



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

# Technologie žárových nástřiků pro renovaci a údržbu

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**AUTOR:** Bc. Barbora Michálková

**VEDOUcí PRÁCE:** Ing. Jiří Kuchař, Ph.D.

**STUDIJNÍ PROGRAM:** Výrobní inženýrství

**STUDIJNÍ OBOR:** Bez specializace

Praha 2023

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Michálková** Jméno: **Barbora** Osobní číslo: **483351**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Výrobní inženýrství**  
Specializace: **Bez specializace**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Technologie žárových nástříků pro renovaci a údržbu**

Název diplomové práce anglicky:

**Thermal spray technology for renovation and maintenance**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rešerše možných vhodných technologií žárového nástříku
- 2) Volba optimální technologie a volba kovového prášku
- 3) Technologický postup renovace
- 4) Zhotovení vzorků
- 5) Zkoušky abraze, tvrdosti a metalografie
- 6) Vyhodnocení, diskuze výsledků

Seznam doporučené literatury:

1. KREIBICH, V., Teorie a technologie povrchových úprav, Praha, ČVUT, Praha, 1999.
2. AMBROŽ, O., KAŠPAR, J., Žárové nástříky a jejich průmyslové využití. 1. vyd. Praha: SNTL, 1990, 318 s. ISBN 80-030-0347-4.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Jiří Kuchař, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

**Ing. Ondřej Chocholatý, Ph.D. VZÚ Plzeň**

Datum zadání diplomové práce: **26.04.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **11.08.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2023**

Ing. Jiří Kuchař, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studentky

## Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Jiřího Kuchaře, Ph.D., IWE, a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne: .....

.....

Podpis

## Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Jiřímu Kuchařovi, Ph.D., IWE za ochotný přístup a věnovaný čas. Dále pak děkuji zaměstnancům Výzkumného a zkušebního ústavu v Plzni za jejich čas, významnou pomoc a obrovskou ochotu při provedení experimentu, především panu Ing. Ondřeji Chocholatému, Ph.D. a slečně Ing. Lucii Jarolímové. Děkuji též firmě PRODECO, a.s. za poskytnutí součásti k renovaci.

## Anotace

Tato diplomová práce se zabývá technologiemi žárových nástřiků vhodných pro renovaci a údržbu strojních součástí. Teoretická část nejdříve stručně popisuje druhy poškození strojních součástí a dále vyjmenovává technologie žárových nástřiků vhodné k jejich renovaci. Praktická část je následně zaměřena na renovaci konkrétní strojní součásti. K renovaci byla zvolena technologie Cold Spray.

<b>Název diplomové práce:</b>	Technologie žárových nástřiků pro renovaci a údržbu
<b>Autor práce:</b>	Bc. Barbora Michálková
<b>Vedoucí práce:</b>	Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., IWE
<b>Konzultant:</b>	Ing. Ondřej Chocholatý, Ph.D.
<b>Akademický rok:</b>	2022/23
<b>Vysoká škola:</b>	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
<b>Ústav:</b>	12133 – Ústav strojírenské technologie
<b>Vedoucí ústavu:</b>	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
<b>Rozsah práce:</b>	68 stránek, 14 tabulek, 56 obrázků
<b>Klíčová slova:</b>	Opotřebení, renovace, údržba, žárové nástřiky, Cold Spray

## Annotation

This thesis focuses on thermal spray technologies suitable for the renovation and maintenance. The theoretical part first briefly describes the types of damage of machine parts and then lists the thermal spray technologies suitable for their renovation. The practical part then focuses on the renovation of a specific machine component. For the renovation was chosen Cold Spray technology.

<b>Title of the final thesis:</b>	Thermal spray technology for renovation and maintenance
<b>Author:</b>	Bc. Barbora Michálková
<b>Supervisor:</b>	Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., IWE
<b>Consultant:</b>	Ing. Ondřej Chocholatý, Ph.D.
<b>Academic year:</b>	2022/23
<b>University:</b>	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
<b>Department:</b>	12133 – Department of Manufacturing Technology
<b>Head of department:</b>	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
<b>Extent:</b>	68 pages, 14 tables, 56 pictures
<b>Keywords:</b>	Wear, Renovation, Maintenance, Thermal spray, Cold Spray

# Obsah

1	Úvod.....	9
2	Poškození .....	10
2.1	Opotřebení.....	10
2.1.1	Adhezivní opotřebení .....	10
2.1.2	Abrazivní opotřebení .....	11
2.1.3	Erozivní opotřebení .....	12
2.1.4	Kavitační opotřebení.....	13
2.1.5	Únavové opotřebení.....	14
2.1.6	Vibrační opotřebení.....	15
2.2	Koroze .....	16
2.2.1	Chemická koroze.....	16
2.2.2	Elektrochemická koroze.....	17
2.2.3	Další dělení koroze.....	17
2.2.4	Vznik a průběh koroze .....	17
2.2.5	Korozní ochrana.....	17
2.3	Otlačení.....	18
2.4	Deformace .....	18
2.5	Trhliny a lomy .....	18
2.5.1	Statický lom .....	18
2.5.2	Únavový lom .....	19
2.6	Ostatní poškození .....	20
3	Renovace a technologie žárových nástřiků pro renovaci dílů .....	21
3.1	Žárové nanášení materiálů .....	21
3.2	Nanášení plamenem.....	23
3.3	Nanášení detonační pistolí DGS.....	24
3.4	Nanášení elektrickým obloukem .....	24
3.5	Plazmové nanášení .....	25
3.6	Vysokorychlostní nástřik HVOF.....	26
3.7	Laser Spray.....	26
3.8	Cold Spray.....	27
4	Experimentální část .....	30
4.1	Popis součásti určeného k renovaci.....	30
4.2	Volba optimální technologie a přídavného materiálu.....	33
4.3	Zhotovení zkušebních vzorků .....	34

4.4	Experimentální zařízení Cold Spray .....	37
4.5	Hodnocení metalografických snímků vzorků.....	38
4.5.1	Příprava metalografických výbrusů .....	39
4.5.2	Metalografické snímky.....	39
4.5.3	Vyhodnocení metalografických snímků vzorků .....	41
4.6	Hodnocení abrazivního opotřebení .....	47
4.6.1	Postup hodnocení abrazivního opotřebení .....	47
4.6.2	Vyhodnocení abrazivního opotřebení .....	52
4.7	Hodnocení mikrotvrdosti nástřiku dle Vickerse .....	53
4.7.1	Postup hodnocení mikrotvrdosti nástřiku dle Vickerse.....	54
4.7.2	Vyhodnocení mikrotvrdosti nástřiku dle Vickerse.....	56
4.8	Vyhodnocení výsledků zkoušek – výběr přídavného materiálu a parametrů nástřiku .....	57
4.9	Technologický postup renovace pastorku .....	58
5	Závěr .....	60
6	Bibliografie.....	61
7	Seznam symbolů a zkratk .....	63
8	Zdroje obrázků .....	64
9	Seznam obrázků.....	65
10	Seznam tabulek.....	67
11	Seznam grafů .....	68



# 1 Úvod

V současné, z energetického hlediska, velmi náročné době hrají renovační technologie stále významnější roli v prodlužování životnosti vysoce namáhaných strojních součástí, jako jsou např. turbíny, hřídele, kladky, převodovky apod. Výroba surové ocele a z ní následně jakostních odlitků a výkovků, jejich obrábění, navazující tepelné zpracování a následné finální opracování, je energeticky mimořádně náročný a velice nákladný proces. Pořizovací cena těchto nových strojních zařízení a jejich součástí je proto nyní extrémně vysoká. Vhodná renovace umožňuje prodloužit jejich životnost a významně snížit náklady na jejich provoz.

Při volbě konkrétní technologie renovace je potřeba postupovat tak, aby splňovala všechny požadavky na kvalitu, cenu a životnost a byla optimální cestou k obnovení funkčnosti renovované součásti.

Důležitou roli, mezi renovačními technologiemi, hrají žárové nástřiky. V případě, kdy se provozovateli strojních zařízení pravidelnou údržbou daří eliminovat fatální poškození součástí a včas zachytit opotřebení v relativně snadno opravitelném rozsahu, je renovace žárovým nástřikem vysoce efektivní proces. Za nízké energetické náročnosti, s přijatelnými finančními náklady a v dobré kvalitě opakovaně vrací strojním dílům funkčnost a tím násobně prodlužuje jejich celkovou životnost.

Renovace žárovým nástřikem se tak stává klíčovou technologií na cestě k zefektivnění procesu údržby nejenom strojního průmyslu.

Z výše uvedených důvodů se tato diplomová práce zabývá právě žárovými nástřiky. V teoretické části mapuje jednotlivé technologie a zvýšenou pozornost věnuje progresivní technologii Cold Spray, která je v technologiích žárových nástřiků relativně novinkou. Dále v teoretické části shrnuje jednotlivé druhy poškození a opotřebení strojních součástí. Cílem experimentální části je pak samotná renovace vybrané strojní součásti technologií Cold Spray. Před renovací je nezbytné udělat výběr vhodného přídavného materiálu a nanést nástřiky těchto materiálů s rozdílnými parametry na zkušební vzorky. Tyto vzorky následně podrobit zkouškám, výsledky analyzovat a vyhodnotit jejich klíčové vlastnosti, jako je pórovitost, otěruvzdornost a mikrotvrdość. Přídavný materiál, kterým bude dosaženo optimálních výsledků (i s přihlédnutím k finančním nákladům), bude následně použit pro renovaci vybrané strojní součásti.

## 2 Poškození

Součást je vystavena různým typům namáháním v závislosti na jejích provozních podmínkách, což způsobuje různorodé poškození. Součást se může poškozovat opotřebením, korozí, deformací, stárnutím či trhlinami a lomem. [2]

### 2.1 Opotřebení

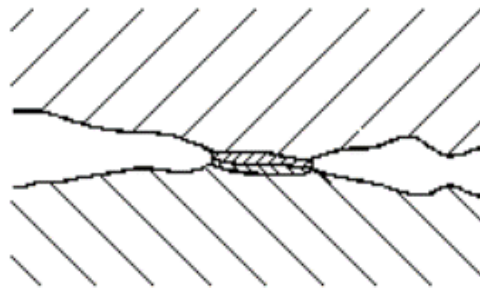
Při provozu součásti se nejčastěji opotřebovávají její funkční plochy v důsledku vzájemného působení na funkční plochy jiných součástí. [1; 2]

Dle již zrušené normy ČSN 01 5050, která definuje názvosloví v oblasti opotřebení součásti, existuje 6 základních druhů opotřebení - adhezivní, abrazivní, erozivní, kavitační, únavové a vibrační. Norma byla zrušena roku 2007, ale názvosloví uvedené v této normě se nadále používá. [3]

V technické praxi obvykle dochází ke kombinacím různých druhů opotřebení.

#### 2.1.1 Adhezivní opotřebení

Adhezivní opotřebení probíhá na základě oddělování a přemísťování částic materiálu mezi dvěma stykovými plochami. Následně v důsledku relativního pohybu funkčních ploch dochází k jejich opotřebení v oblasti povrchových vrstev. [2; 4]



Obrázek 1 - Schématické znázornění adhezivního opotřebení [2]

Princip adhezivního opotřebení spočívá ve vytváření mikrospojů v oblasti kontaktních plošek funkčních ploch za působení velkých sil způsobujících plastickou deformaci, jak je vidět na Obrázek 1. Při vzniku mikrospojů dochází k lokálnímu ohřevu, čímž vzniká vhodné prostředí pro chemickou reakci kovu a okolního materiálu, která následně může zvýšit rychlost opotřebení. Adhezivně opotřebenou funkční plochu lze pozorovat na Obrázek 2. [2; 4]

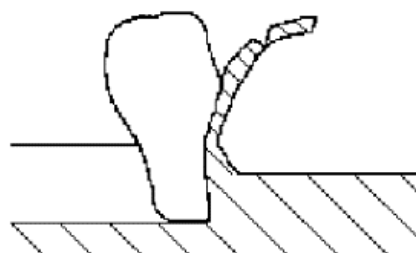


*Obrázek 2 – Adhezivně opotřebený čep [27]*

Intenzita adhezivního opotřebení je dána velikostí zatížení funkčních ploch a jejich vlastnostmi, jako je například druh základního materiálu, či technologie výroby funkčních ploch. Výrazného snížení adhezivního opotřebení můžeme dosáhnout při použití mazání funkčních ploch. Mazivo pomáhá oddělovat funkční plochy a zároveň chrání povrchy před chemickou reakcí se vzduchem. [2; 4]

### 2.1.2 Abrazivní opotřebení

Abrazivní opotřebení je jedním z nejčastějších druhů opotřebení strojních součástí. Je založeno na oddělování částic z funkčního povrchu za působení tvrdosti a drsnosti povrchu druhého tělesa, či vlivem abrazivních částic (viz Obrázek 3). Na funkčním povrchu způsobují abrazivní částice vydíráání materiálu a rýhy. Počet vzniklých rýh je nepřímo úměrný velikosti abrazivní částice, šířka rýhy by měla odpovídat přibližně 10 až 20 % průměru částice. [2; 4]



*Obrázek 3 - Schématické znázornění abrazivního opotřebení [2]*

Velikost abrazivního opotřebení je závislá na poměru tvrdosti funkční plochy a abrazivní částice – čím tvrdší je abrazivo, tím měkčí musí být povrch funkční plochy a opačně. Důvodem upřednostnění materiálu měkčího nad tvrdším je snížení opotřebení, díky možnosti zachycení abrazivních částic v materiálu. Maximální hodnoty odolnosti proti abrazi dosáhne funkční povrch při přibližně 60 % tvrdosti vůči abrazivu. Důležitou proměnnou

je u abrazivního opotřebení drsnost povrchu součásti. Čím drsnější je povrch tělesa, tím větší je jeho opotřebení a opačně. Abrazivně opotřeбенou funkční plochu lze pozorovat na Obrázek 4 [2; 4]

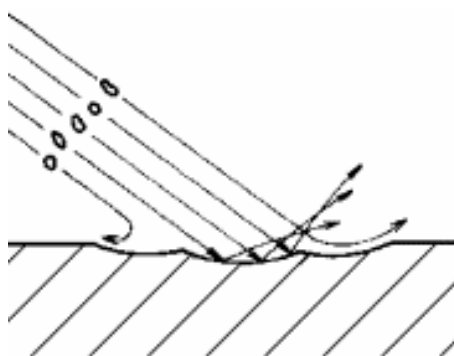


*Obrázek 4 - Abrazivně opotřeбенý píst [28]*

Při vysokých rychlostech abrazivních částic vůči funkčním plochám dochází také k zahřívání materiálu v okolí styku, proto je také nutné uvažovat tepelné ovlivnění oblasti a zvýšenou chemickou reaktivitu s okolním prostředím. [2; 4]

### 2.1.3 Erozivní opotřebení

Erozivní opotřebení nastává, pokud dochází k úbytku základního materiálu funkční plochy v důsledku dopadajících částic unášených v proudícím médiu, popřípadě částic samotného média (viz Obrázek 5). Dopadající částice způsobí vytlačení či oddělení materiálu z funkční plochy, a to v závislosti na jejich energii a úhlu dopadu. Médium unášející částice může být kapalina, pára či plyn. [2; 4]



*Obrázek 5 - Schématické znázornění erozivního opotřeбенí [2]*

Pro erozivní opotřebení je typickým znakem nerovnoměrný úbytek materiálu z funkčních ploch. Vlivem turbulence proudícího média dochází k úbytku materiálu i na nejnižších místech funkčního povrchu. Intenzita opotřeбенí funkční plochy je závislá na geometrii a parametrech částice, rychlosti a úhlu dopadu částice na funkční plochu, chemickém složení a vlastnostech proudícího média, a v neposlední řadě na vlastnostech

funkční plochy. Nejvyšší intenzita opotřebení vzniká, pokud moduly pružnosti dopadající částice a funkční plochy jsou velké a vzájemně srovnatelné. Snížit intenzitu opotřebení je možné pomocí správného konstrukčního řešení součásti, kdy je rychlostní pole proudícího média rovnoměrně rozloženo, či použitím odolnějšího materiálu. Erozivně opotřebenou funkční plochu lze vidět na Obrázek 6. [2; 4]

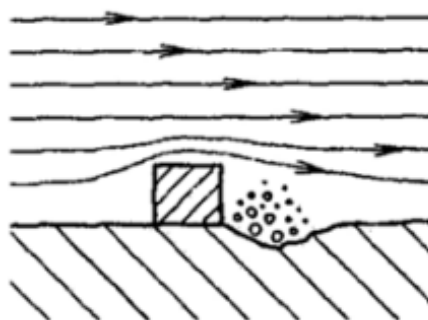


*Obrázek 6 - Erozivně opotřebený uzávěr ventilu [29]*

V praxi se jedná o opotřebení například turbín, součástí čerpadel, křídel letadel, ventilů, vzduchotechniky a ventilátorů. [2; 4]

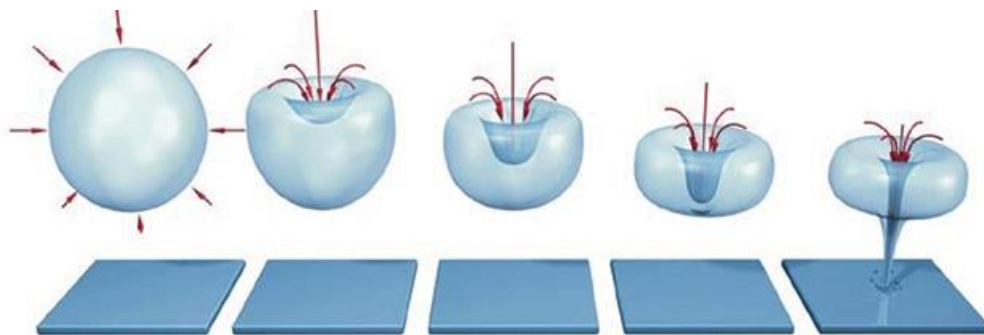
#### 2.1.4 Kavitační opotřebení

Kavitační opotřebení odděluje částice kovu z funkčního povrchu plochy pomocí imploze bublinek vzniklých při lokálním podtlaku v proudící kapalině (viz Obrázek 7). Tento druh opotřebení vzniká například za výstupkem v potrubí, kde vlivem rychle proudící kapaliny vzniká lokální podtlak a v důsledku toho pak bublinky nasycených par kapaliny. [2; 4]



*Obrázek 7 - Schématické znázornění kavitačního opotřebení [4]*

Bublinky následně putují dále a při přechodu do míst s vyšším tlakem dochází k jejich stlačení vedoucího k zániku, tzv. implozi, jak je vidět na Obrázek 8. Pokud bublinky implodují v blízkosti povrchu materiálu, dojde k jeho deformaci. [2; 4; 5]



Obrázek 8 – Schématické znázornění imploze kavitační bubliny [5]

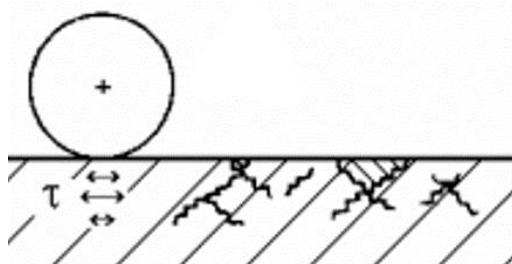
Kavitačnímu opotřebení lze zabránit správným návrhem součásti, které eliminuje vznik kavitace a dodržováním provozních podmínek. Kavitačně opotřeбенou funkční plochu lze vidět na Obrázek 9. [2; 4]



Obrázek 9 - Kavitačně opotřeбенé lopatkové kolo [30]

### 2.1.5 Únavové opotřebení

Únavové opotřebení vzniká při cyklickém namáhání postupnou kumulací poruch krystalových mřížek v povrchové vrstvě funkčních ploch. Nejprve vznikají mikrotrhliny, které se následně spojují za vzniku větších trhlin, které vedou k vylamování funkčních ploch, či destruktivnímu lomu součásti (viz Obrázek 10). [2; 4]



Obrázek 10 - Schématické znázornění únavového opotřebení [2]

Pokud je součást cyklicky namáhána pod mez kluzu materiálu, dochází k vysokocyklové únavě. Při cyklickém namáhání součásti nad mez kluzu (v oblasti plastické deformace) dochází k nízkocyklové únavě. Únavově opotřeбенou funkční plochu lze vidět na Obrázek 11. [2; 4]



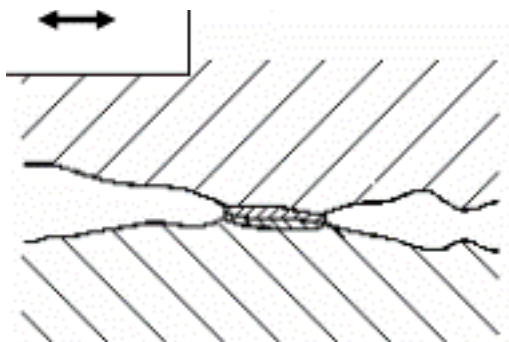


*Obrázek 11 - Únavové opotřebení zubů pastorku [31]*

U materiálů s nízkou plasticitou může vlivem únavového opotřebení docházet až ke křehkému lomu, který může zapříčinit havárii či poruchu celého stroje. Proto je potřeba se tomuto druhu opotřebení vyvarovat, a to vhodnou konstrukcí zařízení, která sníží kontaktní tlaky, či frekvenci působení tlaku a volbou vhodného materiálu. [2; 4]

### 2.1.6 Vibrační opotřebení

Vibrační opotřebení vzniká vzájemnými kmitavými tangenciálními posuny funkčních ploch za spolupůsobení normálového přitlačného zatížení (viz Obrázek 12). Amplitudy posunu jsou velmi malé, v rozmezí 1 až 100  $\mu\text{m}$ . Tento druh opotřebení je doprovázen vznikem oxidů železa s hnědočervenou nebo hnědočernou barvou, což bývá často zaměňováno s korozí. [2; 4]



*Obrázek 12 - Schématické znázornění vibračního opotřebení [2]*

Na průběh vibračního opotřebení působí zejména velikost normálového zatížení, frekvence a amplituda vibrace a vlastnosti materiálů. Vibračně opotřebenou funkční plochu lze vidět na Obrázek 13. [2; 4]



*Obrázek 13 - Vibračně opotřebovaná drážkovaná hřídel [32]*

Tento druh opotřebování lze ovlivnit pečlivou a přesnou výrobou součásti či omezením vibrační soustavy. [2; 4]

## 2.2 Koroze

Koroze je trvalá nežádoucí změna povrchu materiálu způsobená vlivem okolního prostředí, při které dochází k znehodnocování materiálu. Je to tedy jev nežádoucí, který postupně snižuje užité vlastnosti materiálu. Může probíhat v plynech, kapalinách, zeminách i jiných chemických látkách, které jsou s materiálem ve styku. Jednotlivá prostředí se liší svými účinky na materiál, a to jak korozním mechanismem, tak intenzitou degradace. Koroze se projevuje změnou vzhledu a rozpadem kovu. [2; 6]

Koroze se podle mechanismu korozních dějů rozděluje na chemickou a elektrochemickou. [6]

### 2.2.1 Chemická koroze

Chemická koroze probíhá v plynném prostředí za vysokých teplot a v elektricky nevodivém prostředí. Při tomto druhu koroze dochází k chemické reakci mezi materiálem a plynem. Kov, který se nachází v plynu s oxidačním charakterem, vytváří na povrchu vrstvu korozních zplodin. V případě plynu s redukčním charakterem dochází k difuzi plynu do kovu a následné reakci s kovovými složkami. Některé plyny mohou zároveň mít oxidační i redukční účinek zároveň. Příčinou chemické koroze je přechod kovu z nestabilního do stabilního stavu, což způsobuje vyloučení zplodin. Příkladem chemické koroze je tvorba okují při tváření za tepla. [6]



## 2.2.2 Elektrochemická koroze

Elektrochemická koroze probíhá v elektricky vodivém prostředí. Základem této koroze jsou dvě dílčí reakce – anodová a katodová, které jsou na sebe vázány, a samostatně nemohou probíhat. Anodová reakce odpovídá oxidaci kovu neboli korozi. Katodová reakce současně redukuje některé oxidující složky roztoku. Může docházet k vybití iontů vodíku, což se nazývá koroze s vodíkovou depolarizací, nebo k redukci kyslíku rozpuštěného v elektrolytu, což je koroze s kyslíkovou depolarizací. [6]

## 2.2.3 Další dělení koroze

Dále se koroze může dle [7] dělit:

- Dle druhu korozního prostředí na korozi atmosférickou, v kapalinách a půdní
- Dle kombinace s vnějšími činiteli na korozi při mechanickém namáhání, korozi při únavě materiálu, korozní praskání a na vibrační korozi
- Dle druhu korozního napadení na korozi rovnoměrnou, nerovnoměrnou, bodovou, štěrbinovou, důlkovou, nitkovou a mezikrystalovou korozi.

## 2.2.4 Vznik a průběh koroze

Vznik a průběh koroze ovlivňuje řada faktorů, například vlivy dané stavem materiálu, vlivy dané stavem korozního prostředí a vlivy spojené s konstrukcí výrobku nebo zařízení. U vlivu stavu materiálu rozhoduje o korozní odolnosti obsah nečistot, struktura materiálu a stav jeho povrchu. U vlivu stavu korozního prostředí záleží na chemickém složení, teplotě, tlaku a relativním pohybu prostředí vůči kovovému materiálu. U vlivu konstrukce výrobku záleží na kontaktu materiálu s materiálem jiným či například na mechanickém namáhání, jakému je výrobek vystaven. [6]

## 2.2.5 Korozní ochrana

Ochranu materiálu před korozi lze dle [6], [8] zajistit následujícími způsoby:

- Volbou vhodného materiálu
- Úpravou korozního prostředí – odstraněním korozně aktivní složky z prostředí či přidáním inhibitorů, které korozi zpomalí
- Elektrochemickou ochranou – anodickou či katodickou ochranou
- Ochrannými povlaky
- Kombinací výše zmíněných metod.

## 2.3 Otlačení

Otlačení je definováno jako trvalá nežádoucí změna povrchu funkční plochy způsobená vnějšími silami. K otlačení dojde ve chvíli, když kontaktní tlak překročí mez kluzu materiálu funkční plochy a následovně začne docházet k toku materiálu z místa působení tlaku, čímž může být vyvoláno například zvýšené opotřebení. [2]

## 2.4 Deformace

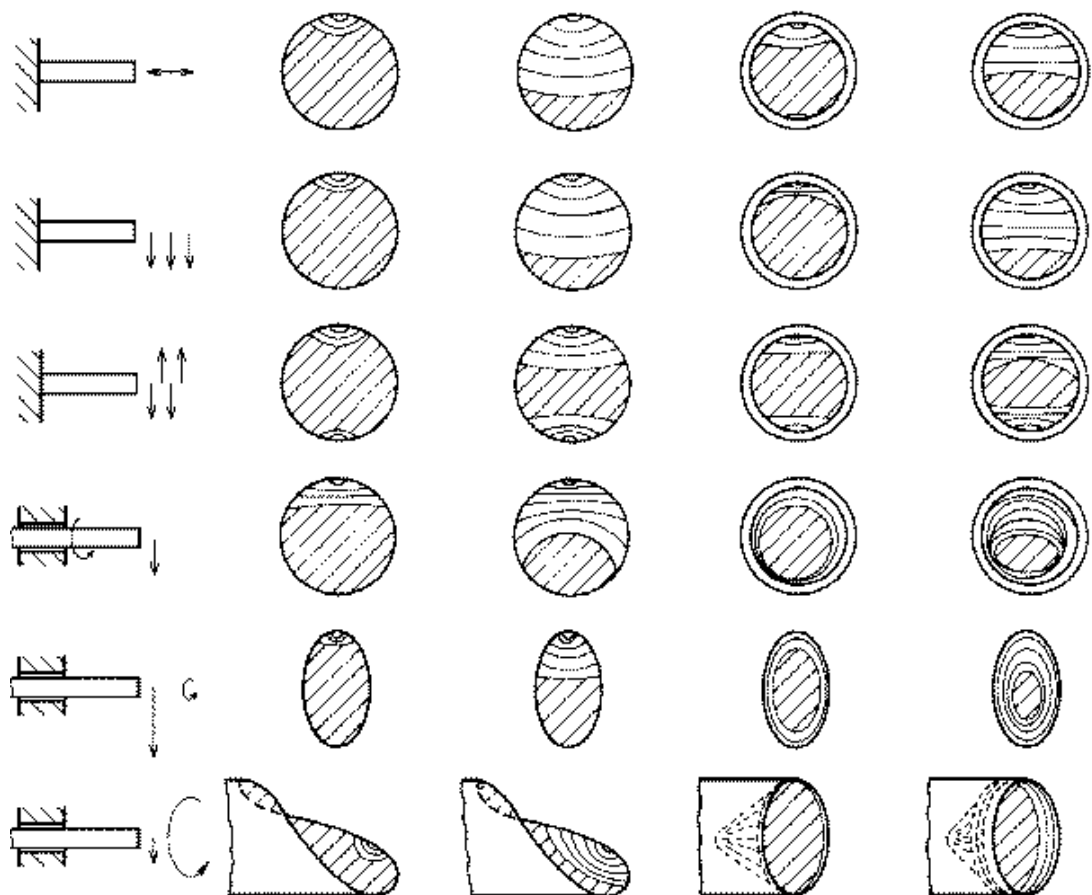
Deformace je trvalá nežádoucí změna geometrického tvaru součásti. Deformace součásti nastává, pokud napětí vyvolané vnějšími silami v některém průřezu překročí mez kluzu materiálu. U křehkých materiálů dochází k deformaci zřídka, neboť již malé deformace vedou k překročení meze pevnosti a následovnému lomu. [2]

## 2.5 Trhliny a lomy

Trhlina je definována jako porušení celistvosti materiálu v části průřezu, zatímco lom je porušení celistvosti v celém průřezu. Příčinami vzniku trhlin a lomů jsou napětí, ať už vnitřní či vnější, která překročí mez pevnosti nebo v případě cyklického namáhání mez únavy materiálu. Vzniku trhlin a lomů napomáhá nevhodná konstrukce součásti, tvar či rozměr, nevhodná technologie výroby, zbytková pnutí či vruby, nevhodné vlastnosti materiálu, pevnost nebo houževnatost, nesprávný provoz součásti, přetěžování součásti či zanedbání údržby či časově závislé změny vlastností, stárnutí, únava či koroze materiálu. Po vzniku trhlin dochází ke snížení celkové pevnosti součásti a u dynamicky namáhaných součásti vedou trhliny ke vzniku únavových lomů. Lomy se dělí dle mechanismu svého vzniku na statické a únavové. [2]

### 2.5.1 Statický lom

Ke statickému lomu dochází ve chvíli, je-li překročena mez pevnosti materiálu v průřezu součásti. Vzhled lomové plochy se mění dle vlastností a způsobu namáhání. Nejčastěji dochází k statickým lomům způsobených ohybem. Lomová plocha v takovém případě je rovinná a kolmá na směr napětí. Její povrch je zrnitý a jemný či hrubší v závislosti na velikosti zrna materiálu. Lomová plocha vypadá na celé své ploše stejně. Je-li statický lom vyvolaný krutem, má buď šroubovitou lomovou plochu, pokud je materiál houževnatý, či jehlicovitě roztříštěnou, pokud je materiál tvrdší. Statické lomy vyvolané kombinací namáhání, krutem i ohybem, mají komplikovaný tvar lomové plochy. [2; 9]



Obrázek 14 - Schématické znázornění únavových lomových ploch [2]

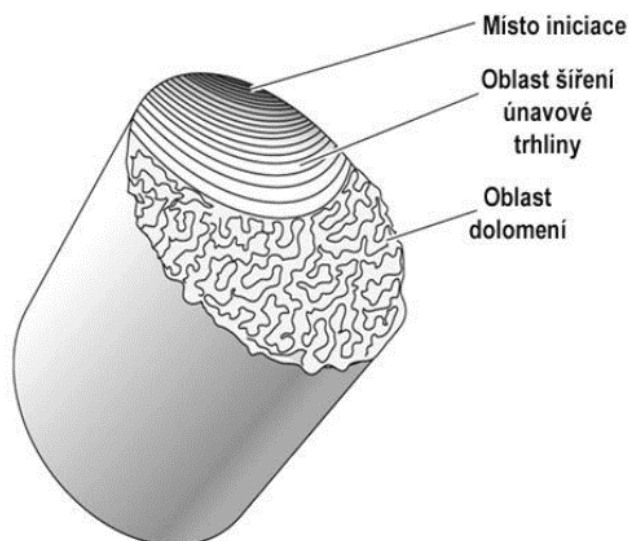
Na Obrázek 14 lze vidět schématické znázornění různých variant únavových lomových ploch v závislosti na zatížení a místa, odkud se lom začal šířit. V prvním sloupci je znázorněné zatížení součásti, například tah, ohyb nebo krut. V druhém sloupci lze vidět lomovou plochu únavového lomu, který se při velkém zatížení součásti začal rozvíjet z povrchové bodové vady. Ve třetím sloupci se únavový lom začal také rozvíjet z povrchové bodové vady, ale zatížení součásti bylo malé. Ve čtvrtém sloupci se únavový lom začal rozvíjet z obvodové povrchové vady s velkým zatížením a v pátém sloupci bylo zatížení malé. [2; 9]

Statický lom může být podle energetické náročnosti houževnatý či křehký. Houževnaté lomy nastávají u tvárných materiálů tahovým zatížením a jsou doprovázeny plastickou deformací, vznikem tzv. krčku. Křehké lomy nastávají u křehkých materiálů. Křehký lom potřebuje k šíření málo energie, proto nastává velmi rychle a náhle, a proto je křehký lom velmi nebezpečný. [2; 9]

### 2.5.2 Únavový lom

K únavovému lomu (viz Obrázek 15) dochází, je-li překročena mez únavy materiálu. Na povrchu v místě, kde dochází ke koncentraci napětí, vzniká po určitém počtu cyklů zárodek trhliny. Trhlina se následně v důsledku zatížení šíří do hloubky materiálu. Jelikož je zatížení

součásti proměnlivé, dochází časem v důsledku vzájemných pohybů ploch trhliny k jejich vyhlazení až do typického lasturovitého vzhledu. Jak se únavový lom rozšiřuje, zmenšuje se nosný průřez součásti, až dosáhne materiál své meze pevnosti a součást se ve zbývajícím průřezu staticky přelomí. Lomová plocha má tedy dvě vzhledově odlišné oblasti – únavovou, s lasturově vyhlazeným povrchem, a statickou, s drsným povrchem křehkého lomu. Následně lze podle tvaru jednotlivých oblastí a jejich poměru určit podmínky namáhání, ze kterých ke vzniku únavového lomu došlo. Čím je povrch lomu více hladký a lesklý, tím pomaleji se únavová trhlina šířila. [2; 9]



Obrázek 15 – Únavový lom [10]

Šíření únavové trhliny ovlivňuje chemické složení a struktura materiálu, kvalita povrchu materiálu, pracovní teplota součásti. [2; 9]

## 2.6 Ostatní poškození

Mimo již uvedené poškození dochází často i k jiným, jako například stárnutí, k tepelné degradaci či tečení.

Stárnutí materiálu je souhrn pozvolna probíhajících vnitřních dějů, které vedou k změnám mechanických a plastických vlastností materiálu. Při stárnutí dochází k zvyšování meze kluzu, pevnosti a tvrdosti. Každý parametr se však mění jinou rychlostí, proto dochází k přibližování mezí, což má za následek postupné snižování plastických vlastností materiálu. Klesá tažnost, kontrakce a usnadňuje se přechod z houževnatého lomu na křehký.

Tepelná degradace materiálu je změna fyzikálně-mechanických vlastností materiálu způsobená teplotou.

Tečení nastává, pokud je materiál vystaven mechanickému namáhání v elastické oblasti při zvýšené teplotě. Při tečení dochází k postupné pomalé plastické deformaci. [2; 9]

## 3 Renovace a technologie žárových nástřiků pro renovaci dílů

Renovace je definována jako soubor činností, které mají za výsledek obnovení provozuschopnosti nebo bezvadnosti součásti, jinými slovy je součást schopna plnit stanovené funkce nebo je ve stavu, který odpovídá všem požadavkům stanovených v technické dokumentaci. [1]

Renovací se obnovují funkční schopnosti součásti a prodlužuje se její technický život, který je definován jako doba od začátku provozu do vzniku mezního stavu, což je stav, ve kterém není možné či účelné další použití součásti. [1]

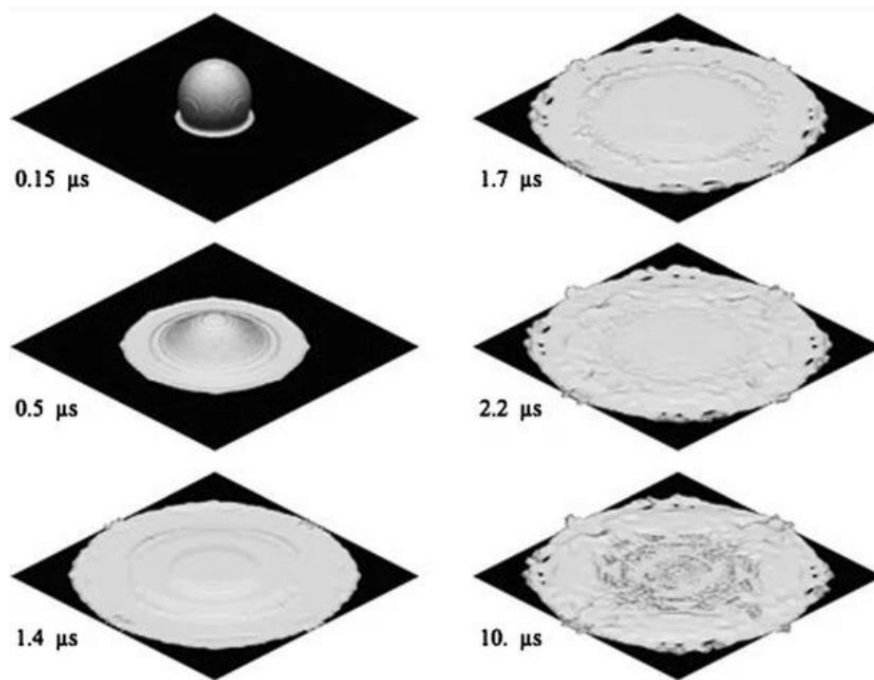
Cílem nanášení žárových nástřiků může být obnova stávajícího opotřebeného povrchu součásti nebo zvýšení užitečných vlastností povrchu zcela nové součásti, popř. obnova opotřebením odlišným materiálem zvyšujícím mechanické vlastnosti povrchu součásti. Nástřik se provádí nanesením vrstvy kovových, či nekovových materiálů na základní materiál. Výsledná tloušťka nanesené vrstvy záleží na hloubce opotřebením povrchu součásti, požadované tloušťce nového povlaku a technologických možnostech použité metody nástřiku. [1]

Materiál, na který se má nástřik nanést, musí v závislosti na stavu jeho povrchu před aplikací projít čištěním, popř. obrobením a zdrsněním povrchu.

### 3.1 Žárové nanášení materiálů

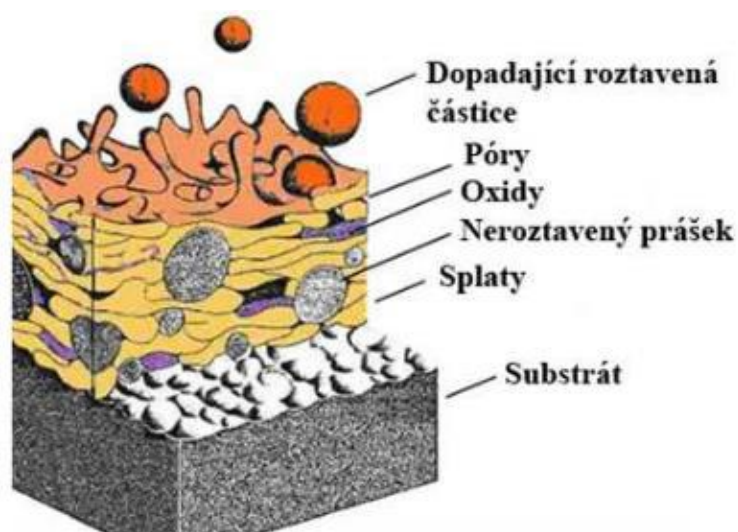
Průkopníkem žárových nástřiků je švýcarský vynálezce Max Ulrich Schoop, který si v roce 1909 nechal patentovat proces. Do svařovacího hořáku přiváděl olověný prášek, který byl roztaven a plamenem unášen na základní materiál, kde tvořil vrstvu nástřiku. Na tento průlomový experiment navazuje řada technologií, které jsou zkoumány a zdokonalovány dodnes. [11]

Norma DIN EN 657:2005-06 (ČSN EN ISO 14917:2017) shrnuje a popisuje technologie žárového nanášení. Příkladový materiál ve formě prášku, tyče či drátu je podáván do zdroje tepla. Tam se roztaví a následně je urychlen směrem k povrchu základní součásti. Dopadem jsou částice deformovány a vznikají tzv. splaty, které přilnou k základnímu povrchu, viz Obrázek 16. Splaty se vrství a tuhnou. [12]



Obrázek 16 – Dopad částice na povrch a tvorba splatu [12]

Ztuhlá vrstva má heterogenní lamelární strukturu a obsahuje mimo splaty také nenatavené částice, oxidační vměstky a póry. Tato mikrostruktura je pro technologii žárového nanášení charakteristická a je znázorněna na Obrázek 17. [13]

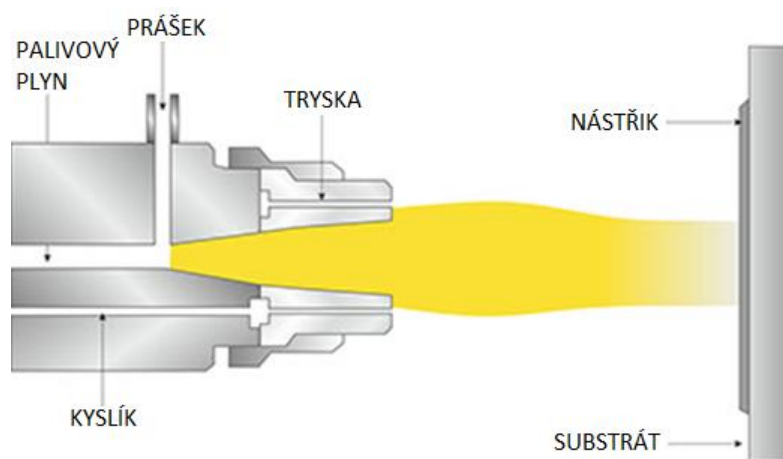


Obrázek 17 - Charakteristická struktura nástřiků [13]

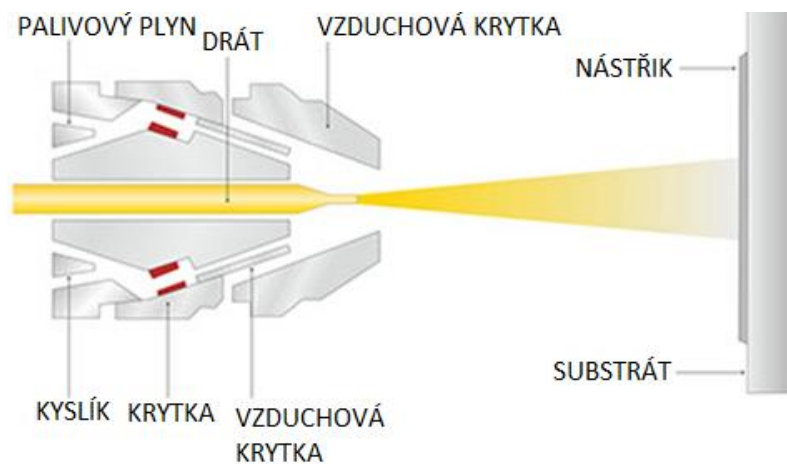
Finální struktura vrstvy nástřiků závisí na parametrech procesu nanášení. Největší vliv má teplota částice v letu a její rychlost, prostředí, ve kterém nanášení probíhá, a vzdálenost nanášecí hlavičky od základní součásti. Při zvolení příliš malé vzdálenosti by nedokázala částice dostatečně zrychlit, a naopak příliš velká vzdálenost by způsobila ztrátu rychlosti a její částečné ztuhnutí, což by negativně ovlivnilo výslednou strukturu nástřiku. [14]

## 3.2 Nanášení plamenem

Technologie nanášení plamenem byla objevena jako první, jelikož vychází přímo z patentu M.U. Schoopa. Tato technologie je hojně používána dodnes, díky svému jednoduchému použití, nízké hlučnosti, vysoké depoziční účinnosti, a především nízkým nákladům. Přídavný materiál je ve formě prášku (viz Obrázek 18) či drátu (viz Obrázek 19) přiváděn do plamene, který vzniká spalováním palivového plynu, například acetylenu, propanu či methyl-acetylen-propadienu (MAPP). Plamen následně částice roztaví a unáší rychlostí do  $80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  směrem k substrátu, kde postupně dochází k jejich vrstvení a tvorbě nástřiku [14; 15; 16].



Obrázek 18 – Schéma žárové metody nanášení prášku plamenem [17]



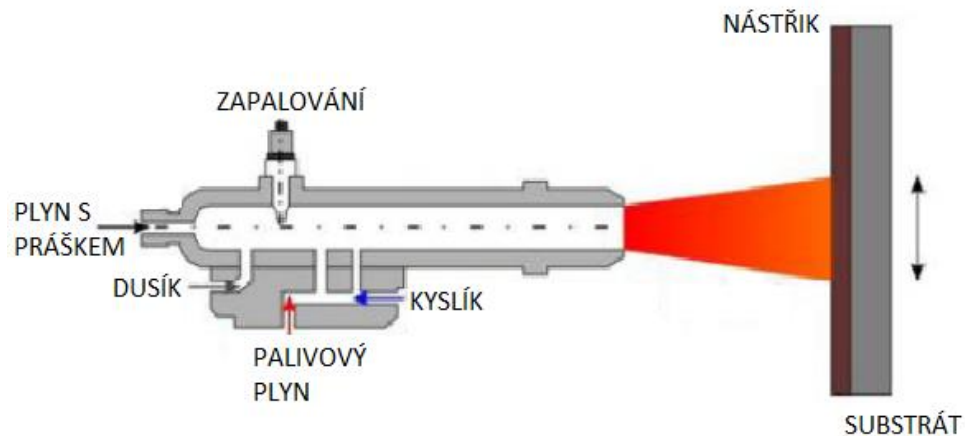
Obrázek 19 – Schéma žárové metody nanášení drátu plamenem [17]

Touto technologií lze nanášet velké množství materiálů. Výsledná struktura nanesené vrstvy závisí na nastavení parametrů nanášení, z nichž největší vliv má teplota plamene. Ta závisí na použitém palivovém plynu a pohybuje se v rozmezí 2 500 až 3 100 °C. Nevýhodami této technologie je oxidace naneseného materiálu, jelikož proces neprobíhá v ochranné atmosféře, vyšší pórovitost v porovnání s jinými metodami nanášení nástřiků, způsobené nízkou nanášecí rychlostí a přenos tepla na základní materiál. [14; 15; 16]



### 3.3 Nanášení detonační pistolí DGS

U této technologie je směs plynu, nejčastěji kyslíku a acetylenu, přiváděna spolu s přídatným materiálem ve formě prášku do detonační komory, viz Obrázek 20. V komoře dochází k zapálení směsi svíčkou a následné detonaci, čímž je přídatný materiál roztaven a doslova vystřelen k substrátu, kde tvoří nástřik. Po detonaci následuje vyčištění komory dusíkem. Celý tento proces se opakuje periodicky až desetkrát za sekundu. Výhodami této technologie jsou například možnost nanášení keramických materiálů díky vysoké teplotě uvnitř komory a nízká pórovitost naneseného nástřiku. Nevýhodou této technologie je hluk procesu nanášení a vysoká oxidace. [14; 15; 16]

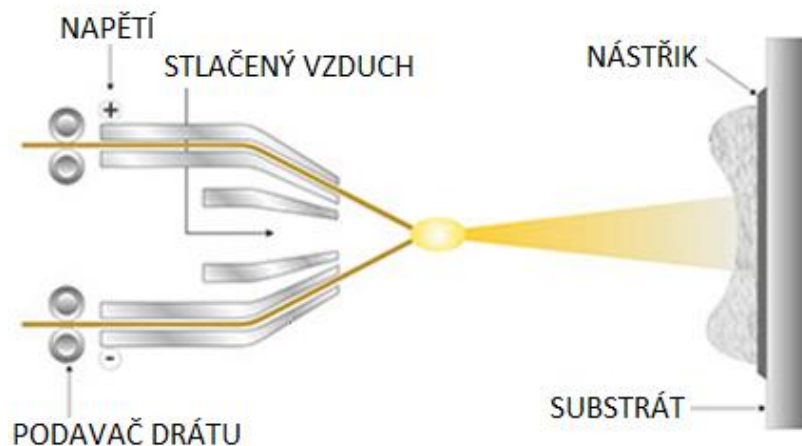


Obrázek 20 - Schéma žárové metody nanášení detonační pistolí DGS [18]

### 3.4 Nanášení elektrickým obloukem

U této technologie dochází ke vzniku elektrického oblouku mezi dvěma přídatnými materiály ve formě drátů, které plní funkci elektrod a musí tedy být z vodivého materiálu (viz Obrázek 21). Tyto dráty jsou kontinuálně posouvány směrem k sobě, přičemž mezi nimi hoří elektrický oblouk o teplotě až 4 000 °C. Díky této teplotě je přídatný materiál roztaven a pomocí stlačeného vzduchu hnán směrem k substrátu, kde dochází k tvorbě nástřiku. Výhodou této technologie je malé tepelné ovlivnění substrátu, díky přenosu tepla pouze na přídatný materiál. Tento fakt je ale zároveň nevýhodou, jelikož se zvyšuje míra nenatavených částic ve struktuře oproti nástřikům tvořených ostatními metodami žárového nanášení. [14; 15; 16]

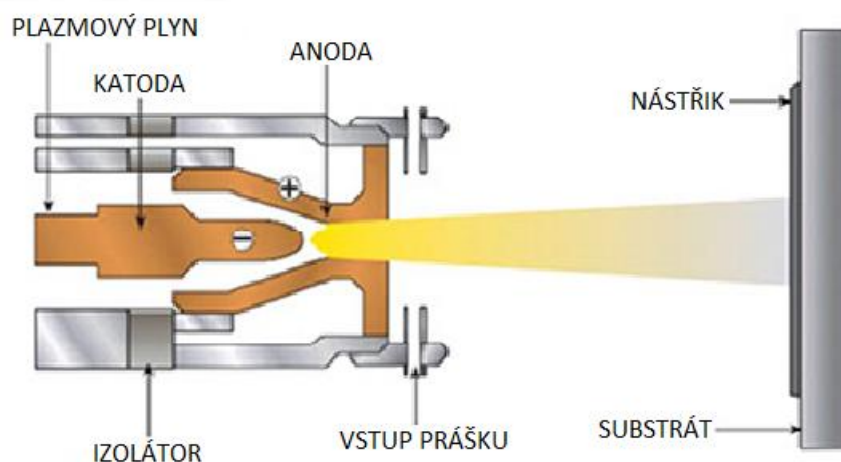




Obrázek 21 - Schéma žárové metody nanášení elektrickým obloukem [17]

### 3.5 Plazmové nanášení

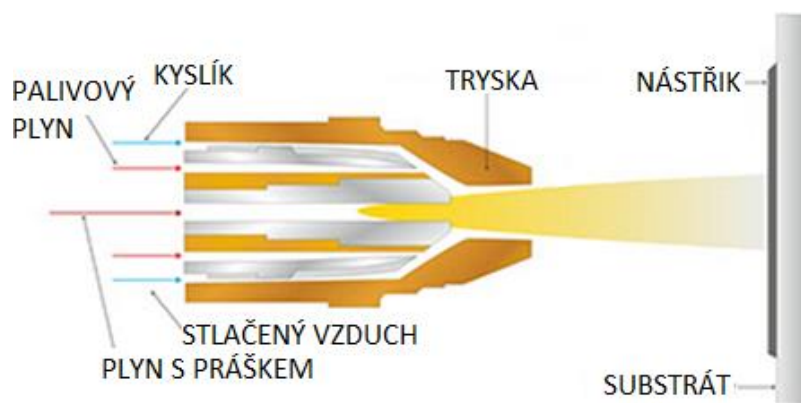
Plazma je generováno stejnosměrným elektrickým obloukem, který vzniká mezi wolframovou katodou a vodou chlazenou měděnou anodou v trysce hořáku, viz Obrázek 22. Do tohoto oblouku je přiváděn plazmatvorný plyn (argon, či jiný inertní plyn) s několika procenty plynu zvyšující entalpii jako je vodík, dusík či helium, který je za vysokých teplot ionizován. Přídavný materiál je ve formě prášku přinášen nosným plynem. Následně je v proudu plazmatu roztaven a unášen směrem k substrátu rychlostí 300 až 550 m.s<sup>-1</sup>, kde tvoří nástřík. Výhodou této technologie je dobrá kvalita nástříku. Nevýhodou může být dosahovaná vysoká teplota procesu, která může způsobovat oxidaci, fázové přeměny či vyhořívání některých prvků nanášeného materiálu. [14; 15; 16]



Obrázek 22 - Schéma žárové metody plazmového nanášení [17]

### 3.6 Vysokorychlostní nástřik HVOF

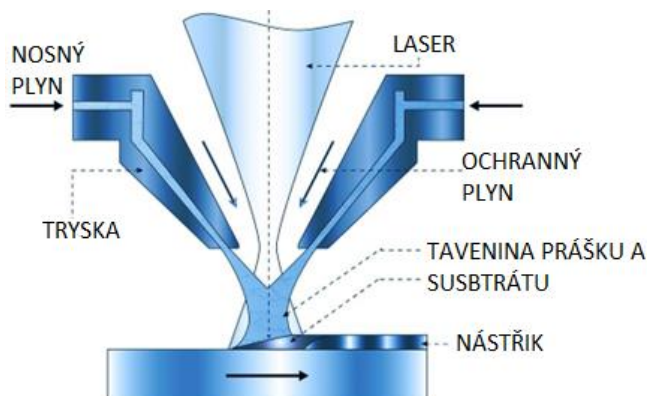
Technologie HVOF (high-velocity, oxy-fuel) spaluje plyny jako propan, propylen, MAPP (methyl-acetylen-propadien) nebo vodík v spalovací komoře, kde dodávají přidavnému materiálu ve formě prášku energii, viz Obrázek 23. Ten je následně vysokou rychlostí unášen směrem k substrátu, kde se tvoří nástřik. Roztavený letící přidavný materiál může mít až nadzvukovou rychlost kolem  $1\,800\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Výhodou této technologie je jemná výsledná struktura nástřiku s nízkým obsahem mikrotrhlin a pórů v kombinaci s vyšší hustotou. Nevýhodou může být oxidace přidavného materiálu díky vystavení produktům spalování. Touto technologií je možno nanášet kovové i nekovové materiály. [14; 15; 16]



Obrázek 23 - Schéma žárové metody nanášení vysokorychlostním nástřikem HVOF [17]

### 3.7 Laser Spray

U této technologie je materiál ve formě prášku za letu směrem k základnímu materiálu taven pomocí laserového paprsku, kam je vháněn pomocí nosného plynu, viz Obrázek 24. Část energie laserového paprsku je také absorbována základním materiálem, a tím dochází k tavení tenké povrchové vrstvy. Tento fakt způsobuje metalurgické vazby mezi základním a přidavným materiálem. Výhodou jsou velmi odolné povlaky bez pórů a mikrotrhlin. Nevýhodou této technologie je její energetická náročnost a omezená možnost volby přidavného a základního materiálu v závislosti na teplotě tání materiálů. [19; 20]

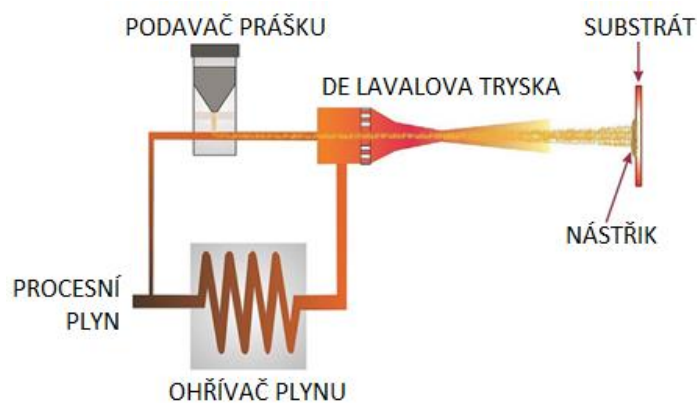


Obrázek 24 - Schéma laserové metody nanášení [33]

### 3.8 Cold Spray

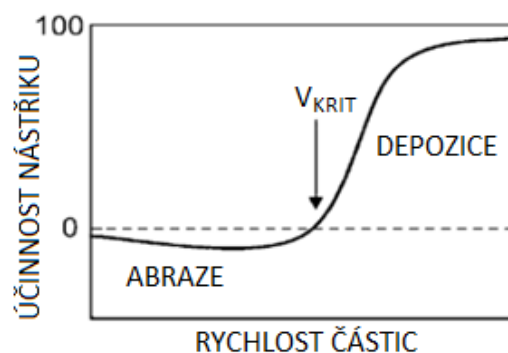
Tato technologie byla objevena koncem 80. let 20. století, kdy tým z Ruské akademie věd použil při aerodynamických zkouškách místo běžných plynů ke zviditelnění proudění drobné částice, které se po dosažení vysoké rychlosti začaly na materiál přichytávat. Pozdější testování ukázalo, že existuje tzv. kritická rychlost, pod níž má proud částic pouze erozivní působení a až při vyšších rychlostech dochází k depozici částic. [21; 22]

Technologie Cold Spray pracuje pod teplotou tání a využívá jako přídavný materiál prášek, o velikost v rozmezí 10 až 50  $\mu\text{m}$ , který je urychlován směrem na základní materiál pomocí stlačeného procesního plynu, viz Obrázek 25. Urychlení prášku se děje v de Lavalově trysce, kde prášek dosahuje nadzvukových rychlostí, až 1 200  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Jednotlivá zrna prášku se na základním materiálu vlivem vysoké rychlosti plasticky deformují, což má za následek adhezivní síly. Přídavný materiál nepřesahuje svou teplotu tání, díky čemuž nedochází k fázovým změnám materiálu, hrubnutí zrna ani rekrytalizaci. Z chemického hlediska jde tedy říct, že vzniklý povlak je totožný s práškem použitým k depozici. [16; 21; 23]

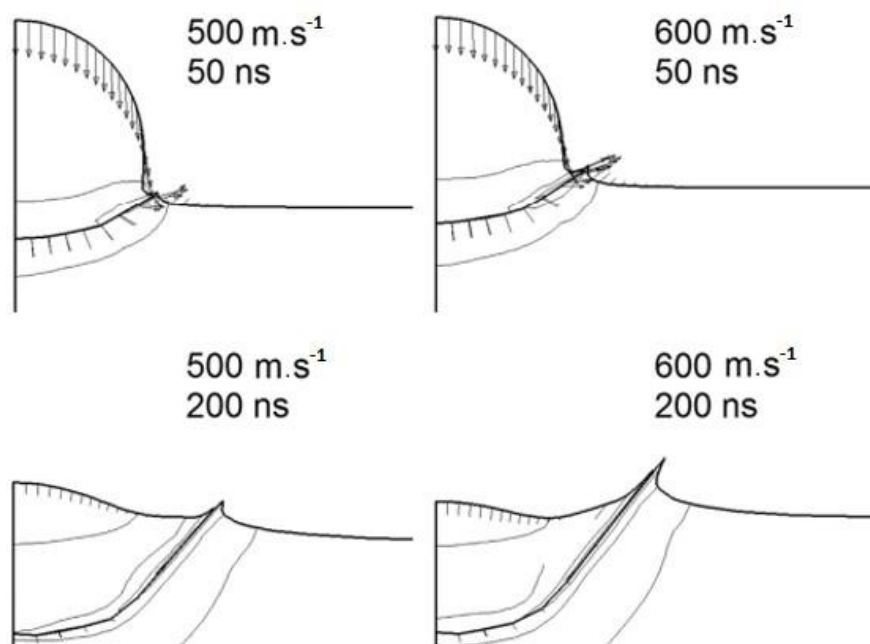


Obrázek 25 - Schéma nanášení technologií Cold Spray [23]

Nejdůležitějším parametrem pro depozici prášku je jeho kritická rychlost  $v_{\text{KRIT}}$ , kterou když letící prášek překoná, tak se po nárazu na substrát přichytí, místo aby jej abrazivně opotřeboval, což je znázorněno na Obrázek 26. Závislost dopadu částice přídavného materiálu na substrát v různých rychlostech je znázorněna na Obrázek 27. [16; 21; 23; 24]



Obrázek 26 - Závislost depoziční rychlosti na účinnosti depozice [21]

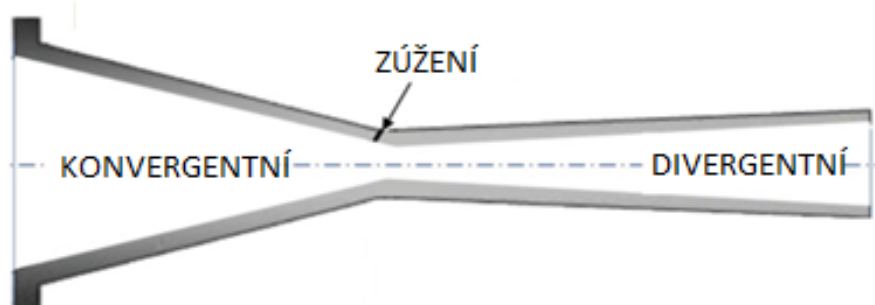


Obrázek 27 - Dopad částice přídavného materiálu na substrát v rychlostech 500 a 600 mm.s<sup>-1</sup> [23]

Dalším parametrem ovlivňujícím kvalitu nástřiku je použitý nosný plyn a jeho teplota. Nejčastěji se používá dusík. Ten ale v některých případech nevyhovuje, proto je upřednostňováno helium, se kterým jsme schopni dosahovat vyšších depozičních rychlostí. Nevýhodou hélia je ovšem jeho cena, která je až 10x vyšší, proto často dochází k míšení těchto dvou plynů. Plyn se přehřívá, což zajišťuje vyšší rychlost částic, ale zvyšuje riziko oxidace. Klesá ale také kritická rychlost, s nárůstem teploty o 100 °C klesá přibližně o 14 m.s<sup>-1</sup> v důsledku tepelného změkčení. [16; 21; 23]

Parametrem ovlivňující kvalitu deponované vrstvy je také úhel dopadu částic na základní materiál. Aby se deponované částice na základním materiálu zachytily, musí být jejich normálová složka rychlosti vyšší než kritická rychlost. Nejideálnějším úhlem pro deponaci nástřiku je tedy úhel kolmý na základní materiál. [16; 21; 23]

Kvalitu výsledného nástřiku také ovlivňuje konstrukce de Lavalovy trysky, znázorněné na Obrázek 28. Bylo zjištěno, že prodloužení délky trysky zvyšuje depoziční rychlost. Při přílišné délce ale dochází k jejímu ucpávání, proto je nutná optimalizace konstrukce. [16; 21; 23]



Obrázek 28 - Konvergentně-divergentní tvar de Lavalovy trysky [34]

Na výslednou kvalitu povrchu má také vliv drsnost substrátu. S větší drsností povrchu substrátu se zvyšuje účinnost depozice, jelikož se na zdrsňeném povrchu částice deformují silněji, čímž se zvyšuje adhezní síla. Je ale důležité dát pozor u měkkých základních materiálů, kde do nich může dojít k pronikání částic pískování a tím k znečištění rozhraní. [16; 21; 23]

Výhodami této technologie jsou nízký objem pórů ve výsledné struktuře nástřiku, vysoká adheze povlaků a minimální oxidace při jejich nanášení. Nevýhodou může být omezení výběru přídatného materiálu na materiály schopné plasticky se deformovat, kdy tato podmínka do jisté míry znesnadňuje nanášení keramických materiálů. Dále může být nevýhodou omezení na pouze viditelné plochy. [16; 21; 23; 25]

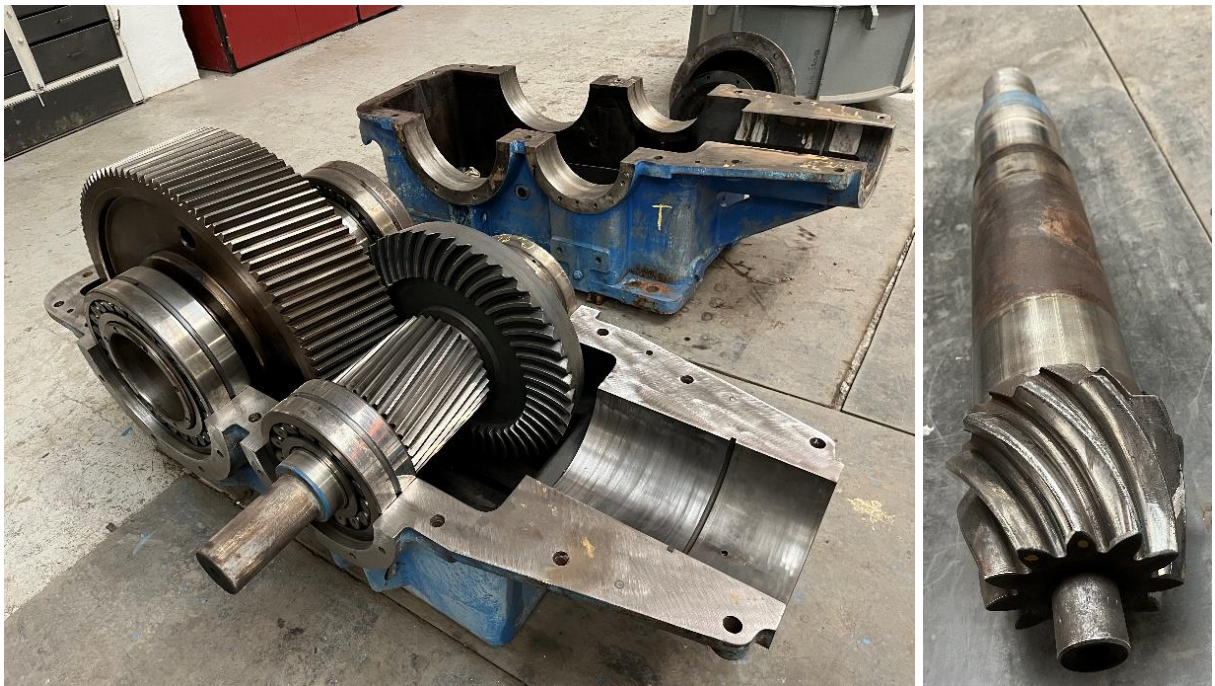
## 4 Experimentální část

Experimentální část této práce se zabývá renovací strojní součásti, konkrétně převodovkového pastorku, který byl poskytnut firmou PRODECO, a.s.

Z důvodu vysoké hmotnosti a velkých délkových rozměrů pastorku, nebylo zatím možné ve Výzkumném a zkušebním ústavu v Plzni součást upnout a roztočit na požadovanou obvodovou rychlost, proto byla renovace simulována na čepu o stejném základním materiálu a průměru.

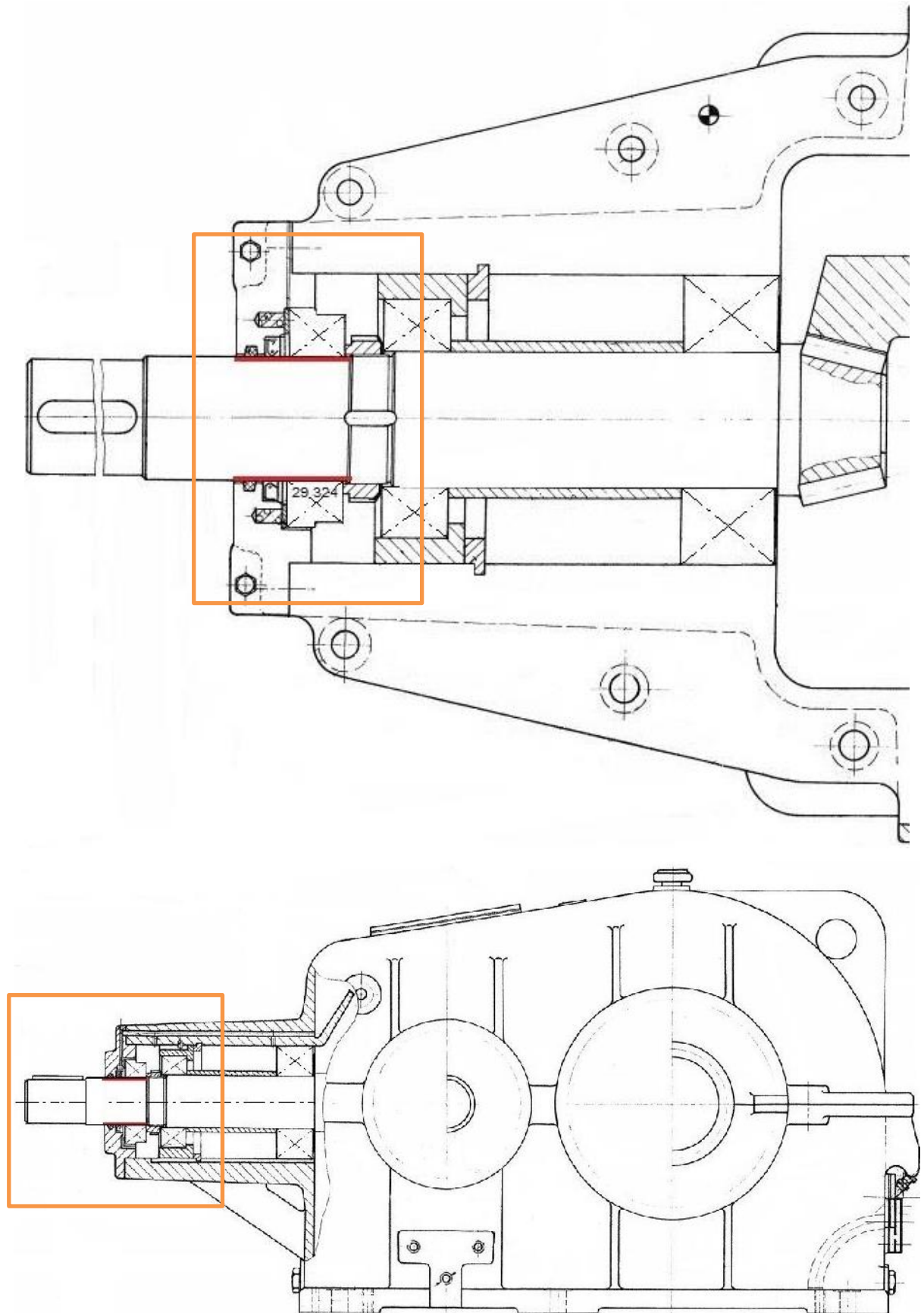
### 4.1 Popis součásti určeného k renovaci

K renovaci byl určen vstupní pastorek z dvoustupňové kuželočelní převodovky o výkonu 250 kW z pohonné jednotky pásového dopravníku dálkové pásové dopravy na Dole Bílina. Pastorek váží 75 kg a je dlouhý 900 mm. Převodovka včetně již zmiňovaného pastorku, je viditelná na Obrázek 29. Uložení pastorku v převodovce je vidět na Obrázek 30, kde je v oranžovém obdélníku červenou barvou vyznačena opotřebená funkční plocha, která byla určena k renovaci.



Obrázek 29 - Převodovka a pastorek





Obrázek 30 - Výkres uložení pastorku v převodovce s vyznačením plochy

Plocha pastorku určená k renovaci je bíle vyznačena na Obrázek 31. Na této ploše je uloženo axiální soudečkové ložisko 29 324 a těsnící kroužek, což lze spatřit na Obrázek 30. Funkční plocha pastorku má v tomto místě průměr 120 mm.

Původní materiál pastorku je dle výkresu konstrukční nízkolegovaná ocel 15 330.6, legovaná chromem, molybdenem a vanadem, určená k nitridaci. Tento materiál byl konstruktéry původně navržen kvůli výskytu ozubení v záběrové části pastorku, které je nitridováno. Číslo 6 v značení oceli za tečkou znamená, že je materiál zušlechťený na spodní hranici pevnosti dle příslušné materiálové normy ČSN 41 5330. Výsledná tvrdost funkčních ploch byla předepsána na 250 až 300 HV.



*Obrázek 31 - Detail renovované funkční plochy*

V minulosti byla výše zmíněná funkční plocha renovována žárovým nástřikem acetylenovým plamenem, tzv. šopováním, a plocha pod těsnícím kroužkem byla navařena elektrodou, jelikož v tomto místě docházelo k intenzivnímu opotřebování v důsledku kontaktu těsnícího kroužku a funkční plochy pastorku. Tímto kombinovaným způsobem renovace ale nebylo dosaženo výkresem požadované povrchové tvrdosti součásti. Navíc se v oblasti návaru tvořila široká tepelně ovlivněná oblast (viz Obrázek 32), která je nebezpečná kvůli výsledným pnutím v materiálu a zhoršení mechanických vlastností v daném místě. Kvůli těmto nepříznivým skutečnostem byl hledán nový způsob renovace součásti.





Obrázek 32 - Detail tepelně ovlivněné oblasti v oblasti návaru

## 4.2 Volba optimální technologie a přídavného materiálu

Z technologií vhodných k renovaci strojní součásti, uvedených v teoretické části této práce, byla zvolena technologie Cold Spray, a to díky jejím výhodám, jako je vysoká adheze nástřiku k substrátu a minimální oxidace při jeho nanášení.

Jako přídavný materiál ve formě prášku byly vybrány tři vhodné materiály - AISI 316L, Diamalloy 1003 a Inconel 625. Tyto materiály byly zvoleny, díky svým vhodným mechanickým vlastnostem blízkým základnímu materiálu pastorku.

Prvním materiálem vhodným k renovaci pastorku je AISI 316L, což je austenitická nerezová ocel od výrobce Sandvik. Jejími hlavními legujícími prvky jsou chrom, nikl a molybden, viz Tabulka 1. Písmeno L v názvu oceli značí, že oproti AISI 316 je tato ocel nízkouhlíková. Tento materiál má velmi dobrou korozní odolnost a svařitelnost. Je hojně využívaný v chemickém, petrochemickém, potravinářském a farmaceutickém průmyslu.

Tabulka 1 – Parametry prášku AISI 316L

AISI 316L - zastoupení prvků v chemickém složení v [hmotnostních %]								
Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	C	S
62 až 72	16 až 18	10 až 14	2 až 3	≤ 2,0	≤ 1,0	≤ 0,04	≤ 0,03	≤ 0,03
Základní parametry prášku								
Velikost částic dle dodavatele						45 ± 15 μm		

Druhým zvoleným materiálem je Diamalloy 1003, což je austenitická nerezová ocel od výrobce Oerlikon. Hlavními legujícími prvky jsou, stejně jako u oceli AISI 316L, chrom, nikl a molybden. Rozdíl mezi těmito materiály je v obsahu křemíku, kdy u této oceli je ho o 1,3 hm.% více (viz Tabulka 2). Materiály mají také jiného výrobce. Diamalloy 1003 je odolný proti korozi a opotřebení a při provozu dochází u tohoto materiálu k dodatečnému zpevnění namáhaných ploch – což je ideální pro součást s těsníci plochami.

*Tabulka 2 – Parametry prášku Diamalloy 1003*

<b>Diamalloy 1003 - zastoupení prvků v chemickém složení v [hmotnostních %]</b>					
Fe	Cr	Ni	Mo	Si	C
37,3 až 48,3	16 až 18	10 až 14	2 až 3	2,3	≤ 0,03
<b>Základní parametry prášku</b>					
Velikost částic dle dodavatele				45 ± 11 μm	

Třetím a posledním zvoleným materiálem je Inconel 625 od výrobce m4p, což je slitina niklu, chromu a molybdenu s přidavkem niobu. Tento materiál zajišťuje vysokou pevnost bez nutnosti tepelného zpracování a jeho chemické složení je vypsáno v Tabulka 3. Inconel 625 se vyznačuje vysokou pevností, odolností vůči zvýšeným teplotám a vysokou odolností vůči korozi. Tento materiál se používá na namáhané strojní díly, potrubní systémy, kotle, výfuky a součásti do mořské vody.

*Tabulka 3 – Parametry prášku Inconel 625*

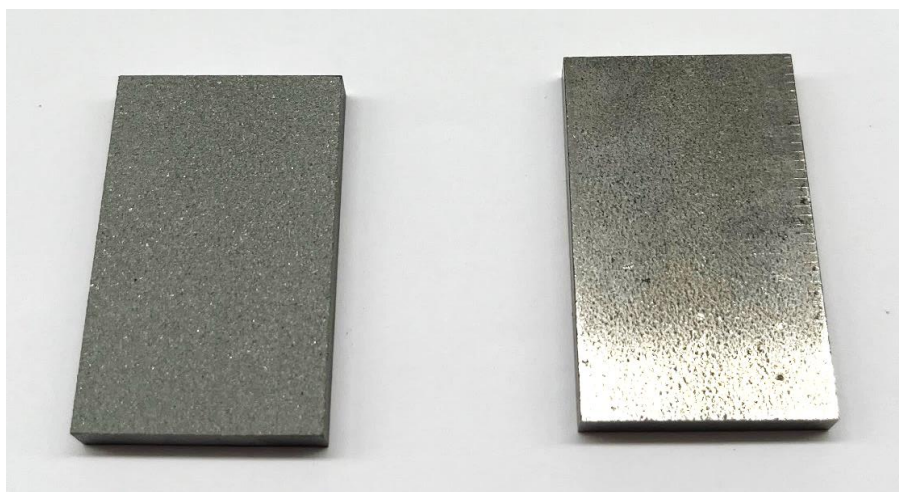
<b>Inconel 625 - zastoupení prvků v chemickém složení v [hmotnostních %]</b>									
Ni	Cr	Mo	Nb	Si	Mn	Fe	Al	Ti	C
≥ 58	20 až 23	8 až 10	3,15 až 4,15	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 5,0	≤ 0,4	≤ 0,4	≤ 0,1
<b>Základní parametry prášku</b>									
Velikost částic dle dodavatele							45 ± 15 μm		

### 4.3 Zhotovení zkušebních vzorků

Celkem bylo připraveno 18 různých zkušebních vzorků, které byly zhotoveny ze stejného základního materiálu jako pastorek. Před nanášením nástřiku se musely nejprve předupravit zdrsněním povrchu a očištěním. Požadované drsnosti  $Ra = 6 \pm 1 \mu m$  bylo dosaženo tryskáním. Parametry tryskání lze vidět v Tabulka 4. Po tryskání byly vzorky očištěny stlačeným vzduchem o tlaku 6 až 10 barů. Na Obrázek 33 lze vidět zkušební vzorek po a před tryskáním.

Tabulka 4 - Parametry tryskání zkušebních vzorků

Parametry tryskání	
Tryskací tlak	5 ± 1 barů
Vzdálenost trysky	210 ± 5 mm
Úhel tryskání	90 +0/-10 °
Abrazivo	Korund F22
Měrný rozměr zrna	0,85 až 1 mm



Obrázek 33 - Zkušební vzorek PO a PŘED zdrsněním

Kontrola drsnosti vzorků po tryskání probíhala na přenosném drsnoměru Mitutoyo Surftest SJ-210, viditelném na Obrázek 34. Drsnost byla na vzorcích měřena vždy třikrát ve dvou směrech na sebe kolmých. Následně se hodnota z naměřených hodnot zprůměrovala.



Obrázek 34 - Přenosný drsnoměr Mitutoyo Surftest SJ-210

Následně byly na připravené zkušební vzorky nanесeny nástřiky technologií Cold Spray ze třech různých přídatných materiálů, viz kapitola výše, s různou kombinací parametrů nástřiku. Rozmanitost parametrů nástřiku vedla k optimalizaci parametrů. Použité parametry nástřiku lze vidět v Tabulka 5.

Tabulka 6 uvádí značení jednotlivých zkušebních vzorků s různou kombinací parametrů nástřiku.

Tabulka 5 – Použité parametry nástřiku

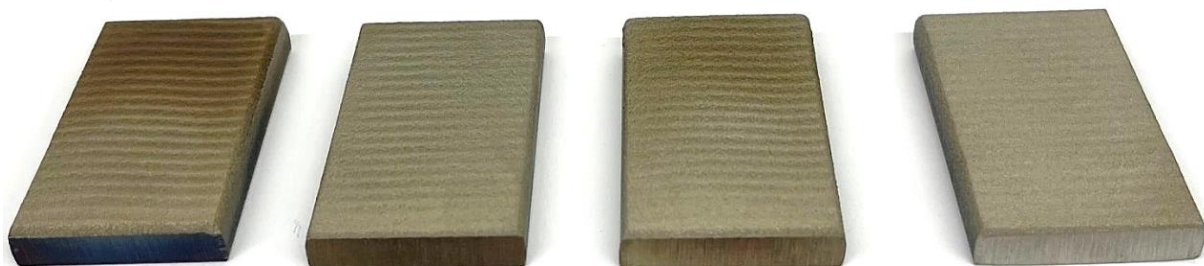
<b>Měnicí se parametry nástřiku</b>	
Rychlost posuvu robota vůči vzorku	300 a 500 mm.s <sup>-1</sup>
Teplota procesního plynu	800 °C a 1 000 °C
Tlak procesního plynu	45 a 50 barů
<b>Konstantní parametry nástřiku</b>	
Průtok procesního plynu dusíku	80,0 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>
Průtok nosného plynu dusíku	3,0 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>
Vzdálenost robota od vzorku	30,0 mm
Úhel robota vůči vzorku	90°
Počet přejezdů robota po vzorku	3

Tabulka 6 - Značení zkušebních vzorků

<b>TLAK PROCESNÍHO PLYNU = 45 BAR</b>			
<b>TEPLOTA PROCESNÍHO PLYNU</b>	<b>MATERIÁL NÁSTŘIKU</b>	<b>RYCHLOST POSUVU</b>	<b>OZNAČENÍ VZORKU</b>
<b>800 °C</b>	<b>AISI 316L</b>	<b>300 mm.s<sup>-1</sup></b>	230101-1
		<b>500 mm.s<sup>-1</sup></b>	230101-2
	<b>Diamalloy 1003</b>	<b>300 mm.s<sup>-1</sup></b>	230116-1
		<b>500 mm.s<sup>-1</sup></b>	230116-2
	<b>Inconel 625</b>	<b>300 mm.s<sup>-1</sup></b>	230104-1
		<b>500 mm.s<sup>-1</sup></b>	230104-2
<b>TLAK PROCESNÍHO PLYNU = 50 BAR</b>			
<b>800 °C</b>	<b>AISI 316L</b>	<b>300 mm.s<sup>-1</sup></b>	230100-1
		<b>500 mm.s<sup>-1</sup></b>	230100-2
	<b>Diamalloy 1003</b>	<b>300 mm.s<sup>-1</sup></b>	230115-1
		<b>500 mm.s<sup>-1</sup></b>	230115-2
	<b>Inconel 625</b>	<b>300 mm.s<sup>-1</sup></b>	230103-1
		<b>500 mm.s<sup>-1</sup></b>	230103-2
<b>1 000 °C</b>	<b>AISI 316L</b>	<b>300 mm.s<sup>-1</sup></b>	230099-1
		<b>500 mm.s<sup>-1</sup></b>	230099-2
	<b>Diamalloy 1003</b>	<b>300 mm.s<sup>-1</sup></b>	230114-1
		<b>500 mm.s<sup>-1</sup></b>	230114-2
	<b>Inconel 625</b>	<b>300 mm.s<sup>-1</sup></b>	230102-1
		<b>500 mm.s<sup>-1</sup></b>	230102-2



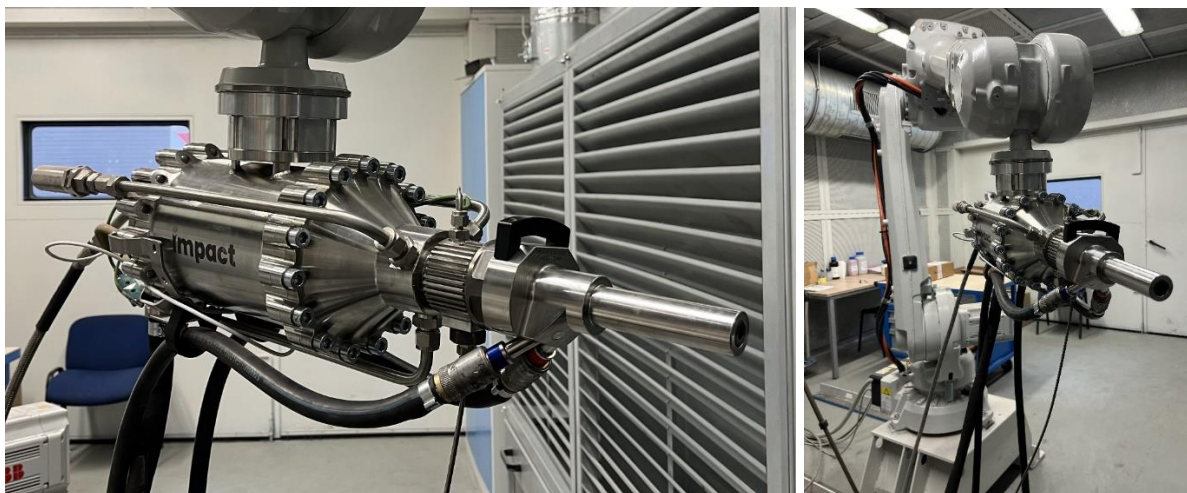
Na Obrázek 35 lze vidět zkušební vzorky po nanesení nástřiků. Jedná se o vzorky (zleva) 230099-1, 230099-2, 230100-1, 230100-2.



*Obrázek 35 - Zkušební vzorky po nanesení nástřiků*

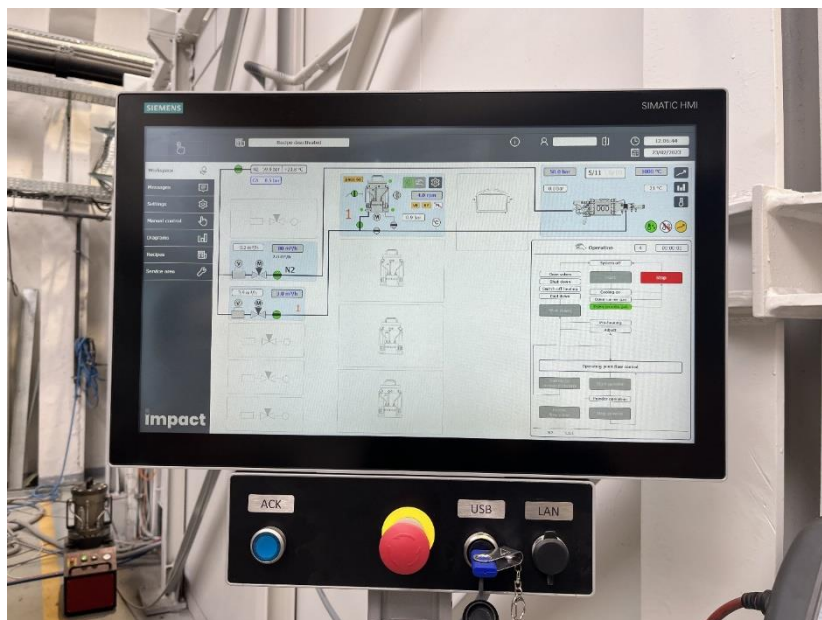
#### 4.4 Experimentální zařízení Cold Spray

Proces nanášení byl realizován na zařízení Cold Spray, umístěném ve Výzkumném a zkušebním ústavu v Plzni. Výrobce zařízení je firma Impact Innovations GmbH. Nejdůležitější částí celého zařízení je dělo Impact Gun EvoCSII (viz Obrázek 36), u kterého byla použita centrální dlouhá tryska.



*Obrázek 36 – Zařízení Cold Spray*

Toto dělo je umístěno na robotickém ramenu od firmy ABB, které se nachází uvnitř nástřikové komory. Z venku komory je proces ovládán pomocí ovládacího panelu (viz Obrázek 37), také od výrobce Impact Innovations GmbH. Na něm je možné upravovat veškeré parametry nanášení a celý proces kontrolovat.



Obrázek 37 - Ovládací panel zařízení Cold Spray

Další důležité části zařízení Cold Spray jsou podavač prášku Impact Powder Feeder EvoCSII (viz Obrázek 38) a tlakový zásobník nosného plynu dusíku (viz Obrázek 39). U podavače prášku byl zvolen disk  $\varnothing 3 \times 120 \text{ mm}$  a rychlost otáček disku 4 otáčky za minutu.



Obrázek 38 - Podavač prášku



Obrázek 39 - Zásobárna dusíku

## 4.5 Hodnocení metalografických snímků vzorků

Další fází praktické části této diplomové práce bylo pozorování a vyhodnocení nanesených nástřiků, k čemuž byla potřeba připravit metalografické výbrusy.

### 4.5.1 Příprava metalografických výbrusů

Zkušební vzorky se nejprve rozřízly na metalografické pile SATM Qcut 150 A s diamantovým kotoučem (viz Obrázek 40). Následně se zalily do pryskyřice a vytvrzovadla Caldofix a vytvrdily při teplotě 70 °C po dobu 1,5 hodiny. Vzorky bylo následně potřeba zbrousit a vyleštit na leštícím zařízení ATM Saphir 250 (viz Obrázek 41). Broušení nejprve probíhalo po dobu 8 minut brusnou podložkou MD Piano 220 za přítomnosti vody, následně 8 minut brusnou podložkou MD Alegro za přítomnosti diamantové suspenze s velikostí částic 9 μm. Následovalo leštění po dobu 4 minut leštícím plátnem MD Dac za přítomnosti diamantové suspenze s velikostí částic 3 μm a leštícím plátnem MD Nap za přítomnosti diamantové suspenze s velikostí částic 1 μm. Nastaveny byly parametry: otáčky vzorku: 150 otáček za minutu, otáčky papíru: 300 otáček za minutu a přítlak na brusný papír: 125 N. Po leštění byly vzorky připravené na pozorování pod mikroskopem.



Obrázek 40 – Metalografická pila ATM Qcut 150 A



Obrázek 41 – Leštička ATM Saphir 250

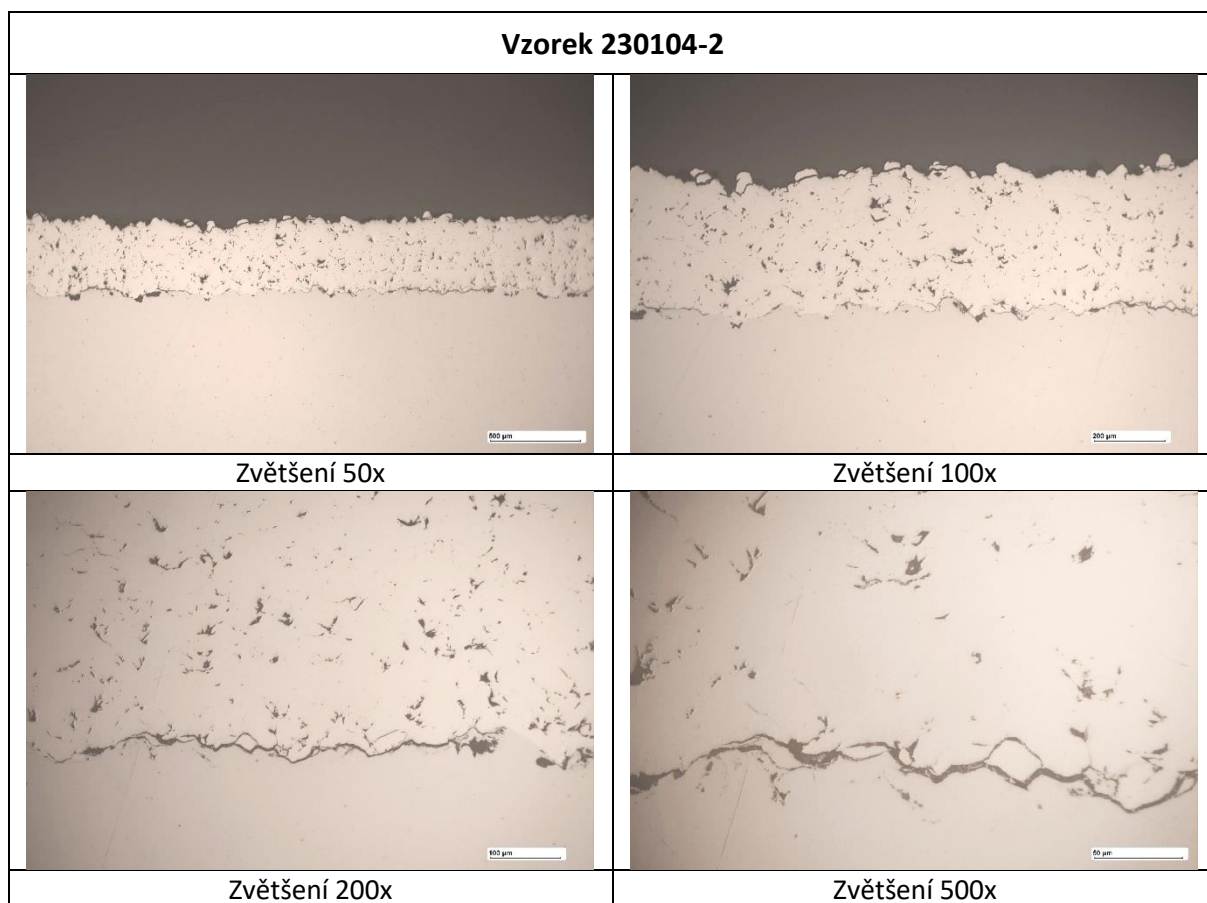
### 4.5.2 Metalografické snímky

Na pořízení metalografických snímků vzorků byl použit mikroskop od značky Arsenal (viz Obrázek 42). Připravené metalografické vzorky byly pozorovány se zvětšením 50x, 100x, 200x a 500x.





Obrázek 42 - Mikroskop Arsenal



Obrázek 43 - Metalografické snímky vzorku 230104-2



Jako příklad jsou na Obrázek 43 uvedeny pořízené metalografické snímky vzorku 230104-2. Přídavný materiál byl v tomto případě Inconel 625. Kombinace měnících se parametrů nástřiku pro tento vzorek byla – tlak procesního plynu 45 barů, teplota procesního plynu 800 °C, rychlost posuvu 500 mm.s<sup>-1</sup>. Na snímcích lze spatřit konzistentní nástřik s vyšším obsahem pórů. Nástřik se se substrátem spojil, až na oblast viditelnou na snímku se zvětšením 200x, kde došlo k šíření lokální trhliny. Tmavé větší částice, vyskytující se v oblasti spoje, viditelné například na snímku se zvětšením 200x, jsou zasekané abrazivo ze vzorku po tryskání.

#### 4.5.3 Vyhodnocení metalografických snímků vzorků

Z metalografických snímků byla vyhodnocena průměrná tloušťka nástřiků, která byla zprůměrována z pěti různých míst, a jejich pórovitost. To bylo hodnoceno pomocí nástrojů v programu ImageJ. Také bylo u snímků nástřiků vyhodnoceno, zda se nástřik od substrátu odlupuje či nikoliv. Výsledky hodnocení nástřiků vzorků z metalografických výbrusů obsahuje Tabulka 7.

Tabulka 7 - Vyhodnocení nástřiků vzorků

TLAK PROCESNÍHO PLYNU = 45 BAR				
TEPLOTA PROCESNÍHO PLYNU	MATERIÁL NÁSTŘIKU	RYCHLOST POSUVU	OZNAČENÍ VZORKU	HODNOCENÍ NÁSTŘIKU
800 °C	AISI 316L	300 mm.s <sup>-1</sup>	230101-1	Tloušťka - 1014 μm
				Porozita - 3,7 %
				Odlupuje se
		500 mm.s <sup>-1</sup>	230101-2	Tloušťka - 586 μm
				Porozita - 2,7 %
				Neodlupuje se
	Diamalloy 1003	300 mm.s <sup>-1</sup>	230116-1	Tloušťka - 864 μm
				Porozita - 4,3 %
				Odlupuje se
		500 mm.s <sup>-1</sup>	230116-2	Tloušťka - 570 μm
				Porozita - 2,5 %
				Neodlupuje se
Inconel 625	300 mm.s <sup>-1</sup>	230104-1	Tloušťka - 619 μm	
			Porozita - 2,9 %	
			Neodlupuje se	
	500 mm.s <sup>-1</sup>	230104-2	Tloušťka - 386 μm	
			Porozita - 3,8 %	
			Neodlupuje se	

Tabulka 7 - Vyhodnocení nástřiků

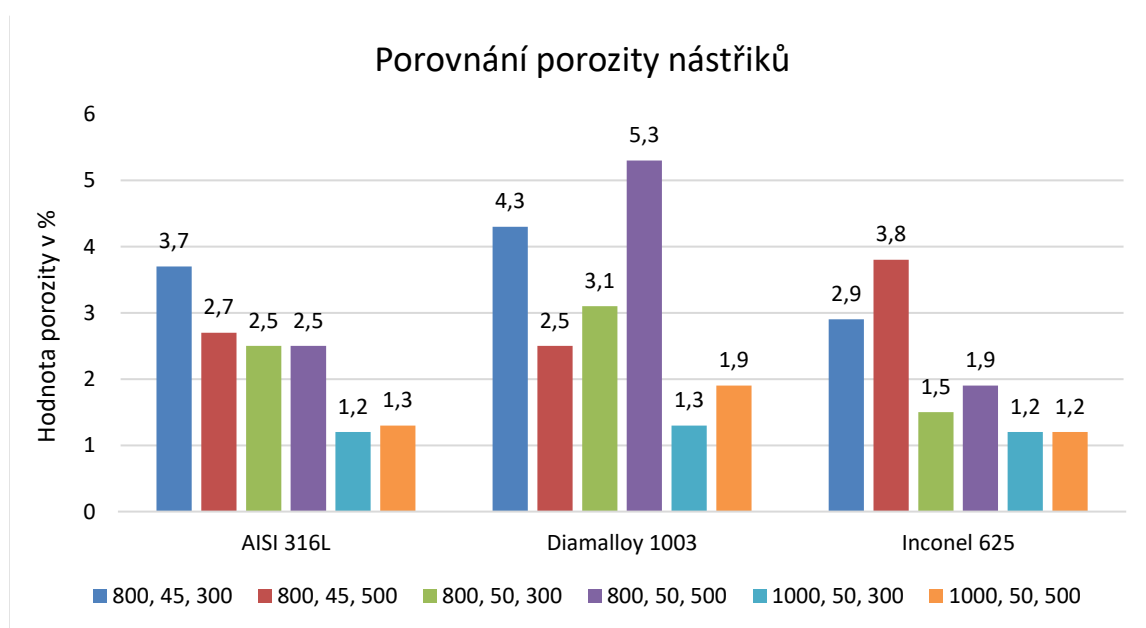
TLAK PROCESNÍHO PLYNU = 50 BAR				
800 °C	AISI 316L	300 mm.s <sup>-1</sup>	230100-1	Tloušťka - 1039 μm
				Porozita - 2,5 %
				Odlupuje se
		500 mm.s <sup>-1</sup>	230100-2	Tloušťka - 612 μm
				Porozita - 2,5 %
				Odlupuje se
	Diamalloy 1003	300 mm.s <sup>-1</sup>	230115-1	Tloušťka - 1017 μm
				Porozita - 3,1 %
				Odlupuje se
		500 mm.s <sup>-1</sup>	230115-2	Tloušťka - 727 μm
				Porozita - 5,3 %
				Odlupuje se
Inconel 625	300 mm.s <sup>-1</sup>	230103-1	Tloušťka - 580 μm	
			Porozita - 1,5 %	
			Neodlupuje se	
	500 mm.s <sup>-1</sup>	230103-2	Tloušťka - 399 μm	
			Porozita - 1,9 %	
			Neodlupuje se	
1 000 °C	AISI 316L	300 mm.s <sup>-1</sup>	230099-1	Tloušťka - 980 μm
				Porozita - 1,2 %
				Odlupuje se
		500 mm.s <sup>-1</sup>	230099-2	Tloušťka - 614 μm
				Porozita - 1,3 %
				Neodlupuje se
	Diamalloy 1003	300 mm.s <sup>-1</sup>	230114-1	Tloušťka - 1028 μm
				Porozita - 1,3 %
				Odlupuje se
		500 mm.s <sup>-1</sup>	230114-2	Tloušťka - 653 μm
				Porozita - 1,9 %
				Neodlupuje se
Inconel 625	300 mm.s <sup>-1</sup>	230102-1	Tloušťka - 590 μm	
			Porozita - 1,2 %	
			Neodlupuje se	
	500 mm.s <sup>-1</sup>	230102-2	Tloušťka - 387 μm	
			Porozita - 1,2 %	
			Neodlupuje se	

Jako příklad nevyhovujícího odlupujícího se nástřiku od substrátu je na Obrázek 44 uveden metalografický snímek vzorku 230100-1, který je 50x zvětšený. Přídavný materiál byl v tomto případě materiál AISI 316L. Kombinace měnících se parametrů nástřiku pro tento vzorek byla – tlak procesního plynu 50 barů, teplota procesního plynu 1 000 °C, rychlost posuvu 300 mm.s<sup>-1</sup>.



Obrázek 44 - Snímek vzorku 230100-1, který je 50x zvětšený

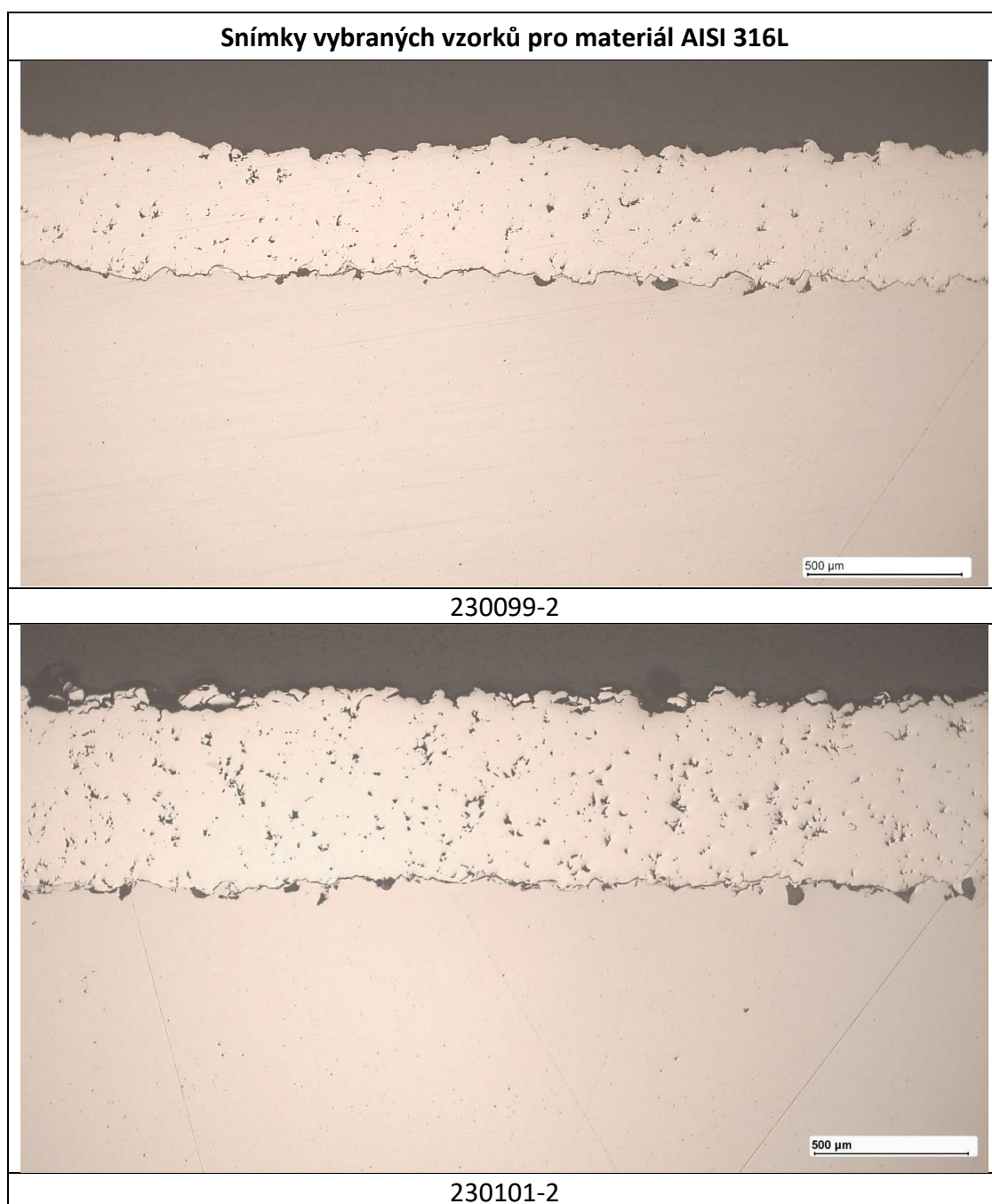
Porovnání porozity jednotlivých vzorků dle přídavných materiálů a parametrů nástřiku můžeme spatřit v Graf 1. Značení jednotlivých sloupců (např. 800, 45, 30) vypovídá o měnící se parametrech nástřiku. První údaj, 800 či 1000, popisuje teplotu procesního plynu v °C. Druhý údaj, 45 či 50, popisuje tlak procesního plynu v barech. Třetí poslední údaj, 300 či 500, popisuje rychlost posuvu v mm.s<sup>-1</sup>.



Graf 1 - Porovnání porozity nástřiků

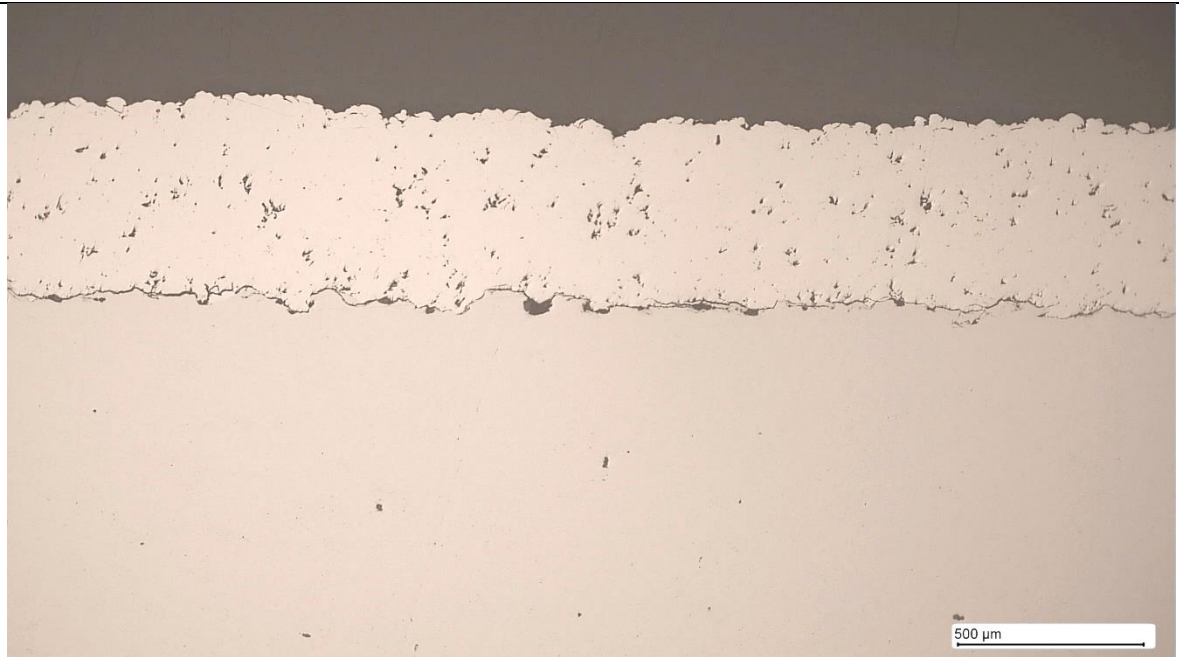
Z Graf 1 je patrné, že nejmenší porozitu mají nástřiky s kombinací měnících se parametrů - teplota procesního plynu 1 000 °C, tlak procesního plynu 50 barů, rychlost posuvu 300 mm.s<sup>-1</sup>. Podobných hodnot porozity dosahovaly vzorky se stejnou teplotou a tlakem procesního plynu, jen s vyšší hodnotou rychlosti posuvu (500 mm.s<sup>-1</sup>).

Z metalografických snímků všech vzorků byly následně vybrány ty nejlépe vypadající, pro každý materiál dva. Pro materiál AISI 316L to byly vzorky 230099-2, 230101-2. Pro materiál Diamalloy 1003 to byly vzorky 230114-2 a 230116-2 a pro materiál Inconel 625 to byly vzorky 23102-2 a 23104-2 (viz zeleně vyznačené vzorky v Tabulka 7). Metalografické snímky těchto vybraných vzorků vidíme na následujících snímcích.

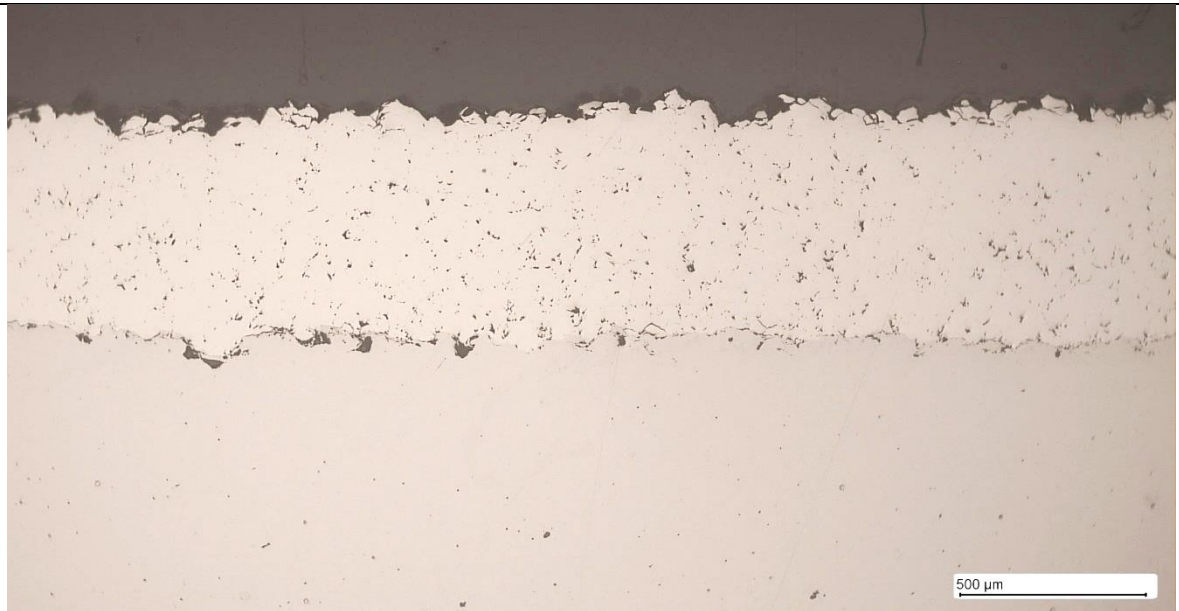


*Obrázek 45 - Snímky vybraných vzorků pro materiál AISI 316L*

**Snímky vybraných vzorků pro materiál Diamalloy 1003**



230114-2

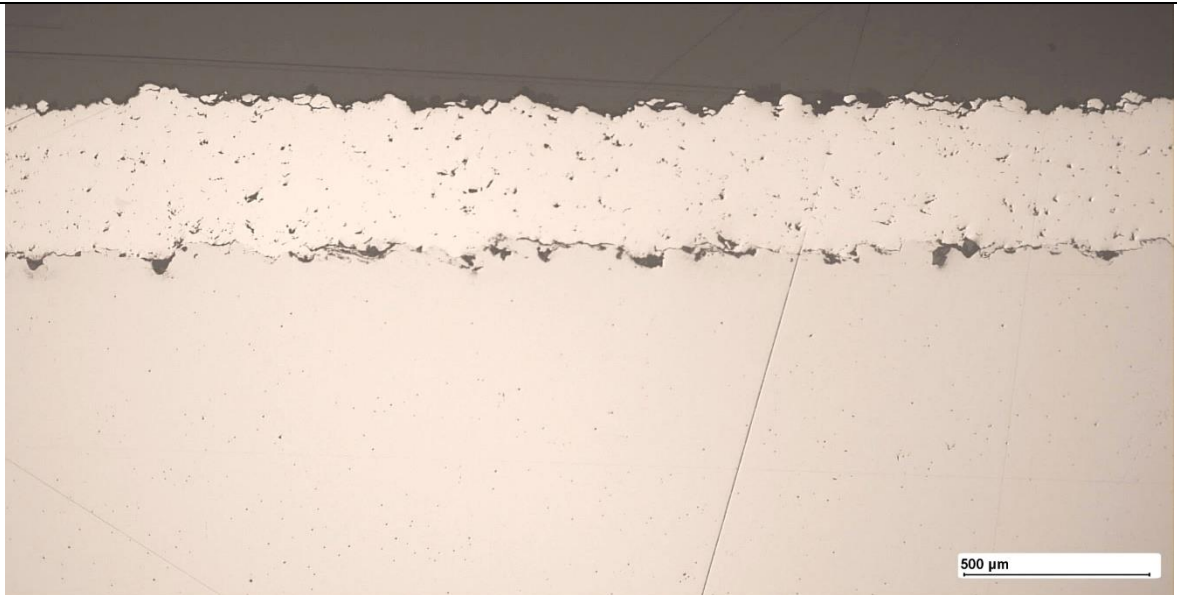


230116-2

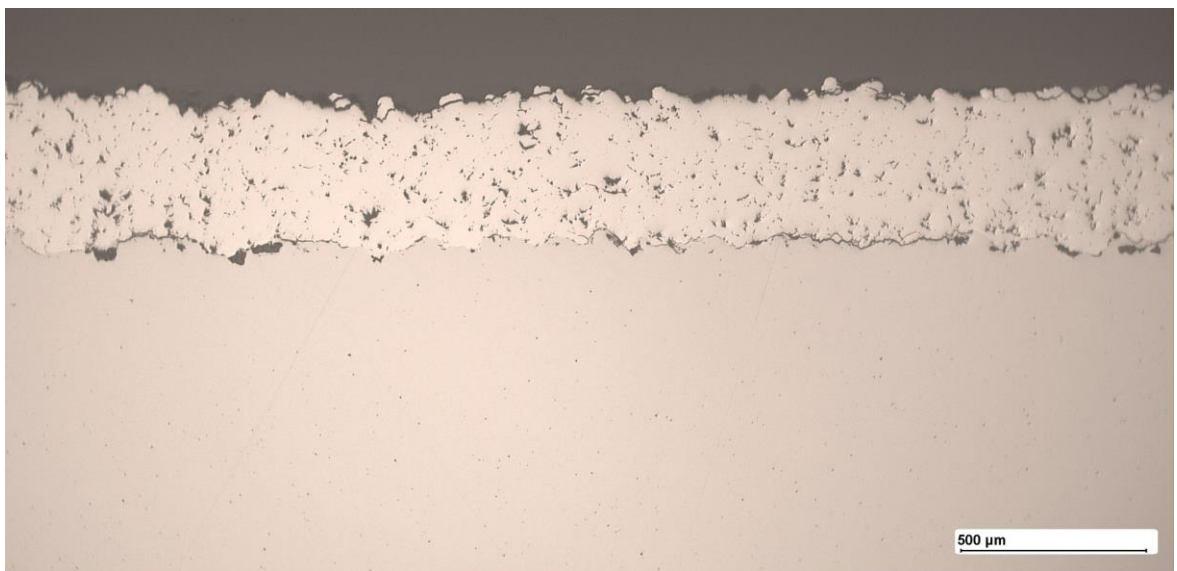
*Obrázek 46 - Snímky vybraných vzorků pro materiál Diamalloy 1003*



### Snímky vybraných vzorků pro materiál Inconel 625



230102-2



230104-2

*Obrázek 47 - Snímky vybraných vzorků pro materiál Inconel 625*

Na těchto vybraných vzorcích byly následně provedeny další zkoušky, otěruvzdornost a mikrotvrdost. Cílem dalšího testování bylo zúžit výběr na jeden konkrétní vzorek, jehož přídatný materiál a parametry nástřiku se následně nanesou na čep.

## 4.6 Hodnocení abrazivního opotřebení

Dále byla na vybraných zkušebních vzorcích (označených zeleným podbarvením v Tabulka 7) hodnocena míra abrazivního opotřebení. Hodnocení bylo provedeno na základě úbytku hmotnosti vzorku, kdy byl vzorek opakovaně otírán pryžovým kotoučem za přítomnosti abraziva, bílého korundu F70  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Zařízení na uchycení vzorku je vidět na Obrázek 48.



Obrázek 48 - Zařízení k hodnocení otěruvzdornosti

### 4.6.1 Postup hodnocení abrazivního opotřebení

Hodnocení abrazivního opotřebení vychází z rozdílu hmotnosti vzorku před a po abrazi. Každý konkrétní vzorek byl zastoupen třemi vzorky, tzn. měření abrazivního opotřebení bylo pro konkrétní vybraný (zeleně označený vzorek z Tabulka 7) provedeno třikrát.

Počáteční hmotnost vzorků byla uvažována až po několikasekundové abrazi, kdy došlo k obroušení nerovností na povrchu nástřiku. Následně byla na vzorcích provedena abraze, kdy se pryžový kotouč celkově otočil o 718 m při zatížení 22 N a otáčkách  $218 \text{ ot. min}^{-1}$ .

Proces abraze byl rozdělen na 6 fází, kdy se po každé fázi vzorek zvažil. První fáze končila, když se pryžový kotouč otočil o 143,6 m. Druhá fáze končila při celkovém otočení o 287,2 m. Třetí pak končila po celkové „ujeté“ vzdálenosti 430,8 m a pátá po 574,4 m. Šestá fáze byla konečná, a vážení nastalo, když se kotouč celkem otočil o 718 m.

Vzorky byly váženy na váze Sartorius Quintix (viz Obrázek 49) s přesností 0,001 mm.



Obrázek 49 - Váha Sartorius Quintix

Při každém vážení vzorku se provedla tři vážení. Z těchto hodnot se následně určila průměrná hodnota hmotnosti vzorku v gramech a směrodatná odchylka v miligramech (viz Tabulka 8).

Výpočet směrodatné odchylky měření hmotnosti ( $s_{m1,2,3}$ ) se provedl pomocí rovnice:

$$s_{m1,2,3} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \times 1000 \text{ [mg]} \quad (1)$$

- Kde:  $n$  [-] počet vážení vzorku  
 $m_i$  [g] jednotlivé hmotnosti vzorků  
 $\bar{m}$  [g] průměrná hmotnost vzorku

Tabulka 8 - Hmotnosti vzorků po jednotlivých fázích abrazivního opotřebení

AISI 316L – vzorek 230099-2_1						
Číslo cyklu	Ujetá dráha [m]	$m_{1,2,3}$ [g]			$\bar{m}$ [g]	$s_{m1}$ [mg]
0	-	76,298	76,298	76,297	76,298	0,471
1	143,6	76,235	76,235	76,235	76,235	0,000
2	287,2	76,174	76,174	76,174	76,174	0,000
3	430,8	76,114	76,115	76,114	76,114	0,471
4	574,4	76,058	76,057	76,057	76,057	0,471
5	718	76,001	76,000	76,001	76,001	0,471



Tabulka 8 - Hmotnosti vzorků po jednotlivých fázích abrazivního opotřebení

AISI 316L – vzorek 230099-2_2						
Číslo cyklu	Ujetá dráha [m]	$m_{1,2,3}$ [g]			$\bar{m}$ [g]	$S_{m2}$ [mg]
0	-	76,512	76,512	76,512	76,512	0,000
1	143,6	76,448	76,449	76,450	76,449	0,816
2	287,2	76,388	76,388	76,388	76,388	0,000
3	430,8	76,328	76,329	76,329	76,329	0,471
4	574,4	76,269	76,269	76,270	76,269	0,471
5	718	76,213	76,213	76,211	76,212	0,943
AISI 316L – vzorek 230099-2_3						
Číslo cyklu	Ujetá dráha [m]	$m_{1,2,3}$ [g]			$\bar{m}$ [g]	$S_{m3}$ [mg]
0	-	76,365	76,366	76,365	76,365	0,471
1	143,6	76,302	76,301	76,302	76,302	0,471
2	287,2	76,239	76,240	76,240	76,240	0,471
3	430,8	76,180	76,180	76,180	76,180	0,000
4	574,4	76,122	76,121	76,122	76,122	0,471
5	718	76,064	76,064	76,064	76,064	0,000

Z těchto hodnot se následně vypočte hmotnostní úbytek ( $ML_{1,2,3}$ ), který se získá pomocí vztahu:

$$ML_{1,2,3} = (m_x - m_{x+1}) \times 1000 \quad [\text{mg}] \quad (2)$$

Kde:  $m_x$  [g] hmotnost vzorku v daném cyklu

$m_{x-1}$  [g] hmotnost vzorku v následujícím cyklu

Následně jednotlivé hmotností úbytky  $ML_1$ ,  $ML_2$  a  $ML_3$  se zprůměrují a získá se průměrný hmotnostní úbytek  $\overline{ML}$ .

Dále se vypočte směrodatná odchylka pro jednotlivé hmotnostní úbytky ( $S_{ML1,2,3}$ ) pomocí rovnice:

$$S_{ML1,2,3} = \sqrt{s_m^2 + s_{ML(x-1)}^2} \quad [\text{mg}] \quad (3)$$

Kde:  $s_m$  [mg] směrodatná odchylka měření hmotnosti v daném cyklu

$s_{ML(x-1)}$  [mg] směrodatná odchylka hmotnostního úbytku předchozího cyklu

Poté se vypočte směrodatná odchylka pro průměrný hmotnostní úbytek ( $s_{\overline{ML}}$ ) za pomoci rovnice:

$$s_{\overline{ML}} = \frac{1}{3} \sqrt{s_{ML1}^2 + s_{ML2}^2 + s_{ML3}^2} \quad [\text{mg}] \quad (4)$$

Kde:  $s_{ML 1,2,3}$  [mg] směrodatná odchylka pro jednotlivé hmotnostní úbytky

Tímto způsobem lze získat všechny vypočtené hodnoty viditelné v Tabulka 9.

*Tabulka 9 – Průměrný hmotnostní úbytek po jednotlivých krocích abrazivního opotřebení*

Průměrný hmotnostní úbytek $\overline{ML}$ [mg]							
230099-2_1		230099-2_2		230099-2_3		$\overline{ML}$ [mg]	$s_{\overline{ML}}$ [mg]
$ML_1$ [mg]	$s_{ML1}$ [mg]	$ML_2$ [mg]	$s_{ML2}$ [mg]	$ML_3$ [mg]	$s_{ML3}$ [mg]		
57,333	0,471	55,667	0,471	57,667	0,471	56,889	0,27
62,667	0,471	63,000	0,943	63,667	0,667	63,111	0,42
61,000	0,471	61,000	0,943	62,000	0,816	61,333	0,44
59,667	0,667	59,333	1,054	59,667	0,816	59,556	0,50
57,000	0,816	59,333	1,155	58,333	0,943	58,222	0,57
56,667	0,943	57,000	1,491	57,667	0,943	57,111	0,67

Po získání průměrného hmotnostního úbytku ( $\overline{ML}$ ) se vypočte průměrný kumulativní hmotnostní úbytek ( $\overline{CML}$ ), který se získá pomocí vztahu:

$$\overline{CML} = \overline{CML}_{(x-1)} + \overline{ML} \quad [\text{mg}] \quad (5)$$

Kde:  $\overline{CML}_{(x-1)}$  [mg] průměrný kumulativní hmotnostní úbytek předchozího cyklu

$\overline{ML}$  [mg] průměrný hmotnostní úbytek daného cyklu

Následně se dopočte směrodatná odchylka pro průměrný kumulativní hmotnostní úbytek ( $s_{\overline{CML}}$ ), a to za pomoci rovnice:

$$s_{\overline{CML}} = \sqrt{s_{\overline{ML}}^2 + s_{\overline{CML}_{(x-1)}}^2} \quad [\text{mg}] \quad (6)$$

Kde:  $s_{\overline{ML}}$  [mg] směrodatná odchylka průměrného hmotnostního úbytku v daném cyklu

$s_{\overline{CML}_{(x-1)}}$  [mg] směrodatná odchylka průměrného kumulativního hmotnostního úbytku předchozího cyklu

Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v Tabulka 10.

Tabulka 10 – Průměrný kumulativní hmotnostní úbytek po jednotlivých krocích abrazivního opotřebení

Průměrný kumulativní hmotnostní úbytek $\overline{CML}$ [mg]		
Číslo cyklu	$\overline{CML}$ [mg]	$S_{\overline{CML}}$ [mg]
1	63,111	0,416
2	124,444	0,609
3	184,000	0,786
4	242,222	0,969
5	299,333	1,176

Na závěr se vypočte průměrný kumulativní objemový úbytek ( $\overline{CVL}$ ), který se získá pomocí rovnice:

$$\overline{CVL} = \frac{\overline{CML}}{\rho} \quad [\text{mm}^3] \quad (7)$$

Kde:  $\overline{CML}$  [mg] průměrný kumulativní objemový úbytek daného cyklu  
 $\rho$  [g.cm<sup>-3</sup>] měrná hmotnost nástřiku

Měrná hmotnost nástřiku neboli hustota, se stanovuje na základě Archimedova zákona, kdy se provádí vážení měřeného předmětu na vzduchu a následně v kapalině o známé hustotě, etylalkoholu. Pro měření byla použita stejná výše zmíněná váha, jelikož disponuje i funkcí měření hustoty. Před měřením bylo potřeba vzorky očistit. Nejprve se naplnila kádinka etylalkoholem a změřila se jeho teplota. Z té se následně stanovila jeho hustota. Následně se kádinka s etylalkoholem zvažila. Dále se zvažil malý vzorek nástřiku na vzduchu a ponořený do kádinky s roztokem. Po naměření hmotností váha automaticky stanovila hustotu nástřiku. Celý proces bylo nutno pro jednotlivé vzorky opakovat třikrát a výslednou hustotu nástřiku stanovit jako aritmetický průměr naměřených hodnot.

Směrodatná odchylka pro průměrný kumulativní objemový úbytek ( $S_{\overline{CVL}}$ ) se vypočítá pomocí rovnice:

$$S_{\overline{CVL}} = \frac{S_{\overline{CML}}}{\rho} \quad [\text{mm}^3] \quad (8)$$

Kde:  $S_{\overline{CML}}$  [mg] směrodatná odchylka průměrného kumulativního hmotnostního úbytku v daném cyklu  
 $\rho$  [g.cm<sup>-3</sup>] měrná hmotnost nástřiku

Výsledné hodnoty průměrného kumulativního objemového úbytku ( $\overline{CVL}$ ) a směrodatné odchylky průměrného kumulativního hmotnostního úbytku ( $S_{\overline{CVL}}$ ) vidíme v Tabulka 11.

Tabulka 11 – Průměrný kumulativní objemový úbytek po jednotlivých krocích abrazivního opotřebení

Průměrný kumulativní objemový úbytek $\overline{CVL}$ [mm <sup>3</sup> ]		
Číslo cyklu	$\overline{CVL}$ [mm <sup>3</sup> ]	$S_{\overline{CVL}}$ [mm <sup>3</sup> ]
1	8,050	0,053
2	15,873	0,078
3	23,469	0,100
4	30,896	0,124
5	38,180	0,150

Stejný postup výpočtů aplikujeme i pro naměřené hmotnosti ostatních vzorků, aby se získaly jejich průměrné kumulativní objemové úbytky  $\overline{CVL}$ , které následně porovnáme.

Hodnota abrazivního opotřebení byla také vyhodnocena pro základní materiál pastorku, aby mohlo dojít k porovnání s otěruvzdorností nového nástřiku.

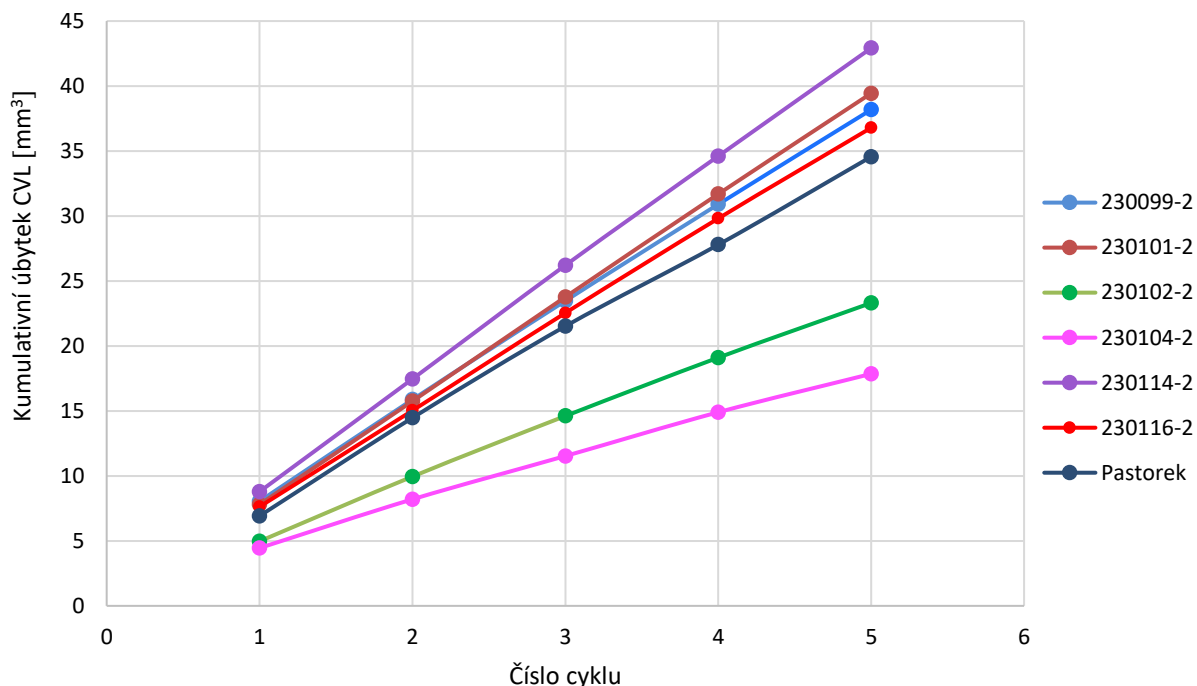
#### 4.6.2 Vyhodnocení abrazivního opotřebení

V Tabulka 12 vidíme výsledné hodnoty kumulativních objemových úbytků ( $\overline{CVL}$ ) pro všechny vybrané vzorky s nástřiky a pro základní materiál pastorku.

Tabulka 12 - Výsledky průměrných kumulativních objemových úbytků

Průměrné kumulativní objemové úbytky $\overline{CVL}$ [mm <sup>3</sup> ]						
Materiál	Číslo vzorku	cyklus 1	cyklus 2	cyklus 3	cyklus 4	cyklus 5
AISI 316L	230099-2	8,05	15,87	23,47	30,90	38,18
	230101-2	7,80	15,75	23,77	31,69	39,44
Diamalloy 1003	230114-2	8,79	17,46	26,21	34,61	42,92
	230116-2	7,63	15,03	22,54	29,81	36,79
Inconel 625	230102-2	4,97	9,95	14,61	19,10	23,31
	230104-2	4,45	8,20	11,63	14,90	17,85
Pastorek	-	6,92	14,47	21,52	27,79	34,56

## Porovnání kumulativních objemových úbytků CVL



Graf 2 - Porovnání průměrných kumulativních objemových úbytků

Z Graf 2 je patrné, že všechny vzorky, kromě vzorků 230102-2 a 230104-2, mají po abrazi větší úbytek materiálu než základní materiál pastorku.

Nejlépe si na tom tedy v porovnání s ostatními materiály stojí materiál Inconel 625, který je v zastoupení vzorků 230102-2 a 230104-2 a jako jediný má menší kumulativní objemový úbytek než základní materiál pastorku. Z Graf 2 lze vyčíst, že největší otěruvzdornost má vzorek 230104-2. Tento vzorek má nástřik z materiálu Inconel 625 a kombinaci měnících se parametrů - teplota procesního plynu 1000 °C, tlak procesního plynu 50 barů, rychlost posuvu 500 mm.s<sup>-1</sup>.

Obstojných výsledků dosáhly ale i zbylé materiály - materiál Diamalloy 1003, v zastoupení vzorků 230114-2 a 230116-2 a materiál AISI 316L, v zastoupení vzorků 230099-2 a 230101-2.

Nejblíže křivce úbytku základního materiálu pastorku je vzorek 230116-2, s přidavným materiálem Diamalloy 1003 a kombinací měnících se parametrů nástřiku - teplota procesního plynu 800 °C, tlak procesního plynu 45 barů, rychlost posuvu 500 mm.s<sup>-1</sup>.

### 4.7 Hodnocení mikrotvrdosti nástřiku dle Vickerse

Dále byla na vybraných vzorcích (označených zeleným podbarvením v Tabulka 7) měřena a hodnocena mikrotvrdost nástřiku dle Vickerse. Tato zkouška je předepsána normou ČSN EN 6507-1 a spočívá ve vtlačování indentoru tvaru rovnostranného jehlanu s vrcholovým

úhlem 136° do měřeného materiálu. Následně je měřena úhlopříčka vtisku, která v měřeném materiálu po odlehčení zkušebního tělesa zůstane.

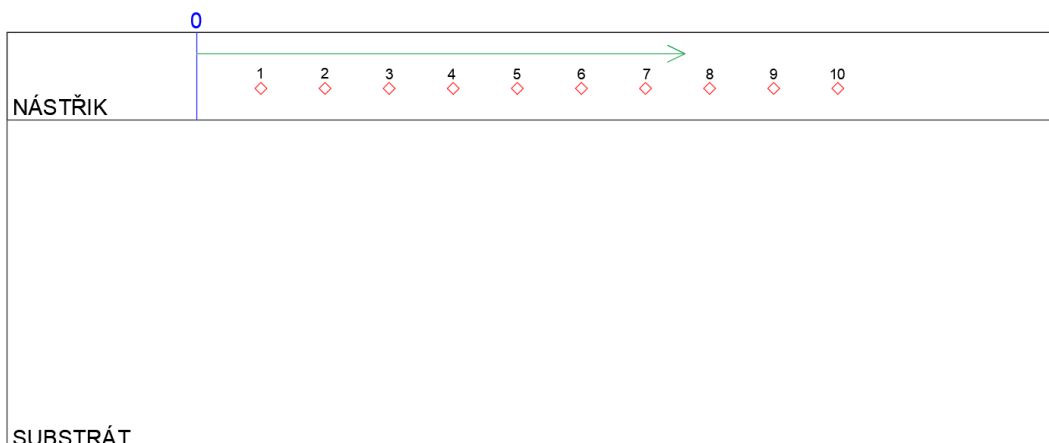
V závislosti na použitém zatěžování indentoru, která je udávána v kilogramech, se měří tvrdost, mikrotvrdosti či nanotvrdost. Tvrdost se měří, když je zatížení indentoru vyšší než 5 kilogramů, mikrotvrdost pak od 5 do 0,2 kilogramů a nanotvrdost od 0,2 do 0,01 kilogramů.

#### 4.7.1 Postup hodnocení mikrotvrdosti nástřiku dle Vickerse

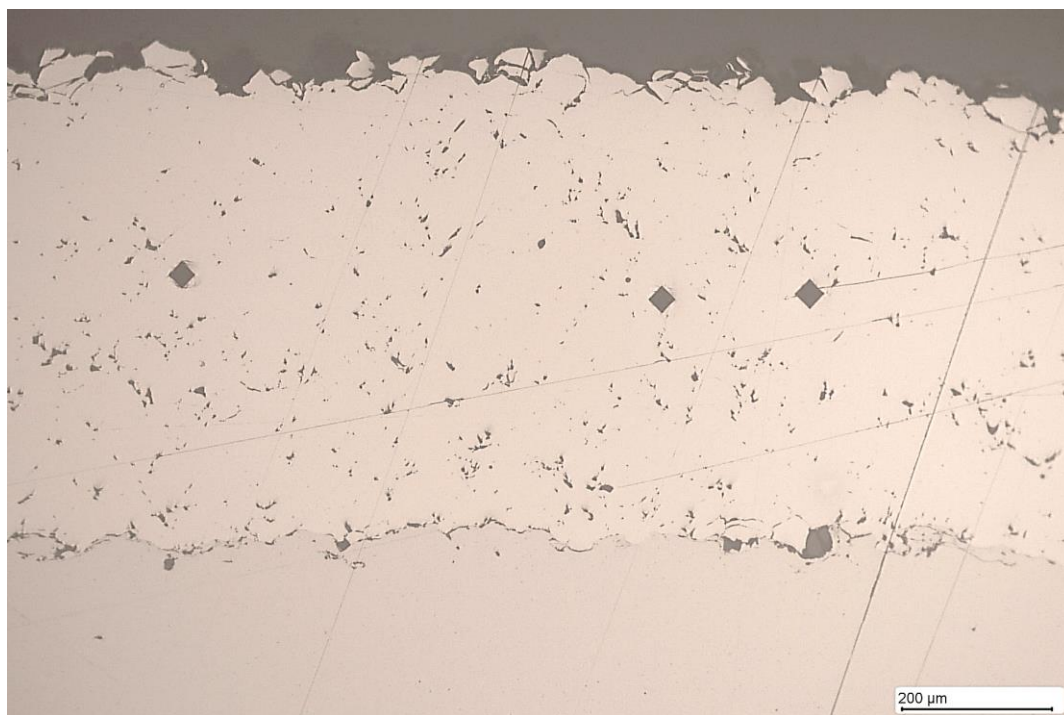
Měření mikrotvrdosti nástřiku dle Vickerse se provádělo na metalografických výbrusech, použitých při pozorování mikroskopem. Měření probíhalo na mikrotvrdoměru LECO LM110AT (AMH55) (viz Obrázek 50). Tento přístroj má snadné uživatelské rozhraní, stačí jen navolit nulovou rovinu (na Obrázek 51 modrá přímka s nulou) a směr vtisků (na Obrázek 51 zelená šipka) a celou zkoušku provede a vyhodnotí bez zásahu operátora. Použité zatížení indentoru bylo zvoleno 0,3 kg a počet vtisků 10. Detail provedeného vtisku indentoru lze vidět na Obrázek 52 a Obrázek 53.



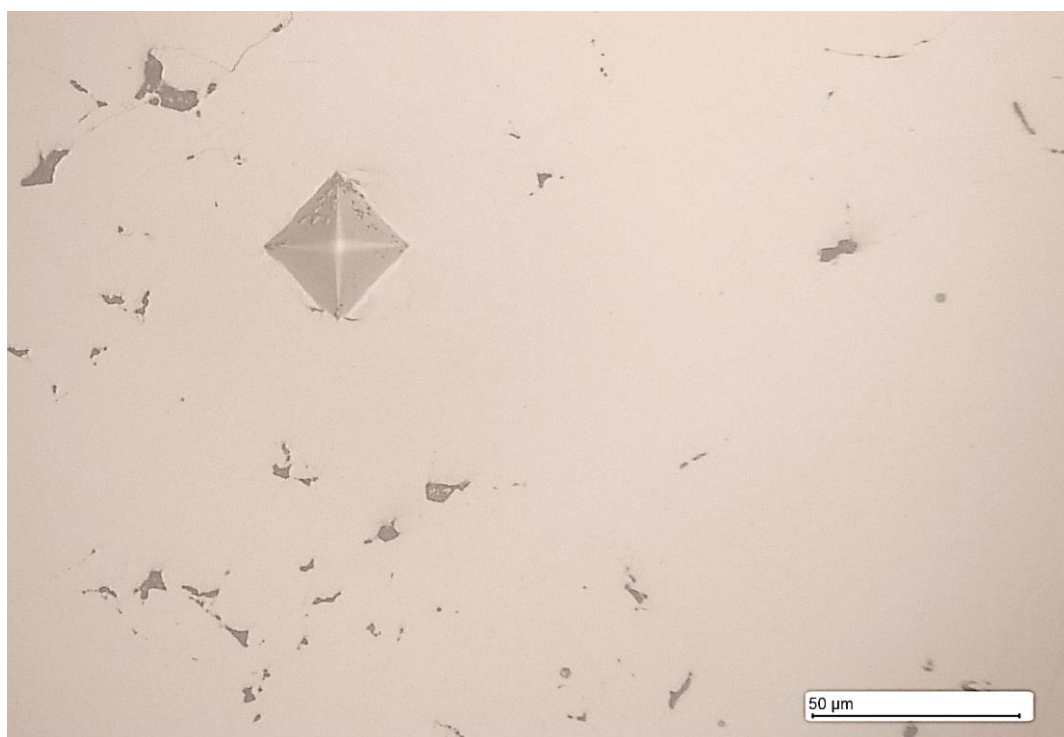
Obrázek 50 – Mikrotvrdoměr LECO LM110AT (AMH55) [26]



Obrázek 51 - Schéma měření zkoušky mikrotvrdosti nástřiků dle Vickerse



Obrázek 52 - Vtisky indentoru v nástřiku



Obrázek 53 - Detail vtisku indentoru v nástřiku



Příklad naměřených hodnot mikrotvrdomosti dle Vickerse nástřiku vzorku 230099-2 vidíme v Tabulka 13. Z naměřených hodnot tvrdostí se vypočte výsledný aritmetický průměr.

Tabulka 13 - Naměřené hodnoty mikrotvrdomosti nástřiku vzorku 230099-2

Vtisk	Vzdálenost [mm]	Tvrdomost HV 0,3
1	0,0958	390
2	0,9969	361
3	1,8997	387
4	2,8147	378
5	3,7054	372
6	4,5863	384
7	5,4818	384
8	6,4096	379
9	7,3051	398
10	8,1985	402
	<b>Průměr</b>	<b>384</b>

#### 4.7.2 Vyhodnocení mikrotvrdomosti nástřiku dle Vickerse

Z naměřených hodnot mikrotvrdomosti dle Vickerse bylo dále nutné vypočítat směrodatnou odchylku ( $s_{HV0,3}$ ) dle vzorce:

$$s_{HV0,3} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (HV0,3_i - \overline{HV0,3})^2}{n}} \quad (9)$$

Kde:  $n$  počet měření

$HV0,3_i$  jednotlivé naměřené mikrotvrdomosti

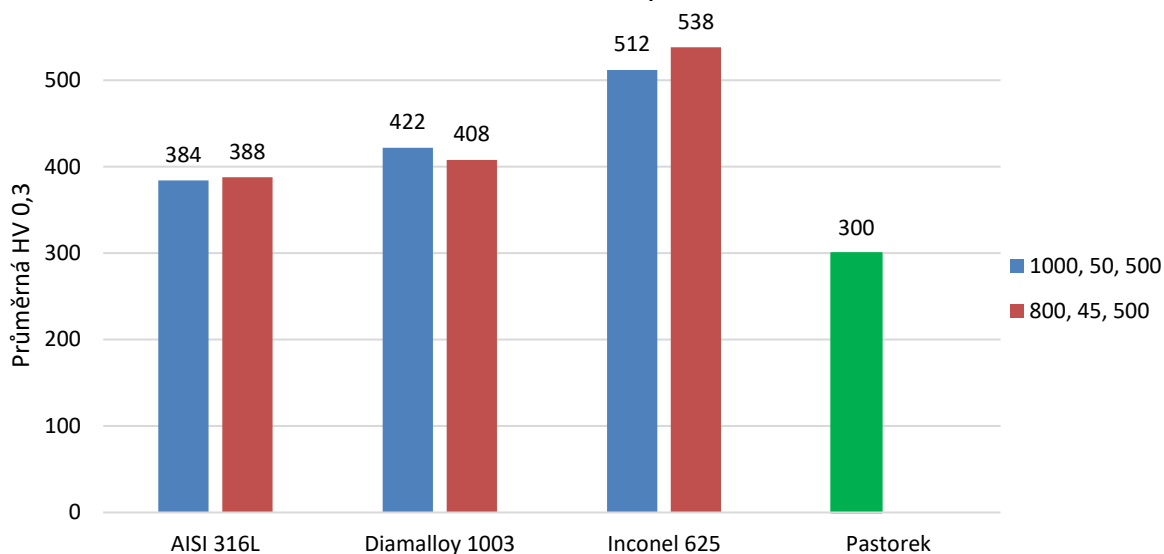
$\overline{HV0,3}$  průměrná mikrotvrdomost

Výsledné hodnoty průměrné mikrotvrdomosti dle Vickerse nástřiků i s jejich směrodatnými odchylkami vidíme v Tabulka 14.

Tabulka 14 - Naměřené průměrné mikrotvrdomosti nástřiků dle Vickerse v porovnání s tvrdostí materiálu pastorku

Materiál	Číslo vzorku	$\overline{HV0,3}$	$s_{HV0,3}$
AISI 316L	230099-2	384	11,3
	230101-2	388	11,4
Diamalloy 1003	230114-2	422	10,3
	230116-2	408	10,3
Inconel 625	230102-2	512	25,7
	230104-2	538	29,1

### Srovnání naměřených průměrných HV 0,3 s požadovanou hodnotou tvrdosti pastorku



Graf 3 - Srovnání naměřených průměrných hodnot mikrotvrdosti nástřiků dle Vickerse s požadovanou hodnotou tvrdosti pastorku

Značení jednotlivých sloupců v Graf 3 (např. 1000, 50, 500) opět vypovídá o měnící se parametrech nástřiku. První údaj, 800 či 1000, popisuje teplotu procesního plynu v °C. Druhý údaj, 45 či 50, popisuje tlak procesního plynu v barech. Třetí poslední údaj, 300 či 500, popisuje rychlost posuvu v  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Z Graf 3 je patrné, že všechny nástřiky překonaly požadovanou tvrdost povrchu pastorku dle výrobního výkresu. Dále lze z grafu vyčíst, že parametry nástřiku nemají na tvrdost nástřiku zásadní vliv.

Největší tvrdost (538 HV 0,3 a 512 HV 0,3) mají vzorky s nástřikem materiálu Inconel 625. Na druhém místě se umístily, z hlediska tvrdosti, vzorky materiálu Diamalloy 1003, a těsně za ním vzorky materiálu AISI 316L.

#### 4.8 Vyhodnocení výsledků zkoušek – výběr přídatného materiálu a parametrů nástřiku

Ze zkoušek uvedených v předchozích kapitolách bylo vyhodnoceno, že by se na renovovanou součást nanasla nástřik materiálu Diamalloy 1003, v zastoupení vzorku 230116-2, s kombinací parametrů nástřiku – teplota procesního plynu 800 °C, tlak procesního plynu 45 barů a rychlost posuvu 500  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Materiál Inconel 625 sice dosáhl mnohem lepších výsledků z hlediska otěruvzdornosti a mikrotvrdosti, ale účelem práce nebylo povrch pastorku vylepšit, pouze renovovat na podobné vlastnosti, jako by měl pastorek vyrobený ze základního materiálu daného

výrobním výkresem. Při přílišné otěruvzdornosti a tvrdosti by navíc mohlo dojít k vydírání ložiska či těsnícího kroužku. Dalším důvodem je ekonomičnost - prášek materiálu Inconel 625 je mnohem dražší, než prášek materiálu Diamalloy 1003.

#### 4.9 Technologický postup renovace pastorku

Jak je již výše v práci zmíněno, z důvodu vysoké hmotnosti a velkých délkových rozměrů pastorku, nebylo možné v tuto chvíli ve Výzkumném a zkušebním ústavu v Plzni součást upnout a roztočit na požadovanou obvodovou rychlost, proto byla renovace simulována na čepu o stejném základním materiálu a průměru.

Postup renovace by byl takový, že by byl nejprve na renovované ploše pastorku obroben starý povrch. Tento krok na čepu nebyl neproveden, jelikož se nejednalo o opotřebením poškozenou plochu.

Před nanesením nástřiku bylo potřeba plochu předupravit zdrsněním povrchu pomocí tryskání na předepsanou drsnost povrchu  $Ra = 6 \pm 1 \mu\text{m}$ . Následně proběhlo důkladné očištění abraziva stlačeným vzduchem. Tryskání bylo provedeno těsně před nanesením nástřiku. Otryskaný čep byl následně upnut do sklíčidla (viz Obrázek 54).



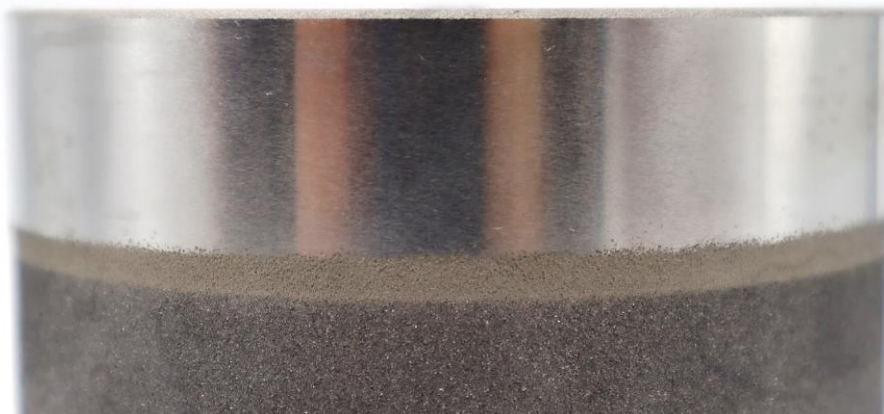
Obrázek 54 - Upnutý otryskaný čep

V dalším kroku byl nanesen nástřik technologií Cold Spray s přídatným materiálem Diamalloy 1003 s kombinací měnících se parametrů nástřiku - teplota procesního plynu 800 °C, tlak procesního plynu 45 barů a rychlost posuvu 500 mm.s<sup>-1</sup>. Zvolená rychlost posuvu pistole vůči vzorku byla přepočtena na obvodovou rychlost čepu. Čep s již naneseným nástřikem lze vidět na Obrázek 55.



*Obrázek 55 - Čep s naneseným nástřikem*

Po nanesení byl povrch nástřiku obroben a obroušen na rozměr a drsnost předepsanou výrobním výkresem pastorku. Obroušenou plochu lze vidět na Obrázek 56. Obrobením této plochy byla současně provedena zatěžkávací zkouška přilnavosti nástřiku k substrátu. V případě, že se nástřik při obrobení neodloupne či jinak nepoškodí se prokáže, že je vyhovující a na substrátu pevně drží. Provedený nástřik na čepu se po obrobení neodloupnul, takže touto zkouškou bez problémů prošel.



*Obrázek 56 - Obroušený nástřik na čepu*

## 5 Závěr

Cílem diplomové práce byla renovace vybrané strojní součásti. K renovaci byl poskytnut firmou PRODECO, a.s. vstupní pastorek. K renovaci byla vybrána technologie Cold Spray. Z důvodu vysoké hmotnosti a délky pastorku nebylo zatím technologicky možné pastorek k zařízení upnout a roztočit, proto byla renovace simulována na čepu o stejném základním materiálu a průměru jako pastorek. Pastorek i tak bude v brzké době renovován pomocí technologie a parametrů, které byly odzkoušeny a jsou obsahem této práce.

Jak bylo popsáno výše, v rámci experimentální části diplomové práce byl, před vlastním nanesením nástřiku, vybrán vhodný přídavný materiál a byly optimalizovány aplikační parametry nástřiku. Toho bylo dosaženo pomocí zkoušek vzorků s nanesenými nástřiky s různými přídavnými materiály a rozdílnými parametry. Tyto vzorky byly zanalyzovány a byly vyhodnoceny jejich klíčové vlastnosti jako je pórovitost, otěruvzdornost a mikrotvrdomost aplikované vrstvy. Při vyhodnocení a volbě přídavného materiálu bylo přihlédnuto i k finančním nákladům renovačního procesu.

Optimálních výsledků bylo dosaženo materiálem Diamalloy 1003 při použití parametrů nástřiku: teplota procesního plynu 800 °C, tlak procesního plynu 45 barů a rychlost posuvu 500 mm.s<sup>-1</sup>.

Tento materiál, se zmíněnými parametry nástřiku, byl následně nanesen na plochu čepu. Po nanesení nástřiku bylo provedeno obrobení a obroušení povrchu, což mimo jiné plní funkci zkoušky přilnavosti nástřiku k substrátu. Po obrobení nejevila obrobená plocha čepu žádné známky odlupování, z čehož lze usoudit, že byl experiment úspěšný a v budoucnu je možno funkční plochy tímto způsobem renovovat.

Informace obsažené v teoretické i experimentální části této diplomové práce mohou nalézt uplatnění v praxi a do určité míry pomoci technickému personálu s orientací v problematice žárových nástřiků. Dále mohou posloužit jako vodítko při výběru konkrétní technologie a přídavného materiálu pro renovace strojních součástí žárovými nástřiky.



## 6 Bibliografie

- [1] POŠTA, J., J. HAVLÍČEK a M. ČERNOVOL. *Renovace strojních součástí: [vědecká monografie]*. 2. vyd. Praha: SVÚM, 1998. ISBN 80-902-0156-3.
- [2] POŠTA, J., M. DVOŘÁK a P. VESELÝ. *Degradace strojních součástí: monografie*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, Technická fakulta, 2002. ISBN 80-213-0967-9.
- [3] ČSN 01 5050. *Opotřebením materiálu: Názvosloví*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1969.
- [4] FAMFULÍK, J. a J. MÍKOVÁ. *Teorie údržby* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008 [cit. 2023-01-05]. ISBN 978-80-248-1509-1. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/TU/TU/>
- [5] Introduction to Cavitation. In: *The Process Piping: a technical knowledge base for all the process piping professionals around the world...* [online]. [cit. 2023-06-21]. Dostupné z: <https://www.theprocesspiping.com/introduction-to-cavitation/>
- [6] ČERNÝ, M. *Korozní vlastnosti kovových konstrukčních materiálů*. Vydavatelství SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1984, 264 s. DT 620.193:669.018.
- [7] *Koroze* [online]. SPŠ Ostrava - Zengrova, 2020 [cit. 2023-01-08].
- [8] BARTONÍČEK, R. *Koroze a protikorozi ochrana kovů*. 1. vyd. Praha: Academia, 1966, 720 s.
- [9] VOJTĚCH, D. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0600-1.
- [10] *Mechanické vlastnosti a charakteristiky materiálů II: Podklady pro výuku - letní semestr: Úvod do materiálových věd a inženýrství (BUM)* [online]. [cit. 2023-01-12]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/index.php/cs/studium/podkladypro-vyuku-letni-semestr>
- [11] STEPHAN, S. a A. CHRISTOPH. 100 years of thermal spray: About the inventor Max Ulrich Schoop. *Surface and Coatings Technology*. 2013, (220), 13 s. ISSN 0257-8972. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.10.034>
- [12] PASANDIDEH-FARD, M., V. PERSHIN, S. CHANDRA a J. MOSTAGHIMI. Splat Shapes in a Thermal Spray Coating Process: Simulations and Experiments. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2002, **11**(206–217). Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1361/105996302770348862>
- [13] MUŠÁLEK, R. *Inženýrské výzvy v oblasti žárového stříkání*. 2011. Dostupné také z: <https://docplayer.cz/8914307-Inzenyrske-vyzvy-v-oblasti-zaroveho-strikan.html>
- [14] TUCKER, R., C. COTTEL a J. SPRAGUE. *ASM handbook: Volume 5A: Thermal Spray Technology*. Materials Park: ASM International, 2013, 412 s. ISBN 978-1-61503-996-8.
- [15] DAVIS, J.R. *Handbook of thermal spray technology*. ASM international, 2004.

- [16] VUORISTO, P. Thermal Spray Coating Processes. *Comprehensive Materials Processing*. Elsevier, 2014, **4**, 229-276. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-096532-1.00407-6
- [17] THERMAL SPRAYED COATINGS. In: *Ador Fontech Ltd* [online]. 2023 [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://www2.adorfon.com/products-and-services/thermal-spray-products-services/thermal-sprayed-coatings/>
- [18] WANK, A. Basics of thermal spray technology i processes. *GTV Verschleiss-Schutz GmbH*. 2006.
- [19] VUORISTO, P., J. TUOMINEN a J. NURMINEN. *Laser coating and thermal spraying - process basics and coating properties*. 2005.
- [20] VILAR, R. Laser cladding. In: *Journal of Laser Applications* [online]. Vol. 11. 1999, , s. 64-79 [cit. 2023-06-24]. ISSN 1042-346X. Dostupné z: doi:10.2351/1.521888
- [21] SINGH, H., T.S. SIDHU a S.B.S. KALSI. Cold spray technology: future of coating deposition processes. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2012, **6(22)**, 69-84. ISSN 19718993. Dostupné z: doi:10.3221/IGF-ESIS.22.08
- [22] IRISSOU, E., J.-G. LEGOUX, A. RYABININ, B. JODOIN a Ch. MOREAU. Review on Cold Spray Process and Technology: Part I—Intellectual Property. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2008, **17(4)**, 495-516 [cit. 2023-07-06]. ISSN 1059-9630. Dostupné z: doi:10.1007/s11666-008-9203-3
- [23] ASSADI, H., H. KREYE, F. GÄRTNER a T. KLASSEN. Cold spraying – A materials perspective. *Acta Materialia* [online]. 2016, **116**, 382-407 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: doi:10.1016/j.actamat.2016.06.034
- [24] SCHMIDT, T., 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* [online]. 2009, **18(5-6)** [cit. 2023-07-06]. ISSN 1059-9630. Dostupné z: doi:10.1007/s11666-009-9357-7
- [25] ASHOKKUMAR, M., D. THIRUMALAIKUMARASAMY, T. SONAR, S. DEEPAK, P. VIGNESH a M. ANBARASU. An overview of cold spray coating in additive manufacturing, component repairing and other engineering applications. In: *Journal of the Mechanical Behavior of Materials* [online]. Vol. 31. 2022, , s. 514-534 [cit. 2023-06-24]. ISSN 2191-0243. Dostupné z: doi:10.1515/jmbm-2022-0056
- [26] AMH55: Automatický systém měření tvrdosti. In: *LECO: Empowering Results* [online]. 2022 [cit. 2023-07-07]. Dostupné z: <https://cz.leco.com/product/amh55-hardness-testing-systems>



## 7 Seznam symbolů a zkratek

MAAP	Methyl-acetylen-propadien
HVOF	High-velocity, oxy-fuel
a.s.	akciová společnost
m	metry
mm	milimetry
$\mu\text{m}$	mikrometry
$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	metry za sekundu
$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	milimetry za sekundu
$\text{mm}^3$	metry krychlové
$\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$	metry krychlové za hodinu
$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	gram na centimetr krychlový
$\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$	otáčky na minutu
kg	kilogram
g	gram
mg	miligram
N	newton
%	procento
hm. %	hmotnostní procento
$^{\circ}\text{C}$	stupeň Celsia
$^{\circ}$	stupeň
kW	kilowatty
bar	bar
Ra	aritmetická odchylka profilu
HB	tvrdost dle Brinella
HV	tvrdost dle Vickerse
HRC	tvrdost dle Rockwella diamantovým kuželem
m [g]	hmotnost
ML [g]	hmotnostní úbytek
CML [g]	kumulativní hmotnostní úbytek
CVL [g]	kumulativní objemový úbytek
Fe	železo
Cr	chrom
Ni	nikl
Mo	molybden
Mn	mangan
Si	křemík
P	fosfor
C	chrom
S	síra
Nb	niob
Al	hliník
Ti	titan
$\text{Al}_2\text{O}_3$	oxid hlinitý

## 8 Zdroje obrázků

- [27] Obrázek adhezivně opotřebeného čepu, staženo dne 05.01.2023, dostupné na webu: <https://degradace.tf.czu.cz/AA/AA095c2.jpg>
- [28] Obrázek abrazivně opotřebeného pístu, staženo dne 05.01.2023, dostupné na webu: <https://degradace.tf.czu.cz/AB/AB011c2.jpg>
- [29] Obrázek erozivně opotřebeného uzávěru ventilu, staženo dne 05.01.2023, dostupné na webu: <https://degradace.tf.czu.cz/AE/AE003c3.jpg>
- [30] Obrázek Kavitačně opotřebeného lopatkového kola, staženo dne 05.01.2023, dostupné na webu: <https://degradace.tf.czu.cz/AK/AK002c1.jpg>
- [31] Obrázek únavového opotřebenění zubů pastorku, staženo dne 05.01.2023, dostupné na webu: <https://degradace.tf.czu.cz/AP/AP055c1.jpg>
- [32] Obrázek vibračně opotřebené drážkované hřídele, staženo dne 05.01.2023, dostupné na webu: <https://degradace.tf.czu.cz/AV/AV013d1.jpg>
- [33] Obrázek schéma laserové metody nanášení, staženo dne 20.03.2023, dostupné na webu: <https://www.metallisation.com/wp-content/uploads/2019/09/07-BLUE-Laser-Illustration.jpg.webp>
- [34] Obrázek konvergentně-divergentního tvaru de Lavalovy trysky, staženo dne 28.03.2023, dostupné na webu: [https://media.springernature.com/lw685/springer-static/image/chp%3A10.1007%2F978-3-030-70672-2\\_6/MediaObjects/118195\\_2\\_En\\_6\\_Fig12\\_HTML.png](https://media.springernature.com/lw685/springer-static/image/chp%3A10.1007%2F978-3-030-70672-2_6/MediaObjects/118195_2_En_6_Fig12_HTML.png)

## 9 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Schématické znázornění adhezivního opotřebení [2] .....	10
Obrázek 2 – Adhezivně opotřebený čep [27] .....	11
Obrázek 3 - Schématické znázornění abrazivního opotřebení [2].....	11
Obrázek 4 - Abrazivně opotřebený píst [28].....	12
Obrázek 5 - Schématické znázornění erozivního opotřebení [2].....	12
Obrázek 6 - Erozivně opotřebený uzávěr ventilu [29] .....	13
Obrázek 7 - Schématické znázornění kavitačního opotřebení [4] .....	13
Obrázek 8 –Schématické znázornění imploze kavitační bubliny [5].....	14
Obrázek 9 - Kavitačně opotřebené lopátkové kolo [30] .....	14
Obrázek 10 - Schématické znázornění únavového opotřebení [2] .....	14
Obrázek 11 - Únavové opotřebení zubů pastorku [31] .....	15
Obrázek 12 - Schématické znázornění vibračního opotřebení [2] .....	15
Obrázek 13 - Vibračně opotřebená drážkovaná hřídel [32] .....	16
Obrázek 14 - Schématické znázornění únavových lomových ploch [2].....	19
Obrázek 15 – Únavový lom [10] .....	20
Obrázek 16 – Dopad částice na povrch a tvorba splatu [12] .....	22
Obrázek 17 - Charakteristická struktura nástřiků [13] .....	22
Obrázek 18 – Schéma žárové metody nanášení prášku plamenem [17] .....	23
Obrázek 19 – Schéma žárové metody nanášení drátu plamenem [17] .....	23
Obrázek 20 - Schéma žárové metody nanášení detonační pistolí DGS [18].....	24
Obrázek 21 - Schéma žárové metody nanášení elektrickým obloukem [17] .....	25
Obrázek 22 - Schéma žárové metody plazmového nanášení [17].....	25
Obrázek 23 - Schéma žárové metody nanášení vysokorychlostním nástřikem HVOF [17].....	26
Obrázek 24 - Schéma laserové metody nanášení [33] .....	26
Obrázek 25 - Schéma nanášení technologií Cold Spray [23] .....	27
Obrázek 26 - Závislost depoziční rychlosti na účinnosti depozice [21] .....	27
Obrázek 27 - Dopad částice přídavného materiálu na substrát v rychlostech 500 a 600 mm.s <sup>-1</sup> [23].....	28
Obrázek 28 - Konvergentně-divergentní tvar de Lavalovy trysky [34] .....	28
Obrázek 29 - Převodovka a pastorek.....	30
Obrázek 30 - Výkres uložení pastorku v převodovce s vyznačením plochy.....	31
Obrázek 31 - Detail renovované funkční plochy.....	32
Obrázek 32 - Detail tepelně ovlivněné oblasti v oblasti návaru .....	33
Obrázek 33 - Zkušební vzorek PO a PŘED zdrsňením .....	35
Obrázek 34 - Přenosný drsnoměr Mitutoyo Surftest SJ-210 .....	35
Obrázek 35 - Zkušební vzorky po nanesení nástřiků .....	37
Obrázek 36 – Zařízení Cold Spray .....	37
Obrázek 37 - Ovládací panel zařízení Cold Spray.....	38
Obrázek 38 - Podavač prášku .....	38
Obrázek 39 - Zásobárna dusíku .....	38
Obrázek 40 – Metalografická pila ATM Qcut 150 A .....	39
Obrázek 41 – Leštička ATM Saphir 250 .....	39
Obrázek 42 - Mikroskop Arsenal .....	40
Obrázek 43 - Metalografické snímky vzorku 230104-2 .....	40
Obrázek 44 - Snímek vzorku 230100-1, který je 50x zvětšený .....	43
Obrázek 45 - Snímky vybraných vzorků pro materiál AISI 316L .....	44

Obrázek 46 - Snímky vybraných vzorků pro materiál Diamalloy 1003 .....	45
Obrázek 47 - Snímky vybraných vzorků pro materiál Inconel 625 .....	46
Obrázek 48 - Zařízení k hodnocení otěruvzdornosti.....	47
Obrázek 49 - Váha Sartorius Quintix.....	48
Obrázek 50 – Mikrotvrdoměr LECO LM110AT (AMH55) [26].....	54
Obrázek 51 - Schéma měření zkoušky mikrotvrdosti nástřiků dle Vickerse.....	55
Obrázek 52 - Vtisky indentoru v nástřiku .....	55
Obrázek 53 - Detail vtisku indentoru v nástřiku .....	55
Obrázek 54 - Upnutý otryskaný čep .....	58
Obrázek 55 - Čep s naneseným nástřikem .....	59
Obrázek 56 - Obroušený nástřik na čepu .....	59

## 10 Seznam tabulek

Tabulka 1 – Parametry prášku AISI 316L .....	33
Tabulka 2 – Parametry prášku Diamalloy 1003 .....	34
Tabulka 3 – Parametry prášku Inconel 625 .....	34
Tabulka 4 - Parametry tryskání zkušebních vzorků .....	35
Tabulka 5 – Použité parametry nástřiku .....	36
Tabulka 6 - Značení zkušebních vzorků .....	36
Tabulka 7 - Vyhodnocení nástřiků vzorků .....	41
Tabulka 8 - Hmotnosti vzorků po jednotlivých fázích abrazivního opotřebení .....	48
Tabulka 9 – Průměrný hmotnostní úbytek po jednotlivých krocích abrazivního opotřebení .....	50
Tabulka 10 – Průměrný kumulativní hmotnostní úbytek po jednotlivých krocích abrazivního opotřebení .....	51
Tabulka 11 – Průměrný kumulativní objemový úbytek po jednotlivých krocích abrazivního opotřebení .....	52
Tabulka 12 - Výsledky průměrných kumulativních objemových úbytků .....	52
Tabulka 13 - Naměřené hodnoty mikrotvrdosti nástřiku vzorku 230099-2 .....	56
Tabulka 14 - Naměřené průměrné mikrotvrdosti nástřiků dle Vickerse v porovnání s tvrdostí materiálu pastorku .....	56

## 11 Seznam grafů

Graf 1 - Porovnání porozity nástřiků .....	43
Graf 2 - Porovnání průměrných kumulativních objemových úbytků .....	53
Graf 3 - Srovnání naměřených průměrných hodnot mikrotvrdosti nástřiků dle Vickerse s požadovanou hodnotou tvrdosti pastorku .....	57