



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

# NÁSTŘIKY KOVOVÝCH POVLAKŮ METODOU COLD SPRAY - OPTIMALIZACE TRAJEKTORIE TRYSKY Z HLEDISKA VLIVU NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI A SPOTŘEBU MATERIÁLU

METAL COATINGS BY COLD SPRAY - IMPACT OF TRAJECTORY PARAMETERS ON MECHANICAL  
PROPERTIES. PATH OPTIMISATION FOR MINIMISATION OF MATERIAL CONSUMPTION  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Jan Kalina**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Lukáš Řehořek, Ph.D.**

**BRNO 2021**

# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	<b>Jan Kalina</b>
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	<b>Ing. Lukáš Řehořek, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2020/21

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

## **Nástřiky kovových povlaků metodou Cold Spray – optimalizace trajektorie trysky z hlediska vlivu na mechanické vlastnosti a spotřebu materiálu**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Studená kinetická depozice (Cold Spray) představuje progresivní metodu tvorby povrchů za použití práškových kovových materiálů, může však být použita i k cílené přípravě objemových materiálů. Bakalářská práce bude zaměřena na studium vlivů parametrů trajektorie trysky na výsledné mechanické vlastnosti získaného depozitu. Práce se dále bude zabývat optimalizací dráhy s ohledem na minimalizaci spotřeby prášku.

### **Cíle bakalářské práce:**

Cílem práce je shrnutí nejnovějších poznatků z oblasti nástřiků metodou Cold Spray a vyhodnocení vlivu parametrů trajektorie trysky (rychlost posuvu, úhel naklonění, rastr, množství podávaného prášku atd.) na mechanické vlastnosti depozitu.

### **Seznam doporučené literatury:**

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

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

MORIDI, A., HASSANI-GANGARAJ, S., GUAGLIANO, M. a DAO, M. Cold spray coating: review of material systems and future perspectives. Surface Engineering. 2014, 36(6), 369-395. DOI:

10.1179/1743294414Y.0000000270. Dostupné také z:

<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/1743294414Y.0000000270>

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

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

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
ředitel ústavu

---

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

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá rozbořem vlivu parametrů trajektorie technologie cold spray na materiálové vlastnosti vzorku. Na základě různých typů trajektorií nástřiku jsou vyhodnocovány parametry porozity a zbytkového napětí v nanesené vrstvě.

## **Abstract**

This thesis describes the consideration about influence of trajectory of cold spray technology on material properties of a sample. The parameters of porosity and residual stress in the applied layer based on different types of spray trajectories are evaluated.

## **Klíčová slova**

Cold spray, trajektorie, materiálové vlastnosti, porozita, zbytkové napětí

## **Key words**

Cold spray, trajectories, material properties, porosity, residual stress

## Bibliografická citace této práce

Tuto práci, prosím, citujte jako:

KALINA, Jan. *Nástřiky kovových povlaků metodou Cold Spray - optimalizace trajektorie trysky z hlediska vlivu na mechanické vlastnosti a spotřebu materiálu* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-24]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/129764>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Lukáš Řehořek.

## Prohlášení o původnosti práce

Čestně prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma „Nástřiky kovových povlaků metodou cold Spray – vliv trajektorie na mechanické vlastnosti, optimalizace dráhy“ vypracoval samostatně s použitím literatury a jiných pramenů uvedených v seznamu, přiloženém na konci této práce.

24. května 2021

---

Jan Kalina

## Poděkování

Děkuji panu Ing. Lukáši Řehořkovi, Ph.D. za cenné připomínky, rady, vedení a trpělivost při vypracovávání této bakalářské práce.

Děkuji panu Ing. Janu Vetiškovi, Ph.D. za rady a podporu při seznamování se a práci s programem Robot Studio.

Část práce byla provedena za podpory výzkumné infrastruktury CzechNanoLab (ID LM2018110, MŠMT, 2020–2022), CEITEC Vysoké učení technické v Brně.

# Obsah

Úvod.....	7
1. Teoretická část .....	8
1.1 Historie.....	8
1.2 Princip .....	9
1.3 Základní typy Cold spray systému.....	9
1.3.1 Vysokotlaký typ.....	9
1.3.2 Nízkotlaký typ.....	10
1.4 Princip tvorby nástřiku.....	11
1.5 Metalurgický princip vzniku adheze se substrátem .....	11
1.6 Mechanický princip vzniku adheze se substrátem .....	12
1.7 Vliv typu substrátu na depozici.....	12
1.7.1 Měkký substrát.....	12
1.7.2 Tvrdý substrát .....	12
1.8 Výhody Cold spray .....	13
1.9 Nevýhody Cold spray.....	13
1.10 Spojení s robotikou.....	14
1.10.1 Dávkovací systém .....	14
1.10.2 Řídicí systém.....	14
1.10.3 Manipulační systém děla .....	14
1.10.4 Manipulační systém obrobku.....	14
1.10.5 Možnosti autonomního řízení .....	14
1.10.6 Vliv trajektorie vedení děla na mechanické vlastnosti vzorku .....	15
2 Praktická část .....	17
2.1 Pracovní stanice .....	17
2.2 Zadání.....	18
2.3 Diskuse zadání a výběr trajektorií.....	18
2.3.1 Společné parametry pro trajektorie.....	19
2.4 Trajektorie Lines .....	19
2.4.1 Vzorek.....	19
2.4.2 Sledované materiálové charakteristiky .....	21
2.5 Trajektorie Criss-cross .....	21
2.5.1 Parametry dráhy .....	21
2.5.2 Software .....	22
2.5.3 Vzorek.....	23
2.5.4 Sledované materiálové charakteristiky .....	24
2.6 Trajektorie Spiral .....	24
2.6.1 Parametry dráhy .....	24
2.6.2 Software .....	25
2.6.3 Vzorek.....	29
2.6.4 Sledované materiálové charakteristiky .....	31
2.7 Diskuse výsledků .....	31



2.8 Uvažovaná vylepšení.....	34
Závěr.....	35
Seznam použitých zdrojů .....	36
Zdroje přímo necitované .....	38
Seznam obrázků .....	40
Seznam příloh.....	41

## Úvod

Technologie depozice povlaku studeným nástřikem, nazývaná Cold spray je poměrně těžké zařízení pro ruční manipulaci nad místem nástřiku, je proto vhodné dělo Cold spraye, nebo předmět, který má být nástřikán polohovat roboticky. Případně manipulovat roboticky s oběma. Tím se dosáhne větší přesnosti a opakovatelnosti i pro velmi komplexní topologie.

Při nástřiku dochází ke vzniku vnitřních pnutí, což je možné minimalizovat pomocí vhodných trajektorií depozice. Tato práce se proto zabývá vlivem 3 druhů trajektorií na materiálové vlastnosti nástřiku na modelovém vzorku substrátu z hliníku, který je povlakován práškovou mědí.

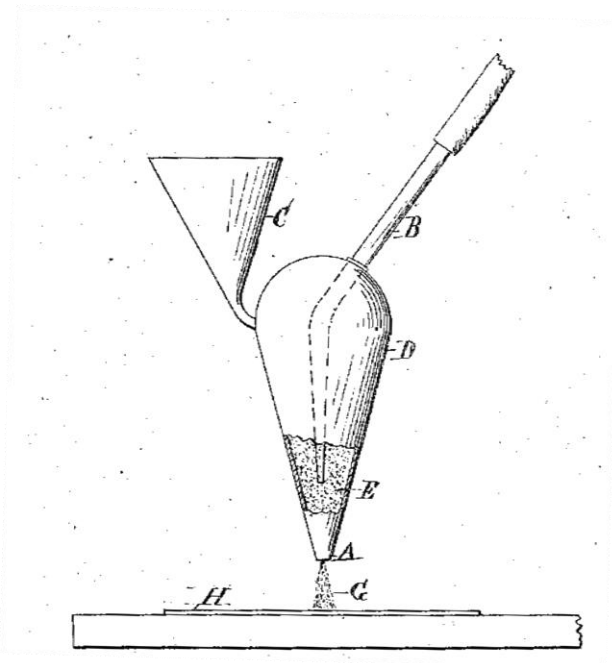
# 1. Teoretická část

V teoretické části jsem se seznámil s historií technologie Cold spray, dále se základními principy, které se zde uplatňují. Rozdělil jsem Cold spray zařízení na dva typy podle tlaku plynu, při kterém jsou provozovány. Zaměřil jsem se i na princip tvorby nástřiku, metalurgický a mechanický princip vzniku adheze mezi nástřikem a substrátem. V závěru této části jsem shrnul výhody a nevýhody technologie Cold spray.

## 1.1 Historie

Nejvýznamnějšími milníky v historii cold spreje, patřícího do technologické rodiny tepelných nástřiků, jsou roky 1900, 1958, osmdesátá léta 20. století. A to i přesto, že je obvykle řazen jako nejmladší z podobných technologií. Ty ovšem byly objeveny až později.

Rok 1900 je významný podáním patentu Samuelem Hemanem Thurstonem ve Spojených státech amerických [1]. Který uvedl myšlenku cold spreje v život. Patentový náčrt jeho zařízení je vyveden na Obr. 1.



Obr. 1: Patentový náčrt na patentu US706701A [1]

Kde: A – „tryska“, B – přívod plynu, C – Zásobník prášku, D – Mísící oblast, E – Oblast mísení plynu a prášku, G – proud směsi plynu a prášku, H – podklad / substrát.

Historie technologie Cold Spray se začala psát před stoletím, dokonce před jinými technologiemi ve skupině tepelných nástřiků, ke kterým patří. Byla však na nějakou dobu pozapomenuta.

V roce 1902 pan Thurston podal patent na metodu kladení kovů na sebe. Při této metodě jsou částičky kovu urychleny expanzí natlakovaného plynu oproti kovové podložce. A to tak, že síla, se kterou dopadají na tuto destičku, způsobí jejich spojení s podložkou, čímž utvoří povlak. Maximální rychlost částic je menší než 350 m/s při pokojové teplotě. Čímž je poměrně limitován okruh kovů, které lze nanášet.

Při dalším zdokonalení je metoda vylepšena o ohřev nanášeného materiálu. Tím se okruh použitelných materiálu nepatrně rozšířil.

Přestože supersonická tryska v této době již byla známa, trvalo dalších padesát let, než se zde začala uplatňovat. Stalo se tak v roce 1958, kdy si pan Rocheville nechal patentovat vylepšení Thurstonovy metody, při níž použil trysku DeLavalova typu a vysokotlaký vzduch, urychlující stříkané částice na vyšší rychlosti. Při tomto vylepšení došlo k rovnoměrnému nanesení tenkého povlaku, neumožňovalo však nanášení tlustých vrstev.

První zmínky o technologii Cold Spray, tak jak si ji představujeme dnes, si tedy připisuje až Rusko 80. let 20. století, kdy skupina vědců z Institutu teoretické a aplikované mechaniky Sibiřského oddělení Ruské akademie věd v Novosibirsku popsala fenomén „cold spray“ [2], [3].

## 1.2 Princip

Cold spray je technologie využívající nepružných srážek částic nanášeného materiálu s podkladním materiálem označovaným jako substrát. Uvolněná energie při dopadu způsobuje lokální natavení těch částí povrchu částice a vzorku, které se právě dotýkají. Při tomto natavení není v dané lokalitě umožněn, zmíněným dotykem, přístup vzduchu a je tedy zamezováno oxidaci povrchu. Zamezení oxidaci povrchu dále napomáhá nosný plyn, kterým je obvykle dusík, nebo hélium (toto neplatí v případě, kdy jako nosný plyn je zvolen stlačený vzduch).

Vzduchu se dá využít v případech, kdy materiály, nebo aplikace, není náchylná k oxidaci, a případně při nedostatku financí.

Cold spray využívá DeLavalovu dýzu pro urychlení plynu s práškem (rychlosti vyšší než 300 m/s) [2] před srážkou se substrátem. Substrátem jsou typicky kovové předměty, ale je možné provést nástřik na jiné materiály, například plastové. Zatím je však pro nástřiky na plastové materiály v potřebné kvalitě třeba dalšího výzkumu. [4]

System je kontrolován tlakovými čidly, teplotními čidly a ventily. Výstupní datové linky jsou svedeny do řídicího systému nezávislého na řídicím systému robotického manipulátoru, tzv. kontroler. Řídicí systém má uživatelské rozhraní pro zobrazování dat z čidel a nastavení parametrů nástřiku obvykle na dotykovém displeji.

Teplota plynu na výstupu nepřesahuje 1000 °C, vždy je volena tak, aby nedocházelo k ohřátí částic prášku na teplotu tání.

## 1.3 Základní typy Cold spray systému

Zařízení se provádí ve dvou variantách s rozdílnými vlastnostmi na základě mírně odlišného provedení. Podrobněji jsem je rozebral v následujících podkapitolách.

### 1.3.1 Vysokotlaký typ

Vysokotlaký Cold spray je konstruován tak, že přivádí prášek nanášeného materiálu v ose děla (axiálně) a to v zužující se části DeLavalovy dýzy. Operuje s tlaky plynu v rozmezí 20–40 ojedinele až 70 barů [5].

Hnací plyn je přes hlavní uzávěr a regulátor tlaku přiveden do rozvodného panelu. Zde je proud rozdělen do dvou větví.

První z nich vede do děla, do kterého vstupuje zadní částí, zahřívá se topnou spirálou (ohříváč plynu), v přední části změni směr a vrací se zpět, aby se dál ohřívá a opět, tentokrát naposledy, změnil směr a směřoval přes mísící oblast a přes DeLavalovu dýzu k podkladu. Tento proud plynu se obvykle označuje jako hnací proud, odtud hnací plyn a okruh hnacího plynu.

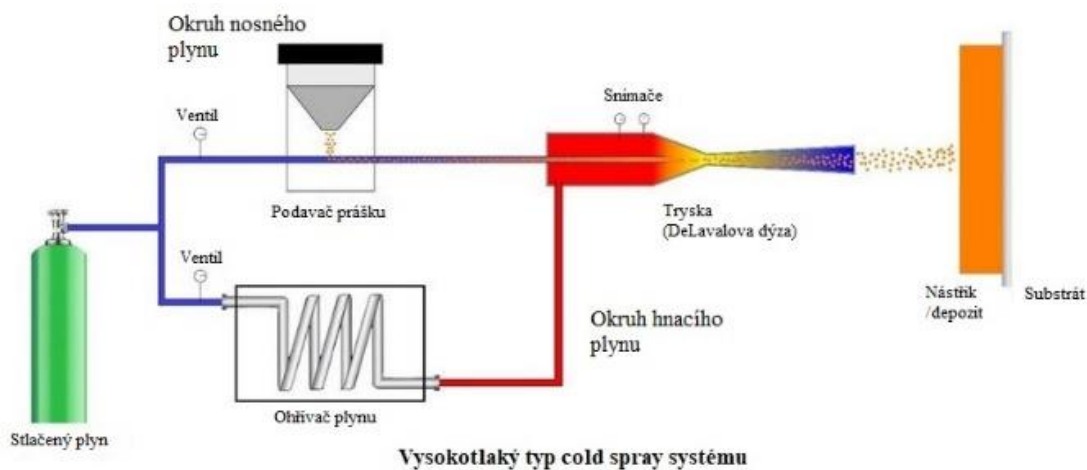
Druhý proud po rozdělení je přiveden k zásobníku s práškem. Horní část zásobníku je spojena s potrubím tohoto proudu pro vyrovnání tlaku tak, aby nedošlo při dávkování

prášku do proudu plynu k zablokování mechanismu rozdílem tlaků. V zásobníku je volně nasypán prášek, který je dělicím karuselem dávkován do druhého proudu plynu, který jej vede do mísící komory, kde se oba proudy spojí a unášejí prášek dýzou na vzorek. Tento druhý proud je obvykle označován jako nosný proud, odtud tedy označení pro nosný plyn a okruh nosného plynu.

Systém je kontrolován tlakovými čidly, teplotními čidly a ventily. Řízení je vyvedeno na dotykový panel.

Výše popsaný vysokotlaký typ Cold spray systému je pro lepší názornost vyobrazen na Obr. 2. Ohřívač plynu spolu s tryskou jsou umístěny v jedné nádobě, označované jako dělo.

Tento typ je reprezentován například zařízením od PlasmaGiken, Japonsko. [6]



Obr. 2: Schéma vysokotlakého typu Cold spray systém [2] [upraveno]

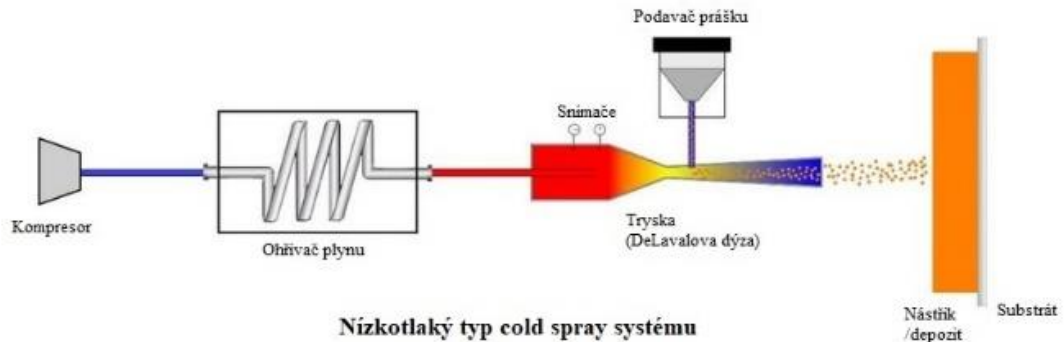
### 1.3.2 Nízkotlaký typ

Nízkotlaký Cold spray je konstruován tak, že přivádí prášek materiál kolmo k ose děla (radiálně) přímo do DeLavalovy dýzy, konkrétně do její rozšiřující části. Plyn z kompresoru, nebo z nádoby na stlačený plyn není rozdělován na dva proudy. Protože je prášek přidáván až v DeLavalově dýze je plyn od zdroje nazýván jako hnací. Hnací plyn je přehříván topnou spirálou. Tlak plynu se pohybuje v intervalu 8–20 bar.

Výhodami tohoto konstrukčního řešení Cold spraye je delší životnost trysky, jelikož nedochází k natažení prášku na povrch trysky. Díky nižšímu operačnímu tlaku oproti vysokotlaké variantě je zvýšena bezpečnost a přenositelnost zařízení. Je tak umožněno pro nenáročné aplikace i jeho ruční vedení. Další nespornou výhodou jsou nižší operační náklady, neboť spotřeba plynu není tak velká v porovnání k předešlému typu.

Výše popsaný nízkotlaký typ Cold spray systému je pro lepší názornost vyobrazen na Obr. 3. Ohřívač plynu spolu s tryskou jsou umístěny, stejně jako u vysokotlakého typu v jedné nádobě, označované jako dělo.

Nevýhodou je menší účinnost depozice částic na matici. Podle [7] jde o účinnost typicky nižší padesáti procentům. Čímž se zvyšují náklady na nástřikový materiál.



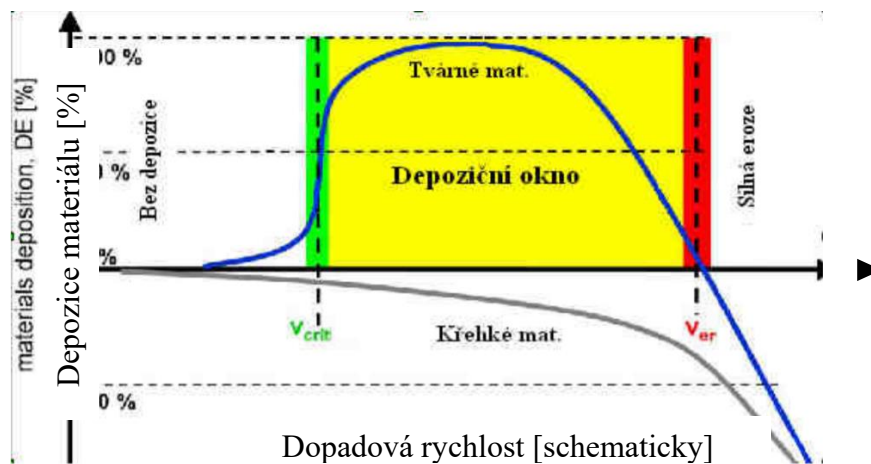
Obr. 3: Schéma nízkotlakého typu Cold spray systém [2] [upraveno]

#### 1.4 Princip tvorby nástřiku

Nástřik se tvoří tryskáním částic nanášeného materiálu na substrát. V závislosti na dopadové energii (reprezentováno dopadovou rychlostí) dopadajících částic dochází k odražení, depozici nebo erozi. Pro pojmenování tohoto poznatku se vžilo označení „Depoziční okno“ (například [8] a [9]).

Na Obr. 4 je schematicky znázorněna závislost účinnosti depozice materiálu na substrát pro různé dopadové rychlosti při neměnné teplotě a objemovém množství částic opouštějících dělo. Můžeme si povšimnout oblasti bez depozice ležící pod kritickou rychlostí, rychlého nárůstu účinnosti na kritické rychlosti, depozičního okna mezi kritickou a erozní rychlostí a konečně oblasti silné eroze nad erozní rychlostí.

Z téhož obrázku je také patrné, že křehké materiály nejsou vhodné pro impaktní nanášení materiálu metodou Cold spray, neboť u nich nastává eroze téměř okamžitě.



Obr. 4: Schéma závislosti dopadové rychlosti na depozici materiálu na substrát [8] [upraveno]

Dalším parametrem, který ovlivňuje míru depozice je dopadový úhel částic na substrát. Přičemž nejlepších výsledků se dosahuje při kolmém dopadovém úhlu. Dopadový úhel spolu s dopadovou rychlostí mají také za následek různá zbytková napětí. Touto problematikou se zabývá zajímavý článek [10].

#### 1.5 Metalurgický princip vzniku adheze se substrátem

Vycházíme-li z technologie slinování (lisování prášku zahřátého na 80 % teploty tavení materiálu prášku), pak adheze na metalurgickém principu vzniká pronikáním elektronů prášku do elektronového obalu atomů substrátu. K tomu dochází díky dodané energii ve formě tepla, čímž se překoná energetická bariéra odpuzivých sil mezi elektrony jednotlivých atomů.

Provázáním elektronových obalů substrátu a nástřiku pak dochází k adhezi mezi nimi. Pro odloupení nástřiku od substrátu je pak třeba dalšího energetického zásahu k oddělení elektronových obalů. [4]

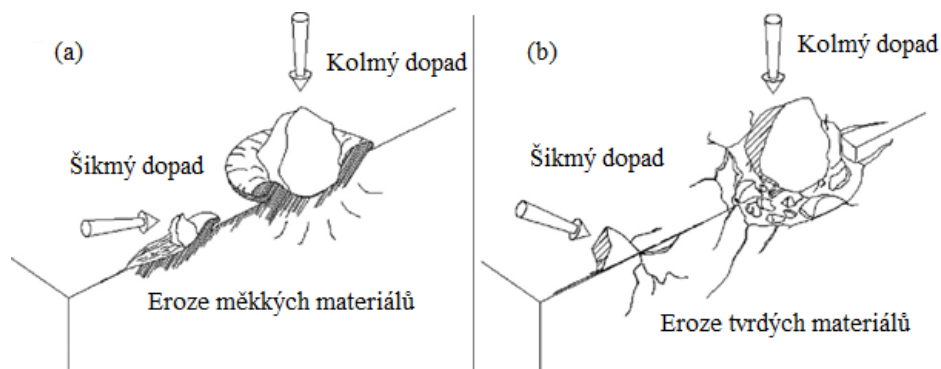
### 1.6 Mechanický princip vzniku adheze se substrátem

Adheze na mechanickém principu spočívá v uvolnění energie nepružnou srážkou částice prášku na substrát. Uvolněná energie se jednak využije v metalurgickém principu, jednak k lokálnímu zkapalnění částice, které pak lépe zkopíruje povrch substrátu a dosedne tak k němu větší plochou, na které se metalurgický princip může uplatnit.

Toto kopírování však není aplikovatelné bez omezení. Je závislé na dopadové energii, viskozitě částice po natavení, kvalitě povrchu substrátu a materiálech substrátu a prášku. Některé kombinace materiálů jsou tak náchylnější na pórovitost nástřiku. [4]

### 1.7 Vliv typu substrátu na depozici

Při dopadu částic s rychlostí přesahující erozní rychlost dochází k erozi. V následujících podkapitolách jsem rozdělil substrát podle typu na měkký a tvrdý typ, jejichž impaktní krátery jsou vyobrazeny na Obr. 5.



Obr. 5: Impaktní eroze dle typu materiálů [upraveno] [10]

#### 1.7.1 Měkký substrát

Měkký substrát vykazuje charakteristiky pružného materiálu. Při dopadu částice o nedostatečné energii pro depozici dojde, jako v případě tvrdého substrátu, k jejímu odmrštění od substrátu. Částice s energií potřebnou pro depozici jsou nástříknuty na substrát. Pokud energie přesáhne kritickou mez, dojde k erozi substrátu.

Obr. 5 (a) vyobrazuje erozi měkkého materiálu. Impaktní kráter je ohraničen valem z materiálu částice a substrátu. Trhliny nejsou z povrchu patrné, tvoří se pod dnem kráteru. [10]

V článku [11] jsou studovány tvary dvojice kráter-částice a jejich vazbu. Potvrzuje se, že s rostoucí odchylkou od kolmosti dopadové dráhy částice na substrát, dochází k většímu skluzu po povrchu substrátu, což ovlivňuje spolu s dopadovou rychlostí přilnavost a porozitu nástřiku.

#### 1.7.2 Tvrdý substrát

Tvrdý substrát vykazuje charakteristiky křehkého materiálu, při dopadu částice o malé energii dochází k odražení částice. V případě energie částice přesahující kritickou mez (erozní rychlost) dojde k erozi substrátu. Tato mezní rychlost je u tvrdého (křehkého) materiálu blízká nule, k erozi tedy dochází už při malých rychlostech.

Na Obr. 5 (b) je znázorněna eroze tvrdého materiálu. Impaktní kráter je ohraničen úlomky substrátu, trhliny jsou patrné z povrchu a dosahují větších rozměrů než u substrátů z měkkých materiálů.

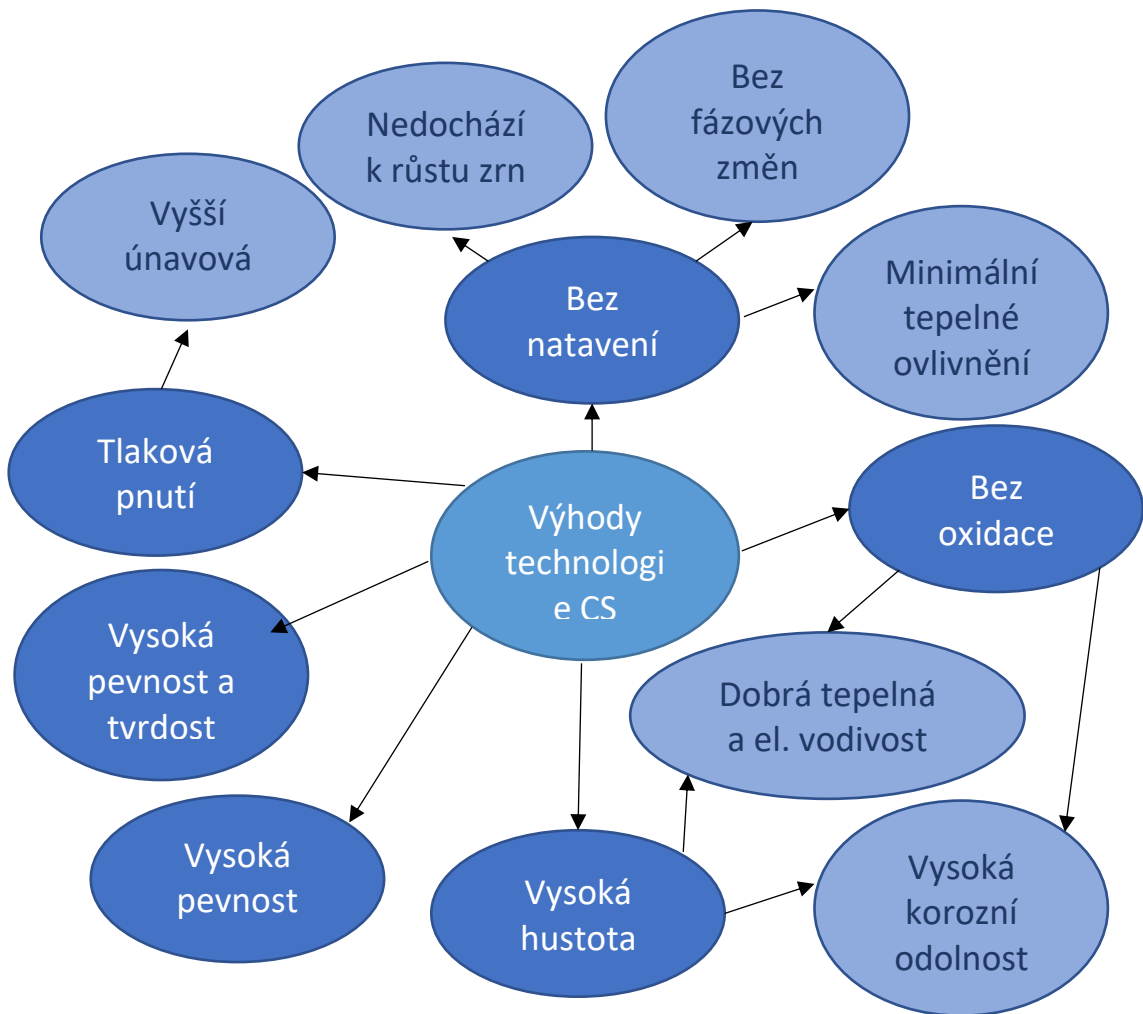
Dopadový kráter má ostré hrany a směrem od středu kráteru se mohou šířit trhliny. Odmrštěný materiál substrátu má tvar bloků krystalické struktury. [10]

### 1.8 Výhody Cold spray

Jak již bylo zmíněno, výhodou Cold spray technologie je mimo jiné nízká teplota částic nástřiku, která je nižší než teplota tání daného materiálu, díky čemuž se značně omezuje povrchová oxidace. Dochází také k zmenšení tepelně ovlivněné zóny substrátu. [11]

Při nástřiku technologií Cold spray nedochází k natavení částic před dopadem a oxidaci. Nástřik vykazuje vysokou hustotu, tlaková pnutí a vysokou pevnost a tvrdost. Výhody a jejich důsledky přehledně shrnuje Obr. 6.

Je možno jak robotizované vedení Cold spray děla, tak jeho vedení ruční. [12]



Obr. 6: Diagram výhod Cold spray zařízení [13]

### 1.9 Nevýhody Cold spray

Technologie není vhodná pro krátké doby nástřiku. Před samotným nástřikem je třeba dělo nahřát na provozní teplotu a po nástřiku ochladit na teplotu blízkou okolí. Při rozběhu i doběhu je spotřebován provozní plyn, čímž se zvyšují fixní provozní náklady za tento plyn a energii. Tyto náklady jsou pro konkrétní materiálovou kombinaci prášek-substrát nezávislé na délce trajektorie. Může se tedy stát, že cena za trajektorii bude zanedbatelná vůči fixním provozním nákladům.



Dalšími nevýhodami jsou omezená schopnost Cold spraye nanášet velmi tvrdé materiály jako je například keramika a vyčerpání plasticity nástřiku – plastickou deformací při nárazu.

Nástřík je tak často tvrdý a křehký, což ovšem může být při určitých aplikacích výhodou. Zatím neodstraněnou nevýhodou je neschopnost nanášet kov na širokou škálu plastů. [4]

### 1.10 Spojení s robotikou

Pro užitečné aplikace technologie je nezbytné pro ni zabezpečit vedení, nebo polohování. V současné době máme pouze čtyři možnosti, z kterých můžeme volit. Ruční vedení – podobně jako ruční vrtačka, statické umístění na nosné konstrukci, ručně-mechanické vedení – obdobně starým soustruhům, a robotické polohování – a to ať jako CNC nebo pomocí robotické ruky.

S ručním polohováním je spojeno nepohodlí ve formě relativně těžkého děla, které je potřeba poměrně dlouhou dobu dostatečně přesně držet nad místem nástřiku.

Cold spray se skládá z několika systémů, které lze roboticky ovládat a získávat na nich potřebné senzorické vstupy.

#### 1.10.1 Dávkovací systém

Nádoba na prášek (možno výměnná), dávkovač (např. karusel), rozvod plynu (potrubí, tlakoměry, ventily) a ovládací prvky (tlačítka, spínací klíček) tvoří dávkovací systém. Ten zajišťuje správné dávkování prášku, ovládání nosného plynu (zapnuto/vypnuto) a hlídá jeho tlak.

Z tohoto systému lze získat data o tlaku nosného plynu, zbývajícím množství prášku a stavu ventilů.

Lze řídit stav ventilů a množství prášku.

#### 1.10.2 Řídicí systém

Uživatelské rozhraní, např. dotyková obrazovka, a řídicí deska, případně programovatelný logický automat (PLC) tvoří řídicí systém.

Z tohoto systému lze získat data o tlaku plynu v různých místech zařízení, množství přidávaného plynu, teplotách uvnitř děla, teplotě chladicí vody, a uživatelské parametry. Nastavení ostatních systémů lze řídit přes tento systém, nebo jednotlivě (vyžaduje úpravu řídicího systému)

#### 1.10.3 Manipulační systém děla

Manipulační systém děla (MSD) je na ostatních systémech nezávislý a není řízen řídicím systémem Cold spraye. Disponuje vlastním řídicím systémem označovaným jako kontroler. MSD je často dodáván spolu s CS, ale jde o výrobek jiné firmy. Vzájemně nemusí být kontroler s řídicím systémem propojeny. Je však výhodné je propojit.

#### 1.10.4 Manipulační systém obrobku

Manipulaci obrobku obvykle obstarává MSD. Manipulační systém obrobku (MSO) v případě robotické manipulace je řízen stejným kontrolerem jako MSD. Díky tomu je umožněn synchronizovaný pohyb obou systémů.

#### 1.10.5 Možnosti autonomního řízení

V případě specifických aplikací by bylo možné instalovat kamerový systém, systém rozpoznávání obrazu a propojit jej s kontrolerem a řídicím systémem tak, aby byl vzorek opracován i s tolerancí upevnění, nebo aby byly opraveny vady v topografii jeho povrchu. Je však třeba dodat systému větší výpočetní výkon.

### 1.10.6 Vliv trajektorie vedení děla na mechanické vlastnosti vzorku

Trajektorie vedení děla, a to jak robotickým systémem, mechanickým systémem, nebo ručním vedením, má vliv na výsledné mechanické vlastnosti vzorku substrát-depozit. Zejména jde o následující parametry:

#### *Vzájemný úhel normály povrchu substrátu a osy trysky děla*

Ukazuje se, že s rostoucím úhlem mezi normálou povrchu a osou trysky děla klesá účinnost depozice materiálu na substrát. Pro rozmezí úhlu  $90^{\circ}$ – $70^{\circ}$  je však zmíněný pokles zanedbatelný.

Významný vliv na účinnost depozice nemá jen úhlová odchylka osy děla od normály povrchu substrátu, ale také topologie blízkého okolí. Čím je významnější prostorové natočení normály mezi dvěma blízkými body, tím více se zhoršuje odfuk nosného plynu a odražených částic, který je pak nucen interagovat s nosným plynem obsahujícím částice, tím je zpomaluje a dochází tak ke zvýšené porozitě v takovémto místě substrátu z důvodu srážek částic odražených a nově přilétajících. Případně k lokálnímu snížení velikosti adheze mezi částicí depozitu a substrátem. [14]

#### *Rychlost pojíždění děla nad substrátem*

Rychlost pojíždění děla nad substrátem má zejména vliv na mocnost vrstvy depozitu. Dalším vlivem tohoto parametru je teplotní zatížení substrátu, případně substrátu a depozitu. S klesající rychlostí pojíždění se do vzorku v daném místě vnáší více tepla. Vzorek je pak více teplotně namáhán a mohou vznikat teplotně ovlivněná místa. Na druhou stranu se zlepšuje přilnavost depozitu k substrátu i mezi jednotlivými částicemi. [15]

Z robotického pohledu řízení systému je tento parametr ovlivňován množstvím zadaných bodů, kterými se snaží kontroler proložit trajektorii. S větším množstvím bodů ležících blízko u sebe se zvyšuje náročnost na výpočetní čas, protože může docházet k zpomalení robotického mechanismu, aby nebylo třeba robot úplně zastavit. V kritických okamžicích nevhodně zadané trajektorie dochází i k zastavení chodu programu.

Z pohledu mechaniky robotické soustavy je kontroler v bodech trajektorie, kde dochází k významné změně směru pohybu. K tomu dochází z důvodu hybnosti jednotlivých částí robota a děla, což způsobuje namáhání servopohonů robotické soustavy, a proto s tím již programy v omezené míře počítají a zpomalují před takovými body rychlost pohybu. Fenoménu popsaném v předešlých dvěma odstavcích se lze částečně vyhnout zhoršením nároků na přesnost vykonávání trajektorie a je tedy třeba nad trajektorii přemýšlet již při jejím sestavování. [15]

Pozn. Článek [15] poskytuje zajímavé náměty, které je vhodné zapracovat do budoucího návrhu trajektorie. Jde o úpravu trajektorie Spiral (použité v kap. 2) kdy se dělo v jedné vrstvě vrací mezerou zanechanou mezi dvěma sousedními křivkami nanesených při dostředném pohybu. Dále pak přizpůsobení trajektorie hranici oblasti nástřiku (při opravách poškození součástí).

#### *Vzdálenost mezi ústím trysky děla a substrátem, tzv. „stand-off distance“*

Vzdálenost mezi ústím trysky děla a substrátem vnáší tyto vlivy: změnu velikosti plochu depozitu při jednom přechodu nad substrátem, změnu rychlosti částic (záleží taktéž na prostorové orientaci celého systému dělo-vzorek vzhledem k tíhovému poli Země.

Jelikož proud částic z trysky děla Cold spraye nevykazuje tvar válce, ale kužele s pomyslným vrcholem uvnitř na ose trysky, s rostoucí vzdáleností se zvětšuje plocha, na kterou dopadají částice nástřiku.

V případě takové orientace soustavy dělo-substrát, kdy se dělo nachází kolmo nad substrátem (v tíhovém poli Země) jsou částice urychlovány gravitačními silami a zpomalovány odporem vzduchu, avšak jejich trajektorie se významně nemění.

*Samotná trajektorie ve smyslu tvaru dráhy pohybu koncového bodu trysky jako dráha TCP – „Tool center point“ / Bod středu nástroje.*

Trajektorie nanášení depozitu na substrát má za následek ohřev substrátu s depozitem v různých místech a časech. Rozložení tepla ve vzorku je tak nerovnoměrné, což způsobuje vnitřní pnutí. Různé trajektorie umožňují směřovat vnitřní pnutí různými směry. Některé trajektorie mohou být náchylnější nad oddělování nástřiku od substrátu více než jiné.

Zahrneme-li mezi parametry trajektorie i parametry proudu plynu, pak jde i o tyto parametry:

*Tzv. feed-rate, tj. rychlost, nebo množství podávaného prášku*

Při zvýšení feed-rate, za udržení konstantní rychlosti pohybu TCP dochází k depozitu mocnější vrstvy materiálu na substrát, a zvýšení teploty v daném místě. Pokud je změna feed-rate pouze lokální (dočasná) dojde k vnesení vnitřního napětí.

*Teplota plynu*

Teplota plynu ovlivňuje kinetickou a tepelnou energii částice, čímž dochází k zvýšení dopadové energie. Zvýšení teploty plynu mívá za následek zvýšení účinnosti depozice, nesmí však přesáhnout teplotu tání materiálu prášku.

*Tlak plynu před tryskou děla*

Tlak plynu zvyšuje kinetickou energii částic prášku bez jejich dodatečného zahřívání.

## 2 Praktická část

V praktické části jsem se zabýval: popisem pracovní stanice, výběrem vhodných trajektorií, specifikací zadání, trajektoriemi Lines, Criss-cross a Spiral a jejich vzájemným porovnáním z pohledu sledovaných materiálových charakteristik vzorků. Na závěr jsem se zamyslel nad možnými vylepšeními, která by stála za bližší prozkoumání.

### 2.1 Pracovní stanice

Pracovní stanice, na které byla tato část provedena, je Cold spray zařízení, jehož dělo bylo připevněno jako efektor k robotické ruce ABB. Robotická ruka ABB IRB 4600 řízeného z kontroleru IRC5. Vzorek je upevněn na robotický manipulátor ABB IRBP A, jehož ovládní je taktéž realizováno ze společného kontroleru s robotickou rukou. Vzhled robotické ruky a manipulátoru je k vidění na Obr. 7 a Obr. 8. Cold spray zařízení je od firmy Impact Innovations, GmbH.

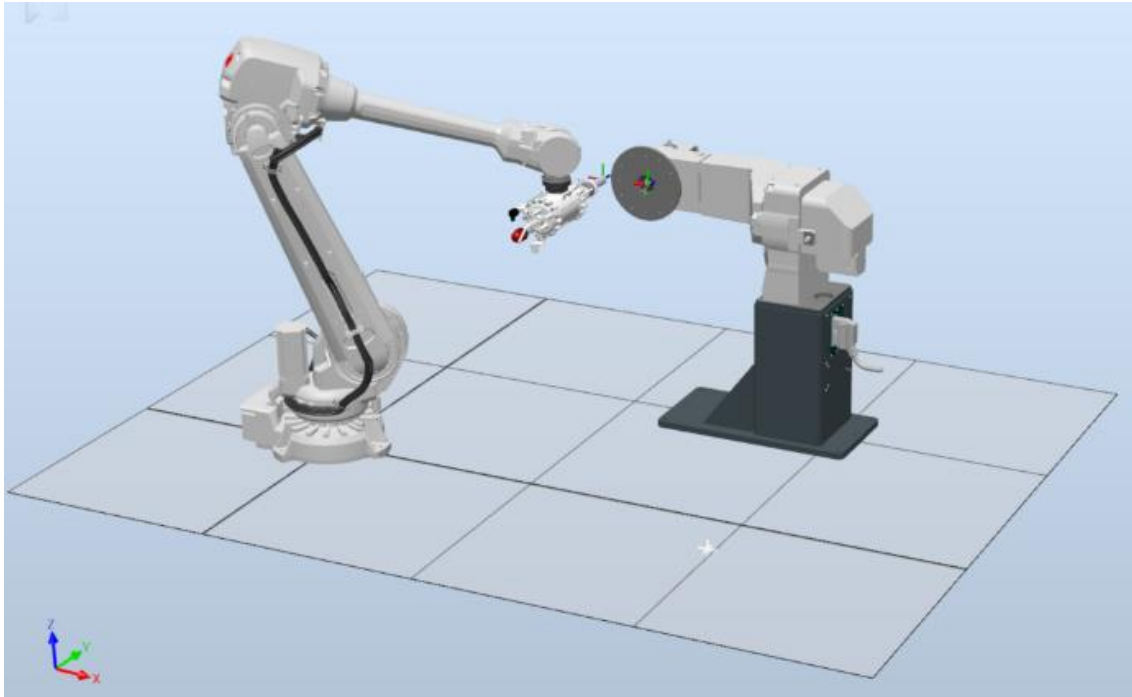


Obr. 7: Robotická ruka ABB IRB 4600 [16]



Obr. 8: Robotický manipulátor ABB IRBP A [17]

Manipulátor byl pro všechny vzorky nastaven do takové pozice, že normála povrchu substrátu svírala s normálou povrchu podlahy pravý úhel. Vizualizace pracovní stanice je vyvedena na Obr. 9.



Obr. 9: Pracovní stanice (Ing. Jan Vetiška, Ph.D.)

## 2.2 Zadání

Zadání dle zadání bakalářské práce:

*Cílem práce je shrnutí nejnovějších poznatků z oblasti nástřiků metodou Cold spray a vyhodnocení vlivu parametrů trajektorie trysky (rychlost posuvu, úhel naklonění, rastr, množství podávaného prášku atd.) na mechanické vlastnosti depozitu.*

Na základě komunikace s vedoucím práce bylo dohodnuto zvolení dvou nově naprogramovaných, zajímavých trajektorií a trajektorie Lines, která již byla naprogramována, jichž bude použito na nástřik na vzorek destičky 20 x 20 mm.

Úhel naklonění osy děla vůči normále povrchu substrátu byl zadán jako konstantních 90°.

## 2.3 Diskuse zadání a výběr trajektorií

Pro porovnání trajektorií srovnáním materiálových charakteristik vzorků byly tedy vybrány tři trajektorie.

První trajektorií pracovně označenou jako Lines, tvořily úsečky pojížděné horizontálně. Tato trajektorie byla zvolena pro svou extrémní jednoduchost.

Druhou z vybraných trajektorií byla vybrána trajektorie označená jako Criss-cross. Výběr na ni padl pro její jednoduchost a rozšířené užívání při testování Cold spraye.

Jako poslední trajektorii jsme zvolili trajektorii tvořenou spirálou, označenou jako Spiral. Byl záměr zjistit, zda do vzorku vnese menší zbytkové napětí oproti Criss-cross trajektorii, která je známá pro vnášení vnitřních napětí po hranicích vzorku více než uprostřed. Čímž se zvyšuje riziko oddělení nástřiku od substrátu na hranici vzorku a následné zdeformování nástřiku do tvaru misky.

Úvahy o změnách feed-rate byly zavrženy z důvodu nepovolení propojení kontroleru cold-spray s kontrolerem IRC5 robota. A tedy nemožnosti řídit feed-rate parametricky z řídicího softwaru trajektorií.

Dále bylo určeno, z finančních důvodů, že se s úhlem mezi osou děla a normálou povrchu substrátu nebude manipulovat a bude udržován na 90°.

Rychlost posuvu byla nastavena na 450 mm/s relativně k substrátu, při trajektorii Spiral byla rychlost posuvu snížena kinematikou robotické ruky, z důvodu rychlých změn vektoru pohybu. Tuto změnu v laboratoři kompenzovali změnou množství podávaného prášku pro možnost srovnání trajektorií.

Článek [20] se zabývá podobnými trajektoriemi. V kapitole 2.7 jsme porovnali naměřené hodnoty na vzorcích podobných trajektorií. I v tomto článku je pozorována větší tloušťka depozitu v centru spirální trajektorie. V případné další práci bych rád zkusil sestavit a odladit simulaci, řešící tento problém návrhem změn parametru feed-rate tak, aby výsledná tloušťka zůstala konstantní.

### 2.3.1 Společné parametry pro trajektorie

Za společné parametry trajektorií byly zvoleny: rychlost pohybu po trajektorii 450 mm/s, zajištěná rozjezdovým a dojezdovým ochranným perimetrem kolem vzorku; vzdálenost od vzorku 30 mm; již zmíněná kolmost úhlu osa děla – normála povrchu substrátu, vzdálenost mezi sousedními přejezdy trysky 1 mm; ochranná pásma 10 mm a počet vrstev byl ustanoven na 10. Tlak plynu (dusík), teplota ohřevu a množství podávaného prášku nebyly, ze zmíněného důvodu nepropojenosti kontrolerů, parametrizovány v rámci návrhu trajektorie. Tlak byl nastaven na hodnotu 25 bar, teplota ohřevu plynu na 450 °C. Jako výchozí referenční bod byl zvolen horní levý vnitřní roh svěraku vzorků umístěného na manipulatoru. Dále označovaný jako REF.

Materiály vzorků byly vybrány takto: měď (Cu) pro depozit/nástřík a hliník (Al) pro substrát.

## 2.4 Trajektorie Lines

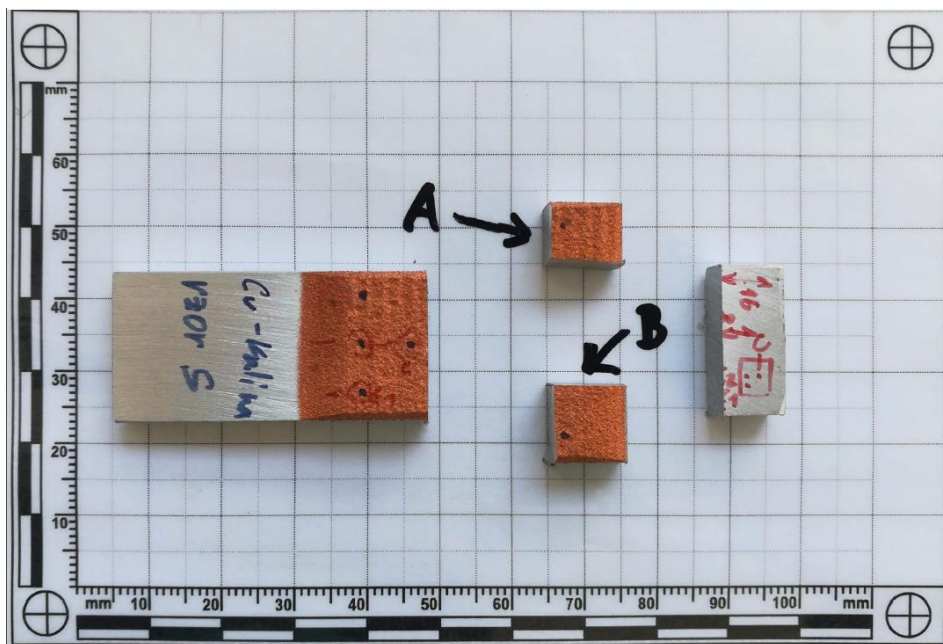
Pro nástřík touto trajektorií byl využit software vytvořený dříve. Proto nebyl vytvořen v rámci této práce.

Parametry dráhy byly nastaveny dle kapitoly 2.3.1.

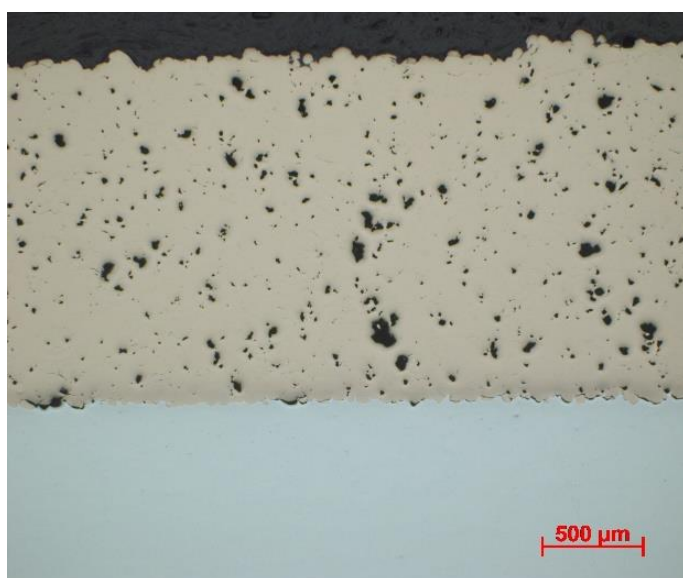
### 2.4.1 Vzorek

Výsledný vzhled vzorku po depozitu, uvolněný ze svěraku a označený (vč. označení bodů pro měření zbytkových napětí), je k vidění na Obr. 10.

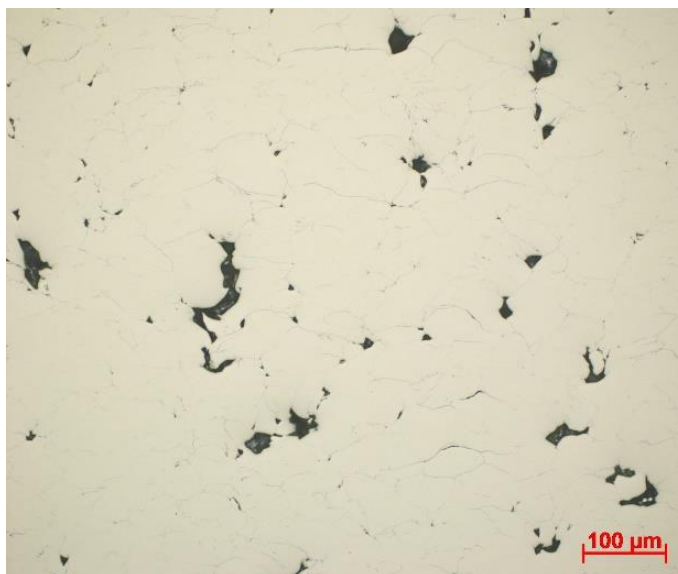
Mikroskopické snímky řezu vzorkem jsou uvedeny níže, byly pořízeny na optickém mikroskopu zn. Olympus GX51. Na Obr. 11 je patrný přehledový snímek, v jehož dolní části se nachází substrát (šedě), ohraničený shora hranicí substrát-nástřík, na níž jsou patrné impaktní krátery od jednotlivých částic depozitu. Za zmínku stojí několik pórů na této hranici. Ve střední části je pak depozit/nástřík s patrnými póry a horní částí je zalévací hmota. Na dalším Obr. 12 je vyobrazen mikroskopický snímek depozitu. Jemu podobné snímky bez měřítka ve snímku, byly použity pro vyhodnocení pórovitosti pomocí programu ImageJ. Ilustrační snímky řezů vzorku použité pro stanovení porozity jsou přiloženy v příloze.



Obr. 10: Vzorek Lines, depozit 20x20 mm



Obr. 11: Mikroskopický přehledový snímek řezu vzorkem trajektorie Lines



Obr. 12: Mikroskopický snímek deponitu trajektorií Lines s měřítkem

#### 2.4.2 Sledované materiálové charakteristiky

U vzorku trajektorie Lines byla zjištěna výška nástřiku, porozita a zbytková napětí ve třech bodech.

Výška nástřiku v řezu A (podél trajektorie) byla naměřena jako průměr ze čtyř měření a to  $(1753 \pm 51) \mu\text{m}$ .

Výška nástřiku v řezu B (napříč trajektorií) byla naměřena jako průměr ze čtyř měření a to  $(1697 \pm 43) \mu\text{m}$ .

Porozita v řezu A byla stanovena na  $(1,82 \pm 0,61) \%$ . V řezu B byla porozita stanovena na  $(1,88 \pm 0,33) \%$ . Pro tyto výpočty porozity bylo použito vždy deseti snímků daného řezu, z nichž byla určena průměrná hodnota a směrodatná odchylka.

Zbytková vnitřní napětí byla stanovena:

- v bodě  $[0; 0]$  mm (roh nástřiku) na  $(-19 \pm 4)$  MPa,
- v bodě  $[0; 8]$  mm (okraj uprostřed) na  $(-24 \pm 3)$  MPa a
- v bodě  $[8; 8]$  mm (střed nástřiku) na  $(-27 \pm 1)$  MPa.

Měření zbytkových napětí bylo provedeno v laboratořích CEITEC VUT, měřeno na difraktometru SmartLab (Rigaku) s využitím Cu K-alfa záření. Paralelní svazek byl fokusovaný pomocí dvou zrcadel do kruhové stopy na vzorku o průměru 1 mm. Měřeno bylo metodou iso-inclination s využitím difrakčních rovin (331) difraktujících na úhlu  $2\text{-theta} = 136,5^\circ$ . Protokoly měření jsou přiloženy v příloze.

### 2.5 Trajektorie Criss-cross

Tato trajektorie se skládá z rovnoběžných úseček, které se po každé vrstvě otočily o  $90^\circ$ . Vstupní body jednotlivých vrstev byly voleny na stejných rozích, kde se nacházel výstupní bod předešlé vrstvy. Díky tomu byl ušetřen stříkaný materiál.

#### 2.5.1 Parametry dráhy

Pro parametry  $x_3$ ,  $y_3$  a  $z_3$  se nastavuje posun v příslušných osách mezi levým horním rohem bližší stěny k trysce a REF v milimetrech. Osa x je zarovnaná horizontálně s čelem svěráku, zleva doprava. Osa y je vertikální orientace po levé straně svěráku, shora dolů a osa z je na ně kolmá, ze vzorku k dělu.

Dále byly vytvořeny konstanty parametrů nástřiku, v programu označeny jako parametry tisku (odkaz na 3D technologie), celkem tedy:



- $x_3$  [mm] reprezentující délku vzorku podél osy x, jinak také označované jako délka řádku,
- $y_3$  [mm] reprezentující délku vzorku podél osy y, jinak také jako délka sloupce,
- $d_3$  [mm] reprezentující rozteč mezi sousedními řádky a sousedními sloupci,
- $p_3$  [mm] reprezentující ochranné perimetry okolo vzorku pro rozjezd a dojezd, jinak také značeno jako přejezd,
- $v_3$  [-] reprezentující počet vrstev nástřiku/tisku, kde každá lichá vrstva je řádková, a sudá sloupcová vrstva,
- $u_3$  [mm] reprezentující zdvih po vrstvě, tedy o kolik se má tryska děla oddálit od vzorku po jedné vrstvě.

Dále byly nastaveny tyto parametry, do kterých by běžný operátor neměl zasahovat:

- $M_{Sp}_3$ , což reprezentuje vektor maximálních rychlostí posunů,
- $Home_3$ , výchozí domovská pozice robota, v textu dále jako HOME,
- $Cil_3$ , pozice konce podčásti trajektorie, posouvá se při běhu programu, v textu dále jako CÍL.

Použité hodnoty parametrů trajektorie uvedené v Tab. 1, byly nastaveny na základě zadání vedoucího této práce.

<i>Parametr</i>	<i>Hodnota</i>	<i>Jednotky</i>
$dx_3$	0	mm
$dy_3$	0	mm
$dz_3$	0	mm
$x_3$	20	mm
$y_3$	20	mm
$d_3$	1	mm
$p_3$	20	mm
$v_3$	10	-
$u_3$	0	mm

*Tab. 1: Parametry trajektorie Criss-cross*

### 2.5.2 Software

Software použitý pro nástřik touto trajektorií je přiložen v příloze. V jeho kódu jsou patrné fragmenty pokusu o vytvoření okna pro FlexPedant, který však byl odložen na neurčito z časového důvodu a nízké priority.

Dále je možné si povšimnout, že přístup k tvorbě trajektorie byl následující. Příjezd do HOME, nastavení prvního bodu trajektorie, tj. začátek prvního řádku posunutého o přejezd blíže k HOME, posun robota, během čehož se CÍL nastavil na konec řádku posunutého o přejezd za hranici vzorku, opět posun robota. Stejným postupem se přechází k dalším bodům.

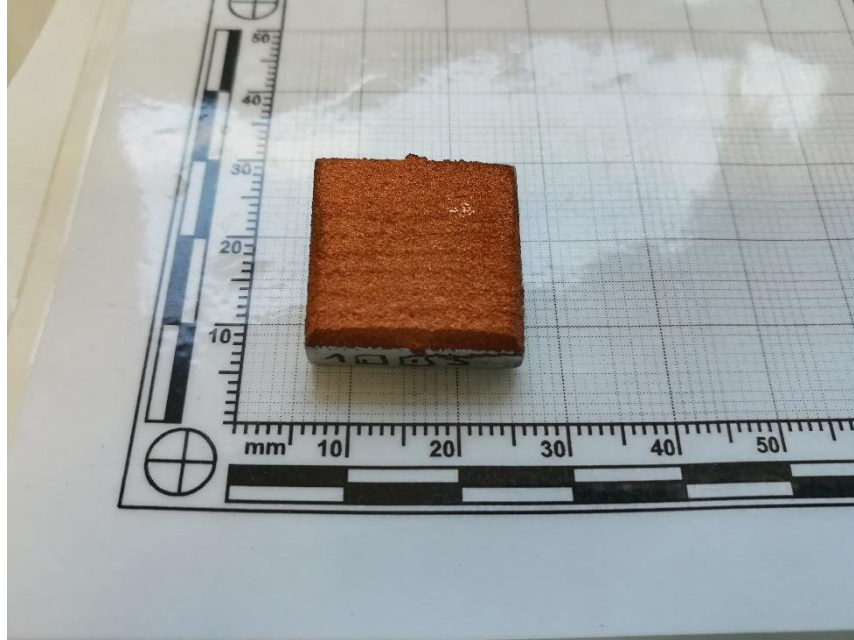
Přesun mezi řádky a sloupci se odehrává na stejných rozích pro úsporu času a materiálu prášku, který by byl nanesen mimo vzorek, čímž by se zvýšila potřeba údržby svěřáku vzorku po konci tisku.

Z hlediska optimalizace dráhy na spotřebu materiálu prášku během přesunů tato trajektorie neposkytovala příliš možností. Jediný očividný přístup byl ve zkrácení

přejezdových vzdáleností, čímž by se zvyšovaly nároky na akceleraci kinematiky robota. Pak by se nedala předpokládat konstantní rychlost během depozitu v oblasti vzorku.

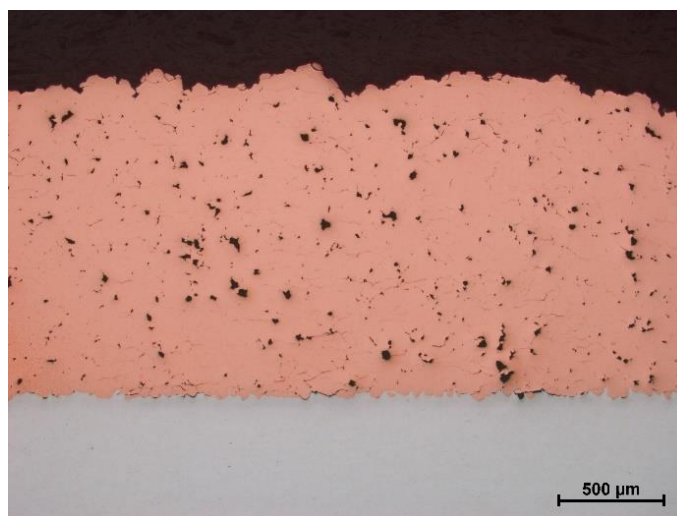
### 2.5.3 Vzorek

Vzhled vzorku po depozitu, uvolnění ze svěráku a označení (vč. Označení bodů pro měření zbytkových napětí), je k vidění na Obr. 13.

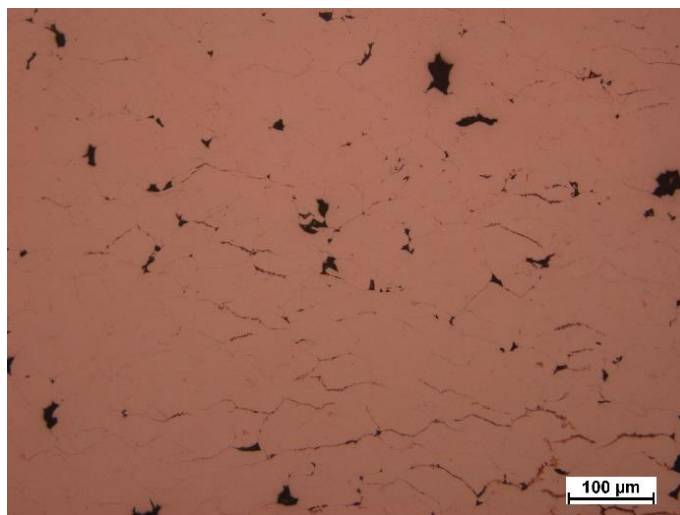


Obr. 13: Vzorek Criss-cross, depozit 20x20 mm

Mikroskopické snímky řezu vzorkem jsou uvedeny níže, byly pořízeny na optickém mikroskopu zn. Olympus GX51. Na Obr. 14 je patrný přehledový snímek, v jehož dolní části se nachází substrát (šedě), ohraničený shora hranicí substrát-nástřík, na níž jsou patrné impaktní krátery od jednotlivých částic depozitu. Za zmínku stojí několik pórů na této hranici. Ve střední části je pak depozit/nástřík s patrnými póry a horní částí dominuje zalévací hmota. Na dalším Obr. 15 je vyobrazen mikroskopický snímek depozitu. Jemu podobné snímky bez měřítka ve snímku, byly použity pro vyhodnocení pórovitosti pomocí programu ImageJ. Ilustrační snímky řezů vzorku použité pro stanovení porozity jsou přiloženy v příloze.



Obr. 14: Mikroskopický přehledový snímek řezu vzorkem trajektorie Criss-cross



Obr. 15: Mikroskopický snímek depozitu trajektorií Criss-cross s měřítkem

#### 2.5.4 Sledované materiálové charakteristiky

U vzorku trajektorie Criss-cross byla také zjištěna výška nástřiku, porozita a zbytková napětí ve stejných třech bodech, jako u trajektorie Lines.

Výška nástřiku v řezu A byla naměřena jako průměr ze čtyř měření a to  $(1165 \pm 56) \mu\text{m}$ . Výška nástřiku v řezu B (kolmý na řez A) byla naměřena jako průměr ze čtyř měření a to  $(1577 \pm 62) \mu\text{m}$ .

Porozita v řezu A byla stanovena na  $(1,28 \pm 0,27) \%$ . V řezu B byla porozita stanovena na  $(1,21 \pm 0,32) \%$ . Pro výpočet porozity bylo použito vždy deset snímků příslušného řezu, z nichž byla určena průměrná hodnota a směrodatná odchylka.

Zbytková vnitřní napětí byla stanovena:

- v bodě [0; 0] mm (roh nástřiku) na  $(-40 \pm 5) \text{MPa}$ ,
- v bodě [0; 8] mm (okraj uprostřed) na  $(-68 \pm 4) \text{MPa}$  a
- v bodě [8; 8] mm (střed nástřiku) na  $(-50 \pm 9) \text{MPa}$ .

Měření zbytkových napětí bylo opět provedeno v laboratořích CEITEC VUT, na stejném zařízení a se stejnými parametry uvedenými v předešlé kapitole. Protokoly měření jsou také přiloženy v příloze.

## 2.6 Trajektorie Spiral

Konkrétně jde o Archimedovu spirálu, která má jednotlivé body při zvoleném úhlu ekvidistantně rozmístěny. Díky této její vlastnosti dochází k rovnoměrnému nástřiku a nevytvářejí se holá místa. Vizualizace jejího tvaru je k vidění na Obr. 23 (na str. 28).

V případě možnosti dalších testů trajektorií by bylo zajímavé provést porovnání trajektorie Spiral a trajektorie Mirrored-Spiral užitě v článku [15]. Porovnání zmíněných trajektorií je možno provést srovnáním Obr. 23 a Obr. 24.

### 2.6.1 Parametry dráhy

Pro trajektorii Spiral byly vytvořeny následující parametry pro uživatelské nastavení:

- dx [mm] reprezentující vzdálenost středu spirály od levého vnitřního horního rohu svěráku v ose x (rovnoběžně s dolní hranou horní čelisti svěráku, orientované zleva doprava),

- $dy$  [mm] reprezentující vzdálenost středu spirály od levého vnitřního horního rohu svěráku v ose  $y$  (rovnoběžně s levou hranou čelistí svěráku, orientované shora dolů),
- $dz$  [mm] reprezentující vzdálenost středu spirály od levého vnitřního horního rohu svěráku v ose  $z$  (kolmé na osy  $x$  a  $y$ , orientované ze vzorku k dělu),
- $leftB$  [mm] reprezentující vzdálenost středu spirály od levé hrany vzorku,
- $upB$  [mm] reprezentující vzdálenost středu spirály od horní hrany vzorku,
- $rightB$  [mm] reprezentující vzdálenost středu spirály od pravé hrany vzorku,
- $downB$  [mm] reprezentující vzdálenost středu spirály od spodní hrany vzorku,
- $lift$  [mm] reprezentující zdvih po vrstvě,
- $levels$  [mm] reprezentující počet vrstev, liché vrstvy dostředné, sudé odstředné,
- $spacing$  [mm] reprezentující vzdálenost mezi dvěma přejezdy při stejném úhlu natočení,
- $delta$  [mm] reprezentující ochranný perimetr okolo vzorku a
- $p$  [°] reprezentující krok aproximace spirály kruhovou trajektorií, označovaný jako přesnost.

Dále byly nastaveny tyto parametry, do kterých by běžný operátor neměl zasahovat:

- $MSp$ , což reprezentuje vektor maximálních rychlostí posunů,
- Home, výchozí domovská pozice robota, v textu dále jako HOME,
- Cíl, pozice konce podčásti trajektorie, posouvá se při běhu programu. V textu dále jako CÍL.

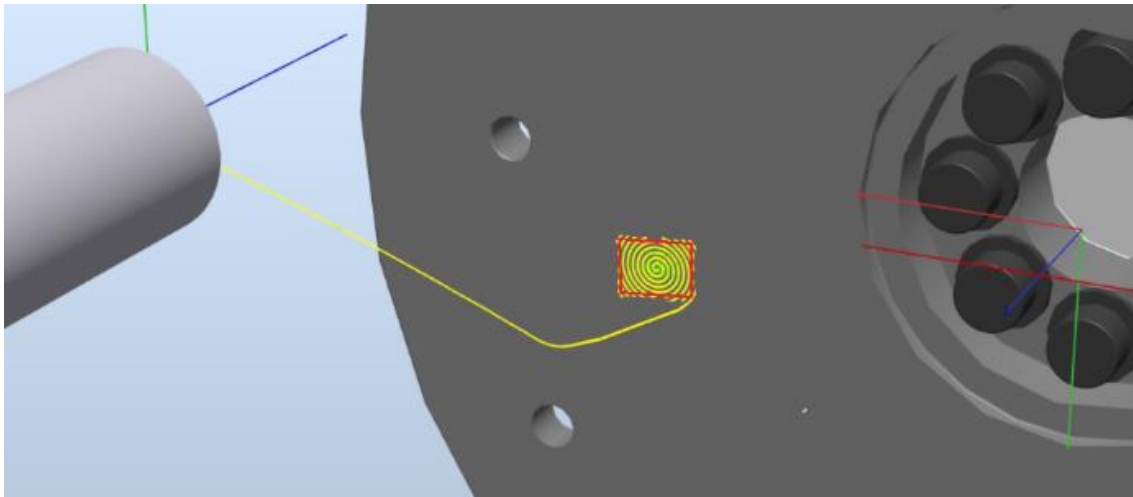
Použité hodnoty parametrů trajektorie uvedené v Tab. 2, byly nastaveny na základě zadání vedoucího této práce.

<i>Parametr</i>	<i>Hodnota</i>	<i>Jednotky</i>
$dx$	0	mm
$dy$	0	mm
$dz$	0	mm
$leftB$	-10	mm
$upB$	-10	mm
$rightB$	10	mm
$downB$	10	mm
$lift$	0	mm
$levels$	10	mm
$spacing$	1	mm
$delta$	10	mm
$p$	5	°

Tab. 2: Parametry trajektorie Spirál

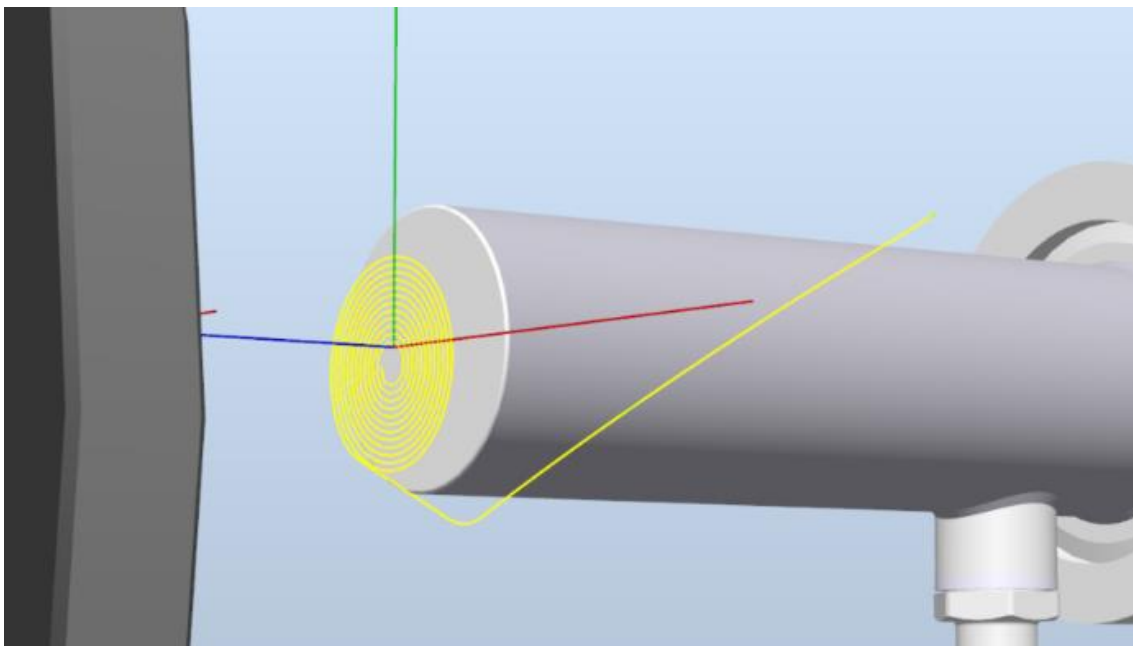
### 2.6.2 Software

Původní myšlenka trajektorie počítala s optimalizací dráhy na přesuny mezi jednotlivými liniemi spirály přesahující hranice vzorku zvětšené o ochranný perimetr  $delta$ . Takovým způsobem, že při výjezdu děla za hranici perimetru by se dělo vrátilo na perimetr a pokračovalo po něm dále ve směru rotace spirály na místo, kde se trajektorie spirály vrací do perimetru. Myšlenka je pro lepší představu k vidění na Obr. 16.



*Obr. 16: Trajektorie Spiral, optimalizovaná*

Sestrojování programu trajektorie předcházelo definici finálních parametrů, byly proto zvoleny pouze přibližně. Po dodatečném definování konkrétních parametrů trajektorie Spiral (viz. kap. 2.5.1) došlo při simulaci k chybě. Ta se projevila zastavením chodu motorů před centrem spirály. Situace patrná na Obr. 17.



*Obr. 17: Trajektorie Spiral, zastavení při chybě*

Jedna z chybových hlášek s návrhem řešení problému je zachycena na Obr. 18.

**Controller1 (Stanice)**

**50443: Nedostatek objektů interních událostí**

**Popis**  
Pro zpracování instrukce bylo přiděleno příliš málo objektů interních událostí.

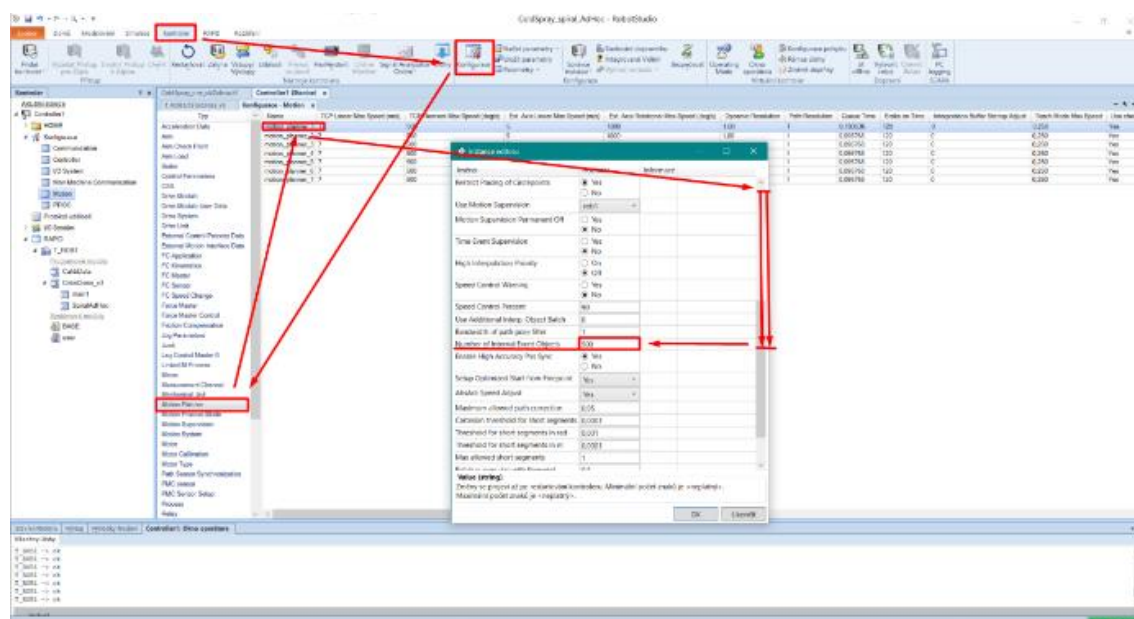
**Následky**  
Pohyb všech mechanických jednotek byl okamžitě zastaven.

**Příčiny**  
Nebyl přidělen dostatek objektů.

**Akce**  
Přidělte více objektů událostí zvýšením systémového parametru počtu objektů interních událostí v tématu Pohyb a typ plánovače a restartujte řadič.

Obr. 18: Chybová hláška error 50443

Navrhované řešení RobotStudiem bylo zvýšit počet objektů interních událostí pro simulaci. Postup nastavení je patrný na Obr. 19.



Obr. 19: Postup nastavení počtu objektů interních událostí

Avšak ani poté chyba v trajektorii nevyzmykla, jen nebyla nahlášena jako error 50443, jak je patrné na Obr. 20.

**Výstup**

Zobrazit zprávy od **Všechny zprávy**

- ⓘ Controller1 (Stanice): 10052 - Návratový pohyb spuštěn
- ⓘ Controller1 (Stanice): 10053 - Návratový pohyb dokončen
- ⓘ Controller1 (Stanice): 10151 - Program spuštěn
- ⓘ Controller1 (Stanice): 10020 - Stav chyby provádění
- ⓘ Controller1 (Stanice): 10012 - Stav ochranného zastavení z důvodů bezpečnosti
- ⓘ Controller1 (Stanice): 10125 - Program zastaven
- ⓘ Controller1 (Stanice): 10010 - Motory ve stavu OFF

Obr. 20: Okno výstupu při zastavení chodu motorů

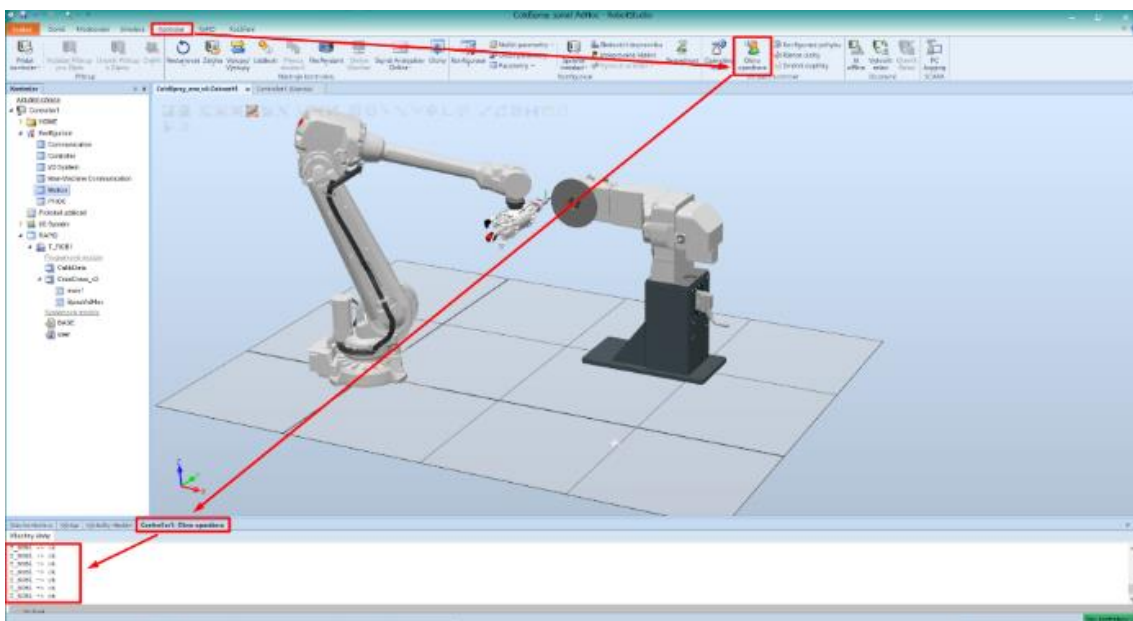
Jako účinné řešení se ukázalo řešení, které se na první pohled jeví jako nelogické, přidání příkazů na vypsání zpráv do okna operátora. Náhled kódu je patrný na Obr. 21. Bylo ještě nutno okno operátora zobrazit dle postupu na Obr. 22.

```

47 PROC SpiralAdHoc()
48 a:=a_max-krok;
49 x1:=posun*a/360*cos(a);
50 y1:=posun*a/360*sin(a);
51 a:=a-krok;
52 x2:=posun*a/360*cos(a);
53 y2:=posun*a/360*sin(a);
54 TPAwrite "ok";
55 MoveC Offs(Stred,x1,y1,0),offs(Stred,x2,y2,0),MSP,z5,toolImpactGun\WObj:=Workobject_1;
56 FOR iv FROM 1 TO 10 DO
57 IF (iv MOD 2) = 1 then
58
59 WHILE a>360*4*krok DO
60 a:=a-krok;
61 x1:=posun*a/360*cos(a);
62 y1:=posun*a/360*sin(a);
63 a:=a-krok;
64 x2:=posun*a/360*cos(a);
65 y2:=posun*a/360*sin(a);
66 a:=a-krok;
67 x3:=posun*a/360*cos(a);
68 y3:=posun*a/360*sin(a);
69 a:=a-krok;
70 x4:=posun*a/360*cos(a);
71 y4:=posun*a/360*sin(a);
72 MoveC Offs(Stred,x1,y1,0),offs(Stred,x2,y2,0),MSP,z5,toolImpactGun\WObj:=Workobject_1;
73 TPErase;
74 MoveC Offs(Stred,x3,y3,0),offs(Stred,x4,y4,0),MSP,z5,toolImpactGun\WObj:=Workobject_1;
75 TPAwrite "ok";
76 ENDWHILE

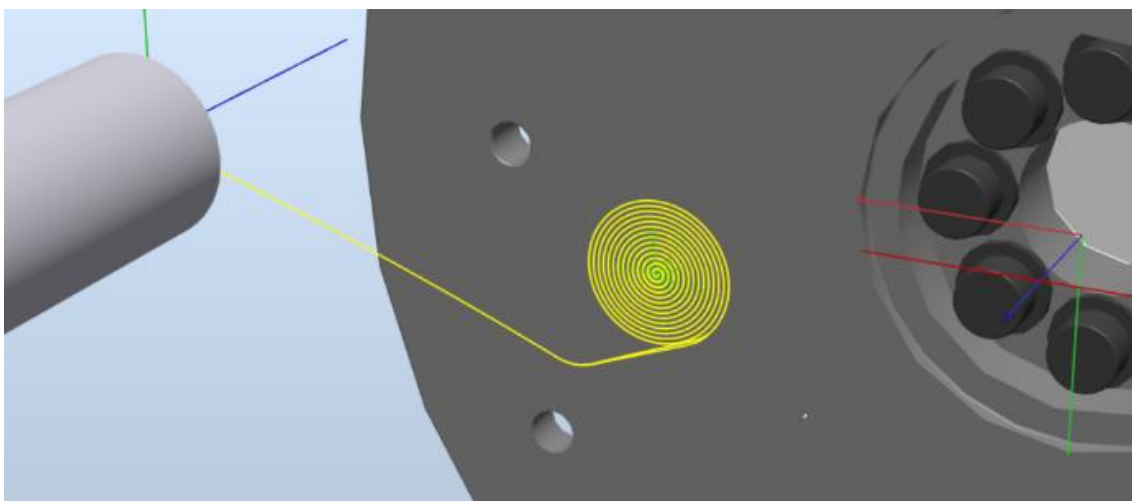
```

Obr. 21: Náhled kódu s příkazy pro výpis zpráv

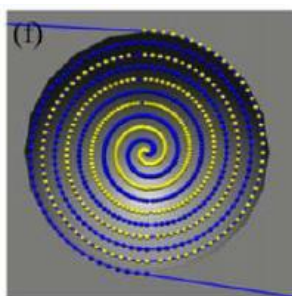


Obr. 22: Postup zobrazení okna operátora

Pak došlo k úspěšnému zobrazení trajektorie, jak je patrné na Obr. 23.



Obr. 23: Trajektorie Spiral



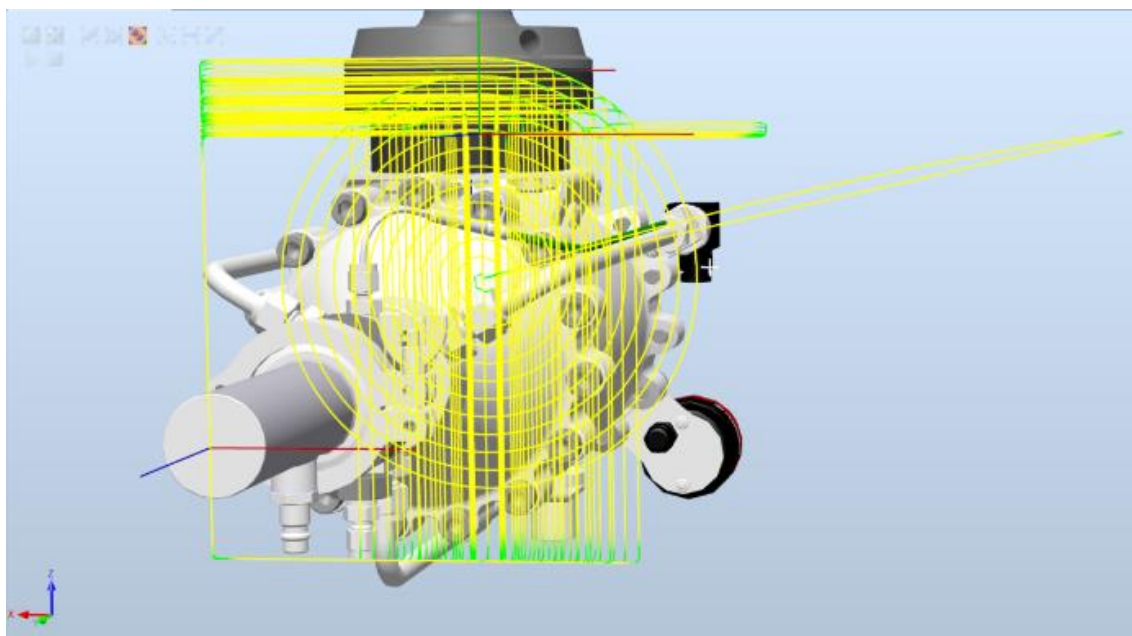
Obr. 24: Trajektorie Mirored-Spiral [15]

Tento problém při depozitu v laboratoři nebyl hlášen. Předpokládal jsem tedy, že šlo o chybu vzniklou nedostatečnými kapacitami počítače na vzdáleném pracovišti, na kterém jsem trajektorii tvořil.

Jak je zmíněno v kapitole 2.3 Diskuse zadání a výběr trajektorií, došlo však v laboratoři ke snížení rychlosti z důvodu pomalé odezvy kinematiky, která způsobovala deformaci trajektorie. Bylo proto přistoupeno ke snížení rychlosti na 45 mm/s. Bohužel nebylo možno snížit 10x rychlost karuselu dávkujícího prášek, tedy feed-rate. To proto, že v případě snížení rychlosti 10x, by byl prášek dávkován nespojitě. Feed-rate byl proto nastaven na 0,5 otáčky za minutu.

Následkem toho je vyšší vrstva nerovného nástřiku, miskovitého tvaru, znemožňující změření zbytkového napětí.

Z důvodu významného zpoždění, vzniklého pokusy o řešení tohoto problému, tj. aby došlo k nástřiku bez problémů, nezbyl čas na nalezení a opravu chyby v optimalizaci dráhy trajektorie Spiral popsané na začátku této kapitoly. Problém s optimalizací je patrný na Obr. 25.



Obr. 25: Chyba v optimalizaci trajektorie Spiral

### 2.6.3 Vzorek

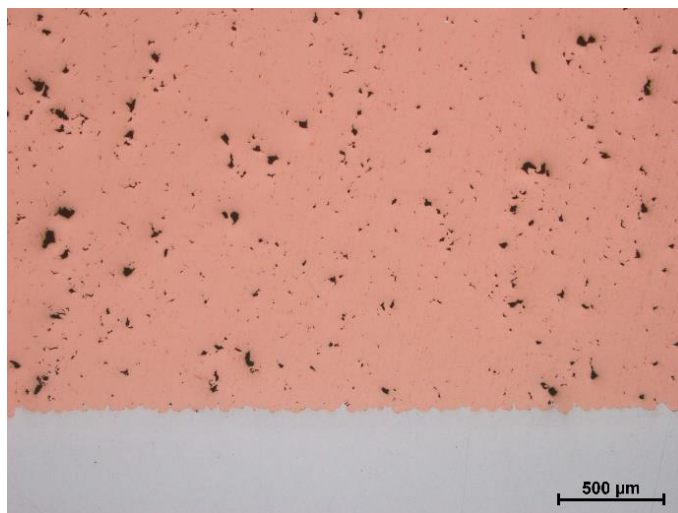
Vzhled vzorku depozitu, uvolněného ze svěráku, je k vidění na Obr. 26.



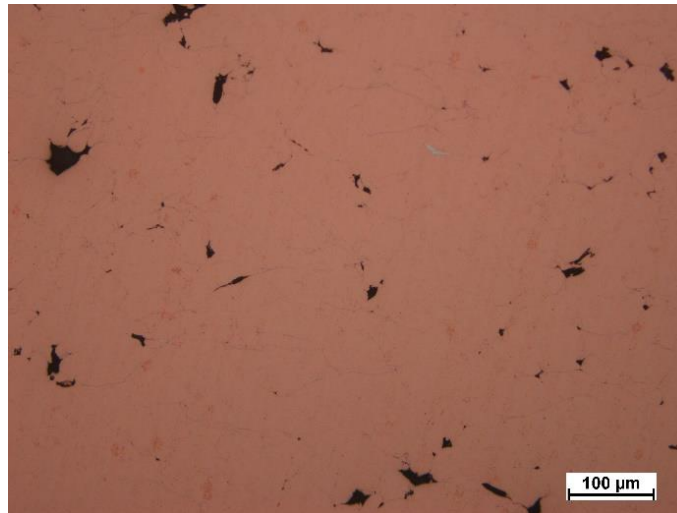


*Obr. 26: Vzorek depozitu trajektorií Spiral*

Mikroskopické snímky řezu vzorkem jsou uvedeny níže, byly pořízeny na optickém mikroskopu zn. Olympus GX51. Na Obr. 27 je patrný přehledový snímek, v jehož dolní části se nachází substrát (šedě), ohraničený shora hranicí substrát-nástřík, na níž jsou patrné impaktní krátery od jednotlivých částic depozitu. Za zmínku stojí několik pórů na této hranici. V horní části je pak depozit/nástřík s patrnými póry. Na dalším Obr. 28 je vyobrazen mikroskopický snímek depozitu. Jemu podobné snímky bez měřítka ve snímku, byly použity pro vyhodnocení pórovitosti pomocí programu ImageJ. Ilustrační snímek řezu vzorku použitý pro stanovení porozity je přiložen v příloze.



*Obr. 27: Mikroskopický přehledový snímek řezu vzorkem trajektorie Spiral*



Obr. 28: Mikroskopický snímek depozitu trajektorií Spiral s měřítkem

#### 2.6.4 Sledované materiálové charakteristiky

U trajektorie Spiral nebylo provedeno měření zbytkového napětí. Z důvodu nerovnosti povrchu vzorku.

Pro vzorek trajektorie Spiral byla vypočtena porozita jako průměrná hodnota z deseti mikroskopických snímků a příslušná směrodatná odchylka.

Porozita byla stanovena na  $(1,41 \pm 0,27) \%$ .

Dále byla změřena výška depozitu ve střední (rovinné) oblasti délkovým měřítkem a stanovena jako průměr ze čtyř měření  $(5,17 \pm 0,03)$  mm. Maximální výška depozitu je 6,3 mm na hraně miskovitěho útvaru.

### 2.7 Diskuse výsledků

Pro přehlednější porovnání trajektorií byly jejich příslušné hodnoty sestaveny do Tab. 3.

Charakteristika	Trajektorie Lines	Trajektorie Criss-cross	Trajektorie Spiral
Zbytkové napětí v rohu [MPa]	$-19 \pm 4$	$-40 \pm 5$	-
Zbytkové napětí v hraně [MPa]	$-24 \pm 3$	$-68 \pm 4$	-
Zbytkové napětí v prostoru [MPa]	$-27 \pm 1$	$-50 \pm 9$	-
Porozita v řezu A [%]	$1,82 \pm 0,61$	$1,28 \pm 0,27$	-
Porozita v řezu B [%]	$1,88 \pm 0,33$	$1,21 \pm 0,32$	-
Porozita celková [%]	-	-	$1,41 \pm 0,27$
Výška depozitu v řezu A [µm]	$1753 \pm 51$	$1165 \pm 56$	-
Výška depozitu v řezu B [µm]	$1697 \pm 43$	$1577 \pm 62$	-
Výška depozitu [mm]	-	-	$5,17 \pm 0,03$

Tab. 3: Porovnání změřených charakteristik vzorků

Je patrné, že trajektorie Criss-cross zanechala ve vzorku přibližně dvakrát větší zbytková napětí než trajektorie Lines. Všechna zbytková napětí jsou tlaková.

Bohužel nebylo možno porovnat zbytková napětí mezi vzorkem trajektorie Spiral a ostatních trajektorií z důvodu značně nerovného povrchu nástřiku trajektorie Spiral.

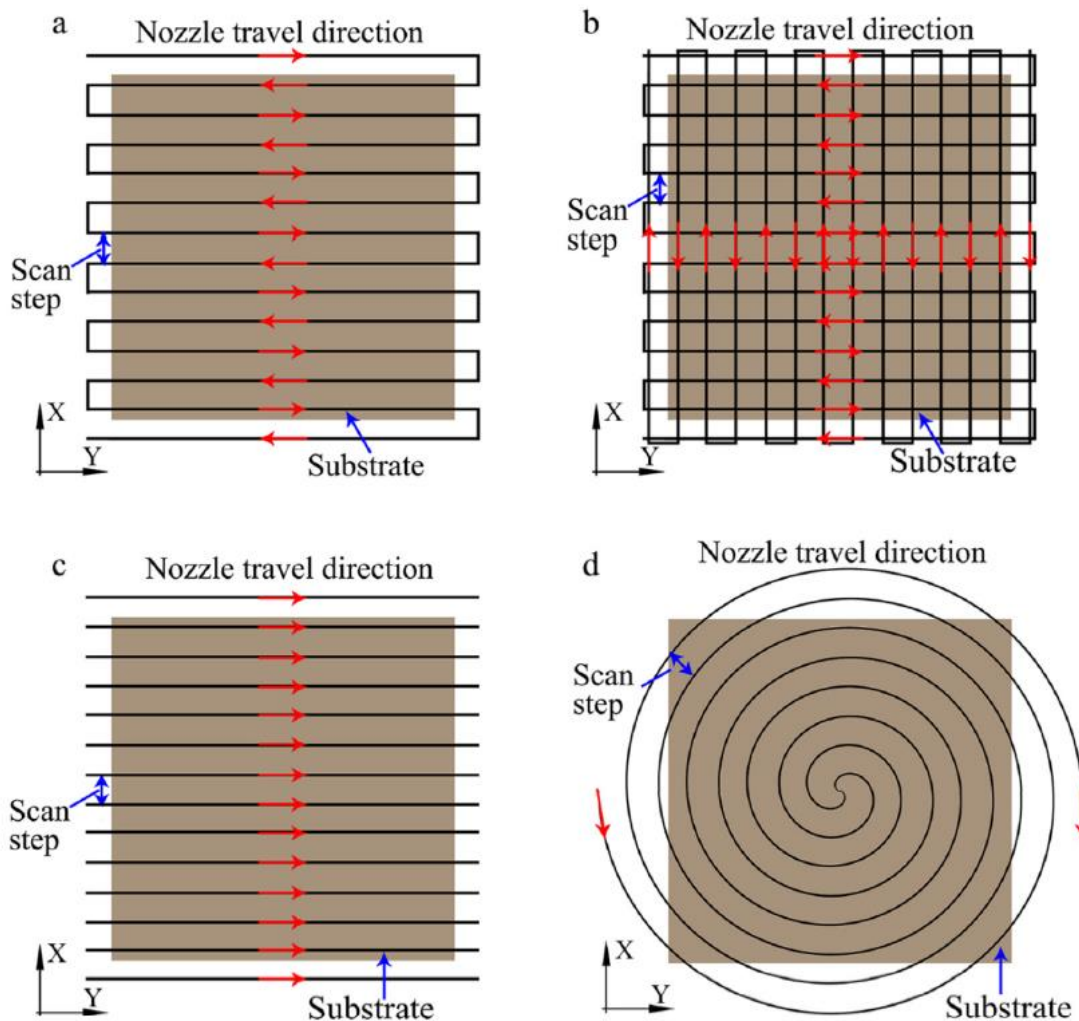
Vzorek trajektorie Spiral byl rozříznut pouze jedním řezem na základě předpokladu rotační symetrie vzorku.

Na druhou stranu z naměřených dat porozity vyplývá, že trajektorie Criss-cross zanechává méně porézní depozit oproti trajektoriím Lines a Spiral.

Při studiu výšky depozitu jsem zjistil, že měření je hodně citlivé na výběr míst měření. Trajektorie Lines vykazuje oproti trajektorii Criss-cross menší rozptyl hodnoty výšky v řezech A a B, což může být dáno zhotovením nedostatečného množství fotografií zobrazujících celou výšku depozitu a nedostatečným počtem měření na jednotlivých snímcích.

V článku [20] prováděli rovněž depozici mědi na hliníkový substrát. Rychlost pojezdu zvolili na 400 m/s. Použili hnací plyn (stlačený vzduch) o tlaku 30 bar, a teplotě 500 °C. Feed-rate pak stanovili na 24 g/min. Vzdálenost trysky od vzorku činila 30 mm. Rozteč mezi sousedními přejezdy ustanovili na 2 mm.

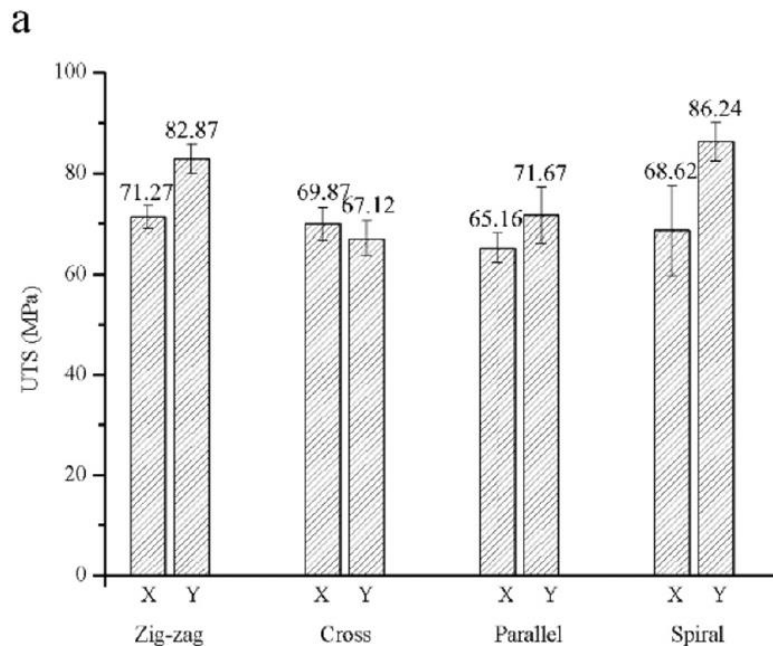
Porovnatelné trajektorie mezi touto prací a článkem jsou Lines – zigzag (Obr. 29a) Trajektorie použité v článku, a Spiral – spiral (Obr. 29d). V případě dvojice Spiral – spiral, mohou být odchylky v naměřených hodnotách způsobeny, mimo odchylky v nastaveních parametrů společných pro trajektorie v dané práci, také tím, že Spiral se vrací ze středu na okraj v nové vrstvě, zatímco spiral se navrácí ve stejné vrstvě prostorem ponechaným pro takový návrat.



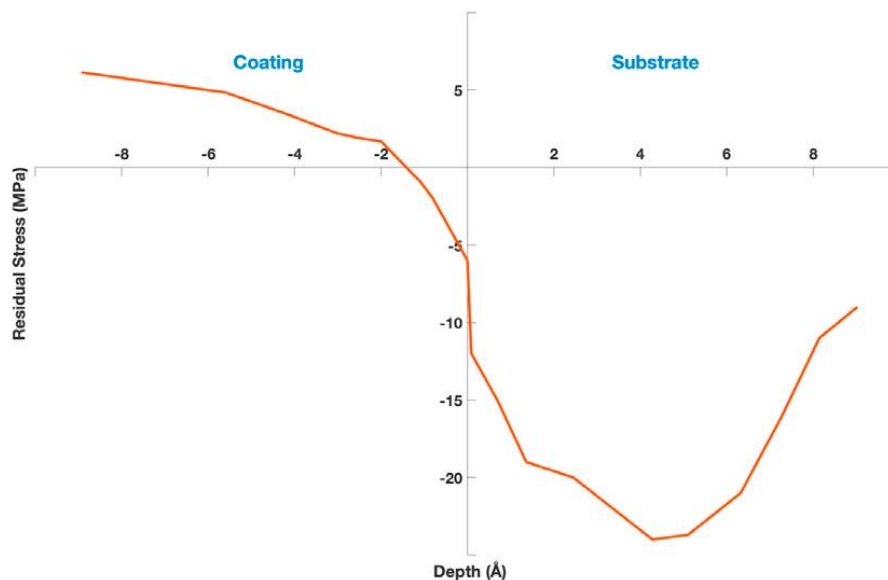
Obr. 29 Trajektorie použité v článku, [20]

Maximální napětí ve vzorcích byla tahová, a to u trajektorie zigzag 82,87 MPa v ose Y, u trajektorie spirál 86,24 MPa v ose Y, viz Obr. 30. Naše výsledky vykazaly tlaková napětí ve vzorku u trajektorie Lines až 27 MPa. U trajektorie Spiral jsme napětí ve vzorku nestanovili.

Tento rozdíl je způsoben rozdílnou tloušťkou nástřiku na vzorcích provedených v této práci vůči tloušťce nástřiku v článku. V profilu nástřiku nejsou napětí rozložena rovnoměrně, ani lineárně. Tento jev je důsledkem zbytkových napětí vzniklých po dopadu jednotlivých částic, viz. Obr. 31. Naše naměřené výsledky jsou v absolutní hodnotě s výsledky ve článku [20] řádově stejně velké.



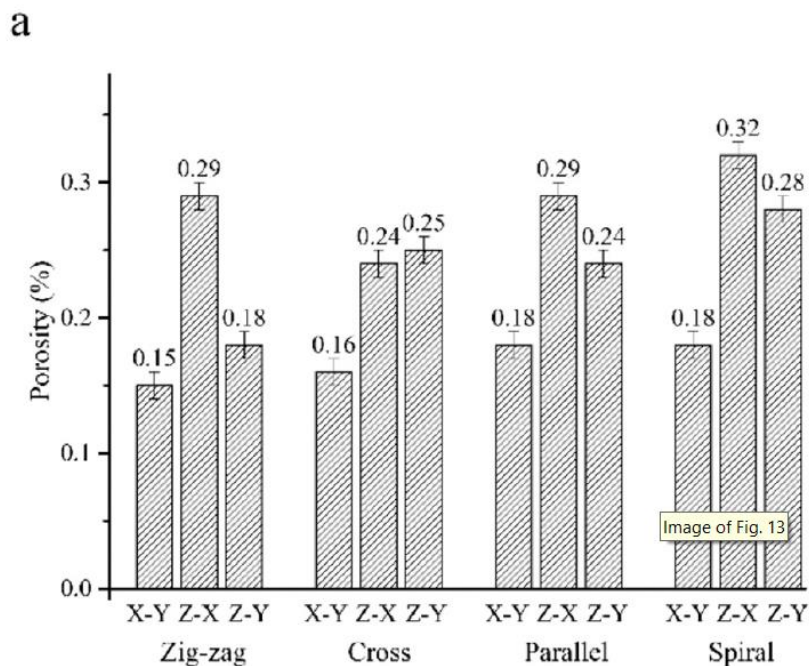
Obr. 30 Maximální tahové napětí naměřená na vzorcích [20]



Obr. 31 Rozložení zbytkových napětí po dopadu jedné částice [10]

Porozita naměřená v článku je u trajektorie zigzag pod 0,3 % a u trajektorie spirál nepřekročila hranici 0,35 %. Podrobnější data jsou patrná na Obr. 32. V porovnání s porozitou uvedenou v článku, trajektorie Lines a Spiral vycházejí výrazně hůře

s hodnotami 1,88 % a 1,41 %. To je způsobeno rozdílem v parametrech trajektorie, kdy v této práci byly zvoleny nižší hodnoty (např. nižší tlak, nižší teplota), což vedlo k nižší deponiční efektivitě. Nižší efektivita se pak projevila vyšší porozitou nástřiku.



Obr. 32 Naměřená porozita vzorků [20]

## 2.8 Uvažovaná vylepšení

Další práce na tomto zajímavém tématu si vyžádá úpravu softwaru jednotlivých trajektorií pro lepší čitelnost, vytvoření oken pro FlexPedant pro jednodušší obsluhu. A v neposlední řadě úpravu trajektorie Spiral, resp. opravu optimalizace její dráhy na přejezdy.

Pro zajímavější a přesnější výsledky porovnání vlivů parametrů dráhy na materiálové vlastnosti vzorků jimi deponovaných je zapotřebí větší financování umožňující změnu/nastavení vždy jednoho parametru dané trajektorie. Neboť nástřik technologií Cold spray je komplexní problém, jehož chování je ovlivňováno všemi parametry současně. Proto je třeba studium vlivu jednotlivých parametrů při jednotlivých měřeních.

## Závěr

V teoretické části této práci jsem zpracoval stručný náhled do historie technologie Cold spray, provedl jsem rozdělení této technologie na dva typy. Vysokotlaký typ, do kterého se řadí i pracovní stanice na které byly nastříkány vzorky depozitu Cu na Al substrát, zkoumané v praktické části této práce. Provedl jsem výtah z odborné literatury o principu funkce Cold spreje a principech adheze depozitu na substrátu (metalurgický a mechanický princip). Na závěr teoretické části jsem rozdělil systém Cold spray technologie nesený robotickým manipulátorem typu robotická ruka a polohovacího zařízení vzorku na subsystemy. Subsystemy jsem popsal z mechatronického pohledu, tj. co dělají, co na nich lze měřit a jak je lze řídit.

V praktické části jsem vytvořil trajektorie Criss-cross a Spiral pomocí nichž a trajektorie Linear, která již byla vytvořena před zadáním této práce, byly nastříkány výše zmíněné vzorky měděného depozitu na hliníkový substrát.

Oproti počátečnímu úmyslu vytvořit u každé trajektorie sadu vzorků se systematicky pozměňovanými jednotlivými parametry, byla možnost změn těchto parametrů trajektorie v průběhu práce z finančních a časových důvodů omezena. Byl měněn pouze rastr a rychlost nástřiku spolu se změnou množství podávaného prášku u trajektorie Spiral, k čemuž došlo kvůli kinematice robotické ruky, tak aby byl rastr trajektorie dodržen. Proto došlo u této trajektorie k velké mocnosti vrstvy depozitu, a tím bylo znemožněno porovnání trajektorie Spiral s ostatními trajektoriemi mimo parametr pórovitosti.

Jednotlivé vzorky byly změřeny na zbytkové napětí ve třech bodech (mimo trajektorii Spiral u níž to nebylo možné z důvodu nerovnosti povrchu), porozitu a tloušťku nástřiku. Trajektorie Criss-cross zanechala oproti očekávání přibližně dvojnásobná zbytková napětí oproti stejným bodům trajektorie Lines. Tento jev může být způsoben součtem napětí zanechaných přejezdy svisle a napětí zanechaných vodorovnými přejezdy. Protože ve směru přejezdu jsou zanechávána větší napětí, oproti směru kolmém na směr přejezdu. Z naměřených dat pórovitosti se jeví jako lepší trajektorie Criss-cross, následovaná trajektorií Spiral.

Tloušťka nástřiku je v řezech A a B v těsnější vzájemné shodě u trajektorie Lines než u trajektorie Criss-cross, lze však prohlásit, že při stejné rychlosti a množství podávaného prášku je mocnost depozitu u obou trajektorií téměř totožná.

Na závěr praktické části jsem pak uvedl možná vylepšení v případě další práce na tomto tématu.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] S. H. Thurston, „Method of impacting one metal upon another“. Spojené státy americké Patent US706701A, 12 8 1902.
- [2] S. Yin, P. Cavaliere, B. Aldwell, R. Jenkins, H. Liao, W. Li a R. Lupoi, „Cold spray additive manufacturing and repair: Fundamentals and applications,“ *Additive Manufacturing*, sv. 21, pp. 628-650, 03 2018.
- [3] J.-G. L. A. N. R. B. J. a. C. M. Eric Irissou, “Review on Cold Spray Process and Technology: Part I—Intellectual Property,” *Journal of Thermal Spray Technology*, no. 17(4), pp. 495-516, Prosinec 2008.
- [4] A. POPYRIN, V. KOSAREV, S. KLINKOV, A. ALKHIMOV a V. FOMIN, COLD SPRAY TECHNOLOGY, Elsevier, 2007.
- [5] H. Koivuluoto, *High-pressure and low-pressure cold spraying – Overview of coating properties*, Tampere: Tampere University of Technology, Department of Materials Science, Laboratory of Surface Engineering, 2013.
- [6] „PLASMA,“ Plasma Giken Co., Ltd., 2020. [Online]. Available: <http://www.plasma.co.jp/en/products/index.html>. [Přístup získán 15 05 2020].
- [7] H. Singh, T. Sidhu a S. Kalsi, „Cold spray technology: future of coating deposition processes,“ v *Frattura ed Integrità Strutturale*, sv. 6 (22), 2012.
- [8] J. PIÑOS, Studium vlastností kovových materiálů připravených technologií nízkoteplotního kinetického naprašování, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013, p. 92.
- [9] T. Schmidt, H. Assadi, F. Gärtner, H. Richter, T. Stoltenhoff, H. Kreye a T. Klassen, „From Particle Acceleration to Impact and Bonding in Cold Spraying,“ *Journal of Thermal Spray Technology*, sv. 18, č. 794, 2009.
- [10] K. S. Sagil James, „Effect of Velocity and Impact Angle on Residual Stress Generation in Cold Spray Process – A Molecular Dynamics Simulation Study,“ *Procedia Manufacturing*, č. 48, pp. 776-780, 2020.
- [11] J. Xie, SIMULATION OF COLD SPRAY PARTICLE DEPOSITION, Lyon: l’Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, L’École doctorale Mécanique, énergétique, génie civil, acoustique, 2014, p. 205.
- [12] G. Li, X.-f. Wang a W.-y. Li, „Effect of different incidence angles on bonding performance in cold spraying,“ č. 17, pp. 116-121, 2007.
- [13] B. L. Cének, „STANOVENÍ VLASTNOSTÍ PŮVODNÍCH A EB-MODIFIKOVANÝCH NÁSTRÍKŮ,“ Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Brno, 2014.
- [14] S. Pathak a G. C. Saha, Cold Spray in the Realm of Additive Manufacturing, Springer, Cham, 2020.

- [15] P. CHAVALIER a at al., *Cold-Spray Coatings*, Springer, 2018.
- [16] K. Petráčková, J. Kondás a M. Guagliano, „Fixing a hole (with cold spray),“ *International Journal of Fatigue*, sv. 110, pp. 144-152, 2018.
- [17] C. Chen, S. Gojon, Y. Xie, S. Yin, C. Verdy, Z. Ren, H. Liao, H. Liao a S. Deng, „A novel spiral trajectory for damage component recovery with cold spray,“ *Surface and Coatings Technology*, sv. 309, 17 January 2017.
- [18] ABB AB Robotics, *IRB 4600 Industrial Robot*, Västerås, 2018.
- [19] ABB AB Robotics, *IRBP A Industrial roboti positioner*, Västerås, 2017.
- [20] C. H. X. X. S. L. T. W. T. N. Y. X. C. D. M. L. H. L. S. D. Hongjian Wu, „Influence of spray trajectories on characteristics of cold-sprayed copper deposits,“ *Surface and Coatings Technology*, č. 405, 2021.
- [21] V. K. CHAMPAGNE, *The Cold Spray Materials Deposition Process*, Abington: Woodhead Publishing Limited, 2007.



## Zdroje přímo necitované

BENENATI, G. a R. LUPOI. *Development of a deposition strategy in Cold Spray for Additive Manufacturing to minimize residual stresses*. Procedia CIRP. 2016, 2016(55), 101-108.

MARHOUN, Bc. LUKÁŠ. *Technické křivky v geometrii*. České Budějovice, 2013. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Pedagogická fakulta. Vedoucí práce Mgr. Roman Hašek, Ph.D.

ABB. *Application manual ScreenMaker*. 5.12. 2009.

QIAN, WANG, XIAOTAO LUO, SEIICHIRO TOSHIHIKO A NINSHU MA. *Measurement and analysis of cold spray residual stress using arbitrary Lagrangian-Eulerian method*. Additive Manufacturing. 2020, (35).

SINGH, R., K.-H. RAUWALD, E. WESSEL, G. MAUER, S. SCHRUEFER, A. BARTH, S. WILSON a R. VASSEN. Effects of substrate roughness and spray-angle on deposition behavior of cold-sprayed Inconel 718. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2017, 319, 249-259 [cit. 2021-4-15]. ISSN 02578972. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S025789721730333X>, doi:10.1016/j.surfcoat.2017.03.072.

## Seznam použitých zkratk a symbolů

CS	Technologie Cold spray
CNC	Počítačem řízené obráběcí stroje
MSD	Manipulační systém děla
MSO	Manipulační systém obrobku

## Seznam obrázků

Obr. 1: Patentový náčrt na patentu US706701A [1] .....	8
Obr. 2: Schéma vysokotlakého typu Cold spray systém [2] [upraveno].....	10
Obr. 3: Schéma nízkotlakého typu Cold spray systém [2] [upraveno].....	11
Obr. 4: Schéma závislosti dopadové rychlosti na depozici materiálu na substrát [8] [upraveno] .....	11
Obr. 5: Impaktní eroze dle typu materiálů [upraveno] [10] .....	12
Obr. 6: Diagram výhod Cold spray zařízení [13].....	13
Obr. 7: Robotická ruka ABB IRB 4600 [16].....	17
Obr. 8: Robotický manipulátor ABB IRBP A [17] .....	17
Obr. 9: Pracovní stanice <sup>(Ing. Jan Vetiška, Ph.D.)</sup> .....	18
Obr. 10: Vzorek Lines, depozit 20x20 mm .....	20
Obr. 11: Mikroskopický přehledový snímek řezu vzorkem trajektorie Lines .....	20
Obr. 12: Mikroskopický snímek depozitu trajektorií Lines s měřítkem .....	21
Obr. 13: Vzorek Criss-cross, depozit 20x20 mm .....	23
Obr. 14: Mikroskopický přehledový snímek řezu vzorkem trajektorie Criss-cross .....	23
Obr. 15: Mikroskopický snímek depozitu trajektorií Criss-cross s měřítkem .....	24
Obr. 16: Trajektorie Spiral, optimalizovaná.....	26
Obr. 17: Trajektorie Spiral, zastavení při chybě .....	26
Obr. 18: Chybová hláška error 50443 .....	27
Obr. 19: Postup nastavení počtu objektů interních událostí.....	27
Obr. 20: Okno výstupu při zastavení chodu motorů .....	27
Obr. 21: Náhled kódu s příkazy pro výpis zpráv.....	28
Obr. 22: Postup zobrazení okna operátora .....	28
Obr. 23: Trajektorie Spiral .....	28
Obr. 24: Trajektorie Mirored-Spiral [15] .....	29
Obr. 25: Chyba v optimalizaci trajektorie Spiral .....	29
Obr. 26: Vzorek depozitu trajektorií Spiral.....	30
Obr. 27: Mikroskopický přehledový snímek řezu vzorkem trajektorie Spiral.....	30
Obr. 28: Mikroskopický snímek depozitu trajektorií Spiral s měřítkem.....	31
Obr. 29 Trajektorie použité v článku, [20].....	32
Obr. 30 Maximální tahové napětí naměřená na vzorcích [20].....	33
Obr. 31 Rozložení zbytkových napětí po dopadu jedné částice [10].....	33
Obr. 32 Naměřená porozita vzorků [20] .....	34

## Seznam příloh

Příklad snímků použitých pro výpočet porozity vzorku Linear

Protokoly měření zbytkového napětí vzorku Linear (3x Ing. Zdeněk Spotz, Ph.D., CEITEC)

Kód trajektorie Criss-cross

Příklad snímků použitých pro výpočet porozity vzorku Criss-cross

Protokoly měření zbytkového napětí vzorku Criss-cross (3x Ing. Zdeněk Spotz, Ph.D., CEITEC)

Příklad snímků použitých pro výpočet porozity vzorku Spiral

Tabulka výpočtu pórovitosti