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

VLIV MIKROOBRÁBĚNÍ POVRCHU NA ADHEZNÍ PEVNOST NÁSTŘIKŮ PŘIPRAVENÝCH TECHNOLOGIÍ COLD SPRAY

THE INFLUENCE OF SURFACE MICROMACHINING ON THE ADHESION STRENGTH OF COATINGS PREPARED BY COLD SPRAY TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE Vladimír Valtr

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Lukáš Řehořek, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2025

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav materiálových věd a inženýrství
Student:	**Vladimír Valtr**
Studijní program:	Základy strojního inženýrství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	**Ing. Lukáš Řehořek, Ph.D.**
Akademický rok:	2024/25

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:

Vliv mikroobrábění povrchu na adhezní pevnost nástřiků připravených technologií cold spray

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tato práce se zaměřuje na studium vlivu mikroobrábění povrchu pomocí elektronového paprsku na adhezní pevnost nástřiků připravených technologií cold spray. Cold spray je moderní metoda povrchového nástřiku, která využívá kinetickou energii částic materiálu k jejich nanášení na povrch. Cílem práce je analyzovat, jak mikroobrábění povrchu pomocí elektronového paprsku ovlivňuje adhezní pevnost nástřiků.

V práci se bude zkoumat mikrostruktura povrchu a příprava povrchu pomocí elektronového paprsku před nanášením nástřiku.

Různé parametry mikroobrábění povrchu pomocí elektronového paprsku, jako je intenzita paprsku, rychlost, frekvence a rozptyl, budou testovány a optimalizovány. Cílem je dosáhnout ideální vlastností povrchu, které zajišťují lepší adhezní pevnost nástřiku technologií cold spray.

Cíle bakalářské práce:

1) Analyzovat vliv mikroobrábění povrchu pomocí elektronového paprsku na adhezní pevnost nástřiků technologií cold spray.
2) Charakterizovat mikrostrukturu povrchu a přípravu povrchu pomocí elektronového paprsku před nástřikem cold spray.
3) Optimalizovat parametry mikroobrábění povrchu pomocí elektronového paprsku.

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: reviewof 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.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc. ředitel ústavu	doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D. děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem mikroobrábění povrchu substrátu na adhezní pevnost nástřiků nanesených metodou cold spray. Tvrdost substrátu v této technologii hraje klíčovou roli, zejména u tvrdých materiálů, kde je obtížné dosáhnout dostatečné přilnavosti povlaku. Cílem práce bylo zjistit, zda předpříprava povrchu zlepší adhezní vlastnosti substrátu oproti leštěnému povrchu. Pro úpravu povrchu byla použita technologie elektronového paprsku, jejímž účelem bylo vytvořit specifické mikrostruktury na povrchu substrátu. Při návrhu mikrostruktur (paternů) byl kladen důraz na jejich rozměrové parametry, které výrazně ovlivňují výslednou drsnost (Sa, Sz) a tím i kvalitu spojení s povlakem. Hodnoceny byly také mikrotvrdost povrchu a výsledná adhezní pevnost povlaku. Získaná data ukázala odchylky od očekávaných výsledků, pravděpodobně v důsledku nepřesné výroby mikrostruktur a malého počtu vzorků. Práce přináší poznatky o vlivu předpřípravy povrchu elektronovým paprskem na adhezi nástřiků cold spray, zejména u tvrdých substrátů.

Klíčová slova

Cold spray, mikroobrábění, elektronový paprsek, adhezní pevnost, drsnost povrchu, mikrotvrdost

Abstract

This bachelor thesis deals with the effect of micromachining of the substrate surface on the adhesion strength of cold spray coatings. Substrate hardness plays a key role in this technology, especially for hard materials where it is difficult to achieve sufficient coating adhesion. The aim of this work was to investigate whether surface pretreatment would improve the adhesion properties of the substrate compared to a polished surface. Electron beam techno-logy was used for surface modification to create specific microstructures on the substrate surface. When designing the microstructures (paterns), emphasis was placed on their dimensional parameters, which significantly affect the resulting roughness (Sa, Sz) and thus the quality of bonding to the coating. The surface microhardness and the resulting adhesion strength of the coating were also evaluated. The data obtained showed deviations from the expected results, probably due to inaccurate fabrication of microstructures and small number of samples. This work provides insights into the effect of electron beam surface pretreatment on the adhesion of cold spray coatings, especially for hard substrates.

Keywords

Cold spray, micromachining, electron beam, adhesion strength, surface roughness, microhardness

Bibliografická citace

VALTR, Vladimír. *Vliv mikroobrábění povrchu na adhezní pevnost nástřiků připravených technologií cold spray*. Bakalářská práce. Lukáš ŘEHOŘEK (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma ***Vliv mikroobrábění povrchu na adhezní pevnost nástřiků připravených technologií cold spray*** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum	Vladimír Valtr

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Lukášovi Řehořkovi Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a vstřícný přístup a trpělivost, kterou mi po celou dobu zpracovávání práce věnoval. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Petru Havlíkovi Ph.D., Ing. Pavlu Gejdošovi Ph.D. a Ing. Soni Pantůčkové za ochotný přístup při provádění dílčích úkonů experimentu.

Obsah

Úvod ... 10
Teoretická část ... 11
1 Cold spray ... 11
1.1 Historie a vývoj ... 11
1.2 Základní princip ... 12
1.3 Mechanismus tvorby depozice ... 13
1.4 Faktory ovlivňující vlastnosti nástřiku ... 15
1.4.1 Kritická rychlost ... 15
1.4.2 Plyny a jejich provozní teplota a tlak ... 16
1.4.3 Tvrdost a drsnost povrchu substrátu ... 16
1.4.4 Úhel nanášení povlaku ... 17
1.4.5 Materiály ... 18
1.5 Vlastnosti vstupního prášku ... 19
1.6 Účinnost depozice ... 19
1.7 Výroba prášku ... 20
1.7.1 Atomizace ... 20
1.7.2 Rozprašovací sušení (Aglomerace) ... 21
1.7.3 Spékání a drcení ... 21
1.7.4 Hydrogenace – Dehydrogenace ... 21
1.8 Druhy CS systémů ... 22
1.8.1 Vysokotlaký CS ... 22
1.8.2 Nízkotlaký CS ... 23
1.9 Použití ... 23
1.9.1 Aditivní výroba ... 24
1.9.2 Spojování různých materiálů ... 25
1.9.3 Využití v biomedicíně ... 26
1.9.4 Antivegetativní úprava povrchu ... 26
2 Technologie mikroobrábění ... 27
2.1 Strukturování povrchu elektronovým paprskem ... 28
2.1.1 Elektronový paprsek ... 28
2.1.2 Svařování elektronovým paprskem ... 29

2.1.3 Technologie Surfi-sculpt ... 31
2.1.4 Tavení elektronovým paprskem ... 32
2.2 Mikroobrábění laserem ... 32
2.2.1 Laser - základní informace ... 33
2.2.2 Emise a absorpce světla v kvantové teorii ... 34
2.2.3 Použití ... 34
2.2.4 Strukturování povrchu laserem ... 35
Praktická část ... 38
3 Experiment ... 38
3.1 Materiál vzorků ... 39
3.2 Příprava vzorků ... 39
3.3 Povrchová předpříprava vzorků ... 41
3.3.1 Zkušební sada ... 42
3.3.2 Sada 2 ... 44
3.3.3 Sada 3 ... 44
3.3.4 Návrh paternu ... 45
3.4 Vyhodnocování povrchu vzorků ... 46
3.5 Nástřik depozice pomocí CS ... 48
4 Výsledky experimentální části ... 50
4.1 Mikrotvrdost povrchu ... 50
4.2 Topografie substrátu ... 50
4.3 Drsnost povrchu ... 51
4.4 Adhezní parametry ... 54
4.4.1 Vzorek s největší hodnotou adhezní pevnosti ... 54
4.5 Porovnání adhezní pevnosti s drsností povrchu ... 56
4.6 Inspekce povrchu po adhezních testech ... 57
5 Diskuse ... 58
Závěr ... 62
Zdroje ... 63

Úvod

Povrchová úprava materiálů představuje důležitou oblast moderního strojírenství a průmyslu obecně. V mnoha aplikacích je nezbytné zlepšit vlastnosti povrchu bez zásahu do objemových vlastností základního materiálu. K tomuto účelu slouží různé technologie nanášení povlaků, z nichž se v posledních letech stále více prosazuje metoda cold spray. Jedná se o studený nástřik, při kterém se částice práškového materiálu urychlují na vysokou rychlost pomocí stlačeného plynu a narážejí na povrch substrátu, kde mechanicky ulpívají. Hlavní výhodou této metody je minimální tepelné ovlivnění základního materiálu a vysoká hustota nanesených vrstev.

Jedním z klíčových faktorů, který ovlivňuje kvalitu spojení mezi povlakem a substrátem, je tvrdost povrchu substrátu, kdy je obtížné nanášet povlaky na tvrdé materiály. Vhodná předpříprava může zásadně zlepšit mechanické vlastnosti rozhraní a tím i adhezní pevnost. V této práci je povrch substrátu upravován pomocí elektronového paprsku. Cílem je vytvořit definované mikrostruktury na povrchu, které zvýší kontaktní plochu a podpoří mechanické zakotvení částic povlaku.

Tato bakalářská práce se zaměřuje na porovnání výsledné adhezní pevnosti měděného povlaku na oceli 42CrMo4. Porovnání se týká předpřipravených povrchů elektronovým paprskem vůči leštěnému povrchu. Dále se zhodnocuje tvrdost povrchu a jeho naměřená plošná drsnost. na zhodnocení vztahu mezi rozměrovými parametry mikrostruktur vytvořených elektronovým paprskem, výslednou drsností povrchu a adhezní pevností nástřiku aplikovaného technologií cold spray. Kromě měření drsnosti (parametry Sa, Sz) a mikrotvrdosti jsou výsledky adhezních testů porovnávány s morfologií upraveného povrchu. Práce si klade za cíl přispět k lepšímu pochopení vlivu mikroobrábění na funkční vlastnosti povlaků.

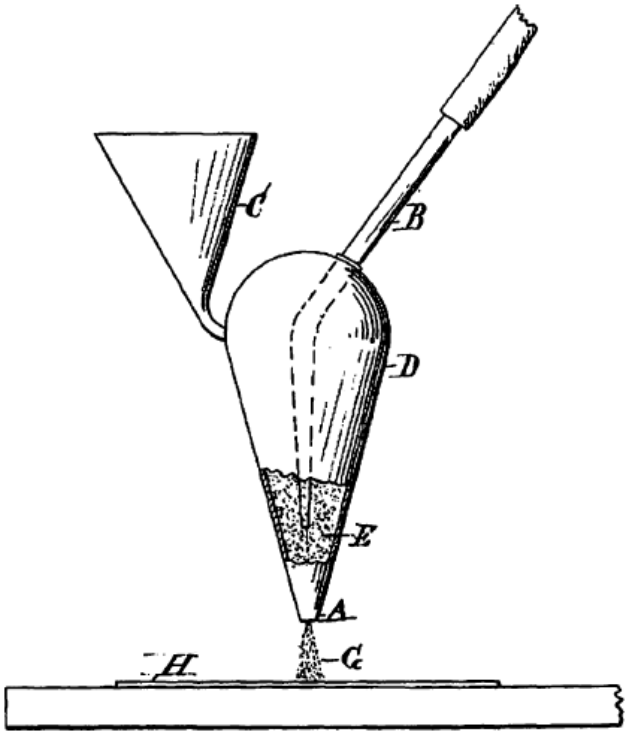
V první části práce jsou rozebrány použité technologie při předpřípravě povrchů a nástřiku povlaku na vzorky. V této teoretické části práce jsou uvedeny základní informace těchto použitých technologií, konstrukce zařízení používající tyto technologie a jejich momentální využití. Druhá část popisuje průběh experimentu. Konkrétně jsou zde zmíněny kapitoly o přípravě vzorků, předpřípravě vzorků, vyhodnocování předpřípravy pomocí konfokálního mikroskopu a nástřiku povlaku. Poté následují kapitoly o výsledcích experimentů a v diskusi jsou tyto výsledky rozebrány.

Teoretická část

1 Cold spray

1.1 Historie a vývoj

Přestože je cold spray považován za poměrně novou technologii v oblasti termálních nástřiků, zmínky o tomto procesu se datují již do minulého století. Tedy ještě před objevením termálních nástřiků samotných, kdy si S.H. Thurston nechal patentovat metodu nanášení kovových povlaků (přístroj viz. Obr. 1.1). Metoda spočívala v nanášení kovových částic na kovovou desku. Částice byly urychlovány proudem stlačeného plynu, který jim dodal dostatečnou kinetickou energii, aby se vryly do povrchu desky a utvořili trvalý povlak. Při této metodě dosahovaly částice rychlosti do 350 m/s (při pokojové teplotě). Použití této metody bylo tedy omezeno pouze na úzký výběr materiálů, které bylo možno nanášet. [1]



Obr. 1.1 *Patent S.H. Thurstona na nanášení kovových povlaků. A – hrdlo trysky, B – přívod vzduchu, C – násypka s kovovým práškem, D – komora, E – kovový prášek, G – proud plynu a prášku, H – tenká vrstva povlaku. Převzato z [1]*

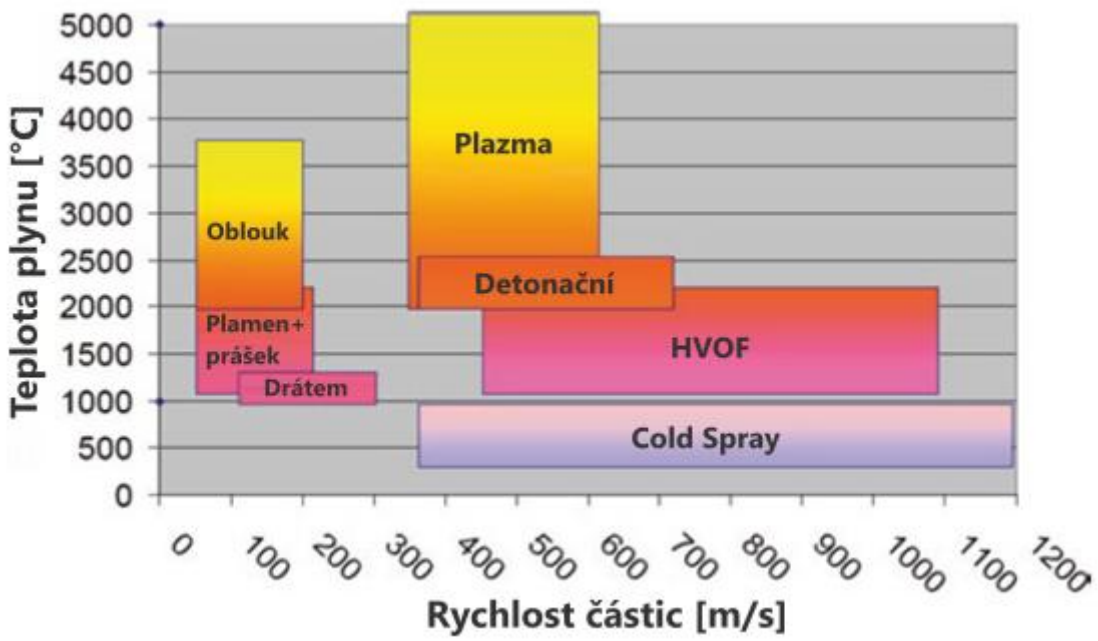
Roku 1958, C.F. Rocheville vylepšil původní patent pana Thurstona. V zařízení použil vysokotlakou trysku typu De-Laval, díky které se mu povedlo zvýšit rychlost nanášených částic, což zlepšilo jejich adhezi na substrátu. Výsledkem byla tenká vrstva celistvého povlaku, která přilnula na povrch substrátu. Avšak i při použití supersonické trysky nebylo zařízení schopno vytvořit silnější vrstvy povlaku kvůli stále nedostatečné rychlosti částic. [1]

V 80. letech minulého století, skupina vědců z Ústavu Teoretické a aplikované mechaniky na Ruské akademii věd v Novosibirsku (ITAM of RAS) posunuli výzkum metody tvoření povlaků dále. Při zkoumání použili nové diagnostické nástroje, které jim umožnili objevit fenomén, který začali nazývat „cold spray‘‘. Sestrojili zařízení, které bylo schopno pomocí plynu o vysokém tlaku a teplotě, výrazně nižší než teplota tání nanášených částic, urychlovat částice takovým způsobem, že dovedli nanášet velké spektrum kovů na substrát. Byli schopni formovat celistvý, poměrně široký a pevný povlak. Tuto metodu pojmenovali „Cold gas dynamic spray“. [1; 2]

1.2 Základní princip

Cold Spray je proces, při kterém je nejčastěji kovový povrch (neboli substrát) vystaven proudu urychlených částic na 300 až 1200 m/s a o velikosti zhruba 1 až 50 μm. Částice jsou urychlovány pomocí stlačeného plynu, nejčastěji helia, dusíku nebo vzduchu. Nanášenými materiály jsou nejčastěji kovy, ale je možno tvořit povlaky z polymerů, keramiky nebo třeba kombinací keramiky a kovu. Tento proces je založen na správném nastavení provozních parametrů, jako je teplota, rychlost a velikost nanášených částic apod. [2]

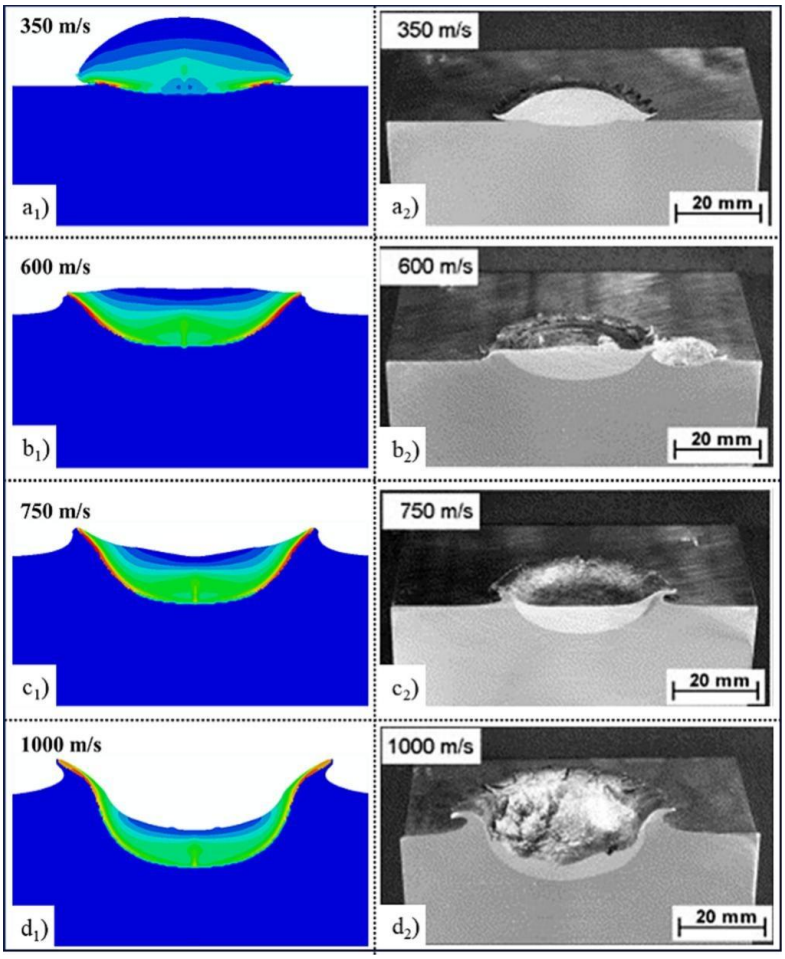
Technologie Cold Spray (dále jen CS), na rozdíl od ostatních žárových nástřiků, které využívají vysokých teplot, pracuje s teplotami vždy nižšími než je teplota tání depozice (viz. Obr. 1.2). Díky tomuto faktu jsou potlačeny nebo dokonce eliminovány problematické faktory jako jsou např. vysokoteplotní oxidace, růst zrna, staženiny, fázové změny, vnitřní napětí atd., které jsou spojeny s technologií termálních nástřiků. Díky vysoké kinetické energii urychlovaných částic depozice je hlavní vazebnou silou plastická deformace mezi substrátem a urychlovanými částicemi. Míra adheze mezi substrátem a depozicí závisí především na jejich tvrdosti, drsnosti povrchu substrátu, rychlosti dopadu částice na substrát, úhlu dopadu částic a teplotě, při které je nástřik prováděn. Mezi termální nástřiky dále patří např.: nástřik elektrickým obloukem (arc wire), plamenem (powder flame, wire flame), plazmou, detonační nanášení a HVOF. [2; 3]



Obr. 1.2 *Porovnání rychlosti nanášených částic a jejich teploty v různých metodách termálních nástřiků. Převzato a upraveno z [2]*

1.3 Mechanismus tvorby depozice

Formování depozice na povrchu substrátu je primárně výsledkem plastické deformace částic při kontaktu se substrátem. Dosavadní zdroje hovoří o fenoménu, nazývající se adiabatická smyková nestabilita (adiabatic shear instability – dále jen ASI). ASI je momentálně považováno za hlavní vazebný mechanismus depozice na substrát, ale je stále předmětem mnoha spekulací a diskusí, jak přesně ASI funguje a zda je opravdu nezbytná pro adhezi depozice. Tento fenomén kombinovaný s vysokým tlakovým napětím, vzniklým při kolizi částice se substrátem, do jisté míry mění mechanismus deformace částice z plastického na viskózní tečení. Po obvodu dopadlé částice dochází k vytvoření útvaru podobného výstřiku (viz. Obr. 1.3), mechanickému zablokování částice v substrátu a promísení krystalových mřížek obou materiálů na dosedových plochách. Tento děj je podmíněn překročením kritické rychlosti dopadu částice na substrát. [3; 4; 5]



Obr. 1.3 *Porovnání simulovaného tvaru a makroskopických fotografií Cu částice (ø20mm) po dopadu na ocelový plát při různých rychlostech. Převzato z [3]*

Při tvorbě povlaku vznikají dva druhy vazeb, a to mechanická a metalurgická. Částice, urychlená proudem plynu skrze trysku, se plasticky deformuje při dopadu na substrát. Z původního tvaru, uvažujme sférického, se stává zploštělý útvar, který se nazývá tzv. „splat“. Při kolizi částice a substrátu se narušuje tenká vrstva oxidů, nacházejících se na povrchu obou rozhraní, čímž se dosáhne velice těsného kontaktu daných dvou materiálů. Dále zde vzniká teplo vyvolané nárazem. Tato interakce se považuje za adiabatický děj, což je děj, při kterém nedochází k tepelné výměně mezi soustavou a okolím. Tím, že se teplo nemůže šířit mimo naši soustavu částice/substrát, dochází na tomto rozhraní ke změkčování povrchu (thermal softening) jak částice, tak substrátu. Lokálním zvýšením teploty poklesne mez kluzu materiálů a tím se zvýší jejich plasticita. Změkčením povrchů se na jejich rozhraní začnou tvořit smykové pásy (shear band). Tyto pásy se kvůli působící tlakové síle, vyvolané nárazem částice na povrch, začnou posouvat k okraji „splatu“. Jejich vysoká rychlost zapříčiní ejekci části materiálu mimo soustavu částice/substrát. Jakmile nastane pokles kinetické energie, zapříčiněný nárazem, pohybující se materiál ztratí schopnost tečení a jakoby zamrzne. Na konci tohoto děje vznikne po obvodu již vzniklého „splatu“ útvar podobný výstřiku (jett). Tento útvar má být hlavním prvkem mechanické vazby zajišťující adhezi, a to mechanickým zablokováním (mechanical interlocking) částice na povrchu substrátu. Metalurgická vazba též vzniká při nárazu částice na povrch substrátu. Jak již bylo zmíněno, nárazem se odstraní vrstva oxidů na povrchu

a dosáhne se velmi těsného kontaktu obou ploch. Za těchto podmínek dojde k promísení krystalových mřížek, popřípadě difuze v povrchových vrstvách obou ploch. [4; 5]

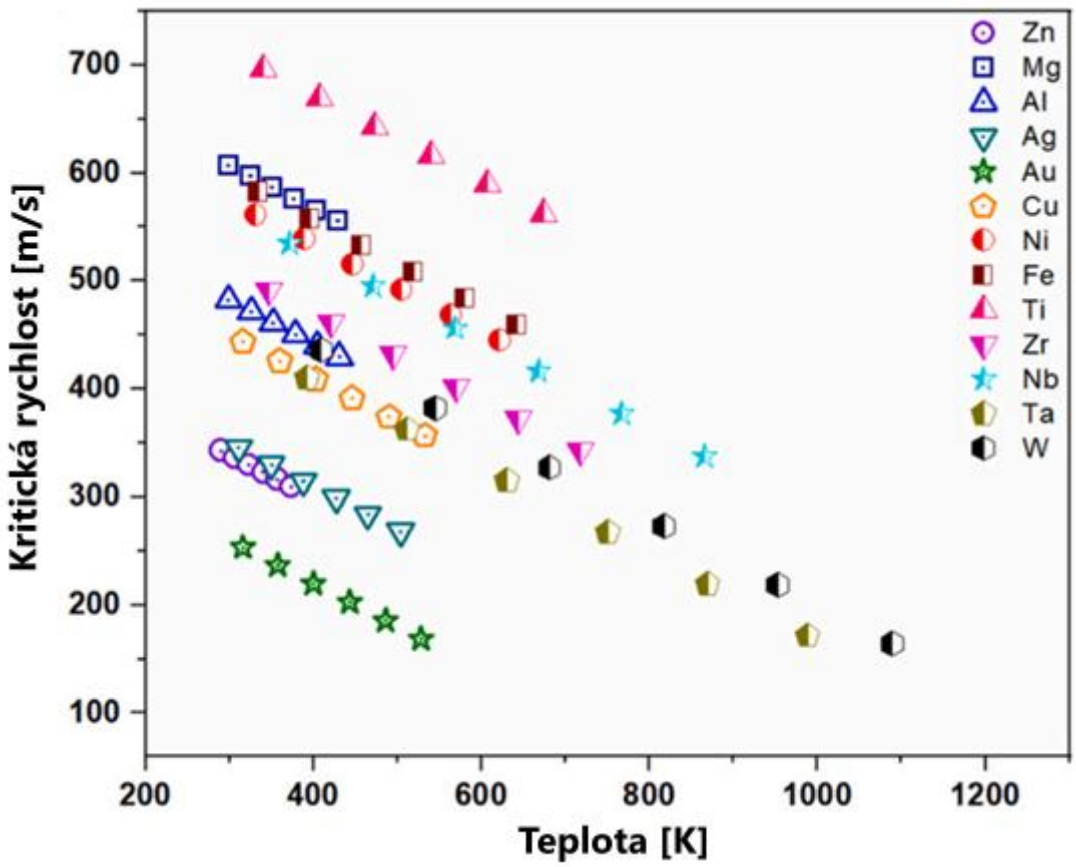
Jelikož je nám hlavní vazebný mechanismus adheze částice na substrátu stále málo znám, ve velké míře se hovoří o tom, že hlavním mechanismem zajišťující adhezi je ASI a následná tvorba „jettů“. To, která vazba je při adhezi dominantní též nevíme, ale spíše se autoři literárních zdrojů přiklání k mechanické vazbě, kterou zajišťují především „jetty“. Nicméně v jisté literatuře [5] se píše o vykonání experimentu za pomoci metody konečných prvků, kde výsledkem bylo zjištění tvorby „jettů“ ještě před zahájením ASI. V další literatuře [6] se píše o podobném experimentu, kde se zjistilo, že tvorba „jettů“ je pouze výsledkem silných tlakových vln působících na expandující okraj dopadající částice a ASI není s procesem adheze v zásadě nijak spojeno. Toto zjištění vede ke spekulacím, zda je ASI opravdu nutným fenoménem při tvorbě jak mechanické, tak metalurgické vazby a není jen výsledkem některého z předcházejících procesů.

1.4 Faktory ovlivňující vlastnosti nástřiku

Abychom dosáhli kvalitního nástřiku s dobrou adhezí k substrátu, musíme se zaměřit na několik parametrů, které hrají klíčovou roli v této technologii. Jedním z nejdůležitějších je kritická rychlost. Při překročení této rychlosti jsou částice schopny ulpívat na povrchu. Dalšími vlastnostmi jsou třeba drsnost povrchu substrátu, užití plynu, jeho tlak a předehřátí, úhel nanášení částic, nanášené materiály atd. Tyto parametry se snažíme co nejlépe optimalizovat pro naše účely, aby efektivita nanášení částic byla vysoká, povlak měl malou porozitu, dobrou adhezi k substrátu a vysokou pevnost.

1.4.1 Kritická rychlost

Nejdůležitějším parametrem v technologii CS je bezpochyby „Kritická rychlost“ (V_c) dopadu částice na substrát. Musíme zajistit, aby částice překročily tuto rychlost při kontaktu s povrchem a byly schopny adheze. Pokud se tak neučiní, dochází pouze k abrazi povrchu substrátu, což je v případě technologie CS nežádoucí. K přilnutí povlaku k substrátu je potřeba kinetická energie urychlené částice, která se při nárazu mění na plastickou deformaci a teplo. Velkou roli hrají při urychlování částic za hranici V_c i další parametry, jako je např. velikost částic, použitý hnací plyn, míra předehřátí hnacího plynu, konstrukce trysky atd. Jelikož jsme schopni nanášet velikou škálu materiálů, jejich kritické rychlosti se budou (viz. Obr. 1.4) lišit vzhledem k jejich mechanickým vlastnostem, jako je mez kluzu, modul pružnosti v tahu, teplota tání atd. Rychlosti se pohybují řádově od 300 m/s do 1200 m/s. [7; 8]



Obr. 1.4 *Kritická rychlost různých materiálů při dané teplotě. Převzato a upraveno z [9]*

1.4.2 Plyny a jejich provozní teplota a tlak

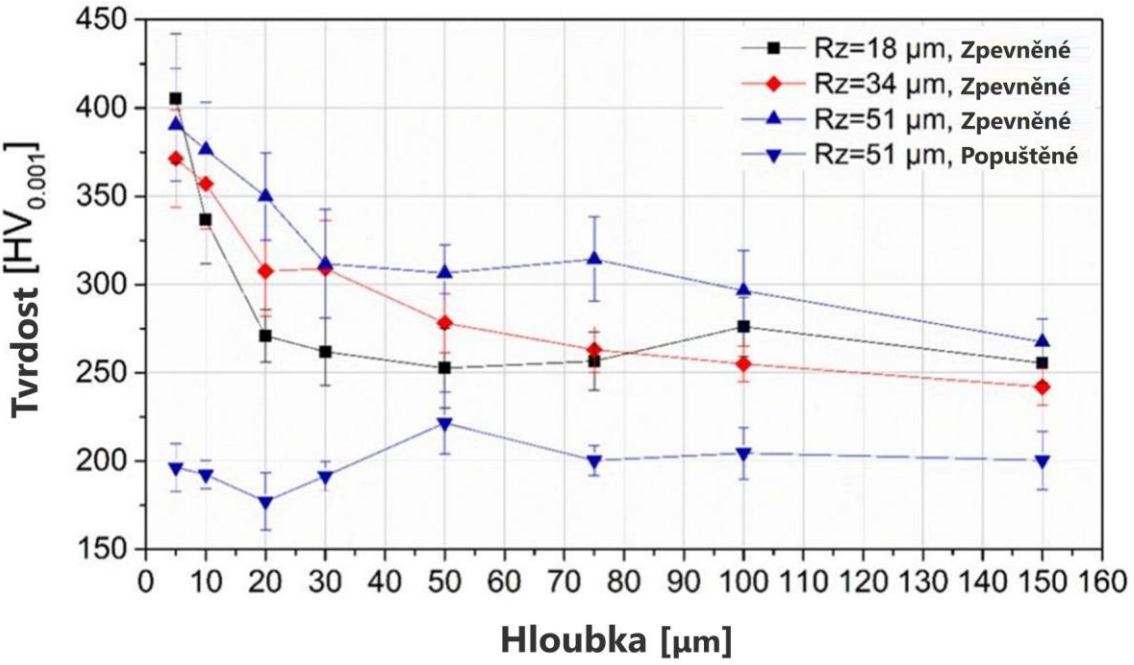
Typickými plyny používaných v CS jsou dusík, helium, jejich směsi a vzduch. Tyto plyny se využívají jako nosiče CS prášku, který je tímto plynem urychlován skrze trysku. Nástřik probíhá za určitého tlaku a teploty daného plynu. Tyto dva parametry (teplota a tlak) napomáhají k zajištění vysokých rychlostí deponovaného materiálu. Mnoha výzkumy bylo zjištěno, že nanášená vrstva vykazovala lepší kvalitu, konkrétněji menší porozitu a větší pevnost, při použití ohřátého plynu na vyšší teplotu (stále nižší než je teplota tání depozice). Samozřejmě jsou s navyšováním teploty spojeny i určité komplikace. CS trysky jsou náchylné na vysoké teploty, oxidaci a nitridaci. Hnací plyny se předehřívají na zhruba 20°C – 800 °C vzhledem k materiálu povlaku. Tlak hnacího plynu se používá v rozmezí 0,5 až 7 MPa. [7]

1.4.3 Tvrdost a drsnost povrchu substrátu

Pokud budeme nanášet měkký materiál na tvrdý substrát pomocí technologie CS, dosažitelná adheze závisí především na tvrdosti a drsnosti povrchu substrátu. V našem případě se budeme bavit o kombinaci Cu nástřiku na ocelový substrát. Adheze může být maximalizována synchronizací velikosti nanášených částic s určitou drsností povrchu substrátu. Jelikož je ASI podmíněna plastickou deformací, která je při kontaktu měkkého Cu na poměrně tvrdou ocel velmi malá, ovlivněním topografie povrchu substrátu je snaha ASI zachytit na okrajích vzniklých splatů tím, že budou mít větší kontaktní plochu se

substrátem. Topografii substrátu ovlivňujeme několika technologiemi, jako je např. otryskávání, texturování laserem nebo elektronovým svazkem. Texturování nám umožňuje přímo řídit, jak bude struktura na povrchu substrátu vypadat, kdežto při otryskávání se topografie povrchu tvoří zcela náhodně. [10]

Nejtypičtější metodou zdrsňování povrhu je otryskávání. Tato metoda je momentálně asi nejpoužívanější technologií pro úpravu drsnosti povrchu díky své jednoduchosti a ekonomické nenáročnosti. Požadované jakosti povrchu se dá lehce dosáhnout nastavením správných provozních parametrů a velikosti zrna brusiva, které abrazivně odebírá z povrchu část materiálu. Její nevýhodou je zpevňování povrchu tryskaného materiálu (viz. Obr. 1.5). Částice zajišťující abrazi tvoří, při nárazu na povrch, deformace v povrchových vrstvách substrátu a zvyšují jeho tvrdost do hloubky několika stovek mikrometrů. To negativně ovlivňuje adhezi deponované vrstvy metodou CS na ještě tvrdší substrát než byl původně. Zpevněný povrch substrátu po kontaktu s urychlenou Cu částicí nevykazuje téměř žádné plastické deformace a tím pádem není podmíněna tvorba „jettů“, které by mohly zajistit mechanickou vazbu se substrátem. [10]



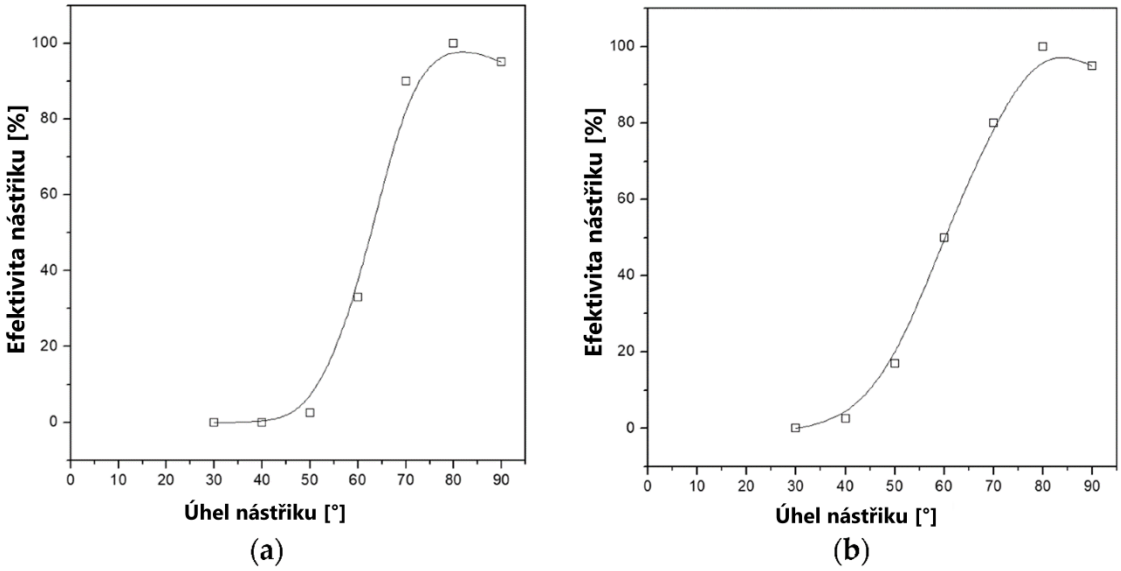
Obr. 1.5 *Profil nanotvrdosti otryskaného povrchu na určitou drsnost ve zpevněném stavu a popuštěném stavu. Převzato a upraveno z [10]*

Další metody, jako je např. texturování laserem nebo elektronovým paprskem, jsou schopny dosáhnout požadované nebo i lepší drsnosti povrchu než otryskávání. Jelikož se ale jedná o termální metody, může docházet ke změnám v mikrostruktuře, nebo k nežádoucí oxidaci. Navíc jsou tyto metody poměrně drahé a technologicky náročné, ale možná v budoucnosti se budou používat jako hlavní nástroje pro úpravu drsnosti povrchu. [10]

1.4.4 Úhel nanášení povlaku

Tento úhel má veliký vliv na dopadovou rychlost částic a následné vlastnosti vzniklého povlaku. Při normálním nastavení se deponuje pod normálovým úhlem vzhledem

k substrátu, tzn. kolmo na něj. Efektivita nanášení depozice, pevnost povlaku a míra adheze se snižuje při zmenšování tohoto úhlu. Snižováním úhlu dojde k rozložení dopadové rychlosti částice na normálovou a tangenciální složku. Čím menší úhel deponování, tím je menší normálová složka rychlosti a tím pádem částice nedosahuje potřebné rychlosti pro dosažení adheze na povrchu. Experimentálně bylo zjištěno, že nejlepší efektivnost nástřiku je dosaženo mezi hodnotami 80-90° (viz. Obr. 1.6). Naopak částice nanášené pod úhly menší jak 40° adherují k substrátu velmi málo. [11; 12]



Obr. 1.6 *Vliv úhlu nástřiku vzhledem na efektivitu nástřiku a) měď (průměr částic 15-37 μm) a b) titan (průměr částic 37-44 μm). Převzato a upraveno z [12]*

1.4.5 Materiály

Možnost nástřiku různých materiálů souvisí především s mírou plastické deformace, kterou mohou poskytnout. Momentálně jsme schopni nanášet povlaky tvořené kovy, keramikou, kompozity a polymery. Krystalické materiály jsou schopny poskytnou více plastické deformace díky pohybu dislokací v jejich mikrostruktuře a tím i dobrou adhezi k povrchu substrátu. Proto jsou hojně využívány kovy, které jsou ve většině případu krystalické. Mimo materiálů s krystalickou mřížkou lze nanášet i amorfní materiály jako je např. keramika nebo amorfní kovy známé taky jako skelné kovy (Metallic glasses). Amorfní materiály nedisponují krystalickou mřížkou. Tím je ztížena tvorba plastická deformace materiálu, která se děje při posunu dislokací a jiných krystalických vad v materiálu, jež je potřebná pro vytvoření vazby částice se substrátem. Amorfní kovy jsou oproti krystalickým kovům velmi pevné a odolné proti korozi kvůli absenci hranic zrn. Navzdory svému křehkému vzhledu jsou pevnější než keramika nebo oxidická skla. [13]

Deformační mechanismus se většinou určuje pomocí dislokačních posunů a interakcí, což úzce souvisí s krystalickou strukturou nanášených kovů. Používané kovové prášky jsou tedy klasifikovány podle krystalické struktury, protože stejné krystalické mřížky mají stejné mechanické vlastnosti. Velmi oblíbené jsou kovy s plošně středěnou kubickou krystalovou mřížkou (FCC), jako jsou Al, Cu, Ni a austenitické oceli. Tento systém obsahuje nejvíce skluzových rovin, které umožňují velké množství plastické deformace.

Další kovy např. Cr, W, Ta a Mb jsou materiály s prostorově středěnou kubickou krystalickou mřížkou (BCC) a Zn, Co, Ti jsou kovy s hexagonální mřížkou (HCP). BCC a HCP mřížka má menší počet skluzových rovin a tím pádem neumožňují tolik plastické deformace jako FCC mřížka, což pro technologii CS není tolik vyhovující. [7]

1.5 Vlastnosti vstupního prášku

Vlastnosti vstupního prášku významně ovlivňují kvalitu nanášeného povlaku. Prášky se vyrábí z různých materiálů a v různých tvarových a rozměrových třídách, kde si zákazník volí tvar a průměrnou velikost částic obsažených v prášku. Při výběru prášku daného materiálu, který máme v plánu nanášet, musíme brát zřetel zejména na jeho sypkost. Při špatné volbě tohoto parametru mohou nastat komplikace v CS systému, konkrétně ucpávání trysky a podavače prášku. Problémy s podáváním prášku nebo ucpáním trysky mohou mít za následek přerušovaný průběh stříkání a nekvalitní povlak. Kvantitativní zkušební metodou pro měření tekutosti prášku je použití Hallova průtokoměrného trychtýře. Hallův průtokoměr je jednoduché zařízení, které pomocí předem kalibrované nálevky určuje průtok sypkých prášků. Je žádoucí mít prášky s dobrou sypkostí a bez satelitních částic, což jsou jemné částice, které ulpívají na větších částicích a způsobují aglomerace a problémy s podáváním prášku. [8]

Vlastnosti práškové suroviny lze obecně rozdělit do dvou kategorií: fyzikální a chemické vlastnosti [8]:

Mezi fyzikální vlastnosti patří:

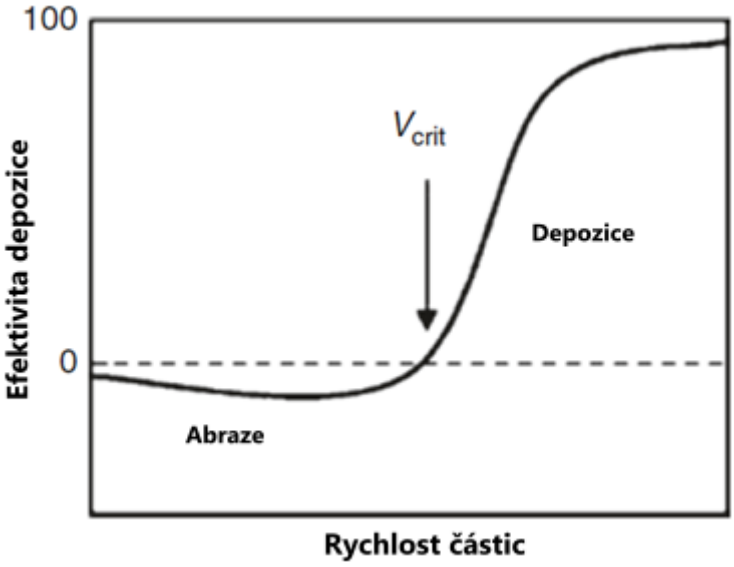
- Velikost částic a zrnitost
- Vnější morfologie (sférická, globulární, hranatá, s/bez satelitů) a vnitřní morfologie (pórovitost)
- Tekutost a zdánlivá hustota
- Tepelné vlastnosti
- Elektrická vodivost/odolnost

Typické chemické vlastnosti prášků zahrnují:

- Chemické složení (čistota, obsah nežádoucích látek jako je kyslík, dusík, atd.)
- Rozložení precipitátů a fází
- Krystalografické informace (tuhé roztoky)

1.6 Účinnost depozice

Účinnost depozice lze jednoduše definovat jako podíl hmotnosti částic, které úspěšně ulpěly na substrátu, a celkové hmotnosti částic výchozího prášku. Tento parametr závisí na mnoha faktorech, který jej ovlivňují. Zejména se bavíme o provozních parametrech, kde vystupuje kritická rychlost dopadajících částic, provozní teploty apod. Dále se jedná o drsnost povrchu substrátu, vzdálenost a úhel nastavení trysky vůči substrátu nebo třeba vlastnosti zvolených materiálů. Z Obr. 1.7 je patrné, že účinnost depozice výrazně roste po překročení kritické rychlosti. Do té doby se částice, vyletující z trysky, odrážejí od substrátu nebo konají abrazi. [7; 8]



Obr. 1.7 *Efekt rychlosti na efektivnost nástřiku. Převzato a upraveno z [7]*

1.7 Výroba prášku

Materiály používané v technologii CS jsou převážně kovové. V počátcích procesu CS v 90. letech 20. století se k optimalizaci rozměrů trysek a parametrů procesu hojně využívaly komerčně čisté měděné vstupní suroviny. Široké použití mědi bylo způsobeno její tvárností a dostupností prášku v požadovaných rozměrových řadách. Výzkum a vývoj této technologie následně zaměřili svoji pozornost na další tvárné materiály, jako je hliník a nikl. Většina těchto kovových prášků byla vyráběna pomocí atomizačních technik a měla kulovou morfologii. Se zavedením komerčních zařízení pro CS povlakování na počátku jednadvacátého století se značné úsilí v oblasti výzkumu a vývoje zaměřilo na vývoj komerčně čistých titanových povlaků, po nichž následovaly titanové slitinové prášky (např. Ti-6Al-4V). V současné době se komunita, zabývající se CS, zajímá o nástřik práškových slitin, jako jsou In 718, MCrAlY a kompozitní prášky ze směsí. [8]

Nové tvrdokovové povlaky s keramikou, které nebylo možné v minulosti nanášet technologií CS, lze nyní úspěšně nanášet pomocí nového designu prášku a výrobních postupů. Vývoj CS zařízení s vyšším tlakem a teplotou plynu navíc znamená, že nyní lze aplikovat obtížně nanesitelné materiály. [8]

1.7.1 Atomizace

Rozprašování je proces rozbíjení taveniny na kapičky, kterého lze dosáhnout různými způsoby. Například rozprašováním přes trysku, naléváním přes rotující disk, elektrostaticky a ultrazvukem. Kovové a slitinové prášky se většinou vyrábějí atomizační cestou, protože kovy se taví při přesně definované vysoké teplotě za vzniku kapaliny s nízkou viskozitou. Atomizace je vhodná pro většinu kovů, jako je cín, olovo, zinek, hliník, hořčík, stříbro, měď, zlato, palladium, kobalt, nikl, železo a ocel, a dokonce i pro žáruvzdorné kovy, jako je wolfram. [8]

Při atomizaci se tavením látky vytvoří objemná kapalina a konečným produktem je pevná látka, která má podobu prášku. Pro CS prášky se široce používá pouze plynová a vodní atomizace. V rozprašovači se kov nebo slitina roztaví v indukčním ohřívači a vytvoří se tavenina, která se pak nalije do kelímku s kalibrovaným vývodem, odkud tavenina klesá jako proud kapaliny do trysky. Nepřetržitý proud kapalného kovu se rozpadá na kapičky působením proudu plynu nebo vody uvnitř trysky. Kov během volného pádu uvnitř komory tuhne a vytváří malé částice prášku. Existuje řada proměnných, které ovlivňují kvalitu prášku vyrobeného technikou atomizace, jako je geometrie trysky, rychlost a tlak atomizačního média, čistota plynu, geometrie atomizačního paprsku, přehřátí taveniny, složení taveniny, viskozita a povrchové napětí taveniny, výška chladicí věže atd. [8]

1.7.2 Rozprašovací sušení (Aglomerace)

Rozprašovací sušení je způsob výroby prášku, který umožňuje aglomerovat různé typy materiálů. Typický proces rozprašovacího sušení se skládá z několika fází: příprava suspenze, rozprašování suspenze, sušení rozprašovaného materiálu a zhušťování částic. Suspenze jemně rozptýlených prekurzorů, organického pojiva a vody se vstřikuje do velké prázdné komory pomocí čerpadla. K rozprašování suspenze, která se následně suší pomocí plynu, lze použít odstředivku nebo trysku. Pevné částice se shromažďují ve sběrači prášku. Prášek vyrobený touto technikou je obvykle porézní a vyžaduje fázi zhušťování, například spékání. Aglomerace a spékání je vhodnější způsob pro prášky, jako jsou oxidy, nitridy a cermety. Prášky vyráběné procesem rozprašovacího sušení zatím nenašly komerční uplatnění v technologii CS, ale několik experimentálních studií uvádí, že tyto prášky lze pomocí CS nanášet. [8]

1.7.3 Spékání a drcení

Příkladem prášků vyráběných spékáním a drcením jsou obvykle oxidy a cermety. Spékané prášky mají nepravidelný tvar, který má špatnou sypkost a rozstřikovatelnost při použití v technologii CS. Spékání obvykle probíhá při teplotách okolo 70% teploty tání daného materiálu. Prášky vzniklé spékáním jsou obvykle husté. WC (karbid wolframu) se vyrábí nauhličováním wolframu s následným drcením a prosévánim, aby se dosáhlo požadovaného rozměrového rozsahu. Rozdrcený prášek se pak mísí s Co a organickým pojivem a slinuje se při snižující se teplotě. [8]

1.7.4 Hydrogenace – Dehydrogenace

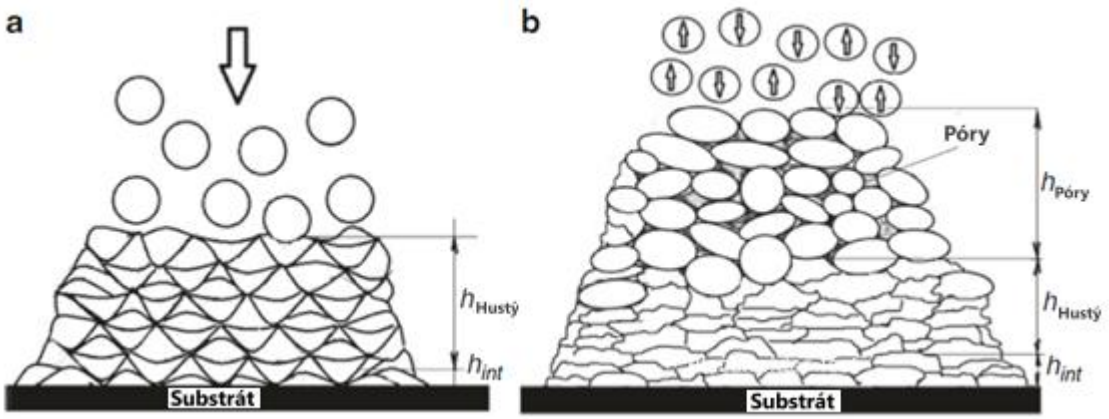
Hydrogenace-dehydrogenace (dále jen HDH) je chemický proces, který se široce používá k výrobě prášku titanu a jeho slitin. Výrobní náklady na tento prášek jsou mnohem nižší než na plynem atomizovanou titanovou surovinu. Typická morfologie prášků vyráběných procesem HDH je nepravidelná. Úroveň nečistot v titanu je zásadní, protože může ovlivnit mechanické vlastnosti konečného výrobku. [8]

Při procesu HDH se surovina nejprve vloží do hydrogenační jednotky a materiál se zahřívá ve vodíkové atmosféře. Výsledkem reakce je tvorba hydridu titanu (TiH_2). Tato křehká sloučenina se rozdrtí na jemnější částice. Jemné částice se vracejí zpět do hydrogenační jednotky k dehydrogenaci. Částice se umístí do vysokého vakua a zahřívají se, aby se z nich během vratné reakce uvolnil vodík. Prášek se poté prosévá, aby se odstranily všechny spečené částice. Morfologie prášku je v tomto procesu ovlivněna výchozími

surovinami. V současné době existují tři zdroje surového titanu: tepaný titan, titan redukovaný sodíkem nebo hořčíkem. [8]

1.8 Druhy CS systémů

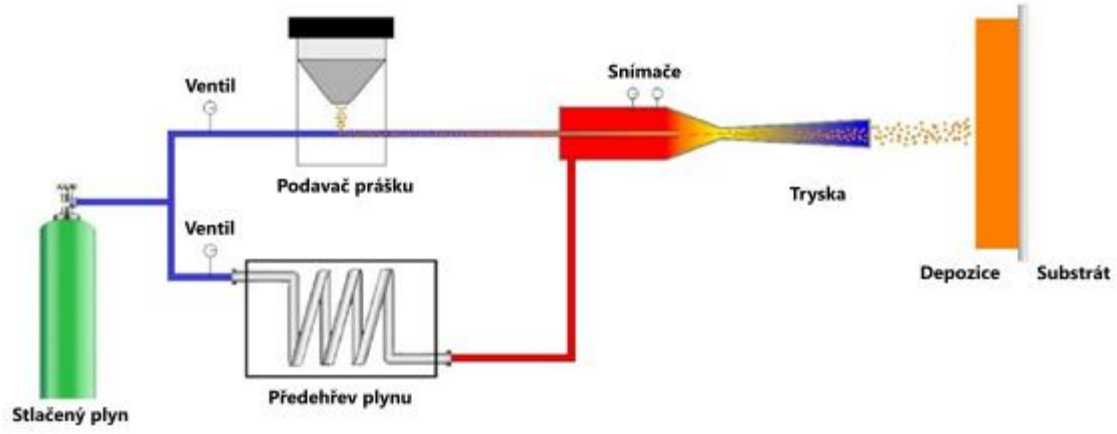
CS proces můžeme rozdělit do dvou kategorií v závislosti na tlaku pracovního plynu: vysokotlaký CS (pracovní tlak přes 1 MPa) a nízkotlaký CS (pracovní tlaky do 1 MPa). Tento rozdíl v pracovních tlacích markantně ovlivňuje rychlost nanášených částic a tím pádem i jejich adhezi k povrchu. Jelikož se při práci s vysokotlakým CS (HPCS) částice urychlují vysoko nad kritickou rychlost, dosahují lepší adhezi k substrátu, minimální pórovitosti a nedochází tolik k zpětnému odrazu částic od substrátu (viz. Obr. 1.8). Při užití nízkotlakého CS (LPCS), který je dost technologicky omezen kvůli své přenositelnosti a menší velikosti, je adheze k substrátu menší, ve vyšších vrstvách povlaku se vytváří póry a dochází z části ke zpětnému odrazu částic od povrchu. Pokud se podíváme na deformaci částic, které byly naneseny těmito metodami, tak částice ze systému HPCS je na povrchu substrátu deformována do tvaru „parachute-like“, což zajišťuje výše zmíněnou lepší adhezi než u částic nanesené technologií LPCS, které se na povrchu pouze zploští a nedeformuje se do povrchu substrátu. [7; 11]



Obr. 1.8 *Formování povlaku při vysokotlakém (a) a nízkotlakém (b) CS. Převzato a upraveno z [3]*

1.8.1 Vysokotlaký CS

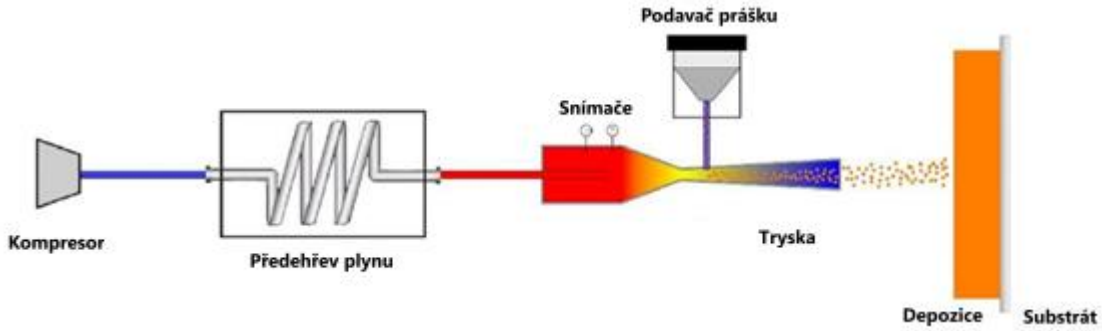
Stlačený hnací plyn je rozdělen do dvou větví, jakmile vstoupí do CS systému. Jedna větev stlačeného plynu (tento plyn je považován za hnací) je dopravován do předehřívacího zařízení, kde se plyn zahřívá na požadovanou provozní teplotu. V druhé větvi zařízení se stlačený plyn (považován za nosný plyn) pohybuje přes zásobník s práškem, kde se plyn nasytí později nanášenými kovovými částicemi. Tyto dvě větve se posléze spojují a oba plyny (jak hnací, tak nosný) se mísí těsně před vstupem do trysky (de-Laval), kde plyn získává vysokou rychlost. Aby bylo zajištěno správné mísení prášku s plyny, je doporučeno, aby tlak nosného prášku byl o trochu vyšší než tlak hnacího plynu. Vysokotlaký CS může pracovat i při tlacích shodných s pracovní oblastí nízkotlakého CS, ale nikoliv naopak kvůli svému speciálnímu designu nízkotlakého CS zařízení. Schéma vysokotlakého CS zařízení je vyobrazeno viz. Obr. 1.9. [11]



Obr. 1.9 *Schéma vysokotlakého CS systému (HPCS). Převzato a upraveno z [11]*

1.8.2 Nízkotlaký CS

Dva viditelné rozdíly mezi vysokotlakým a nízkotlakým CS systémem je zdroj plynu a umístění zásobníku s práškem. Zdrojem u nízkotlakého systému je přenosný kompresor na rozdíl od vysokotlakého systému, kde zdrojem plynu byla tlaková nádoba s plynem. Zásobník s práškem je umístěn do oblasti vyústění trysky (divergentní oblast), tzn. do míst kde plyn je již urychlen na vysokou rychlost a prášek lze mísit s plynem při atmosférickém tlaku. Tyto rozdíly dělají nízkotlaký systém flexibilnějším a mnohem levnějším, ať už je řeč ohledně ceny vybavení systému nebo procesních nákladech. Nízkotlaký systém je ideálním nástrojem pro opravy poškozených součástí díky své jednoduchosti konstrukce a možnosti přenosu zařízení z jednoho místa na druhé. Nicméně rychlost částic nízkotlakého systému je mnohem menší než u vysokotlakého CS. Tento fakt limituje nízkotlaký CS na použití pouze určitých materiálů (např. Al a Cu). Schéma nízkotlakého CS zařízení je vyobrazeno viz. Obr. 1.10. [11]



Obr. 1.10 *Schéma nízkotlakého CS systému (LPCS). Převzato a upraveno z [11]*

1.9 Použití

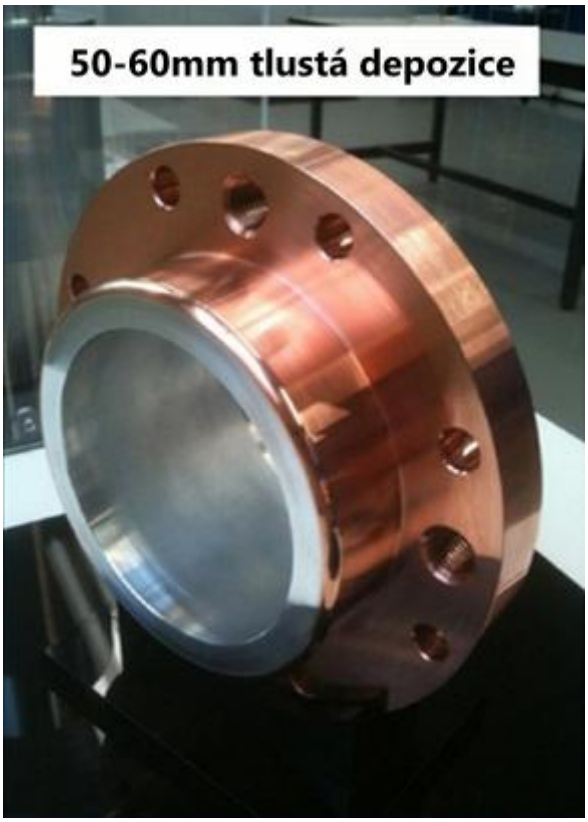
Cold spray je hojně používán jako povlakovací technologie v mnoha odvětví průmyslu zejména v leteckém a automobilním průmyslu, energetice, medicíně, ale i vojenství. Povlaky vytvořené technologií CS zaručují vysokou protekci vůči vysokým teplotám, korozi, erozi, oxidaci nebo chemickým látkám, a to díky možnosti deponovat širokou škálu materiálů, jako je např. Al, Cu, Ni-Al, MMCs a další superslitiny, na substrát. V poslední

době je CS úspěšně používán jako aditivní technologie pro výrobu jednotlivých součástí nebo opravu poškozených kovových součástí. Tento vynález vnáší nové světlo do aditivních technologií a značně rozšiřuje její možnosti použití. [11; 14]

1.9.1 Aditivní výroba

Aditivní výrobní technologie jsou ve velké míře využívány na výrobu 3D modelů vrstvením materiálu. Komplexní a multifunkční součásti mohou být jednoduše vyrobeny za předem definovaný časový úsek a téměř bez jakéhokoliv odpadu. Tento styl výroby je velice ekonomický vzhledem na výrobní čas produktu a také spotřebovaný materiál. [14]

Jakožto nový člen v rodině aditivních technologií má „cold spray additive manufacturing“ (dále jen CSAM) všechny výhody CS technologie. V porovnání s ostatními technologiemi, které jsou dobře prozkoumané a využívané v aditivní výrobě, jako je např. „laser beam melting“ (LBM), „electrone beam melting“ (EBM) a laser metal deposition (LMD), CSAM má unikátní výhody. Jeho největšími výhodami oproti ostatním technologiím je kratší pracovní čas, neomezená velikost produktu, vysoká flexibilita a vhodnost pro opravu poškozených součástí. Víceméně je CSAM vhodný pro nanášení materiálů s reflektivním povrchem (Cu a Al), které jsou velkou výzvou pro technologie na laserové bázi. CSAM však má i několik nevýhod. Produkty vytvořené touto technologií jsou v nedokončeném stádiu. Nanášený materiál má drsný povrch a je dobré jej následně opracovat. Navíc CSAM povlaky mají horší mechanické vlastnosti, kvůli procesu nanášení, kdy se částice plasticky deformují na povrchu. Následným tepelným zpracování je možno dosáhnout požadovaných mechanických vlastností. Názorná ukázka výroby dílů pomocí technologie CSAM viz. Obr. 1.11. [11]



Obr. 1.11 *Měděná příruba vyrobená technologií CSAM. Převzato a upraveno z [11]*

Momentálně je CSAM používán primárně na výrobu rotačních součástí jako jsou stěny válce motoru, trubky nebo příruby. Dále je možno vyrábět komplexní struktury např. žebrování chladičů. Je také dosti používán na opravu poškozených součástí díky jeho vysoké flexibilitě a minimálním nepříznivým účinkům na podkladový materiál pří nanášení materiálu a zachování jeho původních vlastností. Touto technologií se opravují zkorodované a mechanicky poškozené součásti především v leteckém průmyslu, kdy jsme schopni součást uvést do použivatelného stavu, ušetřit hodně času a zdrojů, které by jinak byly potřeba na výrobu nového komponentu. [11]

1.9.2 Spojování různých materiálů

Technologie CS se často používá pro spojování různých lehkých nesourodých materiálů, zejména kovů a polymerů. Získala význam v oblasti výroby různých hybridních struktur a mechanismů pro strojírenské a jiné aplikace. V leteckém a automobilovém průmyslu přinesla tato technologie revoluci ve využití lehkých materiálů, které se zde začaly ve velké míře používat v různých kombinacích. Homogenní rozložení vlastností materiálů v hotovém dílu s odpovídající pevností, hospodárnost a snížení hmotnosti konečného výrobku jsou některé z důležitých výhod tohoto procesu. Ve srovnání s konvenčními postupy spojování se technika CS vyvinula jako alternativní řešení pro takové aplikace, kde je potřeba pracovat s velmi nízkou pracovní teplotou. [14]

1.9.3 Využití v biomedicíně

Rostoucí poptávka antikorozních a biokompatibilních povlaků v oblasti biomedicínských věd vedla ke vzniku různých technik nanášení. CSAM je všestranná a nákladově efektivní modifikace povrchu, která se široce používá v medicíně k výrobě geometricky složitých tvarů. Některé z běžných výrobků, konkrétně zubní implantáty, kloubní protézy, chirurgické nástroje, umělé orgány, tkáňové skelety, umělé svaly a šlachy, jsou vyráběny technologií CSAM. Farmaceutický průmysl nezůstává pozadu a je do značné míry závislý na aditivních technologiích, kvůli několika slibným vlastnostem, jako je zkrácení doby výroby, zvýšení produktivity, nákladová efektivita, přizpůsobení a personalizace produktů. Některé z běžných materiálů, jako je Ti a jeho slitiny, Cu, Ta, Co-Cr a Ni, se široce používají na různých biomedicínských zařízeních. Tyto skupiny materiálů mají lepší mechanické, chemické a biologické vlastnosti. Ti a jeho slitiny se používají již desítky let díky své antikorozní a biokompatibilní povaze. Od příchodu pandemie COVID-19 se zájem výzkumníků a metalurgů přesunul k použití mědi a jejích slitin pro biomedicínské aplikace kvůli jejím antivirovým a antimikrobiálním vlastnostem. Slitiny Co-Cr a niklu mají vyšší odolnost proti opotřebení při značné tuhosti. Keramické povlaky hrají významnou roli také v biomedicínských aplikacích díky své odolnosti proti korozi a opotřebení, rázové houževnatosti a antimikrobiálním vlastnostem. [14]

1.9.4 Antivegetativní úprava povrchu

„Biofouling“ lze definovat jako růst mikroorganismů (rostliny, řasy atd.) na površích součástí, které jsou ve styku s vodou, který svou přítomností poškozují, znehodnocují jej a zamezují správné funkci tohoto předmětu. Konkrétně jde o trupy lodí a ponorek, přívody vody, potrubí, mříže na odtocích rybníků atd. V případě lodní techniky „biofouling“ zhoršuje třecí vlastnosti povrchu lodí. S tím je spojeno horší manévrování, větší spotřeba paliva při rozjezdech a brždění, což snižuje účinnost stroje. Proto je nutné kontrolovat a popřípadě bránit tvorbě biologického znečištění. Skupina výzkumníků, biologů a námořních inženýrů studovala vliv biologického znečištění na námořní konstrukce a vyvinula některé metody proti znečištění, které výrazně zlepšují celkovou výkonnost. V současné době je široce uznávanou protihnilobnou (antifouling) metodou technologie CS s použitím Cu povlaků a slitinami na Cu bázi. [14]

2 Technologie mikroobrábění

Mikroobrábění, které vzniklo v polovině 20. století, se stalo špičkovou metodou, která mění náš pohled na výrobu malých součástek. Mikroobráběním se obvykle označují přesné dílčí výrobní procesy v mikrometrovém měřítku, které jsou nezbytné pro výrobu vysoce přesných mikrosoučástek, jež jsou potřebné v elektrotechnice, zdravotnictví, leteckém a kosmickém průmyslu a dalších rozvíjejících se odvětvích. Možnosti výroby se neustále zlepšují díky pečlivému návrhu nástrojů a procesů, které si poradí s rozměry a tolerancemi, se kterými si tradiční obrábění neporadí. [15]

Mikroobrábění lze zařadit do kategorie nekonvenčních technologií obrábění. Tyto postupy lze definovat jako skupinu procesů, které odstraňují přebytečný materiál z obrobku různými technikami využívajícími mechanické, tepelné, elektrické, chemické energie nebo kombinace těchto energií bez použití ostrých řezných nástrojů, které se používají při tradičních výrobních technikách. [16]

Výroba malých prvků či součásti pomocí konvenčních obráběcích procesů (jako je např. frézování, soustružení, vrtání atd.) má svá omezení, jako je velikost nástroje, opotřebení nástroje, přímý kontakt mezi nástrojem a obrobkem a tepelné účinky (tepelná zbytková napětí, mikro/nanotrhliny atd.) v důsledku vzniku tepla při obrábění. [17]

Nekonvenční obráběcí procesy, které se dnes hojně využívají, lze charakterizovat mechanismem úběru materiálu, druhem energie, která se podílí na úběru materiálu, formami úběru materiálu, typem a materiálem nástrojů atd. Kromě toho k různým aspektům, které jsou zodpovědné za správný výběr nekonvenčních metod obrábění, patří fyzikální parametry procesů, schopnost procesů obrábět požadovaný materiál a výrobek s požadovanou geometrií, rozměry a velikost obráběného výrobku, použitelnost procesu, proveditelnost, provozní charakteristiky a také ekonomická stránka příslušného procesu. [16]

Mikroobrábění, které tedy patří do nekonvenčních metod obrábění, lze rozdělit do několika kategorií [15]:

- Mechanické (obrábění proudem abraziva, vodním paprskem, magnetické abrazivní finišování, atd.) - *metoda používaná v přesném strojírenství k vytváření malých detailních prvků na obrobcích. Má zásadní význam pro vysoce přesná odvětví, jako je elektrotechnika a medicína, protože umožňuje realizovat miniaturní díly s vynikající přesností a kvalitou povrchu.*
- Termální (elektroerozní, elektronovým paprskem, laserem atd.) - *vysoce přesná metoda pro zpracování materiálů, které jsou náročné na obrábění. Intenzivní a soustředěný zdroj energie se používá k úpravě nebo odstranění materiálů a vytvoření složitých detailů.*
- Chemické a elektrochemické - *metody, při nichž se používají chemické a elektrochemické reakce pro přesný úběr materiálu a odpovídající povrchovou úpravu.*
- Hybridní (kombinované elektrochemické broušení, elektrochemické výbojové obrábění, atd.) - *synergie různých technik obrábění, která se vytváří za účelem zlepšení celkového procesu mikroobrábění.*

V této práci se budeme věnovat pouze dvěma technologiím mikroobrábění a to obrábění elektronovým paprskem a laserem. Pomocí těchto technologií se dají efektivně vytvářet povrchové struktury na substrátu vzorku a tím ovlivnit adhezi mezi substrátem a depozicí nanesené pomocí technologie CS.

2.1 Strukturování povrchu elektronovým paprskem

V této kapitole budou popsány základní informace o elektronovém paprsku a technologiích využívající elektronový paprsek pro modifikaci povrchu substrátu. Tyto technologie se nazývají *„Svařování elektronovým paprskem“* (electron beam welding - EBW), *„Elektronový paprsek Surfi-sculpt“* (Electron beam Surfi-sculpt) a *„Tavení elektronovým paprskem“* (Electron beam melting - EBM). Tyto procesy využívají stejný zdroj tepla, kterým je elektronový paprsek, ale zásadně se liší použitím. Zatímco Surfi-sculpt je technologií primárně pro úpravu povrchu substrátu, EBW se zaměřuje na svařování materiálů a EBM na tavení a přetavování povrchu substrátu atd. Technologie EBW a EBM nejsou přímo určeny na strukturování povrchů, ale modifikací procesních parametrů lze pomocí těchto technologií dosáhnout žádoucích úprav substrátu.

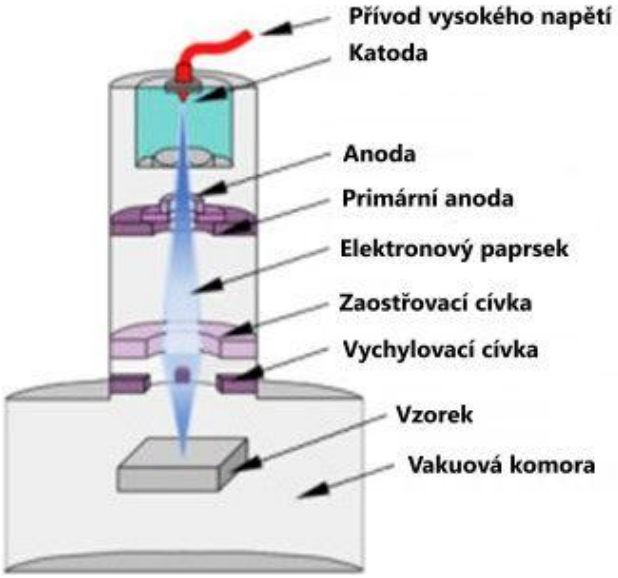
2.1.1 Elektronový paprsek

Pokud se zamyslíme nad fyzikálními vlastnostmi procesu využívající elektronový paprsek, může se zdát překvapivé, že teplo pro tento typ technologie je zajišťováno kinetickou energií částic, které patří k nejlehčím částicím vyskytujícím se ve hmotě. Skutečnost, že číselná hodnota klidové hmotnosti elektronu je pouhých $9{,}1 \cdot 10^{-28}$ g nebo že elektron je asi 1836krát lehčí než stejně nabitá částice protonu, je stejně jako většina atomových rozměrů mimo naše každodenní chápání. Zdánlivou nevýhodu použití částice o malé hmotnosti pro proces přeměny kinetické energie vynahrazuje jedna z nejdůležitějších vlastností elektronu: nese elektrický náboj. Jeho velikost je $1{,}6 \cdot 10^{-28}$ As a vede ke vzniku paprsku. Mnohem důležitější je skutečnost, že tento náboj umožňuje urychlovat elektrony elektrickým polem tak účinně, že nakonec získají množství energie potřebné k fázovým přeměnám kovů (lokální natavení materiálu). [18]

Je dobře známo, že elektrony se nacházejí v obalech obklopujících atomy, v nichž se nacházejí na určitých energetických hladinách. V případě kovů jsou však vnější elektrony vázány na jádro atomu jen slabě. Takové elektrony se mohou víceméně volně pohybovat po celé krystalové mřížce, což dává kovům jejich vynikající elektrickou vodivost. Tyto elektrony však nemohou uniknout z povrchu kovu, protože jsou vázány na krystalovou mřížku potenciální bariérou, kterou lze překonat pouze tehdy, je-li dodána dodatečná energie. Technicky nejspolehlivějším způsobem dodání této energie je zvýšení teploty kovu. Tím se zvýší energie volných elektronů, takže mohou překonat potenciálovou bariéru a uniknout z povrchu kovu. Tímto procesem tepelné emise se kov stává zdrojem elektronů a přivedením záporného napětí může být zdrojem elektronového paprsku. [18]

Všechny procesy a zařízení související s technologií elektronového svazku se vyznačují využitím výkonných generátorů elektronového svazku - elektronových děl, s výkonem svazku až do max. 100 kW. Elektronový svazek emitovaný z wolframové katody, která je nejběžnější přímo vyhřívanou katodou, je urychlován vysokým napětím v rozsahu 10-200 kV na rychlosti přes 100 km/s. V generátoru elektronového svazku se elektrony

emitované katodou seskupují do svazku pomocí urychlujících a fokusujících elektrostatických polí. Tento úkol plní generátor svazku, který se skládá z katody, řídicí elektrody a anodové membrány umístěné na zemském potenciálu. Paprsek vychází přes anodovou membránu a šíří se v kuželovitém tvaru, dokud nevstoupí do magnetického pole fokusační čočky. Po zaostření soustavou zaostřovacích čoček proudí elektrony soustavou vychylovacích cívek, kterými jsou elektrony elektromagneticky vychylovány a mohou být zacíleny do požadovaného místa na součásti. Schéma zařízení elektronového paprsku je zobrazeno viz. Obr. 2.1. [19]



Obr. 2.1 *Schéma stroje produkující elektronový paprsek pro svařování a modifikaci povrchu. Převzato a upraveno z [19]*

2.1.2 Svařování elektronovým paprskem

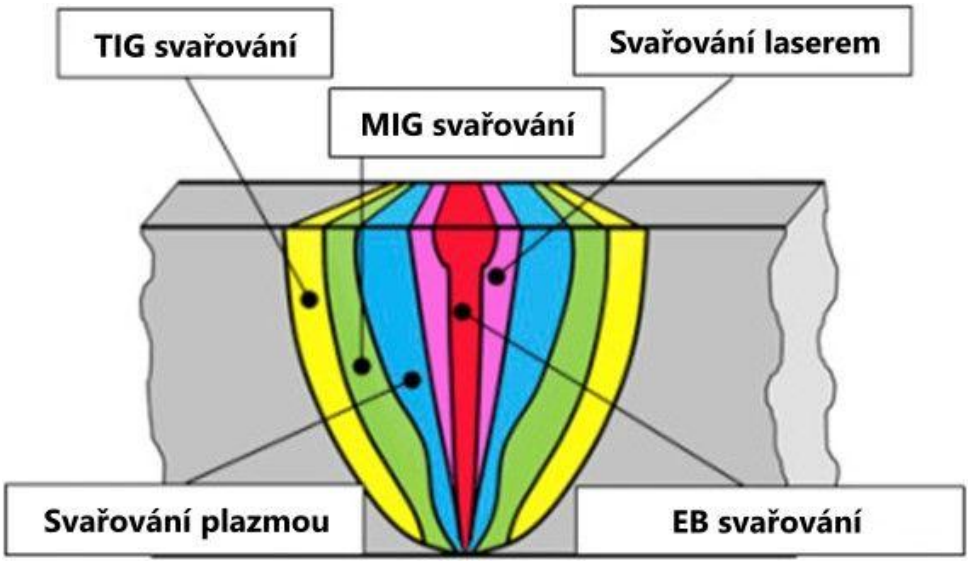
Ačkoli je samotná technologie známá již více než 60 let, v posledním desetiletí roste zájem jednotlivců z oblasti vědy a průmyslu. První zaznamenanou demonstrací v roce 1879 provedl sir W. Crookes a dokázal, že elektronový paprsek může tavit kov. Sir Crookes roztavil platinovou anodu v katodové trubici. Téměř o dvacet let později, v roce 1897, J. J. Thompson ukázal, že katodové paprsky jsou ve skutečnosti proudem elektronů. Zdá se, že první vážný pokus o využití elektronového paprsku jako nástroje pro tavení zaznamenal Pirani v roce 1907. První pokus s vrtáním otvoru o průměru 7 mm v platinové cloně elektronovým paprskem, stejně jako první svařování elektronovým paprskem, provedl K. H. Steigerwald v roce 1949. Koncentrovaný svazek elektronů byl poprvé použit ke svařování ve vakuové komoře v padesátých letech 20. století v Německu a ve Francii. [19]

Svařování elektronovým svazkem probíhá spojováním kovových materiálů roztavením plochy svarového spoje. Svařování nejčastěji probíhá ve vakuu, což napomáhá s fokusací paprsku, kdy elektrony paprsku nekolidují s jinými částicemi obsažené v atmosféře pracovní komory a tím dochází k zamezení samovolného vychylování paprsku. Další výhodou vakua v pracovní komoře je ten, že není potřeba řešit otázku oxidace svaru. Tím pádem nejsou potřeba žádné inertní plyny ani jiné přídavné látky pro ochranu svaru. Při svařování se využívá velmi vysoké hustoty energie paprsku a to až 10^7 W·cm^{-2} v ohnisku

paprsku, což umožňuje této technologii vytvářet velmi hluboké a úzké svary s malým tepelným ovlivněním okolního materiálu a případné deformace součásti. Dobře se používá v sériové výrobě, kvůli jednoduché modifikaci parametrů svařování a automatizaci procesu. [18; 19]

Elektronový svazek je schopen svařovat součásti technikou klíčových otvorů od 0,01 mm do 250 mm tloušťky oceli a až do 500 mm tloušťky hliníku. Svařování elektronovým svazkem je univerzální technologie. EBW lze například vzájemně spojovat různé druhy oceli a také jinými metodami svařování těžko svařitelné kovy: žáruvzdorné kovy (wolfram, molybden, niob) a chemicky aktivní kovy (titan, zirkonium, berylium). Svařování elektronovým svazkem je rovněž schopno spojovat různorodé kovy. Situace však může být složitější, pokud je třeba spojit zcela odlišné kovy (např. chemickým složením, tepelnou vodivostí, vlastnostmi při tuhnutí, koeficientem tepelné roztažnosti atd.). [19]

Vysoká hustota přiváděného tepla a úzký svar způsobují, že svařování elektronovým svazkem je doprovázeno malými deformacemi obrobku. Úroveň deformací je ve srovnání se svařováním TIG, MIG a plazmovým svařováním snížena (viz. Obr. 2.2), takže pro mnoho praktických aplikací lze eliminovat dodatečné dokončování svaru. Množství tepla potřebného k roztavení svarového kovu a tepelné ztráty při svařování určují celkové množství tepla, které musí být dodáno zdrojem tepla, aby bylo možné vytvořit svar. Pokud jde o tepelné ztráty spojené se svařovacím procesem, má elektronový paprsek oproti jiným zdrojům tepla značnou výhodu. Při porovnávání svařovacích procesů laserovým a elektronovým paprskem lze předpokládat, že u pevnolátkových laserů se při svařování využije přibližně 4 % a u vláknových nebo diskových laserů přibližně 25-50 % (vláknové dodané energie. Účinnost zařízení na bázi elektronového paprsku se pohybuje mezi 60 a 70 %. Účinnost svařování laserovým paprskem však silně závisí na fyzikálních vlastnostech a chemickém složení výchozích materiálů, jakož i na odrazivosti povrchu. [19]

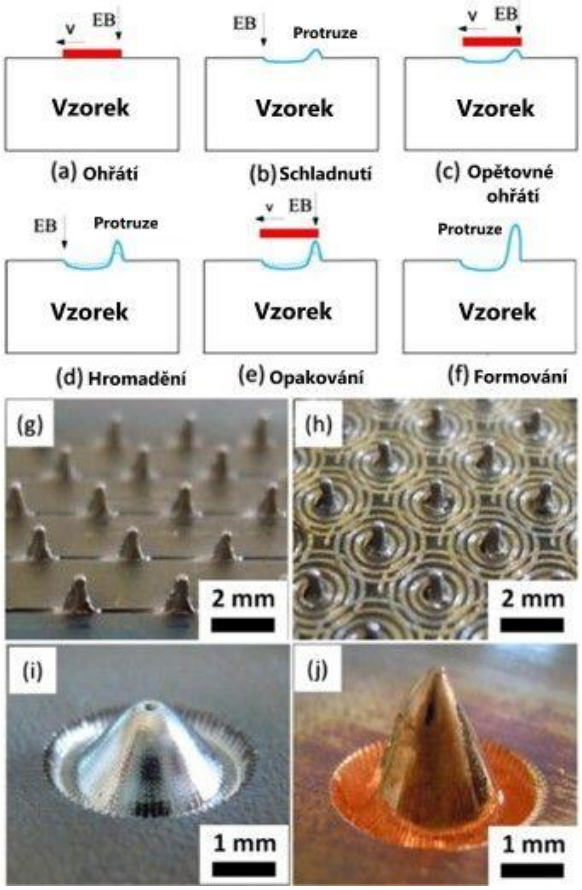


Obr. 2.2 *Geometrie tupého svaru vyrobeného různými technologiemi svařování. Převzato a upraveno z [19]*

2.1.3 Technologie Surfi-sculpt

Elektronový paprsek Surfi-Sculpt je nová technologie strukturování povrchu, kterou od roku 2004 vyvíjí The Welding Institute (TWI) pro pokročilé aplikace v mnoha oblastech, například pro spojování kompozitních materiálů s kovy, předúpravu povrchů pro povlakování a výrobu hydrodynamicky vylepšených povrchů. [20]

Při tomto procesu je elektronový paprsek vychylován řízeným magnetickým polem, které umožňuje umístění paprsku v cílových polohách na povrchu kovu. Při pohybu paprsku podle předem definované trajektorie, frekvence snímání a tepelného toku dochází k efektu, kdy roztavený kov zpočátku proudí v opačném směru než se pohybuje paprsek, v důsledku povrchového napětí a tlaku par roztaveného kovu. Následně po průchodu paprsku materiál ztuhne za paprskem. Tento proces se na stejném místě několikrát opakuje, aby se rychle vytvořil výstupek (viz. Obr. 2.3). [20]



Obr. 2.3 *Ilustrace procesu Surfi-Sculpt (a-f) a ukázka typů paternů. Převzato a upraveno z [20]*

Vzhledem k tomu, že proces Surfi-Sculpt prokázal potenciál pro použití při vysokovýkonném mikroobrábění pro spojování kovových a kompozitních materiálů, předúpravu povrchu pro nanášení povlaků, povrchy s nižším třecím odporem, hydrofobních povrchů, byla pomocí elektronového paprsku Surfi-Sculpt zpracována široká škála materiálů, včetně slitin titanu, oceli a mědi. Velikost vytvořených výstupků se pohybuje od 10 µm do 20 mm a lze zhotovit složité tvary a vzory. Proces při použití vysokofrekvenční

magnetické řídicí cívky je velmi výkonný a vytváření struktur o výšce 1,5 mm trvá jen asi 10 s. [20]

2.1.4 Tavení elektronovým paprskem

Tavení elektronovým svazkem (Electron beam melting, neboli EBM) nebo tavení práškového materiálu elektronovým svazkem (Electron beam powder-bed fusion, neboli EB-PBF) je proces aditivní výroby (Additive manufacturing, neboli AM) s práškovým materiálem. Tento proces je založen na selektivním tavení kovového prášku pomocí elektronového svazku. Proces EBM se používá pro hromadnou výrobu v leteckém a lékařském průmyslu pro širokou škálu komponent, které jsou drahé nebo obtížně vyrobitelné jinými konvenčními výrobními postupy nebo postupy. Příkladem průmyslových výrobků jsou lopatky turbín, kola turbodmychadel, ventily pro spalovací motory a implantáty na míru s vysokou biokompatibilitou. [21]

Systém EBM je založen na principu činnosti elektronového mikroskopu, zatímco hlavní hardware je podobný svařovacímu systému. Společnost Arcam AB (Švédsko), založená v roce 1997, vyvinula první technologii EBM. Hardware stroje se skládá z horního sloupu a zpracovatelské komory. Horní sloup obsahuje elektronové dělo a magnetické čočky. V elektronovém děle emituje elektrony katoda. Katodou může být krystal nebo wolframové vlákno, které se zahřívá a emituje elektrony. Elektrony jsou urychlovány anodickým potenciálem 60 kV až na 40 % rychlosti světla. Magnetické čočky zaostřují a vychylují svazek elektronů. Aby se zabránilo samovolnému vychylování elektronů, probíhá celý proces ve vysokém vakuu. Ve zpracovatelské komoře je typický tlak zbytkových plynů kolem 103 Pa a v elektronovém děle 105 Pa. [21]

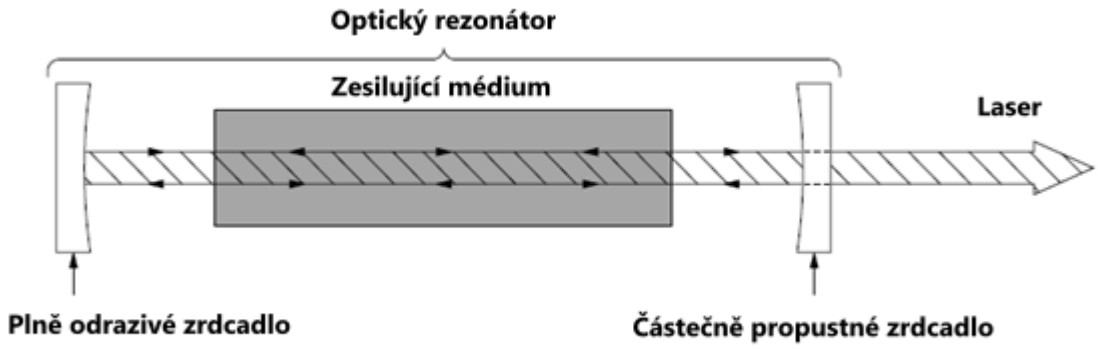
2.2 Mikroobrábění laserem

Strukturování povrchu laserem se ukázalo jako zajímavá metoda pro přípravu funkčních povrchů s různými vlastnostmi, např. tribologickými, hydrofobními a pohlcujícími světlo. Byla použita v několika studiích jako příprava podkladu zaměřená na zlepšení adheze pro termální nástřiky, kam spadá i technologie CS. [22]

Laserové paprsky jako nástroj mají řadu různých vlastností, takže je lze klasifikovat několika způsoby. Jedním ze společných způsobů je popis laserových zdrojů v rámci jejich časových oblastí, protože interakce laseru s hmotou se liší. Zkoumanými průmyslovými vysokovýkonnými laserovými zdroji, jsou kontinuální (cw) laser, pulzní nanosekundový (ns) laser a usp laser. Z hlediska ablace se u cw a ns laserů jedná spíše o teplotní proces s tavením materiálu a následným vyvržením roztaveného materiálu ze zpracovávané oblasti. Naproti tomu ultrakrátké pulzní procesy se mohou na použitou energii soustředit nejen prostorově díky vyšší absorpci, ale i časově. V pikosekundové časové oblasti a níže s vysokou intenzitou mohou nelineární optické efekty změnit interakci mezi laserovým pulzem a materiálem na rozdíl od delších pulzů a výsledkem může být téměř okamžité odpaření materiálu. Při vyšších intenzitách může silná koncentrace energie vést k fázové explozi, kdy tato expanze páry odnáší roztavený materiál pryč od povrchu a posiluje proces ablace. Při vysokovýkonném použití pro obrábění kovů jsou nejmodernější laserové zdroje v blízké infračervené oblasti. [23]

2.2.1 Laser - základní informace

Slovo laser je zkráceným výrazem pro „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, neboli Zesilování světla stimulovanou emisí záření. Laser využívá procesy, při kterých se zesilují světelné signály generované prostřednictvím určitých zdrojů záření. Tyto procesy zahrnují 1) stimulovanou emisi - přírodní efekt, který byl vyvozen z uvažování termodynamické rovnováhy a 2) optickou odezvu (přítomna u většiny laserů), která je většinou zajištěna pomocí zrcadel. Ve své nejjednodušší podstatě se laser skládá ze zesilovacího média (kde dochází ke stimulované emisi) a ze sady zrcadel, které vrací paprsek záření zpět do zesilovacího média, aby se mohl paprsek dále vyvíjet (viz. Obr. 2.4). [24]



Obr. 2.4 *Zjednodušené schéma typického laseru. Převzato a upraveno z [24]*

V nejjednodušší podstatě může být laser pochopen, jako světlo vyzařované svíčkou usměrněné do úzkého paprsku. Za normálních podmínek vyzařuje hořící svíčka světlo ve všech směrech a ozařuje okolní předměty stejně intenzivně, pokud objekty budou všechny stejně vzdálené od tohoto zdroje záření. V případě laseru je záření, které by bylo svíčkou vyzářeno rovnoměrně do okolního prostoru, koncentrováno pouze do jednoho směru. Pokud bychom tedy použili všechno záření ze svíčky a usměrnili jej do malého bodu o průměru asi 3 mm, intenzita záření, ve vzdálenosti 1 m od svíčky, by byla 1 000 000 větší než intenzita světla, kterou normálně lze pozorovat u hořící svíčky. Toto je hlavní podstata, která stojí za technologií laseru. Každopádně, svíčka není zesilovacím médiem, a tedy neexistují lasery, které by využívaly její záření. Pro vytvoření laseru jsou potřeba určité speciální podmínky, aby bylo dosaženo dostatečného zesílení záření a vytvoření laseru. [24]

Materiálů, použitelných jako aktivní média laseru, je nepřeberné množství. Zahrnuty jsou plyny, kapaliny i pevné látky, které byly shledány vhodné pro tuto technologii. Původ fotonů laseru je obvykle na přechodu mezi diskrétní horní a dolní hladinou energetického stavu, který se v danou chvíli vyskytuje v daném médiu, nehledě na jeho skupenství. He-Ne, rubín, CO_2 a barevné lasery jsou nejznámějšími lasery, u kterých toto tvrzení platí. Jsou zde ale i výjimky. Excimerový laser nemá pevně danou spodní laserovou hladinu, polovodičový diodový laser závisí spíše na přechodech mezi elektronovými pásy než na diskrétních stavech a lasery s volnými elektrony nevyžadují kvantové stavy vůbec. [25]

2.2.2 Emise a absorpce světla v kvantové teorii

Moderní interpretace emise a absorpce světla byla poprvé zmíněna Albertem Einsteinem roku 1905 v jeho teorii o fotoelektrickém efektu. Einstein předpokládal, že rozdíl v energii elektronu před a po jeho emisi je rovna energii fotonu, který je během tohoto procesu absorbován. [25]

Tento model absorpce světla byl později rozšířen do dvou směrů panem Bohrem. V prvním rozšíření aplikuje Einsteinovu teorii o fotoelektrickém jevu na elektrony atomů, které nejsou během absorpce fotonu uvolněny, ale nabývají vyšší energie v rámci svého atomu. V druhém rozšíření je aplikována tato teorie na opačný proces emise fotonů kdy by se měla energie elektronů snižovat. Tyto myšlenky dokonale seděly na Bohrův kvantový mechanický model atomu v roce 1913. V tomto modelu se poprvé uvažovalo, že elektrony mohou existovat pouze v sadě pevně daných orbit okolo jádra daného atomu. Ukázalo se, že tyto oběžné dráhy korespondují s energií, kterou elektrony disponují. Myšlenka kvantového přeskoku byla zavedena, aby mohl být vysvětlen přechod elektronů v energetických hladinách obalu atomu. [25]

Množství energie potřebné ke kvantovému skoku závisí na daném kvantovém systému. U atomů se nejčastěji dějí kvantové skoky, které mají energii v rozsahu 1-6 eV po dobu, kdy elektrony ve valenční vrstvě provádí přeskoky. Toto je běžný případ, takže atomy obvykle absorbují a emitují fotony v optické oblasti spektra nebo blízko něj. Přeskoky v energetické vrstvě nejblíže jádra atomu jsou obvykle mnohem náročnější z energetického hlediska a jsou asociovány s fotony rentgenového záření. Na druhou stranu kvantové přeskoky v okolí tzv. Rydbergových energetických hladin, což ve zkratce jsou vnějších elektronové hladiny ležící v blízkosti ionizačního limitu, zahrnují pouze malé množství energie, které koresponduje s infračervenými nebo dokonce mikrovlnnými fotony. [25]

Molekuly mají vibrační a rotační stupně volnosti a jejich kvantové skoky jsou často mnohem menší než kvantové přeskoky ve volných atomech. Totéž obvykle platí i u přeskoků mezi vodivostními a valenčními pásy polovodičů. Velké množství krystalů jsou transparentní ve viditelném spektru, což je znamení, že neabsorbují a ani neemitují optické fotony, protože nedisponují kvantovými energetickými hladinami, aby byli schopny provádět přeskoky ve viditelném spektru. Nicméně barevné krystaly, jako je např. rubín, obsahují nečistoty, které absorbují a emitují optické fotony. Tyto nečistoty jsou velmi často ionty, které mají jak diskrétní energetické hladiny, tak i široké energetické pásy umožňující kvantové přeskoky (rubín dobře absorbuje zelené fotony, a proto se jeví jako červený). [25]

2.2.3 Použití

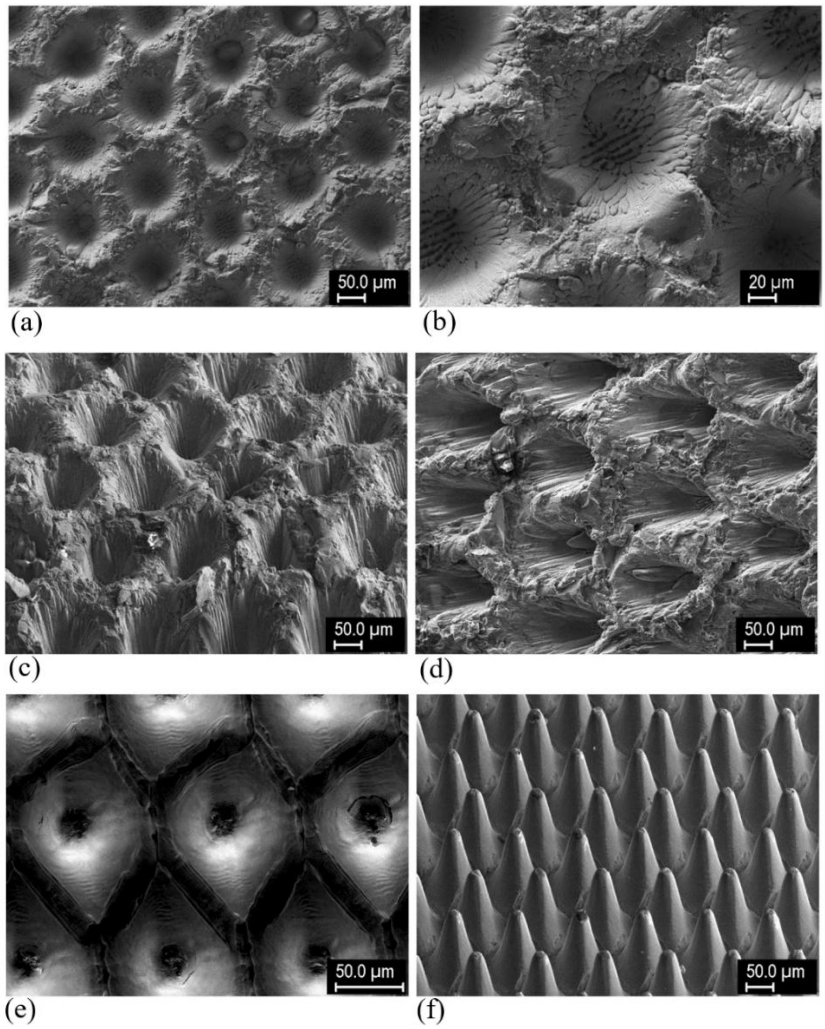
Pokud budeme porovnávat vlastnosti laseru s vlastnostmi ostatních zdrojů světelného záření, můžeme si povšimnout, že hodnoty mnoha parametrů záření laseru ohromně převyšuje hodnoty klasických zdrojů světelného záření. Proto se lasery nepoužívají pro osvětlování ulic, interiérů domů, jako kapesní svítilny nebo ve světlometech motorových vozidel. Lasery, oproti klasickým zdrojům světelného záření, mají užší frekvenční distribuci, nebo mnohem větší intenzitu, nebo mnohem větší stupeň kolimace (soustředění světelných paprsků do úzkého svazku), anebo mnohem menší dobu pulzu. Naopak, kde hojně využíváme laseru jsou čtečky kompaktních disků, skenery v supermarketech, některá

přesná měřící technika, v medicíně jako chirurgické nástroje a také pro operace očí (úprava sítnice). Také jej používáme v komunikačních systémech, radary, vojenská zaměřovací technika a mnoho dalších. Dále se používá v mikroobrábění pro úpravu povrchů součástí, kam spadá gravírování, paternování atd. [24]

2.2.4 Strukturování povrchu laserem

Texturování povrchu je jedním z nejúčinnějších přístupů k modifikaci povrchu pro zlepšení tribologických vlastností technických materiálů. V posledních letech bylo vyvinuto několik technik texturování povrchu. Mezi těmito metodami si laserové texturování povrchu (LST) získalo značný zájem díky své vysoké flexibilitě, vynikající přesnosti texturování a dobré ovladatelnosti. [26]

V průběhu let se vyvinuly různé technologie úpravy povrchu součástí, jako je texturování povrchu laserem (Laser surface texturing – LST), leptání/vrtání iontovým paprskem, litografii, mikrovrtání, elektrochemické obrábění, mechanické texturování, atd. LST vystupuje nad ostatní technologie díky svým originálním vlastnostem a výhodám, pokud se budeme bavit o oblasti texturování povrchu. Hlavními výhodami této technologie je rychlost a efektivnost zpracování povrchu, dobré ovládání používaného nástroje, ekologičnost a možnost vytvářet přesné a komplexní textury na povrchu součásti (viz. Obr. 2.5). Díky těmto vlastnostem je LST používána v mnoha oblastech průmyslu pro zlepšení tribologických vlastností styčných ploch součástí, jako může být např. mechanické uzávěry, pístní kroužky, součásti ložisek, nebo třeba magnetické úložiště dat (HDD). Dále se používá pro zlepšení povrchových vlastností kovových materiálů, ale i keramiky nebo polymerů. [26]



Obr. 2.5 *Ukázka paternů vytvořených laserovou technologií. (a) – důlky, pohled shora, (b) – důlky, detail, (c) – důlky, pohled 45°, (d) – šikmé otvory, (e) – sloupce, pohled shora, (f) – sloupce, pohled 45°. Převzato a upraveno z [22]*

Na základě mechanismu výroby povrchových textur lze momentální technologii LST rozdělit do několika skupin: přímé odstraňování materiálu laserem, tavení materiálu interferencí laseru a formování a paternování materiálu pomocí plastické deformace zajištěné laserovým šokem. Více o těchto principech bude uvedeno níže [26]:

- **LST pomocí řízené laserové ablace:** Laserová ablace je proces ubírání materiálu z pevného povrchu součásti při jeho ozáření laserovým paprskem. Při absorpci energie laseru do ozařovaného materiálu dojde k odpaření části hmoty, což může při určitých podmínkách vést až ke vzniku plazmatu. Touto metodou jsme schopni dosáhnout komplexních povrchových úprav, jako jsou specifické paterny, nebo třeba mikro důlky či rýhy.
- **LST pomocí interference laseru:** Interference laseru, také známá jako „Řízené paternování interferencí laseru“ (Direct laser interference patterning – DLIP), slouží jako další účinný nástroj v odvětví úpravy povrchu, který je schopen vytvářet periodické paterny, prostřednictvím interference koherentního laserového paprsku. Při tomto procesu je povrch materiálu lokálně natavován na místech

největší hodnoty interference paprsku, tzn. v místech největší intenzity paprsku. Na povrchu vzorku lze vytvářet periodické geometrické útvary, jako jsou např. linky, body apod. Mezery mezi jednotlivými prvky paternu závisí na vlnové délce laseru, ohniskové vzdálenosti mezi dvěma danými paprsky, vytvářející danou strukturu.

- **LST pomocí laserových šoků:** Tato technologie úpravy povrchu je pokročilou laserovou technologií, která pracuje na principu vyvolání rázové vlny pomocí laseru, která následně vyvolá kompresní zbytkové napětí doprovázené tvrdnutím povrchové vrstvy na daném vzorku. Texturování povrchu je zajištěno pouze plastickou deformací a není využívána termální energie. Na plochu, která má být ošetřena touto technologií, je nanesen povlak, který zamezuje projití světelných paprsků, aby absorboval energii používaného laseru. Na neprůhlednou vrstvu je ještě vložena transparentní vrstva. Během procesu interaguje laserový pulz s neprůhlednou vrstvou místo se zpracovávaným povrchem a vytváří plazmu. Expanze plazmy je v transparentní vrstvě omezena a dochází ke generaci tlakové vlny (s vysokým maximálním tlakem v řádech GPa), která působí na ovlivňovaný povrch. Jakmile vlna překoná hodnotu meze kluzu v daném materiálu, dojde k plastické deformaci na povrchu vzorku. Jako výsledek může být patern na povrchu ve tvaru mikrodůlků apod.

Intenzita laseru je jeden z nejdůležitějších parametrů při použití LST technologie. Pokud se budeme bavit o šokové metodě texturování povrchu, o které je zmíněno výše, intenzita laseru udává velikost tlakových vln, a tím pádem i míru plastické deformace, vyvolaných při tomto procesu. Výsledkem je morfologie zpracovávaného povrchu a míra zvětšení povrchové tvrdosti ovlivněných ploch na povrchu vzorku. U dalších dvou technologií laserového texturování povrchu (pomocí řízené ablace a interference laseru) se intenzitou laseru zvětšuje energie dodávaná lokálně do místa zpracování, což ovlivňuje výšku, šířku a obecně tvar vytvářených struktur, jako i míru tepelného ovlivnění součásti. [26]

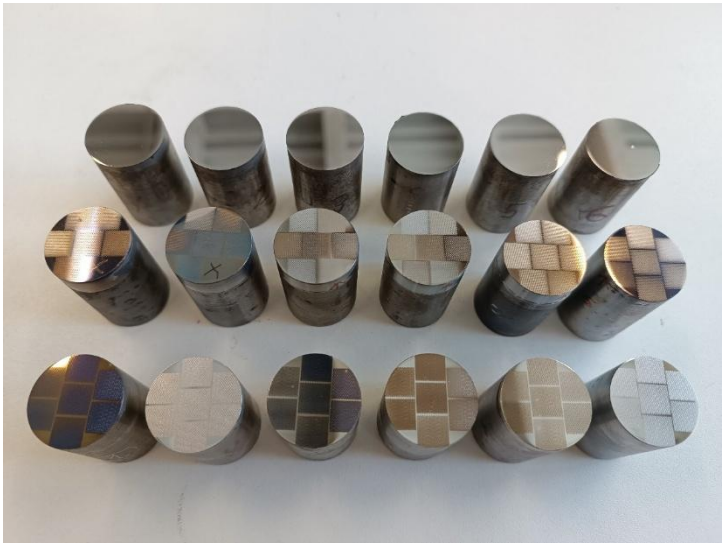
Komerční pulzní lasery mohou být rozděleny podle doby pulzu laseru na mili-sekundové (ms), nano-sekundové (ns), piko-sekundové (ps) a femto-sekundové lasery (fs). V technologii LST hraje doba pulzu laseru významnou roli. Odvíjí se od ní efektivnost vytváření struktur na povrchu, tepelné ovlivnění povrchu kvůli různé době působení laseru na lokální povrch vzorku. Výzkumem bylo zjištěno, že se použitím tyto pulzní lasery liší. Fs laserem lze dosáhnout určitého paternu na povrchu součásti, ale při pokusu o replikaci stejného paternu pomocí ns laseru se výzkumní pracovníci shledali s neúspěchem. Lasery s kratší dobou pulzu (fs a ps lasery) se vyznačují dobrou schopností vytvářet přesnější struktury na povrchu na rozdíl od laseru s delším časovým pulzem. Při kratších dobách pulzu dochází spíše k rychlému odpaření materiálu a malému tepelnému ovlivnění povrchu. Při delších časech pulzu se ovlivňované místo spíše natavuje a vytváří nepřesnější útvary. Navíc dochází k většímu tepelnému ovlivnění oblasti, což může být v některých aplikacích nežádoucí. Fs lasery jsou tedy jedny z nejúčinnějších při strukturování povrchu, ale jsou také dosti drahé na rozdíl od např. ns laserů. [26]

Praktická část

3 Experiment

Náplní praktické části bylo dosáhnout co nejlepší adhezních vlastností spojovaných materiálů při různých parametrech struktur povrchu vytvořených při předpřípravě pomocí elektronového paprsku. V první řadě jsme připravovali vzorky na následné zpracování. Vzorky musely být očištěné a vyleštěné s dobrou kvalitou povrchu, na který se později nanášela vrstva povlaku. Již vyleštěné vzorky dále zpracovával operátor elektronového paprsku. Po konzultaci s operátorem jsme si stanovili požadovaný patern, který se pak snažil nanést na vyleštěný povrch vzorku. Další fází bylo vyhodnocení povrchu pomocí skenovacího konfokálního mikroskopu, díky kterému jsme byli schopni vidět vytvořený patern na substrátu ve 3D i s rozměrovými parametry a dalšími informacemi. Následoval nástřik depozice na předpřipravené povrchy a adhezní testy, které určily míru adheze na rozhraní povlaku a substrátu.

Vzorky byly rozděleny do tří sad (viz. Obr. 3.1) po 6 kusech. Na první sadě vzorků se provedlo pouze broušení a následné leštění povrchu. Druhá i třetí sada byla zaměřena na tvorbu vybraných struktur na povrchu substrátu. Parametry struktur na vzorcích 2. a 3. sady se liší, což byl záměr. Parametry paternu, jako je rozteč jednotlivých bodů, průměr jednotlivých bodů, nebo třeba výšku struktury, jsme se snažili přizpůsobit velikosti nanášených částic. V našem případě se jednalo o Cu částice o průměru 20 – 40 µm. V literatuře [10] je ve výsledcích experimentu uvedeno, že maximální adheze mezi depozicí a substrátem je dosaženo, když hodnota drsnosti povrchu Rz dosahovala cca 0,75krát medián průměru nanášených částic. To by znamenalo, že drsnost povrchu by se měla pohybovat někde okolo hodnoty cca Rz = 22,5 µm. Snažili jsme se tedy přiblížit co nejvíce této drsnosti. Druhá a třetí sada obsahující paterny má tedy odlišné hodnoty drsnosti Rz a dosti podobné struktury na povrchu. Podrobnější výsledky budu uvedeny v následujících kapitolách.



Obr. 3.1 *Použité sady vzorků. Ve vrchní řadě 1. sada s leštěným povrchem. Ve druhé a třetí řadě sady 2 a 3 s paterny na površích.*

3.1 Materiál vzorků

Jako vzorky byly použity polotovary ve formě tyče o průměru 25 mm. Na spodní straně vzorku byl již vytvořen závit pro upnutí při tahové zkoušce. Testované kusy nebyly nijak předem tepelně zpracované. Vzorky byly z materiálu 42CrMo4 neboli podle ČSN 15 142. Jedná se o nízkolegovanou ušlechtilou chrom-molybdenovou ocel k zušlechťování. Tato ocel má vyšší prokalitelnost a je vhodná pro vysoce namáhané součástky. Po zakalení dosahuje tvrdosti přibližně 58 HRC. Do průměru 100 mm lze po zušlechtění docílit pevností nad 1000 MPa při ještě dostatečné houževnatosti. Není náchylná k popouštěcí křehkosti. Kalí se do méně razantního kalicího prostředí, poněvadž je náchylná ke vzniku kalicích trhlin v místech s vrubovým účinkem nebo povrchových vad. V kaleném stavu dobře odolává opotřebení. Patří k nejčastěji používané oceli k zušlechťování. Chemické složení materiálu je zobrazeno viz. Tab. 3.1.

Tab. 3.1 *Chemické složení materiálu vzorků*

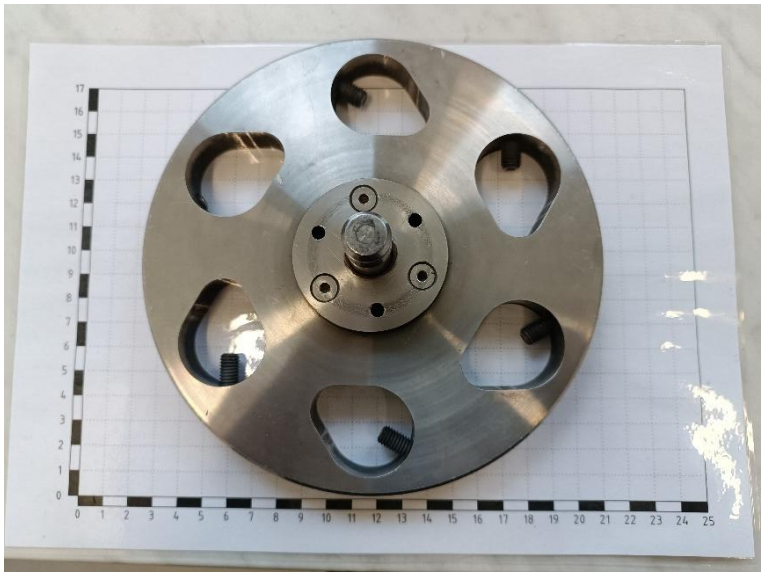
Chemické složení v hmot. %						
C	Si max.	Mn	P max.	S max.	Cr	Mo
0,38-0,45	max 0,4	0,6-0,9	max 0,025	max. 0,035	0,9-1,2	0,15-0,3

3.2 Příprava vzorků

První fází přípravy vzorků bylo očištění testovaného povrchu od zbytků lepidla po předešlých adhezních testech a úprava geometrie a rozměrů vzorků. Jelikož vzorky měly různé výškové rozměry a nebyly geometricky vyhovující, odborný pracovník v dílně na přípravu vzorků opracoval testované kusy na obráběcích strojích dle požadavků operátorů elektronového paprsku a konfokálního mikroskopu. Nároky byly kladeny na stejnou výšku vzorků v jedné sadě a rovinnost testovaného povrchu. S těmito nároky jsou spojeny problematiky upínání vzorků a provozní parametry všech dílčích kroků experimentu, jako je např. dodržení konstantní vzdálenosti vzorku od elektronového děla při předpřípravě povrchu, konstantní ohniskové vzdálenosti při skenování konfokálním mikroskopem a konstantní vzdálenost CS trysky od povrchu vzorku. Tyto požadavky měly ulehčit práci a zpřesnit výsledky experimentu znormalizováním rozměrových a geometrických parametrů v jednotlivých sadách.

V další fázi byly vzorky broušeny a leštěny na automatické brusce LECO GPX 300 (viz. Obr. 3.2). Vzorky byly upnuty do přípravku, který se následně zasunul do vřetene brusky (viz. Obr. 3.3). Jednotlivé vzorky byly zajištěny v přípravku pomocí šroubů. Smysl otáčení stolu brusky a vřetene byl souhlasný.

Obr. 3.2 *Automatická bruska LECO GPX 300*



Obr. 3.3 *Přípravek pro upnutí vzorů*

Při broušení povrchu vzorků byl použit brusný papír od drsnosti P320 až do P4000. Doba broušení vzorku daným papírem o určité drsnosti probíhala po dobu 3 minut. Poté se provedla vizuální inspekce povrchu (rovinnost, drsnost). V případě dostatečné kvality povrchu se přešlo na papír s menší hrubostí. V případě nevyhovující kvality povrchu vzorku se pouze vyměnil brusný papír za nový o stejné hrubosti a operace byla provedena znovu. Tento proces byl opakován do té doby, dokud se nevyčerpala celá škála drsností papíru (od P320 až do P4000),

Po broušení povrchu vzorku se přešlo k jeho leštění. Snahou bylo docílit zrcadlově lesklého povrchu s co nejmenším množstvím vad, jakou jsou například vrypy, škrábance, vydrolené kousky materiálu apod. Nejprve se povrch vzorků leštil pomocí leštícího plátna, na které byla nanesena diamantová leštící pasta s hrubostí 3μm. Po dostatečně vyleštěném povrchu, který mohl obsahovat drobné škrábance, se vyměnilo leštící plátno a nanesla se pasta s hrubostí 1μm. Tento poslední krok sloužil ke konečnému doleštění nedokonalostí na povrchu. Doleštění se i několikrát opakovalo, dokud nebylo dosaženo zrcadlového povrchu s vysokou kvalitou. Doba procesu leštění danou pastou trvala 6 minut. Kondice povrchu vzorků byla kontrolována na světelném mikroskopu, kterým je vybavena metalografická laboratoř. Přehled procesních parametrů je vyobrazen viz. Tab. 3.2.

Tab. 3.2 *Procesní parametry broušení a leštění vzorků*

	Otáčky stolu [min^{-1}]	Otáčky vřetene [min^{-1}]	Přítlak vřetene [N]	Provozní kapalina	Délka cyklu [min]	Smysl otáčení stůl/vřeteno
Broušení	150	120	60	voda	3	souhlasný
Leštění	230	200	60	ethanol	6	souhlasný

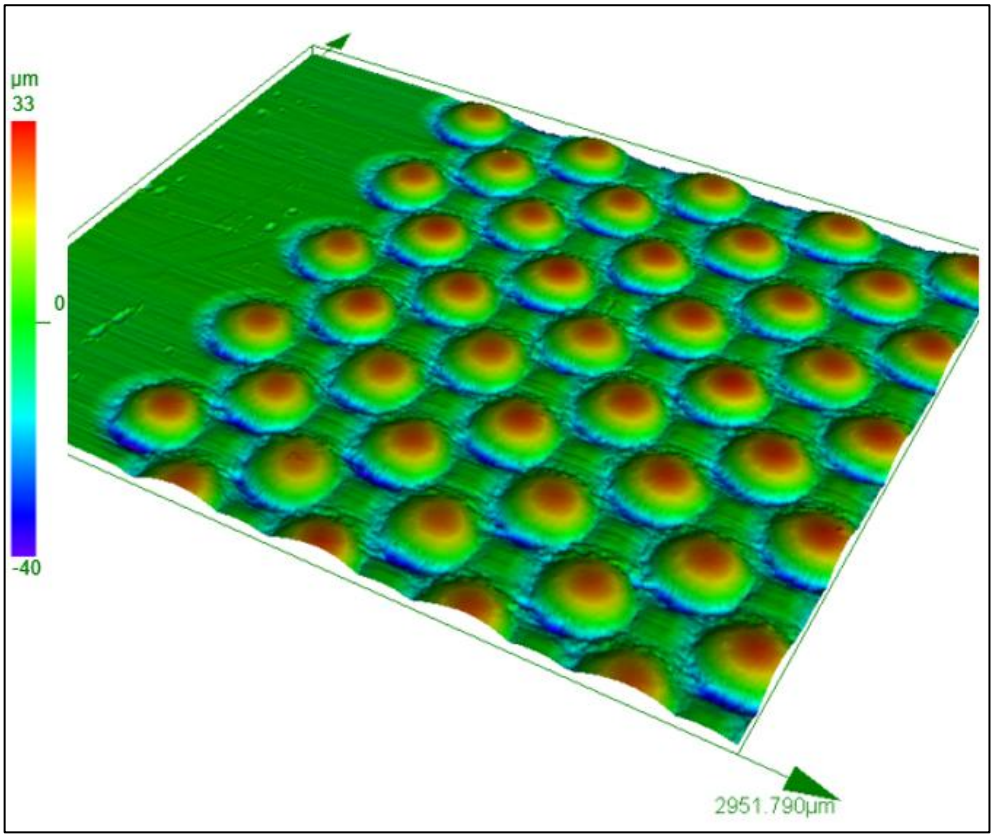
3.3 Povrchová předpříprava vzorků

Povrchová předpříprava vzorků se prováděla pomocí univerzálního zařízení pro svařování a povrchové a tepelné zpracování elektronovým svazkem s označením K26 od firmy *pro-beam GmbH & Co. KGaA*. Přestože stroj není primárně určen na paternování, po úpravě procesních parametrů jsme byli schopni vytvářet na vzorcích vybrané paterny, které se následně zkoumaly.

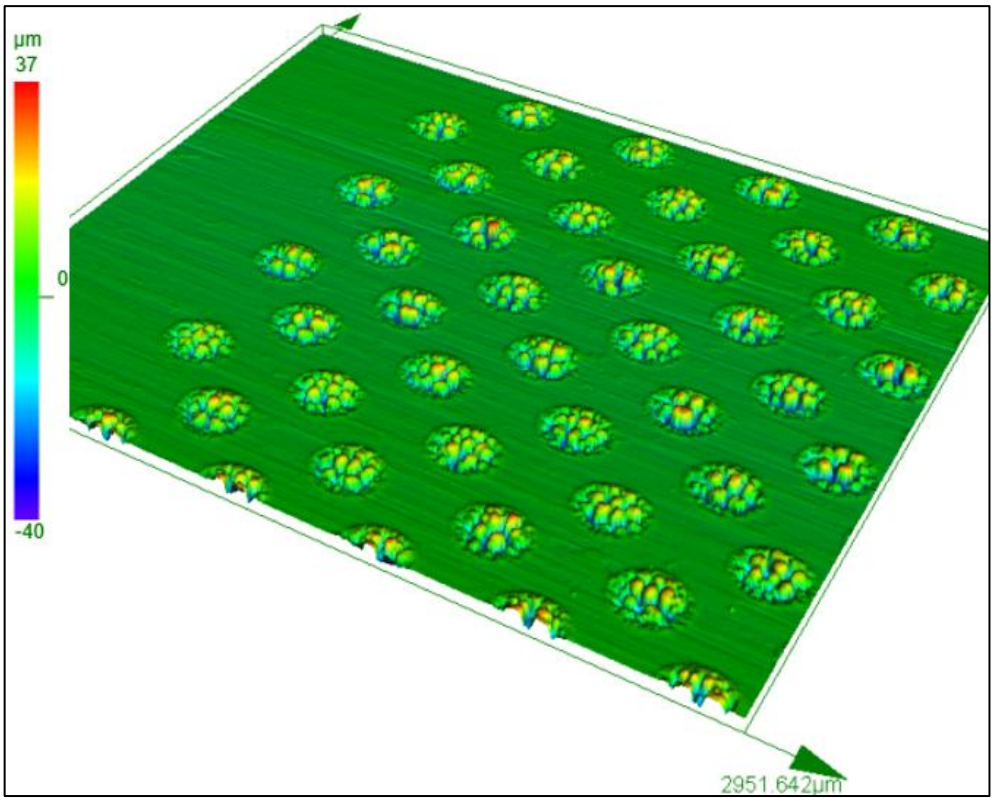
Hlavním účelem předpřípravy povrchu vzorků bylo vytvoření mikrostruktur na povrchu substrátu, které měly zajistit větší kontaktní plochu Cu částice se substrátem a popřípadě zajistit mechanické zaseknutí částice mezi těmito strukturami, což by mohlo vést k větší adhezní pevnosti první vrstvy nástřiku, narozdíl od leštěného povrchu. Předpříprava elektronovým paprskem byla prováděna na sadách vzorků 2 a 3. Po konzultaci s vedoucím této práce bylo dohodnuto vytvoření kopečků na povrchu substrátu těchto sad. Bylo nutno otestovat správnou konfiguraci provozních parametrů elektronového paprsku, abychom dosáhli žádoucího tvaru vytvořených struktur.

3.3.1 Zkušební sada

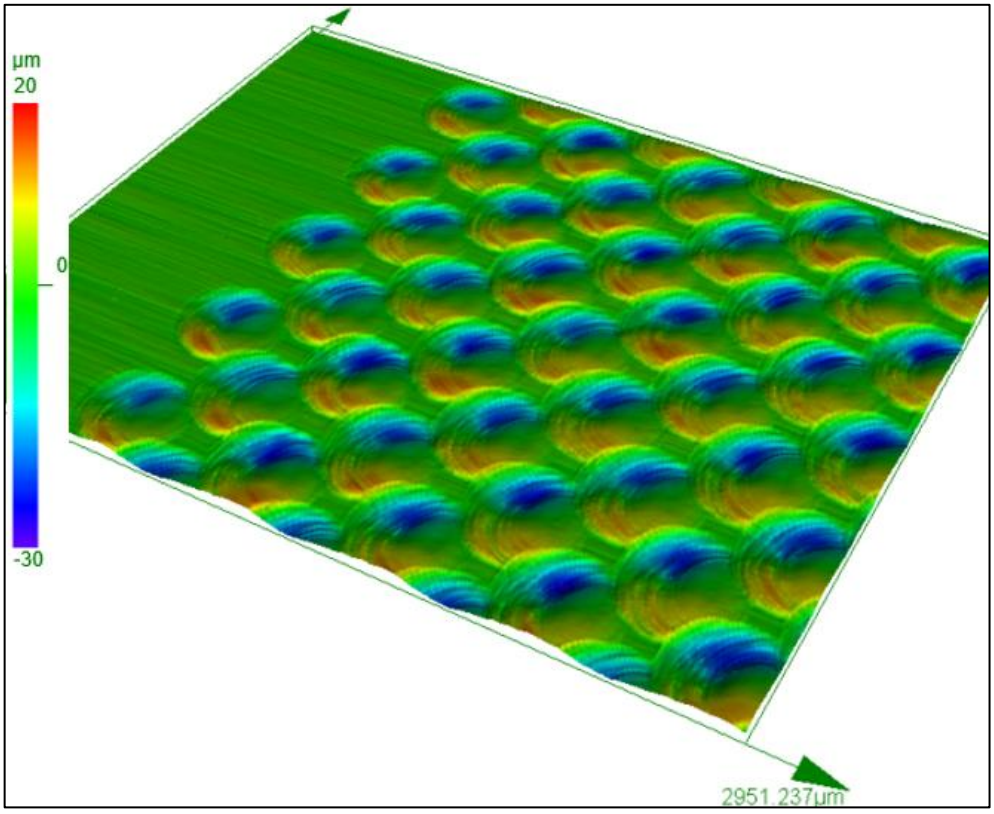
K tomuto účelu sloužila zkušební sada. Na této sadě bylo předpřipraveno celkem 58 plošek s paterny. Předpřipravená plocha byla o rozměrech 8,3 x 8,3 mm. Inspekce předpřipravených ploch byla provedena pomocí konfokálního mikroskopu. Z výsledků snímání mikroskopu byly následně vybráno pouze několik exemplářů, které by potenciálně disponovaly námi požadovanou geometrií a velikostí. Nejlépe vypadajícími byla kopcovitá struktura (viz Obr. 3.4), dále kopcovitá struktura s popraskaným povrchem (viz. Obr. 3.5), struktura tvaru víru (viz. Obr. 3.6) a struktura podobná vlnám (viz. Obr. 3.7). Po konzultaci s vedoucím byla zvolena kopcovitá struktura jako výchozí struktura k dalším operacím. Zpětně se dohledaly data s provozními parametry, kterými byla daná struktura vytvořena a snažili jsme se je aplikovat na další sady vzorků.



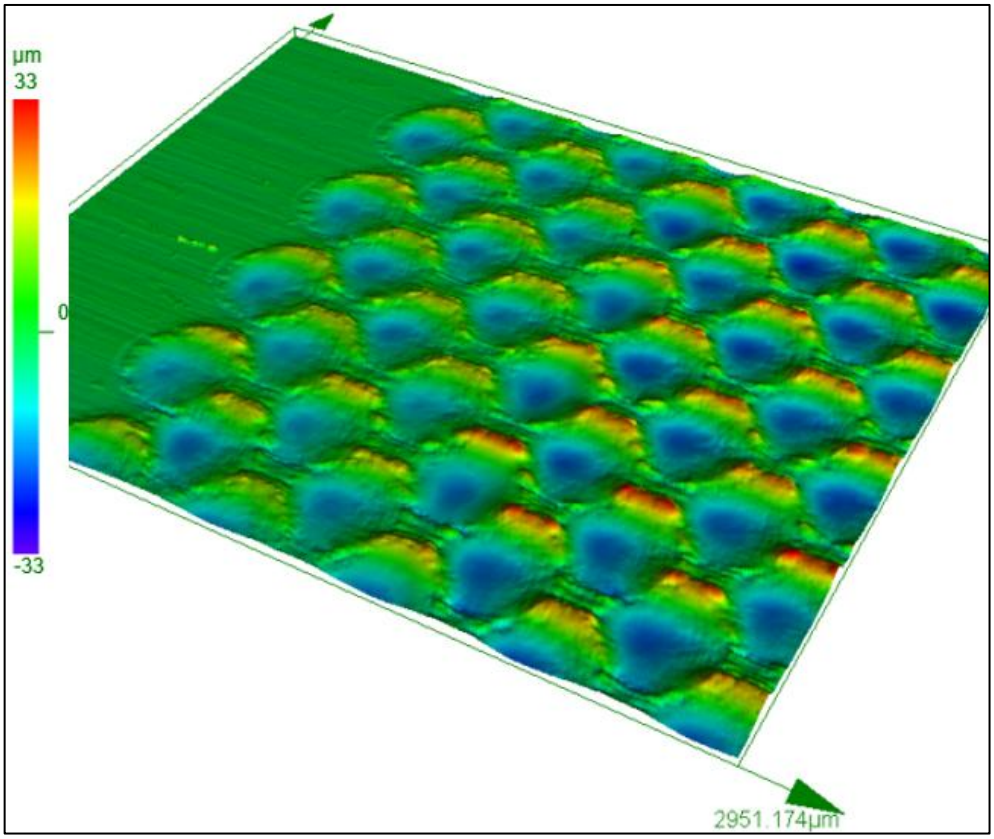
Obr. 3.4 *Vyobrazení kopcovitých struktur*



Obr. 3.5 *Vyobrazení kopcovitých struktur s popraskaným povrchem*



Obr. 3.6 *Vyobrazení vírových struktur*



Obr. 3.7 *Vyobrazení vlnovitých struktur*

3.3.2 Sada 2

Na druhou sadu vzorků byl aplikován kopcovitý útvar (viz. Obr. 3.4) se stejnými parametry, které byly použity na první zkušební řadě (viz. Tab. 3.2). Výsledným paternem však nebyla požadovaná kopcovitá struktura, ale vznikla kopcovitá struktura s popraskaným povrchem. Jelikož měly být provozní parametry na celé sadě stejné, byly vyhodnocovány pomocí konfokálního mikroskopu pouze dva vzorky z celkových šesti, na kterých bylo předpřipraveno celkem 14 plošek.

U_a [kV]	I_b [mA]	f_1 [Hz]	l [mm]	w [mm]	A [mm^2]	t [s]	P_b [W]	ρ_{EB} [W/mm^2]	Q_{eb} [J]
150	0,25	10000	8,3	8,3	68,890	120	37,5	0,544	4500

3.3.3 Sada 3

Na sadě 3 jsme se opět pokusili vytvořit kopcovitou strukturu. Chtěli jsme ale zároveň zjistit, při jaké konfiguraci procesních parametrů se začne na povrchu substrátu tvořit popraskaná struktura místo kopcovité, abychom se jí mohli v budoucnu vyvarovat. Proto byly na každý z šesti vzorků použity jiné provozní parametry, tzn. získali jsme celkem 7

předpřipravených ploch o rozměrech 8,3 x 8,3 mm pro jedny procesní parametry na jednom daném vzorku. Procesní parametry jsou k vidění viz. Tab. 3.3.

Tab. 3.3 *Procesní parametry použity při tvorbě paternů na sadě číslo 3*

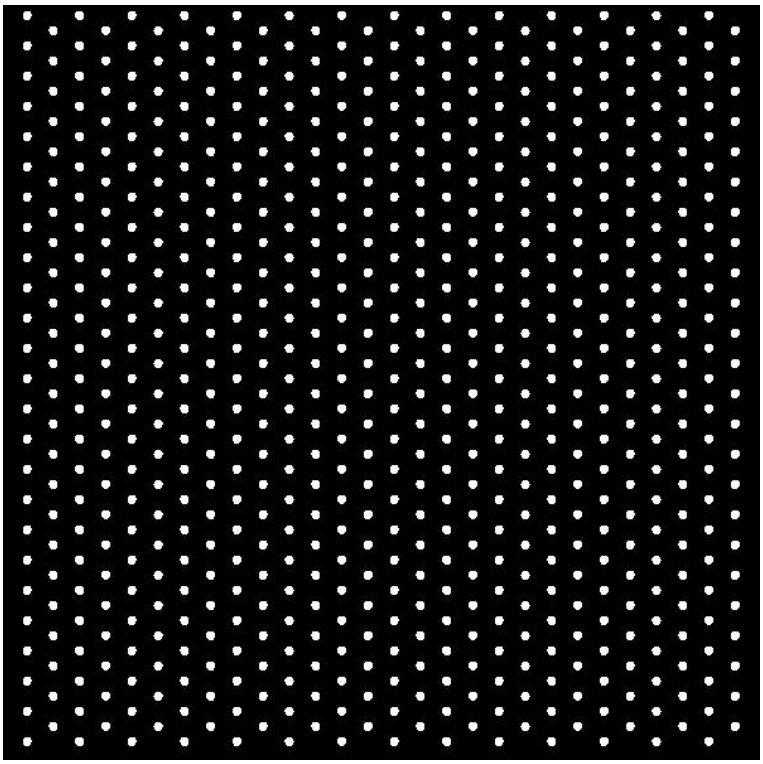
vzorek	U_a [kV]	I_b [mA]	SURF [mA]	no. points [-]	spot [mm]	A [mm^2]	t [s]
1 A-G	150	0,4	0	131040	8,3	68,89	210
2 A-G	150	1,3	0	131040	8,3	68,89	4
3 A-G	150	0,3	0	131040	8,3	68,89	150
4 A-G	150	0,4	0	131040	8,3	68,89	120
5 A-G	150	0,5	0	131040	8,3	68,89	90
6 A-G	150	0,7	0	131040	8,3	68,89	10

Tab. 3.3 *(pokračování)*

P_b [W]	ρ_{eb} [W/mm^2]	Q_{eb} [kJ]	ρ_{Qeb} [J/mm^2]	f_{set} [-]	f_{pic} [mHz]	f_{point} [kHz]
60	0,871	12,6	182,9	0,2	4668,707	26,205
195	2,831	0,78	11,32	0,25	5835,501	32,755
45	0,653	6,75	97,98	0,25	5835,501	32,755
60	0,871	7,2	104,51	0,2	4668,707	26,205
75	1,089	6,75	97,98	0,3	7003,06	39,308
105	1,524	1,05	15,24	0,2	4668,707	26,205

3.3.4 Návrh paternu

Souřadnice bodu, které mají být ozařované elektronovým paprskem se do stroje zadávaly pomocí černobílého bitmapového obrázku (viz. Obr. 3.8), znázorňující umístění bodů. Software stroje pak zacílil elektronový paprsek do bílých bodů na obrázku. Obrázek byl vytvořen ve zvětšeném měřítku tak, aby pak měl výsledný patern požadované rozměrové parametry. Rozteč jednotlivých bodů měla být okolo 150 µm. Průměr ozářených bodů se pohyboval též okolo hodnoty 150 µm. Tento obrázek byl použit pro předpřípravu jedné plošky o rozměrech 8,3 x 8,3 mm. Při vkládání obrázku do stroje si jej stroj přizpůsobil na své maximální rozměry. Kvůli tomuto faktu se rozměrové parametry na obrázku zvětšily a mezi jednotlivými body se utvořily větší mezery, než jsme chtěli. Operátor pak zmínil, že se dají souřadnice ozařovaných bodů vkládat vektorově pomocí programu MC Excel. Tato metoda zadávání paternu do stroje by byla nejspíše efektivnější, ale bohužel v našem případě k tomuto kroku již nedošlo.



Obr. 3.8 *Ukázka použitého obrázku na výrobu paternu*

Mezi jednotlivými předpřipravenými plochami na daných vzorcích se vyskytují mezery. Tyto mezery se na vzorcích ponechávaly z důvodu skenování konfokálním mikroskopem. Tato vyleštěná neozářené plocha elektronovým paprskem nám určovala nulovou hladinu, od které se dále měřily nerovnosti ozářeného povrchu. Tyto místa mezi ozařovanými plochami budou nejspíš trochu ovlivňovat adhezní pevnost nástřiku výměnou za přesnější měření vytvořených struktur.

3.4 Vyhodnocování povrchu vzorků

Předpřipravené povrchy vzorků byly skenovány pomocí konfokálního mikroskopu Olympus Lext OLS 5100. Přístroj je schopen po naskenování povrchu vytvořit jeho 3D model a měřit různé parametry. Pomocí tohoto zařízení byly zkoumány rozměrové parametry předpřipravených ploch a jejich plošná drsnost.

Drsnost leštěného povrchu první sady vzorků byla vyhodnocena pomocí drsnoměru značky Mitutoyo (viz. Obr. 3.9). Mikrotvrdost substrátu i vytvořených struktur byla vyhodnocována pomocí přístroje Qness Q10A (viz. Obr. 3.10).

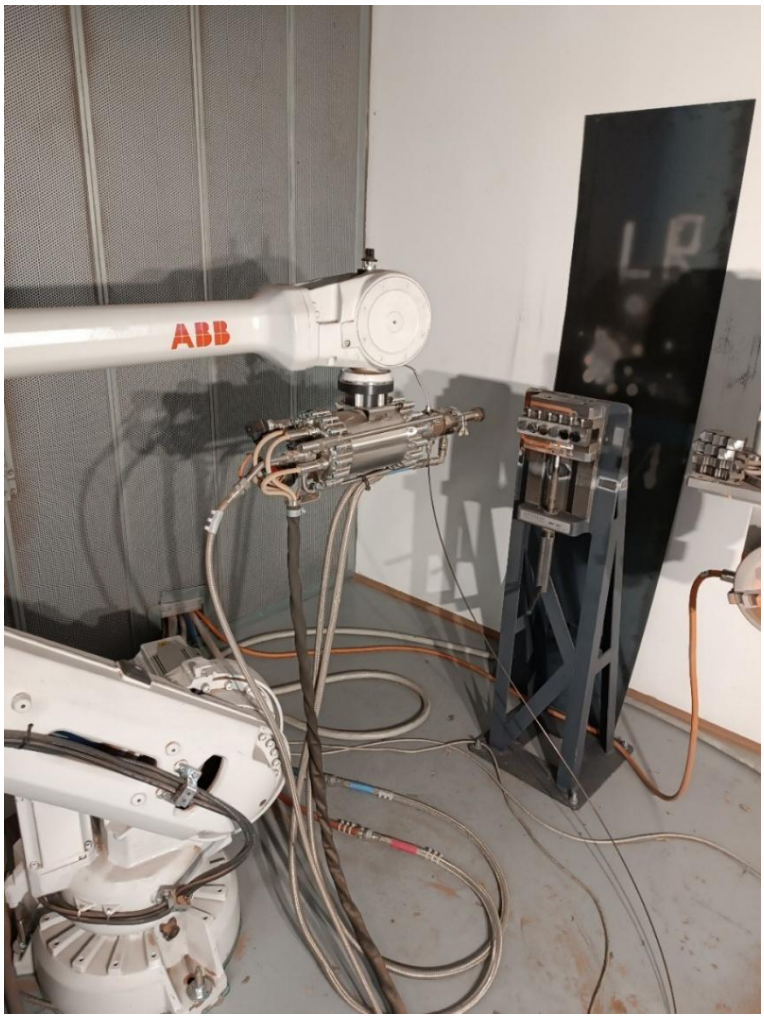
Obr. 3.9 *Drsnoměr značky Mitutoyo*

Obr. 3.10 *Přístroj na měření mikrotvrdosti Qness Q10A*

Podrobné výsledky z jednotlivých měření a zkoumání budou uvedeny v kapitole Výsledky experimentální části.

3.5 Nástřik depozice pomocí CS

Nástřik depozice byl realizován pomocí vysokotlakého CS systému. Dělo bylo připevněno na robotickém ramenu firmy ABB. Vzorky byly umístěny do přípravku, který se následně upevnil na pracovní plochu do svěráku před CS dělo. Pracovní prostor je zachycen viz. Obr. 3.11.



Obr. 3.11 *Ukázka pracovního prostoru při provádění nástřiku CS.*

Provozní parametry volil vedoucí práce, který zároveň obsluhoval zařízení. Použité procesní parametry jsou k vidění viz. Tab. 3.4. Nejprve se provedly 2 přejezdy děla bez přivádění prášku, aby se stlačeným plynem odstranily případné nečistoty z povrchů vzorků a kontrola funkčnosti systému jako je např. kontrola kolizí děla s okolními objekty nebo ucpání trysky děla. Následně se nástřik prováděl ve dvou vrstvách, kdy první přejezdem se vytvářela základní vrstva nástřiku a druhá vrstva sloužila k zvětšení tloušťky depozice. Povlak se vždy nanášel zároveň na jednu sadu s celkem šesti vzorky. Po skončení nástřiku jedné sady se vyjmul přípravek ze svěráku pracovní plochy a nadeponované vzorky se vyměnily za čisté. Nanášeným práškem byl Cu prášek s průměrnou velikostí částic od 20 do 40 µm. Jako hnací plyn byl použit dusík.

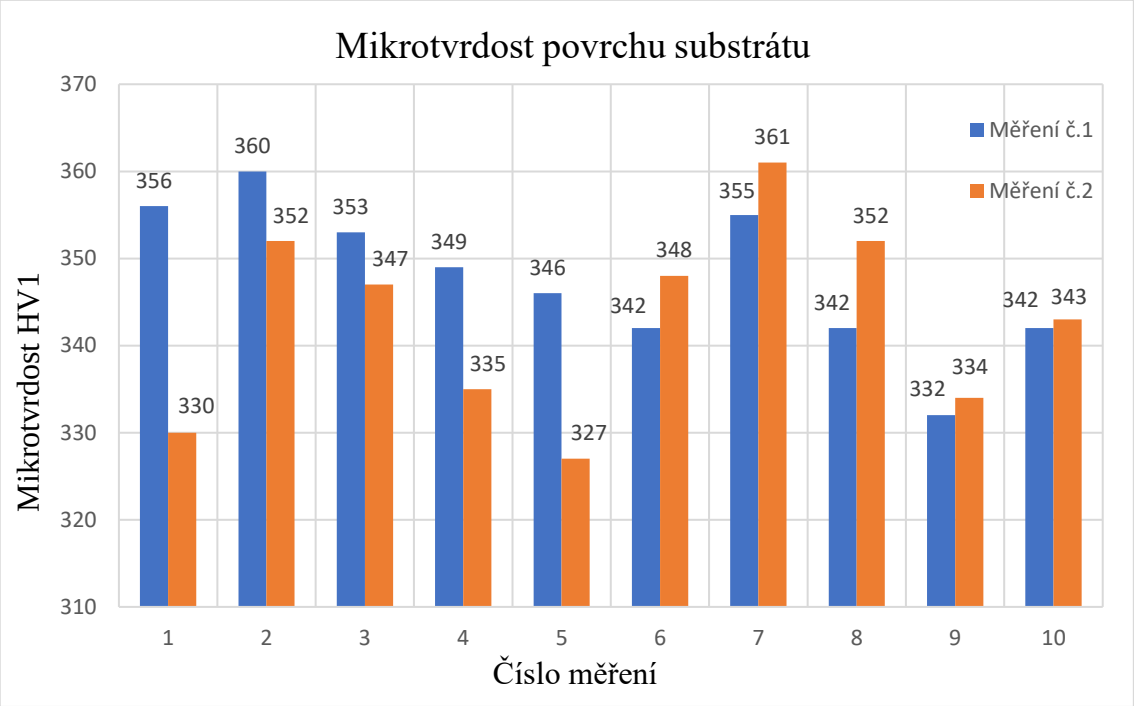
Tab. 3.4 *Procesní parametry použité při tvorbě nástřiku*

Teplota předehřátí [°C]	500
Pracovní tlak [bar]	40
Vzdálenost trysky od substrátu [mm]	30
Rychlost posuvu [mm/s]	200

4 Výsledky experimentální části

4.1 Mikrotvrdost povrchu

Měření bylo provedeno v rámci jednoho vybraného vzorku s naneseným paternem. Bylo provedeno 10 měření mikrotvrdosti na vyleštěných plochách (měření č.1), abychom znali tvrdost neozářeného povrchu a následně se provedlo dalších 10 měření v okrajových částech vytvořených struktur (měření č.2).



Obr. 4.1 *Výsledky měření mikrotvrdosti substrátu*

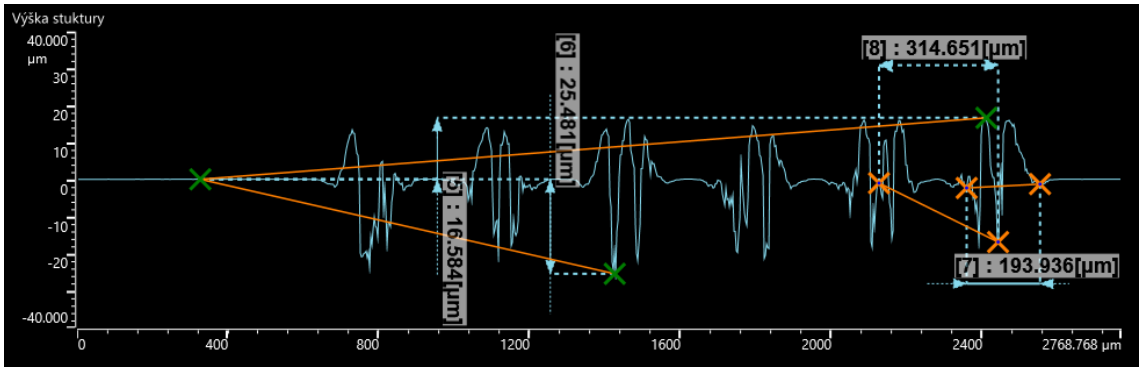
Tab. 4.1 *Shrnutí výsledků naměřených mikrotvrdostí*

	Měření č.1	Měření č.2
Maximální hodnota tvrdosti	360	361
Minimální hodnota tvrdosti	332	327
Střední hodnota tvrdosti	347,7	342,9

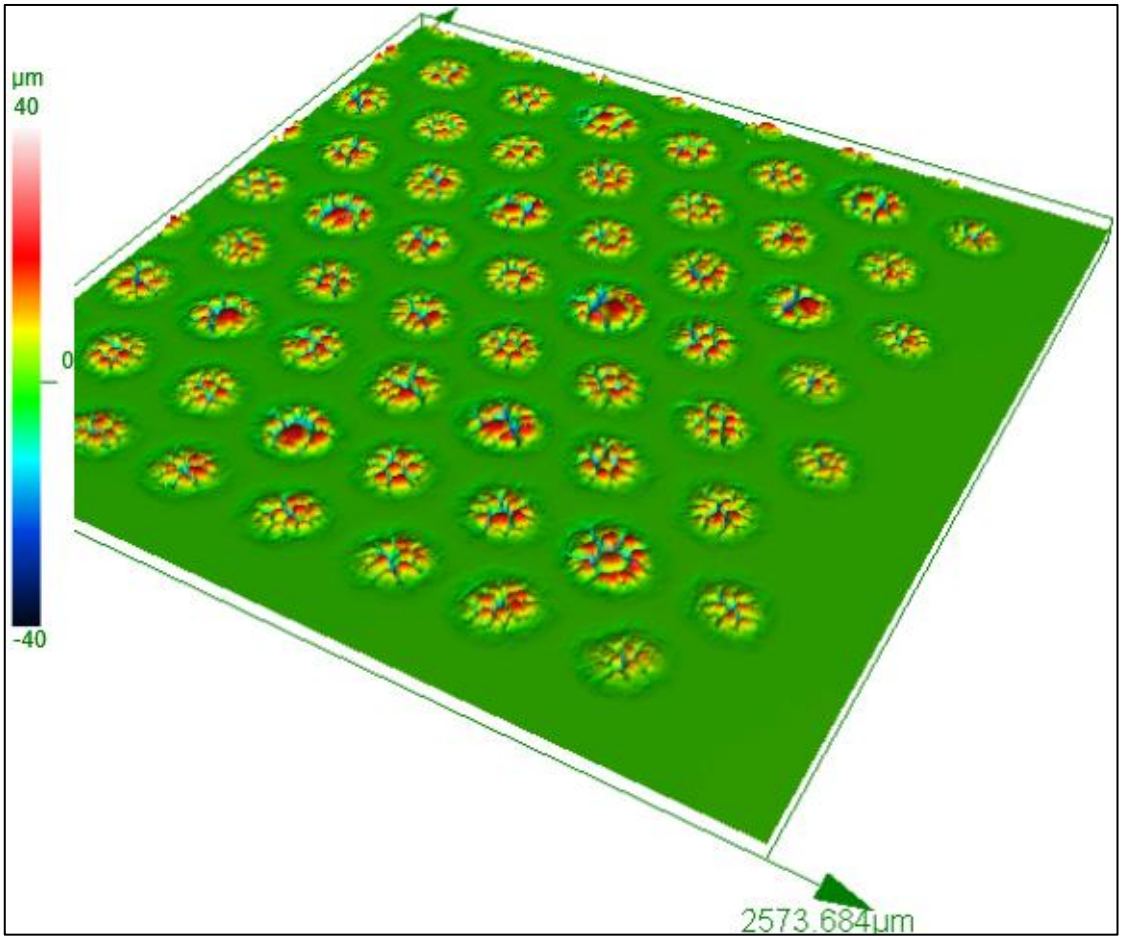
4.2 Topografie substrátu

Strukturami vytvořenými na povrchu substrátu, které měly zajistit lepší adhezi měděného nástřiku na tvrdém ocelovém povrchu, měly původně být kopcovité útvary (viz. Obr. 3.4). Bohužel se nám tyto útvary nepovedlo vyrobit a výsledkem předpřípravy byly většinou kopcovité útvary s popraskaným povrchem (viz. Obr. 3.5). Velikost útvarů se většinou pohybovala okolo 20 µm nad úroveň nulové hladiny a okolo 25 µm pod úroveň nulové hladiny. Zároveň průměr struktury se pohyboval většinou okolo 170 µm a rozteč mezi

jednotlivými strukturami činila cca 300 µm (viz. Obr. 4.2). Tyto parametry se vyskytovaly asi u 60 % paternů. U zbylých 40 % se většinou výrazně měnily výškové parametry struktury.



Obr. 4.2 *Vybraný patern s nejčastější konfigurací rozměrů*



Obr. 4.3 *3D náhled na vybraný patern s nejčastější konfigurací rozměrů*

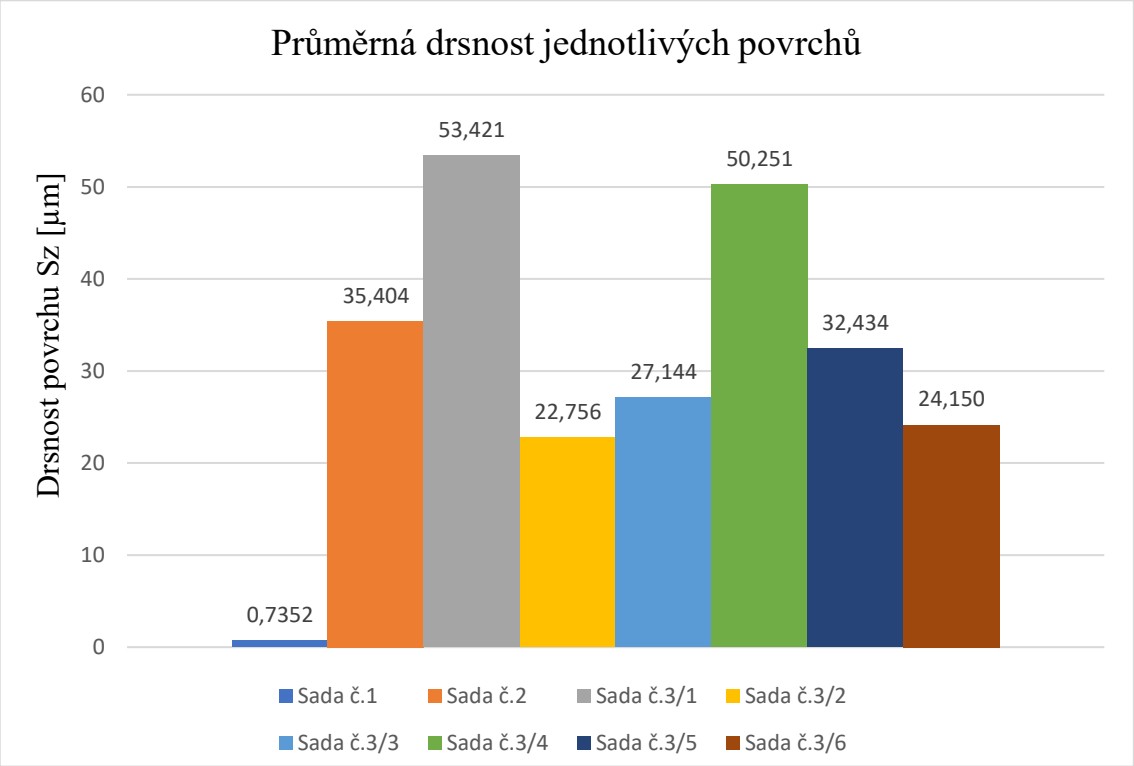
4.3 Drsnost povrchu

Profilová drsnost leštěného povrchu byla měřena na jednom vybraném vzorku ze sady číslo 1 (vzorky pouze s leštěným povrchem). Celkem bylo provedeno 5 měření v různých

směrech. Délka dráhy měření činila 5,6 mm. Průměrná hodnota drsnosti Ra (resp. Sa) a Rz (resp. Sz) jsou uvedeny na Obr. 4.4 a Obr. 4.5.

Na druhé sadě vzorků, kde měl být vytvořen patern se stejnými parametry na všech šesti vzorcích, byla drsnost měřena pouze na třech plochách vzorku S3 a třech plochách vzorku S5. Průměrná hodnota drsnosti Sz a Sa této sady vzorků je vynesena do Obr. 4.4 a Obr. 4.5.

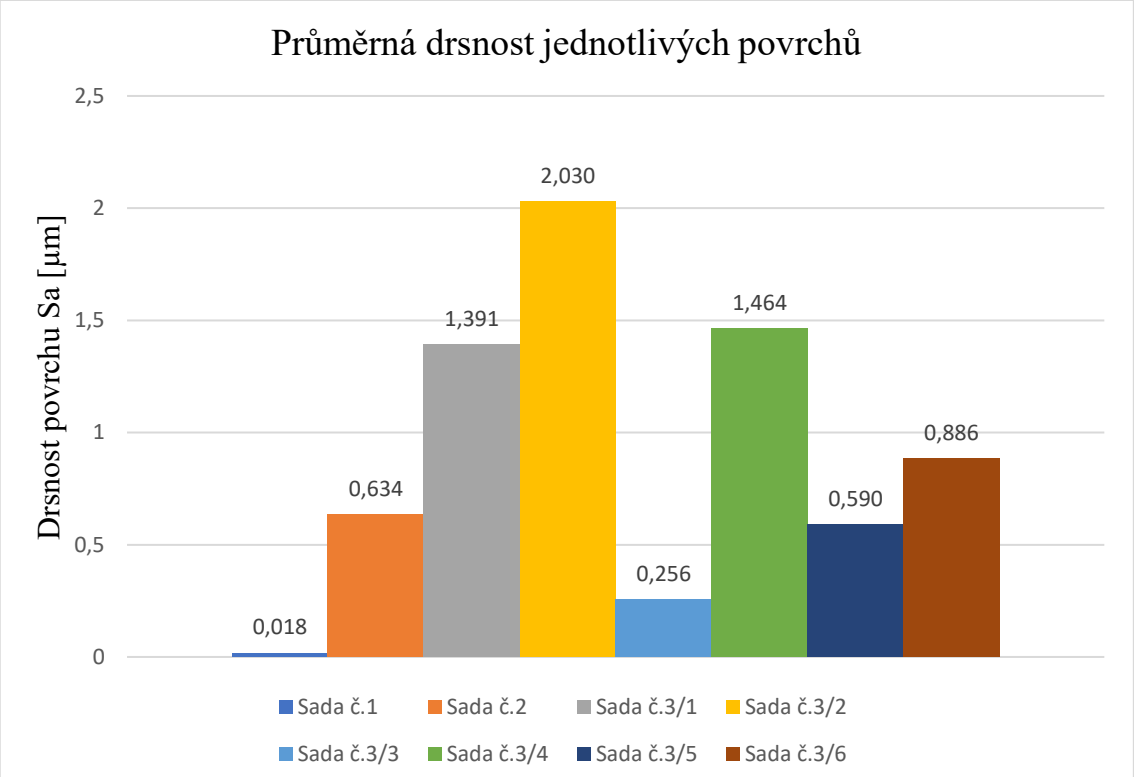
Na třetí sadě vzorků se plošná drsnost vyhodnocovala na třech plochách z celkových sedmi na jednom vzorku. Na každém jednom vzorku byl totiž vytvořen patern stejnými provozními parametry. Průměrná hodnota Sz a Sa pro každý vzorek z této sady je vyobrazen na Obr. 4.4 a Obr. 4.5.



Obr. 4.4 *Graf vyobrazující průměrné drsnosti Sz jednotlivých povrchů*

Tab. 4.2 *Statistická data naměřených drsností Sz*

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
Sada č.1	0,7352	0,5165
Sada č.2	35,404	12,1574
Sada č.3/1	53,421	18,5881
Sada č.3/2	22,756	0,5778
Sada č.3/3	27,144	20,6899
Sada č.3/4	50,251	35,2518
Sada č.3/5	32,434	22,5266
Sada č.3/6	24,150	6,4311



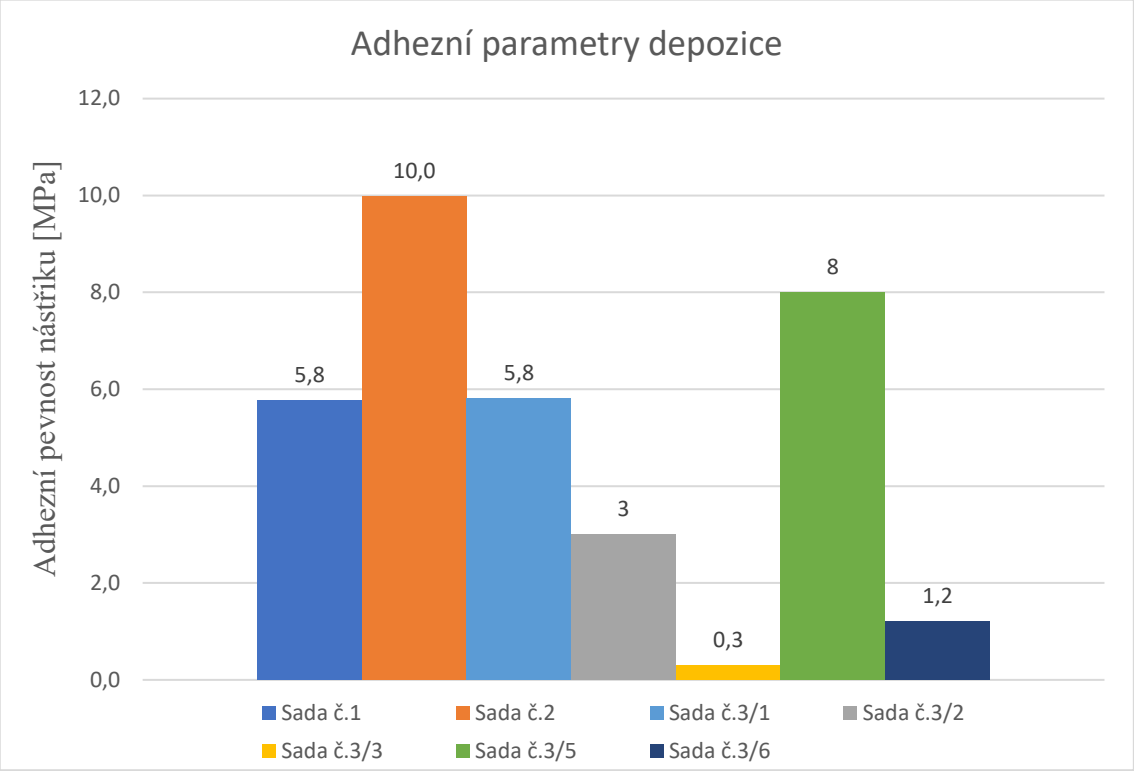
Obr. 4.5 *Graf vyobrazující průměrné drsnosti Sa jednotlivých povrchů*

Tab. 4.3 *Statistická data naměřených drsností Sa*

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
Sada č.1	0,018	0,0042
Sada č.2	0,634	0,3724
Sada č.3/1	1,391	0,9556
Sada č.3/2	2,030	0,1442
Sada č.3/3	0,256	0,3886
Sada č.3/4	1,464	1,2498
Sada č.3/5	0,590	0,6095
Sada č.3/6	0,886	0,6424

4.4 Adhezní parametry

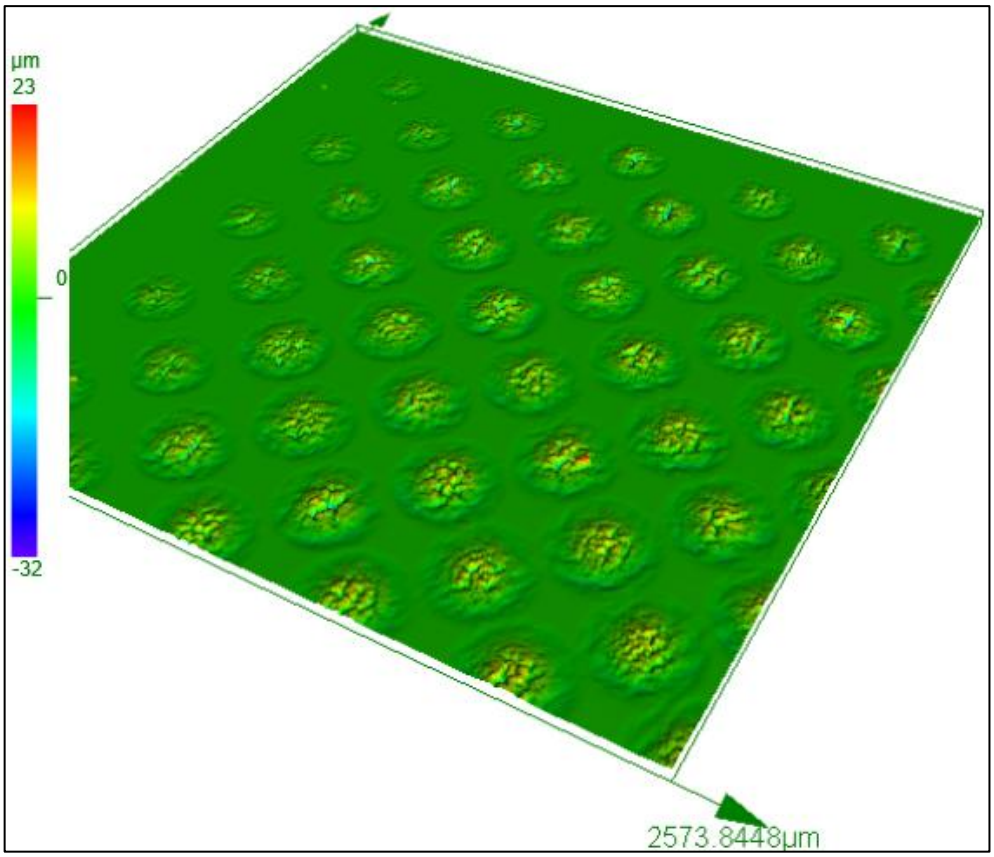
Pro testování adhezních parametrů nástřiku byly vzorky slepeny s podobným protikusem pomocí dvousložkového epoxidového lepidla. Po vytvrzení se prováděly adhezní testy dle ASTM C633. Hodnota adhezní pevnosti se vztahuje k danému povrchu na vzorku.



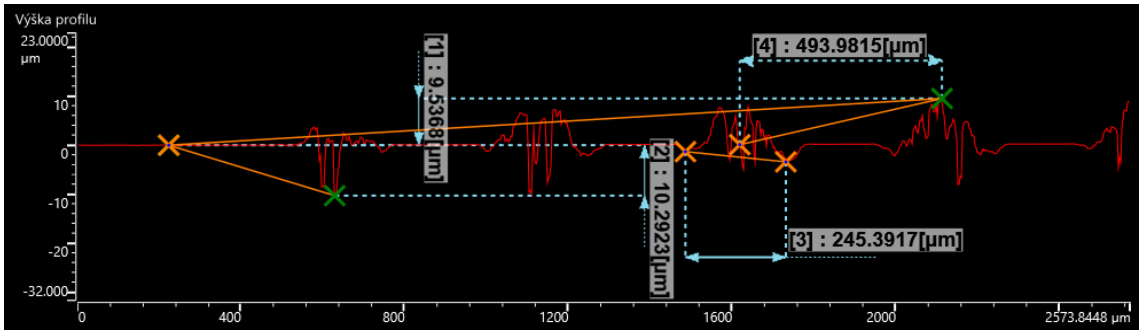
Obr. 4.6 *Vyobrazení míry adheze depozice k substrátu*

4.4.1 Vzorek s největší hodnotou adhezní pevnosti

Nejvyšší hodnoty adhezní pevnosti nástřiku vykazovala sada č.2. V této sadě se též nacházel vzorek s největší hodnotou adhezní pevnosti a to 14,2 MPa. Na tomto vzorku se nacházela kopcovitá struktura s popraskaným povrchem viz. Obr. 4.7. Rozměrové parametry útvarů na povrchu substrátu jsou k vidění na Obr. 4.8.

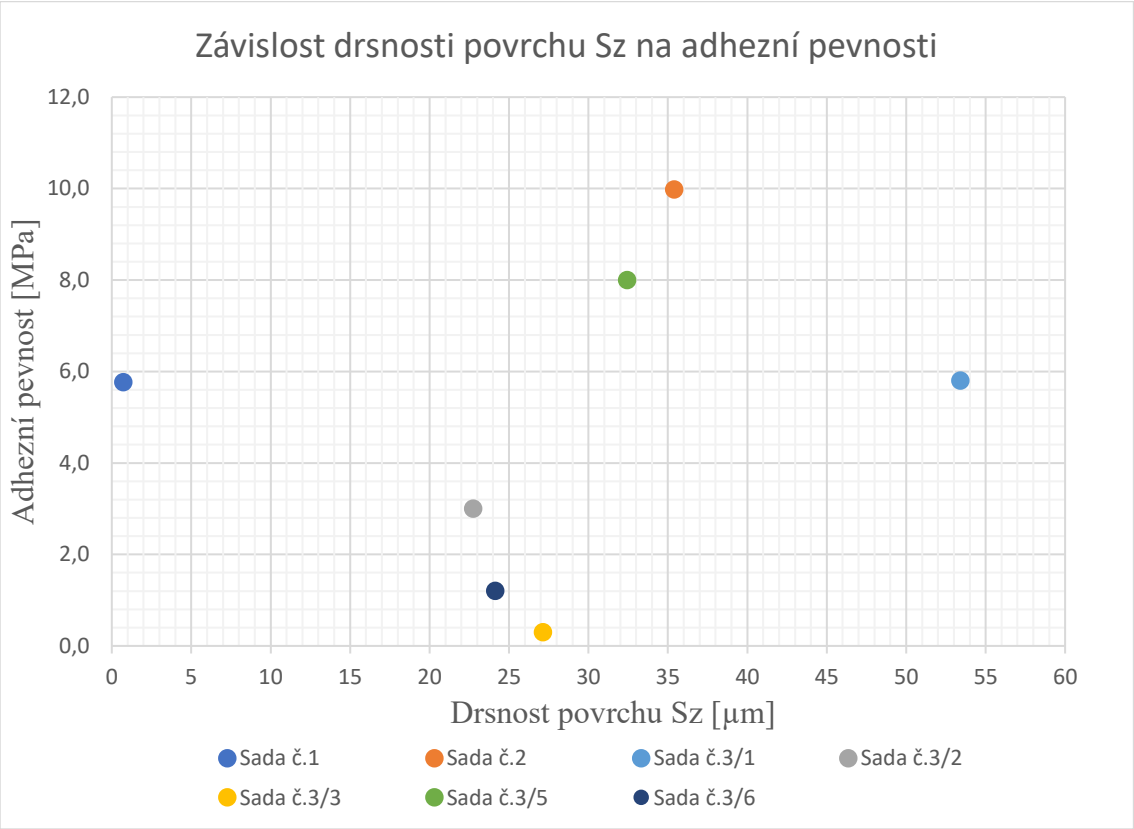


Obr. 4.7 *Patern který vykazoval největší adhezní pevnost. Snímek pořízený konfokálním mikroskopem.*

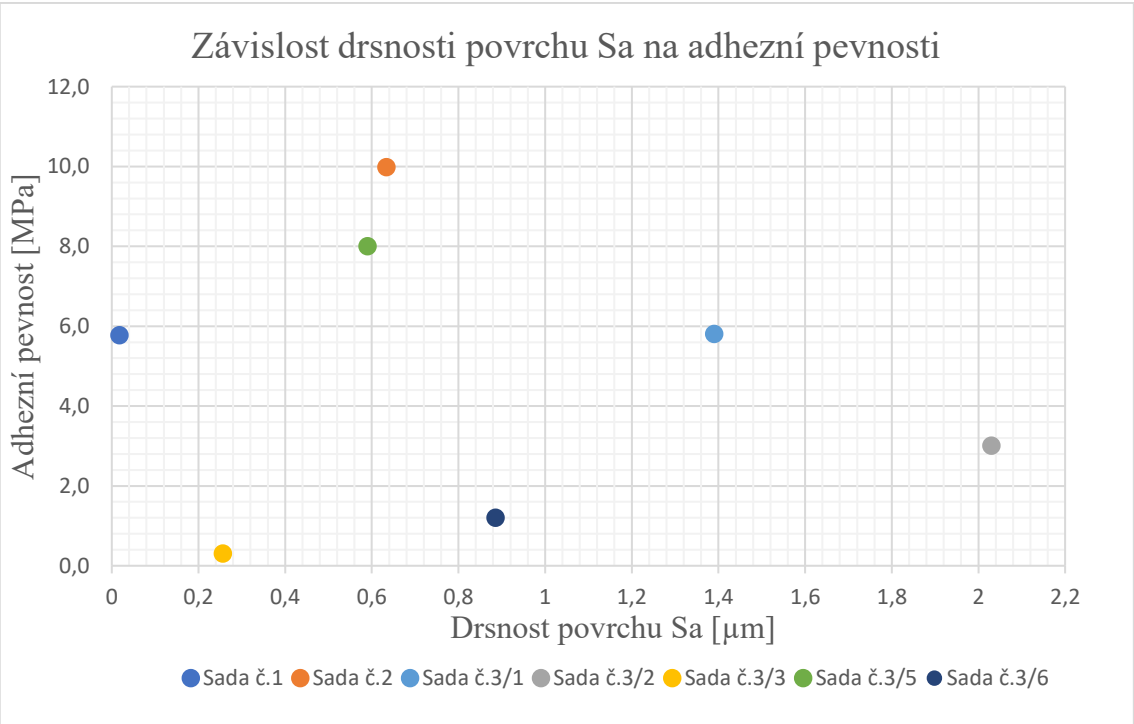


Obr. 4.8 *Zobrazení rozměrových parametrů vytvořených struktur na povrchu substrátu*

4.5 Porovnání adhezní pevnosti s drsností povrchu



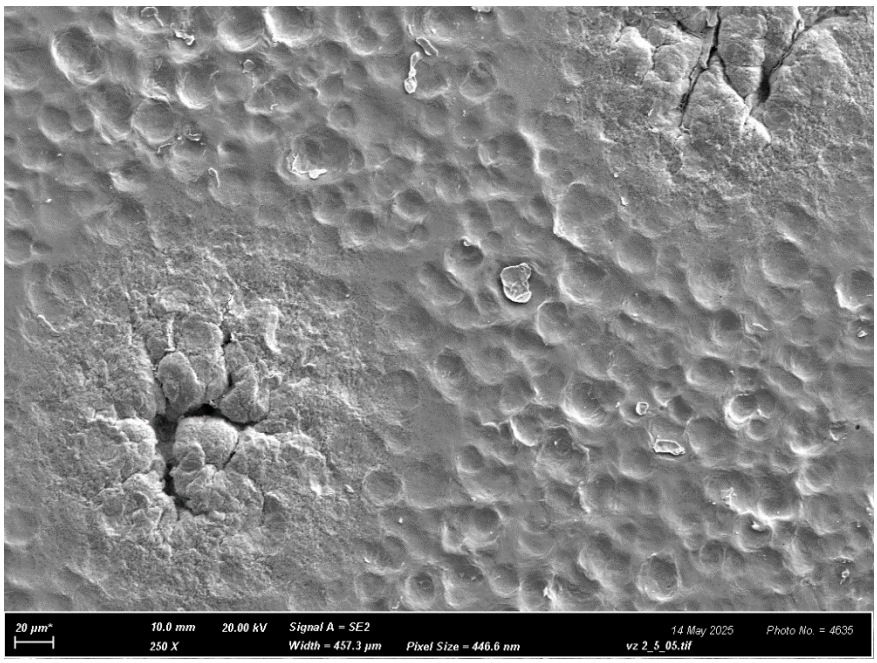
Obr. 4.9 *Zobrazení adhezní pevnosti depozice v závislosti na drsnost povrchu Sz*



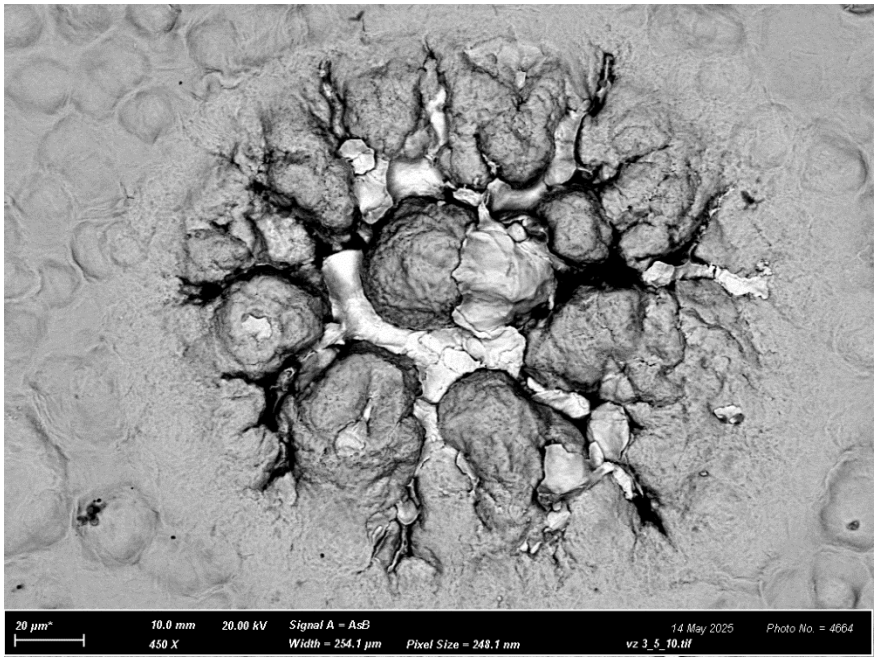
Obr. 4.10 *Zobrazení adhezní pevnosti depozice v závislosti na drsnost povrchu Sa*

4.6 Inspekce povrchu po adhezních testech

Na povrchu všech vzorků se vyskytovala velká spousta stop po kolizi částic. Bohužel zde nebyly viditelné větší známky ulpělých částic (viz. Obr. 4.11). K adhezi tedy docházelo jen zřídka. Zajímavým úkazem však bylo ulpění částic mědi v prostorách uvnitř popraskaných kopcovitých struktur (viz. Obr. 4.12). Díky chemické analýze povrchu bylo potvrzeno, že ve vnitřních prostorách prasklin se skutečně nachází částice mědi.



Obr. 4.11 *Snímek substrátu po odtržení depozice.*



Obr. 4.12 *Snímek vytvořené struktury s deformovanou částicí mědi ulpěnou v prasklinách*

5 Diskuse

Míra adheze depozice nanesené na substrát souvisí s několika faktory, které ji zásadně ovlivňují. Jedním z nich je tvrdost substrátu. Technologií CS lze spojovat velkou škálu materiálu, které nemusí být svařitelné. CS pracuje na principu urychlování kovových částic ve formě prášku, které následně kolidují se substrátem. Kinetická energie částic se mění na plastickou deformaci jak substrátu, tak i dané částice. Díky tomu dochází ke spojení částice se substrátem. Míra ulpívání částic na substrátu se odvíjí od jejich vzájemné tvrdosti. Tvrdost je mechanická vlastnost materiálu, vyjadřující míru odporu proti vnikání cizího tělesa do povrchu daného materiálu. Tvrdost tedy působí negativně při tvorbě depozice na povrchu substrátu. V technologii CS je velice problematické nanášet měkké materiály (např. měď nebo hliník) na tvrdé (např. legované oceli). Proto se v této práci zabýváme zvýšením adhezní pevnosti měděného povlaku na oceli 42CrMo4. Ke zvýšení adheze mezi nástřikem a substrátem bylo použito cílené zdrsňování povrchu, které by mohlo zvýšit účinnost depozice a její adhezi k povrchu. Ke zdrsnění povrchu byla použita technologie elektronového paprsku, díky kterému jsme byli schopni vytvářet mikrostruktury na povrchu, které by potenciálně mohly zvýšit adhezi dopadlých částic.

Na začátku procesu tvorby paternů na povrchu vzorků byl proveden orientační experiment, který měl prezentovat možnosti paternů, které by se daly použít pro zvýšení drsnosti povrchu. Po vyhodnocení předpřípravy pomocí skenování konfokálním mikroskopem jsem vybrali patern, ve kterém jsme viděli největší potenciál, co se týče zvýšení adheze depozice. Jednalo se o patern, který disponoval kopcovitými útvary (viz. Obr. 3.4). Tento patern jsem se dále snažili aplikovat na sady vyleštěných vzorků, které budou později nastříkány měděným povlakem a podrobeny adhezním testům. Bohužel se však refabrikace paternu na následující sadu nepovedl a vytvořily se trochu jiné struktury. Konkrétně byly vytvořeny struktury kopcovitého tvaru s popraskaným povrchem (viz. Obr. 3.5). Následně byla vytvořena ještě jedna sada vzorků, na kterou jsme se snažili opět vytvořit kopcovité struktury, ale marně. Opět byly vytvořeny převážně kopcovité útvary s popraskaným povrchem.

Jedním z možných důvodů, proč se nedaří vytvořit požadovaný patern je tepelné ovlivnění zpracované plochy elektronovým paprskem. Rychlé ochlazení nataveného materiálu by mohlo způsobit popraskání povrchu kopcovitých struktur. Proto se provedlo rychlé zkoumání, zda elektronový paprskem způsobuje nějaké zásadní tepelné ovlivnění povrchu. Operátor měřil teplotu povrchu po ukončení ozařování pyrometrem a kontaktním multimetrem. Podle pyrometru nebyla překročena teplota 350 °C (v celém rozsahu emisivity doporučené výrobcem pyrometru pro leštěný ocelový povrch) a kontaktní multimetr ukazoval teploty maximálně 100 °C. Z výsledků je patrné, že k zásadnímu tepelnému ovlivnění povrchu při předpřípravě elektronovým paprskem nedošlo. Tento fakt také potvrzuje zkouška mikrotvrdosti. Měřena byla mikrotvrdost vytvořených struktur a v jejich těsné blízkosti. Tyto výsledky byly porovnány s tvrdostí materiálu, naměřenou před zahájením předpřípravy. Rozdíly tvrdostí nebyly nijak zásadní. Tyto výsledky jen potvrzují, že předpřípravou nebyl povrch vzorků příliš ovlivněn, protože nedošlo k nárůstu tvrdosti materiálu.

Patern byl dimenzován vzhledem k velikosti částic použitého měděného prášku. Průměr částic se pohyboval v rozmezí 20 až 40 μm. Snažili jsme se tedy vytvořit patern, který by

měl podobnou výšku jako nanášené částice a rozteč mezi jednotlivými strukturami byla okolo 60 μm. Ve zkratce řečeno, snažili jsme se udělat patern, do kterého by částice zapadly podobně jako „puzzle“ a došlo k jejich přilnutí k povrchu substrátu díky zvětšeným stykovým plochám, zapříčiněné geometrií vytvořených struktur.

Při vkládání dat do zařízení elektronového svazku jsme se setkali s komplikacemi. Když jsme prováděli první orientační předpřípravu povrchu, operátor elektronového paprsku vyžadoval jako vstup pro tvorbu paternu černobílý bitmapový obrázek (viz. Obr. 3.8). Mapa bodů byla vytvořena v určitém měřítku, aby výsledný patern měl požadované rozměry. Zařízení elektronového svazku bohužel pojme jen poměrně malé množství dat. Bylo tedy provedeno několikrát snížení kvality a rozměrů, aby mohl být obrázek vložen do zařízení. Tyto operace měly bohužel za výsledek změnu rozměrů výsledného paternu vytvořeného na povrhu vzorků. Později jsme byli informováni, že je zde ještě jedna alternativní cesta, jak zadat do zařízení informace o ozařovaných bodech. Proces je poměrně složitý a operátor sám přiznal, že by si musel tuto možnost podrobněji nastudovat, protože ji ještě nepoužil. Jednalo se o vložení souboru MS Excel, který by obsahoval přesné souřadnice ozařovaných bodů. Bohužel na studium a aplikaci této metody vkládání dat nám již nezbyl čas. S vedoucím práce jsme se ale shodli, že vkládání obrázků není příliš spolehlivé a příště bychom určitě zvolili onu zmíněnou složitější, ale spolehlivější alternativu vkládání dat do zařízení elektronového svazku.

Jak již bylo zmíněno výše, tvrdost je jedním z důležitých parametrů, které hrají roli v adhezi mezi depozicí a substrátem. Abychom znali přesnou hodnotu mikrotvrdosti povrchu vzorků z materiálu 42CrMo4, bylo provedeno měření tvrdosti podle Vickerse. Navíc bylo důležité zjistit, zda ovlivněné plochy elektronovým paprskem při předpřípravě povrchu nemají sklony ke zvýšení tvrdosti. Tvrdost substrátu markantně ovlivňuje míru adheze povlaku k povrchu. V technologii CS se běžně aplikují měkké materiály na měkké (např. měď na hliník), popřípadě tvrdé materiály na měkké (např. ocel na měď), kdy tyto aplikace se nesetkávají s problematikou přilnutí povlaku k substrátu. Avšak přilnavost měkkého materiálu na tvrdý je velice obtížná. Z tohoto důvodu jsme provedli měření mikrotvrdosti, abychom měli představu o hodnotě tohoto parametru u materiálu vzorků.

Z výsledků měření mikrotvrdosti (viz. Obr. 4.1) je patrné, že ovlivněné plochy substrátu nemají sklony ke zvyšování tvrdosti oproti neovlivněným plochám. I když je tvrdost důležitým parametrem, který by měl být dále zahrnut při srovnávání výsledků adhezních testů a měření drsnosti substrátu, budeme dále uvažovat, že substrát měl tvrdost povrchu rovnu průměru z naměřených hodnot (viz. Tab. 4.1).

Ovlivňování drsnosti povrchu bylo hlavním tématem této práce, proto bylo provedeno měření na vytvořených sadách vzorků. U vzorků s předpřipraveným povrchem bylo provedeno měření plošné drsnosti Sa a Sz. Měření bylo prováděno pomocí konfokálního mikroskopu, který tuto drsnost vyhodnocoval na ploše o rozměrech 2,5 x 2,5 mm. Na leštěném povrchu se pomocí drsnoměru měřila profilová drsnost povrchu Ra a Rz. Je známo, že tyto dva druhy drsnosti nejsou mezi sebou moc dobře převoditelné, avšak pro naše účely budeme uvažovat, že profilová drsnost bude přibližně odpovídat plošné.

V jedné z výzkumných prací [10] byla zmíněna informace ohledně závislosti drsnosti povrchu na výsledné adhezní pevnosti nástřiku. V závěru je zmíněno, že nejvyšší adheze měkké depozice ke zpevněné oceli bylo dosaženo přibližně při hodnotách Rz rovny

0,75krát mediánu velikosti částic. Tato informace nám pomohla s nasměrování v začátcích práce. Od toho se odvíjelo následné vytváření paternů, které by se aspoň trochu blížili k této hodnotě. Ve výsledcích jsou uvedena data z měření drsnosti Sz (viz. Obr. 4.4 a Tab. 4.2) jednotlivých paternů a drsnosti Sa (viz. Obr. 4.5 a Tab. 4.3). Tyto data budou dále použita pro zhodnocení adhezní pevnosti v závislosti na drsnosti povrchu.

Při nástřiku povlaku na celkem 18 vzorků došlo k přilnutí povlaku pouze na 13 vzorcích. U zbylých 5 vzorků docházelo k odlupování depozice při jejím nástřiku. Testovány tedy byly tři z celkových šesti vzorků ze sady č.1 (leštěná sada), pět z celkových šesti vzorků ze sady č.2 a pět z celkových šesti vzorků ze sady č.3. Na zbytek vzorků povlak nepřilnul. Dále následovalo testování adhezní pevnosti depozice. Při adhezních testech nastal u všech 13 zkoušených vzorků adhezní lom nástřiku. Výsledky jsou zobrazeny na Obr. 4.6. Nejvyšší míru adheze vykazovala sada č.2. Zde byla hodnota adhezní pevnosti spočtena jako střední hodnota z celkových 5 měření. Maximální hodnota na jednom z 5 vzorků sady č.2 dosahovala hodnoty 14,2 MPa. Na sadě č.3 bylo použito celkem 6 různých procesních parametrů při tvorbě paternu (viz. Tab. 3.3) a paterny tedy nejsou stejné. Z toho důvodu je hodnota adhezní pevnosti pro každý vzorek sady č.3 vzata samostatně. Z hlediska statistiky výsledků adhezní pevnosti jsou výsledky sady 3 velice nepřesné na rozdíl od sady č.2, kdy hodnota adhezní pevnosti na této sadě je vzata jako střední hodnota adhezní pevnosti spočtená z celkem pěti hodnot se směrodatnou odchylkou 2,80. Co se týče sady č.1 (pouze leštěná sada), hodnota adhezní pevnosti byla spočtena jako střední hodnota z 3 měření se směrodatnou odchylkou 1,72. Výsledky jsou pouze orientační a pro jejich zpřesnění by muselo být vyrobeno a otestováno větší množství vzorků s paterny vytvořených stejnými procesními parametry.

Při porovnání adhezní pevnosti depozice a drsnosti povrchu substrátu (viz. Obr. 4.9 a Obr. 4.10) bylo zjištěno, že nejvyšší adhezní pevnosti bylo dosaženo na vzorcích sady č.2, kdy průměrná hodnota adheze byla 10 MPa při drsnosti povrchu Sz = 35,4 μm. Druhou nejvyšší hodnota adheze byla naměřena na vzorku 5 ze sady č.3 při Sz = 32,4 μm. Pokud bychom adhezi porovnávali vzhledem k drsnosti Sa, tak u sady č.2 byla hodnota Sa = 0,634 μm a u vzorku 5 ze sady č.3 byla hodnota Sa = 0,590 μm.

Jedním z cílů této práce bylo porovnat výsledky adhezní pevnosti vzorků s leštěným povrchem (sada č.1) vůči vzorkům, na kterých byla provedena předpříprava. Z výsledků adhezní zkoušky je patrné (viz. Obr. 4.6), že vyšší adhezi, než byla naměřena na leštěném povrchu, vykazovala sada č.2 a vzorek 5 sady č.3. Stejnou hodnotu adhezní pevnosti vykazoval vzorek 1 ze sady č.3. Další tři naměřené hodnoty adhezní pevnosti na zbylých vzorcích vykazují menší adhezní pevnost než bylo na leštěném povrchu. Z výsledků na Obr. 4.9 a Obr. 4.10 není příliš patrné, zda drsnost povrchu přímo ovlivňuje míru adheze povlaku k substrátu. To by ale muselo být ověřeno podrobnějším přezkoumáním, než bylo použito v této práci.

Po dokončení adhezních testů na vzorcích bylo dohodnuto s vedoucím, že provedeme inspekci povrchu substrátu po odtržení povlaku. Účelem bylo zjisti, zda nebude viditelné na povrchu známky adheze částic k substrátu. Inspekce se prováděla pomocí elektronového mikroskopu, který je navíc schopen provádět chemickou analýzu povrchu. Na povrchu vzorků bylo nalezeno velké množství malých důlků vytvořené nárazem částice na substrát. Bohužel se téměř žádné částice neuchytily na povrch a byly odtrženy při adhezních testech. Zajímavý úkaz je k vidění na Obr. 4.12. Došlo zde k zaseknutí částice

v prostorách prasklin vytvořené struktury. Teoreticky vzato, kdyby se nám povedlo vytvořit patern s hustějším osazením těmito strukturami, mohlo by dojít k častému zaseknutí částic, jako je výše zmíněném obrázku. To by molo mít za výsledek silnější mechanickou vazbu mezi částicí a substrátem. Výsledkem by mohla být vyšší adhezní pevnost povlaku. Každopádně to by záleželo na výsledcích dalšího podrobného zkoumání.

Závěr

V teoretické části této práce jsou uvedeny informace ohledně technologie studené depozice neboli Coldspray a dále informace o technologiích strukturování povrchu, konkrétně technologie elektronového parpsku a laseru. Jsou zmíněny základní principy těchto technologií, konstrukce zařízení využívající tyto technologie, jejich využití apod.

V experimentální části se práce zabývá zvýšením adhezní pevnosti měděného nástřiku na oceli 42CrMo4 pomocí předpřípravy povrchu elektronovým paprskem, která měla cíleně zvýšit hodnoty drsnosti povrchu. Vzorky dodané vedoucím práce prošly přípravou povrchu, konkrétně rozměrovými úpravami a následným broušením a leštěním testovaných povrchů. Další částí experimentu bylo ovlivňování povrchu substrátu elektronovým paprskem. Díky této technologii jsme byli schopni vytvářet na povrchu vzorku struktury, které měly za úkol řízeně zvýšit hodnotu drsnosti povrchu a přispět k adhezní pevnosti nástřiku svou geometrií, kde se doufalo, že dojde k mechanickému zaseknutí částic mědi mezi vytvořenými strukturami při tvorbě depozice. Po předpřípravě povrchu byly vzorky vyhodnocovány pomocí konfokálního mikroskopu Olympus Lext OLS 5100, kterým jsme byli schopni pozorovat ovlivněný povrch elektronovým paprskem ve 3D, měřit plošnou drsnost povrchu a rozměrové parametry vytvořených struktur. Dále byla naměřena mikrotvrdost povrchu, která zásadně ovlivňuje míru adheze depozice k substrátu. Následoval nástřik depozice na předpřipravené vzorky. Z celkových 18 vzorků přilnul povlak na 13. Tyto vzorky byly podrobeny testům adhezní pevnosti dle ASTM C633. V poslední fázi experimentu jsme provedli inspekci povrchu pomocí elektronového mikroskopu po vykonání adhezních testů. Cílem bylo zjistit, zda nezůstaly měděné částice ulpělé na povrchu vzorku i po odtržení povlaku.

Výsledky adhezních testů nebyly vůbec uspokojivé. Adhezní pevnost povlaků nepřesáhla hodnotu 14,2 MPa. Při srovnání adhezní pevnosti na vyleštěném povrchu s předpřipravenými povrchy, pouze 3 z celkových 6 měřených paternů měly vyšší adhezní pevnost než v případě leštěného povrchu. Slibovali jsem si od povlaku naneseného na předpřipravené povrchy mnohem vyšší hodnoty adhezní pevnosti. Bohužel se nám nepovedlo po několika iteracích předpřípravy povrchu dosáhnou požadovaného stavu vytvořených struktur na povrchu substrátu, což bylo nejspíš příčinou nízké adhezní pevnosti povlaků. Navíc se kvůli malému počtu vzorků výsledky setkávají s velkou statistickou chybou a jsou spíše orientační. Tento problém by se dal podchytit při dalším výzkumu, kdy by bylo vytvořeno více předpřipravených ploch, které by byly dále testovány.

Zdroje

[1] IRISSOU, Eric; LEGOUX, Jean-Gabriel; RYABININ, Anatoly N.; JODOIN, Bertrand a MOREAU, Christian. Review on Cold Spray Process and Technology: Part I—Intellectual Property. Online. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2008, roč. 17, č. 4, s. 495-516. ISSN 1059-9630. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/s11666-008-9203-3. [cit. 2024-10-06].

[2] PAPYRIN, Anatolii a KOSAREV, Vladimir. *Cold spray technology*. Amsterdam: Elsevier, 2007. ISBN 978-0-08-045155-8.

[3] ZHANG, Zhengmao; LI, Wenya; YANG, Jingwen a HUANG, Chunjie. Prediction of deformation characteristics and critical velocities during cold-spray: A new 3D model. Online. *Surface and Coatings Technology*. 2024, roč. 2024, č. 478. ISSN 02578972. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130492. [cit. 2024-10-06].

[4] GRUJICIC, M; ZHAO, C.L; DEROSSET, W.S a HELFRITCH, D. Adiabatic shear instability based mechanism for particles/substrate bonding in the cold-gas dynamic-spray process. Online. *Materials & Design*. 2004, roč. 25, č. 8, s. 681-688. ISSN 02613069. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.03.008. [cit. 2024-10-06].

[5] HASSANI-GANGARAJ, Mostafa; VEYSSET, David; CHAMPAGNE, Victor K.; NELSON, Keith A. a SCHUH, Christopher A. Adiabatic shear instability is not necessary for adhesion in cold spray. Online. *Acta Materialia*. 2018, roč. 2018, č. 158, s. 430-439. ISSN 13596454. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.07.065. [cit. 2024-10-06].

[6] CHAMPAGNE, Victor; MATTHEWS, Neil a CHAMPAGNE, Victor. Introduction to Supersonic Particle Deposition. Online. *Aircraft Sustainment and Repair*. 2018, s. 799-844. ISBN 9780081005408. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100540-8.00014-5. [cit. 2024-10-06].

[7] CAVALIERE, Pasquale (ed.). *Cold-Spray Coatings: Recent Trends and Future Perspectives*. Online. Springer, 2018. ISBN 978-3-319-67183-3. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-319-67183-3. [cit. 2025-02-13].

[8] VILLAFUERTE, Julio (ed.). *Modern cold spray*. Online. Springer, 2015. ISBN 978-3-319-16772-5. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-319-16772-5. [cit. 2025-02-13].

[9] DEVI, G. Neelima; KUMAR, S.; MANGALARAPU, Tarun Babu; VINAY, Gidla; CHAVAN, Naveen M. et al. Assessing critical process condition for bonding in cold spraying. Online. *Surface and Coatings Technology*. 2023, roč. 2023, č.

470. ISSN 02578972. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129839. [cit. 2024-10-06].

[10] BRUERA, Alessia; PUDDU, Pietro; THEIMER, Stephan; VILLA-VIDALLER, Maria; LIST, Alexander et al. Adhesion of cold sprayed soft coatings: Effect of substrate roughness and hardness. Online. *Surface and Coatings Technology*. 2023, roč. 2023, č. 466. ISSN 02578972. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129651. [cit. 2024-10-06].

[11] YIN, Shuo; CAVALIERE, Pasquale; ALDWELL, Barry; JENKINS, Richard; LIAO, Hanlin et al. Cold spray additive manufacturing and repair: Fundamentals and applications. Online. *Additive Manufacturing*. 2018, roč. 2018, č. 21, s. 628-650. ISSN 22148604. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.017. [cit. 2024-10-06].

[12] PATHAK, Sunil a SAHA, Gobinda. Development of Sustainable Cold Spray Coatings and 3D Additive Manufacturing Components for Repair/Manufacturing Applications: A Critical Review. Online. *Coatings*. 2017, roč. 2017, č. 7. ISSN 2079-6412. Dostupné z: https://doi.org/10.3390/coatings7080122. [cit. 2024-10-06].

[13] KHATAKE, Pranali; TALUJA, Resham; SUNIL KUMAR, M.; MAHENDAR REDDY, M.; AL-ATABY, Fatimah H. et al. Cold spray coating: A review of material systems and future perspectives. Online. *Materials Today: Proceedings*. 2023, roč. 2023. ISSN 22147853. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.11.015. [cit. 2024-10-06].

[14] KUMAR, Satyajeet a PANDEY, Shailesh Mani. The Study of Assessment Parameters and Performance Measurement of Cold Spray Technique: A Futuristic Approach Towards Additive Manufacturing. Online. *MAPAN*. 2022, roč. 2022, č. 37, s. 859-879. ISSN 0970-3950. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/s12647-022-00597-8. [cit. 2025-02-13].

[15] STANIMIROVIĆ, Ivanka a STANIMIROVIĆ, Zdravko. Introductory Chapter: Current Trends in Micromachining Technology. Online. *Micromachining - New Trends and Applications*. Industrial Engineering and Management. 2024. ISBN 978-0-85014-270-9. Dostupné z: https://doi.org/10.5772/intechopen.114841. [cit. 2025-02-26].

[16] KIBRIA, Golam; BHATTACHARYYA, B a DAVIM, J. P. (ed.). *Non-traditional Micromachining Processes: Fundamentals and Applications*. Materials Forming, Machining and Tribology. Cham: Springer International Publishing, 2017. ISBN 978-3-319-52009-4. Dostupné z: https://doi.org/978-3-319-52009-4.

[17] JAIN, Vijay Kumar; BALASUBRAMANIAM, R.; MOTE, Rakesh Ganpat; DAS, Manas; SHARMA, Anuj et al. Micromachining: An overview (Part I). Online.

Journal of Micromanufacturing. 2020, roč. 3, č. 2, s. 142-158. ISSN 2516-5984. Dostupné z: https://doi.org/10.1177/2516598419895828. [cit. 2025-02-26].

[18] SCHULTZ, Helmut. *Electron beam welding*. Cambridge: Abington, 1993. ISBN 18-557-3050-2.

[19] WĘGLOWSKI, M.St.; BŁACHA, S. a PHILLIPS, A. Electron beam welding – Techniques and trends – Review. Online. *Vacuum*. 2016, roč. 130, s. 72-92. ISSN 0042207X. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2016.05.004. [cit. 2025-02-26].

[20] WANG, Xichang; AHN, Joseph; BAI, Qian; LU, Wenjun a LIN, Jianguo. Effect of forming parameters on electron beam Surfi-Sculpt protrusion for Ti–6Al–4V. Online. *Materials & Design*. 2015, č. 76, s. 202-206. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.03.065. [cit. 2025-01-25].

[21] GALATI, Manuela. Chapter 8 Electron beam melting process a general overview. Online. In: *Additive Manufacturing*. Elsevier, 2021, s. 277-301. ISBN 978-0-12-818411-0. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818411-0.00014-8. [cit. 2025-02-01].

[22] MATĚJÍČEK, Jiří; VILÉMOVÁ, Monika; MOSKAL, Denys; MUŠÁLEK, Radek; KROFTA, Jan et al. The Role of Laser Texturing in Improving the Adhesion of Plasma Sprayed Tungsten Coatings. Online. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2019, roč. 28, č. 7, s. 1346-1362. ISSN 1059-9630. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/s11666-019-00924-7. [cit. 2025-03-18].

[23] KRAFT, Sebastian; PETERS, Ole; SCHILLE, Jörg; MUŠÁLEK, Radek; MARTAN, Jiří et al. High-Speed Laser Surface Structuring for Thermal Spray Coating Preparation. Online. *Physica status solidi (a)*. 2024, roč. 221, č. 15. ISSN 1862-6300. Dostupné z: https://doi.org/10.1002/pssa.202300710. [cit. 2025-03-18].

[24] SILFVAST, William Thomas. *Laser fundamentals*. Online. Second edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. ISBN 978-051-1616-426. Dostupné z: https://doi.org/10.1017/CBO9780511616426. [cit. 2025-03-05].

[25] MILONNI, Peter W. a EBERLY, J. H. *Laser physics*. Hoboken, New Jersey: John Wiley, 2010. ISBN 978-0-470-38771-9.

[26] MAO, Bo; SIDDAIAH, Arpith; LIAO, Yiliang a MENEZES, Pradeep L. Laser surface texturing and related techniques for enhancing tribological performance of engineering materials: A review. Online. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020, s. 153-173. ISSN 15266125. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.02.009. [cit. 2025-03-05].