.	MECHANISMY TVORBY DEPONOVANÉ VRSTVY POMOCÍ CS A INTERAKCE ČÁSTIC SE SUBSTRÁTEM.....	10
	METALURGICKÉ SPOJOVÁNÍ.....	10
	ADIABATICKÁ SMYKOVÁ NESTABILITA, SMYKOVÉ PÁSY	10
	MECHANICKÉ ZAKOTVENÍ	11
	PROLÍNÁNÍ MATERIÁLU	12
1.2.	FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ CS NÁSTŘIK.....	13
	RYCHLOST ČÁSTIC.....	13
	PRACOVNÍ PLYN	14
	VZDÁLENOST MEZI TRYSKOU A POVRCHEM SUBSTRÁTU (SD).....	14
	PŘÍPRAVA SUBSTRÁTU	15
1.3.	PŘEDNOSTI A NEDOSTATKY CS	16
1.4.	APLIKACE CS V TECHNICKÉ PRAXI.....	18
	VYTVÁŘENÍ POVLAKŮ	18
	OPRAVY SOUČÁSTÍ.....	19
	ADITIVNÍ VÝROBA	20
1.5.	CS PRÁŠKY A JEJICH ZPRACOVÁNÍ	21
2.	BALISTICKÁ OCHRANA	23
2.1.	MATERIÁLY BALISTICKÉ OCHRANY	24
	KOMPOZITY	24
	UHMWPE	24
	TITAN A JEHO SLITINY	25
2.2.	NORMY ZABÝVAJÍCÍ SE BALISTICKOU OCHRANOU	26
	STANAG 4569.....	26
	STANAG 2920.....	26
	NIJ 0101.06	27
2.3.	KINETICKÉ PROJEKTILY	27
2.4.	MECHANISMY UPLATŇUJÍCÍ SE PŘI DOPADU PROJEKTILU NA PANCÍŘ	27
	KUŽELOVÝ LOM	28

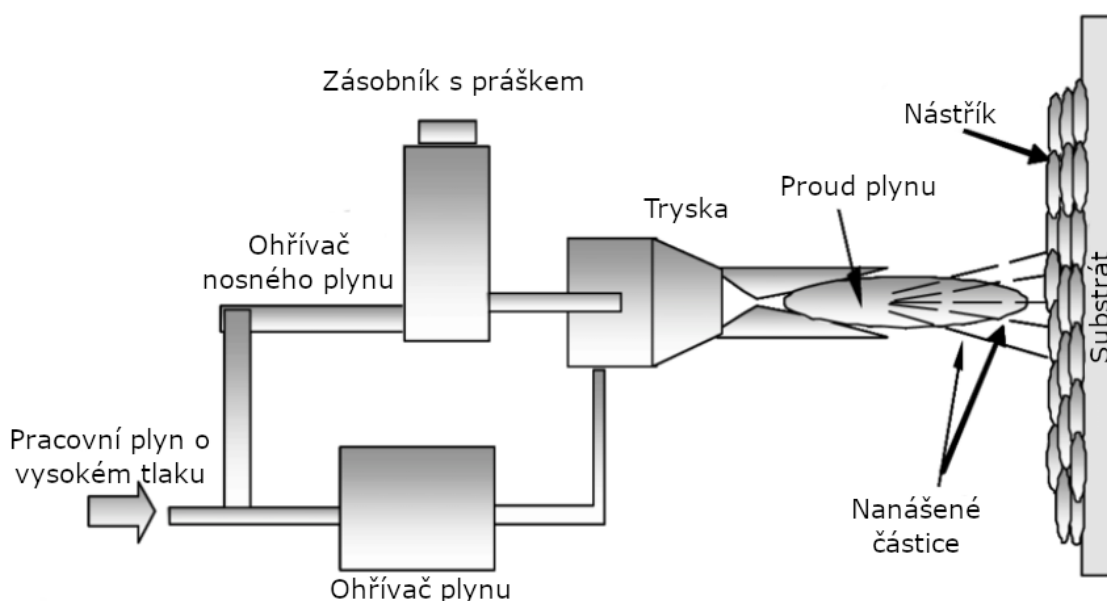
ZÁTKOVÉ POŠKOZENÍ.....	28
2.5. VYUŽITÍ TECHNOLOGIE COLD SPRAY V BALISTICE	28
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	29
METODY ZKOUŠENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	30
4. DISKUSE A VÝSLEDKY	33
OBRAZOVÁ ANALÝZA	33
DYNAMICKÉ ZATĚŽOVÁNÍ.....	35
ADHEZNÍ PEVNOST	37
TVRDOST	38
5. ZÁVĚRY	39
6. LITERATURA	40
7. SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	43
ZKRATKY	43
SYMBOLY	43
8. SEZNAM OBRÁZKŮ	44

1. ZÁKLADY TECHNOLOGIE COLD SPRAY

Technologie cold spray (CS) je moderní metodou kinetické deponice patřící do skupiny žárových nástřiků, při které jsou pevné částice nanášeného materiálu o velikosti 1 - 50 μ m urychlovány směrem na povrch povlakované součásti proudem plynu o rychlosti v rozmezí 250-1400 m/s. Teplota plynu dosahuje až okolo 1000 °C. Částice ale v plynu setrvávají jen velmi krátký časový úsek, takže nedojde k natavení, což je hlavní výhodou oproti jiným technologiím nanášení vrstev. Při interakci s povrchem součásti se mění kinetická energie dodávaná plynem na energii plastické deformace. Takto deformované částice díky tomu ulpívají na povrchu. Konvergentně divergentní tryska se při nanášení vrstvy pohybuje tak, aby byla zachována rovnoměrná tloušťka povlaku. Při povlakování rotačně symetrických těles navíc může těleso rotovat s osou rotace kolmo na proud částic. Přestože je tato technologie hojně používána pro nanášení kovových povlaků, je možné ji využít i v případě polymerů, kompozitních materiálů, keramik atp. V závislosti na materiálu užitého prášku je volen i typ technologie, resp. parametry. Pro nanášení čistě kovových povlaků je užíván typ HPCS – vysokotlaký cold spray. Pracovním plynem je helium nebo dusík. Pro směsi kovových a keramických prášků se využívá typ LPCS – nízkotlaký coldspray.

Princip samotného zařízení lze popsat pomocí jednoduchého schématu na obr. 1. Plyn vchází do zařízení. Většina jej dále proudí do ohřívače plynu, kde je dosahováno teplot až 1000 °C. Zbytek plynu putuje do zásobníku s práškem. Veškerý plyn společně s užitým práškem ústí do předkomory, odkud pokračuje do De-Lavalovy trysky, kde jeho rychlost roste, jak je urychlován zahřátým plynem, a to až na rychlosti přesahující rychlost zvuku v daném plynu. Takto urychlený prášek poté dopadá na substrát, kde se deformuje a ulpívá, jak je popsáno dále (v kapitole 1.1).

Úspěšnost tvorby povlaku lze charakterizovat pomocí deponiční efektivity (DE), která vyjadřuje, jak velký podíl z celkového počtu částic při deponici ulpí na povrchu. Jelikož je DE závislá na mnoha různých procesních parametrech (viz 1.2), pomáhá znalost její hodnoty pro optimalizaci celého procesu.

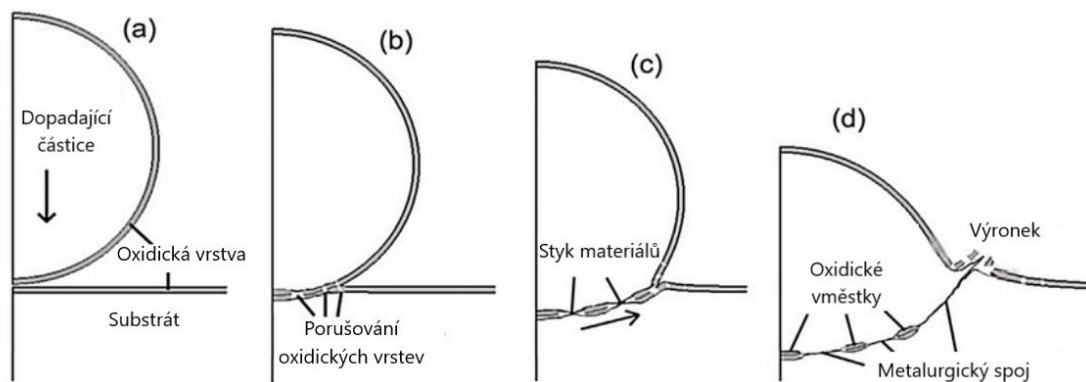


Obr. 1 schéma zařízení [1]

1.1. MECHANISMY TVORBY DEPONOVANÉ VRSTVY POMOCÍ CS A INTERAKCE ČÁSTIC SE SUBSTRÁTEM

METALURGICKÉ SPOJOVÁNÍ

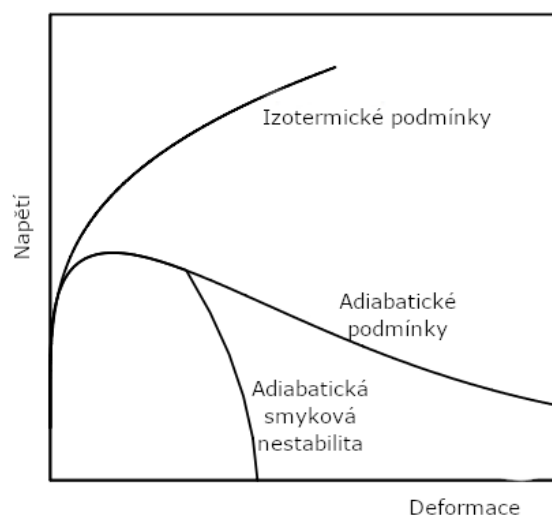
Tento mechanismus je uplatňuje u všech kombinací materiálů. Částice o vhodné rychlosti (obr. 6) dopadá na povrch substrátu, kde dochází ke tření, elastické a následně plastické deformaci jak částice, tak substrátu. V důsledku smykových napětí dochází k příznivému jevu, kterým je narušení celistvé vrstvy oxidů na obou površích a jejich vytlačení mimo rozhraní formou výronku, což má za následek jejich očištění, obnažení a lepší adhezní pevnosti rozhraní, jak lze vidět na obr. 2.



Obr. 2 porušování oxidické vrstvy a vytlačování oxidů mimo styk materiálů [2]

ADIABATICKÁ SMYKOVÁ NESTABILITA, SMYKOVÉ PÁSY

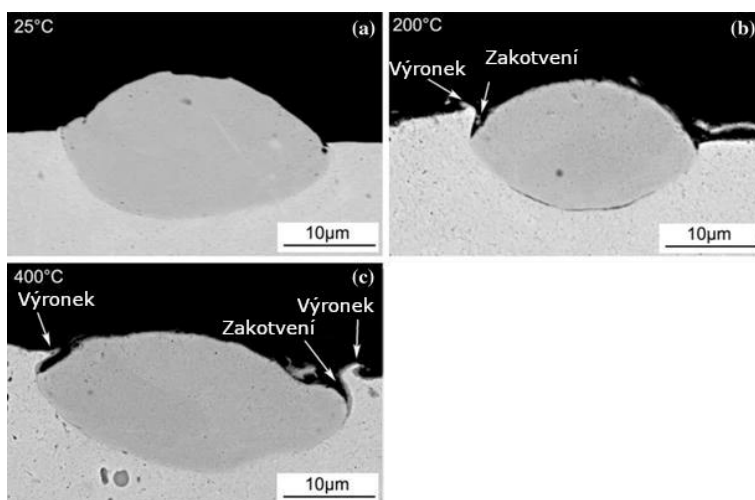
Při dopadu částice na povrch se uplatňují 2 procesy s protichůdným efektem. Prvním je deformační zpevnění vlivem růstu hustoty dislokací. To je důsledek přeměny kinetické energie částice na jejich plastickou deformaci. Druhým je odpevnění materiálů v důsledku zvýšení jejich teploty, rovněž způsobené jejich deformací. Teplo ale z místa dopadu není odváděno dostatečně rychle, což způsobí, že vliv odpevnění převáží nad deformačním zpevněním a napětí nutně k další deformaci klesá (obr. 3), a to dokonce až na nulu v případě tzv. adiabatických smykových pásů, kde je deformace i ohřev soustředěn v malém objemu okolo místa dopadu částice substrátu. Tyto pásy mohou dosahovat tloušťky v řádu jednotek až stovek mikrometrů. Výše zmíněný mechanismus a jeho zásadní vliv na tvorbu nástříků pomocí CS poprvé dostatečně popsal ve své práci T.W. Wright [3; 4].



Obr. 3 napětí potřebné k deformaci materiálu v závislosti na okolních podmínkách [4]

MECHANICKÉ ZAKOTVENÍ

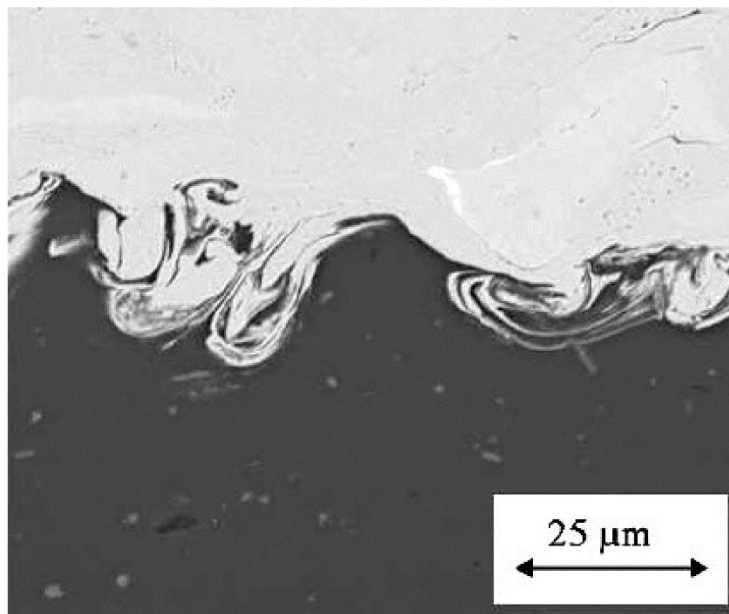
Dalším mechanismem je mechanické zakotvení, s jehož pomocí lze zajistit lepší adhezi rozhraní, a tedy i kvalitnější nástřik. Toto ve nicméně uplatňuje pouze v určitých případech, a to zejména při kombinaci relativně tvrdé částice a měkkého povrchu, konkrétně pak kombinace jako např. částice niklu na měděném substrátu nebo částice mědi na substrátu z hliníku, jak lze vidět na obr. 4, kde byla částice niklu deponována na měděný substrát. Při tvorbě mechanického zakotvení také pomáhá přehřev substrátu [5]. Konkrétně zde byla pro dosažení nejlepších výsledků potřebná teplota 400 °C [6].



Obr. 4 vliv teploty substrátu na tvorbu zakotvení [6]

PROLÍNÁNÍ MATERIÁLU

Poslední v této práci popsany mechanismus je prolínání materiálu na rozhraní nástřik – substrát. Dochází k němu ve specifických případech. Tvorba takového rozhraní závisí na míře plastické deformace, jejíž hodnota musí být dostatečně vysoká. Vytvoření dostatečné plastické deformace na rozhraní doprovází 2 faktory, a to: nízká depoziční efektivita (DE) a vhodná kombinace materiálů. Při nízké DE se většina částic od substrátu odrazí. Jakmile se však úspěšně nanese první vrstva, je intenzivně deformována, případně i částečně štěpena. K tomu dochází v důsledku deformačního zpevnění dalšími deponovanými částicemi, které se od ní odrážejí. Vzniká smykové napětí, což má za následek promísení rozhraní (obr. 5). Dále je zapotřebí, aby měly dopadající částice dostatečnou kinetickou energii, aby byly schopny vnést potřebnou plastickou deformaci do první vrstvy povlaku. Dochází k tvorbě tvarově složitého rozhraní o vysoké adhezni pevnosti [7]. V. Champagne navíc popsal, že při použití vhodných kombinací materiálů hraje roli i viskózní chování materiálů [8].

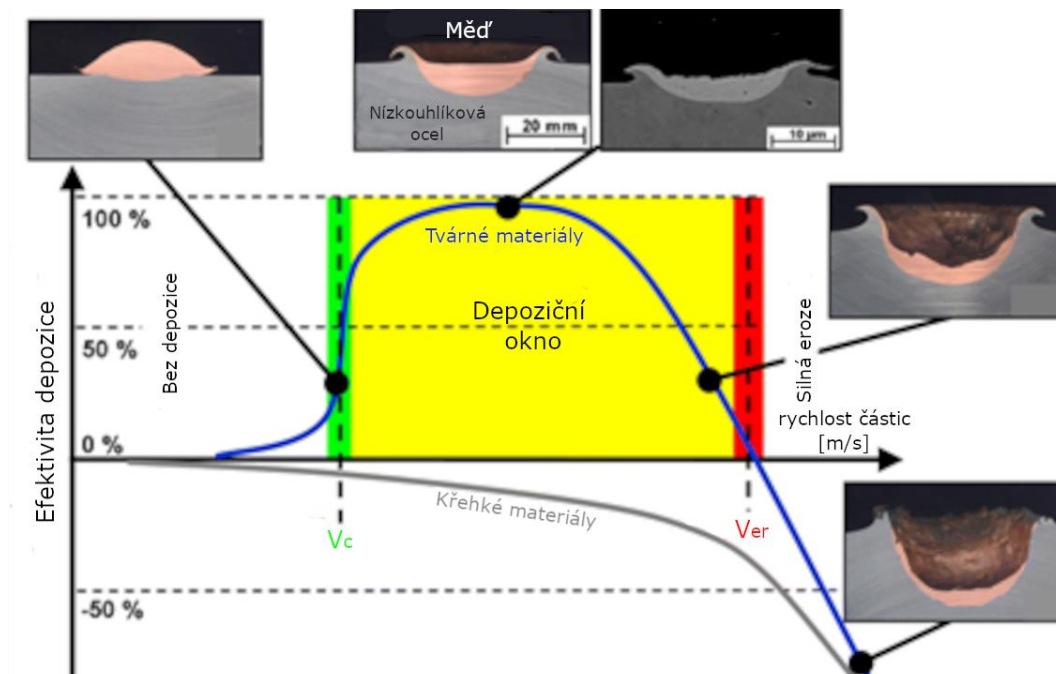


Obr. 5 ukázka prolínání rozhraní
(Cu - nahoře a Al-dole) [8]

1.2.FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ CS NÁSTŘIK

RYCHLOST ČÁSTIC

Tento parametr je pro úspěšnou depozici zásadní, neboť jak už bylo zmíněno, vrstva je tvořena v důsledku přeměny kinetické energie částic na jejich plastickou deformaci. Rychlost částice při dopadu má vliv na míru její následné deformace po dopadu. To mj. přímo souvisí s mírou zahřátí částice. Vzniká tak interval vhodných rychlostí nazývaný depoziční okno (obr. 6), který je zdola omezený kritickou rychlostí V_c , což je minimální rychlost potřebná k úspěšné depozici částic, a shora omezen rychlostí erozní V_{er} , po jejímž překročení dochází k silné erozi a k zničení substrátu. Kritická rychlost závisí zvláště na tvaru, velikosti, tepelné kapacitě a teplotě částic (s rostoucí teplotou jednotlivých částic klesá jejich V_c nutná pro úspěšnou depozici) [9].

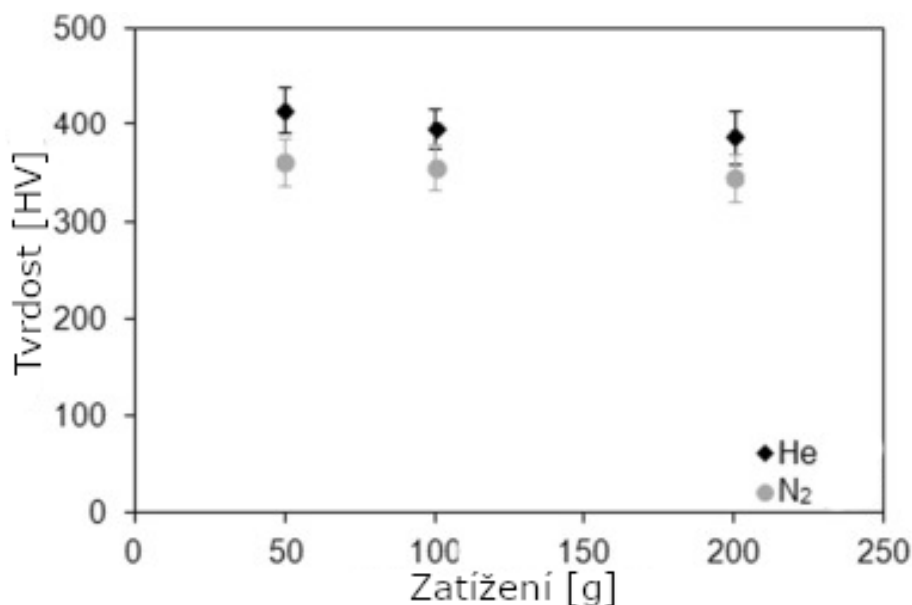


Obr. 6 závislost depoziční efektivity na rychlosti částic [9]

PRACOVNÍ PLYN

Podstatné je také užití vhodného pracovního plynu. Aby při tvorbě povlaku nedocházelo k oxidaci částic, využívají se v technické praxi hlavně dusík a helium. Helium je schopno urychlovat částice na mnohem vyšší rychlost i při použití nižšího tlaku, a proto jsme schopni deponovat i materiály, u kterých by byl při použití dusíku problém s kvalitou nástřiku. Jeho užití je však oproti dusíku poměrně nákladné. Výhodnou alternativou k použití helia je směs helia a dusíku v různých poměrech za účelem snížení výrobních nákladů a zachování relativně dobrých vlastností vrstvy [10].

Porovnáme-li například užití těchto dvou plynů pro slitinu titanu Ti-6Al-4V, má užití helia mnohé benefity. Takto vzniklá struktura má vyšší hustotu. Byla zjištěna nižší porozita nástřiku jakožto důsledek vyšší deformace nanášených částic. Z tohoto faktu vyplývá i zlepšení adhezní pevnosti (a to až téměř dvojnásobně), vyšší tvrdost (obr. 7), otěruvzdornost, únavová životnost i korozní odolnost [11].



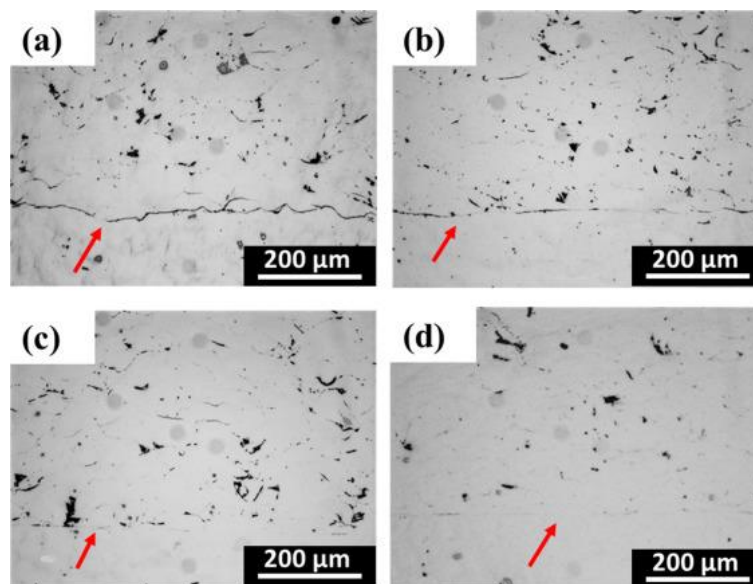
Obr. 7 porovnání tvrdostí vrstev nanášených různými plyny [11]

VZDÁLENOST MEZI TRYSKOU A POVRCHEM SUBSTRÁTU (SD)

SD má zásadní vliv na kvalitu vrstvy. Je třeba zmínit, že částice vzhledem ke svému tvaru a velikosti v některých případech nedosahují maximální rychlosti na konci trysky, ale až za ní. Pokud je ústí trysky příliš blízko substrátu, dochází k tvorbě rázových vln a tzv. Bow shock efektu. Naopak při zvolení příliš velké SD dochází ke zpomalování částic v důsledku jejich interakce s okolním prostředím, a tedy i ke tvorbě nedokonalého nástřiku. Z těchto faktů tedy vyplývá, že existuje optimální hodnota SD.

PŘÍPRAVA SUBSTRÁTU

Příprava substrátu před samotným provedením nástřiku je také důležitá. Ukazuje se, že pro dosažení ideální adheze vrstvy je vhodné upravit povrch substrátu. Pro různé kombinace materiálů nástřiku a substrátu, respektive pro jejich schopnosti se deformovat, je tato úprava různá. Když např. deponujeme měkký materiál na tvrdý substrát, je ideální, když je povrch substrátu broušený. Vznikne tak větší plocha kontaktu. Měkké materiály mají dostatečnou schopnost se deformovat, takže vnikají do vzniklých nerovností. Leštění je naopak vhodné při užití kombinace tvrdého prášku s tvrdým substrátem, kde by v případě jejich užití na broušený povrch vznikaly dutiny snižující adhezi. Takový materiál není schopný se dostatečně deformovat a vnikat do nerovností. Kvůli nízké deformaci se zde ani neuplatňuje již zmíněný princip mechanického zakotvení, tudíž adheze rozhraní, pro kterou je stěžejní co největší plocha kontaktu, je zajištěna výhradně metalurgickým spojováním [12]. Poněkud nevhodným typem úpravy povrchu pro všechny kombinace materiálů je tryskání, protože v materiálu substrátu často ulpívají částice tryskacího média. V takových místech nedochází k metalurgickému spojení. To vede ke špatné adhezní pevnosti vrstvy [13]. Kromě přípravy povrchu je dalším klíčovým parametrem předehřev substrátu, a to hlavně při tryskání relativně měkkého CS prášku na tvrdší substrát. Předehřevem se docílí toho, že se substrát při kontaktu s částicemi prášku ochotněji deformuje a dochází k tvorbě větší plochy podílející se na spojení obou materiálů. Předehřevem lze také redukovat případné vnitřní pnutí v materiálu.



Obr. 8. vliv úpravy povrchu substrátu na kvalitu rozhraní
a) pískovaný, b) broušený, c) frézovaný & d) leštěný
[12]

1.3. PŘEDNOSTI A NEDOSTATKY CS

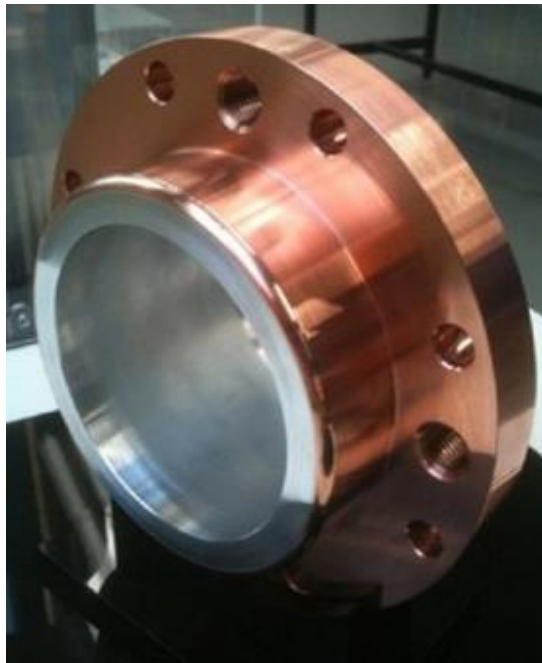
Na rozdíl od ostatních žárových nástřiků u technologie CS nedochází k natavení nanášeného materiálu, a nedojde tedy ani k pochodům s tím spojeným, jako je např. oduhličení, vypařování legur a fázové transformace. Proto lze nanášet i tepelně citlivé materiály a materiály náchylné na oxidaci. Je možné nanášet i povlaky na substráty, které jsou navzájem velmi rozdílné, vzhledem k mechanismům podílejících se na tvorbě rozhraní, které již byly popsány.

Jako důsledek principu tvorby povlaku, který byl již zmíněn, v deponované vrstvě převažuje tlakové napětí, proto mají povlaky vytvářené CS příznivé vlastnosti vzhledem k únavovému životu součásti, přestože mají tyto vrstvy do jisté míry vyčerpanou plasticitu, což naopak tuto životnost snižuje.

Jelikož lze prášek recyklovat, dochází k téměř bezodpadovému vytváření povlaků, což je příznivé obzvláště při použití dražších materiálů. Navíc při depozici nedochází ke vzniku žádných spalin nebo toxických produktů. Použití nižší teploty taky vede ke snížení energetické náročnosti procesu.

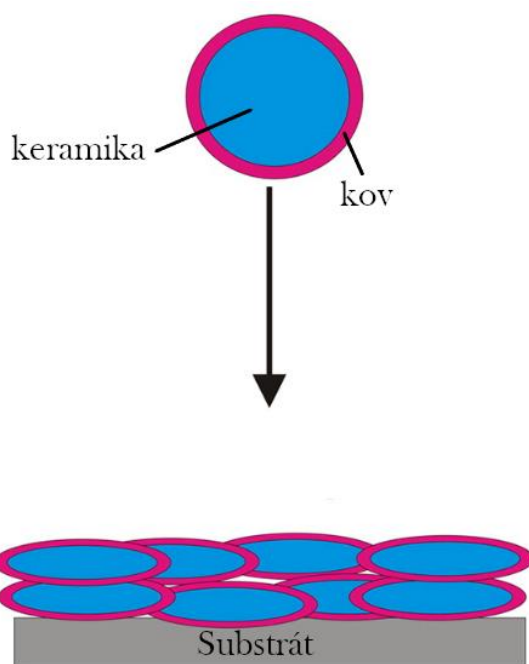
Díky schopnosti trysky se natáčet a možnosti tvorby nástřiku na rotačně symetrické součásti je možná tvorba i relativně přesných a složitých tvarů tzv. „na hotovo“ bez nutnosti dalšího obrábění a úpravy povrchu. Nevzniká tak zbytečný odpad. Tímto se podrobněji zabývá kapitola o aditivní výrobě.

Touto technologií lze vytvářet poměrně velké tloušťky nástřiku (až okolo 5-6 cm), což v kombinaci s relativně rychlou tvorbou nástřiku umožňuje efektivně vyrábět i masivnější díly, jak lze vidět na obr. 9.



Obr. 9 masivní příruba vytvořená pomocí CS [17]

Nevýhodou je omezená možnost tvorby vrstev z keramiky, jelikož keramika nedisponuje dostatečnou plasticitou, která je při tvorbě vrstvy klíčová, jak už bylo zmíněno výše. Tento problém lze řešit užitím speciálního typu prášku (viz obr. 10), kdy jsou tvrdé částice keramiky obaleny do relativně měkkého kovového obalu, který se deformuje a zajistí tak metalurgické spojení s již naneseným substrátem [14].



Obr. 10 schéma kompozitních částic [14]

Při nevhodném nastavení parametrů může docházet k zanášení trysky, což může vést ke zhoršení kvality nanášené vrstvy nebo v krajních případech až k poškození nebo znehodnocení trysky. Tomuto lze předcházet povlakováním vnitřní části trysky vysoce tvrdými karbidy.

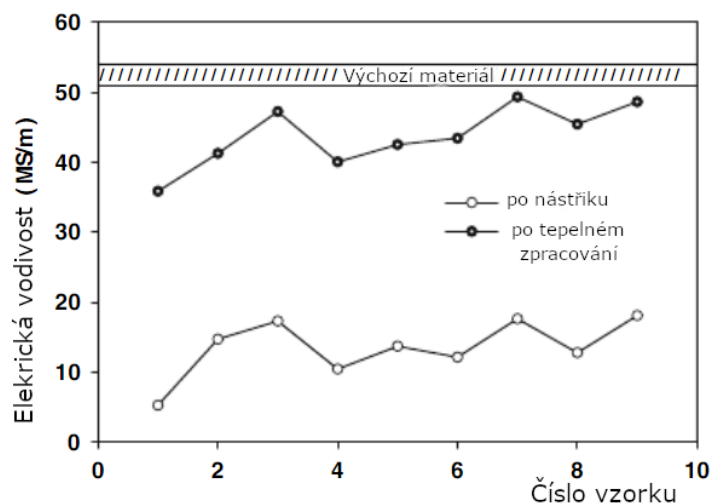
Nastavíme-li správně všechny parametry a zvolíme-li správně kombinaci materiálů, vzniká vysoce homogenní vrstva téměř bez pórů a z dobrými mechanickými vlastnostmi.

1.4.APLIKACE CS V TECHNICKÉ PRAXI

VYTVÁŘENÍ POVLAKŮ

Fakt, že je coldspray vhodný i pro materiály citlivé na teplotu, jej předurčil k tvorbě povlaků, které není možné nanášet technologiemi nástřiků za vysokých teplot. Škála použitelných materiálů je široká (kovy a jejich slitiny vč. superslitin a kovů s vysokou teplotou tání). Je to vhodná technologie i pro materiály citlivé k oxidaci za zvýšených teplot. Je tak možno vytvářet například nástřiky zajišťující chemickou či tepelnou odolnost (protikorozní vrstvy, tepelné bariery). Ve specifických případech je možné nanášení keramických vrstev na kovové substráty [15].

Pomocí technologie CS lze nanášet také povlaky s vysokou hodnotou elektrické vodivosti. Pro tyto účely lze např. využít prášky z dendritické mědi. Bylo však zjištěno, že vodivost ve stavu po nástřiku bez tepelného zpracování není uspokojivá. Po následném tepelném zpracování ve vakuu při 300 °C po dobu jedné hodiny byl pozorován znatelný nárůst vodivosti, která se díky tomu přibližuje vodivosti výchozího materiálu, jak lze vidět na obr. 11. Mimo tento fakt se ukazuje, že na vodivost má také nezanedbatelný vliv teplota přehřevu pracovního plynu a také jeho tlak. Naproti tomu např. vzdálenost trysky od substrátu má efekt spíše zanedbatelný [16].



Obr. 11 srovnání nástřiku z mědi s a bez tepelného zpracování [16]

Mimo výše zmíněné lze takto vytvořené vrstvy použít například pro tvorbu otěruvzdorných a korozivzdorných povlaků pro brzdové kotouče v automobilovém průmyslu nebo in-situ tvorbu povlaku pro ochranu úložných nádob využívaných v jaderné energetice. Vzniklé povlaky poskytují mj. zvýšenou korozní i mechanickou odolnost a únavovou životnost [17].

OPRAVY SOUČÁSTÍ

Pomocí coldspray lze operativně opravovat i tvarově složité součásti z různých materiálů. Toto lze samozřejmě provést i jinými technologiemi, ale oproti nim CS do součásti nevnáší tak velká vnitřní pnutí jako u jiných žárových nástřiků (například jako důsledek tepelné roztažnosti nebo vznikem fáze o rozdílné měrné hmotnost), které má negativní vliv na životnost součásti. Dalším benefitem je, že cold spray zařízení existují i v mobilních velikostech, což zlepšuje přístupnost procesu.

CS se mj. osvědčil pro opravy součástí vesmírné a letecké techniky, kde se používají převážně kovy s nízkou měrnou hmotností jako titan a hořčík. V těchto aplikacích jsou opravy nutné, jelikož konstrukce letadel a její části, jsou v podstatě nepřetržitě vystavovány prostředí urychlující degrační procesy (teplotní šoky, vlhkost, chemicky agresivní prostředí atd.) [18]. Takto můžeme prodloužit životnost různých součástí např. opravou zkorodovaných míst, jak lze vidět na obr. 12, kde došlo k opravě části podvozku letecké techniky nástřikem z titanu. Tři základní kroky jsou: odstranění zkorodované části původní součásti, nanesení CS nástřiku a vytvarování do původních rozměrů, vč. zajištění funkčnosti všech ploch, závitů atp. Takto opravená součást má díky použitému materiálu vyšší korozní odolnost, navíc i finanční úspora oproti nákupu nového dílu je nezanedbatelná [19].

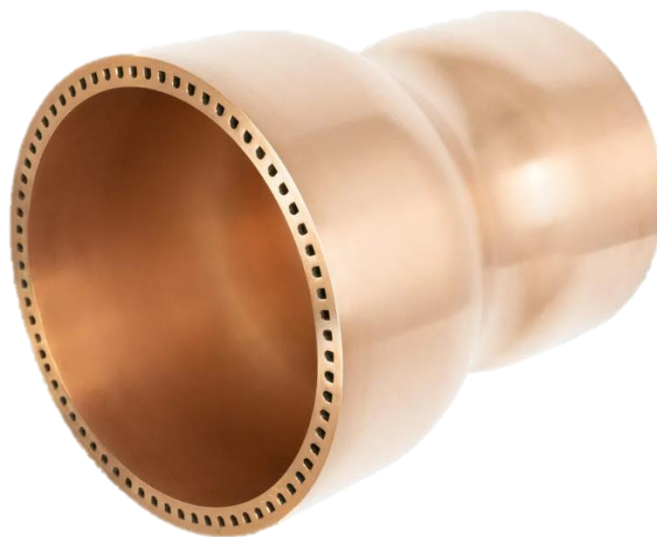


Obr. 12. ukázka opravy součástky pomocí CS [19]

ADITIVNÍ VÝROBA

Technologií cold spray lze v neposlední řadě vyrábět nové součástky s širokým spektrem využití. Rychlost výroby je přitom ve srovnání s ostatními aditivními metodami velmi dobrá (až 45 kg/hod). Materiál se při výrobě netaví, takže je vnesené vnitřní pnutí nižší než u jiných žárových nástřiků. Není rovněž nutné vyrábět tyto díly ve speciálních prostředích, jelikož nehrozí oxidace, což umožňuje takto vyrábět větší díly a celkově díly s téměř neomezenou variabilitou tvaru. Ukazuje se však, že takto vyrobené díly mají oproti dílům vyrobeným konvenčně horší vlastnosti, obzvláště nižší tažnost a elektrickou i tepelnou vodivost. To však lze znatelně vylepšit tepelným zpracováním, které dokáže vlastnosti dílů zlepšit až na hodnoty srovnatelné s vlastnostmi dílů konvenčně vyrobených. Naopak tvrdost dílů vyrobených CS je zpravidla vyšší, jakožto důsledek deformačního zpevnění uplatňujícího se při tvorbě nástřiku.

S tryskou i se součástí, na které vytváříme nástřik lze během procesu pohybovat. Můžeme tedy vytvářet nástřiky i na různé rotačně symetrické součástky. S využitím možnosti rotace substrátu lze také vytvářet duté díly, jak lze vidět na obr. 13. Jako substrát se zvolí součást (často ze slitin Al), jejíž vnější část přesně kopíruje vnitřní tvar vznikající součásti. Po úspěšném zvolení substrátu započne samotná tvorba vrstvy. Je-li vyžadována složitější struktura v samotné stěně výrobku, lze do vzniklého povlaku vyfrézovat např. chladičí kanálky, které jsou zpětně pomocí CS zaplněny chemicky odstranitelným materiálem a následně překryty další vrstvou nástřiku. Po dokončení procesu tvorby vrstvy je substrát chemicky odstraněn. Vznikne tak dutá rotačně symetrická součást [17].



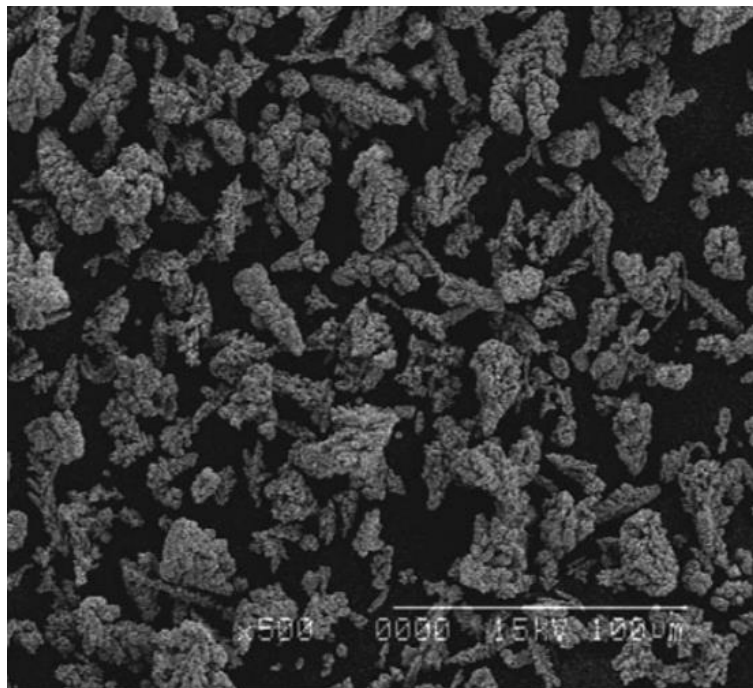
Obr. 13 vložka do spalovací komory vyrobená výhradně pomocí CS [17]

1.5. CS PRÁŠKY A JEJICH ZPRACOVÁNÍ

V dnešní době používáme převážně prášky vyráběné atomizací. Takto vyrobené prášky se velikostně pohybují v řádu jednotek až desítek mikrometrů a mají poněkud pravidelný sférický tvar. Jejich nevýhodou je to, že v důsledku použité technologie jsou v nerovnovážném stavu, a proto je jejich plasticita částečně vyčerpaná. Aby byla jejich plasticita obnovena, je vhodné takto vyrobené částice tepelně zpracovat, aby se dostaly blíže rovnovážnému stavu. Takto zpracovaný prášek získá vyšší plasticitu a vytvořená rozhraní tak budou kvalitnější.

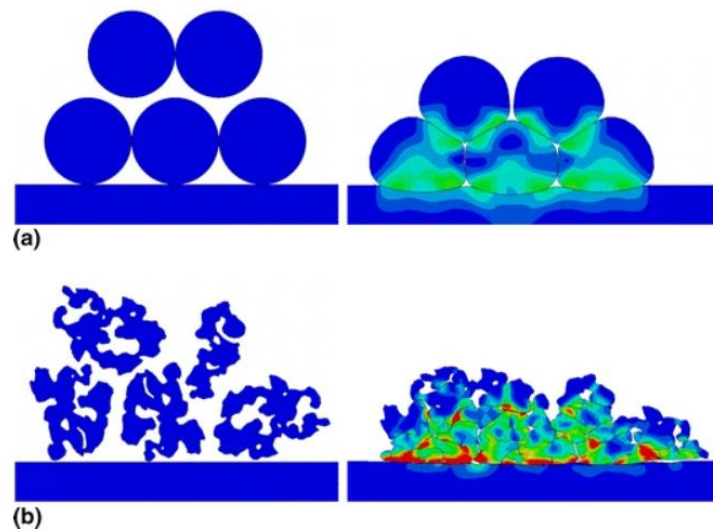
Výhodou technologie CS je, že kromě prášků vyráběných atomizací lze efektivně užít i prášky vyrobené jinými technologiemi, a to např. dendriticky nebo pomocí Armstrong procesu.

Částice mědi, které jsou vyráběny dendriticky, mají nepravidelný tvar (obr. 14). Srovnáme-li takto tvarované částice s částicemi o pravidelném kulovém tvaru, mají větší tendenci se štěpit a jejich velikost se tak v průběhu jejich urychlování směrem na substrát neustále mění vlivem turbulentních proudů v pracovním plynu. Tímto způsobem je možné potlačit vliv velikosti částic na kvalitu nástřiku a ukazuje se, že vlastnosti nástřiků zhotovených pomocí prášků s různou distribucí velikosti částic jsou obdobné a bylo prokázáno, že pomocí dendriticky připravených částic mědi, lze zhotovit kvalitní nástřik [16]. Další výhodou je, že dendritická měď se vyrábí poměrně levným elektrolytickým procesem [20].



Obr. 14. snímek dendritů mědi o velikosti pod 70 μm
(SEM, zvětšeno 500x) [20]

Druhým, v této práci zmíněným procesem, je Armstrong proces, který je obzvláště vhodný pro prášky z titanu. Použijeme-li totiž k depozici kombinaci dusíku, jako pracovního plynu, a prášek složený z kulovitých částic, porozita takto nanesené vrstvy dosahuje neuspokojivých hodnot (obr. 15). Částice prášku vyrobené tímto procesem jsou však nepravidelné (tzv. korálová morfologie), snadněji se nanášejí, proto je s výhodou nižší ceny možno použít dusík i v případě nanášení titanu [21]. Konkrétně pak tento proces probíhá tak, že dochází k redukci chloridu titaničitého sodíkem. Následuje suché a mokré kulové mletí, zajišťující mj. zúžení distribuce velikosti částic [22].



Obr. 15 srovnání kulových částic (a) s částicemi vyrobenými Armstrong procesem (b) [21]

2. BALISTICKÁ OCHRANA

Balistická ochrana byla zapotřebí odedávna, a to zejména ve formě štítů bránících v boji před meči, šípy atp. Tato ochrana byla převážně ze dřeva, popř. částečně z kovu (Cu, Fe). Nutnost balistické ochrany vzrostla především v období světových válek, kdy byly konstruovány tanky a jiná technika tak, aby co nejvíce odolávaly nepřátelským projektilům. Hlavním materiálem byla tepelně zpracovaná ocel. Moderní pancíře jsou vyráběny převážně z vysoce pokrokových kompozitních materiálů různého druhu.

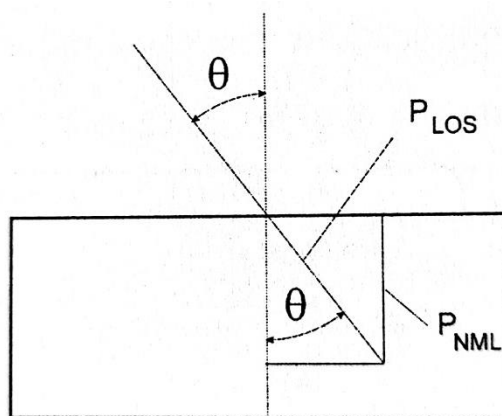
Pod pojmem balistická ochrana se obecně rozumí ochrana majetku, a hlavně lidského zdraví a životů před následky vniku různorodých projektilů nebo jejich částí. Balistiku dělíme na 3 odvětví. Interní zkoumá to, co se děje od výstřelu po okamžik, kdy projektil opustí ústí hlavně. Externí balistika se zabývá tím, co se s projektilem děje při jeho letu mimo hlaveň až do okamžiku kontaktu s projektilem. Terminální balistika nás však v této práci bude zajímat nejvíce, protože hodnotí a popisuje interakci letícího objektu s překážkou. To je forma rázového zatížení, kdy dochází k rychlému uvolnění energie, které je charakterizováno vlnou napětí.

Chování balistických materiálů je popsáno odezvou právě na tuto vlnu napětí. Odezva může být elastická, pružně elastická nebo hydrodynamická. V reálných případech se současně vyskytuje více typů odezvy. O převažujícím typu odezvy rozhoduje především dopadová rychlost projektilu, materiálové vlastnosti projektilu a překážky, jejich geometrie vč. tloušťky a jejich vzájemná poloha. Výzkum vztahů mezi mechanickými vlastnostmi pancíře a jeho balistickou odolností prokázal, že na balistickou odolnost má nejvyšší vliv hodnota tvrdosti. To platí pro nízké i vysoké dopadové rychlosti. U středních dopadových rychlostí, kdy dochází k nehomogenní plastické deformaci a tvorbě adiabatických pásů, však pancíře naopak vykazují pokles balistické odolnosti s rostoucí tvrdostí [23].

Pro dobré pochopení všech dějů spjatých s terminální balistikou je nutné vymezit pár základních pojmů. Jelikož je rychlost projektilu velmi důležitým parametrem, dělíme tyto dopadové rychlosti na nízké, běžné, vysoké a extrémně vysoké. Dále dle poměru tloušťky pancíře a průměru projektilu rozdělujeme pancíře na tenké, středně silné a polonekonečné. Zastaví-li se projektil uvnitř pancíře, mluvíme o penetraci. Pokud ale projektil pancířem pronikne, nazýváme to průrazem. Zásadní roli také hraje dopadový úhel (obr. 16), což je úhel mezi tečnou trajektorie střely v okamžiku dopadu a normálou plochy pancíře v místě dopadu. Zpravidla pro účely průrazu chceme dosáhnout toho, aby tento úhel byl co nejmenší, protože pokud roste, penetrační schopnost střel klesá, a to dokonce rozdílně na základě užitého typu munice. Z rovnice (1) vyplývá, že již při celkem běžném dopadovém úhlu 60° je tloušťka pancíře, kterou musí projektil překonat oproti kolmému dopadu dvojnásobná. Dále pokud dopadový úhel roste, zvyšuje se šance na odražení projektilu.

$$P_{celk.} = P_{nom.} \cdot \sec(\theta) \quad (1)$$

, kde: $P_{celk.}$ je tloušťka, kterou musí projektil překonat při úhlu θ , $P_{nom.}$ je nominální tloušťka pancíře, θ je dopadový úhel



Obr. 16 vliv úhlu dopadu na vzdálenost, kterou musí projektil překonat za účelem průrazu [23]

2.1.MATERIÁLY BALISTICKÉ OCHRANY

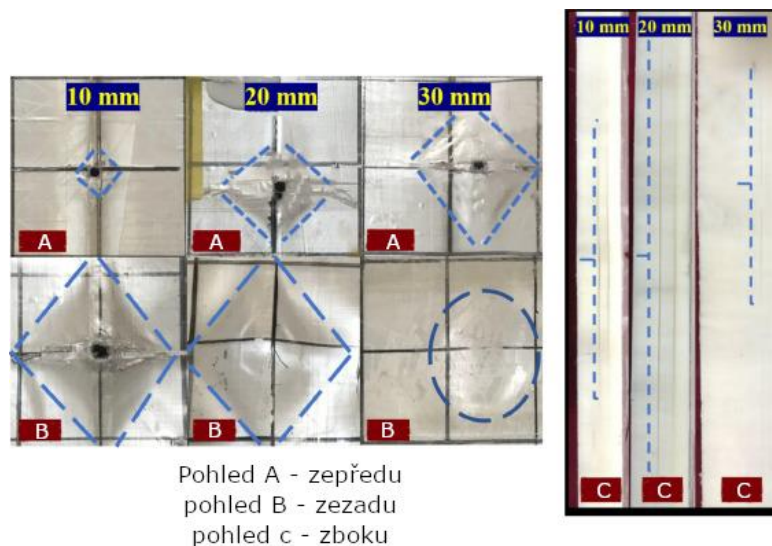
Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, různé způsoby ochrany, resp. materiály, ze kterých jsou vyrobené mají dlouhou historii, nicméně s vývojem techniky, konkrétně hlavně té vojenské, je nyní, dříve než jindy, potřeba přicházet s novými typy balistické ochrany, která by byla schopna odolávat moderním zbraním a projektilům (viz 2.3). Různých technicky atraktivních řešení této problematiky je celá řada. Zde jsou uvedeny alespoň některé materiály a způsoby jejich kombinace, a to jak pro ochranu osob (např. neprůstřelné vesty), tak i ochranu vojenské techniky (např. hlavní nebo přídatné pancíře obrněných vozidel, tanků atp.)

KOMPOZITY

V současné době se často využívají kompozitní pancíře různého druhu. Cílem je vytvořit takové strukturu, aby bylo možné při dopadu projektilu co nejefektivněji vstřebet jeho energii. Tato práce se zabývá zejména projektily způsobující poškození pomocí kinetické energie. Důležitými parametry pro takový kompozit bude volba jednotlivých materiálů, způsob vrstvení a kvalita jejich rozhraní. Při interakci projektilu s pancířem vzniká tlaková vlna, která prostupuje materiálem. Pokud ale bude připravené rozhraní nekvalitní s vysokou pórovitostí a špatnou adhezí, dochází k odrazu vlny zpět do nanesené vrstvy, což má za následek snížení efektivity pancíře. Proto je vhodné, aby bylo rozhraní co nejkvalitnější.

UHMWPE

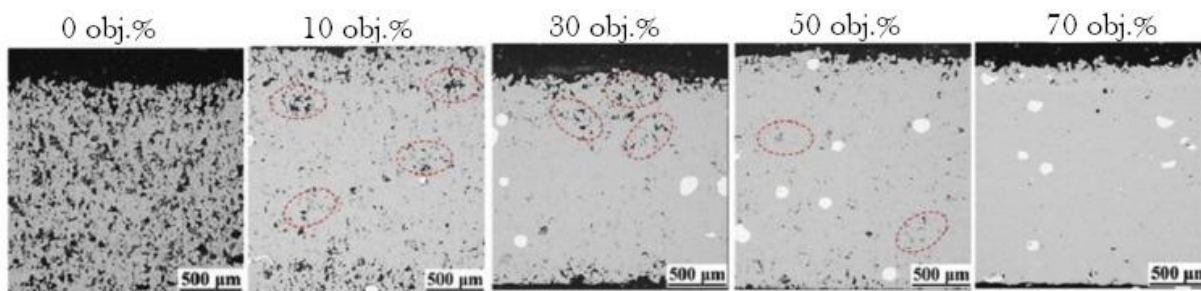
Polyetylen s ultra vysokou molekulovou hmotností je jedním z moderních materiálů užívaných pro širokou škálu aplikací v závislosti na tloušťce takovéto ochrany. Balistická odezva laminátových plátů vyrobených z vláken tohoto materiálu se v závislosti na jejich tloušťce významně mění (obr. 17). Oproti např. skelným vláknům nebo aramidu (žáruvzdorný materiál o vysoké pevnosti používaný pro výrobu neprůstřelných vest) dosahuje tento materiál vyšších hodnot mj. tržné délky (mez pevnosti podělená součinem hustoty materiálu a gravitačního zrychlení v daném místě, jinými slovy, jak může být vlákno dlouhé, než se vlivem vlastní tíhy přetrhne), má také lepší specifický modul (modul pružnosti vztažený na hustotu). Díky tomu může vstřebet vlastní deformací více energie a je proto vhodný pro balistické aplikace [24].



Obr. 17 výsledek testování laminátových UHMWPE plátů různé tloušťky (projektil ráže 7,62 mm) [24]

TITAN A JEHO SLITINY

Titan společně s jeho slitinami je již od 50. let 20. století znám jako výhodný materiál pro balistickou ochranu, a to obzvláště pro užití pro vojenskou techniku jako jsou obrněná vozidla, tanky atd. Výhodami jsou například výborná korozní odolnost, nízká měrná hmotnost vysoká měrná pevnost. Korozní odolnost způsobená pasivací povrchu oxidem hlinitým na druhou stranu komplikuje depozici vrstev z titanu a jeho slitin. Takto vzniklé povlaky se vyznačují neuspokojivou hodnotou porozity, což má mimo jiné negativní vliv na mechanické vlastnosti i korozní odolnost. Řešením tohoto problému se může stát například použití helia jako pracovního plynu, což ovšem negativně ovlivní ekonomické hledisko. Druhou variantou je přimíchání tvrdých částic do prášku. Pokud jsou částice větší než částice prášku, tak se při styku s povrchem odrazí a zároveň zdeformují (pěchují) již nanesené částice Ti, což vede ke snížení porozity, jak lze vidět na obr 18 [25].



Obr. 18 vliv podílu tvrdých částic v Ti prášku na výslednou porozitu nástřiku [25]

Často používanou slitinou je Ti-6Al-4V. Z hlediska fázového složení se zde vyskytuje jak α -fáze (HCP) stabilizovaná hliníkem, tak β -fáze (BCC) stabilizovaná vanadem. Tuto slitinu lze dobře svařovat a tepelně zpracovávat k dosažení požadované úrovně pevnosti. Oproti čistému titanu má vyšší pevnost a lepší únavovou životnost. Vyznačuje se dobrou pevností a výbornou korozní odolností. V závislosti na výrobci vykazuje tato slitina pevnost v tahu 900-1000 MPa a tvrdost okolo 300-320 HB, přitom je poměrně lehká s hustotou 4450 kg/m³. Při testování 12,8 mm tlustého plátu byla získána hodnota $V_{50} = 633$ m/s (viz norma STANAG 2920).

Bylo prokázáno, že tepelné zpracování této slitiny má vliv na její balistické vlastnosti. Materiál, na který bylo aplikováno rozpouštěcí žíhání a následné stárnutí měl vyšší balistickou odolnost než materiál ve výchozím stavu [26].

2.2. NORMY ZABÝVAJÍCÍ SE BALISTICKOU OCHRANOU

Aby bylo možné balistickou ochranu třídit podle různých parametrů, bylo nutné vytvořit normy, které takovéto rozdělení přesně stanoví. Takovéto normy usnadňují mezinárodní operace, umožňují kompatibilitu vojenské techniky atp. Normy se mohou zabývat jak ochranou osob, tak ochranou vojenské techniky včetně obrněných vozidel, tanků, helikoptér atp. Zde je pár příkladů:

STANAG 4569

Tato standardizační norma Severoatlantické aliance, která se mj. uplatňuje i v případě techniky AČR stanovuje míru ochrany posádky vozidel pro logistiku a lehkých pancéřovaných vozidel. Skládá se ze 4 částí. První se zabývá kinetickými hrozbami, tj. projektily z palných zbraní, a to dle míry balistické ochrany od automatických pušek s municí ráže 7.62 mm ze vzdálenosti 30 metrů a rychlostí dopadu 833 m/s až po kanony ráže 25 mm s rychlostí dopadu přes 1200 m/s ze vzdálenosti 500 metrů užívající municí APDS (viz 2.3). Dále se norma zabývá odolností vůči střepinám, ochranou před výbušninami typu granát nebo mina [27].

STANAG 2920

Další norma vydaná NATO se zabývá testováním úrovně ochrany materiálů balistické ochrany osob. Zkoumá schopnost materiálu zastavovat šrapnely a jiné nebezpečné úlomky. Ochrana je podrobena střelbě o různých podmínkách (rychlost projektilu, úhel dopadu), kdy se používají projektily simulující šrapnel. Několikanásobným testováním lze určit kritickou rychlost šrapnelu, kterou je balistická ochrana za daných podmínek schopna zastavit, respektive přesněji parametr V_{50} (balistická limitní rychlost) určeným průměrem ze 6 platných testů skládajících se z 3 nejnižších rychlostí potřebných pro úplné proniknutí a z 3 nevyšších rychlostí pro částečné proniknutí. Na základě hodnoty tohoto parametru pak lze takovouto balistickou ochranu třídit do kategorií, které tato norma stanovuje. Přestože byla norma skutečně původně vyvinuta pro klasifikaci neprůstřelných vest, lze ji v současné době použít i při normalizaci přídatných pancířů obrněných vozidel [28].

Tuto normu na rozdíl od předešlých dvou vydává Národní ústav pro spravedlnost Spojených států a je v současné době uznávána téměř po celém světě. Jde to technický dokument stanovující minimální požadavky na úroveň balistické ochrany neprůstřelných vest, ale také jejich odolnost před bodnými zbraněmi. Vesty jsou následně rozděleny do tříd na základě několika kritérií, které se ověřují sériemi testů při různých podmínkách. Na rozdíl od předchozí normy, tato norma nepojednává o vlivu šrapnelů, ale o vlivu projektilů ze střelných zbraní. Tato norma má široké využití od komerčně prodávaných neprůstřelných vest přes vesty užívané policejními jednotkami až po ty využívané speciálními jednotkami a armádou [29].

2.3. KINETICKÉ PROJEKTILY

Kinetické projektily (na rozdíl od bojových hlavic využívajících energii výbuchu) využívají pro poškození pancíře svou kinetickou energii, která je závislá na jejich hmotnosti a rychlosti. Konkrétně je cílem dosáhnout co nejvyšší hustoty energie, což je hodnota kinetické energie projektilu vztažená na plochu jeho čela. Pro získání co nejvyšší hustoty energie je nutno vzít v potaz i odpor vzduchu, který projektily zpomaluje, a tak tuto hodnotu snižuje. Tudiž je důležitá aerodynamika projektilu. Pro lepší aerodynamické vlastnosti se využívá několika mechanismů, a to obzvláště užití balistických čepiček zlepšující aerodynamiku střely (jako např. u střel typu APBC – armour-piercing ballistic capped). U střel typu APDS (armour-piercing discarding sabot) se lepší aerodynamiky i hustoty energie docílí tak, že po opuštění hlavně se od tvrdého jádra o menším průměru než je hlaveň oddělí segmenty, které mají za úkol těsnit a vést jádro v hlavni. Tato tvrdá jádra se zpravidla vyrábějí z wolframu nebo jeho karbidu. Tyto projektily mohou být dále vybaveny stabilizujícími křídélky (typ APFSDS – armour-piercing fin-stabilized discarding sabot). Vysokých hodnot hustoty energie dosahují i podkaliberní střely typu APCR (armour-piercing composite rigid). Střela se skládá z tvrdého jádra a obalu tvořeného lehkým kovem.

Jak již bylo řečeno dopadový úhel negativně ovlivňuje schopnost penetrace projektilu. Vliv úhlu je možné snížit dalším typem čepičky, která vhodně deformuje pancíř před nárazem vlastního projektilu (střely typu APC armour-piercing capped).

2.4. MECHANISMY UPLATŇUJÍCÍ SE PŘI DOPADU PROJEKTILU NA PANCÍŘ

Styk s projektilem může mít různou odezvu v závislosti na mechanických vlastnostech materiálu, ze kterých je pancíř vyroben. Závisí to ovšem i na úhlu dopadu, tvaru, rychlosti a hmotnosti střely. Dále jsou uvedeny příklady některých mechanismů.

KUŽELOVÝ LOM

Dochází k němu u křehkých materiálů. Konkrétně v případě balistické ochrany se jedná např. o vysokopevné oceli nebo keramiky. Při dopadu projektilu se vlivem její kinetické energie od tohoto místa rychle šíří lom takovým způsobem, že vytvoří tvar kuželu, jehož tvar je závislý na rychlosti střely a napětí, které projektil v místě dopadu vytvoří. Uvnitř takto vytvořeného objemu materiálu odděleného od okolí výše zmíněným kuželem dochází také k drcení materiálu na částice nepravidelného tvaru. Tyto částice mohou být projektilem dále vtlačovány do pancíře nebo se mohou rozptýlit směrem, kterým projektil vnikl. V případě průrazu také vnikají do prostoru chráněného pancířem [23].

ZÁTKOVÉ POŠKOZENÍ

Tento jev je typický pro houževnaté materiály při jejich kontaktu s projektilem o specifické geometrii. Za adiabatických podmínek dochází ke stříhu materiálu a materiál pancíře je tlačěn před projektilem za vniku plastické deformace. Vliv má poměr kalibru projektilu a tloušťky pancíře v místě dopadu. Tento typ poškození je obzvláště typický při interakci pancíře s kumulativními hlavicemi [23].

2.5.VYUŽITÍ TECHNOLOGIE COLD SPRAY V BALISTICE

Technologií cold spray, jakožto jednou z mnoha aditivních technologií lze vytvářet balistickou ochranu. Hlavní výhodou je to, že lze takto vytvářet více vrstev o rozdílných tloušťkách vyrobené z různých materiálů. Lze proto kombinovat různé vlastnosti těchto materiálů za účelem získání co nejvhodnější výsledného kompozitu vzhledem ke zmiňené aplikaci. Kromě nanášených souvislých vrstev lze také vytvářet struktury, ve kterých se vyskytují samostatné částice o rozdílných vlastnostech, než je vrstva, ve které se nachází. Vzhledem k mechanismům uplatňujícím se při tvorbě povlaku jsou takto nanesené materiály deformačně zpevněné, a proto dosahují oproti konvenčně vyrobeným ekvivalentům vyšších hodnot tvrdostí. To je pro aplikaci v balistice výhodné. Výsledný kompozit lze také dále tepelně zpracovávat pro dodatečné zlepšení požadovaných vlastností.

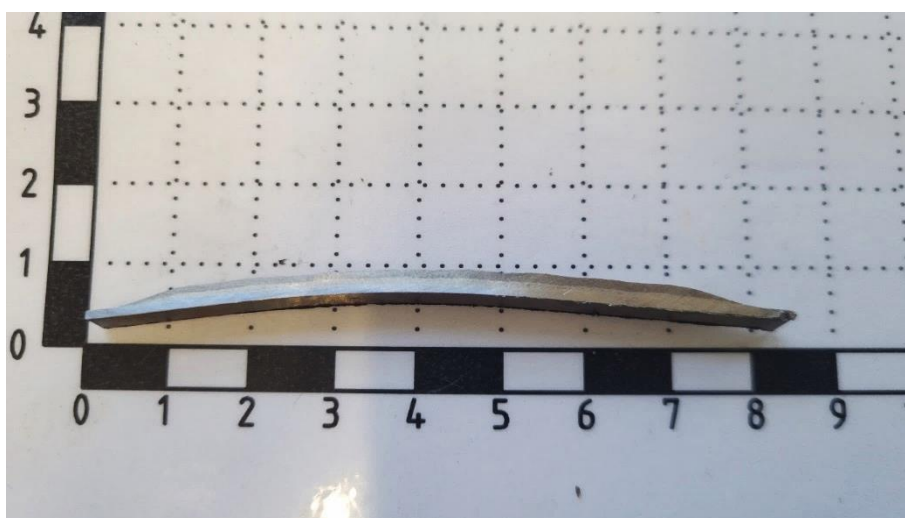
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Pro účely experimentu byl zvolen kompozit skládající se ze tří vrstev. První vrstvou byla konvenčně vyrobená ocel třídy 11. Sloužila pouze jako substrát pro nanášení dalších vrstev pomocí CS. Druhou vrstvou byl nikl. Ten byl použit ze dvou důvodů. Hlavním je zlepšení adhezních pevností obou rozhraní. Pokud by byla Ti slitina nanášena přímo na ocel, nedosáhlo by se uspokojivých hodnot adhezní pevnosti. Druhým důvodem je houževnaté chování niklu. To by bylo výhodné obzvláště pokud by byla nanesena masivnější vrstva, která by pak mohla zpomalit tvrdé šrapnely projektilu a svrchní vrstvy Ti+SiC. Nejdůležitější vrstvou je slitina titanu, konkrétně pak Ti-6Al-4V, která již byla podrobněji popsána v kapitole 2.1. Nicméně kromě této slitiny vrstva obsahuje i částice tvrdých keramických částic SiC (karbid křemíku). Tyto částice byly do prášku přidány mechanickým mícháním bez mletí, aby nedošlo ke snížení plasticity částic.

Keramika jako taková je velmi vhodným materiálem pro balistické aplikace. V tomto vrstveném pancíři se keramika vyskytuje ve formě částic ze tří důvodů. Prvním je odlehčení pancíře, jelikož keramika má oproti kovům obecně nižší hustotu, druhým je dosažení lepší koheze, nižší porozity, vyšší tvrdosti, a tedy i vyšší balistické odolnosti vrstvy Ti-6Al-4V, kvůli mechanismu přechování těmito částicemi popisovaném v kapitole 2.1. Posledním důvodem je zvýšení průměrné tvrdosti kompozitu (viz kapitola 2).

Při vlastním procesu výroby byl jako pracovní plyn použit dusík. Na substrátu byl nejprve učiněn předehřev plynem o teplotě 900 °C. Byla nanesena tenká vrstva niklu, a poté následovalo nanášení vrstvy Ti-6Al-4V + SiC plynem o teplotě 1040 °C a tlaku 5 MPa. Při tvorbě všech vrstev byla vzdálenost trysky od substrátu (SD) 30 mm a rychlost pohybu trysky 200 mm/s.

Aby bylo možné vzorek zkoumat bylo nejprve nutné z vytvořeného kompozitu vyříznout proužek materiálu (viz Obr. 19), který byl dále dělen. Z takto vzniklých kousků byly vytvořeny metalografické vzorky tak, aby je bylo možné pozorovat mikroskopem a provádět testy mechanických vlastností. Pro důkladnější popis byly vzorky pozorovány ve 2 na sebe kolmých směrech.



Obr. 19 tenký proužek vyříznutý z vytvořeného nástřiku

METODY ZKOUŠENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

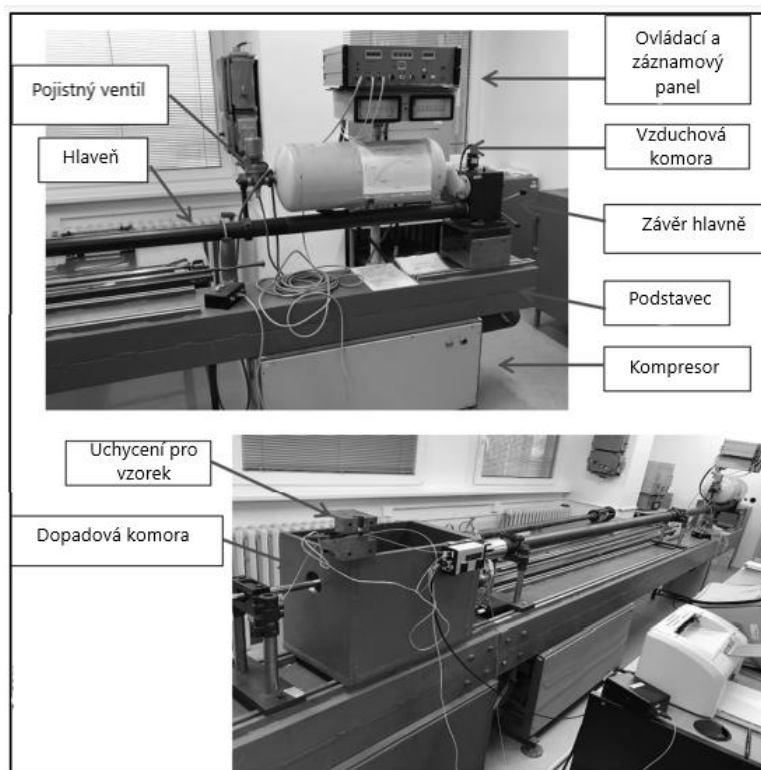
Jelikož hlavním cílem této práce je posoudit vhodnost využití technologie CS pro balistické aplikace, je obzvláště nutné sledovat kvalitu rozhraní, zejména jeho adhezní pevnost a odezvu při dynamickém zatížení. Tvrdost nástřiku je dalším nezanedbatelným parametrem.

Adhezní pevnost byla prováděna scratch testem. Jedná se o kvalitativní metodu standardizovanou mezinárodní normou. Jejím účelem je hodnotit a srovnávat adhezní a kohezní pevnost různých žárových nástřiků o tloušťkách 50-1000 μm . Při zkoušce je do metalografického výbrusu vytvořen vryp napříč zkoumanými vrstvami i rozhraními. Je vytvářen zpravidla konstantním zatížením pomocí indentoru o známé geometrii (zpravidla obrazové analýzy se vyhodnocuje šířka vrypu a případně přítomnost, množství a délka trhlin a podíl jednotlivých druhů poškození. Jsou pozorovány tři základní druhy poškození: adhezní (trhlina se vytváří a šíří rozhraním mezi vrstvami), kohezní (trhlina se šíří od vrypu nástřikem zpravidla podél hranic splat) a tvorba kužele, který vzniká na rozhraní poslední vrstvy a pryskyřice, ve které je vzorek zalit. Jeho tvar vypovídá o kohezi nástřiku. První dva druhy se nemusí vyskytovat vždy, kužel však pozorujeme pokaždé, jak lze vidět na obr. 20. Průběh zkoušky lze ovlivnit následujícími parametry: zátěžná síla, geometrie indentoru, délka a rychlost vrypu. Mimo výsledků zjistitelných obrazovou analýzou je výstupem zkoušky také odpor, který materiál klade proti směru vrypu a signál z akustické emise [30].



Obr. 20 schéma možných druhů poškození [30]

Dynamické zatížení bylo testováno pomocí Taylorova testu. Jedná se o nenormalizovanou zkoušecí metodu, proto získané výsledky nelze porovnávat s normalizovanými balistickými testy. Provedení tohoto testu je však celkově snazší, proto jej lze využít pro posouzení vhodnosti využití daného vzorku pro balistické aplikace. Lze tak předejít provádění balistického testu na nevhodných vzorcích, což znamená finanční i časovou úsporu. Test byl proveden na zařízení, které je popsáno na obr. 21. Pomocí stlačeného vzduchu je proti vzorku urychlován projektil rychlostí až 250 m/s.



Obr. 21 Schéma zařízení pro Taylorův test [31]

Projektilem byla střela ráže 7,62 mm. Jedná se o část normalizovaného puškového náboje využívaného mj. vojáky NATO. Je běžně zhotovena z olova nebo měkké oceli. Dle označení na špičce lze rozlišit speciální typy náboje, a to například průbojné, trasovací, zápalné atd. Normou je požadováno dosažení určitých hodnot klíčových vlastností včetně průbojnosti, úst'ové rychlosti, přesnosti, voděodolnosti atd. Využívá se jako střelivo pro pušky (M14) a kulometry (M60) nebo jako náboje do zbraní, které jsou součástí výzbroje tanků, letadel atp. Hmotnost projektilu je v závislosti na užitém materiálu okolo 9 gramů a jeho průměrná úst'ová rychlost je 840 m/s [32]. Pro účely Taylorova testu nebyl použit celý náboj, ale jen střela, která byla opatřena plastovým nosičem, který zajistil vedení projektilu uvnitř hlavě zařízení (obr. 22)



Obr. 22. projektil ráže 7,62 mm [30]

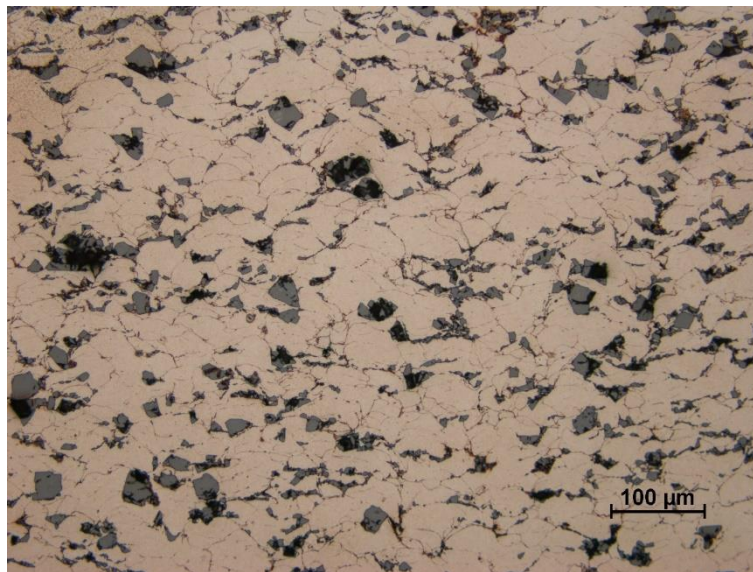
Jak již bylo vysvětleno v kapitole 2., další podstatnou vlastností pro účely balistiky je tvrdost vrstvy, proto bylo nutné se jejímu měření taktéž věnovat. Tvrdost vyjadřuje míru odporu, který materiál klade proti vnikání cizího tělesa. Lze ji měřit pomocí tvrdoměrů. Konkrétně pro tento kompozit byla stanovena mikrotvrdost podle Vickerse dle platné normy. Vtlačováním diamantového kuželu o vrcholovém úhlu 136° do povrchu materiálu vzniká vtisk, jehož obě úhlopříčky jsou měřeny. Na základě jejich délek lze určit tvrdost.

4. DISKUSE A VÝSLEDKY

Pro posouzení vhodnosti kompozitu pro danou aplikaci jej bylo nutné podrobně zkoumat, zejména stanovit tloušťky vrstev a jejich porozity. Dále bylo nutné stanovit vybrané mechanické vlastnosti, hlavně tvrdost, odezvu na dynamické zatížení a také adhezní pevnost rozhraní, která je velmi důležitá v případě vrstvených pancířů. V tomto případě byla kvalita rozhraní analyzována pomocí scratch testu. Dynamické zatěžování bylo simulováno Taylorovým testem.

OBRAZOVÁ ANALÝZA

Po vytvoření vzorků bylo použito vhodných leptadel za účelem zviditelnění struktury. Ukázalo se, že struktura byla tvořena jednotlivými sploty, jak lze vidět na obr. 23, což jsou zploštělé oblasti vzniklé deformací jednotlivých zrn prášku, kterými byl vytvářen povlak. Tato struktura je pro vrstvy vytvořené CS typická, proto byla její přítomnost předpokládána.



Obr. 23 splota zviditelněná leptáním, zvětšeno 200x

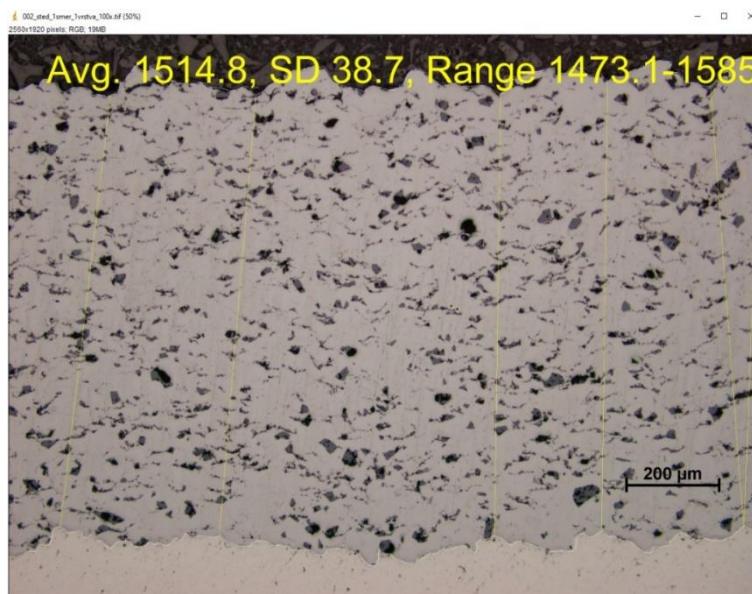
Tloušťka nanesené vrstvy je nezanedbatelným parametrem, proto bylo nutné pomocí vhodného softwaru (obr. 24) toto měření provést. Aby byly hodnoty co nejvíce reprezentativní, byl vytvořen statistický soubor a pomocí vzorců byla zjištěna průměrná hodnota (viz rovnice (2)) i směrodatná odchylka (viz rovnice (3)). Bylo zjištěno, že titanová vrstva měla tloušťku $624 \pm 6 \mu\text{m}$ a vrstva kombinující nikl a keramiku měla tloušťku $933 \pm 3 \mu\text{m}$.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

, kde: n je počet hodnot ve statistickém souboru, x_i jsou jednotlivé hodnoty statistického souboru

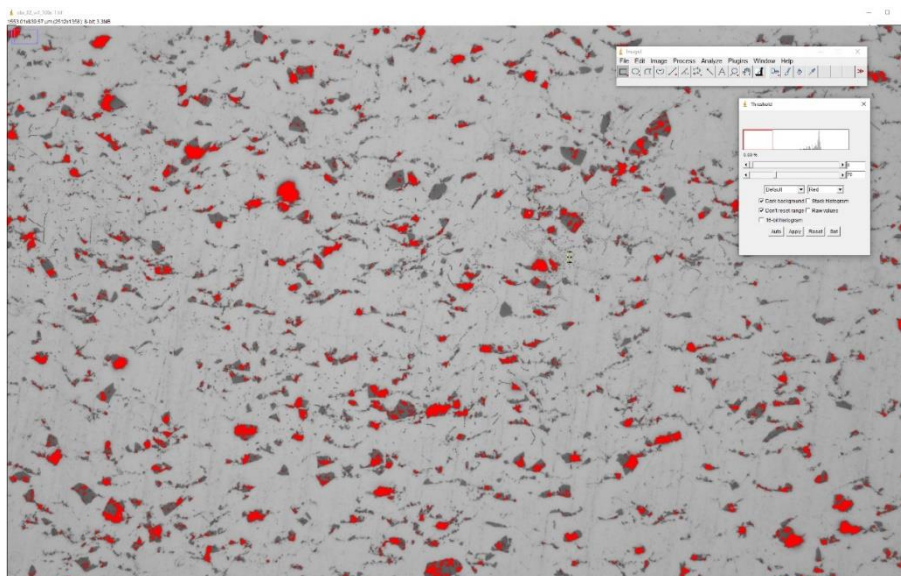
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

, kde: n je počet hodnot ve statistickém souboru, x_i jsou jednotlivé hodnoty statistického souboru, \bar{x} s pruhem je aritmetický průměr hodnot



Obr. 24 Měření tloušťky nanesené vrstvy pomocí softwaru ImageJ

Další důležitou vlastností nanesené vrstvy je její porozita, která úzce souvisí s plasticitou a tvarem užitého prášku, jak již bylo zmíněno v kapitole 1.5. V tomto případě byla porozita stanovena pomocí obrazové analýzy (viz obr. 25). Obdobně jako u měření tloušťky vrstvy byl sestaven statistický soubor a pomocí rovnic (2) a (3) byla vypočtena průměrná hodnota porozity včetně směrodatné odchylky. Porozita niklové vrstvy byla stanovena na $0,15 \pm 0,08$ % a porozita vrstvy titan + keramika na $2,63 \pm 0,21$ %.

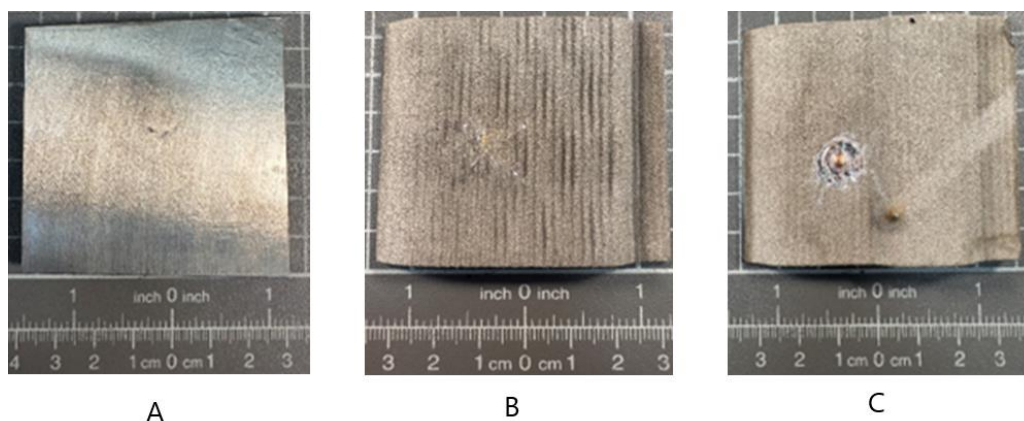


Obr. 25 měření porozity v software ImageJ pomocí funkce treshold

Stanovená porozita dosahuje uspokojivých hodnot. V případě titanové vrstvy hodnotu ovlivnil fakt, že obrazová analýza není dokonalým nástrojem pro hodnocení porozity a jako porozita sejevily i krátery, ze kterých se při řezání a broušení vydrolily částice SiC. Hodnotu pórovitosti by šlo přesněji stanovit použitím jiné technologie, např. rentgenové tomografie.

DYNAMICKÉ ZATĚŽOVÁNÍ

Taylorův test byl prováděn na 3 vzorcích, které lze vidět na obr. 26. Konkrétně šlo o konvenčně vyrobenou Ti-6Al-4V slitinu (A), další vzorky byly vyrobeny technologií CS. V případě (B) bylo přidáno 25 hm% SiC částic a v případě (C) byl použit Ti-6Al-4V prášek bez těchto částic. Pro všechny případy platí, že rychlost projektilu byla 163 ± 2 m/s.



Obr. 26 porovnání vzorků po dopadu projektilu

V žádném z uvedených případů nedošlo ani k porušení soudržnosti jednotlivých vrstev, ani k průstřelu vzorku. Nicméně na povrchu vzorku (C) lze vidět výraznější porušení povrchu. Vzorky (A) i (B) dopadly srovnatelně.

Z výsledků vyplývá, že přidání tvrdých částic do použité slitiny Ti má pozitivní vliv na tvrdost, resp. balistickou odolnost takto vzniklého nástřiku, což již bylo v minulosti pozorováno [25].

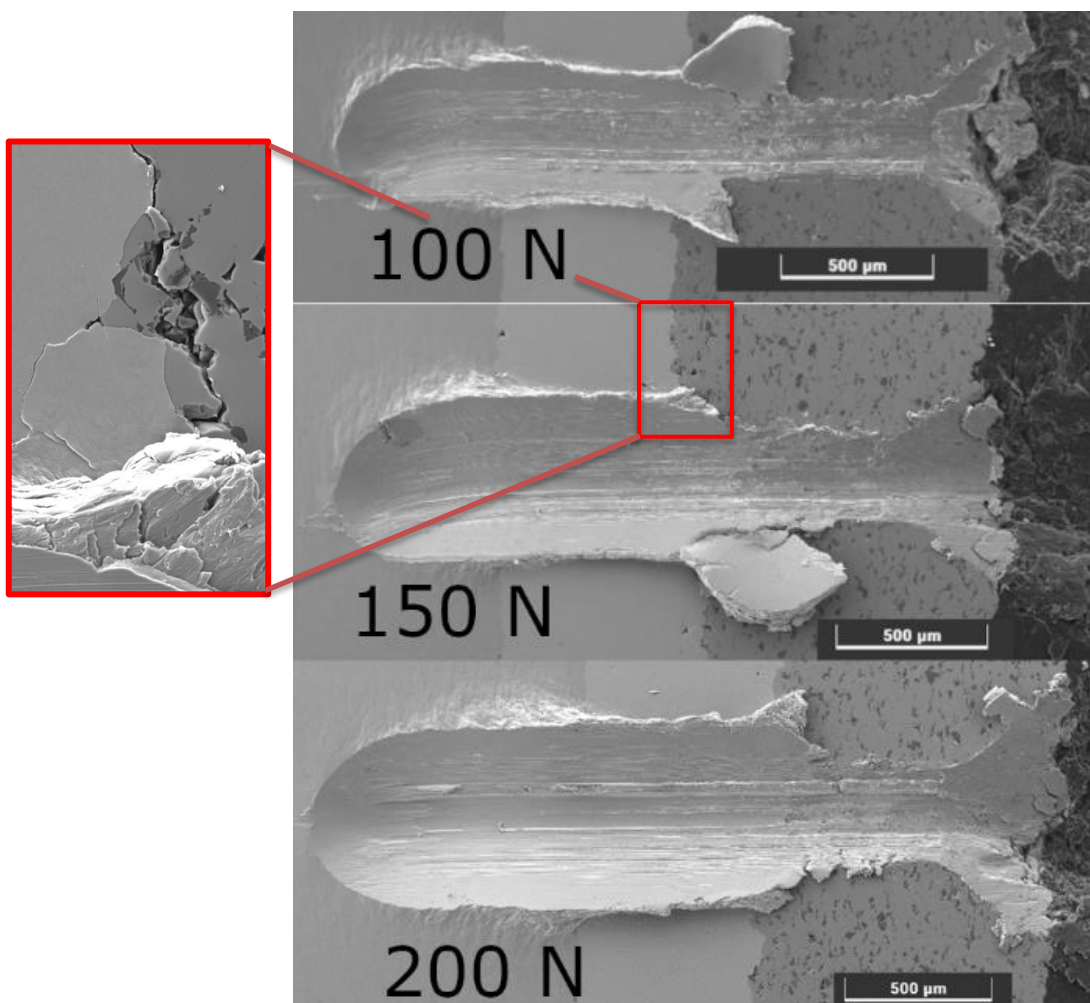
Jak bylo již popisováno, k dosažení co nejlepší adheze vrstvy je potřeba plastická deformace [3]. Jak však znázorňuje obr. 27, na rozhraní dvou nanášených vrstev se občas nacházejí tvrdé částice SiC. Ty mohou svou neschopností plastické deformace negativně ovlivnit adhezi těchto dvou vrstev. Proto by stálo za zvážení nanést nejprve tenkou vrstvu Ti slitiny bez těchto částic, aby byl jejich negativní vliv na adhezní pevnost umenšen. Míra vlivu tvrdých částic nacházejících se na rozhraní vrstev se může stát předmětem dalšího výzkumu.



Obr. 27 částice SiC na rozhraní 2 nástřiků

ADHEZNÍ PEVNOST

Adhezní a kohezní pevnost byla testována scratch testem. Délka vrypu byla 2,5 mm a rychlost 5 mm/min. Bylo testováno různou mírou zatížení v rozmezí 15-200 N. Při pozorování pomocí elektronové mikroskopie nebyly ve většině případů pozorovány žádné adhezní trhliny. Kohezní poškození bylo spíše ojedinělé, jak lze vidět na obr. 28. Šířka vrypu i průměrná velikost kužele vznikajícího na rozhraní vzorek-substrát s rostoucím zatížením roste. Na rozhraní Ni – titanová slitina + SiC lze pozorovat „vyoraný“ objem materiálu, což se ukázalo být typickým jevem. Tento fakt může negativně ovlivnit pozorování rozhraní těchto vrstev. V tomto případě při zatížení 150 N lze pozorovat adhezní poškození rozhraní Ni – Ti-6Al-4V. Vznik a šíření trhlin by bylo možné dále pozorovat na záznamu z akustické emise.

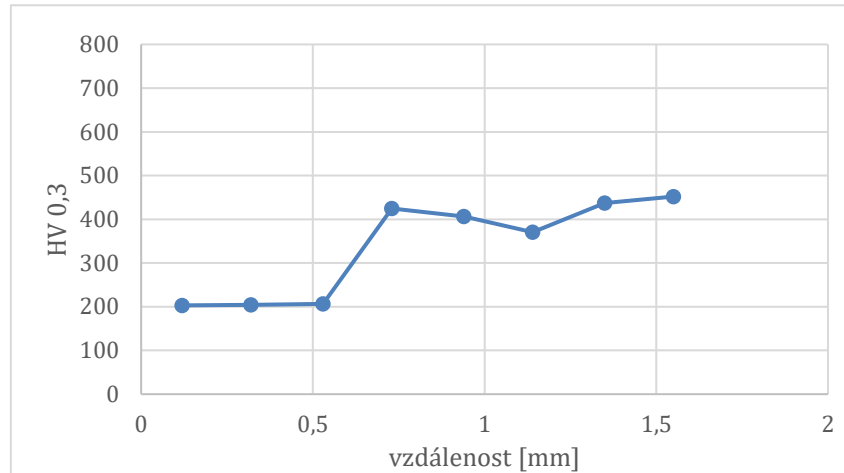


Obr. 28 vryp různým zatížením napříč vrstvami vč. detailu adhezní trhliny

Scratch test prokázal, že nástřiky vytvořené pomocí technologie CS vykazují mnohem vyšší adhezní i kohezní pevnost než jiné žárové nástřiky, kdy dochází k rozsáhlému adheznímu i koheznímu poškození již při násobně menších zátěžných silách. Z toho lze usoudit, že vytvořený nástřik disponuje velmi kvalitním rozhraním, a to jak rozhraní ocel-nikl, tak i nikl-titan. Změna šíře rýhy při konstantním zatížení je způsobena rozdílnou hodnotou tvrdosti materiálů (Ti+SiC kompozit má oproti Ni mnohem větší průměrnou tvrdost).

TVRDOST

Tvrdość byla měřena napříč oběma deponovanými vrstvami směrem od rozhraní ocel-Ni. Vrstva niklu dosáhla průměrné tvrdosti 203 ± 6 HV 0,3 a průměrná hodnota tvrdosti deponované titanové slitiny byla 419 ± 23 HV 0,3. Byla přitom měřena pouze titanová slitina bez vlivu částic SiC.



Obr. 29 hodnoty tvrdosti napříč vrstvami

Hodnoty tvrdosti nevykazovaly žádný trend ani u jedné vrstvy. V obou případech byla tvrdost napříč vrstvami relativně konstantní. Hodnota tvrdosti titanové slitiny byla porovnána s konvenčně vyrobenou slitinou, která dosáhla průměrné tvrdosti 337 ± 17 HV 0,3, což je hodnota nezanedbatelně nižší. CS vyrobená vrstva tudíž dosahuje vyšší tvrdosti kvůli deformačnímu zpevnění, ke kterému dochází při depozici částic. Nárůst tvrdosti oproti konvenčnímu materiálu byl předpokládatelný a shoduje se se zpracovanou teorií. Je zjevné, že tvrdé keramické částice celkovou průměrnou tvrdost vrstvy dále zvýšily, což je vzhledem ke zvolené aplikaci velmi žádané.

5. ZÁVĚRY

Byla vypracována rešerše na témata cold spray a balistická ochrana, která sloužila jako teoretický podklad pro hodnocení vhodnosti a stanovení podmínek testování vyhotoveného kompozitu pro jeho využití v balistické ochraně.

S pomocí technologie cold spray byl vytvořen kompozit. Byly vyhotoveny metalografické vzorky, na kterých bylo světelnou mikroskopií a obrazovou analýzou hodnocena porozita. Také byly za pomoci různých mechanických zkoušek stanoveny mechanické vlastnosti podstatné pro tuto aplikaci.

Obrazová analýza ukázala, že obě deponované vrstvy disponují nízkou hodnotou porozity, což je důsledek optimálně nastavených parametrů procesu depozice a chytře využitých částic keramiky, které při depozici pomáhaly přechovat vrstvu z titanové slitiny, která je obecně obtížná na depozici.

Měření tvrdosti se zjistilo, že vrstva niklu i vrstva titanové slitiny dosahuje relativně konstantních hodnot tvrdosti napříč celým svým průřezem a tyto hodnoty jsou relativně vysoké, což je pro danou aplikaci velmi vhodné. Deponovaná vrstva Ti slitiny dosahuje v důsledku deformačního zpevnění vyšší tvrdosti než konvenčně vyrobený ekvivalent.

Scratch test prokázal, že adhezní i kohezní pevnost nástřiku je uspokojivá a nebyla zpravidla pozorována významná delaminace vrstev. Teorie o negativním vlivu částic SiC nacházejících se na rozhraní na adhezní pevnost se ukázala jako pravdivá. V případech, kdy poškození vzniklo se trhlinka šířila podél rozhraní těchto částic (obr. 28). Rozhraní vytvořených vrstev lze nicméně z hlediska celého pozorovaného souboru vzorků považovat za kvalitní.

Ukázalo se, že technologie cold spray je vhodnou aditivní metodou pro tvorbu moderních pancířů. To zejména proto, že lze vytvářet vrstvené pancíře i jiné druhy kompozitu, které dosahují uspokojivých hodnot adhezních i kohezních pevností jednotlivých vrstev a při rázovém zatížení nedochází k pozorovatelné delaminaci. Celková integrita kompozitu zůstává neporušena. Konkrétní volba materiálu pro vytvořený kompozit Ti-6Al-4V s 25 hm% SiC je vhodná pro balistické aplikace, neboť ve formě as-sprayed vykazuje vysoké hodnoty tvrdosti, což má příznivý vliv na balistickou odolnost.

Tato titanová slitina je navíc vhodná pro tepelné zpracování, proto je vhodný další výzkum za účelem posouzení vlivu tohoto zpracování na dodatečné zvýšení mechanických vlastností vrstvy, a tedy i zvýšení balistické odolnosti vytvořeného kompozitu.

6. LITERATURA

- [1] LUPOI, R. a William O'NEILL. Powder stream characteristics in cold spray nozzles. *Surface & Coatings Technology - SURF COAT TECH.* 2011/12/01, **206**, 1069-1076. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2011.07.061
- [2] LI, Wenya, Kang YANG, Shuo YIN, Xiawei YANG, Yaxin XU a Rocco LUPOI. Solid-state additive manufacturing and repairing by cold spraying: A review: A review. *Journal of Materials Science and Technology -Shenyang-*. 2017/09/01, **34**. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmst.2017.09.015
- [3] WRIGHT, T.W. Shear band susceptibility: Work hardening materials: Work hardening materials. *International Journal of Plasticity.* 1992, **8**(5), 583-602. ISSN 0749-6419. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/0749-6419(92)90032-8
- [4] GRUJICIC, Mladjan, C.L ZHAO, W.s DEROSSET a Dennis HELFRITCH. Adiabatic shear instability based mechanism for particle/substrate bonding in the cold-gas dynamic-spray process. *Mater Des. Materials & Design.* 2004/07/07, **25**, 681-688. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2004.03.008
- [5] FUKUMOTO, Masahiro, Hideho WADA, K. TANABE, Motohiro YAMADA, E. YAMAGUCHI, A. NIWA, M. SUGIMOTO a M. IZAWA. Effect of Substrate Temperature on Deposition Behavior of Copper Particles on Substrate Surfaces in the Cold Spray Process. *Journal of Thermal Spray Technology.* 2007/12/01, **16**, 643-650. Dostupné z: doi:10.1007/s11666-007-9121-9
- [6] YIN, Shuo, Xinkun SUO, Xie YINGCHUN, Wenya LI, Rocco LUPOI a Hanlin LIAO. Effect of substrate temperature on interfacial bonding for cold spray of Ni onto Cu. *Journal of Materials Science.* 2015/11/01, **50**. Dostupné z: doi:10.1007/s10853-015-9304-6
- [7] YIN, Shuo, Jan CIZEK, Jan CUPERA, et al. Formation conditions of vortex-like intermixing interfaces in cold spray. *Materials & Design.* 2021, **200**, 109444. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109444
- [8] CHAMPAGNE JR, Victor, Dennis HELFRITCH, Phillip LEYMAN, Scott GREINDAHL a Brad KLOTZ. Interface Material Mixing Formed by the Deposition of Copper on Aluminum by Means of the Cold Spray Process. *Journal of Thermal Spray Technology.* 2005/01/09, **14**, 330-334. Dostupné z: doi:10.1361/105996305X59332
- [9] SCHMIDT, Tobias, Hamid ASSADI, Frank GÄRTNER, Horst RICHTER, Thorsten STOLTENHOFF, Heinrich KREYE a Thomas KLASSEN. From Particle Acceleration to Impact and Bonding in Cold Spraying. *Journal of Thermal Spray Technology.* 2009, **18**(5), 794-808. ISSN 1544-1016. Dostupné z: doi:10.1007/s11666-009-9357-7
- [10] STIER, Oliver. Fundamental Cost Analysis of Cold Spray. *Journal of Thermal Spray Technology.* 2013/08/01, **23**, 137. Dostupné z: doi:10.1007/s11666-013-9972-1

- [11] KHUN, N.W., A.W.Y. TAN, K.J.W. BI a E. LIU. Effects of working gas on wear and corrosion resistances of cold sprayed Ti-6Al-4V coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2016, **302**, 1-12. ISSN 0257-8972. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.05.052>
- [12] SUN, Wen, Adrian Wei Yee TAN, Ayan BHOWMIK, Iulian MARINESCU, Xu SONG, Wei ZHAI, Feng LI a Erjia LIU. Deposition characteristics of cold sprayed Inconel 718 particles on Inconel 718 substrates with different surface conditions. *Materials Science and Engineering: A*. 2018, **720**, 75-84. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.02.059>
- [13] HUSSAIN, T., D. G. MCCARTNEY, P. H. SHIPWAY a D. ZHANG. Bonding Mechanisms in Cold Spraying: The Contributions of Metallurgical and Mechanical Components: The Contributions of Metallurgical and Mechanical Components. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2009, **18**(3), 364-379. ISSN 1544-1016. Dostupné z: doi:10.1007/s11666-009-9298-1
- [14] GRIGORIEV, S., A. OKUNKOVA, A. SOVA, P. BERTRAND a I. SMUROV. Cold spraying: From process fundamentals towards advanced applications: From process fundamentals towards advanced applications. *Surface and Coatings Technology*. 2015, **268**, 77-84. ISSN 0257-8972. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.09.060>
- [15] LI, Yong, Chang-Jiu LI, Guan-Jun YANG a Lu-Kuo XING. Thermal fatigue behavior of thermal barrier coatings with the MCrAlY bond coats by cold spraying and low-pressure plasma spraying. *Surface and Coatings Technology*. 2010, **205**(7), 2225-2233. ISSN 0257-8972. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.08.144>
- [16] SUDHARSHAN PHANI, P., D. SRINIVASA RAO, S.V. JOSHI a G. SUNDARARAJAN. Effect of Process Parameters and Heat Treatments on Properties of Cold Sprayed Copper Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2007, **16**(3), 425-434. ISSN 1544-1016. Dostupné z: doi:10.1007/s11666-007-9048-1
- [17] IMPACT INNOVATIONS GMBH. Cold Spray Applications. IMPACT INNOVATIONS GMBH. *Impact* [online]. 2024 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://impact-innovations.com/en/applications/>
- [18] MATTHEWS, N., R. JONES a G. C. SIH. Application of supersonic particle deposition to enhance the structural integrity of aircraft structures. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*. 2014, **57**(1), 12-18. ISSN 1869-1927. Dostupné z: doi:10.1007/s11433-013-5367-z
- [19] *Modern cold spray*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2015, 429 s. ISBN 9783319167718. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-16772-5
- [20] KO, K. H., J. O. CHOI a H. LEE. Characteristics of cold sprayed dendritic Cu coatings. *Surface Engineering*. Taylor & Francis, 2016/09/01, **32**(9), 650-654. ISSN 0267-0844. Dostupné z: doi:10.1179/1743294415Y.0000000044

- [21] MACDONALD, D., R. FERNÁNDEZ, F. DELLORO a B. JODOIN. Cold Spraying of Armstrong Process Titanium Powder for Additive Manufacturing. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2017, **26**(4), 598-609. ISSN 1544-1016. Dostupné z: doi:10.1007/s11666-016-0489-2
- [22] ARACI, Kerem, Damien MANGABHAI a Kamal AKHTAR. *9 - Production of titanium by the Armstrong Process®*. In: . Boston: Butterworth-Heinemann, 2015, s. 149-162. ISBN 978-0-12-800054-0. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800054-0.00009-5
- [23] BUCHAR, Jaroslav a Josef VOLDŘICH. *Terminální balistika*. Praha: Academia, 2003. ISBN 80-200-1222-2.
- [24] CHEN, Li, Mingjin CAO a Qin FANG. Ballistic performance of ultra-high molecular weight polyethylene laminate with different thickness. *International Journal of Impact Engineering*. 2021, **156**, 103931. ISSN 0734-743X. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.103931
- [25] LI, Wenya, Kang YANG, Shuo YIN, Xiawei YANG, Yaxin XU a Rocco LUPOI. Solid-state additive manufacturing and repairing by cold spraying: A review: A review. *Journal of Materials Science & Technology*. 2018, **34**(3), 440-457. ISSN 1005-0302. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.jmst.2017.09.015
- [26] BHAV SINGH, B., G. SUKUMAR, Amit BHATTACHARJEE, K. SIVA KUMAR, T. BALAKRISHNA BHAT a A.K. GOGIA. Effect of heat treatment on ballistic impact behavior of Ti-6Al-4V against 7.62mm deformable projectile. *Materials & Design (1980-2015)*. 2012, **36**, 640-649. ISSN 0261-3069. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.11.030
- [27] MILITARY AGENCY FOR STANDARDIZATION. *PROCEDURES FOR EVALUATING THE PROTECTION LEVELS OF LOGISTIC AND LIGHT ARMoured VEHICLES FOR KE AND ARTILLERY THREATS*. Brusel, 2004.
- [28] MILITARY AGENCY FOR STANDARDIZATION. *Military standards for ballistic protection & armour, solutions for military applications are tested according to relevant NATO standards*.
- [29] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Thermal spraying - Evaluation of adhesion/cohesion of thermal sprayed ceramic coatings by transverse scratch testing*.
- [30] VILIŠ, Jindřich, Z. POKORNÝ, Jan ZOUHAR a Miroslav JOPEK. Ballistic Resistance of Composite Materials Tested by Taylor Anvil Test. *Manufacturing Technology*. 2022/12/07, **22**. Dostupné z: doi:10.21062/mft.2022.074
- [31] ÚŘAD PRO OBRANNOU STANDARDIZACI, KATALOGIZACI A STÁTNÍ OVĚŘOVÁNÍ JAKOSTI. *MUNICE 7,62 MM (NÁBOJ 7,62 MM NATO)*. Praha, 2020.

7. SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

ZKRATKY

AČR – armáda České republiky

Al – chemická značka hliníku

atd. – a tak dále

atp. – a tak podobně

CS – cold spray

Cu – chemická značka mědi

DE – depoziční efektivita

DE – depoziční efektivita

mj. – mimo jiné

např. – například

Ni – chemická značka niklu

SD – vzdálenost mezi tryskou a povrchem substrátu

Ti – chemická značka titanu

Ti-6Al-4V – chemická sloučenina titanu, hliníku a vanadu

tj. – to je

V – chemická značka vanadu

vč. – včetně

SYMBOLY

μ – řecké písmeno mu

σ – řecké písmeno sigma, v této práci vyjadřuje směrodatnou odchylku statistického souboru

\bar{x} s pruhem – vyjadřuje aritmetický průměr statistického souboru

8. SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 schéma zařízení [1]
Obr. 2 porušování oxidické vrstvy a vytlačování oxidů mimo styk materiálů [2]
Obr. 3 napětí potřebné k deformaci materiálu v závislosti na okolních podmínkách [4]
Obr. 5 ukázka prolínání rozhraní (Cu - nahoře a Al-dole) [8]
Obr. 6 závislost depoziční efektivity na rychlosti částic [9]
Obr. 7 porovnání tvrdostí vrstev nanášených různými plyny [11]
Obr. 8. vliv úpravy povrchu substrátu na kvalitu rozhraní a) pískovaný, b) broušený, c) frézovaný & d) leštěný kombinace tvrdý/tvrdý [12]
Obr. 9 masivní příruba vytvořená pomocí CS [17]
Obr. 10 schéma kompozitních částic [14]
Obr. 11 srovnání nástřiku z mědi s a bez tepelného zpracování [16]
Obr. 12. ukázka opravy součástky pomocí CS [19]
Obr. 13 vložka do spalovací komory vyrobena výhradně pomocí CS [17]
Obr. 14. snímek dendritů mědi o velikosti pod 70 μm (SEM, zvětšeno 500x) [20]
Obr. 15 srovnání kulových částic (a) s částicemi vyrobenými Armstrong procesem (b) [21]
Obr. 16 vliv úhlu dopadu na vzdálenost, kterou musí projektil překonat za účelem průrazu [23]
Obr. 17 výsledek testování laminátových UHMWPE plátů různé tloušťky (projektil ráže 7,62 mm) [24]
Obr. 18 vliv podílu tvrdých částic v Ti prášku na výslednou porozitu nástřiku [25]
Obr. 19 tenký proužek vyříznutý z vytvořeného nástřiku
Obr. 20 schéma možných druhů poškození
Obr. 21 Schéma zařízení pro Taylorův test [28]
Obr. 22. projektil ráže 7,62 mm [28]
Obr. 23 splata zviditelněná leptáním, zvětšeno 200x
Obr. 24 Měření tloušťky nanesené vrstvy pomocí softwaru ImageJ
Obr. 25 měření porozity v software ImageJ pomocí funkce treshold
Obr. 26 porovnání vzorků po dopadu projektilu
Obr. 27 vryp napříč vrstvami, zátěžná síla 200 N
Obr. 28 hodnoty tvrdosti napříč vrstvami
Obr. 29 částice SiC na rozhraní 2 nástřiků