



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

**MOŽNOSTI VYUŽITÍ STUDENÉ KINETICKÉ
DEPOZICE (COLD SPRAY) VE VOJENSKÝCH
APLIKACÍCH**

POSSIBILITIES OF USING COLD GAS DYNAMIC SPRAY (COLD SPRAY) IN MILITARY APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Dvořáček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Řehořek, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav materiálových věd a inženýrství
Student:	Jan Dvořáček
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Lukáš Řehořek, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

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:

Možnosti využití studené kinetické depozice (Cold Spray) ve vojenských aplikacích

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Studená kinetická depozice je nová metoda nanášení vrstev kovů, založená na vysoké kinetické energii dopadajících částic. Liší se od ostatních metod termálních nástřiků zejména v tom, že celý proces probíhá v tuhém stavu bez natavování vstupního materiálu. Díky tomuto faktu je možné nanášet s vysokou efektivitou vrstvy o tloušťce až stovek mm. Tato metoda se uplatňuje pro povrchové úpravy či opravy součástí. Díky vysoké ceně je však smysluplné využívat tuto metodu pro součásti, které jsou buď ojedinělé, nebo jejich cena opravy je vysoká. Oba tyto požadavky splňují součásti strojů využívaných ve vojenském či leteckém průmyslu. Další výhodou metody je možnost kombinovat různé materiály a vytvářet tak vnitřně strukturované materiály, lamináty či kovo–keramické kompozity potenciálně vhodné pro balistickou ochranu.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Rešerše v oblasti oprav bojové techniky a možnosti využití metody studené kinetické depozice pro výrobu balistických ochranných materiálů.
- 2) Analýza nástřiku čistého hliníku na korundové desce. Ověřit kvalitu rozhraní a mechanické vlastnosti nástřiku.

Seznam doporučené literatury:

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

YADAV, R., M. NAEBE, X. WANGA and B. KANDASUBRAMANIAN. Body armour materials: from steel to contemporary biomimetic systems. RSC Advances. 2016, Sv. 116, stránky 115145–115174.

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

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

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je seznámení s problematikou metody cold spray využívanou pro opravy těžko nahraditelných a drahých komponent v leteckém a vojenském průmyslu za účelem ekonomické úspory, přesnosti a kvality opravy oproti jiným metodám termálních nástřiků. Dalším možným využitím této metody by mohla být výroba balistické ochrany, zvýšení její balistické účinnosti, životnosti a soudržnosti.

Druhá část práce se zabývá hodnocením rozhraní kovo-keramického dvouvrstvého systému balistické ochrany vyrobeného metodou cold spray. Hodnocení bylo provedeno formou světelné a elektronové mikroskopie.

Klíčová slova

Cold spray, mechanismus depozice, kritická rychlost, balistická ochrana, rozhraní

Abstract

This work aims to acquaint with thermal spray method called Cold spray. This method is used for repair of expensive and badly replaceable components, which are mainly used in aerospace and military branch of industry. These repairs cause economic savings, higher accuracy and quality than other thermal spray methods. There is a possibility to use Cold spray for ballistic armor production. It is possible that ballistic protection would have higher ballistic efficiency, durability and coherence.

The second part of the work handle with the evaluation of the interface of a metal-ceramic two-layer ballistic protection system made by the cold spray method. The evaluation was performed in the form of light and electron microscopy.

Key words

Cold spray, deposition mechanism, critical velocity, ballistic protection, interface

Bibliografická citace

DVOŘÁČEK, Jan. *Možnosti využití studené kinetické depozice (Cold Spray) ve vojenských aplikacích* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-04-26]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132906>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Ing. Lukáš Řehořek, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Možnosti využití studené kinetické depozice (Cold Spray) ve vojenských aplikacích** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou součástí této práce.

V Brně dne:

Podpis:

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu panu Ing. Lukášovi Řehořkovi, Ph.D. za cenné rady, vedení a trpělivost při zpracovávání této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval za obrovskou podporu své snoubence, rodině a ÚMVI za možnost využití prostor laboratoře pro zpracování experimentální části mé Bakalářské práce. Největší dík však patří Tomu, který mě podporuje celý život.

Obsah

1	Úvod	1
2	Cíle práce	2
3	Technologie Cold Spray	2
3.1	Mechanismus depozice	3
3.2	Mechanismus vrstvení materiálu	5
3.3	Kritická rychlost	5
3.3.1	Měření úspěšnosti depozice podle rozdílu hmotností	6
3.3.2	Detailní analýza rozhraní částice-substrát	7
3.3.3	Numerické metody	7
4	Aplikace	9
4.1	Letecký a kosmický průmysl	9
4.1.1	Zkorodované komponenty převodové skříně	9
4.1.2	Koroze akčního členu podvozku	10
4.1.3	Zkorodovaný drak motoru	12
4.1.4	Otěr hydraulického vedení	13
4.1.5	Překročení polohové tolerance paneláže	15
4.2	Balistická ochrana	17
4.2.1	Terminální balistika	17
4.2.2	Vícevrstvé systémy balistické ochrany	17
4.2.3	Problematika BP	20
4.2.4	Mechanismus poškození křehkých materiálů (konoidní lom)	22
4.2.5	Mechanismus poškození houževnatých materiálů (zátkové „plug“ poškození)	23
4.2.6	Mechanismus poškození balistické ochrany keramika-kov	24
5	Experimentální část	25
5.1	Materiál pro experiment	25
5.1.1	Korund (substrát)	25
5.1.2	Čistý hliník (povlak)	25
5.2	Postup	26
6	Výsledky a diskuze	30
6.1	Analýza metalografického vzorku	30
6.2	Analýza fázového rozhraní	33
6.3	Měření mechanických vlastností	35
7	Závěr	36
8	Literatura	37

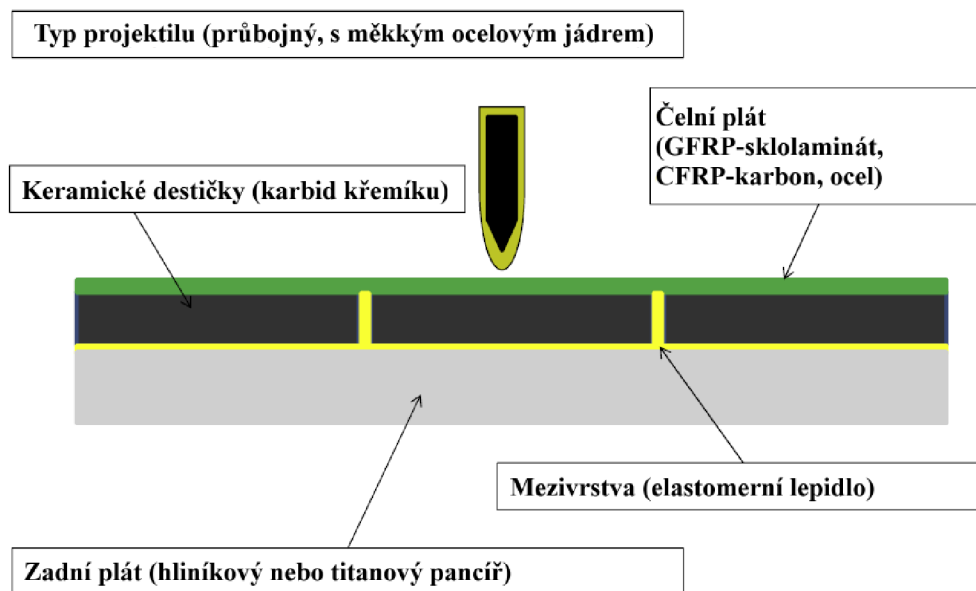
9	Seznam zkratk a symbolů	40
10	Seznam obrázků	42

1 Úvod

Studená kinetická depozice neboli Cold spray, je jedna z metod termálních nástřiků používaných pro aplikaci kovových povlaků. Tato metoda se používá z estetických důvodů za účelem zlepšení vzhledu součástí, pro aditivní výrobu prototypových dílů rychlostí nanášení materiálu až 45 kg/hod a pro zajištění správné funkčnosti dílů a součástí strojů, jako je nanášení antikorozních povlaků. Z velké části nalézá využití pro opravy poškozených nebo těžce nahraditelných dílů. [1;2]

Výhodou této metody je možnost aplikace více vrstev materiálu, jemnost struktury, depozice částic kovu v pevné fázi, takže nedochází k tepelnému ovlivnění povrchu materiálu, nebo také ekonomická vhodnost oproti koupi nové součásti, zvláště v leteckém nebo armádním odvětví. [1;2;3]

Dalším možným využitím by byla potenciálně výroba lehké kovo-keramické balistické ochrany. Ta se obvykle skládá z keramické čelní desky připevněné k tvárné podkladové desce adhezním lepidlem, jak je znázorněno na obr. 1. Možnou alternativou by tak mohla být technologie cold spray. Kov by byl spojen s keramickou deskou bez nutnosti aplikace pojivového materiálu, který má sklon k degradaci během několika let nebo vlivem vysoké teploty. Pro užití této metody je tak zapotřebí zjistit, jak kvalitní a pevné bude spojení na rozhraní kov-keramika a zda bude schopna nahradit užití pojiva. [4;5;6]



Obrázek 1 - Schéma keramického vícevrstvého systému balistické ochrany

2 Cíle práce

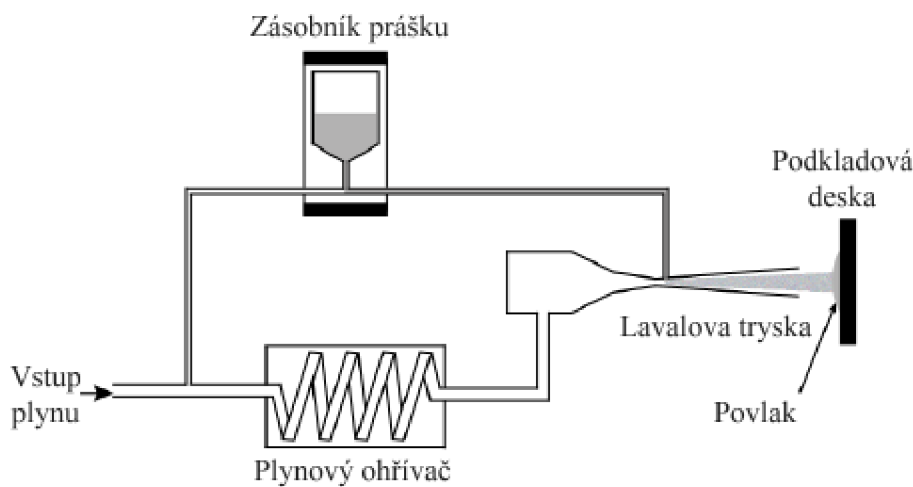
Cílem práce je zpracovat rešerši v oblasti oprav bojové techniky a možnosti využití metody studené kinetické depozice pro výrobu balistických ochranných materiálů.

Cílem experimentální části je provést analýzu nástřiku čistého hliníku na korundové desce, ověřit kvalitu rozhraní a stanovit základní mechanické vlastnosti nástřiku.

3 Technologie Cold Spray

Počátkem 80. let 20. století byl objeven jev Cold Spray na Ruské akademii věd, konkrétně na Ústavu teoretické a aplikované mechaniky, při studiu nadzvukového dvoufázového proudění (plynu a pevných částic) kolem zkušební tělesa. [7]

Cold spray (dále CS) je jedna z metod tzv. termálních nástřiků, jejichž hlavním principem je nanášení povlaků mikročástic na substrát (podkladovou desku) pomocí tepelné a kinetické energie. Metody termálních nástřiků se liší rychlostí a teplotou nanášených částic. Konkrétně proces CS probíhá v pevné fázi, kdy jsou částice kovu nanášeny a ulpívají na povrchu daného objektu prostřednictvím složitých deformačních a vazebných procesů. Materiál je aplikován vysokou rychlostí 300-1200 m/s pomocí urychleného plynu. Metoda CS se využívá pro aplikaci kovových povlaků a jejich vrstvení. [2;7;8]



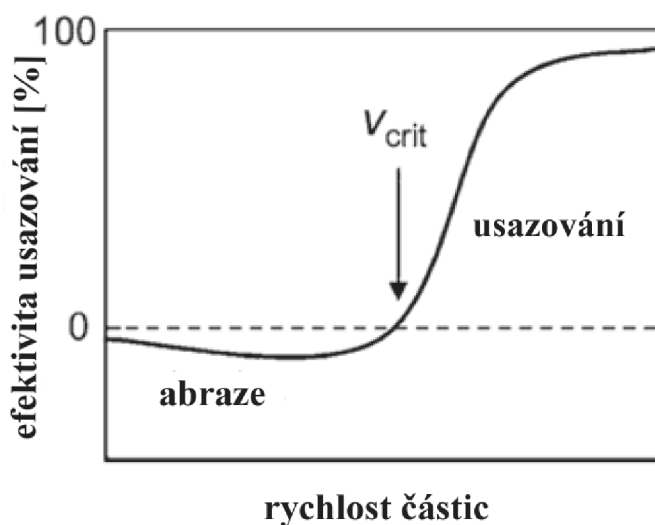
Obrázek 2 - Jednoduché schéma systému Cold spray

Na obr. 2 je znázorněno zjednodušené schéma procesu CS. Do systému vchází plyn a rozděluje se. Větší část objemu plynu je vedena do plynového ohřivače (95 %), kde se ohřeje na 500 až 1000 °C. Zbytek plynu (5 %) je veden do zásobníku s práškem. Rozdělený plyn se opět spojí v Lavalově (nadzvukové) trysce. Následně je prášek vstříkovan do trysky a urychlován zahřátým plynem. Prášek lze vstříkovat dvěma způsoby. Vstříkování upstream, kdy je prášek mísen s plynem před zúžením trysky za vysokých tlaků (vysokotlaký systém CS), nebo vstříkováním downstream, kdy jsou mikročástice míseny až za zúžením trysky (nízkotlaký systém CS). Prášek zůstává v pevném stavu, protože ohřátý plyn má nižší teplotu, než je jeho teplota tavení. Nosný plyn během procesu snižuje svoji teplotu a

dosahuje rychlosti až mach 3. Při dopadu na substrát se částice deformuje a ulpívá na jeho povrchu viz kapitola 3.1. [2;7]

Výsledek tohoto procesu je takový, že jsou potlačeny nebo zcela eliminovány škodlivé efekty, jako jsou např. vysokoteplotní oxidace, tavení, krystalizace nebo zbytková tepelná napětí, které jsou běžné u jiných metod „termálních nástřiků“. [7]

Rychlost dopadajících částic je jedním z nejdůležitějších faktorů pro vytvoření vazby. Tato vazba se vytvoří, pokud rychlost dopadajících částic $v_p > v_c$. Obecně je tato rychlost považována za klíčovou, protože má vliv na ulpívání částic na substrát, jak je vidět na obr. 3. [7]



Obrázek 3 - Vliv rychlosti deponovaných částic na úspěšnost depozice

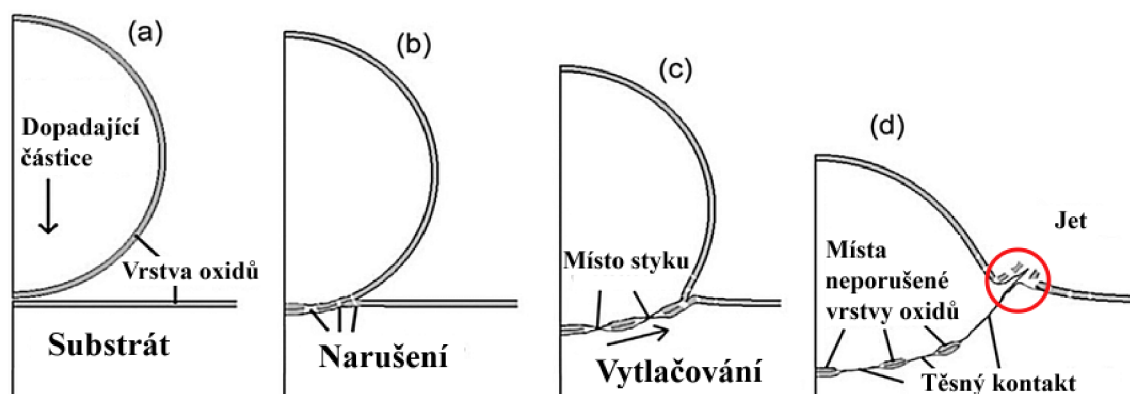
Existuje však široké spektrum dalších parametrů, které ovlivňují přímo či nepřímo rychlost nanášení nebo kvalitu samotného nástřiku. Dělí se do čtyř kategorií:

- Nosný plyn: druh plynu, jeho teplota a tlak v rovnovážném stavu
- Nástřikový materiál: materiálové složení prášku, velikost jednotlivých částic a jejich tvar, rychlost nanášení a jejich teplota při dopadu na základní materiál
- Základní materiál: povaha materiálu substrátu, příprava povrchu před samotným procesem (broušení, odmaštění, otryskání), povrchová teplota
- Nastavení CS systému: materiál a geometrie trysky, rychlost posuvu hlavice při nanášení povlaku, poloha a vzdálenost trysky vůči základnímu materiálu [3]

3.1 Mechanismus depozice

Hlavním a nejdůležitějším parametrem pro vytvoření vazby mezi substrátem a dopadající částicí je rychlost, která nejvíce ovlivňuje úspěšnost vzniku vazby. Limitní hodnota rychlosti určující úspěšnost depozice se nazývá kritická rychlost. [7;9]

K lepšímu porozumění tvorby vazby mezi substrátem a deponovanou částicí poslouží obr. 4. Dopadající kovová částice je pokryta vrstvou oxidů, která brání přiblížení interagujících prvků na meziatomovou vzdálenost a následnému vytvoření vazby (a). Pro toto vazebné spojení je třeba, aby byla vrstva oxidů narušena, nebo zcela eliminována. Toho je docíleno napnutím mezifázového rozhraní pomocí plastické deformace vlivem kritické rychlosti (b). Samotná interakce probíhá ve dvou fázích, v jejichž průběhu se deponovaná



Obrázek 4 - Průběh deformace částice-substrát a vznik vazby

částice zplošťuje a v substrátu vytváří kráter (c) a (d). V první fázi dochází ke zvýšení tlaku a elastické deformaci až do meze kluzu. Po jejím překročení dochází k výrazné plastické deformaci s přeměnou kinetické energie na tepelnou. Dojde k interakci čistých atomových ploch dopadající částice se substrátem a nastane jejich adhezivní propojení. [9;10;14]

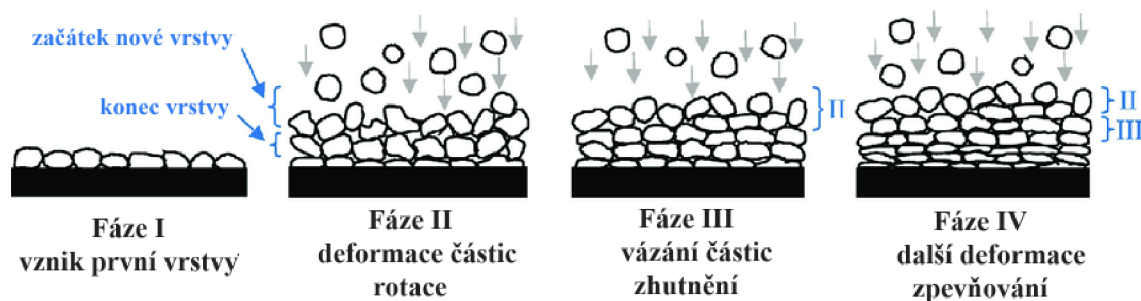
Pokud má dopadová rychlost dostatečnou velikost a dojde k překročení meze kluzu materiálu, je elastická deformace velice krátká. K největším plastickým deformacím dochází právě v místech okraje kráteru, kde se zároveň vytváří nejlepší adhezivní propojení částic. Zde při dostatečně vysoké hodnotě rychlosti dojde k výstřiku materiálu deponované částice i substrátu. Tento jev je znám pod názvem „jet“. Velikost plastické deformace klesá od okraje kráteru k jeho středu. S tím je spojen také pokles kvality propojení od okraje ke středu. Rozšíření této plochy lze docílit nárůstem dopadové rychlosti. K celkovému propojení dopadající částice a substrátu nedojde z důvodu velice malých plastických deformací kolem středu kráteru (nedojde k rozbití vrstvy oxidů). [9;10;14]

Adheze částic a substrátu závisí na více faktorech: povrchu kontaktní plochy, hloubce kráteru, mezi kluzu materiálu, plastické deformaci, teplotě a tlaku při deformaci atd. Samotný „jet“ se objevuje v širokém rozsahu dopadových rychlostí, což činní hodnocení úspěšnosti depozice (počet úspěšně vázaných částic z celkového počtu nanášených částic) podle výskytu „jetu“ nepoužitelným, protože při nižších dopadových rychlostech vždy nedochází k adhezi. K neúspěšné adhezi může rovněž dojít pokud je doba kontaktu příliš krátká a napětí jsou příliš velká (dopad šikmo na substrát). V tomto případě dochází k odražení částic. Při šikmém dopadu částice nárůstá teplota v místě vazby vlivem vzájemného tření, kde tangenciální složka hybnosti částice může způsobit její oddělení od substrátu. [3]

3.2 Mechanismus vrstvení materiálu

V současné době jsou uvažovány dvě povahy koheze částic, které závisí na druhu deformace částice. Tvárná deformace tvoří kovové vazby, zatímco plastická způsobuje těsný kontakt na rozhraní dopadajících částic. Mezičásticová koheze může být vytvořena metalurgickou vazbou, která zahrnuje velké plastické deformace a strukturální změny. [11]

Pojem metalurgická vazba je používán pro charakterizaci mechanismu vrstvení tvárných kovů, jak je vidět na obr. 5. Po úspěšné adhezi základní vrstvy jsou dále definovány další tři fáze vrstvení materiálu, které mají odlišné vlivy na konečnou strukturu. Růst deponovaného materiálu začíná dopadem částic na substrát, při němž dochází k jejich deformaci a současné rotaci. Toto chování způsobuje menší pórovitost a zhutnění základní vrstvy. Během druhé fáze se plastickou deformací dále snižuje pórovitost a vznikají mezičásticové vazby. Zhutňování deponovaného materiálu působí jeho vytvrzování (zpevňování). [11]



Obrázek 5 - Mechanismus vrstvení materiálu

Pro netvárné částice je uvažován jiný mechanismus vrstvení. Experimenty s keramickým deponovaným materiálem ukázaly na vrstvení řízené zhutňováním. Křehké částice se při dopadu na substrát tříští na malé fragmenty, které se vrství na sebe a dochází ke zhutňování. Materiál je dále soudržný a kompaktní díky nárazu a „zaseknutí se“ mezi sebou. Přidání těchto keramických částic do kovového prášku působí pýchování měkkých částic, které se zhutňují (snižuje se pórovitost) a zvyšuje se soudržnost deponovaného materiálu. [11]

3.3 Kritická rychlost

U technologie CS, která je charakteristická vrstvením materiálu při vytváření pevných vazeb mezi částicemi urychlenými supersonickými plyny, jako je helium a dusík, můžeme depozici považovat za úspěšnou pouze pro omezený rozsah rychlostí. Mimo jiné je toto rozmezí pro každý materiál a velikost částic odlišné. [7;9]

Proto je nutné tohoto rozsahu rychlostí dosáhnout. Hranici pro úspěšnou depozici nazýváme kritickou rychlostí v_c . Rychlost nižší než kritická má za následek odražení částic od substrátu. S narůstající rychlostí dochází k vytváření vazby, která se liší zvláště plochou vazby a její pevností (viz kap. 3.1). Při příliš vysoké rychlosti dopadu dochází také k odrazu částice jako v případě nízké rychlosti, ale v oblasti odrazu částice vzniká eroze materiálu substrátu (vytvoření kráteru). Hranice rychlosti při níž dochází ke zmíněné erozi nazýváme erozní rychlostí v_e . Rozsah rychlostí úspěšné depozice tedy můžeme ohraničit kritickou rychlostí a erozní rychlostí. [12]

Pro překročení v_c se používá kromě odlišných nosných plynů také plynový ohřivač a speciální geometrie trysky. Pro určení kritické rychlosti jsou charakterizovány tři základní metody. [3]

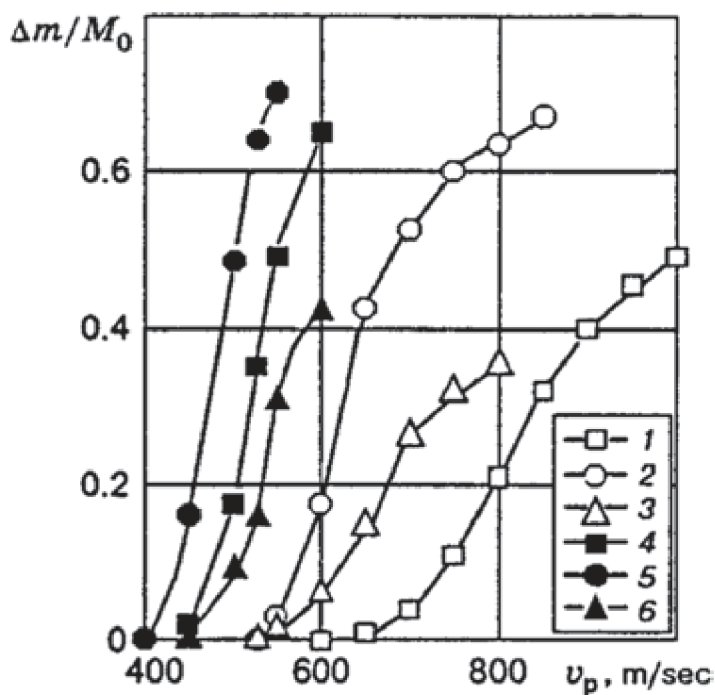
3.3.1 Měření úspěšnosti depozice podle rozdílu hmotností

V mnoha dalších metodách termálních nástřiků dochází stejně jako u CS k odrážení určitého počtu částic i při rychlostech vyšších než v_c . Z toho důvodu bude usazené množství částic vždy menší než 100%. Zavádíme termín úspěšnost depozice a definujeme ho vztahem:

$$DE = \frac{\Delta m}{M_o} [-], \quad (1)$$

kde: m je přírůstek váhy substrátu během depozice [kg],

M_o je hmotnost deponovaného materiálu [kg].



Obrázek 6 - Úspěšnost depozice s narůstající dopadovou rychlostí různých materiálů; 1- hliník, 2- měď, 3- nikl (urychlení směsí vzduchu a helia), 4- hliník, 5- měď, 6- nikl (urychlení vzduchem)

Tuto definici lze uvažovat pouze při nízkých dopadových teplotách částic. Při rychlostech nižších než 200 m/s se většina dopadajících částic odrazí a pouze malé množství ulpí na povrchu (DE je blízké nulové hodnotě). Většinou je ztráta hmotnosti nejvíce patrná erozí substrátu. Pokud vykazují deponované částice tažnost a systém je schopen tyto částice dále urychlovat, dochází ke strmému růstu hodnoty úspěšnosti depozice až ke 100 % během několika stovek m/s viz obr. 6. Úspěšnost depozice je však také závislá na materiálu substrátu a deponovaných částic. Křivka DE- v_p je v praxi shora omezena, protože jen zlomek částic přesahuje v_c (nejmenší). Hodnota v_c lze stanovit korelací úspěšnosti depozice s velikostí částic v kombinaci s lokálním měřením nebo kalkulací rychlostí částic. [3]

3.3.2 Detailní analýza rozhraní částice-substrát

Při depozici nastávají dva případy vzniklých vazeb. Jednak vazba mezi částicí a substrátem, která určuje adhezi deponovaného materiálu k substrátu, a také vazba mezi částicemi navzájem, která určuje vzájemnou kohezi naneseného materiálu. [3]

Proces CS je specifický také v tom, že lze kombinovat materiály substrátu a deponovaných částic. To zpravidla znamená, že podle zvolené kombinace bude také hranice kritické rychlosti odlišná. Tato skutečnost byla zkoumána vědeckými týmy. Hodnota byla stanovena zkoumáním nejpomaleji se pohybujících adherovaných částic pomocí detailní mikroskopie („Splat“ studie). Lee a kol. (2007) stanovili rozdíl kritické rychlosti na 160 m/s, při zkoumání dopadu bronzových částic na bronzový substrát a poté těch samých částic na hliníkový substrát. Naopak Raletz a kol. (2005) měřil rozdíl pouhé 3 m/s pomocí metody zobrazování částic u dopadu mědi na měď oproti mědi na nerezovou ocel. [3]

Pomocí zmíněné Splat metody byly zjištěny další skutečnosti týkající se volby materiálu deponovaných částic a substrátu. Pokud jsou oba materiály identické, nebo velice podobné svými mechanickými vlastnostmi, dojde k podobné deformaci u obou částic. Při tvrdší deponované částici oproti substrátu dochází k jejímu vmáčknutí do substrátu s jeho malou nebo dokonce žádnou deformací. Poslední možností je tvrdost substrátu větší než u deponované částice, kde k největším deformacím dochází právě u této částice. Chování adhezni vrstvy materiálu závisí také na povrchu samotného substrátu. Lze ho otryskat keramickou drtí nebo pískem pro zvýšení hrubosti povrchu, protože je této povrchové úpravy využíváno u jiných metod termálních nástřiků. Avšak tyto částice vytváří podobný efekt jako samotné deponované částice. Navíc mohou v substrátu ulpět a přispět tak k iniciaci trhlin a špatné adhezni pevnosti. Proto je ve většině případů lepší použít leštěný povrch substrátu pro lepší přilnavost. [3]

3.3.3 Numerické metody

V tomto případě se jedná o metodu konečných prvků. Na základě semi-empirického experimentu, který stanovil kritickou rychlost pro měděné částice na 570 m/s se Assadi a kol. (2003) snažili o zavedení rovnice, která by byla použitelná pro širší pole materiálů a stanovení kritické rychlosti závislé na základních parametrech jako jsou teplota částice, mez kluzu, hustota, modul pružnosti a teplota tání materiálu. Použitím metody konečných prvků a údajů, které měli z předešlých měření, sestavili rovnici zahrnující tyto vlivy: [3;13]

$$v_{cr} = 667 - 14\rho + 0,08T_m + 0,1\sigma_u - 0,4T_i \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}, \quad (2)$$

kde:

ρ	je hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
T_m	je teplota tavení [$^{\circ}\text{C}$],
σ_u	je mez pevnosti materiálu v tahu [MPa],
T_i	je dopadová teplota částic [$^{\circ}\text{C}$].

Výsledky, kterých bylo dosaženo ze vzorce se výrazně nelišily od semi-empirické metody. Rovnice (1) však nepočítá s velikostí deponovaných částic. Je známo, že velikost samotné částice má také vliv na kritickou rychlost. Schmidt a kol. (2006) určili několik vztahů jejichž

vzájemnou interakcí došli k rovnici, která navíc oproti rovnici (1) obsahovala kalibrační koeficient F_1 a korelační koeficient F_2 zahrnující právě velikost deponované částice: [12]

$$v_{crit}^{th,mech} = \sqrt{\frac{F_1 \cdot 4 \cdot \sigma_{TS} \cdot \left(1 - \frac{T_i - T_R}{T_m - T_R}\right)}{\rho} + F_2 \cdot c_p \cdot (T_m - T_i)} \quad [m \cdot s^{-1}], \quad (3)$$

kde: $F_1; F_2$ jsou kalibrační koeficienty [-],

ρ je hustota [$kg \cdot m^{-3}$],

σ_{TS} je mez kluzu materiálu v tahu [MPa],

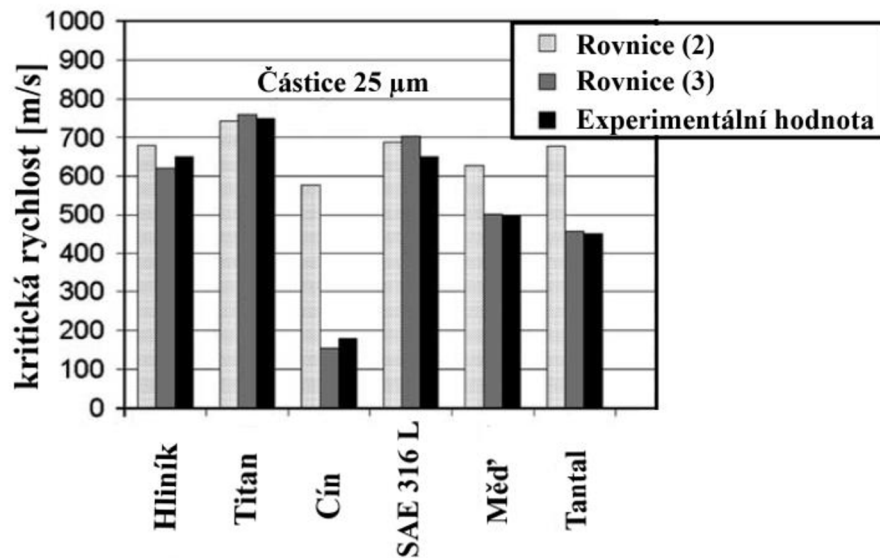
T_i je dopadová teplota částic [$^{\circ}C$],

T_m je teplota tavení [$^{\circ}C$],

T_R je lokální teplota (okolí) [$^{\circ}C$],

c_p je měrná tepelná konstanta za konstantního tlaku
[$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$].

Srovnání výsledků experimentálního zkoumání, rovnice podle Assadiho a Schmidta ukázala, že přesnost upravené rovnice (2) byla blíže experimentálním hodnotám (obr. 7). [12]



Obrázek 7 - Porovnání zjištěných hodnot kritické rychlosti pro různé materiály

4 Aplikace

4.1 Letecký a kosmický průmysl

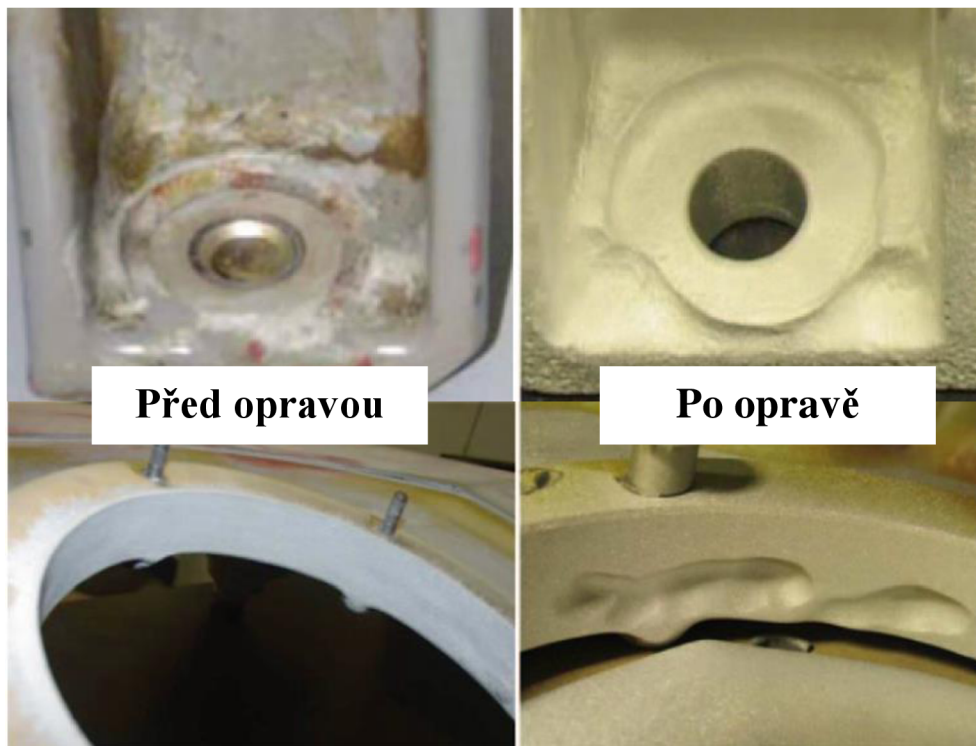
Aby mohla být technologie CS uznána za vhodnou pro využití v leteckém a kosmickém průmyslu, musela projít dlouhým a náročným procesem schvalování trvajícím více jak 20 let. Pokud by totiž nedošlo k dostatečnému testování této technologie, mohlo by dojít ke ztrátě lidských životů nebo zničení drahých součástí a zařízení. Proces schvalování obnáší množství investic a subjektů, které zajistí výzkum, výrobu, kontrolu kvality atd. [3]

Jak již bylo psáno v úvodu, technologie CS je unikátní díky své schopnosti provádět nástřiky, rozměrové opravy nebo vytváří součásti, jejichž tvar před obrobením je téměř identický s tvarem po obrobení, při teplotách nižších, než je bod tání prášků používaných pro nástřiky. Toto brání nebo minimalizuje teplotní ovlivňování materiálu. Dostáváme tak zařízení, které je schopno opravit i komplexní poškození. V některých případech je možné využití přenosného CS, aniž by muselo dojít k demontáži poškozené komponenty. Tím je značně zkrácena doba, po kterou je stroj vyřazen z provozu. Z toho vyplývá, že se jedná o metodu, která dokáže v mnoha směrech ulehčit servis techniky a kvalitativně se rovnat nebo i předčit metody běžně užívané za účelem oprav. V poslední řadě vidíme, že pokud bude touto metodou opravováno více komponent, dosáhneme tak finanční úspory v jednotkách sta milionů korun českých. Příkladem může být oprava paneláže v kap. 4.1.5. Koupě nového dílu stojí v přepočtu z amerických dolarů cca 1 784 000 Kč. Oprava dílu využitím technologie CS vyjde na 86 000 Kč. Úspora za jeden díl činí cca 1 700 000 Kč. [3;15]

4.1.1 Zkorodované komponenty převodové skříně

Převodové skříně helikoptér jsou obecně vyráběny z hořčkových slitin kvůli jejich dostupnosti, dobré obrobiteľnosti, tepelné vodivosti, tlumení vibrací a tuhosti. Tyto slitiny jsou velice náchylné ke korozi (elektrochemická aktivní struktura) zvláště v místech spojů. Hořčkové slitiny jsou navíc velice citlivé na povrchové poškození ve formě škrábanců nebo oděrek způsobených manipulací, obráběním nebo opravami. Takto narušený povrch je tak mnohem více náchylný ke korozi. Proto bylo vynaloženo značné úsilí, aby byla vyvinuta povrchová úprava, která by předcházela korozi, zvyšovala by povrchovou tvrdost, otěruvzdornost a prodlužovala celkovou životnost komponent. Pro zlepšení korozivzdornosti těchto slitin je běžně užíváno eloxování, nebo různé antikorozi nátěry. Bohužel tato ochrana není dostatečná, aby součásti dále nedegradovaly. Převodové skříně jsou velice důležitou součástí pro samotnou funkčnost stroje a výměna této komponenty je velice finančně náročná, a zvláště ve vojenských helikoptérech má dopad i na provozní a bojovou připravenost. [3]

Jako alternativa již zmíněných metod antikorozi opravy je použit nástřík čistého hliníku nebo slitiny Al 6061. Depozice hliníku metodou CS se stala uznávaným postupem pro zajištění rozměrové obnovy a antikorozi ochrany hořčkových komponentů. Tímto přidáním hliníku je docíleno lepší pasivace povrchu než u nelegovaného hořčíku. [3]



Obrázek 8 - Oprava komponent převodové části helikoptéry UH-60 metodou CS za použití Al 6061

Konečný prověřený postup užití CS depozice hliníku na hořčkový substrát zahrnuje povrchovou úpravu postižené části určené pro opravu (odstraňování nečistot a úlomků materiálu, broušení), zakrytí míst nežádoucích pro aplikaci hliníku, depozice CS, obrábění, rozměrová a vizuální kontrola a další požadované testování. Touto aplikací CS bylo úspěšně opraveno několik komponent středně těžkého víceúčelového vrtulníku UH-60 Black Hawk zařazeného do služby v roce 1979 převážně v armádě Spojených států amerických. Bylo takto opraveno zakrytování převodu hlavního rotoru a rozměrová obnova poškozené převodové skříně viz obr. 8. [3]

4.1.2 Koroze akčního členu podvozku

Jiným problematickým místem vzhledem k opotřebení a bezpečnosti provozu vojenské techniky může být podvozek. V leteckém a kosmickém průmyslu se standardně používají vysokopevnostní niklové slitiny, které jsou specifické vynikajícími mechanickými vlastnostmi spolu s vysokou tepelnou a chemickou odolností. I přes tyto vlastnosti jsou komponenty z tohoto materiálu během provozu opakovaně vystaveny vysokému tepelnému a mechanickému namáhání, což má za následek opotřebení v takové míře, že jsou součásti považovány za neschopné plnit jejich určení. [3]

Příkladem této situace je válcová část se závitem akčního členu řízení předového kola. Vzhledem k jeho umístění v přední části letadla dochází k vystavení vlhkosti a různým nečistotám, které se usazují v celém systému podvozku a dochází tak ke korozi. Válcovou součást lze jednoduše opravit použitím nástřiku niklových slitin technologií CS. Proces začíná odstraněním zkorodované části dílu předobrobením, provedením nástřiku a konečným obrobením opravené součásti do původních rozměrových charakteristik viz obr. 9. Nejen, že jde opět o ekonomickou úsporu, ale také o vyšší antikorozi ochranu. [3]



Obrázek 9 - Oprava akčního členu podvozku metodou CS za použití niklových slitin

Dalším problémem spojeným s podvozky je, že se v posledních letech začalo využívat technologie IVD (ion vapor deposited neboli iontové nanášení povlaků hliníku pomocí par) pro vysokopevnostní oceli, jako alternativy k pokovování kadmíem. Bohužel jsou tyto tenké povlaky ($1\div 20\ \mu\text{m}$) při poškození náchylné ke korozi. Jako alternativa byla využita technologie CS pro nástřik hliníku na poškozenou část. Bylo prokázáno, že takto aplikovaný hliník lépe splňuje požadavky v oblasti korozní ochrany a nezpůsobuje křehnutí vysokopevnostní oceli. Největší výhodou je však to, že tyto opravy lze provádět v terénu pomocí přenosného systému CS. Časové a finanční náklady na demontáž a opravu jsou tímto způsobem elegantně minimalizovány viz obr. 10. [3]



Obrázek 10 - Využití přenosného CS pro opravu předového podvozku

4.1.3 Zkorodovaný drak motoru

Koroze ve formě pittingu (vznik bodových hlubokých míst s korozí) draků leteckých motorů je způsobena držením vody na jejich povrchu po operačních letech. Tento problém je zjevný zvláště v přední, kde vchází proud vzduchu do motoru mezi „čtvrtou a osmou hodinou“ viz obr. 11. [3]



Obrázek 11 – Místo, kde došlo ke korozi

Existují způsoby opravy, díky kterým lze vyplnit tyto vykorodované důlky. Používanými metodami oprav jsou např. vysokorychlostní nástřik HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) nebo epoxydové tmelení, které často nepřináší opravované součásti žádné strukturální výhody. Tyto metody se tak nedají použít z důvodu nutnosti velké rozměrové opravy, která je mimo možnosti těchto technologií. Jako další možnost opravy byla zvolena metoda tavného svařování, která bohužel vedla k nepřijatelnému zkroucení materiálu vlivem tepelného namáhání během provozu motoru. Mimo to měla vysoká teplota vliv i na materiálové vlastnosti samotné skříně motoru. [3]

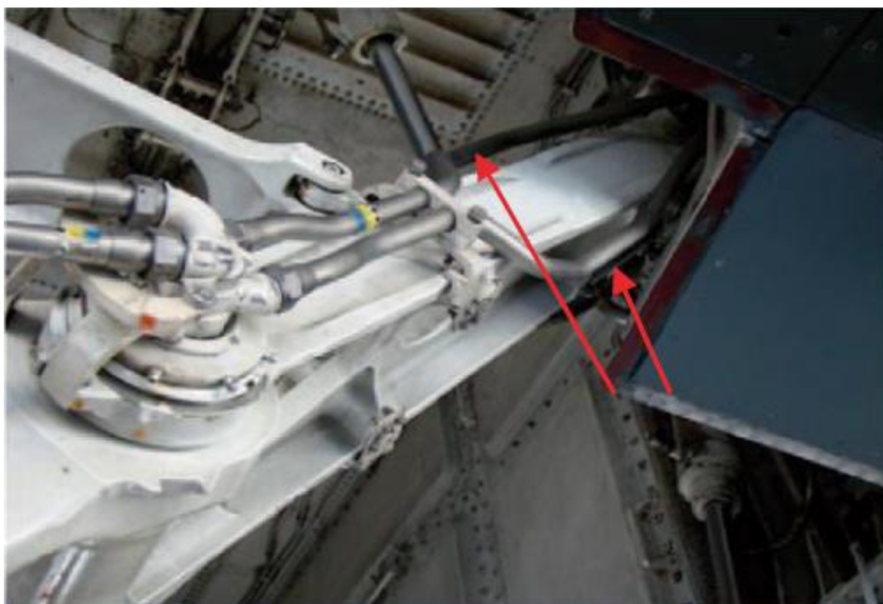
Opět byla využita technologie CS. Jako materiál určený k depozici byla zvolena hliníková slitina Al-6061 s velikostí zrna $5\div 50\ \mu\text{m}$. Byl úspěšně připraven povlak Al-6061 a byl hodnocen. Pomocí SEM mikroskopie byla provedena analýza povlaku o tloušťce $500\div 600\ \mu\text{m}$. Snímky ukázaly, že v povlaku je velmi nízká pórovitost, což je pro CS typické viz kap. 3.2. Dále také to, že lze nanášet povlaky s velkou hustotou a velice nízkou nebo žádnou oxidací. Podle tvaru rozhraní mezi povlakem a substrátem bylo možné prohlásit adhezi za úspěšnou. Bylo provedeno měření základních mechanických vlastností metodou HV1 po dobu 15 s. Zprůměrovaný výsledek z 5 měření dosahoval hodnoty 104,7 HV1, což je lehce vyšší hodnota než tvrdost samotného základního materiálu (103,8 HV1). Zvýšení tvrdosti můžeme připsat postupnému zhutňování struktury během dopadání dalších částic. Nízká pórovitost v nanášených vrstvách je důkazem koherence povlaku. Jako poslední analýza mechanických vlastností byla provedena zkouška pevnosti v tahu s tloušťkou

vzorku 200 μm . Vzorky selhaly při zatížení 34 ± 6 MPa. Srovnatelná pevnost byla naměřena u povlaků stříkaných plazmou. Zde se hodnota pevnosti pohybovala kolem 20 MPa, což ukazuje na značně větší pevnost povlaku provedeného metodou CS. [3]

Nástřik metodou CS můžeme podle získaných analytických hodnot pokládat za velmi účinnou metodu pro opravu draku leteckých motorů poškozených korozí. Nástřik Al-6061 byl co do obsahu z výchozího materiálu téměř totožný. Nástřik nevykazoval žádnou oxidaci, nízkou pórovitost a vynikal vysokou adhezí a zvýšenou tvrdostí. [3]

4.1.4 Otěr hydraulického vedení

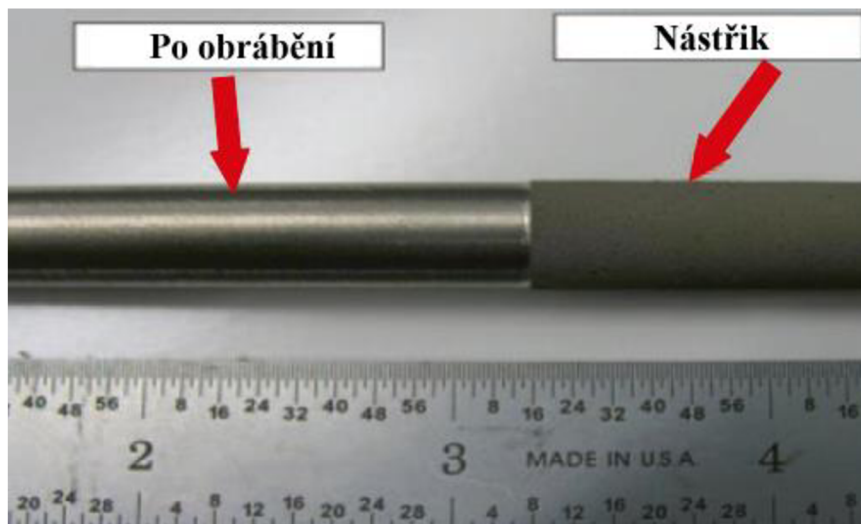
Dalším příkladem využití CS jako možnosti opravy poškozených komponent je americký nadzvukový těžký bombardér B-1. U tohoto letounu bylo problémovým dílem podvozkové potrubí vedoucí hydraulickou kapalinu, u něhož docházelo primárně k otěru titanových hydraulických trubek vlivem vibrací a abrazivního opotřebení během letu viz obr. 12. Tato komponenta byla u B-1 nejnáročnější na údržbu vzhledem k hodinám, které byly stráveny opravami. [3]



Obrázek 12 - Poškozená místa hydraulického vedení

Jako technologické řešení využitelné pro opravu těchto komponent předně ve vojenských ale i v komerčních aplikacích byla zvolena technologie CS. V roce 2009 byla dokončena studie proveditelnosti, která ukázala, že CS je efektivním způsobem opravy potrubí nástřikem titanového povlaku v oblastech s vyšší zátěží, jak z technického, tak z ekonomického hlediska. Toto „ošetření“ hydraulického vedení bylo zavedeno při běžných plánovaných údržbách. V další studii bylo prokázáno, že lze úspěšně aplikovat titanový povlak na hydraulické vedení ze stejného materiálu, jako vrstvu určenou k opotřebení viz obr. 13. [3]

Takto ošetřená součást byla podrobena zkouškám prokazujícím účinnost depozice 70 %, pevnost spoje >12 ksi, hustotu 99 % a tvrdost 93 HBR. Dále byla součást testována nárazem $>16\,000$ psi a zkoumána pod optickým a elektronovým mikroskopem. Opravené



Obrázek 13 - Opravené hydraulické vedení metodou Cold Spray za použití titanu

vedení bylo zařazeno do provozu po dobu 5 měsíců, aby byla vyhodnocena úspěšnost opravy. Každý týden byla prováděna kontrolní měření povlaku ke stanovení účinnosti proti otěru. Výsledky byly uspokojivé a povlak byl nanesen na vedení předového podvozku. B-1 létalo po dobu 4 let bez otěru mimo limitní hodnoty nebo jiného nežádoucího ovlivnění provozu. Na základě výstupních dat provozní zkoušky byly navrženy a implementovány přesné procesy a parametry nanášení povlaků. Probíhal také výzkum a vývoj různých povlakových materiálů pro maximalizaci jejich účinnosti. Pro identifikaci limitního opotřebení (nutnost opravy) je plánovaný vývoj vrstvy, která by indikovala hraniční poškození naneseného povlaku. [3]

4.1.5 Překročení polohové tolerance paneláže

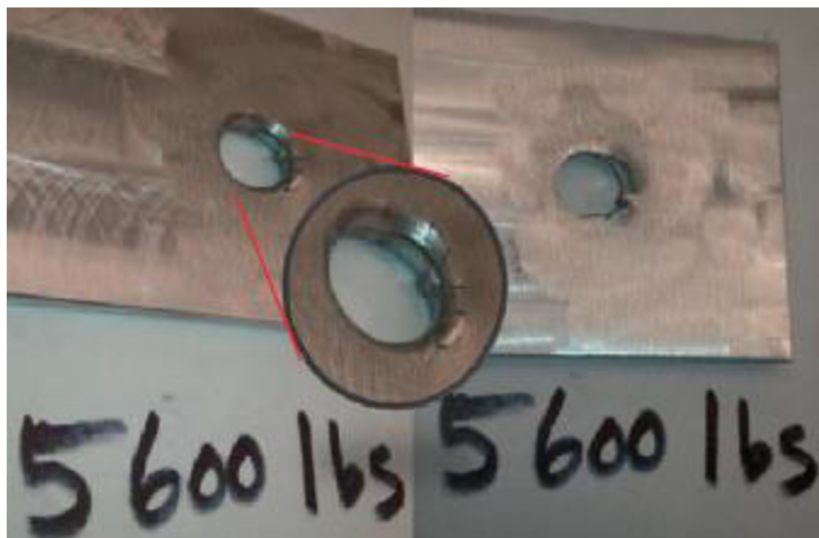
U bombardéru B-1 nebyl jediný problém poškozené hydraulické vedení, ale také odloupaný a otačený materiál paneláže (slitina hliníku Al-2024) v prostoru kolem upevňovacích prvků. Tyto spojovací prvky jsou navrženy tak, aby kopírovaly geometrii panelů a neovlivňovali aerodynamické vlastnosti letadla (laminární proudění). Během provozu docházelo k opotřebení zkosení v dírách panelu, na které doléhaly šrouby viz obr. 14. To způsobovalo prodlužování děr v panelech, které pak neplnily svoji funkci a nebyly schopné provozu, protože byla překročena tolerance jejich polohy. [3]



Obrázek 14 - Místo poškození paneláže

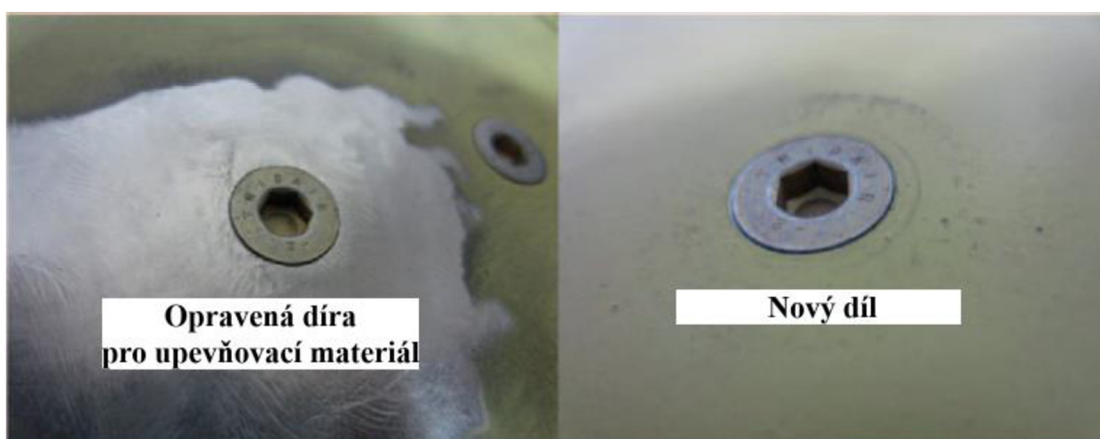
Jako materiál byl použit prášek Al 6061 nanášený kolmo na zkosený povrch poškozeného panelu. Následně byly provedeny zkoušky přenosu zatížení, únavové a tahové zkoušky spolu se smykovou zkouškou a metalografií určující úspěšnost opravy. [3]

Výsledky ukázaly, že technologie CS je velice dobře schopna opravit panel, aby plnil dále svůj účel a negativně neovlivňoval aerodynamické vlastnosti letadla. Samotné vzorky dosáhly nebo dokonce i překročily požadovaná zatížení panelu a spojovací součásti. I při zátěži 1,5x větší než mez kluzu, se nanesený materiál neoddělil od opraveného panelu viz obr. 15. [3]



Obrázek 15 - Výsledek tahové zkoušky ověřující kvalitu nástřiku

Náhrada panelů by stála až 225 000 USD (4,8 milionů CZK). Technologie CS byla tedy schválena jako nízkonákladová a s vysokou návratností investic opravy těchto panelů. Pokud bude tato technologie schválena pro opravy dalších komponent těchto bombardérů B-1, tak bude možné uspořít náklady na opravy kolem 9,6 milionů USD (208 milionů CZK) ročně. Technologii CS můžeme uplatnit také pro jiné součásti letadel a je příkladem procesu, kterým je možné ušetřit velké množství peněz a obnovit či zachovat funkčnost starších zbraňových systémů. Úspora peněz by pak mohla vystoupat až k 100 milionů USD ročně. [3]



Obrázek 16 - Porovnání opravené díry a nového dílu

4.2 Balistická ochrana

Balistická ochrana je prostředek, který slouží primárně k ochraně lidských životů. V minulosti byla používána balistická ochrana ve formě dřevěných štítů nebo brnění. Tyto prostředky měly odolávat šípům a později kulkám z prvních střelných zbraní. S rozvojem a zvyšující se účinností palných zbraní až do dnešní doby jsou kladeny stále větší požadavky na bezpečnost a ochranu členů ozbrojených složek nebo významných osob. Z toho důvodu dnes nepoužíváme pouze osobní ochranu (neprůstřelné vesty), ale také systémy balistické ochrany na vozidlech, helikoptérách nebo letadlech. Obecně můžeme dělit balistickou ochranu podle materiálů, které pro zastavení projektilu používáme a podle typů systémů. [16]

4.2.1 Terminální balistika

Balistika jako celek je dělena na tři podoblasti. Na interní, která se zabývá tím, co se děje s kulkou uvnitř zbraně. Dále na externí, která řeší dynamiku letu kulky. Poslední oblast analyzuje chování mezi kulkou a jejím cílem, tj. balistickou ochranou. Terminální balistika necílí pouze na interakci projektilu a ochrany, ale také na chování kulky při zásahu lidského těla. [6;17]

Konkrétními dílčími charakteristikami, které ovlivňují chování projektilu při zasažení balistické ochrany a terminální balistika se jimi zabývá, jsou např. dělení projektilů (pro dosažení maximální přesnosti na danou vzdálenost, maximální poškození cíle penetrací nebo řízenou deformací střely), penetrace (hloubka poškození balistické ochrany projektilem) nebo poškození způsobené projektilem (střely s řízenou deformací, s plochým nosem, fragmentové). Neomezuje se však pouze na projektily, ale také na výbušniny, u kterých mohou být cílem budovy, obrněná vozidla nebo helikoptéry. [6;17]

Předmětem zkoumání této bakalářské práce je nástřik čistého hliníku na korundové desce, a z toho důvodu se tato práce bude zabývat pouze procesy, ke kterým dochází při nárazu projektilu do balistické ochrany tohoto typu (CMC – Ceramic-metal composite materials).

4.2.2 Vícevrstvé systémy balistické ochrany

Vícevrstvé balistické systémy se začalo využívat za účelem mnohonásobného zvýšení účinnosti balistické ochrany proti zbraním různých ráží a druhů. Jako příklad pro odůvodnění používání vícevrstvého systému balistické ochrany může být zmíněna balistická ochrana automobilu. Účinnost balistické ochrany automobilu by se dala navýšit např. vrstvením pancéřové oceli. S tímto řešením přichází mnohá negativa, která jsou u opancéřování automobilu naprosto rozhodující. Dochází k vysoké hmotnosti zbroje, snížení pohyblivosti, přetěžování vozidla a dalším možným nežádoucím vlivům tohoto řešení. Z toho důvodu došlo ke kombinaci různých materiálů a jejich vlastností, aby bylo docíleno nízké hmotnosti a vysoké balistické účinnosti. [6]

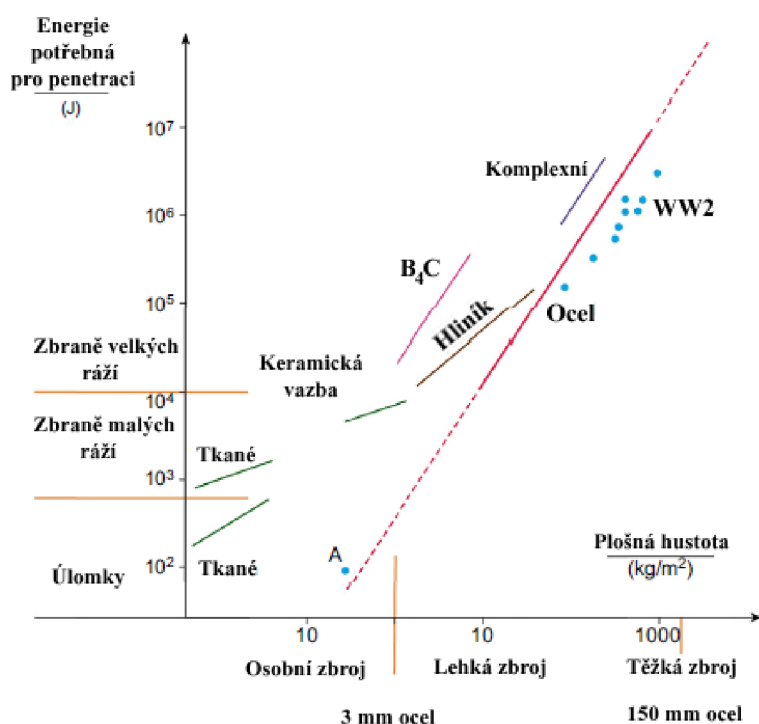
Balistické systémy můžeme rozdělit do čtyř skupin:

- pasivní – hlavní pancíř tanků, lodí, helikoptér, balistické vesty (kombinace různých materiálů)
- reaktivní – kombinace pancíře a výbušnin, cíl zaznamená blížící se střelu a pomocí exploze výbušniny zneškodní střelu
- aktivní – systém senzorů a různých druhů obraných zařízení pro zneškodnění střely
- elektro-magnetické – tyto systémy jsou stále ve vývoji a testují se, u tohoto typu stále převládají problémy s hmotností a způsobem napájení systému [6]

Pro výběr ideálního systému existuje způsob, kterým lze tyto systémy porovnat při jejich návrhu a stanovit ten, který bude schopen nejlépe plnit dané požadavky. Jedná se o hodnocení podle parametrů E_m a E_s . Kromě těchto parametrů je také hodnocena vhodnost systému podle ceny, dostupnosti, strategických důvodů apod. [6]

- E_m je poměr plošné hustoty válcovaného homogenního pancíře a plošné hustoty systému určeného pro danou aplikaci. [-]
- E_s je poměr tloušťky válcovaného homogenního pancíře a tloušťky systému určeného pro danou aplikaci. [-]

Pro příklad můžeme uvést lehké keramické balistické systémy používané na obrněných vozidlech, u nichž se hodnota E_m pohybuje kolem hodnoty 5 až 10, naopak hodnota E_s má hodnotu menší jak 1. Důvod nízké hodnoty parametru E_s spočívá ve větší tloušťce systému oproti monolitické desce z pancéřové oceli (tato hodnota je standardní u

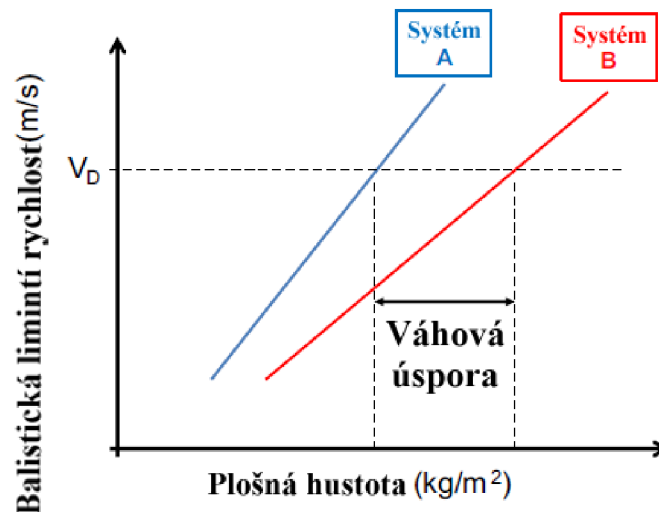


Obrázek 17 - Milne de Marre graf

mnoha dnešních balistických systémů). Jak je poznamenáno výše, největším kritériem pro vhodnost systému byla a je hmotnost, proto tloušťka balistické ochrany nehraje vždy zásadní roli. [6]

Globálně se stále využívá Milne de Marre grafu viz obr. 17. Tento graf je obecný a není příliš užitečný při návrhu konkrétního řešení balistického systému, ale můžeme sledovat konkrétní vlastnosti různých materiálů. Na ose y jsou vyneseny hodnoty energie potřebné pro penetraci. Osa x znázorňuje logaritmus plošné hustoty balistického materiálu. Z grafu můžeme vyčíst, že např. pro střelu o penetrační energii 10^4 J je výhodnější zvolit hliník před ocelí, protože má menší plošnou hustotu (systém keramika-hliník). [6]

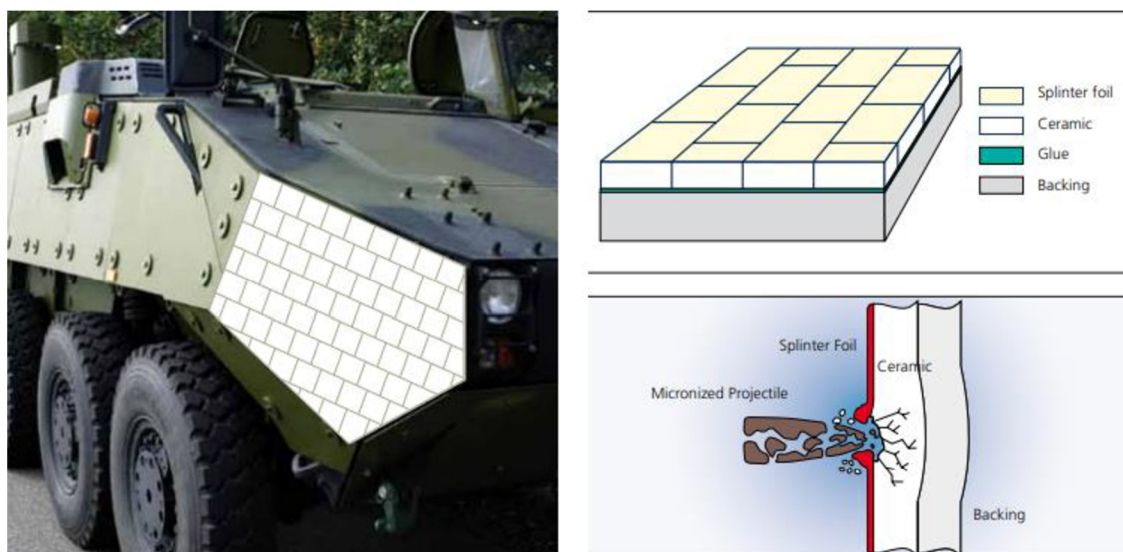
Dalším způsobem volby systému je srovnání plošné hustoty a limitní hodnoty dopadové rychlosti kulky (hodnota rychlosti kulky, při níž je ještě systém účinný). Závislosti v grafu viz obr. 18 nejsou v realitě lineární, jedná se pouze o ilustraci úspory hmotnosti balistické ochrany. [6]



Obrázek 18 - Srovnání balistických systémů

4.2.3 Problematika BP

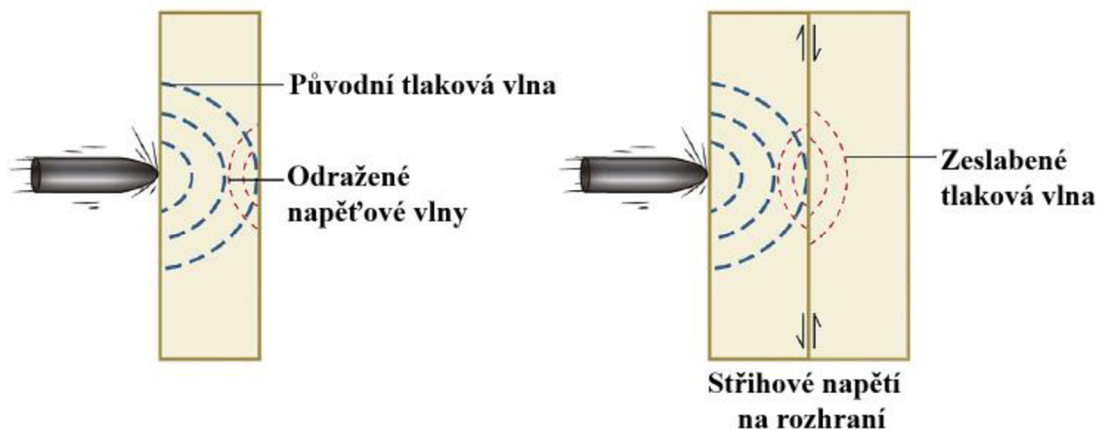
V případě bakalářské práce a její experimentální části budu uvažovat využití technologie CS jako jednu z možností pro zlepšení vlastností balistické ochrany pro bojová vozidla viz obr. 19.



Obrázek 19 - Příklad lehké keramické balistické ochrany pro bojová vozidla

Obvykle se využívá tří vrstvého systému (CMC) skládajícího se z čelního plátu, který je velice tvrdý, aby zabránil průniku speciální munice s vysokou mírou penetrace. Tato vrstva zajistí roztržení, nebo deformaci projektilu a rozložením kinetické energie na větší plochu, aby mohlo dojít k lepšímu pohlcení kinetické energie fragmentů. V případě složení balistické ochrany se jedná o korundovou desku (Al_2O_3), která je běžně používanou keramikou s obsahem 96-99 hm%, dobrou zpracovatelností, velkým výrobním objemem a velice dobrými mechanickými vlastnostmi. Zadní plát je tvořen houževnatým materiálem, který má za úkol zdeformovaný nebo roztržený projektil zastavit a zabránit tak jeho průniku skrz systém. Jedná se o čistý hliník (Al). Mezivrstvou, která zajistí soudržnost keramiky a hliníku je polyuretanové lepidlo. Nevýhodou těchto lepidel je degradace vlivem vysoké teploty nebo omezená životnost. Takto znehodnocená balistická ochrana musí být vyměněna. V poslední řadě je čelní plát pokryt folií, která brání vydrolení poškozené keramiky z brnění viz kap. 4.2.4 (drcení materiálu). [4;5]

Spojení materiálů může mít podstatný vliv na kvalitu balistické ochrany. Při dopadu kulky na keramický plát dochází ke vzniku tlakové vlny a jejímu šíření. Špatná adheze mezi vrstvami nebo trhlinka může zabránit šíření tlakové vlny a působí vysoké namáhání keramické desce, protože dochází k odrazení tlakové vlny od rozhraní viz obr. 20. [6]



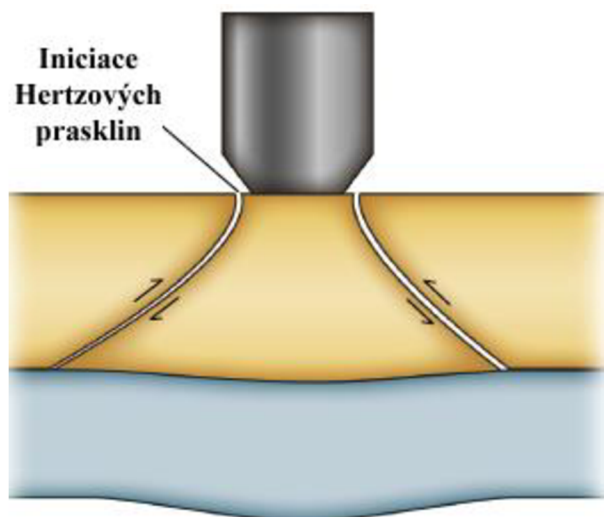
Obrázek 20 - Šíření tlakové vlny balistickou ochranou

Možnost, jak eliminovat vrstvu lepidla je např. zalití keramiky do hliníku gravitačním litím. Toto řešení s sebou může nést další problémy spojené s odléváním, jako je např. tvorba staženin a kavit. Pokud by tyto negativní efekty vznikly u rozhraní keramika hliník, mohly by bránit zmíněnému šíření tlakové vlny. [5]

Zde vidím potenciál samotné technologie CS. Při správné kritické rychlosti deponovaných částic a správně připraveném povrchu keramiky by došlo k ideální adhezi. Rozhraní by bylo kvalitní a bez vad (nebránilo by šíření tlakové vlny), hliník by byl homogenní, disponoval by klesající tvrdostí od rozhraní k povrchu (zhuťování deponovaného materiálu kap. 3.2) a měl by velice nízkou pórovitost. Dalo by se předpokládat zvýšení životnosti balistické ochrany, soudržnosti poškozené keramiky nebo průchozí rozhraní pro tlakovou vlnu.

4.2.4 Mechanismus poškození křehkých materiálů (konoidní lom)

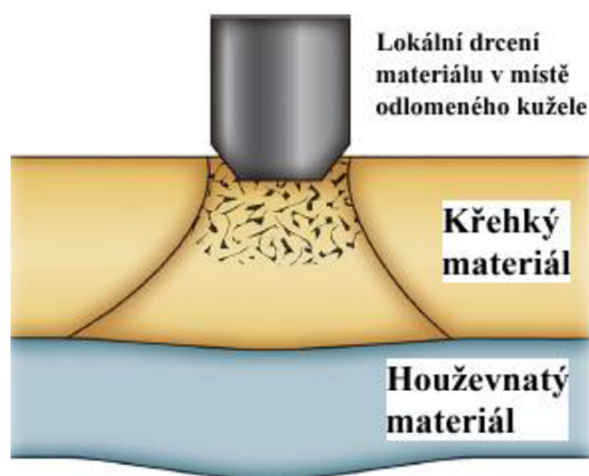
Ke konoidnímu lomu dochází u skla, ocelí s vysokou tvrdostí, polykarbonátů nebo keramiky. V roce 1881 popsal Hertz chování křehkého materiálu po zásahu kulkou. Při dopadu kulky se vytvořil v okolí kontaktu lom kruhového tvaru a vlivem tahového napětí a hybnosti projektilu došlo k rychlému šíření lomu skrz materiál. Došlo k odštípnutí materiálu ve tvaru kužele viz obr. 21. Toto je základní mechanismus poškození křehkého materiálu,



Obrázek 21 - Konoidní lom keramického materiálu při dopadu kulky

aby bylo dále možné mluvit o jeho balistické účinnosti. Vědci zjistili, že napěťové pole pod projektilem a vrcholový úhel kužele souvisí s hodnotou Poissonova čísla. Čím vyšší toto číslo bylo, tím větší byl vrcholový úhel a průměr základny kužele. Materiály s těmito vlastnostmi poskytovaly nejvyšší balistickou účinnost. Velikost kužele neovlivňuje pouze materiál ochrany, ale také nárazová rychlost projektilu, která při zvyšující se hodnotě zvětšuje také vrcholový úhel kužele. [6]

V místě konoidního lomu probíhá během dopadu projektilu také drcení materiálu, tj. zmenšování materiálu z velké částice na mnoho menších vlivem broušení, drcení, vibrací a jiných mechanismů. Během některých průběhů zůstává poměrná část rozdrčeného materiálu

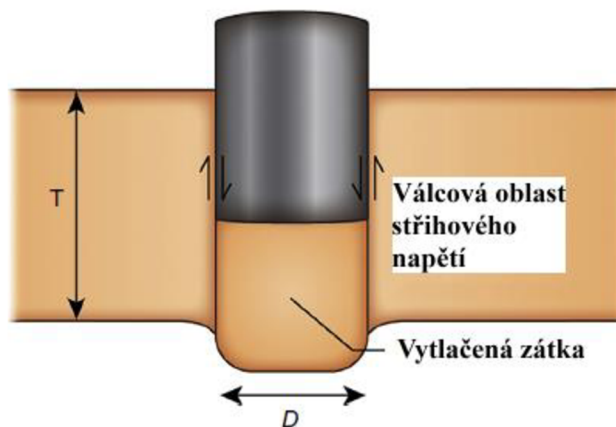


Obrázek 22 - Drcení materiálu

před projektilem a zbytek se pohybuje ven z brnění. Drcení materiálu je omezeno pouze na materiál odlomeného kužele viz obr. 22. [6]

4.2.5 Mechanismus poškození houževnatých materiálů (zátkové „plug“ poškození)

Zátkové poškození je charakteristické pro monolitické zbroje při dopadu tupých předmětů (projektilů, fragmentů roztržených projektilů) a je spojeno s absorpcí předmětů o nízké energii. Při dopadu projektilu dochází k urychlení materiálů před ním. Blízké okolí zůstává v relativním klidu. Dochází k lokálnímu stlačení materiálu a ke smykové deformaci za adiabatických podmínek viz obr. 23. Kulka prochází materiálem, který se plasticky

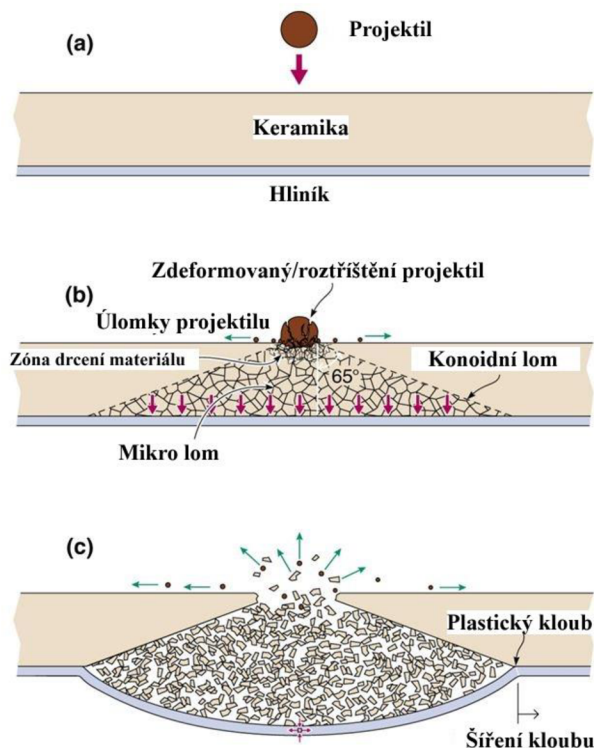


Obrázek 23 - Zátkové poškození houževnatého materiálu při dopadu kulky

deformuje. K zátkovému poškození dochází zvláště za podmínek, které podporují deformaci smykem. Nejznámější podmínkou je geometrický vztah mezi ráží střely a tloušťkou zbroje. Pokud je poměr blízký hodnotě 1, dochází k poškození tohoto typu. [6]

4.2.6 Mechanismus poškození balistické ochrany keramika-kov

Při nárazu kulky do čelního keramického plátu (Al_2O_3) dochází buď k její deformaci nebo fragmentaci podle napětí, které je v kulce vyvolané viz obr. 24. Dochází ke konoidnímu lomu, jak je zmíněno v kap. 4.2.4. Materiál je tlačěn směrem do zadního plátu (Al) a



Obrázek 24 - Poškození balistické ochrany keramika-hliník při dopadu kulky

způsobuje natahování desky. K dosažení balistické meze (rychlost projektilu potřebná k proniknutí balistickou ochranou) dojde v momentě, kdy není deska schopna udržet tahové napětí vyvolané keramickým kuželem, nebo dojde vlivem sil ke stříhu na obvodu základny kužele. Lomová charakteristika keramiky vede k velké zatěžující ploše, která působí větší rozložení sil, a tak celkově snižuje napětí působící na desku (obr.24 (c)). [18;19]

5 Experimentální část

Vzorek pro experimentální část byl vyráběn externě a bylo využito technologie CS s následujícím logistickým postupem a parametry:

- Příprava substrátu před nanášením materiálu – otryskání korundovými částicemi o velikosti zrna 80 μm , odmaštění.
- Nastavení systému – nosný plyn N_2 o tlaku 40 bar a teplotě 500 $^\circ\text{C}$, vzdálenost trysky od substrátu 30 mm s rychlostí posuvu 50 mm/s a rastrovým způsobem nástřiku.
- Použitý nanášený prášek – Al o velikosti částic 40-75 μm

Byl vytvořen čtvercový vzorek o rozměrech přibližně 50x50 mm. Tloušťka nanesené vrstvy hliníku byla cca 2,7 mm a tloušťka substrátu 10 mm.

5.1 Materiál pro experiment

5.1.1 Korund (substrát)

Al_2O_3 neboli oxid hlinitý je chemická sloučenina kyslíku a hliníku. Oxid hlinitý je znám také pod názvem korund, který má velice dobré mechanické a chemické vlastnosti. V Mohsově stupnici tvrdosti dosahuje hodnoty 9. Proto se v praxi využívá jako abrazivo nebo tepelná izolace díky své vysoké teplotě tání. Dalším využitím oxidu hlinitého je balistická ochrana. Výroba keramiky probíhá slinováním při vysoké teplotě (1300-1500 $^\circ\text{C}$). [4;5;20]

5.1.2 Čistý hliník (povlak)

Hliník (Al) je lehký kov stříbrné barvy s atomovým číslem 13. Hustota hliníku je přibližně třetina hustoty oceli a je nemagnetický. Hliník má vysokou afinitu ke kyslíku, takže při přítomnosti vzduchu vytváří na svém povrchu ochrannou vrstvu z oxidů. Mohsova tvrdost pro hliník je 2,75. [21]

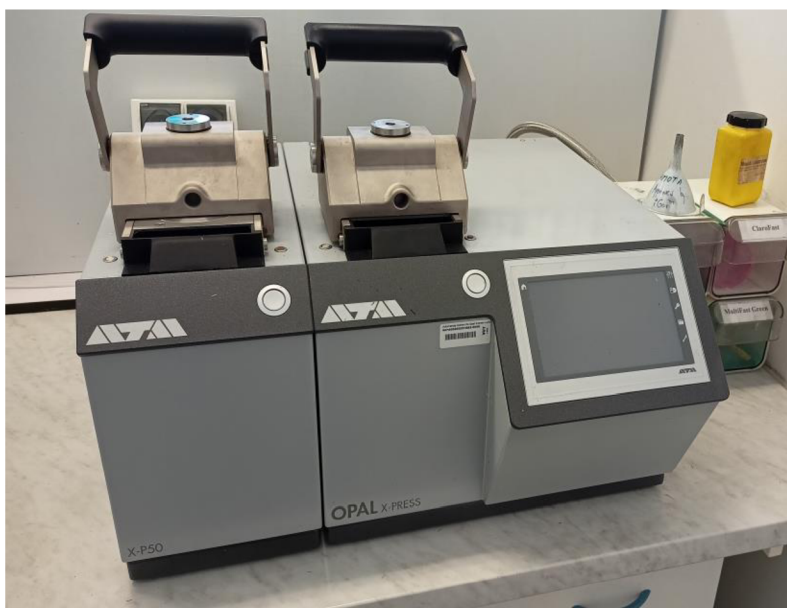
5.2 Postup

Připravený nástřík hliníku na korundovém substrátu byl vizuálně zkontrolován a bylo vybráno reprezentativní místo k vytvoření metalografického vzorku. Následně byl materiál upnut do přípravku a řezán na automatické/manuální metalografické pile Brillant 220 za použití diamantového kotouče A $\varnothing 150 \times 0,5/5 \times 12,5$ mm chlazeného vodou. Byly provedeny 2 příčné řezy s rychlostí posuvu 0,015 mm/s, aby nedošlo k zanesení kotouče nebo tepelnému ovlivnění materiálu. Celková doba trvání řezů byla cca 45 min viz obr. 25. Při řezání došlo k odlomení povlaku Al, a proto bylo provedeno řezání druhého vzorku, přičemž druhý řez byl větší než v prvním případě.

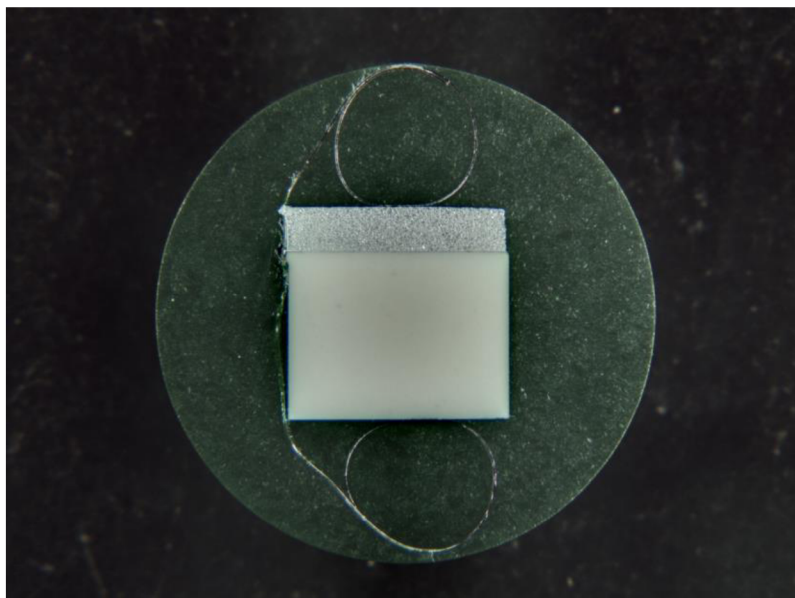


Obrázek 25- Řezání vzorku na metalografické pile Brillant 220

Následně byl odřezaný vzorek umístěn do automatického metalografického lisu Opal X-Press viz obr. 26, kde byl zasypan epoxidovou pryskyřicí a lisován po dobu 15 minut viz obr. 27.

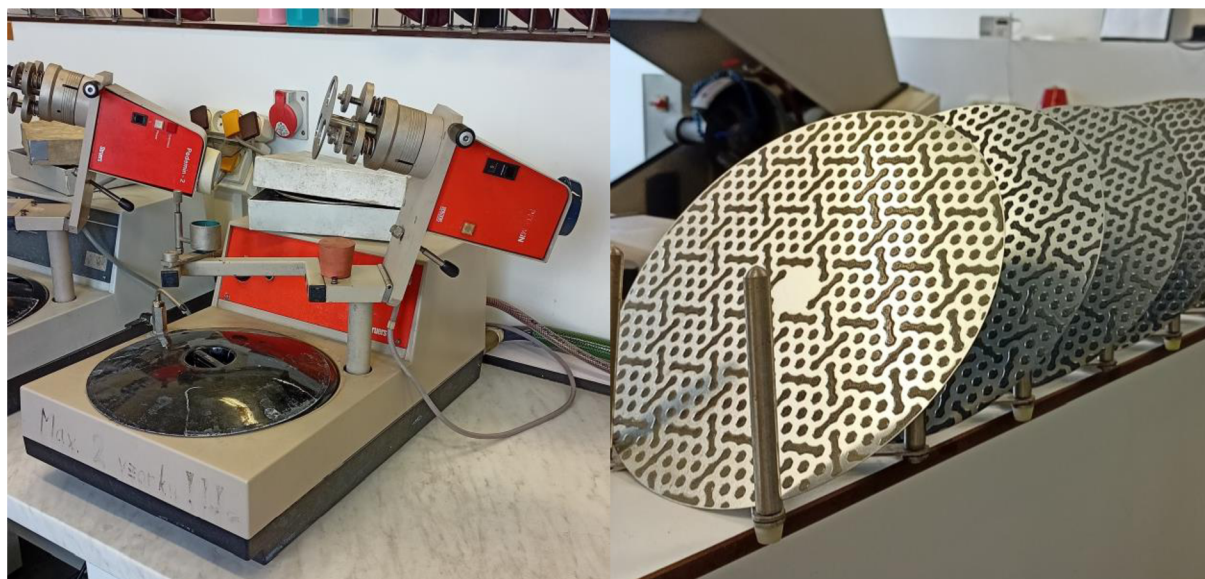


Obrázek 26- Metalografický lis Opal X-Press



Obrázek 27- Zalisovaný vzorek

Po zalisování bylo na vzorku provedeno broušení a leštění na přístroji Struers Pedemin viz obr. 28. Brousilo se 6-ti kotouči od značky Struers v rozmezí hrubostí 80-2000 po dobu 5 minut na každý kotouč. Styčná plocha mezi kotoučem a vzorkem byla chlazená vodou.



Obrázek 28- Zařízení na leštění a broušení vzorků s brusnými kotouči

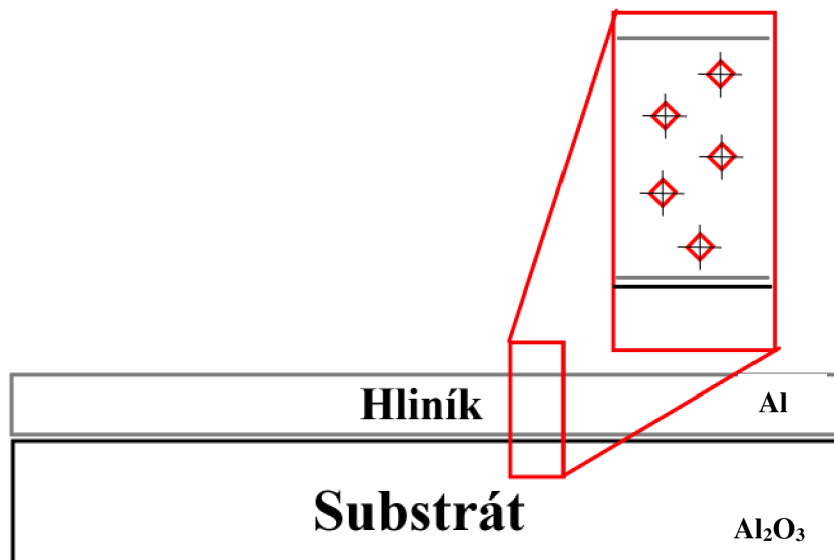
Mezi každou operací byl vzorek důkladně umyt pod tekoucí vodou. Po broušení byl vzorek leštěn pastou s diamantovými částicemi o velikosti 3 a 1 μm po stejnou dobu jako u broušení viz obr. 29. Styčná plocha byla smáčena ethanolem po 20-ti sekundových intervalech.



Obrázek 29- Leštění vzorku

Připravený metalografický vzorek byl podroben světelné mikroskopii a byly zaznamenány fotografie struktury hliníku a rozhraní hliník-keramika v nenaleptaném stavu. Leptání bylo provedeno Kellerovým činidlem (směs 5 ml HNO_3 (kyselina dusičná), 3 ml HCl (kyselina chlorovodíková), 2 ml HF (kyselina fluorovodíková) a 190 ml destilované vody). Celková doba leptání trvala cca 30 s, aby došlo k ideálnímu naleptání struktury. Tvar a deformace zrn byly hodnoceny pomocí SEM metalografie.

Na připraveném metalografickém vzorku byly stanoveny základní mechanické vlastnosti. Tvrdost byla měřena podle Vickerse metodou HV0,3, 14-ti vpichy vedenými zigzag kolmo na substrát od rozhraní hliník-keramika k povrchu deponovaného materiálu viz obr.30. Dále byla změřena tvrdost substrátu podle Vickerse metodou HV10, 3mi vpichy.



Obrázek 30- Měření tvrdosti podle Vickerse

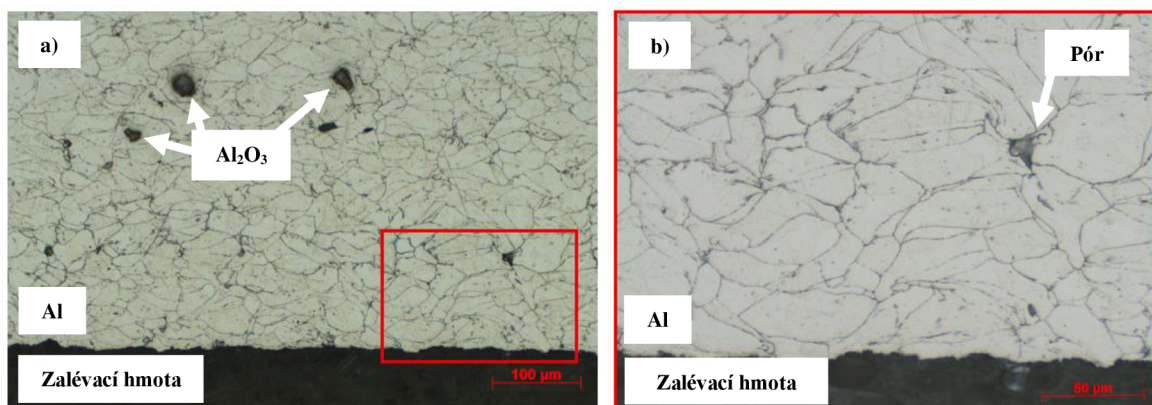
V poslední řadě byla provedena SEM/EDX analýza (Zeiss Sigma 300VP s analyzátozem, xFlash 6/10 Bruker) odloupnuté spodní plochy deponovaného hliníku, aby mohla být analyzována struktura a složení materiálu na rozhraní.

6 Výsledky a diskuze

Při řezání 1. vzorku došlo k oddělení deponovaného materiálu od substrátu. Protože byly rozměry vzorku cca 10x15 mm, bylo provedeno řezání druhého vzorku o rozměrech cca 10x30mm. Z výsledku řezání 1. vzorku již bylo jasné, že se nejedná o dostatečně kvalitní a pevné adhezni spojení deponovaného hliníku s korundovým substrátem. I při zvětšení rozměrů řezaného vzorku se bohužel nepodařilo zachovat soudržnost deponovaného materiálu a substrátu. Pro výrobu metalografického výbrusu byl použit 1. vzorek. Oddělený materiál byl přiložen zpět na substrát zajištěn sponou a vložen do metalografického lisu. Při vrácení materiálu nedošlo v některých místech k ideálnímu kontaktu ploch. Tato místa byla vyplněna zalévací hmotou a výbrus nedosahoval požadované kvality. Proto byl vytvořen metalografický vzorek pouze z odloupnuté části nástřiku v příčném řezu. Místo Al_2O_3 bylo nahrazeno zalévací hmotou. Kontaktní plocha odděleného povlaku z 2. vzorku a metalografický vzorek byly podrobeny SEM/EDX analýze.

6.1 Analýza metalografického vzorku

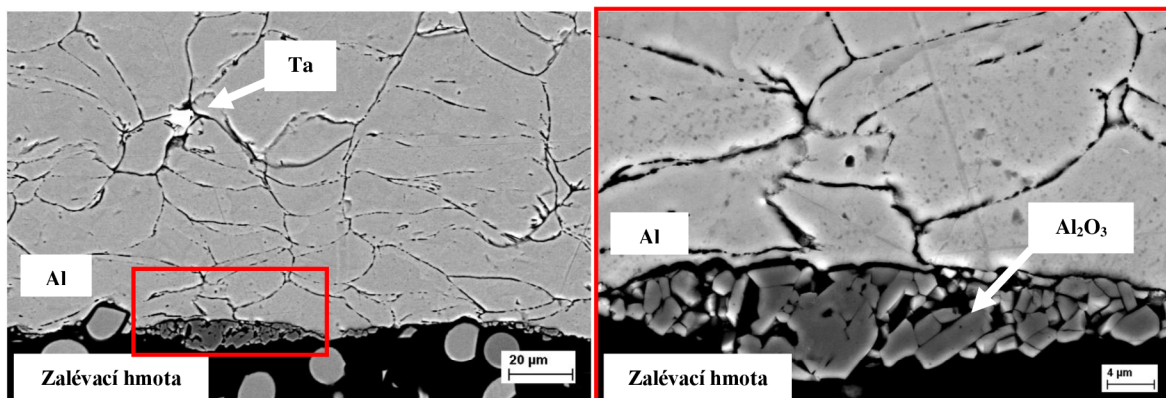
Světelná mikroskopie odhalila, že se nejedná o čistou hliníkovou strukturu. SEM a EDX analýzou bylo zjištěno, že se ve struktuře vyskytují korundové částice o velikosti cca 5-35 μm viz obr. 31 a). Z pořízených snímků lze vidět homogenní strukturu s velice nízkou pórovitostí.



Obrázek 31 - Světelná mikroskopie naleptaný vzorek - vlevo zvětšeno 200x, vpravo zvětšeno 500x

Snímky z elektronového mikroskopu byly pořízeny jak v SE (secondary electrons), tak v BSE (back-scattered electrons) modu. Snímky v BSE modu zřetelně ukazují chemické heterogenity v průřezu povlaku. Prvky a sloučeniny s vyšší relativní atomovou hmotností se v tomto zobrazení ukazují jako světlejší.

Pro účel SEM metalografické analýzy vzorku, byla na povrch vzorku naprášena vrstva zlata o tloušťce 2 nm naprašovačkou Leica EM Ace200. Protože došlo k odloupení deponovaného materiálu, je možné rozhraní hodnotit pouze na krátkých úsecích viz obr. 32.

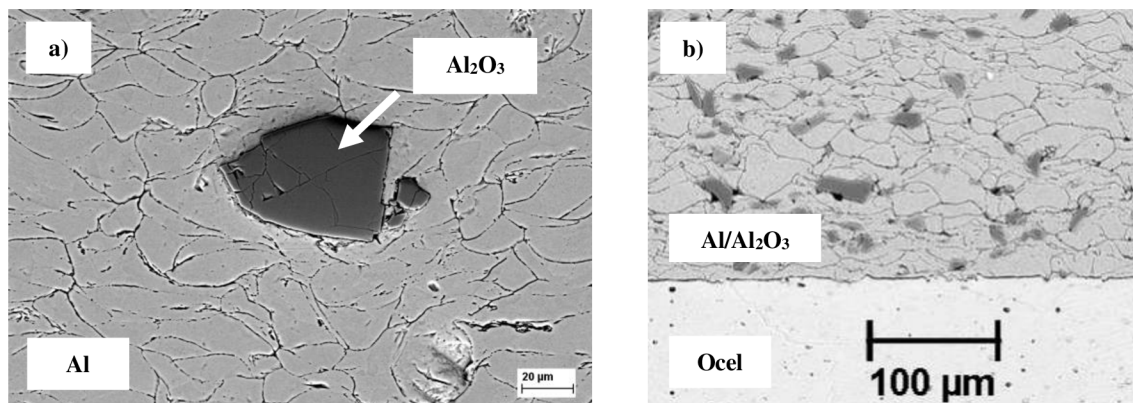


Obrázek 32 - Elektronová mikroskopie rozhraní BSE mod- vlevo zvětšeno 500x, vpravo zvětšeno 2300x

Výskyt míst s dostatečnou adhezí je nízký, a z toho důvodu došlo k odloupení materiálu. Mechanismus depozice spojení kov-keramika (mechanická interlokace) není stejný jako u spojení kov-kov (metalurgická vazba) viz. kap. 3.1. Před nanášením se korundová deska upravuje (ostřelování korundovými částicemi, odmaštění), aby byl zdrsňen její povrch a došlo tak k mechanickému spojení mezi deponovaným materiálem a keramikou. Pro optimalizaci a zvýšení úspěšnosti adheze by bylo zapotřebí zvýšit drsnost povrchu substrátu. Zvýšení drsnosti by mohlo být dosaženo mechanicky, chemicky, nebo vzájemnou kombinací. První možností by bylo zvolit tryskání substrátu hrubšími částicemi, než jsou korundové. To by však mohlo způsobit vznik mikro-trhlin u rozhraní. Další možností by mohlo být využití chemického leptadla nebo vytvoření vzoru na povrchu keramiky při její výrobě.

SEM analýzou povlaku bylo zjištěno, že se ve struktuře u rozhraní vyskytuje kontaminace cizími částicemi, které se v BSE modu zobrazují jako zářivě bílé. EDX analýza odhalila, že se jedná o tantal.

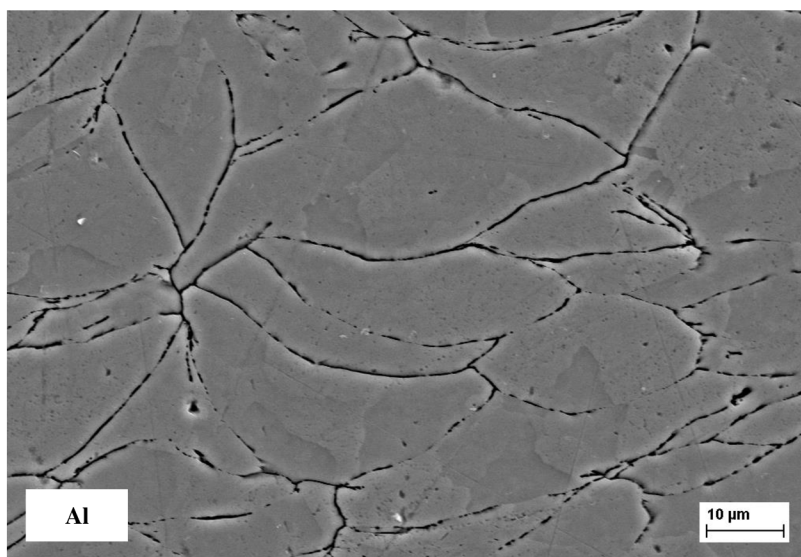
Korundových částic se při nástřiku využívá ke snížení pórovitosti a zvýšení zhutnění výsledného povlaku, což je ilustrováno na obr. 33 a). Pod částicí Al_2O_3 je viditelná oblast se



Obrázek 33 - Elektronová mikroskopie struktury SE mod – vlevo zvětšeno 500x; vpravo zvětšeno 250x

zvýšenou plastickou deformací. Obr. 31 a) poukazuje na nízký výskyt Al_2O_3 v povlaku deponovaného Al. Z toho důvodu můžeme uvažovat přítomnost Al_2O_3 částic jako možnou kontaminaci prášku z výroby, což podporuje struktura na obr. 33 b). Jedná o nástřik směsi Al s koncentrací 10 hm. % Al_2O_3 na ocelový substrát. V námi připraveném povlaku viz obr. 31 a) proto nemůžeme uvažovat využití částic Al_2O_3 pro plošné snižování pórovitosti a zvýšení zhutnění. [27]

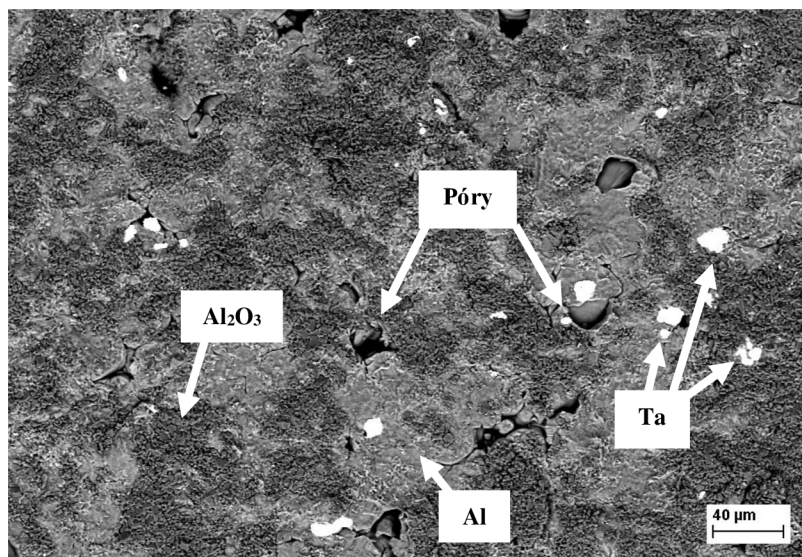
Na obr. 34 je možné vidět výraznou plastickou deformaci zrn hliníku a jejich zhutnění s minimálním podílem pórovitosti. Velikost jednotlivých zrn se pohybuje řádově v desítkách mikrometrů.



Obrázek 34 - Elektronová mikroskopie struktury SE mod - zvětšeno 1100x

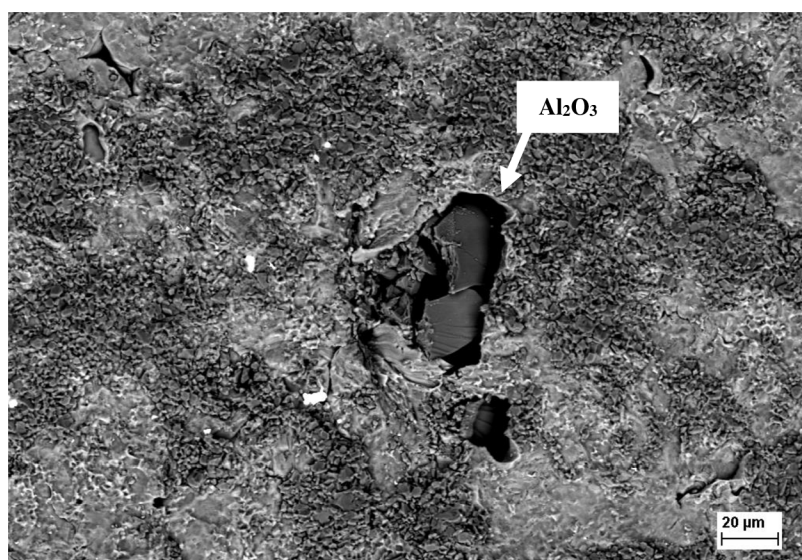
6.2 Analýza fázového rozhraní

Kontaktní plocha odloupeného materiálu byla focena v modu BSE. Jak je možné vidět na obr. 35, tak fázové rozhraní vykazuje chemickou heterogenitu v podobě Al_2O_3 , Al a Ta. Oblasti s výskytem Al_2O_3 ukazují na místa ideální adheze povlaku se substrátem. Místa



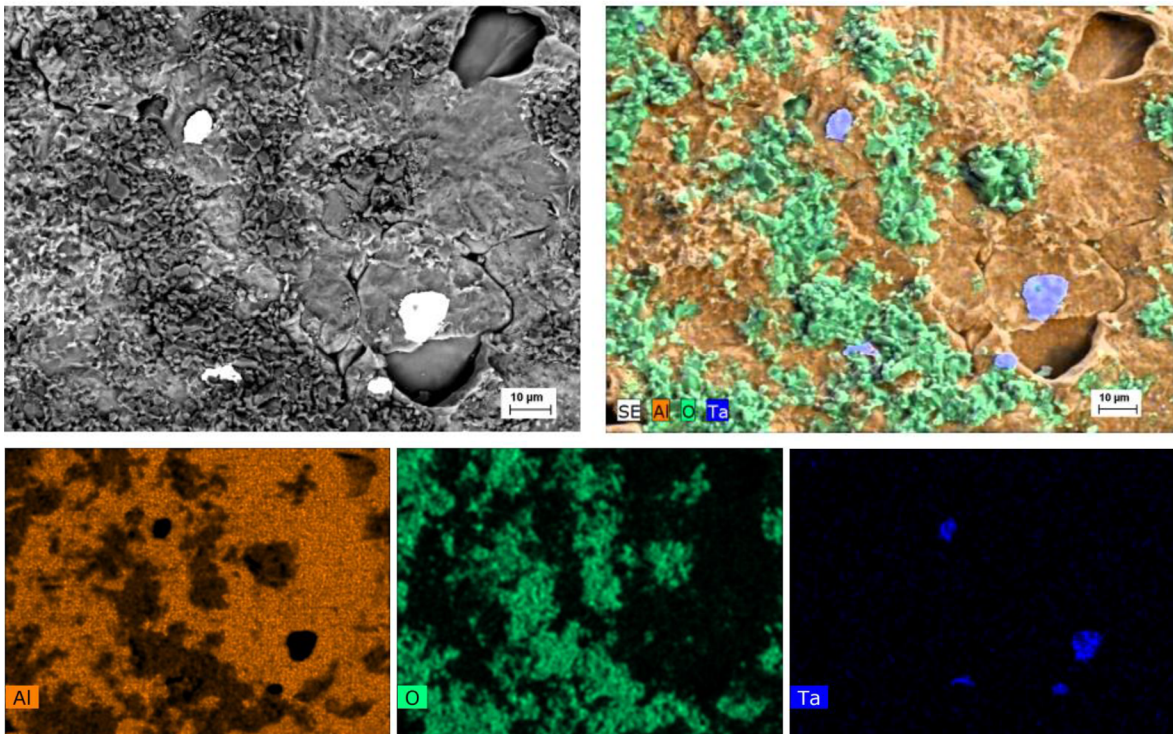
Obrázek 35 - Elektronová mikroskopie kontaktní plochy BSE mod - zvětšeno 250x

s téměř čistým Al ukazují naopak na nedokonalé adhezivní spojení. Částice Ta nalezené na fázovém rozhraní nebo v blízkém okolí indikují možnou kontaminaci prášku z předchozího nástřiku. Obr. 36 ukazuje pěchovací částice na fázovém rozhraní, EDX analýzou bylo prokázáno Al_2O_3 . Dále se na snímcích vyskytují sporadicky viditelné póry ve struktuře Al.



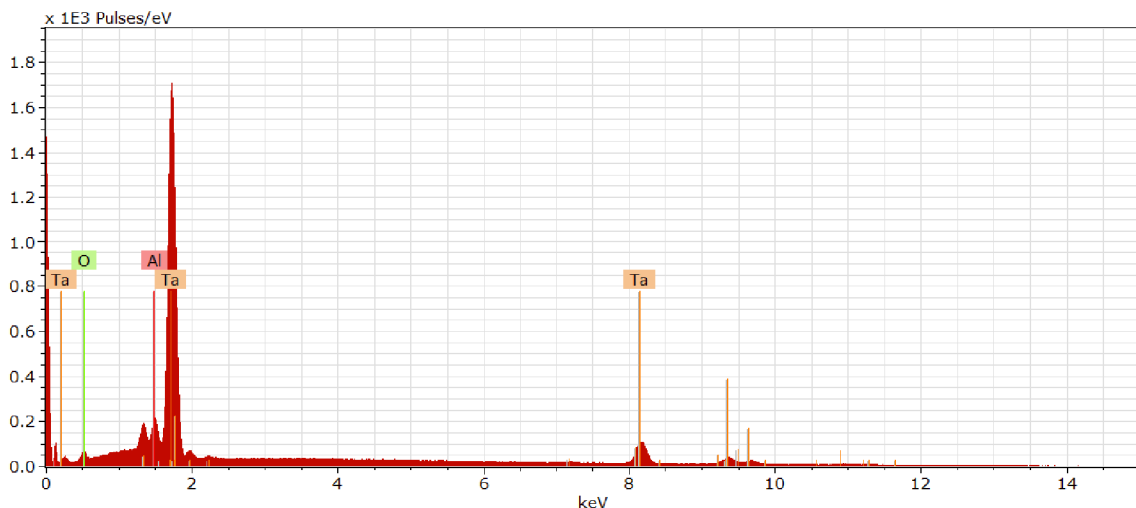
Obrázek 36 - Elektronová mikroskopie kontaktní plochy BSE mod - zvětšeno 400x

Jak dokazuje srovnání SEM/BSE a EDX mapy fázového rozhraní a jednotlivých prvků viz obr. 37, v případě děr se jedná o póry a neznámé částice jsou tantal, který byl



Obrázek 37 - Elektronová mikroskopie (BSE mod - zvětšeno 760x) a EDX mapping kontaktní plochy

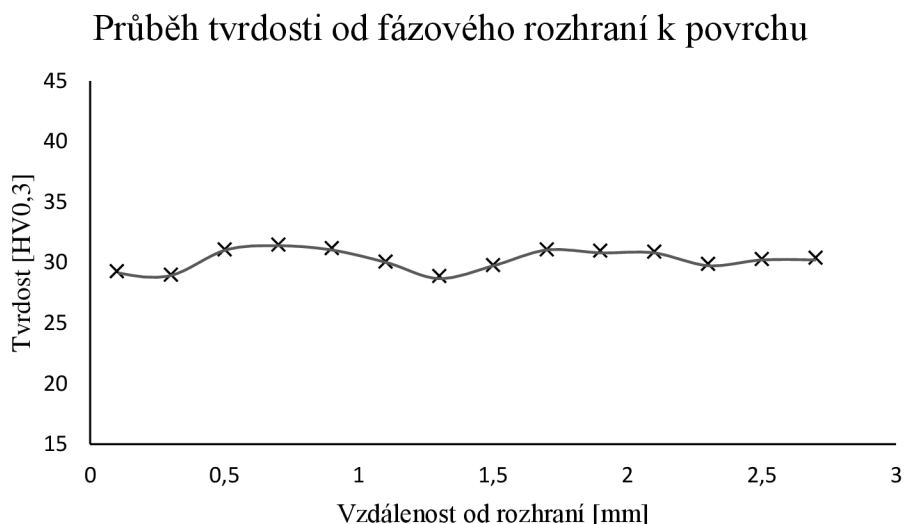
identifikován také EDX mikroanalýzou materiálu viz obr. 38, která byla prováděna pod urychlovacím napětím 15 keV. Na ose x je vyneseno urychlovací napětí a na ose y intenzita. Tantal byl přítomen ve větší míře pouze u rozhraní Al-Al₂O₃ a jeho koncentrace ve vyšších vrstvách nástřiku byla minimální. Můžeme s jistotou říct, že se jedná o kontaminaci nanášeného prášku. To bylo způsobeno špatným vyčištěním systému CS po předešlé operaci.



Obrázek 38 – EDX spektrum kontaminace na fázovém rozhraní

6.3 Měření mechanických vlastností

Provedeným měřením tvrdosti bylo zjištěno, že povlak nevykazuje gradient tvrdosti od fázového rozhraní směrem k povrchu a nedošlo tak k potvrzení hypotézy z kap. 4.2.3 o vývoji tvrdosti v tloušťce povlaku. Jak je vidět na obr. 39, tak tvrdost osciluje kolem hodnoty 30 HV_{0,3}. Dosažená tvrdost je nižší v porovnání s dalšími povlaky připravovanými stejnou technologií na ocelový substrát [27], kde hodnota tvrdosti povlaku čistého hliníku o velikosti částic 35-80 μm dosahovala hodnoty 50±2 HV_{0,3}. Z toho lze vyvodit, že má námi připravený povlak mírně nižší tvrdost a konstantní mechanické vlastnosti v celé tloušťce.



Obrázek 39 - Graf vývoje tvrdosti od rozhraní k povrchu

Rozdíl mezi měřenou hodnotou tvrdosti a hodnotou uváděnou v literatuře je pravděpodobně způsoben odlišným typem systému CS a nastavením jeho parametrů. V našem případě se jedná o vysokotlaký systém CS o tlaku nosného plynu 4 MPa (N₂), naopak v případě nastavení systému v literatuře se jedná o nízkotlaký systém CS o tlaku nosného plynu 0,62 MPa (N₂). Obecně jsou nízkotlaké systémy flexibilnější a levnější volbou než vysokotlaké systémy CS, deponované částice mají při dopadu nižší teplotu a dosahují nižších dopadových rychlostí. To může mít vliv na stupeň zhutnění, plastickou deformaci, a tudíž i tvrdost. [27;29;30]

Korundová keramika, která byla použita jako substrát pro nanášení povlaku vykazuje tvrdost 1230 HV₁₀. Námi stanovená tvrdost keramiky je nižší než u jiných keramik vyrobených slinováním, kde tvrdost dosahuje hodnot kolem 1600 HV. Konečné vlastnosti materiálu závisí zejména na čistotě prášku, stupni slinování a velikosti zrn. Mechanické vlastnosti námi použitého substrátu jsou srovnatelné s ostatními běžně používanými keramikami pro balistickou ochranu. [4;5;28]

7 Závěr

S využitím technologie CS byl úspěšně připraven povlak Al na korundovém substrátu. Ze vzorku byl připraven metalografický výbrus, na kterém byla pomocí světelné a elektronové mikroskopie hodnocena mikrostruktura, a byly stanoveny základní mechanické vlastnosti.

Světelnou mikroskopií byla v povlaku odhalena přítomnost cizích částic. Ty určila EDX analýza jako částice Al_2O_3 , které se zřejmě do prášku pro povlak dostaly kontaminací při výrobě. To se potvrzuje i při srovnání se strukturou Al/ 10hm. % Al_2O_3 [27]. Struktura povlaku vykazovala nízkou pórovitost, vysoký stupeň zhutnění a výraznou plastickou deformaci zrn.

Elektronová mikroskopie kontaktní plochy hliníku ukázala, že na fázovém rozhraní hliník-keramika jsou částice kontaminace cizích prvků, které byly EDX analýzou určeny jako tantal. Ten se do struktury dostal pravděpodobně špatným vyčištěním systému po předchozí operaci a byl v nástřiku přítomen pouze ve spodní vrstvě, což podporuje tuto hypotézu. Detailní SEM analýza fázového rozhraní v BSE modu ukázala přítomnost oblastí s vysokým podílem Al_2O_3 . V těchto místech došlo pravděpodobně k dostatečné adhezi mezi povlakem a substrátem (obr. 31 a 35). Míst s dostatečnou adhezí je viditelných na fázovém rozhraní cca 40 %.

Měření tvrdosti ukázalo, že má deponovaný materiál konstantní mechanické vlastnosti v celé tloušťce a byla tak vyvrácena hypotéza o snižující se tvrdosti od rozhraní k povrchu povlaku. Tvrdost námi připraveného povlaku je nižší, než povlaku, který byl připraven pomocí nízkotlakého systému CS. Tvrdost Al_2O_3 dosahovala nižší tvrdosti než u komerčně slinované keramiky. [4;5;27;28;29;30]

V této bakalářské práci se jedná o první zkoušku analyzovat nástřik hliníku na keramice. Adheze je řízena mechanickou interlokací a z toho důvodu je třeba zvolit vhodné optimalizace procesu, aby bylo docíleno úspěšné a pevné adheze. Optimalizace by se měla týkat hlavně úpravy povrchu keramiky (zdrsnění povrchu) mechanicky nebo chemicky, aby proběhla úspěšná interlokace u více částic hliníku. V případě nanášení kovu na keramiku by se nejednalo pouze o využití v balistice, ale také v jiných aplikacích, kde jsou kombinovány tyto materiály.

Technologie Cold spray má ve vojenském a leteckém průmyslu obrovský potenciál. Jak plyne z doložených zdrojů, lze touto technologií úspěšně opravovat komponenty, které mají vysoké požadavky na spolehlivost a ušetřit značnou částku peněz a materiálu. Pokud by bylo o této technologii širší povědomí, mohla by se začít využívat i v AČR pro případné opravy bojové techniky. Cold spray by potenciálně mohl být schopen zlepšit výrobu a životnost balistické ochrany v případě, že by v této oblasti byl proveden mnohem hlubší výzkum.

Tato práce tak může být odrazovým můstkem pro další práce a analýzy zabývající se touto problematikou.

8 Literatura

- [1] ASSADI, Hamid. Seminar. In: Cold Spray Technology from Academic Research to the Marketplace [video]. Youtube 4.6.2012. Dostupné též z: https://www.youtube.com/watch?v=Y-19glaAS6w&t=617s&ab_channel=ThayerSchoolofEngineeringatDartmouth
- [2] BENESCH, Brian. Webinar. In: The Cold Spray Revolution [video]. Youtube 30.1.2019. Dostupné též z: https://www.youtube.com/watch?v=mUdVRxZAwTM&ab_channel=DefenseSystemsInformationAnalysisCenterDSIAC
- [3] *Modern cold spray: materials, process, and applications*, [2015].. Editor Julio VILLAFUERTE. Cham: Springer. ISBN 978-3-319-16771-8.
- [4] *CeramTec* [online], 2021. Germany: CeramTec-ETEC [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://www.ceramtec.cz/>
- [5] HLADÍK, Jakub. *Příprava kompozitů keramika-kov pro balistickou ochranu*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117585>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce David Salamon.
- [6] CROUCH, Ian G., ed., 2017. *The Science of Armour Materials*. Sawston, Cambridge: Woodhead Publishing. ISBN 978-0-08-101002-0.
- [7] *Cold spray technology* [online], 2007. Editor Anatolii PAPYRIN. Amsterdam: Elsevier [cit. 2021-5-4]. ISBN 0-08-045155-1. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/book/9780080451558/cold-spray-technology>
- [8] Cold spraying, 2021. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Cold_spraying
- [9] KRVAČ, Matěj. *Opravy vysokopevnostních ocelí pomocí technologie studené kinetizace*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125330>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Lukáš Řehořek.
- [10] II, Wenya, 2017. *Solid-state additive manufacturing and repairing by cold spraying: A review* [online]. 1-18 [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmst.2017.09.015
- [11] RAOELISON, R.N., 2017. *Cold gas dynamic spray additive manufacturing today: Deposit possibilities, technological solutions and viable applications* [online]. 1-47 [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2017.07.067
- [12] SCHMIDT, Tobias, 2006. Development of a generalized parameter window for cold spray deposition. In: SCHUH, C.A. *Acta Materialia* [online]. 54. Oxford, Velká Británie:

Elsevier, s. 729-742 [cit. 2021-5-5]. ISSN 1359-6454. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359645405005975>

[13] ASSADI, Hamid, 2003. Bonding mechanism in cold gas spraying. In: SCHUH, C. A. *Acta Materialia* [online]. 51. Oxford, Velká Británie: Pergamon Press, s. 4379-4394 [cit. 2021-5-5]. ISSN 1359-6454. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S135964540300274X>

[14] ASSADI, Hamid, 2016. Cold spraying e A materials perspective. In: SCHUH, C.A. *Acta Materialia* [online]. Oxford, Velká Británie: Elsevier, s. 1-27 [cit. 2021-5-5]. ISSN 1359-6454. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359645416304530>

[15] MARX, Quentin K., 2020. Ellsworth cold spray team completes first AF organic repair. In: *Ellsworth Air Force Base* [online]. Rapid City, South Dakota: 28th Bomb Wing Public Affairs [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://www.ellsworth.af.mil/News/Article-Display/Article/2146451/ellsworth-cold-spray-team-completes-first-af-organic-repair/>

[16] TARASOV, Petr, 2017. *Prostředky individuální ochrany člověka proti působení kineticko-energetických střel a střepin zavedené ve výzbroji ozbrojených bezpečnostních sborů*. Praha. Bakalářská práce. Vysoká Škola Regionálního Rozvoje v Praze. Vedoucí práce Mgr. Milan Prchal.

[17] Terminální balistika, 2020. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Termin%C3%A1ln%C3%AD_balistika

[18] LANGSETH, M., ed., 2013. *Effect of core topology on projectile penetration in hybrid aluminum/alumina sandwich structures*. *International Journal of Impact Engineering* [online]. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, s. 99-113 [cit. 2021-4-29]. 0734-743X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X13001140>

[19] Ballistic limit, 2021. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Ballistic_limit

[20] Aluminium oxide, 2021. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium_oxide

[21] Aluminium, 2021. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium#Applications>

[22] Metalografická laboratoř, 2021. In: *Odbor slévárenství, Ústav strojírenské technologie* [online]. Brno: webdesign webkafe.cz [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/laboratore-a-vybaveni/metalograficka-laborator-0>

- [23] MD-Piano 80, 2021. In: *Struers* [online]. Copenhagen [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: [https://e-shop.struers.com/US/EN/products/Grinding/MD-Grinding/MD-Piano_80_200_mm_\(8\)_dia\(40800121\).aspx](https://e-shop.struers.com/US/EN/products/Grinding/MD-Grinding/MD-Piano_80_200_mm_(8)_dia(40800121).aspx)
- [24] Grinding/polishing and consumables, 2021. In: *Advanced Laboratory Solutions* [online]. Northriding, Randburg [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.advancedlab.co.za/product/struers/grinding-polishing-and-consumables>
- [25] Schematic of the cold spray process, 2021. In: *ResearchGate* [online]. Berlín, Německo: ResearchGate [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-cold-spray-process-4_fig1_262343458
- [26] CUTLER, Colin, 2020. Turbofan Engine. In: *Boldmethod* [online]. Denver, Colorado [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.boldmethod.com/learn-to-fly/aircraft-systems/how-does-a-jet-engine-turbofan-system-work-the-basics/>
- [27] IRISSOU, Eric, 2007. Investigation of Al-Al₂O₃ Cold Spray Coating Formation and Properties. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 5-6(16), 661-668 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: doi:10.1007/s11666-007-9086-8
- [28] PRŮDEK, M. *Slinování pokročilých keramických materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 47 s. Vedoucí diplomové práce doc. RNDr. Karel Maca, Dr..
- [29] YIN, Shuo, 2018. Cold spray additive manufacturing and repair: fundamentals and applications. *Additive Manufacturing* [online]. (21), 628-650 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: doi: 10.1016/j.addma.2018.04.017
- [30] ŠTĚTINA, Josef, *Proudění plynů a par* [prezentace]. 2020 [cit. 19.5.2021], Dostupné z: <https://docs.google.com/presentation/d/1ek-bVXgRp0xo69YDwJ6VIB1N4pSSoHskd9rM0jnk2vM/edit#slide=id.p1>

9 Seznam zkratek a symbolů

Zkratky

AČR – Armáda České republiky

Al – chemické označení hliníku

Al₂O₃ – chemické označení oxidu hlinitého, korund

Al 2024 – slitina hliníku AlCu4Mg1

Al 6061 – slitina hliníku AlMg1SiCu

BSE – Back-scattered electrons, zpětně odražené elektrony

CMC – Ceramic-metal composite materials – kovo-keramické kompozitní materiály

CS – Cold spray

EDX – Energy-dispersive X-ray spectroscopy, prvková spektroskopie

HCl – chemické označení kyseliny chlorovodíkové

HF – chemické označení kyseliny fluorovodíkové

HNO₃ – chemické označení kyseliny dusičné

HVOF – High Velocity Oxy-Fuel, vysokorychlostní nástřik plamenem

IVD – Ion Vapor Deposited, depozice par pro nanášení povlaků

keV – kilo-elektron volty

N₂ – chemické označení dusíku

SEM – Scanning electron microscope, rastrovací elektronový mikroskop

SE – Secondary electrons, sekundární elektrony

Ta – chemické označení tantalu

Symboly

ρ [kg/m³] – hustota

σ_u [MPa] – mez pevnosti materiálu v tahu

σ_{TS} [MPa] – mez kluzu materiálu v tahu

DE [-] – úspěšnost depozice

E_m [-] – poměr plošné hustoty válcovaného homogenního pancíře a plošné hustoty systému určeného pro danou aplikaci

E_s [-] – poměr tloušťky válcovaného homogenního pancíře a tloušťky systému určeného pro danou aplikaci

F_1, F_2 [-] – kalibrační koeficienty

HV [Pa] – tvrdost podle Vickerse

HVB [Pa] – tvrdost podle Brinella

m [kg] – přírůstek váhy substrátu během depozice

M_o [kg] – hmotnost deponovaného materiálu

pH [-] – vodíkový exponent

T_m [°C] – teplota tavení

T_i [°C] – dopadová teplota částic

T_R [°C] – lokální teplota (okolí)

v_c [m/s] – kritická rychlost

v_{cr} [m/s] – kritická rychlost podle Assadiho

v_p [m/s] – rychlost partikulů

$v_{crit}^{th,mech}$ [m/s] – kritická rychlost podle Schmidta

10 Seznam obrázků

Obrázek 1 [6] - Schéma keramického vícevrstvého systému balistické ochrany.....	1
Obrázek 2 [25] - Jednoduché schéma systému Cold spray	2
Obrázek 3 [3] - Vliv rychlosti deponovaných částic na úspěšnost depozice	3
Obrázek 4 [10] - Průběh deformace částice-substrát a vznik vazby	4
Obrázek 5 [11] - Mechanismus vrstvení materiálu	5
Obrázek 6 [3] - Úspěšnost depozice s narůstající dopadovou rychlostí různých materiálů; 1- hliník, 2- měď, 3- nikl (urychlení směsí vzduchu a helia), 4- hliník, 5- měď, 6- nikl (urychlení vzduchem)6	
Obrázek 7 [12] - Porovnání zjištěných hodnot kritické rychlosti pro různé materiály	8
Obrázek 8 [3] - Oprava komponent převodové části helikoptéry UH-60 metodou CS za použití Al 6061.....	10
Obrázek 9 [3] - Oprava akčního členu podvozku metodou CS za použití niklových slitin	11
Obrázek 10 [3] - Využití přenosného CS pro opravu předového podvozku	11
Obrázek 11 [3] - Místo, kde došlo ke korozi.....	12
Obrázek 12 [3] - Poškozená místa hydraulického vedení	13
Obrázek 13 [3] - Opravené hydraulické vedení metodou Cold Spray za použití titanu.....	14
Obrázek 14 [3] - Místo poškození paneláže	15
Obrázek 15 [3] - Výsledek tahové zkoušky ověřující kvalitu nástřiku	16
Obrázek 16 [3] - Porovnání opravené díry a nového dílu	16
Obrázek 17 [6] - Milne de Marre graf.....	18
Obrázek 18 [6] - Srovnání balistických systémů.....	19
Obrázek 19 [4] - Příklad lehké keramické balistické ochrany pro bojová vozidla.....	20
Obrázek 20 [6] - Šíření tlakové vlny balistickou ochranou.....	21
Obrázek 21 [6] - Konoidní lom keramického materiálu při dopadu kulky	22
Obrázek 22 [6] - Drcení materiálu	22
Obrázek 23 [6] - Zátkové poškození houževnatého materiálu při dopadu kulky.....	23
Obrázek 24 [18] - Poškození balistické ochrany keramika-hliník při dopadu kulky	24
Obrázek 25 - Řezání vzorku na metalografické pile Brillant 220.....	26
Obrázek 26 - Metalografický lis Opal X-Press	26
Obrázek 27 - Zalisovaný vzorek	27
Obrázek 28 - Zařízení na leštění a broušení vzorků s brusnými kotouči	27
Obrázek 29 [24] - Leštění vzorku	28
Obrázek 30 - Měření tvrdosti podle Vickerse	29
Obrázek 31 - Světelná mikroskopie naleptaný vzorek – vlevo zvětšeno 200x, vpravo zvětšeno 500x	30
Obrázek 32 - Elektronová mikroskopie rozhraní BSE mod – vlevo zvětšeno500x, vpravo zvětšeno 2300x.....	31
Obrázek 33 [27] - Elektronová mikroskopie struktury SE mod – vlevo zvětšeno 500x; vpravo zvětšeno 250x.....	32
Obrázek 34 - Elektronová mikroskopie struktury SE mod – zvětšeno 1100x.....	32
Obrázek 35 - Elektronová mikroskopie kontaktní plochy BSE mod – zvětšeno 250x	33
Obrázek 36 - Elektronová mikroskopie kontaktní plochy BSE mod – zvětšeno 400x	33
Obrázek 37 - Elektronová mikroskopie (BSE mod – zvětšeno 760x) a EDX mapping kontaktní plochy.....	34
Obrázek 38 - EDX spektrum kontaminace na fázovém rozhraní.....	34
Obrázek 39 - Graf vývoje tvrdosti od rozhraní k povrchu	35