



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## ŽÁROVÉ NÁSTŘIKY ELEKTRICKÝM OBLOUKEM

THERMAL SPRAY BY ELECTRIC ARC

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vojtěch Eliáš

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Kubíček

BRNO 2020

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Bc. Vojtěch Eliáš</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	<b>Ing. Jaroslav Kubíček</b>
Akademický rok:	2019/20

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

## **Žárové nástřiky elektrickým obloukem**

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

Protikorozní ochrana žárovým nástřikem zinkovou slitinou je velmi častá aplikace pro metodu obloukového stříkání. Úkolem práce je realizace zkoušky dle ISO 14918 pro obloukový žárový nástřik povlaku slitiny Zinacor 850 na ocelovém profilu.

### **Cíle diplomové práce:**

1. Literární studie problematiky koroze a technologie žárových nástřiků.
2. Návrh experimentální práce.
3. Provedení žárového nástřiku a destruktivních zkoušek.
4. Vyhodnocení výsledků.

### **Seznam doporučené literatury:**

COTELL.M.Catherine a kolektiv autorů. ASM Handbook Surface Engineering Volume 5, 2011 vyd. Materials Park, Ohio, 1994, ISBN 978-0-87170-384-2.

AMBROŽ, Oldřich. a Jiří, KAŠPAR. Žárové nástřiky a jejich průmyslové využití. 1. vyd. Praha: SNTL, 1990, 318 s. ISBN 80-030-0347-4.

MOHYLA, Miroslav. Technologie povrchových úprav kovů. 3vyd. Ostrava: Ediční středisko VŠB Ostrava. 2006. 156s. ISBN 80-248-1217-7.

SEDLÁČEK, Václav. Povrchy a povlaky kovů. 1vyd. Praha: Ediční středisko ČVUT Praha. 1992. 176s. ISBN 80-01-00799-5.

PODJUKLOVÁ, Jitka. Speciální technologie povrchových úprav I. 1vyd. Ostrava: Ediční středisko VŠB Ostrava.1994. 76s. ISBN 80-7078-235-8.

Povrchová úprava - elektronický odborný časopis, IMPEA s.r.o.,  
<http://www.povrchovauprava.cz/free-pdf-magazine>.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

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

## **ABSTRAKT**

ELIÁŠ Vojtěch: Žárové nástřiky elektrickým obloukem

---

Tato diplomová práce se zabývá problematikou žárových nástřiků elektrickým obloukem. Nejprve je pomocí literární studie zpracována teoretická část, zabývající se korozí a technologií žárového nástřiku. Experimentální část obsahuje technologický postup a vyhodnocení čtyř žárově nástřikovaných vzorků. Jako povlak byl použit Zinacor 850 se složením 85% zinku a 15% hliníku. Vyhodnocení se skládá z měření tloušťky, přilnavosti, drsnosti a makrostrukturní analýzy povlaku. Dva vzorky vykazovaly neobvykle nízké přilnavosti, všechny vzorky měly navíc velkou kolísavost naměřených tloušťek. To potvrdila také analýza makrostruktury, z které byla u vzorku s nízkou přilnavostí shledána také vysoká pórovitost. Tyto vady mohou mít více příčin, avšak doporučením pro další praxi je zkrácení vzdálenosti nástřiku od základního materiálu.

Klíčová slova: žárový nástřik, elektrický oblouk, koroze, Zinacor 850

## **ABSTRACT**

ELIÁŠ Vojtěch: Thermal spray by electric arc

---

This thesis deals with the issue of thermal spraying by means of an electric arc. First of all, a theoretical part is processed using a literary study dealing with corrosion and thermal spraying technology. The experimental part contains a description of the technological procedure and evaluation of four thermally sprayed samples. Zinacor 850, consisting of 85% zinc and 15% aluminum, was used as a coating. The evaluation involves measurements of thickness, adhesion and roughness as well as the macro-structural analysis of the coating. Two samples showed unusually low adhesion, and all samples also had a large fluctuation of the measured thicknesses. This was also confirmed by the macro-structural analysis, which showed that the sample with low adhesion also had high porosity. These defects may have multiple causes, but the recommendation for further practice is to reduce the spraying distance from the base material.

Keywords: thermal spraying, electric arc, corrosion, Zinacor 850

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ELIÁŠ, Vojtěch. *Žárové nástřiky elektrickým obloukem* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125054>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaroslav Kubiček.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Žárové nástřiky elektrickým obloukem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 26.6.2020

.....  
Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu Ing. Jaroslavu Kubíčkoví za cenné připomínky, rady a pomoc při zpracování teoretické i praktické části práce. Poděkování patří také panu prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. a paní Ing. Petře Sliwkové Ph.D. za výpomoc při měření drsnosti. V neposlední řadě patří poděkování také rodině, která mě v období studia podporovala.

## Obsah

ZADÁNÍ

ABSTRAKT

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

PODĚKOVÁNÍ

ÚVOD .....	10
1 Rozbor součásti .....	11
1.1 Metody zinkování a jejich porovnání .....	11
1.2 Měření jakosti povlaku .....	12
2. Koroze .....	14
2.1 Rozdělení koroze .....	14
2.1.1 Rozdělení dle vnitřního mechanismu .....	15
2.1.2 Rozdělení dle druhu napadení .....	17
2.1.3 Rozdělení dle okolního prostředí .....	18
2.1.4 Rozdělení koroze dle vnějších vlivů .....	20
2.2 Způsoby protikoroze ochrany .....	21
2.2.1 Volba materiálu .....	22
2.2.2 Ochrana povlaky .....	23
2.2.3 Úprava korozního prostředí a korozní zkoušky .....	25
2.2.4 Konstrukční řešení protikoroze ochrany .....	26
2.2.5 Elektrochemická ochrana .....	27
3 Žárové nástřiky .....	29
3.1 Princip technologie nanášení žárových nástřiků .....	29
3.2 Struktura žárového nástřiku .....	30
3.3 Vlastnosti žárových nástřiků a jejich měření .....	31
3.4 Obecný technologický postup žárových nástřiků .....	33
3.5 Uvedení a srovnání metod žárových nástřiků .....	36
3.6 Technologie nástřiku elektrickým obloukem .....	38
4 Experimentální část .....	41
4.1 Technologický postup .....	41
4.1.1 Charakteristika přídavného materiálu .....	42
4.1.2 Příprava povrchu .....	43
4.1.3 Žárový nástřik .....	45



4.2 Měření jakosti povlaku.....	46
4.2.1 Měření tloušťky.....	46
4.2.2 Měření přilnavosti .....	48
4.2.3 Měření drsnosti.....	53
4.2.4 Vyhodnocení makrostrury povlaku.....	57
5 Závěry.....	61

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

## SEZNAM OBRÁZKŮ

## SEZNAM TABULEK

## SEZNAM PŘÍLOH

## ÚVOD [2], [3], [4], [5]

S ohledem na vysoké národohospodářské ztráty je boj proti korozi velice důležitým aspektem. Udává se, že v průmyslově vyspělých státech korozní ztráty dosahují 4 až 6 % hrubého domácího produktu. Nejedná se pouze o ztrátu kovu, koroze může narušovat také bezpečnost a funkci jednotlivých strojních zařízení. Pouze poznání mechanismů koroze vede k vývoji stále se rozvíjejících antikorozních metod. Ty spočívají ve volbě korozivzdorného materiálu, úpravě korozního prostředí, vhodném konstrukčním řešení, elektrochemické ochraně a především vhodné povrchové úpravě.

Často využívaným způsobem protikorozní povrchové úpravy je nanášení povlaků pomocí technologie žárového nástřiku. Mezi tyto metody spadají také nástřiky, jejichž protikorozní účinek je založen na principu elektrochemické funkce. Typickým představitelem jsou povlaky s označením Zinacor 850 s chemickým složením o 85% zinku a 15% hliníku, které se nanášejí metodou žárového nástřiku, kdy se přídavný materiál nataví pomocí energie elektrického oblouku. Užití tohoto povlaku bylo i tématem této diplomové práce, kdy se povlak dle stejného technologického postupu nanasel na čtyři rozměrově identické ocelové vzorky. Pro správnou funkci těchto povlaků je důležitá jejich jakost, charakterizovaná různými parametry. Zhodnocení daných vlastností je společně s technologickým postupem nástřiku součástí experimentální práce.



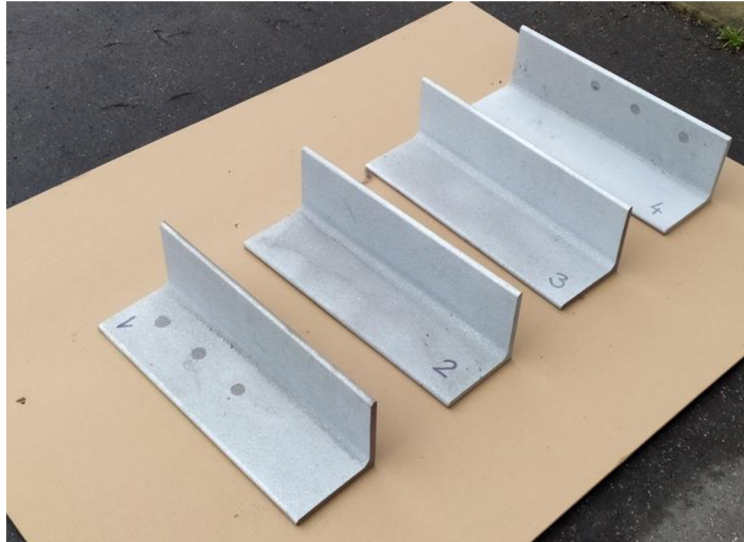
Obr. 1 Žárový nástřik elektrickým obloukem [6]



Obr. 2 Nanesení povlaku Zinacor 850 [3]

## 1 Rozbor součásti [5], [7], [8]

Zadaná součást byla v počtu čtyř kusů dodána externí firmou pro výzkum v rámci diplomové práce. Jedná se o L profil o příčných rozměrech 150x150x12 a délkou 150 mm z ocelového materiálu S245. Na tento materiál byl nanesen povlak slitiny ZINACOR 850, u které je složení dáno z 85% obsahem zinku a 15% hliníku. Zadaná tloušťka povlaku činila 250  $\mu\text{m}$ . Tento povlak má využití především z protikorozních důvodů. Podoba tohoto přídavného materiálu je pro aplikaci žárových nástřiků vždy ve formě drátu a jako metody metalizace této slitiny se využívá nástřiku plamenem a elektrickým obloukem. Při srovnání těchto metod se při obloukové metalizaci dosahuje vyšších hodnot přilnavosti a zároveň nižších hodnot porezity. Konkrétní vzorky byly povlakovány pomocí metody nástřiku elektrickým obloukem a všechny spadají pod identický technologický postup.



Obr. 3 Čtyři zkoumané metalizované vzorky

### 1.1 Metody zinkování a jejich porovnání [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]

Obecně se pro zinkové povlaky kromě žárových nástřiků (někdy nazýváno také metalizace) využívá více technologií, které mají své specifické vlastnosti a využití. *Žárové zinkování* je metalurgický proces, který spočívá v ponoru součásti v roztaveném zinku. Povlak není tvořen čistým zinkem, ale slitinovými fázemi železa a zinku, kdy směrem od základního materiálu klesá obsah železa. Takové povlaky mají tvrdost srovnatelnou s podkladovou ocelí. Ve srovnání se zinkovými povlaky nanesené nástřikem však nelze dosáhnout takových tloušťek vrstvy (uvádí se maximální hodnoty okolo 200  $\mu\text{m}$ ). Další výhodou nástřiku oproti žárovému zinkování je znatelná u rozměrnějších součásti, jelikož při ponoru mohou být součásti limitovány velikostí vany. To u žárově stříkaných součástí neplatí a jejich velikost tak v podstatě není limitována. Při metalizaci navíc nedochází k tak velkému tepelnému zatížení. Na druhou stranu, povlaky nanesené žárovým zinkováním jsou velice estetické a nevyžadují takovou zručnost pracovníka. To se projevuje zejména na špatně přístupných místech součásti, jako jsou rohy nebo hrany, kde je v případě žárového zinkování ponorem zajištěná souvislá vrstva povlaku a kde by byl v případě nástřiku špatný přístup.

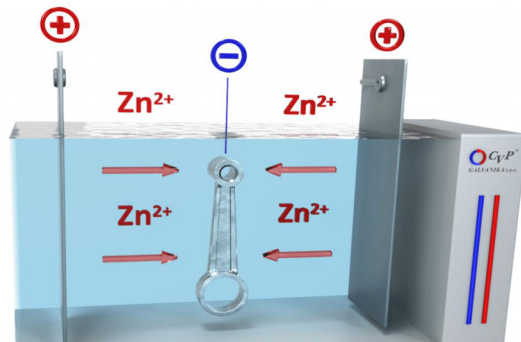
Další často využívanou technologií pro vytváření zinkových povlaků je tzv. *galvanické zinkování*. Jedná se o elektrolytický děj, při kterém se na ocelový materiál (který je v procesu katodou) rozpouští zinkový povlak (anoda). Tloušťka vrstvy je znatelně nižší než u žárového zinkování nebo u nástřiků, nejčastěji se pohybuje okolo 10  $\mu\text{m}$ . Povlaky tak nemají takovou odolnost a je tak vhodné je příliš nevystavovat vnějším vlivům. Uplatnění proto nacházejí zejména ve vnitřních prostorech. Jejich výhodou je však příznivá cena. Často se spojují ještě s fosfátováním nebo chromátováním, čímž se prodlužuje životnost a také lze dosáhnout různých odstínů výsledného povlaku. Ve srovnání s žárovými nástřiky je korozní odolnost značně menší. Další alternativou pro vytváření zinkových povlaků je tzv. *sherardování*, kdy se do rotační pece vloží součásti, zinkový prach a písek. Nastává ohřívání

k teplotám těsně pod bodem tavením zinku (350 až 400 °C) a otáčení bubnu pece, přičemž dochází k reakci železa se zinkem.

Podobně jako u žárového zinkování, tak dochází k tvorbě sloučenin železa a zinku. Tloušťky vrstvy se pohybují v rozmezí 15 až 40  $\mu\text{m}$ , vyznačují se dobrou přílnavostí a také konstantními hodnotami tloušťky, i na konstrukčně složitějších dílech. Jejich použití je však omezeno pro rozměrově menší součásti, omezené velikostí bubnu – typicky spojovací materiály.



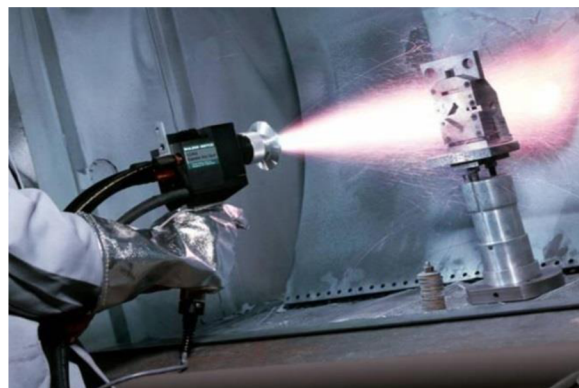
Obr. 4 Proces žárového zinkování [19]



Obr. 5 Princip procesu galvanického zinkování [20]



Obr. 6 Spojovací materiál po technologii sherardizování [21]



Obr. 7 Proces žárového nástřiku el. obloukem [52]

## 1.2 Měření jakosti povlaku [5], [23], [24], [25], [26]

Jedním z hlavních motivů diplomové práce bylo zhodnocení kvality povlaků a porovnání všech čtyřech dodaných vzorků. Pro měření tloušťky existují různé destruktivní i nedestruktivní metody. V případě této práce bylo zapotřebí získat větší množství hodnot (20 pro každý vzorek) a tak bylo nutno zvolit rychlou metodu s ohledem na přesnost, kvantitu a jednoduchost. To nesplňují destruktivní zkoušky, které jsou časově náročné a navíc vzhledem k poškození nevhodné pro vyšší počet měření. Dalším faktem, který je při volbě metody měření tloušťky nezbytné vzít na vědomí je ten, zda je povlak feromagnetický či nikoli. V tomto případě se jedná o povlak z neferomagnetického materiálu na feromagnetickém podkladu. Jako měřicí zařízení byl zvolen nedestruktivní tloušťkoměr *POSITECTOR 6000*, který je však univerzální pro všechny kovové podklady.

Pro měření přilnavosti se nabízí řada destruktivních zkoušek. Velice rozšířenou metodou měření tloušťek vrstev je mřížková zkouška. Ta je však omezena pro nátěry do 250  $\mu\text{m}$  (naměřené hodnoty tloušťek dosahovaly vyšších hodnot). Pro vyšší hodnoty tloušťek žárových nástřiků se využívá a i v konkrétním případě bylo pro měření přilnavosti povlaku využito *odtrhové zkoušky*. Ta je časově náročnější a vyžaduje delší přípravu, včetně nalepení potřebných terčů a jejich dlouhému zasychání, nicméně pro každý vzorek byly naměřeny pouze tři měření přilnavosti. Aplikace odtrhové metody je pro měření přilnavosti povlaků žárových nástřiků běžná.

Drsnosti povlaků žárových nástřiků mohou dosahovat různých hodnot  $R_a$ , závislých na provozních parametrech nástřiku. V tomto případě byla drsnost povlaku vysoká. Proto nemohlo být užito kapesního drsnoměru, který se standartně používá u ploch s rozsahem  $R_a$  do 15  $\mu\text{m}$ . Pro měření drsnosti bylo proto užito měřicího přístroje *Alicona Infinite Focus*, který pro vyhodnocení nepoužívá kontaktu měřicího hrotu s měřenou plochou, ale pracuje na optickém principu vyhodnocování topografie povrchu. Výstupem navíc není pouze 2D profil, ale komplexnější 3D vyhodnocení stanovené plochy nástřiku, které zatím obecně není tak rozšířené, ale vzhledem k někdy nedostatečnému hodnocení pomocí profilových parametrů je předurčováno k postupnému rozšiřování jeho užití.

## 2. Koroze [2],[26],[27],[28]

Pojem koroze pochází z latinského slova *corrodere*, znamenající v českém překladu doslova *rozežítat*. Konkrétně dochází k rozrušování materiálu, jenž je způsobeno následkem chemické nebo elektrochemické reakce daného materiálu s okolím. Koroze může probíhat v atmosféře či jiných plynech, ve vodě či jiných kapalinách a obecně ve všech chemických látkách, které jsou s materiálem ve styku. Nezneškodňuje pouze kovy, ale také nekovové organické a anorganické materiály. Může se projevovat rozdílně – od změny vzhledu materiálu (ztráta lesku, barvy) až po úplný rozpad (porušení celistvosti). Kvůli jejím škodným účinkům je boj proti korozi důležitým technickým a ekonomickým úkolem, který se bez znalostí mechanismu koroze neobejde.



Obr. 8 Ukázka koroze zadního náboje bicyklu [27]

### 2.1 Rozdělení koroze [2], [26], [28]

Vzhledem k tomu, že koroze má více různých forem, rozlišujeme ji dle různých hledisek. Jako nejzákladnější hledisko se jeví rozdělení *dle vnitřního mechanismu*, jenž ji rozděluje na:

- chemickou
- elektrochemickou

Dle *druhu napadení* materiálu:

- rovnoměrná
- bodová
- důlková
- selektivní
- mezikrystalická

Jak již bylo zmíněno, proces může probíhat v různém *okolním prostředí*, dělicí korozi na:

- atmosférickou
- v kapalinách
- půdní

Na proces mají vliv i *vnější vlivy*, které mohou korozi rozdělovat např. na:

- při mechanickém namáhání
- vibrační
- únavovou

## 2.1.1 Rozdělení dle vnitřního mechanismu [29] [2], [26], [30], [31], [7], [32]

- *Chemická koroze*

Jedná se o chemickou reakci mezi materiálem a elektricky nevodivým prostředím. Dochází k současné oxidaci kovu a zároveň redukci oxidující složky. K vytvoření korozních produktů dochází přímo na povrchu materiálu. Oxidace je děj, při kterém dochází ke ztrátě valenčních elektronů kovu. Výsledkem této reakce jsou korozní produkty, tvořené nejčastěji oxidy kovů či jinými sloučeninami (sírany, uhličitany nebo chloridy).

Náchylnost kovu ke koroznímu napadení ovlivňuje poměr molárního objemu oxidu korozního produktu  $V_O$  vůči atomárnímu objemu kovu  $V_{ME}$ , určující tzv. Piling-Bedwordovo číslo.

$$r_{PB} = \frac{V_O}{V_{ME}} \quad (2.1)$$

Kovy, jejichž produkty koroze mají menší molární objem než atomový objem kovu, na kterém vznikají ( $r_{PB} < 1$ ), nevytváří celistvou ochrannou vrstvu a tak vzniká nesouvislá vrstva oxidů, podmiňující vysokou rychlost oxidace. To platí pro alkalické kovy (Li, K, Sr). Je-li molární objem oxidu korozního produktu naopak větší než atomový objem kovu ( $r_{PB} > 1$ ) lze počítat s ochranným účinkem souvislé vrstvy. Nicméně v případě, kdy je poměr  $r_{PB}$  příliš veliký, může vlivem napětí, vznikajícího mezi povrchem a vrstvou docházet k odlupování nebo praskání vrstvy.

Přítomnost a podoba ochranné vrstvy má vliv na množství korozní změny, vyjádřené v mm/rok. V případě, že na povrchu nevzniká žádná ochranná vrstva, je závislost korozního napadení na čase lineární a lze vyjádřit rovnicí.

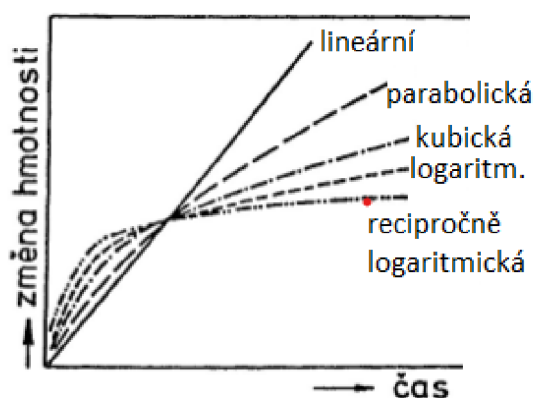
$$M = k \cdot T \quad (2.2)$$

Kde  $M$  – korozní změna (mm/rok);  $k$  – konstanta;  $T$  – doba

V případě, tvoří-li se na povrchu ochranné vrstvy, zabraňující difundujícím iontům, zmenšuje se korozní rychlost dle parabolické závislosti.

$$M^2 = k \cdot T \quad (2.3)$$

U parabolické závislosti se už jedná o docela složitý proces, jenž záleží na více na sobě závislých chemických pochodech, probíhajících na povrchu kovu. Touto závislostí korozního napadení se řídí především kovy za vyšších teplot při dostatečně tlustých vrstvách. Kubická závislost ( $m^3 = k \cdot T$ ) se v některých případech vyskytuje na přechodu mezi korozi za nízkých a vysokých teplot. K logaritmické závislosti dochází při relativně nízkých teplotách za vzniku velmi tenkých vrstev.



Obr. 9 Druhy korozních závislostí [7]

K nejrozšířenějšímu druhu chemické koroze dochází v plynném prostředí za vyšších teplot nebo za přehřáté páry. Typickým příkladem je tvorba okují při tepelném zpracování ocelí, kdy dochází ke vzniku oxidační vrstvy, jejíž tloušťka roste se zvyšující se teplotou ohřevu. Např. v teplotním intervalu 600 až 800 °C se na povrchu oceli ve dvou až čtyřech vrstvách vytvářejí okuje, složené z různých oxidů železa. To je důvodem použití pecí s ochrannou atmosférou (tj. inertních plynů), které zabraňují oxidaci a tím pádem také korozi. V případě prostředí přehřáté páry může docházet k zkřehnutí oceli vlivem difuze vodíku do narušeného kovu. Dochází k tzv. vodíkové křehkosti, která má vzhledem k mechanickým vlastnostem kovu negativní dopad. Kromě toho dochází také k samotné oxidaci kovu.

- *Elektrochemická koroze*

Na rozdíl od chemické koroze, dochází k elektrochemické korozi za předpokladu přítomnosti elektricky vodivého prostředí (elektrolytu – elektricky vodivých roztoků nebo tavenin). Proces se skládá ze dvou dílčích dějů – anodového a katodového, které probíhají současně a jsou na sebe vázány. K oxidaci, tj. korozi dochází během anodické reakce, kdy iont vystupuje z mřížky více elektronegativního materiálu, hydratuje se a vnikne do elektrolytu. Při katodické reakci dochází k redukci některých složek korozního prostředí spotřebováním elektronů, které reagují s ionty a atomy, schopnými redukce. Kovy s nižším elektrickým potenciálem, vysílající kladné ionty, nabíjející se záporně, mají oproti vodíkové elektrodě nižší elektrický potenciál a nazývají se neušlechtilými. Oproti tomu ušlechtilé kovy na sebe v roztoku své soli ionty přitahují, nabíjejí se tedy kladně a mají vzhledem k vodíkové elektrodě kladné napětí. Z principu elektrochemické koroze vyplývá, že odolnost proti korozi je závislá na hodnotě elektrického potenciálu kovu. Menší korozní odolnost mají kovy s větším záporným potenciálem než kovy s nižším záporným potenciálem nebo kladným potenciálem. Srovnání potenciálů různých materiálů nabízí tab. 1.

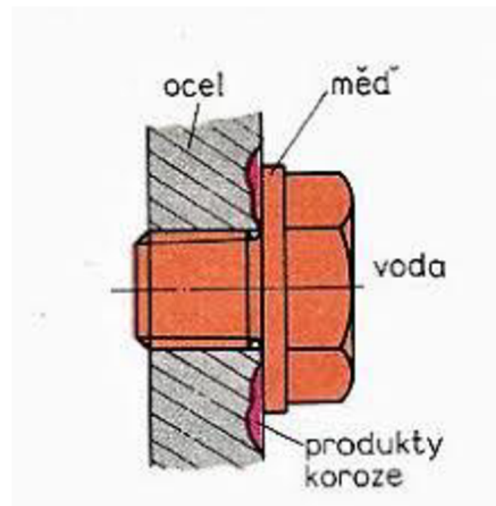
Tab. 1 Srovnání elektrických potenciálů různých materiálů [7]

Materiál	El. potenciál [V]	Materiál	El. potenciál [V]
Sodík	-2,71	Cín	-0,14
Hořčík	-1,55	Olovo	-0,12
Hliník	-1,37	Vodík	0,00
Zinek	-0,76	Měď	+0,34
Chrom	-0,56	Stříbro	+0,8
Železo	-0,44	Rtuť	+0,86
Kadmium	-0,4	Zlato	+1,36
Nikl	-0,25	-	



V praxi je pak důležité zahrnout možnost vzniku elektrochemické koroze zejména při konstrukčním návrhu sestav z různých materiálů, s odlišným elektrickým potenciálem. Typickým příkladem je zašroubování měděného šroubu do ocelové nádrže, naplněné vodou. Měděný šroub s vyšším elektrickým potenciálem se stane katodou, oproti tomu ocel s nižším elektrickým potenciálem anodou, která se začne rozpouštět – dochází ke vzniku korozního makročlánku.

Ani povrch samotného kovu nikdy není zcela homogenní a tak může mezi jednotlivými složkami s rozdílným elektrickým potenciálem docházet k anodové a katodové reakci. Ku příkladu u nelegovaných ocelí, tedy slitiny železa a uhlíku. Vzhledem k tomu, že železo má nižší potenciál než uhlík, může docházet k jeho rozpouštění.

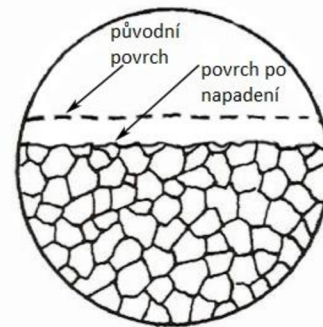


Obr. 10 Vznik korozního makročlánku [31]

### 2.1.2 Rozdělení dle druhu napadení [33], [26], [2], [34], [7]

- *Rovnoměrná koroze*

Z pohledu spolehlivosti nejpriznivější druh koroze. Povrch součásti je rozrušován stejnoměrně, což znamená, že dochází k stejnoměrnému úbytku materiálu po celém povrchu. Lze docela snadno monitorovat úbytek, např. úbytkem tloušťky v mm/rok. K zjištění, zda došlo ke koroznímu napadení je tedy zapotřebí znát velikost změny hmotnosti a rozměru vzorku. Obvykle se mění s časem, což znamená, že počáteční hodnota je vyšší než konečná. Typické pro materiály bez ochranných vlastností.



Obr. 11 Rovnoměrná koroze [26]

- *Bodová koroze*

Typ místního napadení, které pokračuje do hloubky bez zvětšení šířky, přičemž okolní materiál zůstává bez viditelného napadení. Jedná se o zvlášť nebezpečný druh napadení u materiálů odolných proti rovnoměrné korozi (typické pro hliník nebo korozivzdornou ocel). Hloubka je podstatně větší než průměr bodového napadení. Mechanismus iniciace spočívá v napadení v místech kovu se slabšími ochrannými vlastnosti pasivační vrstvy (hranice zrn, vměstky). Způsobuje např. proděravění stěn potrubí, nádob aj., obzvlášť v roztocích obsahující chlor, jod, brom, či jejich soli - zejména pak halogenidy těžkých kovů nebo chlornany.



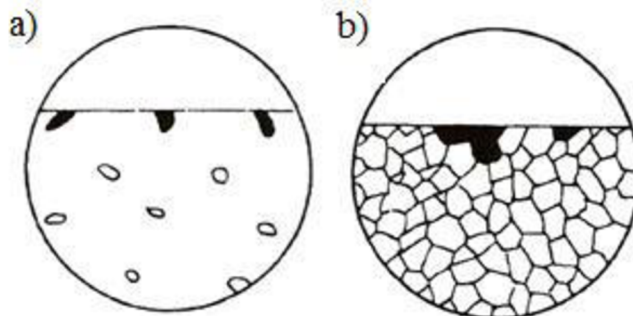
Obr. 12 Důlková a bodová koroze [34]

- *Důlková koroze*

Podobně jako u bodové koroze se projevuje lokálním porušením pasivované vrstvy. Poměr hloubky k šířce je však z dlouhodobého hlediska znatelně menší. Pro její iniciaci je významný hlavně obsah korozních aktivátorů v elektrolytu, strukturní nehomogenity povrchu kovu nebo tuhé složky na povrchu kovu. Obdobně jako u bodové koroze - typické pro hliník či korozivzdornou ocel.

- *Selektivní koroze*

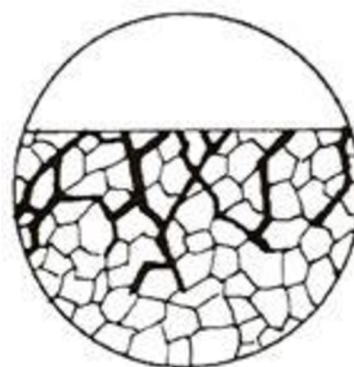
Vyskytuje se u slitin s vícefázovou strukturou projevem korozního napadení pouze na jedné fázi, která je ve struktuře obsažena v menším množství, viz obr. 11a. Tvar napadení je tedy závislý na tvaru a rozložení korodující fáze. Může se však vytvořit také u jednofázových struktur, kdy k napadení dochází pouze u některých zrn nebo pásma tvořeného precipitáty či vměstky, viz obr. 11b.



Obr. 13 Selektivní koroze pro případ napadení jedné fáze vícefázové struktury (a), napadení jednotlivých zrn struktury (b) [26]

- *Mezikrystalická koroze*

Korozní napadení postupuje po hranicích zrn (nebo-li napadení hranic zrn je daleko rychlejší než koroze vlastního zrna), doprovázena zhoršením mechanických vlastností bez hmotnostního úbytku a pozorovatelné vizuální změny. Korozní napadení na povrchu je charakterizováno pouze malým úbytkem, zatím hlouběji pod povrchem vznikají velké korozní dutiny. Zapřičiňují ji chemická a strukturní nehomogenita na hranicích zrn kovu. Projevuje se zejména po tepelném zpracování, v důsledku ochuzení chromu v oblastech na hranicích zrn. Může probíhat na hranicích všech zrn nebo pouze některých, obecně neurčitelných.



Obr. 14 Mezikrystalická koroze [26]

### 2.1.3 Rozdělení dle okolního prostředí [2], [26], [35], [16], [36], [37], [38]

- *Atmosferická koroze*

Vzhledem k tomu, že je většina kovových produktů vystavena atmosféře, jedná se o nejvyskytovanější druh korozního napadení. Udává se, že až 80% korozních ztrát je způsobeno atmosférickou korozí. Hlavním vlivem jsou tzv. klimatické podmínky, určené vlhkostí, teplotou okolního vzduchu nebo jeho znečištěním. Proces atmosférické koroze má elektrochemický charakter a probíhá pod velmi tenkou vrstvou vody (o tloušťce v rozmezí 50 až 150  $\mu\text{m}$ ), nasycenou dalšími rozpustnými složkami atmosféry jako oxidem uhelnatým, oxidem siřičitým, chlorovodíkem, amoniakem nebo



Obr. 15 Atmosférická koroze potrubí [38]

aerosoly. Při tzv. nadkritické rychlosti koroze (relativní vlhkost překročí 60 až 80 %) dochází ke vzniku dostatečné tloušťky filmu elektrolytu potřebnému k uskutečnění průběhu korozních reakcí. Při podkritických vlhkostech není rychlost koroze nulová, ale pro většinu technických aplikací se zanedbává. Nejagresivnější elektrolyt vzniká v mlze. S rostoucí teplotou se rychlost koroze zvyšuje, při nižších teplotách elektrolyt zamrzá a proces koroze se zastavuje. Tloušťka vrstvy je krom klimatických podmínek závislá také na tom, jak je povrch součásti drsný a zda obsahuje nečistoty (např. prach, který může vlhkost držet). Omezit zadržování vlhkosti je možno např. vhodnou orientací profilů, odstraněním štěrbin nebo zhotovením drenážních otvorů. Nutnou ochranou je nanášení organických nátěrů a povlaků. Důležité však je, aby byl povrch pro nanášení správně upraven. Pokud tomu tak není, jedná se o jeden z nejčastějších příčin selhání protikorozi ochrany.

- *Koroze v kapalinách*

Nejvýznamnějším druhem je koroze ve vodách. Přírodní vody lze dělit na sladké, mořské, minerální a brakické (sladké vody, které jsou znečištěny mořskou vodou, např. Baltské moře, jenž je považováno za největší plochu brakické vody na světě). Její agresivita je závislá na tvrdosti vody (způsobené rozpuštěnými soli), hodnotě pH, množství plynu rozpuštěných ve vodě či obsahem pevných částic. Ze všech plynů je nejvlivnější kyslík, jelikož koroze ve vodách je většinou řízena rychlostí redukce kyslíku. U uzavřených vodních systémů je proto důležité zamezit přístupu kyslíku či jej redukovat chemickými činidly nebo odplyňováním. Vliv má také teplota a rychlosti proudění vody. Teplota může mít na korozní proces ve vodě jednak negativní vliv, znamenající urychlení elektrochemických reakcí (anodické a katodické), také však dopad pozitivní z důvodu nižší rozpustnosti kyslíku a dalších plynů ve vodě. Agresivita přírodních vod se liší a nezávisí pouze na obsahu přirozených látek, ale také na stupni znečištění, způsobeným lidským faktorem. Z toho důvodu je často korozní odolnost stejného materiálu v různých lokalitách rozdílná. Vody se pro průmyslové využití změkčují, oplyňují a chemicky upravují. Při konstrukci a návrhu vodních zařízení je důležité předejít vzniku korozního makročlánku.



Obr. 16 Koroze uhlíkové oceli v pitné vodě [36]

- *Půdní koroze*

Dle jednotlivých složek se půda rozděluje na více typů, obecně se však vždy skládá z tuhé, kapalné a plynné fáze. Z korozního hlediska má hlavní význam kapalná fáze půdy, představující vodný roztok elektrolytu s různým obsahem solí (např. amoniaku) a plynů, které mohou korozi urychlovat. Z obecného hlediska má na agresivitu půdy vliv vícero faktorů jako soudržnost a typ půdy (propustné půdy jsou méně agresivní než např. půdy jílovité, jenž vodu dobře vážou), chemické složení elektrolytu, redox potenciál nebo hodnota pH, která se obvykle pohybuje v rozmezí 5 až 9,5. U vyšších hodnot pH nad 8,5 se daná půda pro ocel již nepovažuje za agresivní. Naopak pod hodnotou pH 6,5 je agresivita půdy vysoká. Typickým příkladem často napadených součástí půdní koroze jsou podzemní potrubí (pro dopravu vody, ropy či různých plynů), silniční odtoky nebo základy budov a mostů. Většinou se pro tyto aplikace užívá ocelových materiálů, v menším rozsahu pak z hliníku, mědi, olova nebo zinku. Speciálním příkladem mohou být archeologické nálezy.

#### 2.1.4 Rozdělení koroze dle vnějších vlivů [29], [28], [2], [36], [26], [7], [39]

- *Koroze při mechanickém namáhání a korozní praskání*

Zvláště nebezpečný a škodlivý případ poškození kovů a slitin, vyskytující se často i v málo agresivním prostředí. Při současném působení korozního prostředí a mechanického namáhání tahem dochází k tzv. koroznímu praskání, při kterém vznikají trhliny. Ty mohou mít mezikrystalický, transkrystalický nebo smíšený charakter a rozkládají se většinou kolmo na směr namáhání. Tahová napětí, potřebná k iniciaci trhlín nemusí způsobovat pouze vnější druhy zatížení, ale také zbytková napětí, vzniklá např. při předchozím svařování, tepelném zpracování či tváření za studena. Obecně platí, že čím je materiál homogennější, tím je náchylnost menší (čisté kovy jsou proti praskání nejodolnější). Dalším vlivem je struktura slitiny, jelikož se uvádí, že prostorově centrovaná krychlová mřížka je značně odolnější než plošně centrovaná. Potvrzením je tomu srovnání austenitických chromniklových ocelí a feritických chromových korozivzdorných ocelí, kdy se jako náchylnější jeví prvně zmiňovaná austenitická ocel s plošně středěnou mřížkou. I velikost samotného zrna má vliv, neboť obecně platí, že s rostoucí velikostí zrna roste citlivost ke koroznímu praskání.



Obr. 17 Narušení materiálu vlivem korozního praskání [39]

Vzhledem k ochraně materiálu před tímto jevem je v první řadě, stejně jako u všech protikorozních aplikací důležitá vhodná volba materiálu. Ta nemusí být vždy zcela možná a tak je nutno snížit úroveň napětí vhodným tepelným zpracováním. Běžně se užívá žihání na odstranění pnutí. Další možností ochrany je snížení tahových napětí v materiálu, odstranění agresivní složky z prostředí, či zmenšení teploty prostředí. Účinný může být také přídavek inhibitoru nebo elektrochemická forma ochrany.

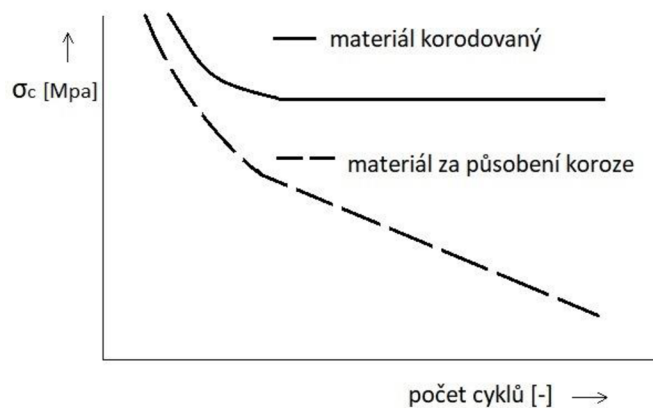
- *Vibrační koroze*

Vzniká za předpokladu mechanického namáhání a vzájemných tangenciálních kmitavých pohybů dvou stýkajících se součástí s velmi malou amplitudou. Jedná se o proces, u kterého se uplatňuje jak složka mechanická tak chemická, nelze však mluvit o elektrochemickém mechanismu. Dochází k ní i za podmínek nízké relativní vlhkosti atmosféry, tedy v případě, kdy je korozní vliv atmosféry zanedbatelný. Se zvětšováním relativní vlhkosti se vibrační opotřebení dokonce zmenšuje. Vlhkost má totiž vliv na změnu součinitele tření styčných ploch a dochází tedy k nižšímu abrazivnímu účinku. Od opotřebení, ke kterému dochází při jednosměrném tření se vibrační koroze odlišuje v relativně malé dráze pohybu a stálém vzájemném styku třecích ploch. Typickým rysem je zadržování oxidačních produktů mezi styčnými plochami - u ocelových součástí vyznačujících se hnědočerveným zbarvením (někdy se mluví o tzv. „krvácení materiálu“). V podstatě jde o opotřebení ploch, které je vzhledem k oxidačním pochodům mnohem výraznější než při rovnocenném tření bez korozního působení. Nevyskytuje se pouze u součástí s pohyblivým uložením, ale také s uložením pevným (lisované spoje, u kterých dochází k vzájemnému skluzu).

Častým případem napadení jsou součásti, u kterých vlivem průhybu rotujícího hřídele dochází k vratnému mikropohybu, což typicky platí u stykových ploch nábojů a ložisek, nalisovaných na hřídeli.

- *Korozní únava*

Vzniká za předpokladu současného korozního napadení a cyklického tahového namáhání. Za těchto podmínek dochází k tvorbě trhlin, které jsou většinou transkrystalické a mohou se větvit. Jelikož se vlivem koroze stále zmenšuje průřez napadeného objektu, nelze v tomto případě uvažovat o mezi únavy, tzn. největší opakované změně napětí, jenž materiál teoreticky vydrží pro nekonečný počet cyklů, aniž by došlo k jeho porušení. Rychlost šíření je závislá na frekvenci zatěžování, přičemž čím menší je frekvence, tím je na jeden cyklus vzrůst délky trhliny větší. Korozně únavové chování lze pozorovat i při relativně nízké frekvenci zatěžování. Trhliny se šíří v místech nehomogenit povrchu (vměstky, hranice zrn, vruby) a lom je pokryt korozními produkty. Předejít či redukovat účinky korozní únavy lze např. odstraněním cyklického tahového zatěžování, snížením amplitudy zatěžování, vhodné volbě odolnějšího materiálu či použití anorganických povlaku.



Obr. 18 Vliv korozní únavy na průběh Wöhlerovy křivky [2]

## 2.2 Způsoby protikorozní ochrany [40], [7], [36]

Vzhledem k rozmanitosti forem a příčin koroze představuje protikorozní ochrana komplexní problematiku, předpokládající značné praktické i teoretické znalosti projektanta. Způsoby protikorozní ochrany umožňují korozi zabránit, popř. ji zpomalit na přijatelnou míru. Protikorozní opatření lze rozdělit do několika základních skupin, které je možno různě kombinovat:

- volba vhodného materiálu
- povrchová úprava
- úprava korozního prostředí
- konstrukční řešení
- elektrochemická ochrana

### 2.2.1 Volba materiálu [28],[36],[41], [2],[7],[42], [77],[43],

Jelikož kovové materiály korodují za stejných podmínek různou rychlostí, volba materiálu je z hlediska protikorozní ochrany velice důležitým aspektem. Korozní odolnost materiálu se posuzuje s ohledem na jeho termodynamickou stálost, schopnosti snadné a účinné pasivace a také chemickou čistotu. Optimální volba materiálu je rovněž důležitá s ohledem na ekonomičnost. Použití na první pohled dražšího, avšak korozi odolnějšího materiálu může být s ohledem na životnost součástí, zejména v agresivnějším prostředí výhodnější volbou. Druh okolního prostředí je pro optimální volbu materiálů velmi důležitý. Jde o jeho složení a koncentraci jednotlivých agresivních látek, mechanické působení či různé intervaly působení. Důležitým vlivem je také maximální teplota, které je materiál vystaven, pnutí uvnitř materiálu nebo druh spojení dvou vodivých materiálů.



Obr. 19 Ložisko z martenzitické oceli [43]

Typickým příkladem je nahrazení uhlíkové oceli. Ta sice většinou splňuje primární užité vlastnosti součástí, nicméně její protikorozní odolnost nemusí být dostatečná. Legováním lze dosáhnout snížení korozní rychlosti. Zejména v agresivních podmínkách je tedy obzvláště důležité použití korozivzdorného materiálu. Nejpoužívanějším materiálem je korozivzdorná ocel. Ta je definována minimálním obsahem chromu o hodnotě 12 hmot. %. Chrom je u korozivzdorných ocelí zásadním prvkem, jelikož zajišťuje pasivitu materiálu. Mezi další důležité prvky patří zejména nikl, mangan, molybden, měď, křemík, titan aj.

Dle chemického složení je dána jejich struktura, na základě které se korozivzdorné oceli rozdělují na martenzitické, feritické a austenitické s některými přechodnými skupinami. Tyto typy se liší mechanickými vlastnostmi, technologickými vlastnostmi (obrobitelností nebo svařitelností), magnetickými vlastnostmi, žáruvzdorností, ale také rozdílnou odolností proti korozi. Korozivzdornou ocel je proto důležité zvolit se zřetelem na okolní prostředí a látky, ve kterých má materiál působit a odolávat jim.

Další možností použití korozivzdorného materiálu je v neželezných kovech. Často se využívá např. měď a její slitiny, hliník nebo zinek. Jejich použití je v protikorozní ochraně obzvláště specifické a stejně jako v případě korozivzdorných ocelí je důležité odlišovat danou operaci a prostředí, kterému bude materiál vystaven. Ku příkladu pro rozvody teplé vody, výměníky, nádrže a armatury se často využívá mědi, bronzů nebo mosazí s vyšším obsahem mědi (u mosazí totiž může docházet k odzinkování). V mořských vodách se díky dobré odolnosti využívá např. slitina Al-Mg-Si, v běžných vodách pak niklu a jeho slitin.

Z hlediska dobré protikorozní odolnosti lze použít také plasty. Ty jsou navíc dobře zpracovatelné, slouží jako elektrické izolanty, tlumí rázy a mají nízkou měrnou hmotnost. Na druhou stranu je jejich použití omezeno pro značně nižší teploty než u kovů. To platí i o mechanických vlastnostech, které jsou navíc ovlivněny časem, teplotou a také stárnutím. Z hlediska korozní odolnosti plasty na rozdíl od vodivých kovů nereagují na elektrochemické vlivy. Koroze plastů se projevuje rozrušením – degradací a stárnutím. Stárnutí je nevratný chemický a fyzikální děj, kdy dochází ke změnám chemické struktury a poklesu mechanických vlastností, estetičnosti (změna barvy a lesku) nebo křehnutí. Proces stárnutí je ovlivněn různými fyzikálními vlivy jako ultrafialovým zářením, atmosferickým prostředím, mechanickým namáháním nebo teplotou, dále chemickými vlivy, kdy může docházet k difuzi, bobtnání či destrukci. V případě difuze dochází vlivem difundující látky k pohybu makromolekul a následné změně vlastností materiálu. Míra difuze je závislá na propustnosti materiálu. Bobtnání se projevuje změnou objemu a vlastností materiálu.

Důvodem je difundující látka, která v makromolekulárním řetězci vytváří sekundární vazby, čímž dochází k oddalování řetězců. K destrukci dochází reakcí mezi difundující látkou a polymerem.

### 2.2.2 Ochrana povlaky [2], [36], [32], [7], [44]

Poměrně rozšířený způsob protikorozní ochrany, umožňující zvolit materiál s požadovanými mechanickými vlastnostmi bez ohledu na jeho protikorozní odolnost. Základní podstata spočívá ve vytvoření bariéry mezi základním materiálem a korozním prostředím. Krom toho bývají povlaky využívány také z estetického hlediska. Odolnost povlaku je určena především jeho složením a typem. Důležitým aspektem je také tloušťka, struktura a jakost spojení k základnímu materiálu. Dle funkce se povlaky rozdělují na více druhů.

Mezi první patří povlaky, které plní funkci izolace základního materiálu od korozního prostředí. Nutností je, aby byly dokonale souvislé, bez prasklin a pórů. Typickým příkladem jsou povlaky z keramických smaltů, povlaky na oceli z ušlechtlejších kovů než ocel, plastové povlaky aj.

Druhý typ ochranných povlaků spočívá na principu elektrochemické funkce. Pro správnou funkci musí mít materiál povlaku nižší elektrický potenciál než chráněný kov, tak aby představoval obětovanou anodu. Vlivem toho se rozpouští, přičemž vznikají korozní zplodiny, které zabraňují dalšímu koroznímu pronikání k chráněnému kovu. Typickým příkladem této aplikace jsou povlaky na bázi zinku, s více záporným potenciálem (-0,76 V) než základní materiál z oceli s méně záporným potenciálem (-0,44 V), představující nerozpustnou katodu. Z hlediska pórovitosti lze do určité meze tvrdit, že přítomnost pórů neovlivňuje životnost povlaku, jelikož se v nich zinek rozpustí. Nicméně pokud jsou póry příliš veliké, dochází k tomu, že okolní zinek nestačí základní materiál ve formě oceli chránit a dochází ke vzniku koroze. Z tohoto důvodu je důležité, aby zinkové povlaky nebyly příliš porézní.

V případě, kdy má materiál povlaku vyšší potenciál než chráněný základní materiál, dochází k opačné situaci, kdy je povlak katodou a základní materiál anodou. Ochranná funkce takového povlaku je pouze bariérová. To platí např. pro nanášení cínového povlaku (-0,14 V) na ocelový substrát (-0,44 V). Tyto povlaky jsou obzvlášť choulostivé na přítomnost pórů, jelikož při jejich existenci dochází k rozpuštění základního materiálu. Proto musí mít ideálně nulovou poréznost.

Mezi další typ povlaků se řadí materiály, jenž mají schopnost inhibičních účinků, tzn. odstranění složek pronikajícího korozního prostředí, které urychlují korozi. Patří mezi ně nátěry, jejichž ochranná schopnost spočívá v obsahu různých pigmentů s inhibičními účinky.

Povlaky se dále dle materiálu rozdělují na organické a anorganické (ty mohou být kovové i nekovové). Díky dobré dostupnosti tvoří zhruba 80 až 90% ze všech druhů povlaků. Organické povlaky mají ve většině případů bariérový účinek, v menším výskytu pak také inhibiční. Ve většině případů jsou na materiál nanášeny nátěrem. Přestože se jedná o poměrně jednoduchou, ekonomickou a dostupnou aplikaci, má vcelku vysoký ochranný účinek. Hlavním důvodem nátěrů je jejich ochranný účinek (proti povětrnostním podmínkám, vibracím, mořské vodě atp.), mohou však také sloužit pro specifické účely jako dekorativní, baktericidní, maskovací aj. Bariérový ochranný účinek lze zvýšit např. nanesením více vrstev nátěru. Důležitou funkci plní základní nátěr, jenž pasivuje (konzervuje) natíraný materiál a musí mít takové vlastnosti, aby se korozní rychlost snížila na minimum. Nátěr se skládá ze základních složek – pigmentů, pojiv, plnidel a aditiv. Nejdůležitější složkou nátěru jsou pojiva, obsahující filmotvorné látky a rozpouštědla. Nátěru určují její charakteristické fyzikální vlastnosti. Pigmenty dávají nátěru požadované zbarvení a neprůhlednost. Mohou

mít také inhibiční charakter. Jako pomocné přísady se používají aditiva, podobně jako plniva totiž ovlivňují fyzikální a také technologické vlastnosti nátěrů.

V případě kovových povlaků se využívá široký sortiment materiálů, od méně ušlechtilých (vzhledem k železu negativní) až po velmi ušlechtilé (vzhledem k železu pozitivních). V technické praxi se však nejčastěji uplatňují povlaky hliníku, zinku, stříbra, kadmia, mědi, chromu, niklu nebo olova. Pro hodnocení kovových povlaků je klíčová jejich tloušťka a poréznost. Se zvyšující se tloušťkou se současně snižuje počet korozně významných pórů, což má za důsledek zvýšení životnosti. Ideální podmínky lze charakterizovat tak, že povlak neobsahuje žádné póry. Protikorozní ochrana kovových povlaků spočívá krom zmiňované elektrochemické funkce také v protikorozním legování a bariéřním účinku.

Mezi hlavní druh nekovových anorganických povlaků patří *konverzní vrstvy*. Ty vznikají reakcí kovu s prostředím, kterému je kov během povrchové úpravy vystaven. Výsledná vrstva se vytváří směrem od povrchu do materiálu a obsahuje složky kovu i prostředí. Důvody těchto aplikací nejsou pouze protikorozní. Různé druhy nekovových povlaků jsou shrnuty v následujícím odstavci.

*Oxidické vrstvy* vznikají oxidací za zvýšené teploty a kromě malého protikorozního účinku se užívají také z dekoračních úmyslů. Proto je důležité dokonalé vyleštění materiálu. Další velice rozšířenou chemickou úpravou povrchu je *fosfátování*, při kterém se na povrchu materiálu tvoří nerozpustné krystalické terciální fosforečnany železa, zinku, vápníku a manganu. Jedná se o ekonomicky levný a jednoduchý proces. Výsledná vrstva je pórovitá a měkká, proto se běžně používá pod nátěry, které v povlaku dobře zakotví. Kromě protikorozního účinků se vyznačují dobrými elektroizolačními vlastnostmi, čehož se využívá např. u transformátorových plechů. Vzhledem k tomu, že v kombinaci s vhodným mazivem snižuje tření, je častou aplikací pro polotovary před tvářením za studena (např. hluboké tažení nebo protlačování). Dalším typickým příkladem je užití na povrchové úpravy karoserií automobilu, kdy se fosfátování umísťuje na začátek celého procesu.



Obr. 20 Fosfátování karoserie Škoda [44]

Dobrého protikorozního účinku se docílí nejrozšířenějším způsobem pasivace – *chromátováním*. Tento proces se provádí v lázních, které obsahují kyselinu chromitou a výsledné vrstvy dosahují tlouštěk od 0,1 do 0,5  $\mu\text{m}$ . Častou aplikací je chromátování pozinkovaných plechů, kdy se v podstatně zvyšuje korozní odolnost kovových povlaků proti korozi. Dalším obvyklým využitím je fakt, že chromátové mezivrstvy podstatně zvyšují přilnavost organického povlaku a zároveň zabraňují korozi pod nátěrem.

Dobrého protikorozního účinku se docílí nejrozšířenějším způsobem pasivace – *chromátováním*. Tento proces se provádí v lázních, které obsahují kyselinu chromitou a výsledné vrstvy dosahují tlouštěk od 0,1 do 0,5  $\mu\text{m}$ . Častou aplikací je chromátování pozinkovaných plechů, kdy se v podstatně zvyšuje korozní odolnost kovových povlaků proti korozi. Dalším obvyklým využitím je fakt, že chromátové mezivrstvy podstatně zvyšují přilnavost organického povlaku a zároveň zabraňují korozi pod nátěrem.

Mezi další typické představitele nekovových anorganických povlaků patří *keramické smalty*. Smaltování je způsob ochrany, při kterém je na povrch nanášen skelný povlak, tzv. smalt. Ten je definován jako sklovitá látka s fyzikálními a chemickými vlastnostmi upravenými tak, aby byla po natavení schopna přilnout k povrchu kovu a v důsledku toho vytvářet požadovanou korozní odolnost. Smalty se vyrábí ze skloviny, která je tvořena ze



sklotvorných a přídržných oxidů. Adheze vrstvy se zvyšuje s přítomností přídržných oxidů. Vzhledem k tomu, že smalty chrání bariérovým způsobem, je žádoucí, aby nebyly pórovité. Předností smaltů je dobrá chemická stálost proti kyselinám nebo otěruvzdornost při současném ozdobném efektu. Z důvodu nižší tepelné vodivosti a roztažnosti však nejsou odolné vůči častým tepelným změnám a vzhledem k jejich křehkosti, je zapotřebí nevystavovat je nárazům a předcházet poškození při upevňování šroubů. Jednotlivé vrstvy se na materiál nanáší poléváním, máčením nebo stříkáním, v případě litinových předmětů také poprášením. Zhotovují se jak jednovrstvé, tak vícevrstvé smalty. V případě vícevrstvých se nanáší nejprve základní a poté krycí vrstva. Základní vrstva má funkci přídržné mezivrstvy mezi kovem a krycí vrstvou, vykazující požadované chemické, fyzikální a mechanické vlastnosti povlaku. Jednovrstvé smalty by měly splňovat aplikační vlastnosti základních smaltů a zároveň funkční vlastnosti vrstev krycích. Často se používají pro konstrukčně složitější součásti, kde by byla větší tloušťka vzhledem k vzniku prnutí a následnému možnému porušení povlaku nevýhodná. Výhodou jednovrstvých povlaků je i menší ekonomická (energetická) náročnost.

### 2.2.3 Úprava korozního prostředí a korozní zkoušky [36, 32, 2, 7, 45, 46, 47, 40]

Dochází k podstatnému snížení agresivity korozního (kapalného i plynného) prostředí. Existují tři vzájemně související způsoby jak agresivitu prostředí snížit. Jedná se o úpravu fyzikálních parametrů, snížení koncentrace korozně aktivních látek (či jejich úplným odstraněním) a také možnost použití inhibitorů (látek, které snižují rychlost koroze).

Úpravou fyzikálních parametrů se myslí změna okolní teploty a rychlosti pohybu korozního prostředí. Nižší teplota je z protikorozního hlediska ve většině případů příznivá. Snížení rychlosti korozního prostředí má příznivý vliv v případech, kdy dojde buď k omezení transportu korozně aktivní složky k povrchu materiálu nebo k omezení korozně erozního napadení. Naopak příznivý vliv má rychlost proudění v případech, kdy dochází k přisunu pasivátoru. Vliv tlaku není v případě korozních procesů příliš znatelný, nebo se projevuje nepřímo.

Jelikož v plynném prostředí je intenzita koroze podmíněna zejména určitým obsahem vlhkosti, snižuje se její obsah v atmosféře pod hodnotu relativní kritické meze, tj. pod 60 % relativní vlhkosti. Způsoby snižování vlhkosti jsou různé – od větrání a zvýšení teploty vzduchu (garáže, sklady), zamezení kondenzace páry (při časté změně teplot), vakuování až po použití vysoušedel, které jako hygroskopické látky vodu vážou a snižují tak její obsah na hodnoty nízké relativní vlhkosti. Mezi nejpoužívanější vysoušedla patří oxid hlinitý, silikagel a oxid vápenatý. V kapalinách je rychlost koroze značně ovlivněna zejména obsahem kyslíku či oxidu uhličitého, které korozní průběh urychlují. Obsah plynů v kapalinách navíc zvyšuje intenzitu kavitačního opotřebení, proto se z kapaliny odstraňují. Snížení obsahu kyslíku lze dosáhnout jak fyzikálně (za varu v tlakových nebo vakuových odplyňovačích), tak chemicky (vazbou na alkalizační látky – siřičitan sodný, hydrazín atp.).

V případě inhibice dochází ke snižování agresivity prostředí vlivem přísady látek (inhibitorů), které svou přítomností ve vhodné koncentraci (i v nepatrném množství, v řádech setin procent) rychlost koroze výrazně snižují. Reakcí kovu s inhibitory vznikají na povrchu materiálu tenké filmy a jejich sloučeniny, které na základě svých fyzikálně-chemických vlastností snižují rychlost korozního pochodu. Inhibitory lze rozdělit do více druhů. Prvním příkladem jsou oxidační látky, které svou redukcí zvyšují rychlost katodického děje a posouvají jej do oblastí pasivity chráněného kovu. Patří sem např. dusitany nebo kovové kationy vyšších mocností. Druhým typem jsou látky, které brzdí anodický proces (např. fosforečnany a benzoany).

Třetí skupinu tvoří látky umožňující snadnější redukci složek prostředí (ionty Pt<sup>4+</sup>, Hg<sup>2+</sup>, Ag<sup>+</sup>, Pd<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>), v praxi použitelné např. pro pasivaci korozivzdorných ocelí či titanu v kyselém prostředí.

Pro testování a simulaci materiálů v reálných přírodních podmínkách se využívá korozních zkoušek. Konkrétní typ zkoušky se volí s ohledem na to, kde bude daný materiál využíván. Jejich aplikace se nejčastěji využívá v leteckém, strojírenském, stavebním, těžebním a v neposlední řadě také v automobilovém průmyslu. Provádí se zkoušky, kde jsou simulována různá prostředí, které mohou testované komponenty potkat. Aplikují se např. zkoušky odolnosti proti UV záření, vodě, prachu, teplotním šokům nebo rozšířená zkouška v solné mlze. Ta však nesimuluje žádné reálné prostředí, jelikož ani v přímořských oblastech se nestane, že by byl komponent vystaven celou dobu takto extrémním podmínkám. Výsledky solné zkoušky tak nejsou mnohdy zcela relevantní. Z toho důvodu se často používají cyklické zkoušky. Ty zahrnují fázi solné mlhy, osušení a ovlhčení. V některých případech se v rámci cyklických zkoušek simulují také fáze rychlé změny teplot, vymrazování, či působení UV záření. Doba trvání cyklické zkoušky se obvykle pohybuje okolo šesti týdnů, přičemž by se měly vystřídat nejméně tři periodicky se měnící fáze. Taková zkouška pak dává realističtější výsledky, čehož se hojně využívá v již zmíněném automobilovém průmyslu, kde je na protikorozní odolnost materiálů kladen vysoký důraz.

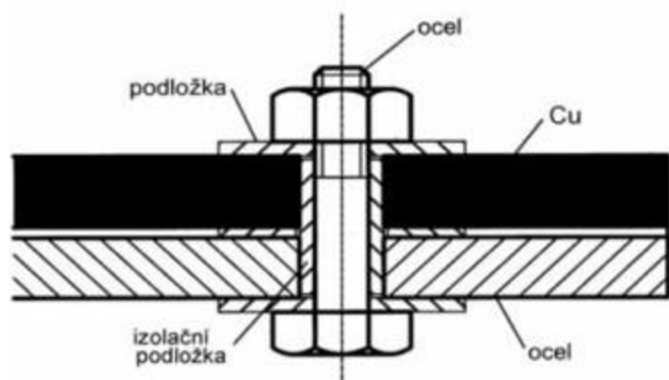


Obr. 21 Komora pro korozní zkoušky v solné mlze a kondenzace vody [47]

#### 2.2.4 Konstrukční řešení protikorozní ochrany [2], [36], [28], [48], [49]

Potlačení účinků koroze lze dosáhnout také vhodnou konstrukcí. Zejména u součástí, nacházejících se v agresivnějším prostředí je tak vhodné respektovat protikorozní konstrukční zásady. Mezi nejčastější konstrukční chyby patří např. vytváření korozního makročlanku, místní přehřívání materiálu, nevhodné tvary pro nanesení povlaku, soustředování usazenin nebo nevhodná kombinace korozního a mechanického namáhání.

Z hlediska prevence vzniku korozního makročlanku je zapotřebí se vyvarovat styku materiálů o značně rozdílném potenciálu. Pokud je však podobné spojení nutné, řešením může být použití izolačního materiálu, který se mezi oba kovy vloží. Správné řešení je znázorněno na obr. 22, kde se materiály oceli a mědi izolují pomocí nevodivých plastových podložek a trubiček.



Obr. 22 Použití ochranných izolátorů [49]

U konstrukcí, kterými proudí kapalina a jsou tak ve stálém styku s korozně působícím aktivním prostředím je důležité, aby bylo proudění kapaliny ve všech místech rovnoměrné. V opačném případě může docházet ke vzniku různých nežádoucích usazenin. Potrubí se tak opatřují soustavou odkalovacích ventilů a kohoutů. Stojaté nádoby nebo nádrže by měly mít oblé dno s výpustí na nejnižším místě.

Také technologické operace mohou mít na výslednou korozivzdornost významný dopad. To platí i pro materiály, které jsou jinak dostatečně odolné. Zejména důležité je provádění svarů, jelikož špatný technologický postup svařování může vést k tvorbě makročlánků nebo štěrbin. Proto je pro svarový spoj podstatné zvolit vhodnou metodu svařování, konstrukci svaru a také kombinaci materiálů základního a svarového kovu.

Dalším rizikovým faktorem protikorozní ochrany je vnitřní pnutí materiálu, které kromě svařování vzniká také při obrábění či tváření za studena a může být příčinou korozního praskání. Vzhledem k tomu, že na hladkých plochách se příliš neusazuje prach, jenž po dlouhou dobu udržuje vlhkost a podporuje tak vznik koroze, je z hlediska obrábění vhodné volit řezné podmínky tak, aby měl výsledný povrch co nejmenší drsnost.

Pro nanášení povlaků je důležité, aby byl povrch pokud možno jednoduchý, tak aby jeho tvar a rozměry umožňovaly rovnoměrné nanesení vrstvy ve všech místech substrátu. Hrany a rohy by proto měly být zaobleny. Je optimální, pokud jsou všechny plochy nanášené součásti dobře přístupné, tak aby bylo možno povlaky snadno obnovovat. V místech, kde vlivem korozního napadení dochází k úbytku materiálu je jako kompenzaci narušení vhodné zvážit volbu přísadku na korozi.

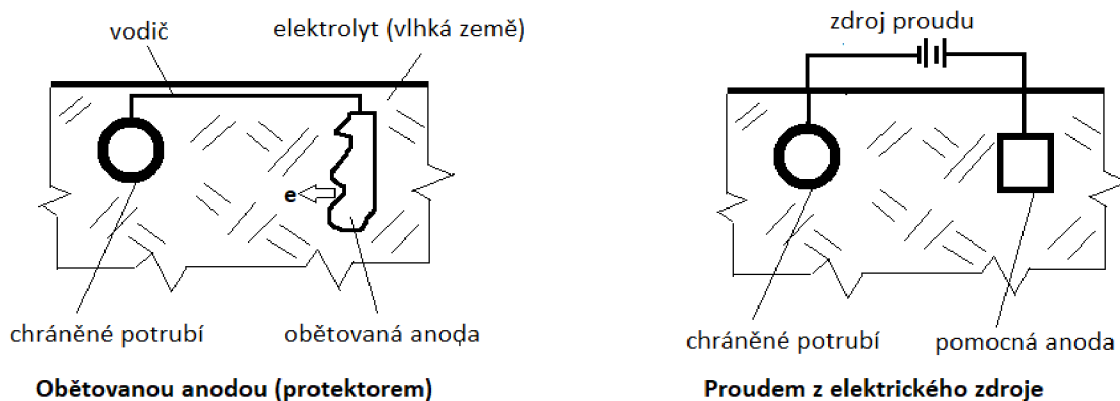
### **2.2.5 Elektrochemická ochrana [2], [36], [7], [40]**

Metoda je založena na účinku průchodu daného materiálu stejnosměrným proudem, při kterém nejenže dochází ke změně potenciálu kovu, ale může docházet taky ke změnám složení korozního prostředí v blízkosti chráněného materiálu. Dělí se na dvě základní metody:

- Katodická ochrana
- Anodická ochrana

Známější a daleko rozšířenější metodou je katodická ochrana, kdy je chráněný kov důsledkem katodické polarizace převeden do stavu imunity (stav, ve kterém koroze neprobíhá). V případě méně časté anodické ochrany je chráněný kov převeden do stavu pasivity (stav, ve kterém je kov proti korozi odolný).

Katodickou polarizaci chráněného kovu lze dosáhnout dvěma způsoby. První způsob spočívá v propojení chráněného materiálu s vyšším elektrickým potenciálem s materiálem, jenž má elektrický potenciál nižší a představuje tak obětovanou anodu (též protektor), která se pozvolna rozpouští (u ochrany oceli se jako obětované anody používají např. slitiny na bázi zinku nebo hliníku). Druhý způsob spočívá v použití zdroje stejnosměrného proudu (nejčastěji selenový, křemíkový nebo germaniový) s volitelnými parametry, přičemž kladný pól je vodivě spojen s anodou a chráněný předmět se zapojí opět jako katoda. Technická aplikace této metody se soustřeďuje zejména pro ochranu zařízení uložených v zemi či vodních systémech. V prvním případě postačí jako obětovaná anoda např. kolejnice nebo odpadová nelegovaná ocel. Pro ochranu vodních systémů je nutné užití méně rozpustných anod z křemíkové slitiny či titanových anod pokovených platinou.



Obr. 23 Katodická ochrana kovů [2]

Anodická ochrana nachází využití u pasivovatelných materiálů, kde se polarizací obnovuje korozi porušovaná pasivní vrstva (např. u nelegovaných ocelí v hydroxidech nebo u chromových ocelí v roztocích kyselin). Chráněný kov je zapojen jako anoda na kladný pól vnějšího zdroje, čímž se potenciál chráněného kovu posunuje do oblasti pasivity. Posun do oblasti pasivity se dosahuje pomocí vnějšího zdroje elektrického proudu, přičemž chráněný kov je jakožto anoda zapojen ke kladnému poli zdroje. Jako zdroj se zpravidla používá tzv. potenciostatické zařízení, které z principu udržuje potenciál na předem stanovené hodnotě.

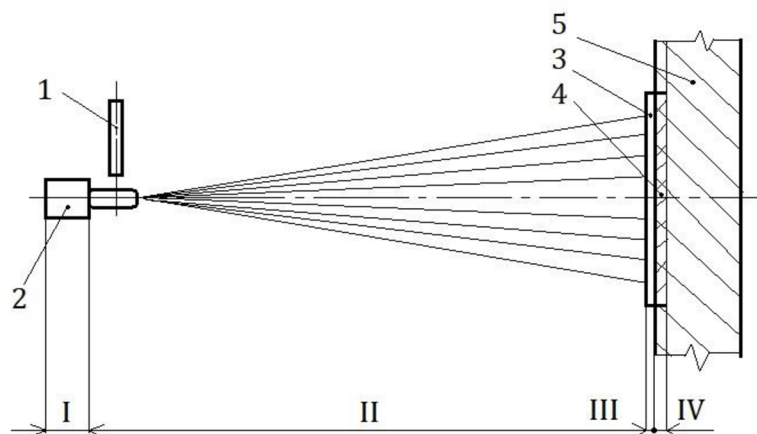
### 3 Žárové nástřiky [1], [29], [5]

Technologie žárových nástřiků představuje souhrn metod, využívající se pro různé účely povlakování materiálu v mnoha odvětvích průmyslu. Jednotlivé metody se liší na základě zdroje natavení přídavného materiálu. Přídavný materiál je buď ve formě drátu nebo prášku. Technologii lze definovat jako ohřev natavených částic na teploty blízké teplotě liquidu nebo nad teplotu liquidu za podmínky, že teplota základního materiálu nepřesáhne 120°C (dle některých zdrojů 150°C). Jedná se o povlaky tloušťek od 50 μm, které bývají realizovány za účelem různých vlastností povlakované součásti. Mezi tyto vlastnosti patří:

- odolnost proti mechanickému opotřebení (abraze, kavitace, eroze)
- odolnost proti extrémně vysokým teplotám (tepelné bariéry)
- odolnost proti korozi, oxidaci a agresivnímu chemickému prostředí obecně
- výborné tribologické vlastnosti
- doplnění chybějícího materiálu, rozměru
- biokompatibilní, zdravotně nezávadné povlaky
- dekorativní povlaky
- elektroizolační a elektrovedivé povlaky
- tvorba kompozitních povlaků keramiky a kovu

#### 3.1 Princip technologie nanášení žárových nástřiků [59], [1], [29], [5], [51]

Podstatou technologie žárových nástřiků je nanášení nataveného přídavného materiálu na povlakovanou součást. Na začátku procesu je přídavný materiál přiváděn do zařízení, kde dojde k jeho natavení a následnému urychlení směrem k součásti. Po dopadu na relativně studenou součást dochází k výraznému plošnému rozprostření natavené částice a ochlazování. Výsledný povlak je charakteristický svou lamelární strukturou. Příznivým vlivem je fakt, že teplota povlakované součásti je hluboko pod teplotou fázových přeměn, což brání nežádoucím deformacím součásti. Jednotlivé fáze procesu žárového nástřiku jsou znázorněny na obr 24.



I - fáze vstupu přídavného materiálu do tepelného zdroje, II - fáze průletu vzdálenosti mezi hořákem a podložkou, III - fáze dopadu částice na podložku, IV - fáze vlivu přídavného materiálu na podložku  
1 - vstup přídavného materiálu do tepelného zdroje, 2 - stříkací pistole (hořák), 3 - povlak, 4 - podpovrchová oblast základního materiálu (podložky), 5 - základní materiál (podložka), 6 - paprsek nanášených částic

Obr. 24 Rozdělení procesu žárového nástřiku na jednotlivé fáze [5]

Každá z těchto fází má na výslednou kvalitu povlaku významný vliv, přesto lze z hlediska kvality nanášení nejvíce vyzdvihnout fázi týkající se průletu nanášených částí od vstupu do zdroje do jejich zakotvení na povrchu základního materiálu.

Zdrojem tepelné energie, potřebné k natavení přídavného materiálu je buď elektrická energie nebo spalovací proces. Z hlediska hodnocení využitelnosti jednotlivých typů energie je třeba zohlednit jistá kritéria jako maximální dosahovanou teplotu zdroje energie, tepelný obsah zdroje energie nebo plošnou hustotu energie. Z hlediska konstrukce zařízení se pak metody rozdělují na nástřik plamenem, elektrickým obloukem a plazmatický nástřik, u kterého se dosahuje nejvyšších pracovních teplot. Na kvalitu výsledného povlaku mají významný vliv použité procesní parametry.

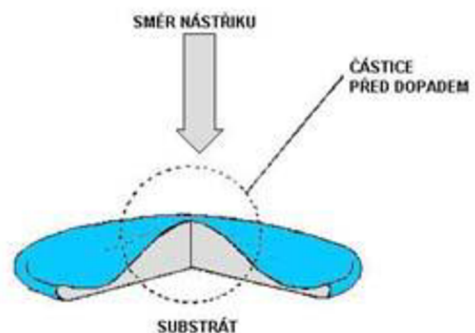
Mezi nejdůležitější parametry procesu patří teplota a rychlost plamene (resp. el. oblouku či plazmy) nebo také rychlost hnacího plynu. Vyšší rychlost plamene má za důsledek vyšší rychlost částice, která zvyšuje kinetickou energii částice a její výslednou plastickou deformaci, potřebnou k ideálnímu rozprostření přídavného materiálu. Další vlivné parametry jsou např. vzdálenost letu a úhel dopadu natavených částic, okolní prostředí (použití ochranné atmosféry, vakua), zdroj tepelné energie, rychlost posuvu hořáku během nástřiku, tvar výstupní trysky, druh přídavného materiálu aj.

### 3.2 Struktura žárového nástřiku [59], [1], [29], [5], [52], [51]

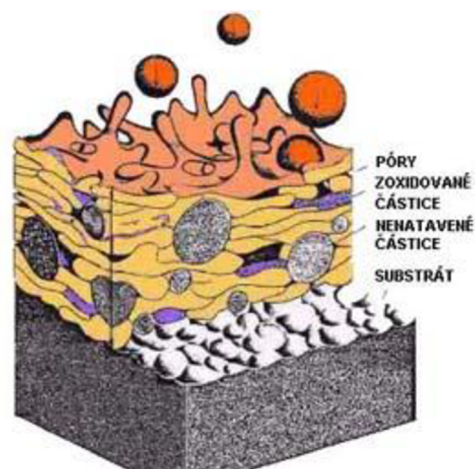
Bez ohledu na použitou technologii natavení přídavného materiálu má povlak z pravidla lamelární strukturu. Kromě požadovaně deformovaných, ztuhlých částic (tzv. splatů), které jsou do sebe navzájem mechanicky zakotveny, se ve struktuře povlaku nacházejí také nežádoucí nenatavené či pouze částečně natavené částice, oxidické vměstky a póry.

Oxidické vměstky jsou charakterizovány jako podlouhlé, tmavé útvary. Vznikají interakcí letící natavené částice s okolní atmosférou nebo na povrchu povlaku vlivem vysoké teploty. Jejich přítomnost je nežádoucí, jelikož s rostoucí tvrdostí je výsledný povlak křehčí a se zvyšující se koncentrací oxidů tak klesá kohézní pevnost povlaku. Z toho důvodu je zapotřebí obsah oxidů ve struktuře redukovat. K tomu se používá např. ochranné atmosféry inertních plynů, kdy nedochází k interakci s kyslíkem. Dalším způsobem je snížení teploty povrchu nástřiku, či snížení teploty částic omezením tepelné kapacity plamene. Vliv může mít také druh přídavného materiálu.

Další charakteristickou strukturní vlastností je porezita povlaku. Velká porezita je vnímána jako nežádoucí, jelikož je spojena s vysokou koncentrací nenatavených či pouze částečně natavených částic, což vede k nižší kohezi a následnému odlupování povlaku. Uvádí se, že pokud je obsah pórů vyšší než 10%, mohou se u protikorozních povlaků tvořit kanály pro průnik kyslíku a vlhkosti, které mohou zapříčinit korozi a oxidaci základního materiálu.



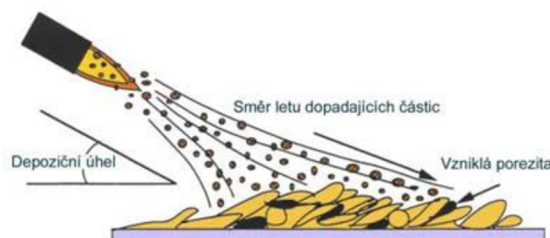
Obr. 25 Rozprostření splatu [29]



Obr. 26 Struktura povlaku [29]

Porézní povrch je zdrojem různých povrchových nehomogenit, důlků atp., jenž mohou být problémem např. u ložiskových spojení, kde je potřeba zrcadlově lesklého povrchu. Existují však také aplikace, kde je vyšší koncentrace porézity žádoucí – jedná se např. o povlaky tepelných bariér, pro filtrační účely nebo u samomazných výsterek ložisek, kdy jsou depoziční parametry voleny záměrně tak, aby se míra porézity pohybovala v intervalu 10-30%.

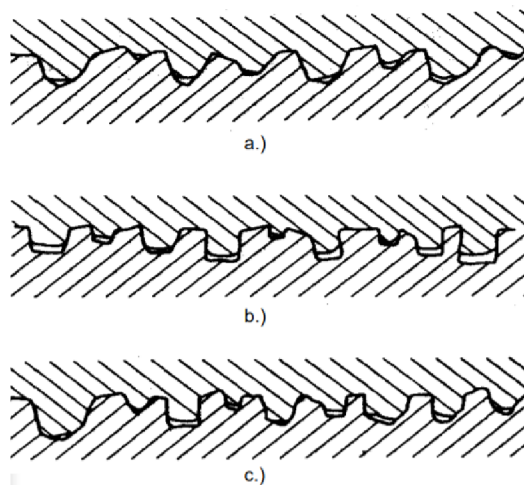
Z těchto důvodů je tedy zapotřebí porézitu řídit a kontrolovat. Eliminovat hlavní zdroj porézity – špatně natavené či nenatavené částice, je možno např. ovlivněním míry protavení přídavného materiálu. Dalším vlivem, ovlivňující porézitu je rychlost natavených částic. Platí, že se zvyšující se rychlostí částic klesá porézita vznikajícího povlaku, protože dochází k dokonalejšímu rozprostření deformované částice. K tzv. stínění dochází vlivem nástřiku pod ostrým úhlem, kdy povlak vykazuje zvyšující se porézitu (viz obr. 27). Mezní hodnota úhlu dopadu částic je 45°.



Obr. 27 Nástřik pod úhlem [29]

### 3.3 Vlastnosti žárových nástřiků a jejich měření [1], [29], [52], [5], [7], [23]

Jedna z nejdůležitějších vlastností povlaku je jeho přilnavost k základnímu materiálu. Tu lze definovat jako napětí dané síly potřebné k odtržení povlaku na definované ploše. Pro ideální zakotvení natavených částic na základní materiál je důležité jej správně upravit, tak aby k mechanickému zakotvení částic byly ideální podmínky. Jedná se zejména o očištění a odmaštění základního materiálu od nečistot a oxidů. Pro větší drsnost dopadové plochy se provádí trýskání. Přilnavost není pouze funkcí mechanického zakotvení, ale také sil vzájemného působení (Van der Waalsovy síly), sil chemických vazeb kovalentního a kovového druhu nebo metalurgickými procesy, probíhajícími v těsné blízkosti mikrosvarů či difuze. Z těchto mechanismů však mechanické zakotvení jasně převládá a má na adhezi k základnímu materiálu majoritní vliv. Závisí však také na použité technologii. Použitá technologie má také vliv na kohézní pevnost povlaku. Krom toho je z hlediska koheze potřeba zohlednit volbu přídavného materiálu, jelikož kovové povlaky mají obecně větší kohézní pevnost než materiály keramické. Nejnižších hodnot přilnavosti se dosahuje při nástřiku plamenem, kdy se přilnavost pohybuje okolo 10 MPa, nejvyšších pak u supersonických metod typu HVOF, kdy můžeme mluvit o přilnavosti cca 90 MPa. Pro vyhodnocení se vykonávají různé přilnavostní zkoušky.

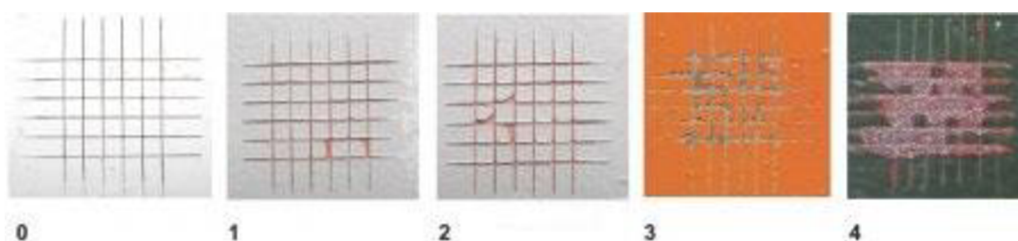


a) klínové spojení  
b) kotvové spojení  
c) smíšené spojení

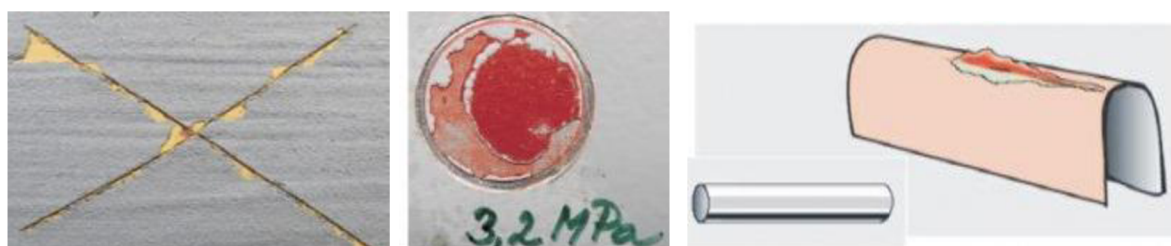
Obr. 28 Druhy spojení povlaku k substrátu [29]

*Mřížková zkouška přilnavosti* spočívá v proříznutí povlaku několika na sebe vzájemně kolmými řezy, které musí proniknout až na podkladový materiál. Vzdálenost jednotlivých řezů je závislá na tloušťce povlaku. Princip zkoušky spočívá v odlupování povlaku lepicí páskou a podle míry odlupování se vzorek klasifikuje. Jedná se o jednoduchou a snadno proveditelnou metodu, která je určena zejména pro povlaky s menšími tloušťkami.

Na podobném principu je založena *přilnavostní zkouška X řezem*, řezy se však provádí jen dva a ty se vzájemně protínají ve svém středu. Vyhodnocení se provádí taktéž pomocí lepicí pásky. Pro vyšší tloušťky povlaků je pro vyhodnocení vhodná tzv. *odtrhová zkouška*. Ta se provádí pro stanovení soudržnosti vrstvy povlaku, tedy pro zjištění maximálního smykového napětí (kdy dojde k odtržení). Výsledná přilnavost se udává v MPa a vypočítá se z plochy odtrhávaného povlaku a maximální síly. *Zkouška ohybem* se vykonává pro stanovení odolnosti povlaku při deformaci ohybem. Vyhodnocení se provádí vizuální kontrolou buď pouhým okem nebo pod lupou a hodnota přilnavosti je dána rozměrem trnu, při kterém se vzorek poškodí. Další technologickou přilnavostní zkouškou je *zkouška hloubením*, jenž se provádí v Erichsenově přístroji a výsledná hodnota se odečítá v momentu, kdy se objeví první trhlinky či odlupování.



Obr. 29 Průběh mřížkové zkoušky [23]



Obr. 30, 31 a 32 Zkouška X-řezem, Odtržená plocha, Ohyb přes válcový trn [23]

Další vlastností výsledného povlaku je jeho tloušťka. Ta je závislá na druhu přídavného materiálu a typu aplikace. Ku příkladu tenké povlaky okolo 0,05 mm se aplikují u plazmatických nástřiků hydroxyapatitu na dentální implantáty. Naopak tlusté povlaky do tloušťky 3 mm se provádí u tepelných bariér na bázi oxidů zirkonu. Z důvodu vzniku vnitřního pnutí platí, že s rostoucí tloušťkou povlaku klesá jeho přilnavost. Měření tlouštěk se provádí různými destruktivními i nedestruktivními způsoby. Destruktivní metody jsou vhodné u aplikací hromadného charakteru, navíc u vícevrstvých povlaků lze snadno měřit tloušťku každé vrstvy. Provádí se kolmý výbrus, měření probíhá při 100 až 250násobném zvětšení. Nedestruktivní metody jsou vhodné pro rychlá měření. Volba metody je závislá na vlastnostech měřeného povlaku, mimo jiné na tom zda se jedná o magnetický nebo nemagnetický povlak či základní materiál.

Pro velkou část aplikací (např. v automobilovém či leteckém průmyslu) je žádoucí hladký povrch, a tak se povlaky závěrečně opracovávají broušením. Není to však pravidlem, jelikož např. u elektroizolačních povlaků nebo u trubkových systémů kotlů je jistá hodnota drsnosti žádoucí a povrch se tak dále neopracovává. Drsnost povlaku souvisí s druhem přídavného materiálu, rychlostí dopadu a především velikostí natavených částic. Drsnosti povlaků žárových nástřiků tak mohou dle těchto parametrů dosahovat poměrně široký rozsah hodnot, na základě kterých se pak zvolí metoda měření.

Důležitou vlastností povlaků, využívaných pro tepelné aplikace (např. tepelné bariéry) je jejich tepelná roztažnost. Jako optimální stav lze považovat situaci, kdy je koeficient



tepelné roztažnosti přídavného a základního materiálu stejný. To však často neplatí - zejména u keramických materiálů, kdy jsou rozdíly koeficientů roztažnosti značné. Jako částečné řešení vyrovnání napětí je použití kovové mezivrstvy (typicky NiCr 80/20, NiCrAlY, NiAl 93/7).

Tvrdoost povlaku je nejvíce závislá na jeho chemickém složení, dále pak na použité technologii nástřiku a také zvolených technologických parametrech. Jedná se o základní kontrolovanou vlastnost, související se strukturou, odolností proti opotřebením, pevností a také životností povlaku. Jako zkouška makrotvrdoosti se běžně užívá metoda dle Rockwella, spočívající v měření hloubky vnutnutí indentoru. Mikrotvrdoost povlaků obvykle bývá hodnocena pomocí Vickersovy metody na příčném řezu povlakem. Při měření mikrotvrdoosti i makrotvrdoosti je nutné zohlednit tloušťku povlaku, která by měla být dle předpisu několikanásobně větší než hloubka vnutnutí. Další obecné vlastnosti, které se u povlaků sledují, jsou např. obrobitelnost a elektrické nebo magneticko-optické vlastnosti.

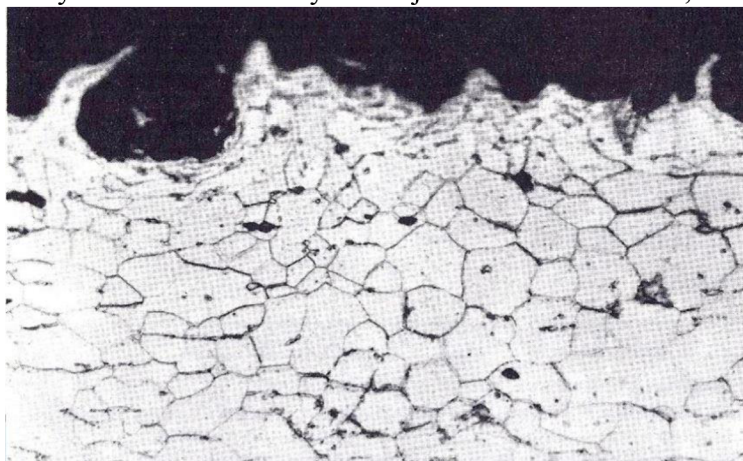
### 3.4 Obecný technologický postup žárových nástřiků [5], [29], [53], [54], [52]

Aby povlaky žárových nástřiků splňovaly kvalitu adekvátní k provozu v daných provozních podmínkách, je důležité splnit určitý postup a zásady, jenž mají na výslednou kvalitu povlaku nemalý vliv. Postup lze rozdělit na pět částí: vstupní kontrolu, přípravu povrchu základního materiálu před nanesením povlaku, samotný žárový nástřik, případné následné opracování nástřiku a závěrečnou inspekci.

*Vstupní kontrola* spočívá v kontrole povrchu a rozměrů součásti, kdy je zapotřebí zkontrolovat výskyt různých defektů povrchu (trhlin, prasklin aj.) či pozůstatků předchozí povrchové úpravy (zbytky nátěrů, povlaků). Také je potřeba zkontrolovat, jak rozměry součásti souhlasí s rozměry na výkrese, s uvážením budoucí tloušťky naneseného povlaku. Inspekce se týká také kontroly ovality, kuželovitosti a jiných rozměrových úchylek.

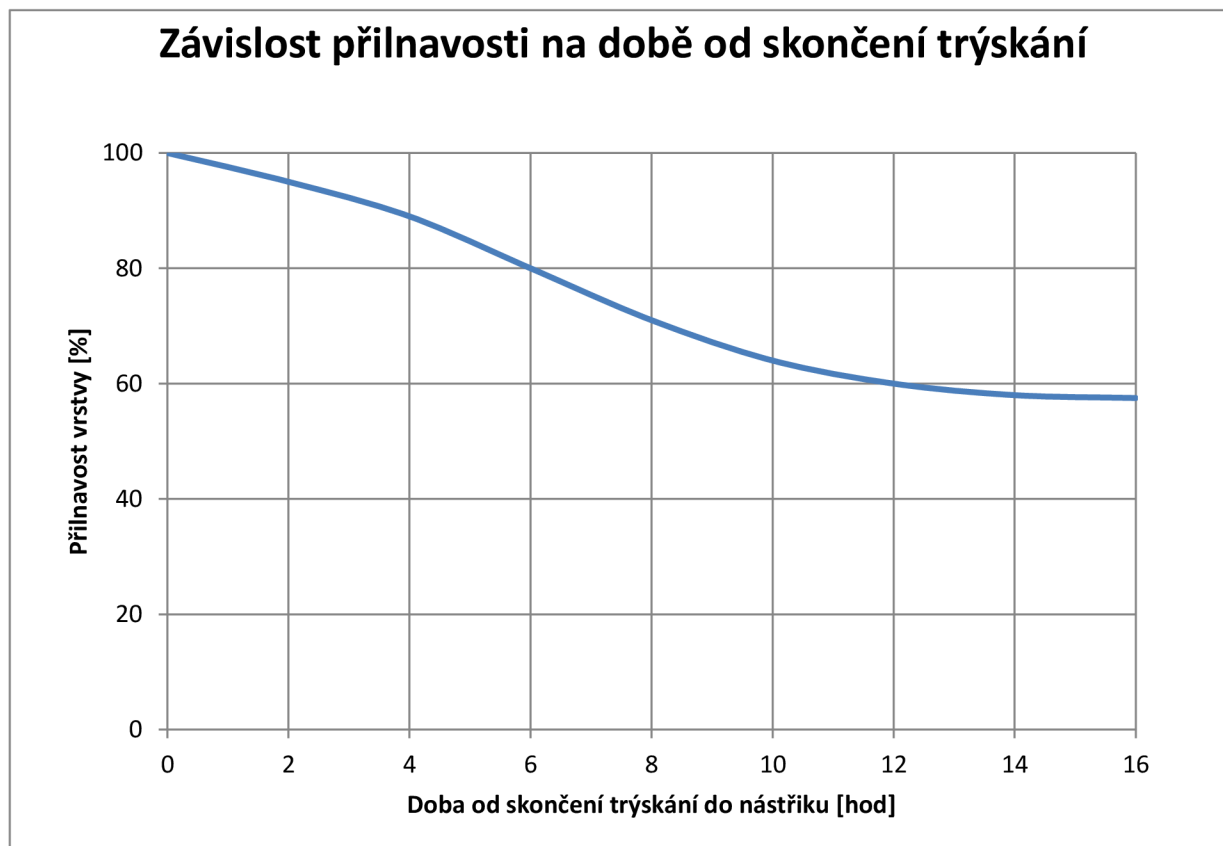
Velmi důležitou a nezastupitelnou roli, odrážející se na kvalitě výsledného povlaku, má *příprava povrchu součásti*. Povrch je zapotřebí důkladně odmastit a očistit od rzi a hrubých nečistot. Plochy, které přímo sousedí se stříkanou plochou je zapotřebí zakrytovat vhodnými prostředky (plechy, silikonová guma aj.). Je však důležité, aby krytování nijak nezasahovalo ani nestínilo do nanášené plochy.

*Tryskání* je nezbytnou operací před nanesením žárového nástřiku. Jeho účinek spočívá v odstranění oxidů a korozních zplodin, zdrsnění plochy (důležité pro mechanické zakotvení povlaku) a zvětšení kontaktní plochy mezi povlakem a základním materiálem. Zvýší se tak adhezní přilnavost povlaku a především dochází k přivedení povrchu do stavu termodynamické nerovnováhy s okolním prostředím, kdy se povrch podložky v důsledku uvolnění meziatomových vazeb povrchových atomů chemicky aktivuje. Vzhledem k tomu, že má tato aktivace z důvodu výrazné oxidace vzdušnou vlhkostí, snižující přilnavost omezenou životnost, je nutností provést samotný nástřik ideálně ihned po tryskání, nejpozději však do čtyř hodin. Znatelné je to z grafu na obr. 34, kde je zobrazena závislost přilnavosti naneseného povlaku na době žárového nástřiku od skončení tryskání.



Obr. 33 Struktura plochy tryskané umělým hnědým korundem [5]

Tato konkrétní závislost byla vyhodnocena výzkumem [5], přičemž jednotlivé hodnoty přilnavosti byly měřeny pro povlaky nanesené pomocí plazmové technologie nástřiku.



Obr. 34 Snížení přilnavosti povlaků vlivem oxidace povrchu podložky [5]

Jako tryskací médium lze použít více typů abrazivních materiálů na kovové i nekovové bázi. Často se využívá např. korund, karbid křemíku, křemenný písek nebo ocelová či litinová drť. Volba jednotlivého tryskacího média je kromě typu základního materiálu závislá také na materiálu nanášeného povlaku a velikosti a tvaru podložky. Nezanedbatelné je také hledisko ekonomičnosti a bezpečnosti práce. Na výsledný otryskaný povrch mají vliv jednotlivé parametry nastavení procesu. Výkon trýskání lze řídit velikostí zrn, tlakem, úhlem a vzdáleností trýskání, velikostí trysky či druhem otryskávaného materiálu. Dle ČSN EN ISO 8501-1 se tryskaný povrch rozděluje do čtyř stupňů:

- SA 1 – lehké otryskání:  
Při kontrole bez zvětšení nesmí být vidět mastnota a nečistoty, málo přilnavých okují, nátěrů a cizích látek
- SA2 – důkladné otryskání  
Povrch neobsahuje viditelné mastnoty, nečistoty a oleje. Je bez většiny okují, rzi, nátěrů a cizích látek.
- SA2 ½ - velmi důkladné otryskání  
Povrch je bez viditelných olejů, mastnoty, nečistot, rzi, okují, nátěrů a cizích látek. Zbylé stopy nečistot musí vykazovat pouze lehké zabarvení ve formě pruhů nebo skvrn. Využívá se pro aplikaci nátěrových hmot.
- SA3 – otryskání na vizuálně čistý povrch  
Bez viditelné mastnoty, olejů, nečistot, rzi, okují, nátěrů a cizích látek. Zbylé stopy nečistot mohou vykazovat pouze lehké zabarvení ve formě pruhů nebo skvrn. Povrch musí mít jednotný kovový vzhled. Aplikuje se před žárovými nástřiky.

Po tryskání následuje samotný *nástřík*. Součást je zapotřebí správně upnout, tak aby nedošlo k jejímu povolení a zároveň poškození (otlaky na plochách apod.). K upnutí se používají vhodné přípravky. Před samotným nástříkem je ještě zapotřebí zkontrolovat a připravit pracoviště. V případě drátu jako přídavného materiálu je důležité, aby byl rovný a plynule navinutý. Pokud je jako přídavný materiál použit prášek, je důležité předcházet tzv. slepování. To může nastat zejména u velmi jemných prášků (zrnění menší než 20  $\mu\text{m}$ ) a proto je nezbytné je přesušovat. Samozřejmostí je, že by prášky měly být tříděny a neměly by obsahovat žádná cizí tělesa. Parametry nastavení samotného nástříku se odvíjí od použité technologie nanášení. Společné je však to, že musí dojít k dostatečnému natavení přídavného materiálu a zároveň by nemělo docházet k nežádoucímu tepelnému ovlivnění a deformaci povlakované součásti. Někdy se do technologického postupu zahrnuje také nanesení vazné mezivrstvy, která se provádí zejména z důvodu lepší přilnavosti výsledného povlaku. Proto se pro tuto aplikaci využívají materiály, které vykazují velmi dobrou přilnavost jak k základnímu materiálu, tak k vnějšímu povlaku. Z důvodu větší styčné plochy, důležité pro dobré zakotvení mezivrstvy k povlaku se v případě použitého přídavného materiálu ve formě prášku používá prášků o hrubším zrnění, v případě drátů je hrubší povrch dosažen na základě způsobu odtavování. Pro tyto aplikace se často využívá materiálů na bázi niklu nebo molybdenu.

V průběhu nástříku se kontroluje teplota povlakové součásti, která by neměla přesáhnout 150°C (pokud tomu není stanoveno jinak). Důležité je také dodržovat úhel paprsku (ideálně kolmý) a rychlost posuvu hořáku. Pro lepší přesnost povlakování lze kontrolovat také aktuální tloušťku během nanášení. Konečné měření se provádí až po vychladnutí součásti, za pokojové teploty. Po operaci nástříku se odstraní všechno krytování a nežádoucí přestříky, tak aby byla zajištěna průchodnost všech zakrytovaných mazacích otvorů a drážek. *Závěrečná inspekce* pak spočívá v závěrečné kontrole rozměrů, vizuální kontrole povlakované součásti (celistvosti, deadheze, prasklin atd.), popř. zabalení vhodnými prostředky, jako ochranu proti poškození při převozu.

Přestože zásah do povrchu relativně slabého povlaku s řadou tvrdých fází může výrazně přispět k jeho porušení, někdy se povlaky, nanesené žárovým nástříkem dále opracovávají. Z toho důvodu je důležité nastavit řezné procesy tak, aby k nežádoucím narušením nedocházelo. Proto je nezbytné, vzít v úvahu vlastnosti lamelární struktury, jenž se od stejných materiálů v tvářeném nebo litém stavu značně liší. Zejména u pórovitějších a drsnějších povlaků lze počítat s přerušovaným řezem obrábění. Z důvodu velkého zatížení řezného nástroje se využívají zejména slinuté karbidy nebo keramické řezné materiály. Pro materiály s nižší tvrdostí se však využívá také rychlořezné oceli. V dalším případě je zapotřebí vhodně zvolit přísady na obrábění. Jejich velikost se odvíjí od požadované drsnosti a použité technologii žárového nástříku. Soustružení se typicky aplikuje u materiálů, které mají nízkou tvrdost a dobré plastické vlastnosti (např. materiály CuSn6 nebo CuAl). Naopak není vhodné pro přerušované řezy. Volba řezných podmínek se odvíjí od konkrétního materiálu, obecně lze však tvrdit, že bývá voleno vyšších hodnot řezné rychlosti a nižších hodnot posuvu. Nejčastějším způsobem opracování povlaků se doznalo broušení. Vzhledem k tomu, že broušením lze dosáhnout velice kvalitního povlaku s velkou geometrickou přesností, je metoda často upřednostňována před třískovým obráběním, zejména z toho důvodu, že nedochází k tak velkému namáhání povlaku jako je tomu např. při soustružení nebo frézování. Ve všech případech broušení je důležité využívat intenzivního chlazení, jelikož nedostatečné chlazení by mohlo způsobovat vznik sítě povrchových trhlin. Obroušený povrch nástříků bývá charakteristický otevřenou pórovitostí, která je ve struktuře vždy v jisté míře přítomna. Výběr brusného kotouče je závislý na tvaru broušených ploch a samozřejmě také materiálu povlaku. Pro keramické materiály jsou to často diamantové nástroje.

Z konstrukčního hlediska je při aplikaci žárových nástřiků nutno dodržovat důležité konstrukční zásady. Hrany by měly být zaoblené nebo zkosené, spoje ideálně tupé. Pro rovnoměrné nanesení nástřiku je dále důležité, aby daná součást neobsahovala úzké spáry, štěrbinu, kapsy, hluboké dutiny nebo ostré vnitřní úhly. Obecně je nutno, vyvarovat se spojům, ve kterých by se mohla hromadit vlhkost a nečistoty.

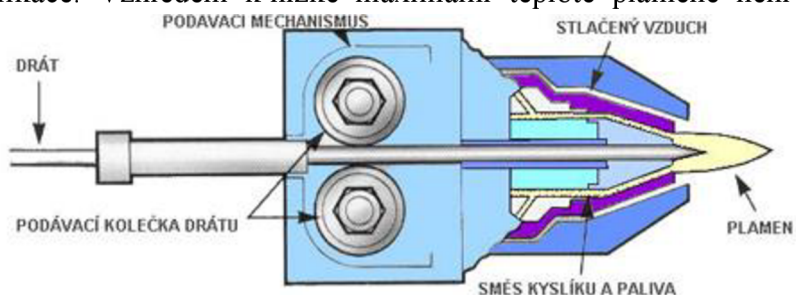
### 3.5 Uvedení a srovnání metod žárových nástřiků [1], [29], [52], [5], [55], [56]

Volba metody žárového nástřiku je důležitá pro konkrétní aplikaci povlakování. Jednotlivé metody se totiž liší procesními parametry, srovnání nabízí tabulka 2.

Tab. 2 Srovnání jednotlivých metod žárového nástřiku [29], [52]

Metoda	HVOF	Plasma	El. oblouk	Plamen
Forma materiálu	prášek	prášek	drát	prášek, drát
Teplota plamene [°C]	3000	5000 ÷ 25000	3000 ÷ 6000	2700 ÷ 3000
Rychlost částic [m/s]	400 ÷ 800	80 ÷ 300	50 ÷ 150	80 ÷ 100
Přilnavost [MPa]	40 ÷ 90	13 ÷ 50	10 ÷ 45	do 15
Pórovitost [%]	0,5 ÷ 3	2 ÷ 8	7 ÷ 15	10 ÷ 18
Typické materiály	kovy, cermety, slitiny	keramika	kovy, cermety, slitiny	kovy, slitiny, plasty
Vhodné aplikace	ochrana proti opotřebení, korozi	tepelné bariéry, izolátory	otěruvzdorné povlaky, renovace	méně náročné aplikace

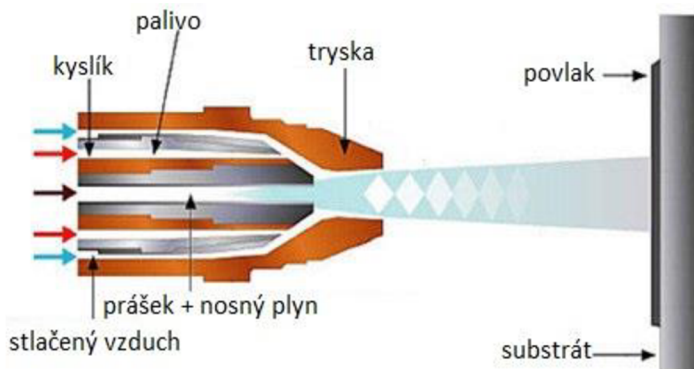
Nejstarší technologií je *nástřik plamenem*, kdy se mísí kyslík s palivem (acetylen, vodík, propylen) a jejich reakcí dochází k natavení přídavného materiálu. Ten může být ve formě drátu i prášku. Vzhledem k nízké výstupní rychlosti a energii plamene nedochází k optimálnímu urychlení částic přídavného materiálu a tedy ani optimálním rychlostem, které by zaručovaly dobré vlastnosti nanesených povlaků. Z toho důvodu je tato metoda vhodná zejména pro méně náročné aplikace. Vzhledem k nízké maximální teplotě plamene není metoda vhodná pro všechny druhy přídavných materiálů. Typickým příkladem využití jsou nízkotavitelné materiály jako hliník, bronz nebo zinek. Výhodou metody jsou nízké pořizovací i provozní náklady, či jednoduchost provedení.



Obr. 35 Schéma nástřiku plamenem [29]

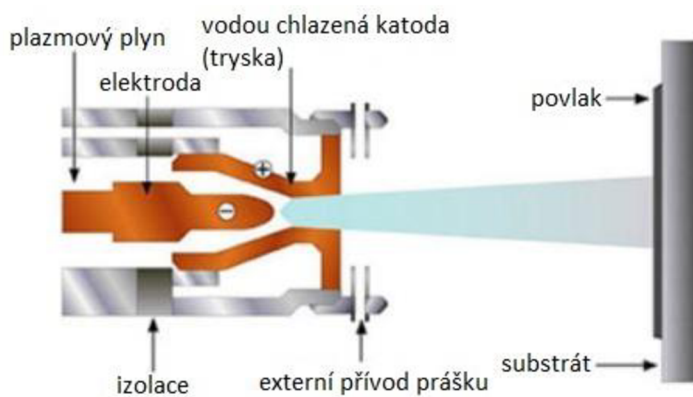
Princip *detonačního nástřiku* spočívá také v hořlavé reakci mísících se plynů. Proces však probíhá ve spalovací komoře, do které je přídavný materiál přiváděn ve formě prášku. Vzniklá směs plynů je diskontinuálně zapalována svíčkou. Oproti nástřiku plamenem dochází k vyšším procesním teplotám i rychlostem. Někdy se metoda označuje pod zkratkou D-gun. *Metoda HVOF* pracuje na stejném principu s rozdílem, že plnění spalovací komory a hoření plynů probíhá kontinuálně.

Produkty hoření jsou urychlovány v konvergentní trysce až k supersonickým hodnotám. Metoda je charakteristická vysokými rychlostmi částic, což má pozitivní vliv na jejich optimální rozptýlení. Výsledkem jsou povlaky o velké hustotě a výborné adhezi. Nevýhodou je však relativně nízká teplota plamene, která metodu HVOF omezuje např. pro nástřik keramických materiálů, kde by nedošlo k dostatečnému a následnému rozptýlení.



Obr. 36 Schéma HVOF nástřiku [55]

Pro tyto aplikace je vzhledem k vysokým provozním teplotám ideální technologie *plazmatického nástřiku*. Princip spočívá v hoření elektrického oblouku mezi vodou chlazenou wolframovou katodou a měděnou anodou, sloužící zároveň jako tryska hořáku. Stabilizace plazmového hořáku je uskutečňována buď pomocí kapaliny (voda) nebo ve většině případech plynu (obvyčejně argon, vodík nebo jiný inertní plyn).



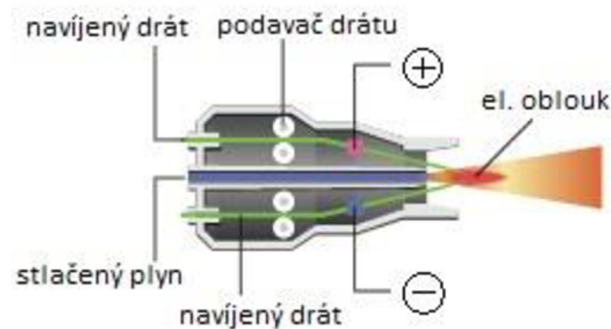
Obr. 37 Schéma plazmového nástřiku [56]

Přídavný materiál bývá v podobě prášku. Kromě keramiky je díky vysokým procesním teplotám možno nanášet všechny druhy materiálu od čistých kovů až po vysokotavitelné materiály. Nevýhodou vysoké teploty je však větší náchylnost k oxidaci, změně fázového složení nebo vyhořívání některých prvků během nástřiku.

Jednoduchou, ekonomickou a operativní metodu, založenou na principu tavení vodivého základního materiálu teplem *elektrického oblouku*, představuje technologie nástřiku elektrickým obloukem. Podrobněji je tato technologie popsána v následující kapitole 3.6.

### 3.6 Technologie nástřiku elektrickým obloukem [57; 58; 51; 29; 5; 52; 68; 50; 60; 61]

Historie metody sahá do počátku 20. století. Teplo elektrického oblouku, potřebné k natavení základního materiálu vzniká mezi dvěma přídavnými vodivými materiály, které jsou ve formě drátu (pro nástřik cermetů také ve formě trubiček). Ty jsou do tavicího procesu dopravovány kontinuálně pomocí podavače. Mezera mezi konci obou drátů, ve které dochází k zapálení oblouků je velká v řádech desetin milimetrů. Natavené částice jsou pak urychlovány pomocí stlačeného plynu. Nejčastěji se využívá stlačeného vzduchu nebo také netečných plynů jako je argon nebo dusík. Teplota plamene elektrického oblouku dosahuje dle zvolených procesních parametrů hodnot v rozmezí od 3000 do 6000 °C.



Obr. 38 Schéma žár. nástřiku el. obloukem [60]



Obr. 39 Praktická aplikace metody [61]

Protože se materiál taví přímo v oblouku, eliminuje se počet nenatavených částic a zefektivňuje se tak celý proces. Výkonnost metody dosahuje až 80 kg materiálu za hodinu, což je při relativně nízkých provozních cenách velice efektivní. Na rozdíl od ostatních metod nástřiků, dochází k tepelnému ovlivnění základního materiálu pouze vlivem tepla roztavených kapiček přídavného materiálu, dopadajících na povrch. Nedochozí tak k velkému tepelnému namáhání základního materiálu, které by mohly znamenat např. metalurgické změny na jeho povrchu. Na druhou stranu, částice přídavného materiálu se po opuštění oblouku rychle ochladí, což má krom ztráty teploty za následek také zvýšenou oxidaci. Řešením tohoto problému pak může být zkrácení vzdálenosti od substrátu nebo zvýšení toku stlačeného plynu.

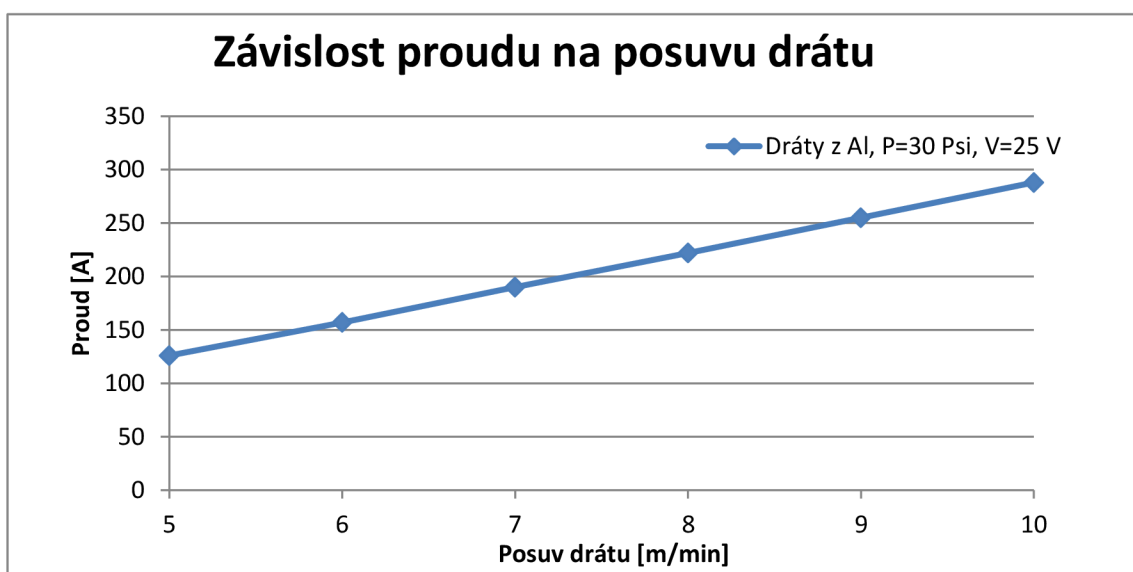
Z bezpečnostního hlediska je potřeba brát zřetel na přítomnost intenzivního infračerveného, ultrafialového a viditelného záření. Dalším bezpečnostním faktorem je nadměrný hluk, který může přesahovat bezpečnou hranici ([5] uvádí 104 dB při frekvenci 8 kHz). Zvláště nebezpečný je vývin nitrózních plynů.

Výsledné kvalitě povlaků napomáhá použití stlačeného plynu, který urychluje průlet natavených částic a zvyšuje produktivitu metody. Jako stlačený plyn se využívá zejména vzduch, ale v některých případech také dusík nebo argon. Interval rychlosti se pohybuje v rozmezí 50 ÷ 150 m/s (v závislosti na rychlosti hnacího stlačeného plynu, vzdálenosti nástřiku a také tvaru trysky), hustota nástřiku pak 80 ÷ 95 %.

V porovnání např. s plazmatickým či HVOF nástřikem se většinou dosahuje nižších hodnot adheze naneseného povlaku. Ta se pohybuje v rozmezí 10 ÷ 45 MPa. Stejně tak pórovitost nabývá vyšších hodnot. To je důvod, proč je metalizace obloukem pro některé aplikace omezena. Ovlivnit vlastnosti nanášeného povlaku lze ovlivnit těmito technologickými parametry:

- velikosti el. napětí
- velikostí el. proudu
- vzdálenosti nástřiku
- tlakem rozstřikovacího plynu
- množstvím přídavného materiálu
- úhlem nástřiku
- tvarem trysky zařízení

Platí, že velikost částic se zvyšuje se zvyšujícím se proudem, velikostí průměru drátu a nepřímo úměrně při snižujícím se napětí a tlaku vzduchu. Velikost elektrického napětí se v závislosti na přídavném materiálu pohybuje v intervalu od 18 do 40 V. Napětí lze nastavit přímo na zařízení. Oproti velikost proudu je dána ostatními parametry – napětím, tlakem plynu, materiálem drátu nebo rychlostí posuvu drátu do procesu. Vliv napětí na proud je charakterizován plochou voltampérovou charakteristikou se stoupající charakterem. V případě zvýšení tlaku plynu dochází zároveň k chlazení a tím pádem k poklesu teploty a vodivosti oblouku, což má za důsledek pokles elektrického proudu. V případě zvýšení rychlosti posuvu drátu do tavicího procesu (udávaného v m/min) roste množství nataveného drátu a současně se zvyšuje hodnota stříkacího proudu. Jak lze vidět z grafu na obr. 40, závislost proudu na posuvu drátu je lineárně rostoucí.



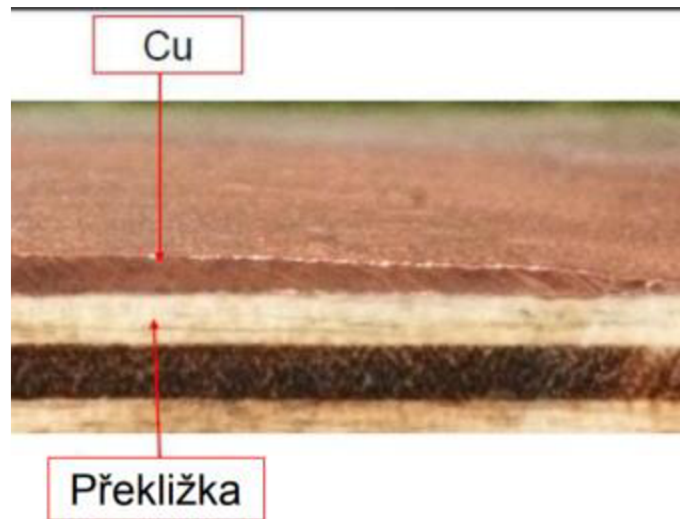
Obr. 40 Závislost proudu na posuvu drátu [50]

Při běžných operacích dosahuje elektrický proud hodnot zhruba od 50 do 300 A, ve speciálních případech však i více. Ke zmínce stojí např. metalizační zařízení Precision Arc 4,8 společnosti Thermion inc, jenž pracuje s drátem o průměru 4,8 mm, proudem 650 A, které je při stoprocentním zatěživateli schopno dosáhnout výkonu až  $30 \frac{m^2}{hod}$ . Konstantní napěťovou charakteristiku, zaručující souvislé hoření oblouku (podobně jako u svařování) zajišťují generátory stejnosměrného proudu. Při procesu může docházet k různým vadám a narušením

elektrického oblouku, vedoucí k nejednotnému hoření či neustálému přestavování, které často způsobuje např. proud stlačeného plynu, elastické napětí drátu apod.

Jak již bylo uvedeno výše, přídavné materiály jsou vždy ve formě drátu s podmínkou vodivosti a také tvárnosti, požadované k zhotovení drátu. Typickou aplikací je nástřik povlaků, odolných proti korozi – ty bývají většinou na bázi zinku, hliníku, mědi či korozivzdorné oceli. Často se aplikuje u rozměrově velkých součástí (mostní konstrukce, komponenty námořních lodí atd.). Pro nástřik cermetů (otěruvzdorné povlaky) se jako přídavný materiál používají trubičkové dráty. Tloušťky nanesení povlaků se pohybují řádově od desetin až po jednotky milimetrů.

Vzhledem k tomu, že nedochází k výraznému tepelnému ovlivnění základního materiálu, upřednostňuje to metodu k aplikacím nástřiku základních materiálů, u kterých je tepelné ovlivnění nepřipustné (např. dřevo, polymery, kovy s nízkou teplotou tání atd.). Konkrétní aplikaci zobrazuje obr. 41, kde je zobrazen nástřik měděného povlaku na dřevěnou překližku.



Obr. 41 Nástřik Cu povlaku na překližku [52]



## 4 Experimentální část

Tato kapitola zahrnuje praktickou část této práce. Podkapitola 4.1 popisuje technologický postup žárového nástřiku a nanášený přídavný materiál. Podkapitola 4.2 pak pojednává o jakosti naneseného povlaku. Součástí je měření tloušťky, přilnavosti, drsnosti a nasnímání makrostruktury povlaku.

### 4.1 Technologický postup

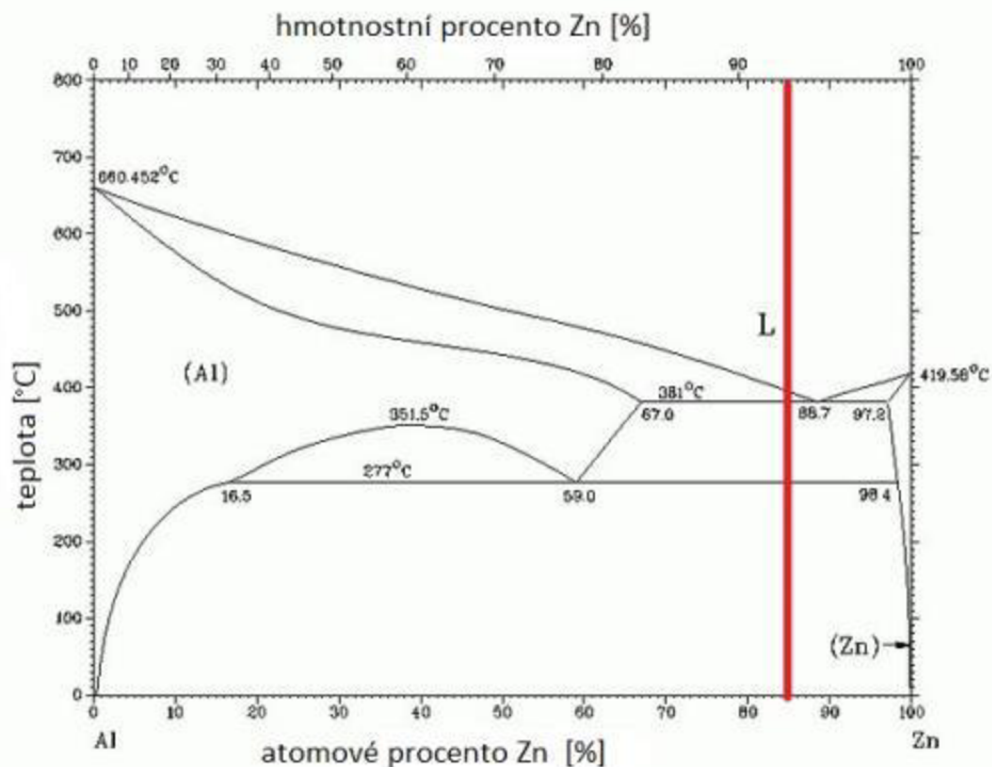
Přepis protokolu žárového nástřiku se zadanými parametry je zobrazen v tabulce 3. Tyto parametry nástřiku byly zvoleny pro nanášení čtyř vzorků, které se v daném rozsahu lišily provozním napětím, proudem a vzdáleností nástřiku. Ostatní parametry byly zvoleny identicky. Zadaná minimální tloušťka povlaku byla stanovena na 250  $\mu\text{m}$ . Každý ze čtyř vzorků byl nanášen manuálně jiným pracovníkem.

Tab. 3 Návrh parametrů žárového nástřiku

Praktická zkouška nástřiku - elektrický oblouk dle ČSN EN 14 918		
Podmínky zkoušky		
Tryskání	Typ tryskacího zařízení	Airblast ABSC 200
	Tryskací prostředek	Ocelová drť GL18
	Tlak tryskacího vzduchu [bar]	6
	Úhel tryskání [°]	90
Nástřik	Typ stříkacího zařízení	MARGARIDO M45
	Typ přídavného materiálu	Silesia tavba 618026
	Rozsah napětí U [V]	20 až 25
	Rozsah proudu I [A]	130 až 160
	Průměr drátu [mm]	2
	Průměr trysky vzduchu [mm]	4
	Tlak vzduchu [bar]	6,5
	Rozsah vzdálenosti nástřiku L [mm]	230 až 260
	Předehřev zákl. materiálu [°C]	NE
	Úhel nástřiku [°]	90
Vyhodnocení povlaku	Druh zákl. materiálu	S 245
	Rozměry zákl. materiálu [mm]	L - 150x150 1-500
Poznámky	Maximální teplota zákl. materiálu 150°C	

#### 4.1.1 Charakteristika přídavného materiálu [8], [62], [72]

Jako přídavný materiál byl zvolen Zinacor 850, což je povlak o koncentraci 85% zinku a 15% hliníku. Jedná se o povlak s elektrochemickou funkcí (katodickou ochranou), kterou zajišťuje přítomnost zinku. Přísada hliníku plní funkci pasivity povlaku a navíc zvyšuje mechanickou odolnost. Tato kombinace zajišťuje povlakovaným součástem dlouhou životnost i v korozně agresivnějších prostředích. Používá se např. pro součásti větrných elektráren, mostních konstrukcí, lodí či pozemní dopravy. Z možných technologií pro nanesení tohoto druhu povlaku se kromě žárového nástřiku elektrickým obloukem nabízí také žárový nástřik plamenem a je dostupný vždy ve formě drátu. Fázový diagram slitiny zinku a hliníku je zobrazen na obr. 42, kde červená čára zvýrazňuje složení Zinacoru 850.



Obr. 42 Fázový diagram slitiny zinku a hliníku [62]

Mezní hodnoty jednotlivých prvků jsou zobrazeny v tabulce 4. Toto složení splňuje normu DIN EN ISO 14919 pro slitiny ZnAl15. Dále tabulka 5 zobrazuje mechanické vlastnosti povlaku uváděné výrobcem.

Tab. 4 Složení a mezní hodnoty prvků povlaku Zinacor 850 [8]

Prvek	Zn	Al	Pb	Cd	Pb+Cd
Koncentrace [%]	84-86	14-16	max 0,003	max 0,001	max 0,004
Prvek	Sn	Fe	Cu	Si	ostatní
Koncentrace [%]	max 0,001	max 0,015	max 0,002	max 0,01	max 0,03

Tab. 5 Mechanické vlastnosti povlaku Zinacor 850 [8]

Pevnost v tahu Rm	Mez kluzu Rpo2	Tažnost	Hustota	Rozsah tavení
110-150 MPa	80-130 MPa	min. 50%	5,73 g/cm <sup>3</sup>	382-450 °C

#### 4.1.2 Příprava povrchu [63], [5]

Vzorky byly nejprve odmaštěny v acetonu. Samotné tryskání bylo provedeno v tryskacím kotli Airblast ABSC-200 (obr. 43 a 44). Ten je charakterizován konkávní hlavou a kuželovitým dnem, umožňujícím hladké proudění všech druhů abraziv a jednoduché plnění. Rozměry zařízení v poměru průměru k výšce činí 850x1450 mm. Maximální možný objem je 200 l a maximální hmotnost 161 kg.

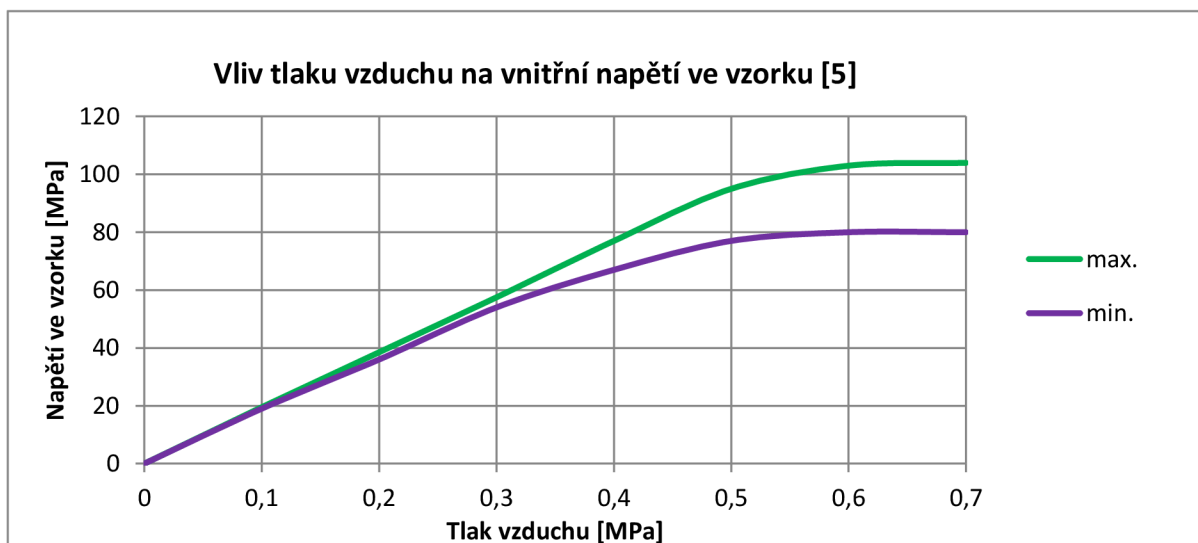


Obr. 43 a 44 Tryskací zařízení Airblast ABSC-200

Tryskací tlak byl nastaven na hodnotu 6 bar (0,6 MPa), kolmo na základní materiál. Důvod užití této hodnoty tryskacího tlaku je patrný z grafu závislosti tlaku vzduchu na vnitřním napětí ve vzorku (obr. 46). Ten byl získán výzkumem [5], kdy bylo měřeno maximální a minimální napětí ve vzorku. Ze závislosti je patrné, že při tlaku nad 0,6 MPa již nedochází ke potřebnému zvýšenému napětí ve vzorku.

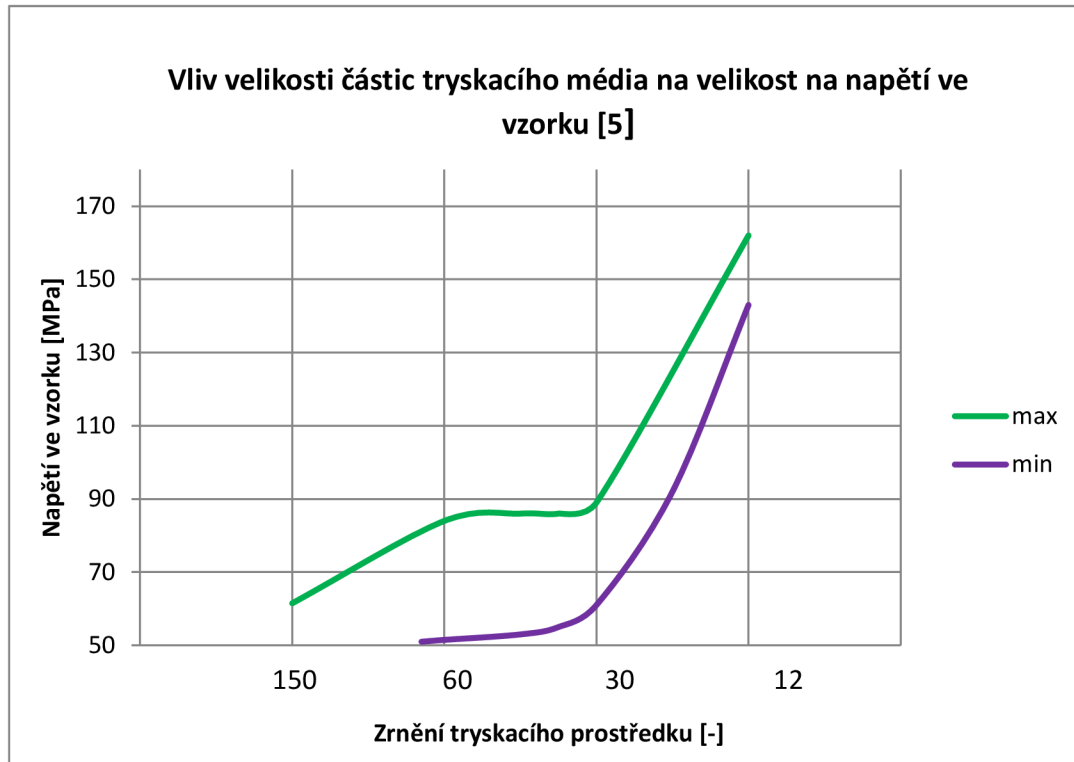


Obr. 45 Otryskaný materiál



Obr. 46 Závislost vlivu tlaku vzduchu na vnitřní napětí ve vzorku [5]

Dále ze závislosti na obr. 47 vyplývá, že s klesajícími hodnotami zrnitosti (výzkum [5] počítá s tryskacím médiem v podobě korundu), nebo-li s rostoucími hodnotami velikostí částic tryskacího média potřebné vnesené napětí ve vzorku stoupá. Zároveň je však zapotřebí zohlednit fakt, že také roste jeho nerovnoměrnost a drsnost podložky. V případě tohoto experimentu bylo jako tryskací médium zvoleno ocelové drti se zrnitostí GL18.



Obr. 47 Závislost velikosti tryskacího média na velikosti napětí ve vzorku [5]

Hlavním požadavkem však bylo, aby otryskaný povrch dosáhl vizuálně čistého povrchu bez nečistot a jednotným kovovým vzhledem, který norma ČSN EN ISO 8501-1 kvalifikuje jako stupeň SA3, což je pro tryskání před žárovými nástřiky standardní požadavek (viz kapitola 2.5).

### 4.1.3 Žárový nástřik [64]

Pro nanesení žárového nástřiku bylo užito metalizačního zařízení MARGARIDO M45. To pracuje s maximálním příkonem 11,8 kW. Tavící napětí zařízení se v rámci nastavení může pohybovat v intervalu od 23 do 35 V. Maximální proud lze krátkodobě nastavit až na hodnotu 450 A. Typickým využitím jsou protikorozní povlaky na bázi zinku, hliníku, mědi nebo mosazi. Průměr tavícího drátu bývá typicky 1,6 mm, ale používá se také průměrů 2,0 a 2,5 mm. Minimální nastavitelný tlak vzduchu je 6 bar, maximální 10 bar se spotřebou 80 m<sup>3</sup>/hod. Chlazení zdroje je uskutečňováno vnitřním ofukováním stlačeným vzduchem.



Obr. 48 Metalizační zařízení MARGARIDO M45

Samotný žárový nástřik byl manuálně nanesen na čtyři zmíněné vzorky. Jak plyne z tabulky 3, tlak vzduchu pro urychlení částic byl zvolen na 6,5 bar. Průměry drátů činily 2 mm. Parametry zvoleného napětí, proudu (nastaveným nepřímo v závislosti na rychlosti posuvu drátu) a vzdálenosti nástřiku se pro každý ze čtyř nástřiků lišily v daném rozmezí, uvedeném v tabulce 3 ( $U = 20 \div 25$  V,  $I = 130 \div 160$  A,  $L = 230 \div 260$  mm). Dalším požadavkem bylo, že teplota povlakované součásti nesměla během nástřiku překročit 150°C.



Obr. 49 Aplikace žárového nástřiku



Obr. 50 Stříkáč pistole



Obr. 51 Nastříkaný vzorek č. 2

## 4.2 Měření jakosti povlaku

Jedním z hlavních úkolů této práce bylo změřit a zhodnotit dané vlastnosti povlaku. Konkrétně se jednalo o měření tloušťky, přilnavosti, drsnosti a také nasnímání makrostruktury povlaku. Vzhledem k tomu, že se tyto vlastnosti povlaku vzájemně ovlivňují a úzce spolu souvisí, bylo nutno tyto výsledky porovnat, zejména v případě extrémních hodnot anebo nesrovnalostí mezi jednotlivými vzorky (tloušťka a přilnavost povlaku byla měřena pro všechny čtyři vzorky).

### 4.2.1 Měření tloušťky [24], [65]

Měření bylo prováděno v dílenském areálu ÚST VUT. Tloušťka povlaku byla měřena na každém ze čtyř vzorků celkem dvacetkrát (desetkrát na každé z obou stran L-profilu). Jako měřící zařízení bylo použito Positector 6000, které pracuje na magnetickém principu. Zařízení se skládá ze sondy a těla přístroje. Sonda určuje volbu měřené veličiny, její přesnost a rozsah (fyzikální vlastnosti měření). Tělo přístroje určuje organizační a matematické zpracování výsledků měření (přenos, uchování a zpracování měřených dat). Postup měření spočívá v kalibrování (vynulování) přístroje na feromagnetickém materiálu (v případě experimentu konstrukční ocel). Poté je již možno sondu přiložit k měřenému povlaku, naměřené hodnoty tloušťky se pak v  $\mu\text{m}$  zobrazují na displeji těla přístroje.



Obr. 52 a 53 Měření tloušťky povlaku

Tab. 6 Naměřené hodnoty tloušťky povlaku [ $\mu\text{m}$ ]

Vzorek/Číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	260	272	320	430	266	280	366	548	552	340
2	352	428	454	526	428	496	418	422	460	414
3	414	628	482	662	584	440	456	514	620	662
4	414	522	334	378	474	352	310	254	280	230
1	502	540	468	430	332	518	344	484	514	390
2	564	618	716	866	580	840	658	834	624	610
3	448	658	340	620	444	682	498	628	452	548
4	386	278	256	182	414	546	342	480	434	334

Pro přesnější interpretaci dat a porovnání jednotlivých vzorků bylo potřebné provést základní statistické výpočty naměřených hodnot. Pro porovnání vzorků byla vypočtena průměrná tloušťka povlaku dle vzorce aritmetického průměru:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (4.1)$$

$X_i$  – i-tá naměřená hodnota tloušťky

$n$  – počet všech měření tloušťky pro každý vzorek

Naměřené hodnoty se navíc liší v relativně vysokém intervalu. Pro srovnání odlišnosti naměřených hodnot byla dále vyhodnocena výběrová směrodatná odchylka:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.2)$$

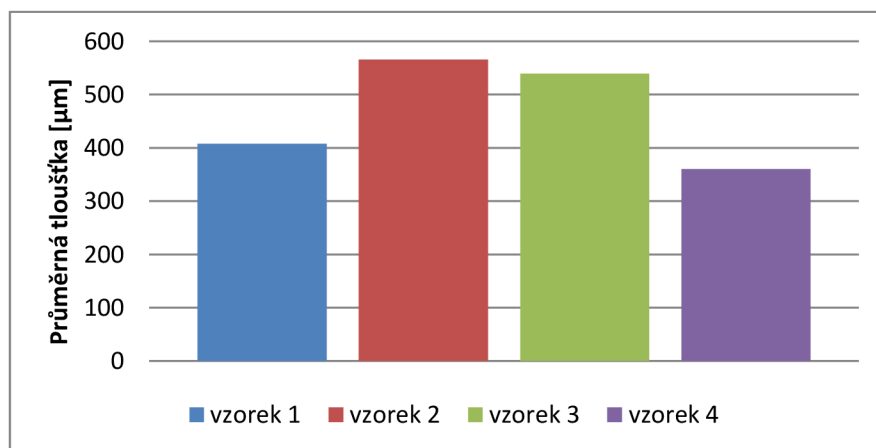
Pro přehlednější procentuální srovnání mezi jednotlivými vzorky bylo použito výpočtu variačního koeficientu:

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (4.3)$$

Tab. 7 Vypočtené hodnoty aritmetického průměru, směrodatné odchylky a variačního koeficientu

Vzorek/Vypočtená hodnota	Aritmetický průměr $\bar{x}$ [ $\mu\text{m}$ ]	Směrodatná odchylka $s$ [ $\mu\text{m}$ ]	Variační koeficient $v$ [%]
Vzorek 1	407,8	102,99	25,26
Vzorek 2	565,4	154,91	27,40
Vzorek 3	539	102,16	18,95
Vzorek 4	360	99,62	27,67

Dle naměřených 20 hodnot bylo nejvyšší průměrné tloušťky povlaku vyhodnoceno u vzorků č. 2 s hodnotou 565,4  $\mu\text{m}$ . Oproti tomu vzorek č. 4 s nejnižší hodnotou průměrné tloušťky 360  $\mu\text{m}$  byl tak o 36% nižší. Grafické srovnání průměrných tlouštěk je zobrazeno na obr 54. Variační koeficienty, charakterizující procentuální kolísavost naměřených hodnot dosahují v případě vzorků č. 1,2 a 4 hodnot v intervalu od 25,26 do 27,67 %. V případě vzorku č. 3 je variační koeficient mírně nižší o hodnotě 18,95 %.



Obr. 54 Grafické srovnání průměrných tlouštěk mezi vzorky

#### 4.2.2 Měření přilnavosti [66], [5]

Pro měření přilnavosti naneseného povlaku bylo použito zařízení Comtest OP1-P20. To pracuje na principu odtrhových zkoušek, tzn. na principu měření tahové pevnosti kolmo k povlaku. Pro vyhodnocení zkoušky bylo zapotřebí použít tzv. terče, které se na měřené místo přilepily. V případě experimentu byly pro každý vzorek použity terče tři. Pro každý vzorek bylo tedy vyhodnoceno třech měření. Po tom, co se terče na vzorek nalepily, bylo zapotřebí počkat než lepidlo dostatečně vytvrdne (konečná pevnost použitého lepidla ERGO 7430 se udává 3 dny). Poté, ještě před samotným měřením přilnavosti, bylo nutno okolí po obvodu terče proříznout ruční frézou až do hloubky k základnímu materiálu. Tím se zajistila přesná měřicí plocha. Terče obsahují díru se závitem, potřebnou ke spojení k odtrhoměru.



Obr. 55 Proříznutí okolí terče ruční frézou

Dalším krokem bylo už samotné měření hodnot přilnavosti povlaku. Odtrhový přístroj bylo nejprve zapotřebí našroubovat do závitové díry terče. Po přiměřeném dotažení následuje otáčení vratidla, čímž dochází k tahovému zatížení terče a na displeji zařízení pak lze vidět první hodnoty napětí a jejich pomalý nárůst. Pokud je otáčení vratidla příliš rychlé a pracovník překročí daný limit (v N/s), zařízení vydá zvukový signál jako varování a otáčení je tak nutno zpomalit. Tento postup se uplatňuje až do odtržení terče, kdy je z displeje nutno opsat výslednou hodnotu přilnavosti povlaku v MPa. Ve skutečnosti odtrhový přístroj neměří napětí, ale pouze tahovou sílu působící na terč. Vzhledem k tomu, že je plocha terče v přístroji zadána, dle měřené síly se hodnoty přilnavosti automaticky dopočítávají.



Obr. 56 Zašroubování odtrhoměru do terče



Obr. 57 Proces postupného trhání terče



Obr. 58 Výsledná hodnota na displeji





Obr. 59 Terče vzorku 1 po zkoušce

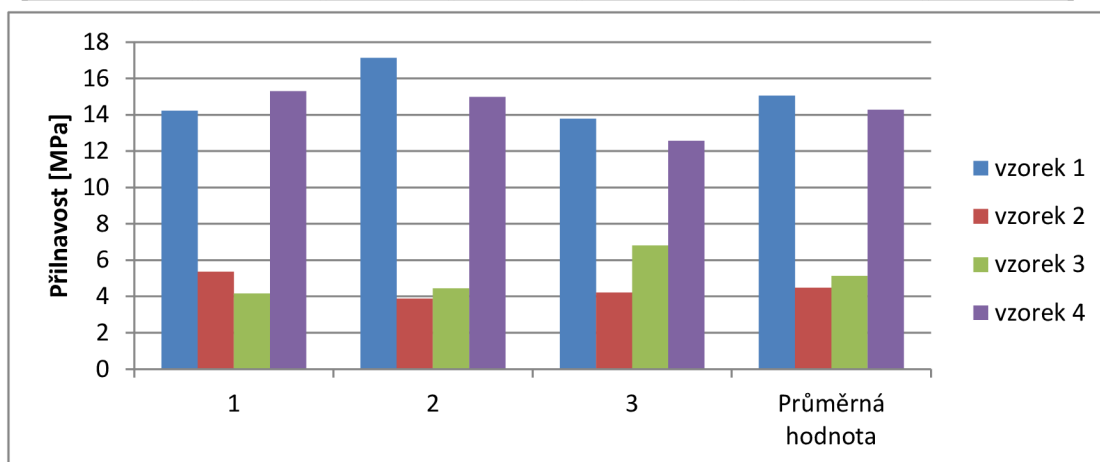


Obr. 60 Vzorek 1 po přilnavostní zkoušce

Naměřené hodnoty byly zaznamenány do tabulky 8. Pro každý ze čtyř vzorků byly vyhodnoceny tři měření, což znamená, že celkem bylo provedeno 12 měření. Naměřené hodnoty jsou v MPa. Stejně jako u měření tloušťky byly vypočtena také průměrná hodnota, směrodatná odchylka a variační koeficient pro každý vzorek. Zde je nutno podotknout, že pro přesnější statistické vyhodnocení by bylo zapotřebí větší množství naměřených hodnot.

Tab. 8 Naměřené hodnoty přilnavosti a vypočtené statistické charakteristiky [MPa]

Vzorek /Číslo měření	1 [MPa]	2 [MPa]	3 [MPa]	Průměrná hodnota [MPa]	Výběrová směrodatná odchylka [MPa]	Variační koeficient [%]
Vzorek 1	14,22	17,12	13,79	15,04	1,81	12,04
Vzorek 2	5,37	3,89	4,21	4,49	0,78	17,34
Vzorek 3	4,16	4,44	6,8	5,13	1,45	28,25
Vzorek 4	15,29	14,98	12,56	14,28	1,49	10,47



Obr. 61 Grafické porovnání naměřených hodnot přilnavosti [MPa]

Jak lze vidět i z grafického srovnání na obr. 61, přilnavost se mezi jednotlivými vzorky značně lišila. U vzorků 1 a 4 dosahovaly průměrné hodnoty přilnavosti okolo 15 MPa (15,04 MPa a 14,28 MPa), oproti tomu u vzorků 2 a 3 okolo 5 MPa (4,49 MPa a 5,13 MPa), což znamená téměř 200% rozdíl mezi těmito dvojicemi vzorků. Oproti tomu, při pohledu na konkrétní tři měření v rámci každého vzorku, se měření zejména u vzorků s označením 1 a 4 s vyššími přilnavostmi (kde činil variační koeficient 12,04% a 10,47%) relativně shodovaly.

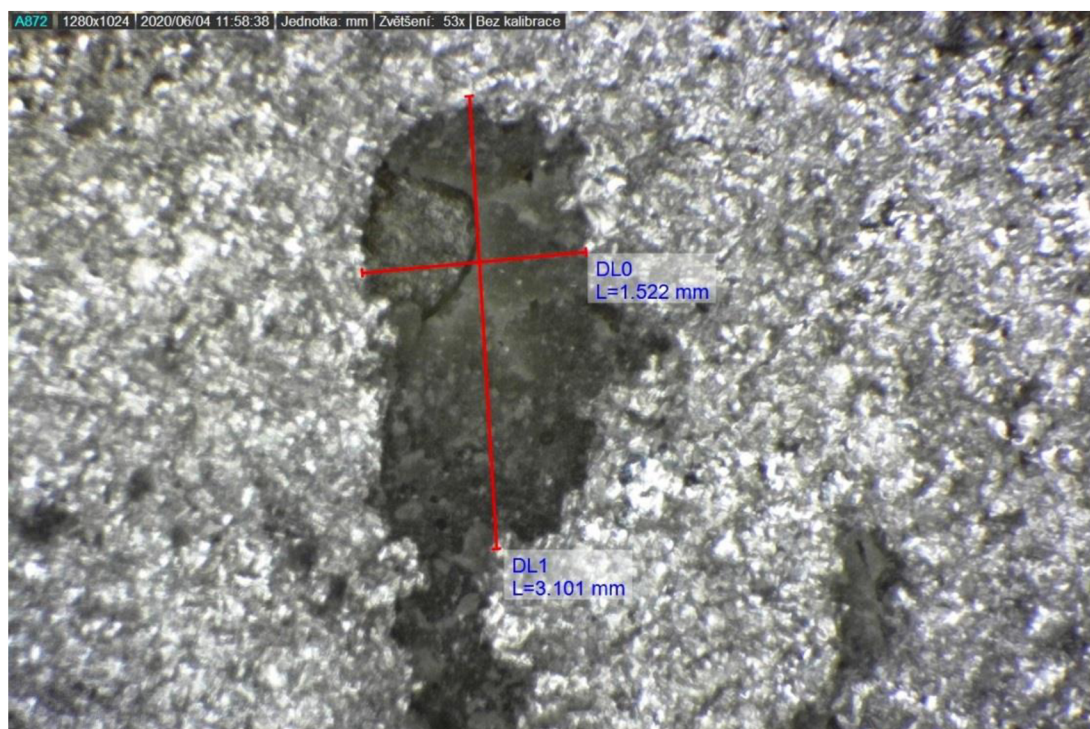
Větší kolísavosti naměřených hodnot bylo sledováno u vzorků s nižší přilnavostí, s označením 2 a 3, kde variační koeficient dosahoval 17,34% a 28,25%.

Při pohledu na utržené terče po přilnavostní zkoušce, bylo u terčů vzorků č. 1 a 4 sledováno zbytků lepidla. Oproti tomu zbylé dva terče pro měření přilnavosti vzorků č. 2 a 3, které vykazovaly přilnavost značně nižší, žádné zbytky lepidla neobsahovaly.

To může svědčit o lokálně nižší tahové pevnosti lepidla než samotné přilnavosti povlaku. Tato odlišnost je viditelná ve srovnání na obr. 62. Detailní snímky zbytků lepidla na odtrhované ploše s rozměry jsou zobrazeny na obr. 63 (pro terč vzorku 1 s rozměry DL0 = 1,522 mm a DL1 = 3,101 mm) a obr. 64 (pro terč vzorku 4 s rozměrem DL0 = 3,217 mm).



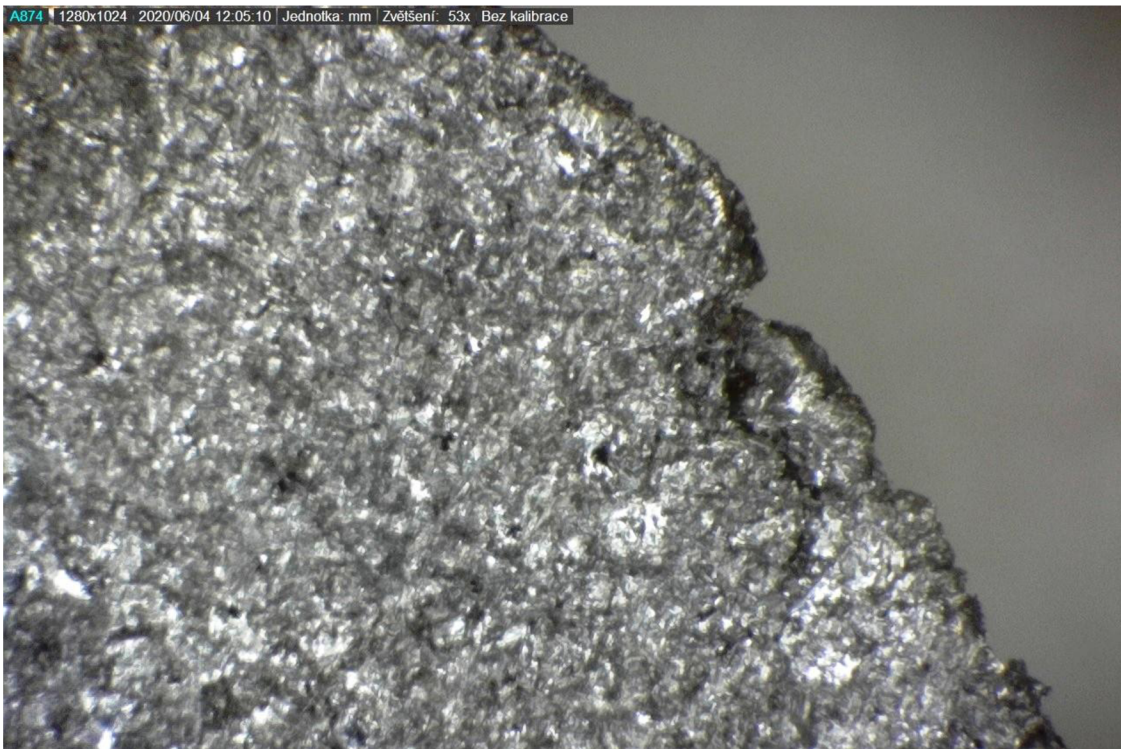
Obr. 62 Vizuální srovnání odtržených ploch terčů pro měření přilnavosti povlaku



Obr. 63 Detail zbytku lepidla na terči pro vzorek č. 1

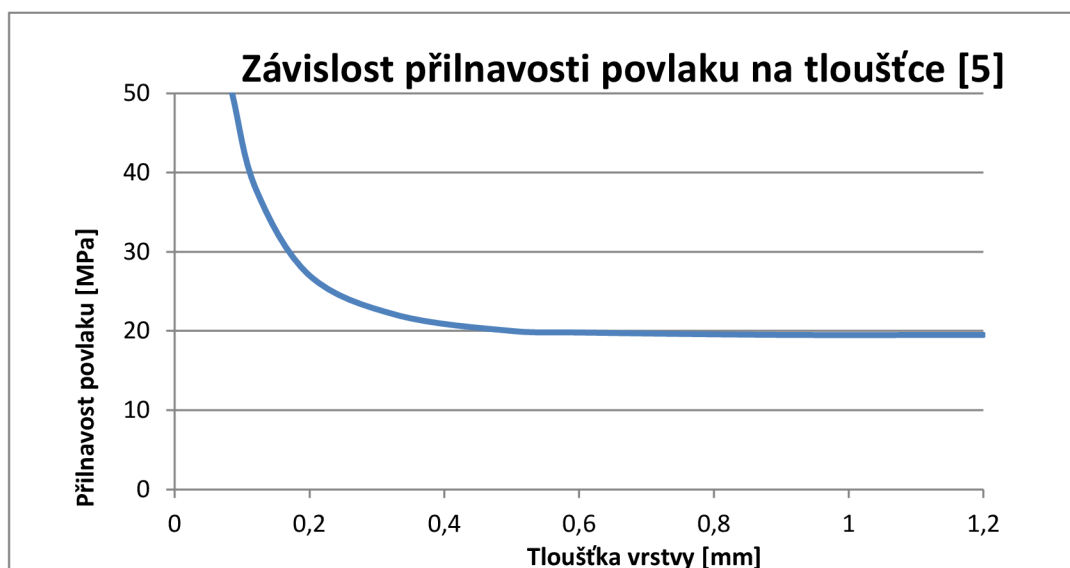


Obr. 64 Detail zbytku lepidla na terči pro vzorek č. 4



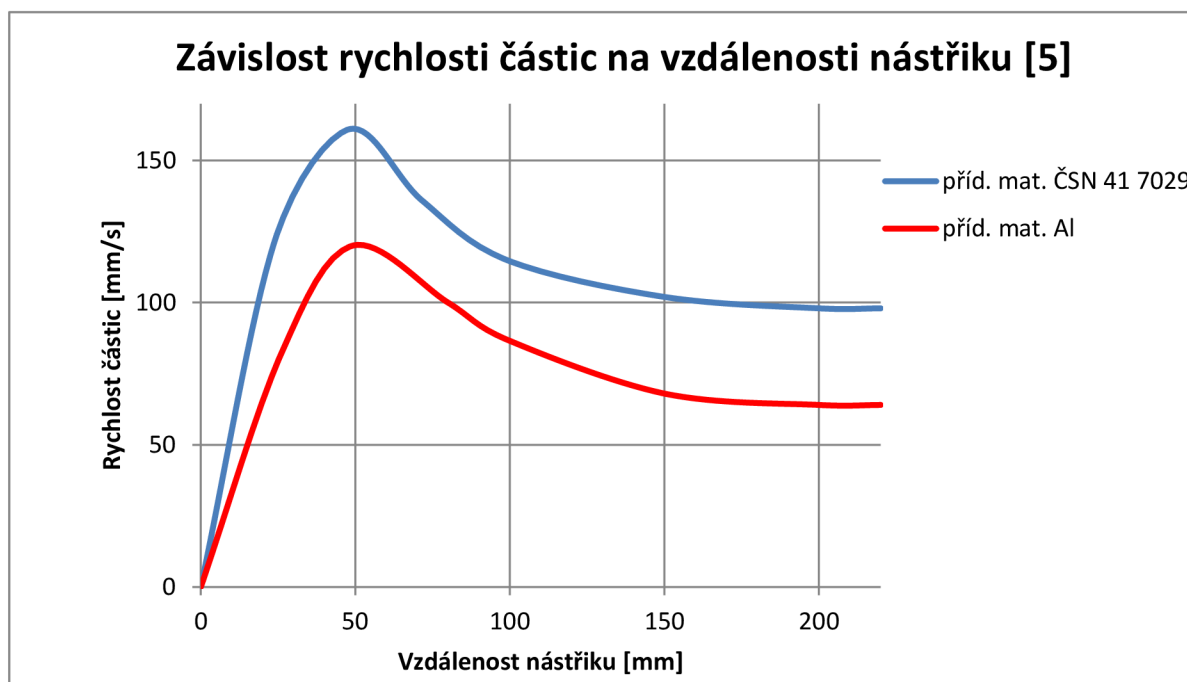
Obr. 65 Detail plochy odtrženého terče č. 2 bez zbytků lepidla

Rozdílná přilnavost může mít různé příčiny. Přilnavost povlaku totiž ovlivňuje více veličin. Zásadním vlivem je tloušťka povlaku. Ze závislosti na obr. 66 z výzkumu [5] lze vidět prudkou klesající tendenci přilnavosti v hodnotách tloušťky cca od 0,1 mm do 0,4 mm (což z velké části koresponduje s naměřenými hodnotami), s dalším nárůstem tloušťky už se hodnoty přilnavosti téměř nemění. Výzkum byl proveden pro materiál ČSN 41 1523 (11 523).



Obr. 66 Závislost přilnavosti povlaku na tloušťce vrstvy [5]

Přilnavost je také nepřímo závislá na vzdálenosti nástřiku. Jak vyplývá z grafu [5] pro dva různé přídavné materiály, rychlost dopadajících natavených částic na základní materiál je přímo závislá na vzdálenosti pistole při nástřiku. Rychlost částic pak přímo souvisí s výslednou přilnavostí naneseného povlaku, jelikož vyšší rychlost částic má pozitivní vliv na jejich plastickou deformaci při dopadu a následné rozprostření splatu.



Obr. 67 Závislost rychlosti částic na vzdálenosti nástřiku [5]

#### 4.2.3 Měření drsnosti [67, 68, 69, 70, 71, 73, 74, 75, 76]

Drsnost povlaku byla vyhodnocována ve výzkumném pracovišti Odboru technologie obrábění ÚST VUT na zařízení Alicona Infinite Focus ( na obr. 66), které pracuje na bezdotykovém principu měření *focus variation*. Ten spočívá v optickém skenování topografie zkoumaného povrchu v ose kolmé na povrch, na základě odrazů použitého osvětlení od povrchu. Toto zařízení nabízí velice komplexní výstup měření zahrnující jak profilové, tak plošné parametry drsnosti. Z důvodu vytíženosti pracoviště byl zhodnocen pouze jeden vzorek. Pro měření byl využit odřezek ze vzorku č. 3 o rozměrech 26x42 mm.

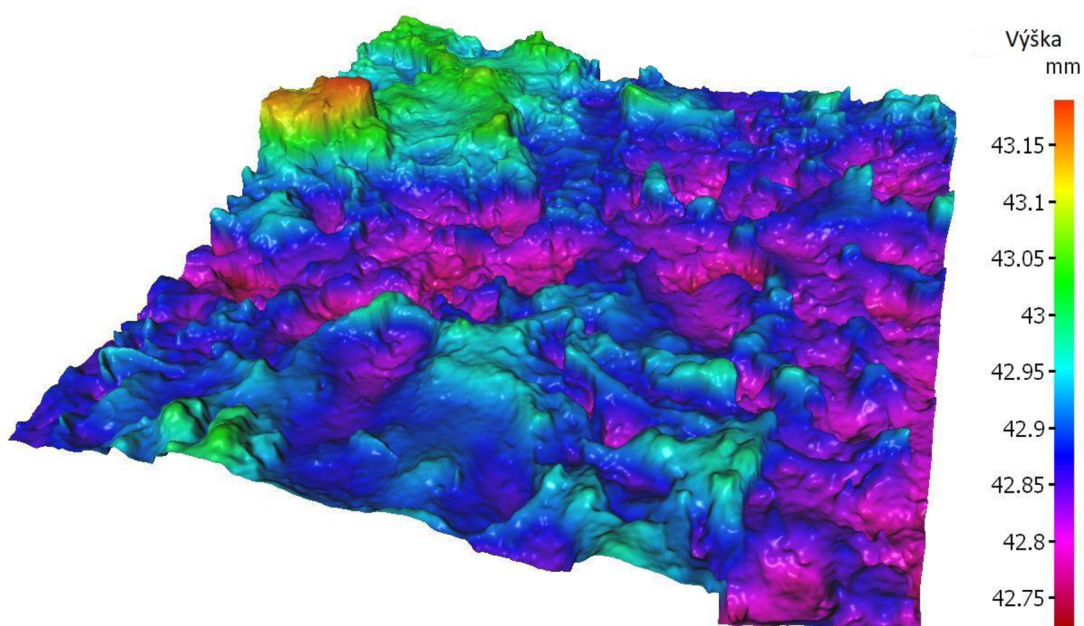


Obr. 68 Odřezaný vzorek pro měření

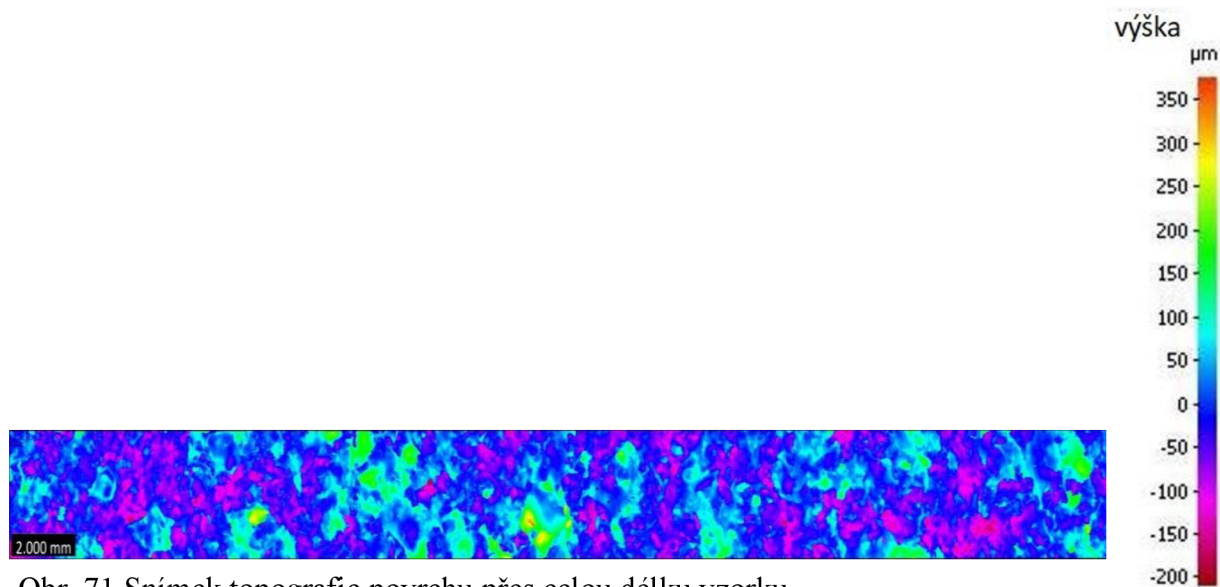


Obr. 69 Měření drsnosti na zařízení Alicona

Velká členitost povrchu, která přímo souvisí s jeho drsností, je zřejmá i ze dvou topografických snímků na obr. 70 a 71. První zobrazuje 3D pohled, druhý 2D pohled kolmo na snímanou plochu přes celou délku vzorku.

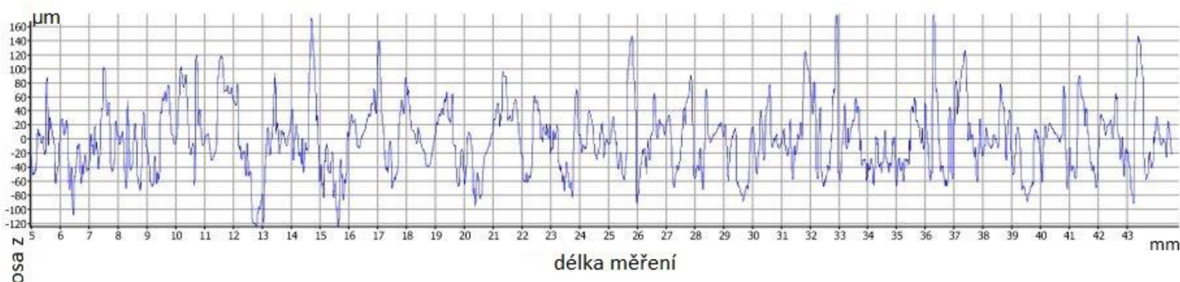


Obr. 70 3D topografický snímek povrchu nástřiku



Obr. 71 Snímek topografie povrchu přes celou délku vzorku

Profilové měření drsnosti bylo provedeno přes celou délku vzorku. Profil drsnosti, jakožto součást protokolu, je zobrazen na obr. 72. Mezní vlnová délka cut-off byla v závislosti na délce vzorku zvolena na  $\lambda_c = 8$  mm



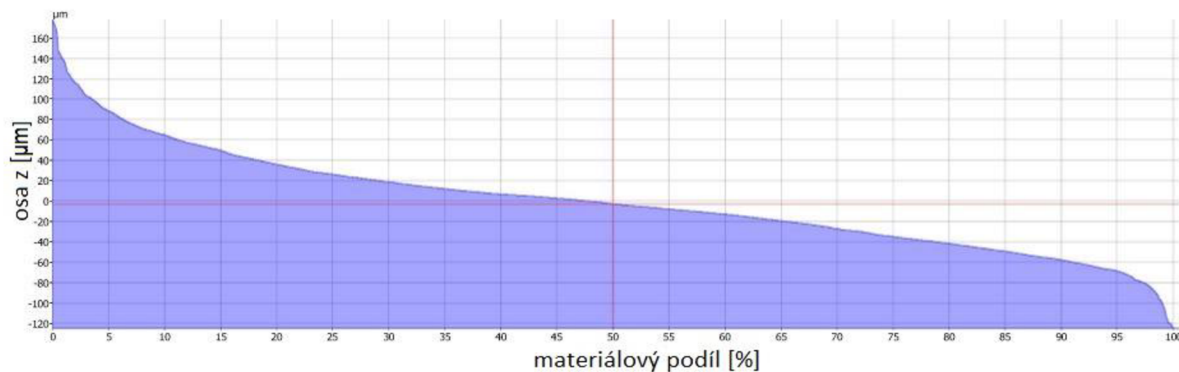
Obr. 72 Naměřený profil drsnosti

Tabulka 9 zobrazuje pouze vybrané parametry (kompletní výsledky, včetně všech naměřených parametrů jsou v příloze). *Parametr Ra* je velice rozšířený parametr, udávající se běžně i u povrchů žárových nástřiků. Nevýhodou tohoto parametru je však necitlivost na extrémní výšky hrotů profilu a hloubky rýh. *Parametr Rq*, stejně jako Ra charakterizuje průměrnou úchylku profilu. Rozdíl je však ten, že výškové hodnoty amplitud jsou umocněny na druhou. Dalším rozšířeným, často užívaným parametrem je *Rz*, značící součet největšího výstupku a prohlubně. Všechny tyto zmíněné parametry jsou vyhodnocovány v rozsahu základní délky  $l_r$  ( $l_r = \lambda_c$ ). *Parametr Rt* je shodný s parametrem *Rz* s rozdílem, že je vyhodnocen v rozsahu celé vyhodnocované délky.

Tab. 9 Vybrané naměřené hodnoty profilové drsnosti

Značka	Hodnota	Název parametru (dle ČSN EN ISO 4287)
Ra	37,385 μm	Průměrná aritmetická úchylka profilu v rozsahu základní délky
Rq	48,371 μm	Průměrná kvadratická úchylka profilu v rozsahu základní délky
Rz	257,208 μm	Součet největšího výstupku a prohlubně v rozsahu základní délky
Rt	302,481 μm	Součet největšího výstupku a prohlubně v rozsahu vyhodnocované délky

Další vypovídajícím výstupem z měření je křivka materiálového podílu, zobrazena na obr. 73, která vyjadřuje materiálový podíl na dané výškové úrovni (ve směru osy z). Stoprocentní materiálový podíl odpovídá podkladovému materiálu, hodnoty blíží se k nulovému materiálovému podílu představují výstupky profilu. Význam křivky je užitečný především z hlediska posouzení zatěžovaných funkčních povrchů, mazání nebo problematiky tření. Shrnutí naměřených hodnot obsahuje tab. 10.



Obr. 73 Profilová křivka materiálového podílu

Parametr  $R_k$ , značící hloubku jádra je důležitý z hlediska problematiky zatěžování povrchu. Malá hloubka  $R_k$  má menší sklon střední části nosné křivky a odpovídá povrchům s nižšími drsnostmi. Takové povrchy jsou vůči opotřebení více odolné. Parametr  $R_{pk}$ , označující redukovanou výšku výstupků charakterizuje část profilu povrchu, které se při zatížení nejrychleji opotřebí. Z hlediska této práce je nejzajímavější parametr redukované hloubky prohlubní  $R_{vk}$ . Vyšší hodnoty  $R_{vk}$  totiž značí lepší podmínky pro zadržení kapaliny, čehož se kromě mazaných povrchů využívá také u nátěrů. Ten se nanášel i na konkrétní měřený povlak Zinacor 850 (viz kapitola 4.3.4).

Tab. 10 Parametry z profilové křivky materiálového profilu

Značka	Hodnota	Název parametru (dle ČSN EN ISO 13565-2)
$R_k$	112,686 $\mu\text{m}$	Hloubka jádra profilu drsnosti
$R_{pk}$	65,107 $\mu\text{m}$	Redukovaná výška výstupků
$R_{vk}$	34,214 $\mu\text{m}$	Redukovaná hloubka prohlubní
$R_{mr1}$	13,54 %	Podíl materiálu oddělující výstupky od jádra profilu drsnosti
$R_{mr2}$	90,69 %	Podíl materiálu oddělující prohlubně od jádra profilu drsnosti

Pro komplexnějšího hodnocení a realističtější prezentaci zkoumaného povrchu se užívá *plošné hodnocení* struktury povrchu, které nezahrnuje pouze 2D profil, ale konkrétní zadanou plochu povrchu. Parametry pro hodnocení struktury povrchu plochy jsou ve většině případů odvozeny z parametrů 2D a jsou tak jejich ekvivalenty.

Tab. 11 Vybrané parametry plošné drsnosti

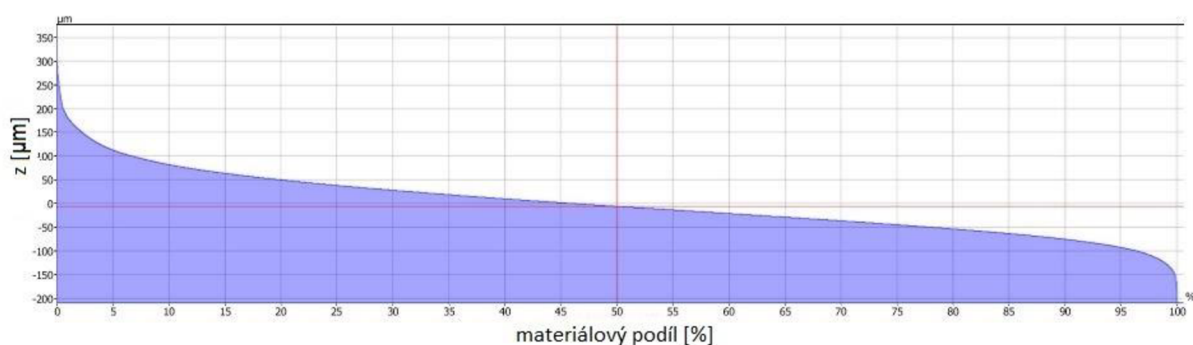
Značka	Hodnota	Název parametru (dle ČSN EN ISO 25178-2)
$S_a$	49,995 $\mu\text{m}$	Aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu
$S_q$	63,833 $\mu\text{m}$	Základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu
$S_z$	585,244 $\mu\text{m}$	Maximální výška omezené stupnice povrchu
$S_p$	375,943 $\mu\text{m}$	Maximální výška piku omezené stupnice povrchu
$S_v$	209,3 $\mu\text{m}$	Maximální hloubka prohlubně omezené stupnice povrchu

Tabulka 11 obsahuje plošné ekvivalenty 2D parametrů, uvedených v tabulce 9, doplněné o parametry maximální výšky piku  $Sp$  (pik je název odvozen z anglického slova *peak* a lze jej nazývat také jako *vrchol*) a maximální hloubky prohlubně  $Sv$ . Součet těchto dvou parametrů pak logicky dává hodnotu parametru  $Sz$ .

Stejně jako u profilového měření byla vyhodnocena křivka materiálového podílu, v tomto případě pro celou plochu vzorku s povlakem. Parametr  $Sk$ , obdobně jako jeho profilový ekvivalent  $Rk$ , charakterizuje nosné jádro měřeného povlaku. Vyhodnoceny byly také  $Spk$  a  $Svk$ , tedy redukovaná výška piku a hloubka prohlubně. Parametr  $Svk$ , stejně jako jeho profilový ekvivalent  $Rvk$ , zhodnocuje podmínky pro další nátěry. Dalším zajímavým ukazatelem je poměr  $Svk/Sk$  a  $Spk/Sk$ , udávající poměr prohlubní a výstupků vůči jádru.

Tab. 12 Vybrané parametry křivky materiálového podílu zkoumané plochy

Značka	Hodnota	Název parametru (dle ČSN EN ISO 25178-2)
Sk	158,137 $\mu\text{m}$	Výška jádra
Spk	87,845 $\mu\text{m}$	Redukovaná výška piku
Spk/Sk	0,555	Poměr red. výšky piku ku výšce jádra
Svk	42,779 $\mu\text{m}$	Redukovaná hloubka údolí
Svk/Sk	0,271	Redukovaná hloubka údolí ku výšce jádra
Smr1	12,05 %	Plošný mat. podíl oddělující výstupky od jádra profilu drsnosti
Smr2	92,99 %	Plošný mat. podíl oddělující prohlubně od jádra profilu drsnosti



Obr. 74 Plošná křivka materiálového podílu

Poměrové porovnání hodnot ekvivalentních hodnot plošných a profilových parametrů drsnosti je uvedeno v tabulce 13.

Tab. 13 Poměr vybraných ekvivalentů drsnosti

Sa/Ra	Sq/Rq	Sz/Rz	Sk/Rk	Spk/Rpk	Svk/Rvk	Smr1/Rmr1	Smr2/Rmr2
1,33	1,32	2,28	1,40	1,35	1,25	0,89	1,03

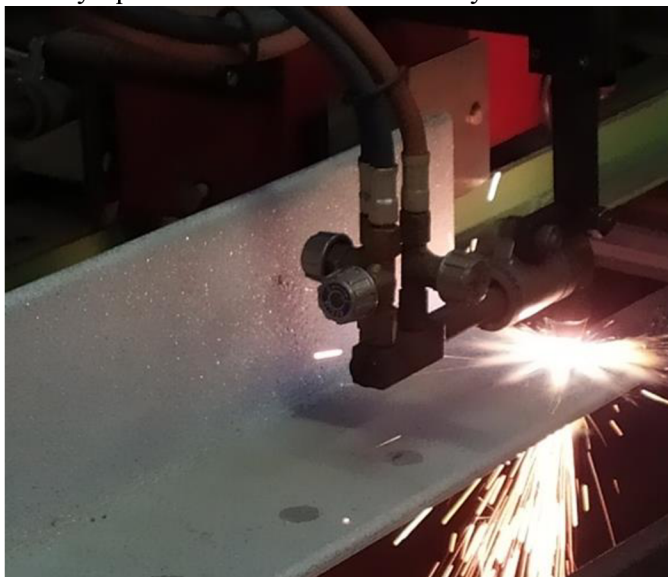
U parametrů vypočtených z daného profilu, plochy či křivky jejich materiálového podílu ( $Sa/Ra$ ,  $Sq/Rq$ ,  $Sk/Rk$ ,  $Spk/Rpk$ ,  $Svk/Rvk$ ) vychází plošný parametr vyšší v intervalu od 25 do 40% vyšší než jeho profilový ekvivalent. U parametrů, vypočtených z extrémů ( $Sz/Rz$ ) je dokonce o 128% vyšší. V případě podílů materiálů, oddělujících výstupky a prohlubně od jádra drsnosti, vypočtených z křivky materiálového podílu ( $Smr1/Rmr1$ ,  $Smr2/Rmr2$ ) dochází k větší shodě, zejména u materiálového poměru oddělující prohlubně od jádra se ekvivalenty liší pouze v rámci 3%.



#### 4.2.4 Vyhodnocení makrostrury povlaku

Analýza makrostruktury slouží k vizuálnímu posouzení kvality povlaku. Z vyhotovených snímků lze hodnotit pórovitost, zakotvení jednotlivých splatů nebo proměnlivost tloušťky povlaku, která lze srovnat s již naměřenými hodnotami magnetickou metodou (viz kapitola 4.2.1).

Pro vyhodnocení makrostrukturních snímků bylo zapotřebí odebrat vhodný vzorek s dostatečnou tloušťkou povlaku, potřebnou pro kvalitní snímek. Proto byl vybrán vzorek č. 2, u kterého byl vypočten největší aritmetický průměr naměřené tloušťky a vzhledem k nezvykle nízkým naměřeným přilnavostem tohoto vzorku nabízel viditelnost vad, které mohly nízkou přilnavostí zapříčinit. Na povlak tohoto vzorku byla nanesena ještě nátěrová vrstva vodou ředitelného polyuretanového nátěru s nižší viskozitou pro lepší penetraci. Tyto nátěry se v kombinaci s povlakem Zinacor 850 často používají z důvodu zvýšení životnosti povlaku. Je požadavkem, aby tato nátěrová vrstva dobře penetrovala. Pro srovnání byl použit ještě vzorek č. 4 s vyšší průměrnou přilnavostí (bez nátěru).



Obr. 75 Odřezání vzorku plamenem

Větší vzorek byl z L profilu nejprve oddělen řezáním pomocí kyslíko-acetylenového plamene. Takový vzorek by pro analýzu struktury, vzhledem k značnému tepelnému ovlivnění, vzniklém při řezání, nemohl být použit. Proto byl z důvodu nutnosti tepelně neovlivněné struktury povrchu pro snímání znovu nadělen na metalografické pile a obroušen na metalografické brusce. Pro lepší rozeznatelnost jednotlivých vrstev a ocelového podkladu musel být vzorek ještě naleptán. Jako leptadlo byl použit Nital 3% (kyselina dusičná na alkoholové bázi).



Obr. 76 Dělení vzorku na metalografické pile

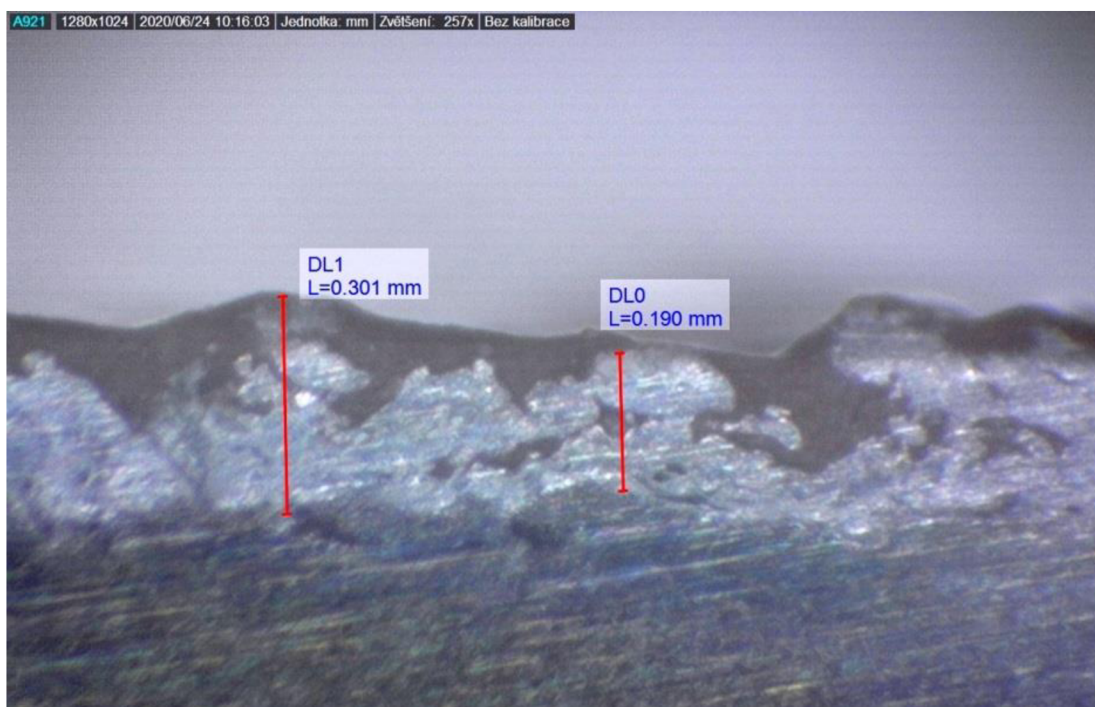


Obr. 77 Metalografická bruska pro úpravu vzorku



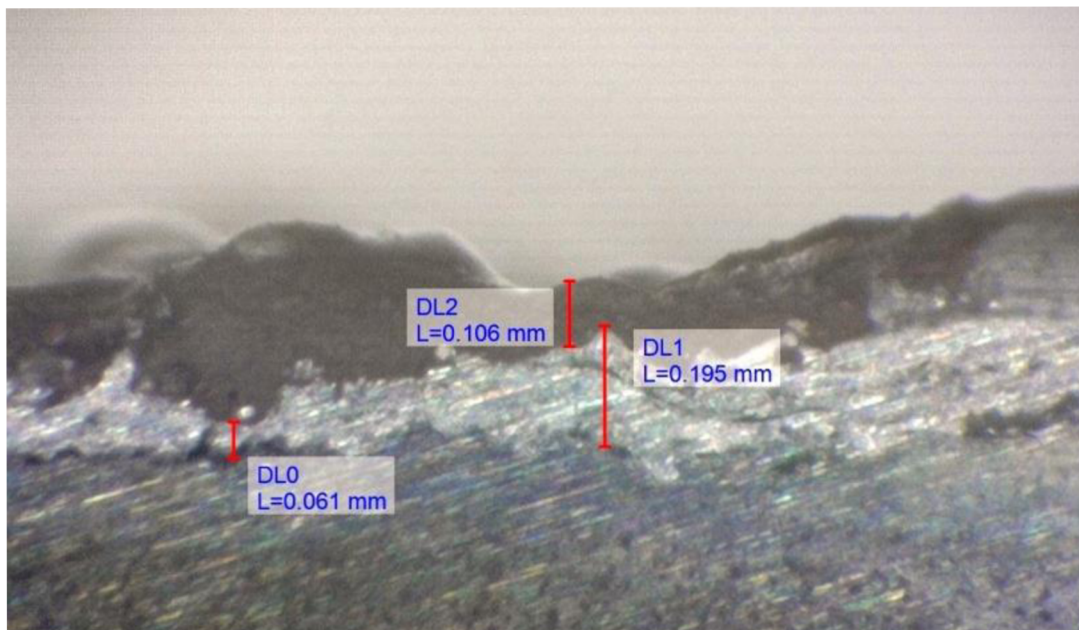
Obr. 78 Nanesená vrstva nátěru na povlaku Zinacor 850

Pohled na řez naleptaného vzorku č. 2 je zobrazen na obrázku 79. Zde lze vidět proměnná tloušťka povlaku (která byla měřena také v kapitole 4.2.1), jednak vizuálně a také na základě mikroskopem opticky změřených rozměrů (tloušťky DL o hodnotách 0,301 mm; 0,190 mm). Ze snímků lze vidět velice členitý přechod mezi nastříkaným povlakem a vrstvou nátěru. Oproti tomu přechod mezi nastříkaným povlakem a ocelovým podkladem je vizuálně značně hladší. Ze snímků je také patrná značná pórovitost nastříkaného povlaku. Nátěrová vrstva je charakterizována nízkou viskozitou pro lepší penetraci, což potvrzuje i snímek, kde lze vidět, že vrstva do prohlubní nastříkaného povlaku dobře zapenetrovala.



Obr. 79 Makroskopický snímek vrstvy povlaku a nátěru – vzorek č. 2

Ze snímku na obr. 80 byla v rámci vzorku shledána a naměřena minimální tloušťka vrstvy žárově nastříkaného povlaku (DL0 = 0,061 mm). Tak nízkých hodnot nebylo při magnetické metodě naměřeno. Je to z toho důvodu, že magnetická metoda měření tloušťky povlaku snímá výstupky (v případě snímku na obr. 80 DL1 = 0,195 mm), nikoli prohlubně. Ze snímků je také patrná poměrně proměnlivá a členitá vrstva nátěru (v měřeném místě rozměr DL2 = 0,106 mm).



Obr. 80 Snímek, zobrazující značnou prohlubeň povlaku – vzorek č. 2

Velký pór lze vidět ve snímku na obr. 81. Takováto vada byla pravděpodobně způsobena z důvodu místního nezakotvení nanášených částic, což mohlo být důsledkem jejich nedostatečného natavení.



Obr. 81 Snímek, zobrazující velký pór povlaku – vzorek č. 2

Pro porovnání byl vyhodnocen také vzorek č. 4, který vykazoval značně vyšší průměrnou přilnavost (14,28 MPa) než výše analyzovaný vzorek č. 2 (4,49 MPa). Takováto hodnota přilnavosti již odpovídá obecnému intervalu hodnot, které povlaky nanosené obloukovou metalizací dosahují (viz tabulka 2). Ze snímku na obr. 82 lze usoudit, že se jedná o homogenní povlak s velmi dobrou vazbou na základní materiál (naměřená tloušťka povlaku  $DLO = 0,409\text{mm}$ ).



Obr. 82 Homogenní povlak s velmi dobrou vazbou na základní materiál – vzorek č. 4

Při srovnání obou zkoumaných vzorků bylo u vzorku č. 2 shledáno nezanedbatelných vad, které odůvodňují nízkou naměřenou přilnavost. Kvalita povlaku není dostatečná – pro lepší jakost povlaku lze doporučit zmenšení vzdálenosti od základního materiálu, která má na zmiňované vady nezanedbatelný vliv. U vzorku č. 4 byla shledána homogenní struktura, která vysvětluje rozdílné přilnavosti obou povlaků.

## 5 Závěry

Čtyři ocelové vzorky ve tvaru L-profilu byly v rámci protikorozní ochrany pomocí technologie žárového nástřiku elektrickým obloukem nanесeny povlakem typu Zinacor 850, obsahující 85% zinku a 15% hliníku. Všechny čtyři vzorky podléhaly identickému protokolu s provozními parametry. Nejprve byl ocelový podklad otryskán tryskacím médiem v podobě ocelové drti se zrnitostí GL18 a tryskacím tlakem 0,6 MPa na stupeň vizuálně čistého povrchu SA3. Samotný žárový nástřik byl proveden za provozních parametrů napětí v rozsahu 20÷25 V, proudu 130÷160 A, vzdáleností nástřiku 230÷260 mm a dalších provozních parametrů.

U těchto vzorků bylo zpracováno měření vlastností, hodnocených typicky u povlaků. Jednalo se o měření tloušťky, přilnavosti, drsnosti a analýzu makrostruktury. V případě měření tloušťky a přilnavosti byly zhodnoceny všechny vzorky, oproti tomu u drsnosti z kapacitních důvodů pouze jeden konkrétní vzorek a u makrostruktury dva vzorky s rozdílnou přilnavostí.

Při měření tloušťky povlaku byl u všech vzorků shledán relativně široký interval naměřených hodnot, což značí poměrně proměnlivou tloušťku vrstvy povlaku. Jako vzorek s nejmenší průměrnou tloušťkou povlaku byl vyhodnocen vzorek č. 4 s průměrnou tloušťkou 360  $\mu\text{m}$ , což činilo 63% z největší vypočtené hodnoty průměrné tloušťky 565,4  $\mu\text{m}$  pro vzorek č. 2. Minimální tloušťka povlaku pro nástřik vzorků byla stanovena na 250  $\mu\text{m}$ , což všechny nanесené povlaky splňují.

Velkých odchylek mezi jednotlivými vzorky bylo shledáno při měření přilnavosti odtrhovou zkouškou, kdy u vzorku č. 2 a 3 byly naměřeny a následně vyhodnoceny průměrné hodnoty okolo 5 MPa (4,49 MPa a 5,13 MPa), kdežto u vzorků 1 a 4 hodnoty téměř 3x větší (14,28 MPa a 15,04 MPa). Nižší hodnoty, okolo 5 MPa neodpovídají běžným přilnavostem, které povlaky nanесené metalizací elektrickým obloukem běžně dosahují. Vzhledem k tomu, že všechny naměřené hodnoty těchto vzorků (2 a 3) dosahují nízkých hodnot okolo vypočtené průměrné přilnavosti, není pravděpodobné, že by tyto nízké hodnoty byly způsobeny např. nalepením terčů do míst s lokálně nižší přilnavostí povlaku. Pravděpodobně charakterizují přilnavost pro celou plochu povlaku. Důvodem takto rozdílné, nižší přilnavosti bylo nejspíš nedodržení vzdálenosti nástřiku, která je už tak určena v intervalu 30 mm (230÷260 mm). Nicméně, také nelze zanedbat vliv tloušťky, kde platí, že se zvyšující se tloušťkou klesá přilnavost. U vzorků s nižšími přilnavostmi byla navíc vypočtena vyšší průměrná tloušťka povlaku. Jedná se ale pouze o průměrné hodnoty s velkou kolísavostí naměřených hodnot.

Srovnání vzorků s řádově nižší (č. 2) a vyšší (č. 4) přilnavostí je obsažena také v kapitole 4.2.4 pro vyhodnocení makrostruktury povlaku. U vzorku s nedostatečně nízkou přilnavostí bylo detekováno množství velkých pórů, vzniklých pravděpodobně z důvodu nedostatečně natavených částic ochlazených vzduchem a vlivem velké vzdálenosti s důsledkem nízké dopadové rychlosti. Při nízké dopadové rychlosti se nedostatečně zakotvují jednotlivé částice do povlaku a vzniká nadměrná pórovitost. Hlavním opatřením proti nadměrné pórovitosti a nízkým hodnotám přilnavosti u nástřiků typu Zinacor 850 je tedy zkrácení vzdálenosti nástřiku. Vzorek s vyšší přilnavostí č. 4 byl shledán s homogenní strukturou povlaku a dobrým zakotvením na základní materiál.

Drsnost povlaku byla již při subjektivním zhodnocení příliš vysoká na to, aby ji bylo možno měřit konvenčními metodami, vhodnými např. pro měření obráběných ploch. Proto bylo použito zařízení Alicona Infinite Focus, které nefunguje na běžném principu dotykového měření, ale na principu optickém a umožňuje měřit i tak drsné povrchy, jako tomu bylo v tomto konkrétním případě. Pro měření byl použit odřezek ze vzorku č. 3. Při profilovém měření přes celou délku naděleného vzorku bylo naměřeno  $R_a = 37,385 \mu\text{m}$  a jeho plošného ekvivalentu  $S_a = 49,995 \mu\text{m}$ . Srovnání poměrů ostatních ekvivalentů drsnosti je v zobrazeno v tabulce13.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [78]

1. ELIÁŠ, Vojtěch. Návrh keramického povlaku na kotoučové brzdy jízdního kola. Brno, 2018. 38s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Kubíček
2. HLUCHÝ, Miroslav a Václav HANĚK. *Strojírenská technologie 2: Koroze, základy obrábění, výrobní postupy*. 2. díl. Praha: Scientia, spol., 2001. ISBN 80-7183-245-6
3. Metallisatiedraad. In: *Hebocoat.be* [online]. [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <http://www.hebocoat.be/functions/content.asp?Pag=38&pnav=;2;53;56;>
4. Korozní ztráty. In: *Chemická obchodní společnost s.r.o.* [online]. [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <http://www.chos.cz/cs/novinka/korozni-ztraty/>
5. AMBROŽ, Oldřich a Jiří KAŠPAR. *Žárové nástřiky a jejich průmyslové využití*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-030-0347-4
6. NÁSTŘIK ELEKTRICKÝ MOBLOUKEM - ELECTRIC ARC:. In: *Servis armatur* [online]. [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <http://www.servisarmatur.cz/index.php?page=electric-arc-spray>
7. KRAUS, Václav. *Povrchy a jejich úpravy*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-668-1.
8. Zinacor, Material data sheet. In: *Zinacor* [online]. [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <https://www.zinacor.com/wp/wp-content/uploads/2019/03/FT-ANG-Z850-851-all-dia.-except-1.60-mm-Zinacor.pdf>
9. TYPES OF GALVANIZING AND OTHER ZINC COATINGS. In: *Galvanizers association of Australia* [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://gaa.com.au>
10. KUBÍČEK, Jaroslav. Žárové pokovení v roztavených kovech. In: *Fakulta strojního inženýrství, Odbor technologie svařování a povrchových úprav* [online]. Brno, 2018 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hpu\\_renovace\\_a\\_povrchove\\_upravy\\_zarove\\_pokoveni\\_2018\\_kubicek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hpu_renovace_a_povrchove_upravy_zarove_pokoveni_2018_kubicek.pdf)
11. HAVRÁNKOVÁ, Zdeňka. ŽÁROVÉ ZINKOVÁNÍ PONOREM - ZÁKLADNÍ INFORMACE PRO UŽIVATELE. *KONSTRUKCE* [online]. 2005, (3) [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <http://www.acsz.cz/clanek/zarove-zinkovani-ponorem-zakladni-informace-pro-uzivatele/>
12. *Hot Zinc Spraying Vs Traditional Galvanising – What Are The Key Differences?* [online]. In: . [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://blog.glwengineering.co.uk/hot-zinc-spraying-vs-traditional-galvanising-what-are-the-key-differences>

13. Hot Dip Galvanized Steel vs Zinc Spray Metallizing. In: *American Galvanizers Association* [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: [https://galvanizeit.org/uploads/publications/Galvanized\\_Steel\\_vs\\_Zinc\\_Spray.pdf](https://galvanizeit.org/uploads/publications/Galvanized_Steel_vs_Zinc_Spray.pdf)
14. KUBÍČEK, Jaroslav. Bezproudé a elektrochemické pokovení. In: *VUT FSI, Odbor technologie svařování a povrchových úprav* [online]. Brno, 2018 [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hpu\\_renovace\\_a\\_povrchove\\_upravy\\_elektrchemicke\\_pokovovani\\_2018\\_kubicek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hpu_renovace_a_povrchove_upravy_elektrchemicke_pokovovani_2018_kubicek.pdf)
15. Galvanické zinkování. In: *Galvena* [online]. [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <https://www.galvena.cz/galvanicke-zinkovani>
16. Povrchová úprava kovů. In: *Vzdělávání Rikfer* [online]. [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <http://www.vzdelavanirikfer.cz/povrchova-uprava-kovu/dalsi-zpusoby-zinkovani>
17. HLAVÁČEK, Vratislav a Viktor KREIBICH. Povlaky s mikrolamelami zinku. *MM Spektrum* [online]. 2004(10) [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/povlaky-s-mikrolamelami-zinku.html>
18. KUBÍČEK, Jaroslav. Chemicko-tepelné zpracování termodifuzní sycení. In: *VUT FSI, Odbor technologie svařování a povrchových úprav* [online]. Brno, 2018 [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hpu\\_renovace\\_a\\_povrchove\\_upravy\\_termodifuzni\\_syceni\\_2018\\_kubicek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hpu_renovace_a_povrchove_upravy_termodifuzni_syceni_2018_kubicek.pdf)
19. HOT DIP GALVANIZING PROCESS. In: *Galco* [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://galco.ie/galvanizing-process/>
20. Galvanické pokovování a zinkování kovu i kovových výrobků. In: *CVP - Galvanika* [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.cvp-galvanika.cz/pokovovani-zinkovani>
21. Sherardizing Bolt. In: *Trade india* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://1url.cz/1zadj>
22. *Povrchová úprava - elektronický odborný časopis, IMPEA s.r.o.*, [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://www.povrchovauprava.cz/free-pdf-magazine>.
23. BENEŠOVÁ, Jaroslava a Markéta PARÁKOVÁ. Zkušební metody pro hodnocení přilnavosti organických povlaků. In: *Tribotechnika* [online]. [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-52013/zkusebni-metody-pro-hodnoceni-prilnavosti-organickych-povlaku.html>
24. PosiTector 6000. In: *Qtest* [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <http://www.qtest.cz/defelsko/positector-6000.htm>
25. Komplexní hodnocení jakosti povrchu. *MM Spektrum* [online]. 2014(5) [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/komplexni-hodnoceni-jakosti-povrchu.html>

26. NĚMCOVÁ, Aneta a Bohumil PACAL. Korozní zkoušení kovových materiálů. In: *Ústav materiálových věd a inženýrství VUT FSI* [online]. 2010 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/oporakorozze4/Index.html>
27. What is Rust? In: *Reliance foundry* [online]. [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://www.reliance-foundry.com/blog/what-is-rust#gref>
28. ČÍHAL, Vladimír. *Korozivzdorné oceli a slitiny*. Praha: Academia, 1999. ISBN 80-20006-71-0.
29. ISBN 978-80-227-2708. HOUDKOVÁ, Š., ENŽL, R., BLÁHOVÁ, O., 2003: Žárové nástřiky. Dostupné na: <http://www.kmm.zcu.cz/CD/index.htm> [2010-11-22].
30. KUKLÍK, Vlastimil a Jan KUDLÁČEK. *Žárové zinkování*. Havlíčkův Brod: Asociace českých a slovenských zinkoven, 2014. ISBN 978-80-905298-2-3.
31. DRAŽAN, Jaroslav. Koroze. In: *SPŠ a VOŠ Příbram* [online]. [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: [http://www.spspb.cz/wp-content/uploads/dumy/str/VY\\_32\\_INOVACE\\_DR\\_STR\\_20.pdf](http://www.spspb.cz/wp-content/uploads/dumy/str/VY_32_INOVACE_DR_STR_20.pdf)
32. RYŠ, Přemysl. *Beztržiskové zpracování*. Brno: Vojenská akademie Antonína Zápotockého, 1961. ISBN MK2736.
33. Koroze. In: *Anzdoc* [online]. [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://adoc.tips/viii-koroze-ocelovy-hebik-vystaveny-vzduchu-a-vlhkosti.html>
34. Druhy korozního napadení. In: *Mendelova univerzita v Brně* [online]. [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: [http://web2.mendelu.cz/af\\_291\\_projekty2/vseo/print.php?page=3717&typ=html](http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=3717&typ=html)
35. AHMAD, Zaki. Atmospheric Corrosion. In: *Science direct* [online]. 2006 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/atmospheric-corrosion>
36. NOVÁK, Pavel. *Koroze kovů* [online]. Praha [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Koroze20kovC5AF.pdf?redirected>. Fakulta chemické technologie, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze.
37. ROBERGE, Pierre R. *Corrosion Engineering: Principles and Practice*. McGraw Hill Professional, 2008. ISBN 0071640878.
38. ATMOSPHERIC CORROSION. In: *Apga security and integrity foundation* [online]. [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <http://apgasif.org/atmospheric-corrosion/>
39. How electropolishing significantly reduces Stress Corrosion Cracking (SCC). In: *MPE Limited* [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://mpelimited.co.uk/stainless-steel-advice-information/electropolishing-reduce-stress-corrosion-cracking>



40. MOHYLA, Miroslav. *Technologie povrchových úprav kovů*. 3vyd. Ostrava: Ediční středisko VŠB Ostrava. 2006. 156s. ISBN 80-248-1217-7.
41. VÁCLAV, Machek. *Kovové materiály 2. Vlastnosti a zkoušení kovových materiálů*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014. ISBN 978-80-01-05527-4.
42. Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti. In: *TU Liberec Fakulta strojní, Katedra strojírenské technologie, Oddělení tváření kovů a plastů* [online]. Liberec [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/01.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm)
43. Deep Groove Ball Bearing (SUS440) . In: *Tarso NetBearing* [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <http://www.tarso.com.cn/products/details/deep-groove-ball-bearing-sus440-109.html>
44. Krok za krokem nejmodernější lakovnou Škoda Auto. In: *Škoda storyboard* [online]. [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.skoda-storyboard.com/cs/inovace/krok-za-krokem-nejmodernejsi-lakovnou-skoda-auto/>
45. Urychlené korozní zkoušky. *Technopark Kralupy* [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.technopark-kralupy.cz/urychlene-korozni-zkousky>
46. Seznam akreditovaných zkoušek ve Zkušebně klimatické a korozní odolnosti. In: *Vojenský výzkumný ústav, s.p.* [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.vvubrno.cz/stredisko-zkouseni/zkusebna-klimaticke-a-korozni-odolnosti/seznam-akreditovanych-zkousek/>
47. BUZKOVÁ, Eva. Cyklické zkoušky pro reálnější simulace. *MM Spektrum* [online]. 2017, 2017(11) [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/cyklicke-zkousky-pro-realnejsi-simulace.html>
48. Ochrana proti korozi. In: *Mendelova univerzita v Brně* [online]. [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: [http://web2.mendelu.cz/af\\_291\\_projekty2/vseo/print.php?page=3604&typ=html](http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=3604&typ=html)
49. MACHEK, Václav. Přehližené aspekty koroze. In: *Engineering.sk* [online]. [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/povrchove-upravy/8490-prehlizene-aspekty-koroze>
50. ABKENAR, AmirHossein Pourmousa. *WIRE-ARC SPRAYING SYSTEM: Particle Production, Transport, and Deposition*. Toronto, 2007. University of Toronto
51. SIGMUND, Marián. Pájení a žárové nástřiky. Přednáška Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství
52. Žárové nástřiky. In: *Odbor technologie svařování a povrchových úprav, VUT FSI* [online]. Brno, 2018 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hpu\\_renovace\\_a\\_povrchove\\_upravy\\_zarove\\_nastriky\\_2018\\_kubicek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hpu_renovace_a_povrchove_upravy_zarove_nastriky_2018_kubicek.pdf)

53. TENGLER, J. Obrábění žárových nástřiků v podmínkách letecké výroby: diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2016, 76 s. Vedoucí práce: Zlámal, T
54. KUBÍČEK, Jaroslav. Tryskání. In: *FSI VUT ÚST Odbor svařování* [online]. 2018 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hpu\\_renovace\\_a\\_povrchove\\_upravy\\_tryskani\\_2018\\_kubicek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hpu_renovace_a_povrchove_upravy_tryskani_2018_kubicek.pdf)
55. SIDIK, Muhamad Harith Izdiyad a Subsash KAMAL. *Wear Mechanism of Wear Resistant HVOF Thermal Spray Coating: Chromium Carbide Nickel Chrome on 304 AISI Steel* [online]. Seri Iskandar, 2018 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/328742989\\_Wear\\_Mechanism\\_of\\_Wear\\_Resistant\\_HVOF\\_Thermal\\_Spray\\_Coating\\_Chromium\\_Carbide\\_Nickel\\_Chrome\\_on\\_304\\_AISI\\_Steel#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/328742989_Wear_Mechanism_of_Wear_Resistant_HVOF_Thermal_Spray_Coating_Chromium_Carbide_Nickel_Chrome_on_304_AISI_Steel#fullTextFileContent). Mechanical Engineering Department, Universiti Teknologi PETRONAS
56. Spraying plasma. In: *Advanced coating* [online]. [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <http://www.advanced-coating.com/english/spraying-plasma.htm>
57. Nástřiky elektrickým obloukem. In: *Wirpo* [online]. [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://www.wirpo.cz/zarove-nastriky/nastriky-elektrickym-obloukem>
58. Arc Spray Process. In: *Gordon England* [online]. [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://www.gordonengland.co.uk/aws.htm>
59. MALEK, Muhamad Hafiz Abd, Nor Hayati SAAD, Sunhaji Kiyai ABAS a Noriyati Binti Md SHAH. *Critical process and performance parameters of thermal arc spray coating*. Puchong, 2014. International Journal of Materials Engineering Innovation.
60. Electric Arc Spraying Process (Arc Process). In: *Tocalo Co.* [online]. [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://www.tocalo.co.jp/english/technical/arc.html>
61. THERMAL ARC SPRAYING. In: *Denton engineering* [online]. [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://dentonengineering.com.au/services/thermal-arc-spraying/>
62. MERKLEY, Brad. The effect of zinc on cold rolling textures in cast aluminum. In: *Researchgate* [online]. Kingston, Ontario, Canada: Queen's University, 2016 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/309200732\\_The\\_effect\\_of\\_zinc\\_on\\_cold\\_rolling\\_textures\\_in\\_cast\\_aluminum](https://www.researchgate.net/publication/309200732_The_effect_of_zinc_on_cold_rolling_textures_in_cast_aluminum)
63. Airblast Tryskací systémy červené. In: *Gamin* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.gamin.cz/airblast-tryskaci-kotle-cervene/>
64. ELEKTROMETALIZAČNÍ ZAŘÍZENÍ MARGARIDO M45. In: *Piskovačky.cz* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: [www.piskovacky.cz](http://www.piskovacky.cz)
65. Charakteristiky variability (proměnlivosti souboru). In: *Veterární a farmaceutická univerzita Brno* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z:

66. Odtrhóměr Comtest OP1 S. In: *Proinex Instruments* [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.proinex.cz/cs/245-odtrhomer-comtest-op1-s.html>
67. Parametry drsnosti. In: *Jen optik* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.jenoptik.cz/cz/technicke-informace/drsnost-povrchu-dle-din-en-iso/>
68. NOVÁK, Zdeněk. Zvyšování kvality hodnocení struktury povrchu. *MM Spektrum* [online]. 2004(12) [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zvysovani-kvality-hodnoceni-struktury-povrchu-2.html>
69. SKOPAL, Miroslav, Miroslav TYKAL a Miroslav POSPÍŠIL. *Drsnost jako součást struktury povrchu*. Brno: VUT FSI Brno, 2002. ISBN ISBN 80-214-2063-4.
70. Area Roughness Parameters. In: *Keyence.eu* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: [https://www.keyence.eu/ss/products/microscope/roughness/surface/tab04\\_c.jsp](https://www.keyence.eu/ss/products/microscope/roughness/surface/tab04_c.jsp)
71. 3D Functional Parameters. In: *Michmet.com* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: [https://www.michmet.com/3d\\_s\\_functional\\_parameters\\_ratios.htm](https://www.michmet.com/3d_s_functional_parameters_ratios.htm)
72. HAVRDA, Miroslav. Žárově stříkané povlaky slitinou ZnAl 15 pro zvýšení ochrany odolnosti ocelových konstrukcí. *Konstrukce* [online]. 2005(3) [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/zarove-strikane-povlaky-slitinou-znal-15-pro-zvyseni-ochrany-odolnosti-ocelovych-konstrukci/>
73. ČSN EN ISO 4287 GPS - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu
74. ČSN EN ISO 13565-2 GPS- Struktura povrchu: Profilová metoda, povrchy mající stratifikované funkční vlastnosti – Č. 2: Výškové charakteristiky využívající křivku lineárního poměru materiálu
75. ČSN EN ISO 25178-2 GPS - Textura povrchu: Plocha – Č. 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu
76. PÍŠKA, Miroslav a Jitka METELKOVÁ. *ON THE COMPARISON OF CONTACT AND NON-CONTACT EVALUATIONS OF A MACHINED SURFACE*. Brno, 2014. Faculty of Mechanical Engineering, BUT Brno.
77. *Vstřikování plastů, Teorie a praxe* [online]. Praha: Grada Publishing, 2018 [cit. 2020-06-05]. ISBN ISBN 978-80-247-2819-3.
78. Citace PRO [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Žárový nástřik elektrickým obloukem [6]
- Obr. 2 Nanesení povlaku Zinacor 850 [3]
- Obr. 3 Čtyři zkoumané metalizované vzorky [19]
- Obr. 4 Proces žárového zinkování [20]
- Obr. 5 Princip procesu galvanického zinkování [20]
- Obr. 6 Spojovací materiál po technologii sherardizování [21]
- Obr. 7 Proces žárového nástřiku el. obloukem [52]
- Obr. 8 Ukázka koroze zadního náboje bicyklu [27]
- Obr. 9 Druhy korozních závislostí [7]
- Obr. 10 Vznik korozního makročlánku [31]
- Obr. 11 Rovnoměrná koroze [26]
- Obr. 12 Důlková a bodová koroze [34]
- Obr. 13 Případy selektivní koroze [26]
- Obr. 14 Mezikrystalická koroze [26]
- Obr. 15 Atmosférická koroze potrubí [43]
- Obr. 16 Koroze uhlíkové oceli v pitné vodě [36]
- Obr. 17 Narušení materiálu vlivem korozního praskání [39]
- Obr. 18 Vliv korozní únavy na průběh Wöhlerovy křivky [2]
- Obr. 19 Ložisko z martenzitické oceli [43]
- Obr. 20 Fosfátování karoserie Škoda [44]
- Obr. 21 Komora pro korozní zkoušky v solné mlze a kondenzace vody
- Obr. 22 Použití ochranných izolátorů [49]
- Obr. 23 Katodická ochrana kovů [2]
- Obr. 24 Rozdělení procesu žárového nástřiku na jednotlivé fáze [5]
- Obr. 25 Rozprostření splatu [29]
- Obr. 26 Struktura povlaku [29]
- Obr. 27 Nástřik pod úhlem [29]
- Obr. 28 Druhy spojení povlaku k substrátu [5]
- Obr. 29 Průběh mřížkové zkoušky [23]
- Obr. 30 Zkouška X-řezem [23]
- Obr. 31 Održená plocha [23]
- Obr. 32 Ohyb přes válcový trn [23]
- Obr. 33 Struktura plochy tryskané umělým hnědým korundem [5]
- Obr. 34 Snížení přilnavosti povlaků oxidace povrchu podložky [5]
- Obr. 35 Schéma nástřiku plamenem [29]
- Obr. 36 Schéma HVOF nástřiku [55]
- Obr. 37 Schéma plazmového nástřiku [56]
- Obr. 38 Schéma žár. nástřiku el. obloukem [60]
- Obr. 39 Praktická aplikace metody [61]
- Obr. 40 Závislost proudu na posuvu drátu [50]
- Obr. 41 Nástřik Cu povlaku na překližku [52]
- Obr. 42 Fázový diagram slitiny zinku a hliníku [62]
- Obr. 43 Tryskací zařízení Airblast ABSC-200

- Obr. 44 Tryskací zařízení Airblast ABSC-200
- Obr. 45 Otryskaný materiál
- Obr. 46 Závislost vlivu tlaku vzduchu na vnitřní napětí ve vzorku [5]
- Obr. 47 Závislost velikosti tryskacího média na velikosti napětí ve vzorku [5]
- Obr. 48 Metalizační zařízení MARGARIDO M45
- Obr. 49 Aplikace žárového nástřiku
- Obr. 50 Stříkácká pistole
- Obr. 51 Nastříkaný vzorek č. 2
- Obr. 52 Měření tloušťky povlaku
- Obr. 53 Měření tloušťky povlaku
- Obr. 54 Grafické srovnání průměrných tloušťek mezi vzorky
- Obr. 55 Proříznutí okolí terče ruční frézou
- Obr. 56 Zašroubování odtrhoměru do terče
- Obr. 57 Proces postupného trhání terče
- Obr. 58 Výsledná hodnota na displeji
- Obr. 59 Terče vzorku 1 po zkoušce
- Obr. 60 Vzorek 1 po přilnavostní zkoušce
- Obr. 61 Grafické porovnání naměřených hodnot přilnavosti
- Obr. 62 Vizuální srovnání odtržených ploch terčů pro měření přilnavosti povlaku
- Obr. 63 Detail zbytku lepidla na terči pro vzorek č. 1
- Obr. 64 Detail zbytku lepidla na terči pro vzorek č. 4
- Obr. 65 Detail plochy odtrženého terče č. 2 bez zbytků lepidla
- Obr. 66 Závislost přilnavosti povlaku na tloušťce vrstvy [5]
- Obr. 67 Závislost rychlosti částic na vzdálenosti nástřiku [5]
- Obr. 68 Odřezaný vzorek pro měření drsnosti
- Obr. 69 Měření drsnosti na zařízení Alicona
- Obr. 70 3D topografický snímek povrchu nástřiku
- Obr. 71 Snímek topografie povrchu přes celou délku vzorku
- Obr. 72 Naměřený profil drsnosti
- Obr. 73 Profilová křivka materiálového podílu
- Obr. 74 Plošná křivka materiálového podílu
- Obr. 75 Odřezání vzorku plamenem
- Obr. 76 Dělení vzorku na metalografické pile
- Obr. 77 Metalografická bruska pro úpravu vzorku
- Obr. 78 Nanesená vrstva nátěru na povlaku Zinacor 850
- Obr. 79 Makroskopický snímek vrstvy povlaku a nátěru – vzorek č. 2
- Obr. 80 Snímek, zobrazující značnou prohlubeň povlaku – vzorek č. 2
- Obr. 81 Snímek, zobrazující velký pór povlaku – vzorek č. 2
- Obr. 82 Homogenní povlak dobrou vazbou na základní materiál – vzorek č. 4

## **SEZNAM TABULEK**

- Tab. 1 Srovnání elektrických potenciálů různých materiálů [7]
- Tab. 2 Srovnání jednotlivých metod žárového nástřiku [29], [52]
- Tab. 3 Návrh parametrů žárového nástřiku
- Tab. 4 Složení a mezní hodnoty prvků povlaku Zinacor 850 [8]
- Tab. 5 Mechanické vlastnosti povlaku Zinacor 850 [8]
- Tab. 6 Naměřené hodnoty tloušťky povlaku [ $\mu\text{m}$ ]
- Tab. 7 Vypočtené hodnoty aritmetického průměru, směr. odchylky a var. koef.
- Tab. 8 Naměřené hodnoty přilnavosti a vypočtené stat. charakteristiky
- Tab. 9 Vybrané naměřené hodnoty profilové drsnosti
- Tab. 10 Parametry z profilové křivky materiálového profilu
- Tab. 11 Vybrané parametry plošné drsnosti
- Tab. 12 Vybrané parametry křivky materiálového podílu zkoumané plochy
- Tab. 13 Poměr vybraných ekvivalentů drsnosti

## **SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1 – Profilové měření drsnosti
- Příloha 2 – Plošné měření drsnosti

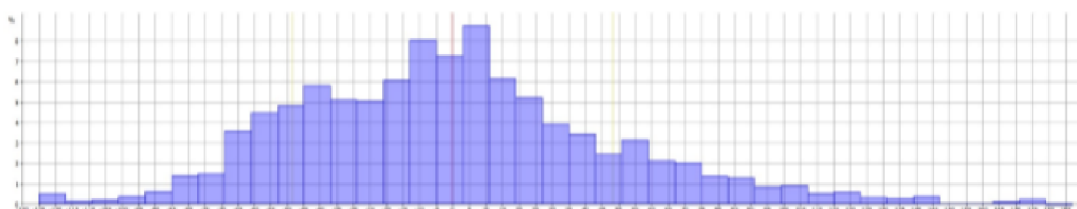
## Příloha 1 Profilové měření drsnosti

# Measurement Report

## Profile Roughness Measurement

### Parameters of Roughness Profile

2



### Histogram Settings

Number of Classes: 39  
Minimum Value:  $-125.005\mu\text{m}$   
Maximum Value:  $186.995\mu\text{m}$   
Class Width:  $8.000\mu\text{m}$

### Statistics

Name	Value	Unit	Description
Elements	13108		Number of data values
Classes	39		Number of histogram classes
Mean Value	-0.156	$\mu\text{m}$	Mean value of data values
Standard Deviation	48.373	$\mu\text{m}$	Mean Value of standard deviation

### Parameters

Name	Value	Unit	Description
Ra	37.385	$\mu\text{m}$	Average roughness of profile
Rq	48.371	$\mu\text{m}$	Root-Mean-Square roughness of profile
Rt	302.481	$\mu\text{m}$	Maximum peak to valley height of roughness profile
Rz	257.208	$\mu\text{m}$	Mean peak to valley height of roughness profile
Rmax	297.344	$\mu\text{m}$	Maximum peak to valley height of roughness profile within a sampling length
Rp	177.476	$\mu\text{m}$	Maximum peak height of roughness profile
Rv	125.005	$\mu\text{m}$	Maximum valley height of roughness profile
Rc	157.419	$\mu\text{m}$	Mean height of profile irregularities of roughness profile

# Measurement Report

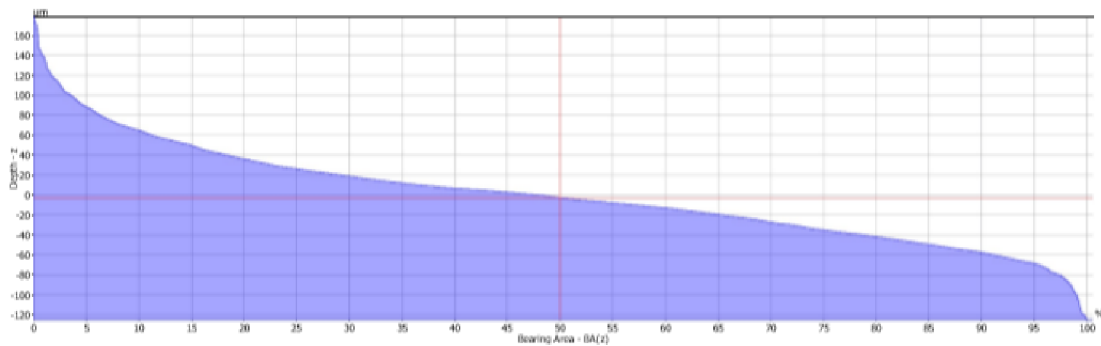
## Profile Measurement

### Bearing Ratio/Firestone-Abbott Curve

#### of Roughness Profile

$L_c = 8.000\text{mm}$

2



Measurement line

$BA(z) = 50.000\%$

$z = -2.861\mu\text{m}$

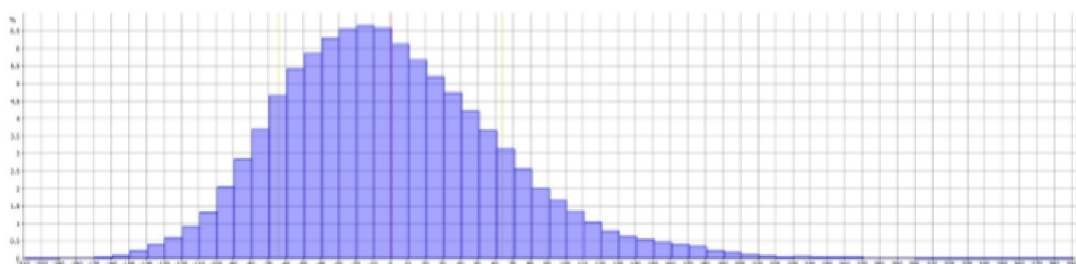
Name	Value	Unit	Description
Rk	112.686	$\mu\text{m}$	Core roughness depth, Height of the core material
Rpk	65.107	$\mu\text{m}$	Reduced peak height, mean height of the peaks above the core material
Rvk	34.214	$\mu\text{m}$	Reduced valley height, mean depth of the valleys below the core material
Rmr1	13.540	%	Peak material component, the fraction of the surface which consists of peaks above the core material
Rmr2	90.690	%	Peak material component, the fraction of the surface which will carry the load
l	49.501	mm	Profile Length
Lc	8.000	mm	LambdaC: cut off wavelength



# Surface Texture Measurement

## Surface Texture of Primary Dataset

2



### Histogram Settings

Number of Classes: 60  
 Minimum Value: -209.300µm  
 Maximum Value: 390.700µm  
 Class Width: 10.000µm

### Statistics

Name	Value	Unit	Description
Elements	7878746		Number of data values
Classes	60		Number of histogram classes
Mean Value	0.003	µm	Mean value of data values
Standard Deviation	63.833	µm	Mean Value of standard deviation

### Parameters

Name	Value	Unit	Description
Sa	49.995	µm	Average height of selected area
Sq	63.833	µm	Root-Mean-Square height of selected area
Sp	375.943	µm	Maximum peak height of selected area
Sv	209.300	µm	Maximum valley depth of selected area
Sz	585.244	µm	Maximum height of selected area
S10z	565.592	µm	Ten point height of selected area

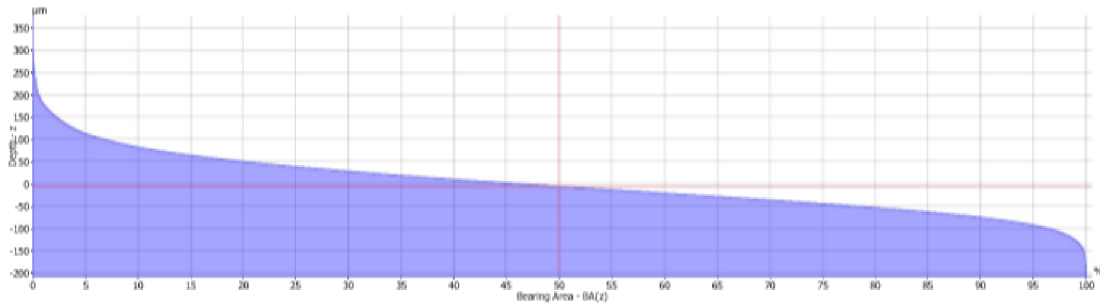
# Measurement Report

## Surface Texture Measurement

### Bearing Area/Firestone-Abbott Curve

#### of Primary Dataset

2



Measurement line

$BA(z) = 50.000\%$

$z = -6.008\mu\text{m}$

Name	Value	Unit	Description
Sk	158.137	$\mu\text{m}$	Core roughness depth, Height of the core material
Spk	87.845	$\mu\text{m}$	Reduced peak height, mean height of the peaks above the core material
Svk	42.779	$\mu\text{m}$	Reduced valley height, mean depth of the valleys below the core material
Smr1	12.050	%	Peak material component, the fraction of the surface which consists of peaks above the core material
Smr2	92.990	%	Peak material component, the fraction of the surface which will carry the load
Vmp	4.369	$\text{ml}/\text{m}^2$	Peak material volume of the topographic surface ( $\text{ml}/\text{m}^2$ )
Vmc	54.729	$\text{ml}/\text{m}^2$	Core material volume of the topographic surface ( $\text{ml}/\text{m}^2$ )
Vvc	80.878	$\text{ml}/\text{m}^2$	Core void volume of the surface ( $\text{ml}/\text{m}^2$ )
Vvv	5.459	$\text{ml}/\text{m}^2$	Valley void volume of the surface ( $\text{ml}/\text{m}^2$ )
Vvc/Vmc	1.478		Ratio of Vvc parameter to Vmc parameter