



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

**Porovnání vlastností práškových povlaků po  
horkovzdušném a IR vypalování**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**AUTOR:** Bc. Lukáš Majer

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

**STUDIJNÍ PROGRAM:** Výrobní inženýrství

**Praha 2023**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Majer** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **483160**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Výrobní inženýrství**  
Specializace: **Bez specializace**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Porovnání vlastností práškových povlaků po horkovzdušném a IR vypalování**

Název diplomové práce anglicky:

**Comparison of the properties of powder coatings after hot air and IR firing**

Pokyny pro vypracování:

1. Rozdělení, předúpravy povrchu a principy nanášení práškových plastů
2. Způsoby vypalování práškových plastů
3. Zhotovení vzorků pomocí horkovzdušné a IR pece
4. Vyhodnocení vzorků (mechanické zkoušky, korozní zkoušky)
5. Diskuze výsledků

Seznam doporučené literatury:

1. KREIBICH, V., Teorie a technologie povrchových úprav, Praha, ČVUT, Praha, 1999.
2. Fluorinated Coatings and Finishes Handbook. The Definitive User's Guide. A volume in Plastics Design Library. 2nd Edition. 2016. 630 s. ISBN 978-0-323-37126-1.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

**doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc. ústav strojírenské technologie FS**

Datum zadání diplomové práce: **26.04.2023** Termín odevzdání diplomové práce: **11.08.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2023**

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

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

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Prohlášení

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

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

V Praze dne: .....

.....

Podpis autora

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Jiřímu Kuchařovi, Ph.D., IWE za cenné rady a připomínky při vedení mé diplomové práce. Dále bych rád poděkoval manželce, dceři a rodičům za veškerou podporu v průběhu studia.

## Anotace

Diplomová práce je zaměřena na technologii povrchových úprav práškovými plasty. V teoretické části práce jsou popsány a shrnuty hlavní požadavky na úspěšnou aplikaci práškových plastů, vyhodnoceny hlavní funkce a vlastnosti těchto povlaků. Jednotlivé kapitoly rozebírají výrobu a recyklaci práškových plastů, volbu vhodných předúprav povrchu, technologie nanášení a možnosti jejich vytvrzování. V experimentální části jsou porovnávány dvě metody vytvrzování, konkrétně pomocí horkého vzduchu a pomocí infračerveného záření. U vytvořených zkušebních vzorků jsou prostřednictvím zkoušek a měření hodnoceny fyzikální a chemické vlastnosti povlaků, jako je tloušťka, adheze povlaku k základnímu materiálu, odolnost proti oděru za mokra a korozní odolnost.

<b>Název diplomové práce:</b>	Porovnání vlastností práškových povlaků po horkovzdušném a IR vypalování
<b>Autor práce:</b>	Bc. Lukáš Majer
<b>Vedoucí práce:</b>	Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., IWE
<b>Konzultant:</b>	doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.
<b>Akademický rok:</b>	2022/2023
<b>Vysoká škola:</b>	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
<b>Ústav:</b>	12133 – Ústav strojírenské technologie
<b>Vedoucí ústavu:</b>	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
<b>Rozsah práce:</b>	105 stran, 21 tabulek, 49 obrázků
<b>Klíčová slova:</b>	Povrchové předúpravy, povlaky, práškové plasty, termosety, termoplasty, nanášení práškových plastů, horkovzdušné a infračervené vytvrzování

## Annotation

The diploma thesis is focused on the technology of surface treatments with powder plastics. In the theoretical part of this work, the main requirements for the successful application of powder plastics are described and summarized, the main functions and properties of these coatings are evaluated. Individual chapters discuss the production and recycling of powdered plastics, the choice of suitable surface pretreatments, optimal application technologies and their curing options. In the experimental part, two methods of curing are compared, specifically using hot air and using infrared radiation. The physical and chemical properties of the coatings, such as thickness, adhesion of the coating to the base material, wet abrasion resistance and corrosion resistance, are evaluated through tests and measurements.

<b>Title of the final thesis:</b>	Comparison of the properties of powder coatings after hot air and IR curing
<b>Author:</b>	Bc. Lukáš Majer
<b>Supervisor:</b>	Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., IWE
<b>Consultant:</b>	doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.
<b>Academic year:</b>	2022/2023
<b>University:</b>	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
<b>Department:</b>	12133 – Department of Manufacturing Technology
<b>Head of department:</b>	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
<b>Extent:</b>	105 pages, 21 tables, 49 pictures
<b>Keywords:</b>	Surface pretreatment, coatings, powder plastics, thermosets, thermoplastics, application of powder plastics, hot air, infrared radiation, curing

# Obsah

1. ÚVOD A CÍL PRÁCE .....	12
2. FIRMA .....	13
3. PRÁŠKOVÉ NÁTĚROVÉ HMOTY .....	14
3.1 Rozdělení práškových plastů.....	16
3.1.1 Termosety.....	16
3.1.2 Termoplasty.....	16
3.2 Výroba práškových plastů.....	16
3.3 Recyklace práškových plastů .....	17
4. PŘEDÚPRAVA POVRCHU .....	20
4.1 Mechanické předúpravy .....	20
4.2 Chemické předúpravy .....	23
4.3 Sušení.....	27
4.4 Neutralizace .....	28
5. PRINCIPY NANÁŠENÍ PRÁŠKOVÝCH NÁTĚROVÝCH HMOT .....	29
5.1 Prostory a zařízení potřebné k nanášení (nanášecí kabiny) .....	29
5.2 Podmínky potřebné k realizaci povlaku.....	31
5.3 Metody nanášení práškových nátěrových hmot .....	32
5.3.1 Elektrostatické nanášení.....	33
5.3.2 Nanášení fluidní.....	36
5.3.3 Nanášení žárovým nástřikem .....	37
6. VYTVRZOVÁNÍ.....	38
6.1 Typy pecí podle uspořádání .....	39
6.2 Typy pecí podle zdroje tepla .....	40
6.2.1 Konvekční, horkovzdušná vytvrzovací pec .....	40

6.2.2	Infračervené vytvrzování (IR).....	41
6.2.3	Radiačně vytvrzovací pece (UV) .....	44
6.2.4	Indukční pece.....	50
6.2.5	Laser.....	50
7.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	51
7.1	Návrh experimentu .....	51
7.2	Předúprava povrchu .....	52
7.3	Měření drsnosti.....	53
7.4	Nanášení práškového plastu.....	54
7.5	Vytvrzování práškového plastu.....	55
7.5.1	Konvekční horkovzdušná pec .....	55
7.5.2	Infračervený jednotrubicový zářič.....	56
7.6	Měření tloušťky povlaku .....	58
7.7	Mechanické zkoušky povlaku .....	59
7.7.1	Mřížková zkouška .....	59
7.7.2	Zkouška křížovým řezem .....	62
7.7.3	Odrhová zkouška povlaku .....	64
7.8	Korozní zkouška povlaku .....	69
7.8.1	Puchýřkování .....	71
7.8.2	Stupeň prorezavění .....	71
7.8.3	Delaminace .....	73
7.8.4	Koroze v okolí řezu .....	74
7.9	Stanovení odolnosti nátěrů proti oděru za mokra .....	75
7.9.1	Výpočet úbytku hmotnosti nátěru na jednotku plochy .....	77
	Výsledky a diskuze .....	80
	Závěr .....	84



Bibliografie.....	85
Seznam tabulek .....	92
Seznam obrázků.....	93
Seznam příloh .....	95
Přílohy.....	96

## Seznam zkratk

UV	Ultrafialové záření
IR	Infračervené záření
HRK	Horkovzdušná trouba
NCS	Natural colour system = přirozený barevný systém
ČSN	Československá norma
EN	Evropská norma
ISO	International Organization for Standardization = Mezinárodní organizace pro normalizaci
ASTM	American Society for Testing and Materials = Americká společnost pro zkoušení a materiály

## Seznam použité symboliky

[MPa]	megapascal
[N]	newton
[°C]	jednotka teploty
[ $\mu\text{m}$ ]	mikrometr
[mm]	milimetr
[g]	gram
[mg]	miligram
[mm <sup>2</sup> ]	milimetr čtverečný
[m <sup>2</sup> ]	metr čtverečný
[g·cm <sup>-3</sup> ]	gram na centimetr krychlový
[g·l <sup>-1</sup> ]	gram na liter
[ml·min <sup>-1</sup> ]	mililitr za minutu
%	procento
±	směrodatná odchylka
>	větší než
<	menší než

# 1. ÚVOD A CÍL PRÁCE

Lakování práškovými plasty (tzv. komaxit) je velice rozšířeným způsobem lakování využívaným již od 90. let 20. století. Technologie umožňuje nanášet nátěrové hmoty bez použití rozpouštědel, a zároveň je tato metoda široce uznávaná jako nejvíce ekologická, úsporná a bezpečná v oboru moderního lakování. Práškové povlaky poskytují vysokou odolnost proti opotřebení, korozní ochranu a esteticky atraktivní povrch. Při aplikaci práškových povlaků existuje několik metod vytvrzování, mezi kterými se často volí metoda horkovzdušného a infračerveného (dále jen IR) vytvrzování.

Jedním z nejvíce náročných procesů při lakování práškovými nátěrovými hmotami je jejich vytvrzování za účelem dosažení požadovaných vlastností. V této oblasti by bylo vhodným řešením zkrátit požadovaný čas na vytvrzení, a snížit tak celkovou energetickou náročnost celého procesu. Jedním ze způsobů, jak dosáhnout zkrácení vytvrzovacích časů, je metoda využívající infračervených paprsků, která bude v této diplomové práci porovnávána s tradiční a dobře známou metodou vytvrzování pomocí horkého vzduchu.

Cílem diplomové práce je provést podrobné srovnání vlastností práškových povlaků po horkovzdušném a infračerveném vytvrzování. Komplexně jsou analyzovány a srovnány vlastnosti práškových povlaků po obou vytvrzovacích metodách. V práci jsou hodnoceny fyzikální a chemické vlastnosti povlaků, jako je tloušťka, adheze povlaku k základnímu materiálu, odolnost proti oděru za mokra a korozní odolnost. Výsledky jsou vyhodnoceny a diskutovány z hlediska kvality povlaků a efektivity vytvrzovacích metod.

Očekává se, že tato diplomová práce přispěje k hlubšímu porozumění výhod a nevýhod horkovzdušného a IR vytvrzování při aplikaci práškových povlaků. Výsledky mohou sloužit jako podklad pro optimalizaci procesů povrchové úpravy a výběr vhodné vytvrzovací metody v závislosti na požadovaných vlastnostech povlaku.

## 2. FIRMA

Hedson Technologies AB (Obrázek 1) je inovativní a přední technologická firma se sídlem ve Švédsku. Společnost se specializuje na vývoj a výrobu pokročilých technologických řešení pro průmysl. Počátky firmy lze datovat od 60. let minulého století. Tehdy firma vynalezla jako první krátkovlnný infračervený zářič. Hlavní obor působnosti Hedson Technologies je oblast povrchové úpravy. Firma nabízí širokou škálu produktů a systémů, které zlepšují efektivitu a kvalitu povrchových úprav. V roce 2014 se stala firma Hedson Technologies součástí Mellby Gård Innovation och Tillväxt AB – soukromý švédský investor v průmyslovém segmentu. Hedson je globálně zastoupen v 80 zemích světa. [2]



*Obrázek 1: Logo formy Hedson Technologies AB [2]*

### 3. PRÁŠKOVÉ NÁTĚROVÉ HMOTY

Práškové lakování lze považovat za ideální technologii pro konečnou úpravu kovových povrchů, a to nejen pro technologické a ekologické výhody, ale také pro jejich ekonomickou atraktivitu. Vzhledem k těmto úvahám se přechod od konvenčních tekutých k práškovým nátěrům stává logickým rozhodnutím. [3]

Rychlý růst používání termosetových práškových nátěrů byl v posledních desetiletích řízen kombinací technologických, ekologických a ekonomických výhod. V minulosti byla při použití práškových laků běžná rychlost růstu přesahující 10 % ročně. Pro příštích 10 let se předpokládá průměrný dlouhodobý růst o 6,5 % ročně. [3]

#### Technologické výhody

Příprava a manipulace s práškovými nátěrovými hmotami jsou obecně jednodušší než u tekutých systémů. Prášek lze účinně nanášet na ploché a 3D podklady elektrostatickým nástřikem. Prášek, který dopadne mimo upravovanou součást lze recyklovat a získat více než 95 % využití práškového materiálu. [3]

Práškové plasty lze vybírat z neomezených odstínů barev s vysokými až nízkými lesky. Žádný problém nepředstavují ani speciální typy povrchových úprav (různé textury) viz Obrázek 2. [3]



Obrázek 2: Příklady dřevěných textur práškových plastů [4]

Práškové barvy poskytují vynikající ochranu kovových podkladů. Ochranné povlaky vyrobené z práškových plastů splňují řadu standardů kvality. Požadavky na venkovní odolný systém specifikované GSB International (německá norma), Qualicoat (třída 1 a třída 2, evropská norma) nebo AAMA 2604-98 (Americká asociace architektů výrobců) – to jsou příklady organizací určujících kvalitu. [3]

Hlavní specifiky ve všech těchto normách jsou: přilnavost k podkladu, pružnost povlaku a odolnost vůči chemikáliím, korozi a povětrnostním vlivům. Tyto požadavky lze splnit správnou volbou materiálu práškového plastu (druh pryskyřice, tvrdidla) v kombinaci se správnými pigmenty a přísadami. [3]

#### Ekologický přínos

Práškové nátěrové hmoty neobsahují rozpouštědla a během vytvrzování se neuvolňují téměř žádné VOC (z angl. Volatile Organic Compounds – těkavé organické látky). Z tohoto důvodu je práškové lakování ideální technologií pro splnění nových legislativních požadavků na ochranu životního prostředí. [3]

#### Ekonomické výhody

Úspora materiálu: práškové laky jsou 100 % pevné, zatímco tekuté barvy mají snížený obsah pevných látek (rozpouštědlové barvy asi 40 – 45 %, vodou ředitelné asi 40 %, vyšší sušiny asi 65 %) a vyžadují úpravu viskozity, což generuje dodatečné náklady na manipulaci. Přenosová účinnost prášků je 95 % a téměř veškerý nevyužitý prášek lze recyklovat a následně znovu použít. [3]

Úspora energie: jelikož práškové nátěrové hmoty neobsahují rozpouštědla, je během vytvrzování vyžadován nižší průtok vzduchu. U mokré barvy je pro vytvrzení a odstranění těkavých látek vyžadován vysoký průtok vzduchu. To má za následek vyšší náklady na energii. [3]

Úspora práce: práškové barvy jsou připraveny k použití tak, jak jsou dodány, nevyžadují následné úpravy viskozity. [3]

Vyšší provozní účinnost: díky eliminaci procesu odpařování rozpouštědel je umožněné celou výrobní linku umístit na menším prostoru. [3]

Environmentální: tekuté barvy vytvářejí nebezpečný odpad, který vyžaduje nákladnou likvidaci. Vznik odpadu při práškovém lakování je minimální a náklady na likvidaci jsou výrazně nižší než u tekutých systémů. [3]

### 3.1 Rozdělení práškových plastů

Rozlišují se dva typy práškových plastů, které se dělí na základě charakteru své hlavní složky používané pro povrchové úpravy na:

- termosetový,
- termoplastický. [4]

#### 3.1.1 Termosety

Termosety jsou amorfními polymery, jež lze po zahřátí tavit a tvarovat pouze po určitou dobu. Během dalšího zahřívání dochází k chemické reakci nazývané vytvrzování, která způsobuje zesíťování molekul a vznik netavitelné a nerozpustné vrstvy. Tento chemický proces je nevratný a znemožňuje opětovné tvarování materiálu. Výrobky z termosetů jsou charakterizovány vysokou chemickou a tepelnou odolností, tvrdostí a tuhostí. Termosety v nevytvrzeném stavu se nazývají pryskyřice. Příklady termosetů jsou např.: epoxidy, polyestery, polyuretany a akryláty. [5, 6]

#### 3.1.2 Termoplasty

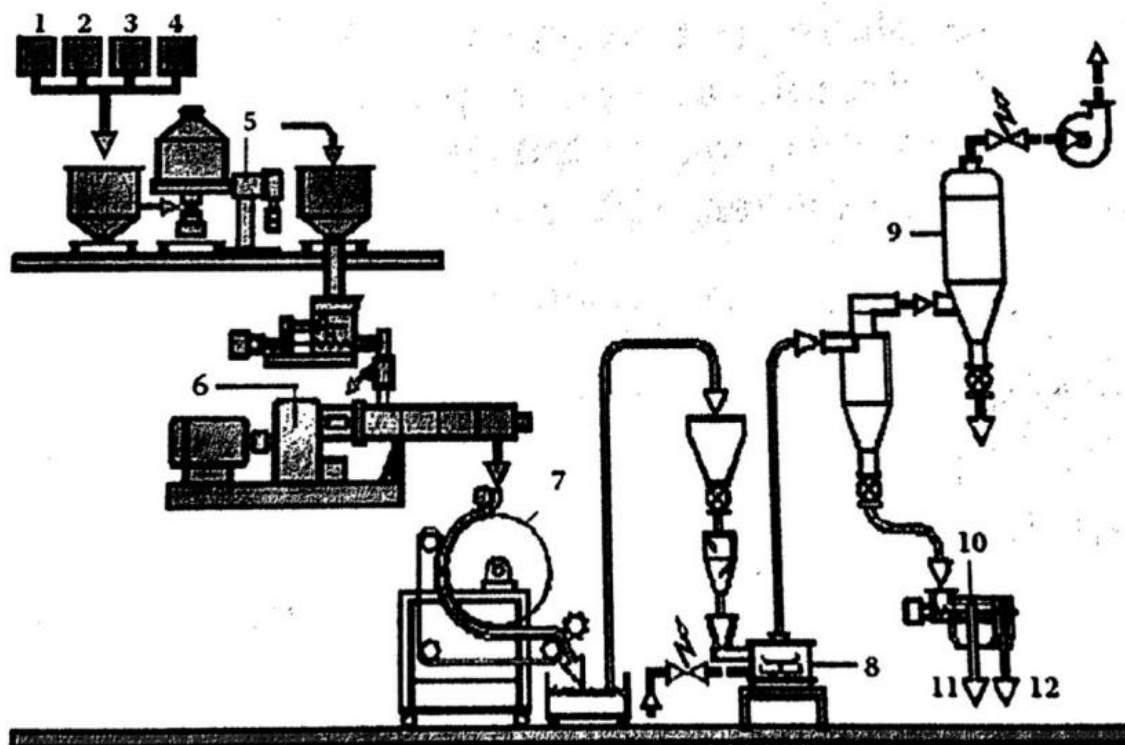
Termoplastický práškový povlak je typ povlaku, který se při ohřevu taví a po ochlazení a ztuhnutí si zachovává stejné chemické složení. Tuto změnu lze provést opakovaně, což přináší možnost opravy špatně nalakovaných dílů. Termoplastické prášky jsou charakterizovány vynikající chemickou odolností, houževnatostí a pružností. Termoplasty jsou dnes výrazně méně používané kvůli jejich nevýhodám, jako je špatná přilnavost na kovové povrchy a nízká pigmentace. Z tohoto důvodu je většina lakoven vůbec neaplikuje. Termoplastické prášky jsou nejčastěji aplikovány technologií fluidního nanášení, kdy se předem zahřátý předmět ponoří do fluidní lázně s následným natavením částic plastu na povrch předmětu. Typickými zastupiteli termoplastů jsou: polyethyleny, polyamidy a fluoropolymery. [5, 6]

### 3.2 Výroba práškových plastů

Proces výroby práškových plastů je poměrně složitý, a aby byl zajištěn vysoce kvalitní produkt, je třeba ho pečlivě kontrolovat. Prvním krokem výroby je přesné vážení a míchání jednotlivých složek v pevné fázi. Pryskyřice, pigmenty, fotoiniciátory a další přísadové prvky jsou smíchány za pokojové teploty, poté roztaveny a rozptýleny v extrudéru při teplotě 100–130 °C. Roztavená směs je následně stlačena do tenkého pásu ( $T = 1 \text{ mm}$ ) mezi chlazenými válci. Tento pás se ochladí na vodou chlazeném chladícím pásu na teplotu blízkou



pokožkové teplotě. Vychlazený pás je nejprve rozdrčen na vločky a poté rozemlet na jemný prášek, který je roztříděn a připraven k použití. Proces je ilustrován na Obrázku 3. [7]



Obrázek 3: Proces výroby práškových plastů: 1. pryskyřice, 2. pigmenty, 3. plniva, 4. aditiva, 5. míchání jednotlivých složek, 6. tavení a vytlačování v extrudéru, 7. ochlazovací jednotka s drtičem, 8. mlýn, 9. filtrační zařízení, 10. prosévací zařízení, 11. materiál podle specifikace do pytlovací stanice, 12. nevyhovující materiál. [7]

Během procesu jemného mletí může finální teplota procesu dosáhnout 30–35 °C. Prášek musí zůstat při těchto teplotách sypký, tedy nesmí měknout a shlukovat se. Doporučuje se skladovat práškové plasty při teplotách pod 22 °C, ale často se stává, že nádoby s práškovými plasty mohou během skladování a přepravy dosáhnout i 40 °C. Aby bylo možné splnit tyto podmínky pro skladování, prášek nesmí změknout při teplotě nižší než 80 °C, zároveň ale musí tvořit tekutý hladký film při teplotách 110 °C. Během skladování by relativní vlhkost neměla překročit 75 %. [7]

### 3.3 Recyklace práškových plastů

Práškové plasty mají výhodu téměř 100 % využitelnosti. Při aplikaci nevytvářejí žádné exhalace ani další odpad. Avšak vysoké využití práškových plastů je možné pouze při hromadné výrobě, kdy se používá stejný typ a odstín nátěrové hmoty na velké šarže výrobků. Při nanášení se použitý prášek recirkuluje v nanášecím zařízení, a zároveň se doplňuje nový prášek. Prášek, který se nedrží na povrchu výrobku v nanášecí kabině, se obvykle odsává přes cyklon

(viz Obrázek 4) do koncových filtrů. Jako odpad zůstává pouze malé množství jemného prášku, který se zachytí v koncových filtrech. Většina nátěrové hmoty se vrátí z cyklonu zpět do nanášecího zařízení. Celý proces je znázorněn na Obrázku 5. [8]

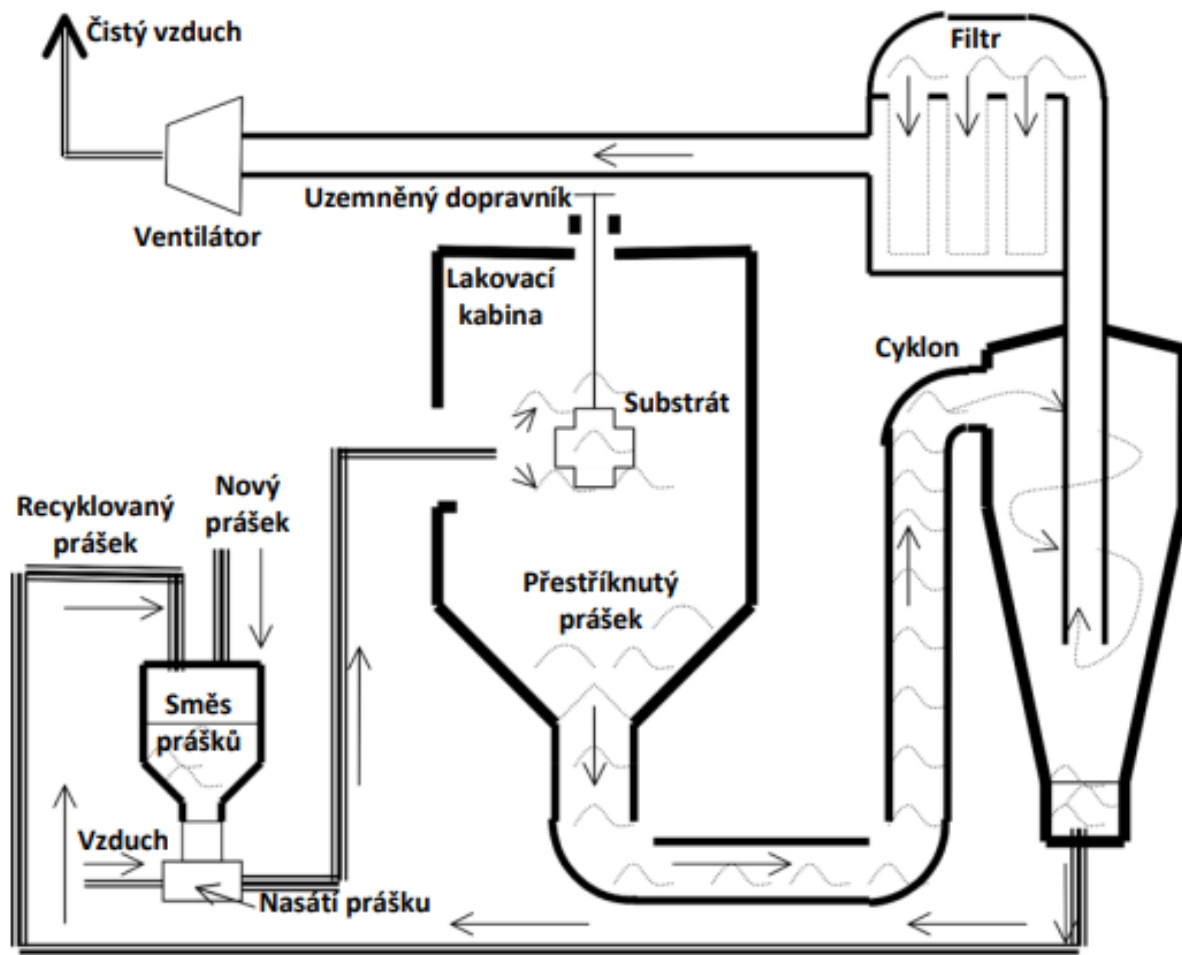


*Obrázek 4: Zařízení pro čištění prášku - je určeno pro pneumatickou dopravu práškové barvy přes cyklon v horní části zařízení. Prosátá barva spadává do odvětrávaného zásobníku umístěného pod prosévačkou. Většinou je použit přímo zásobník stříkáací techniky, nebo lze dodat včetně zásobníku. [9]*

V menších lakovnách nebo při zakázkových pracích, kde se lakují výrobky v menších sériích, recirkulace prášku není výhodná kvůli poměrně malému množství použitých práškových plastů a prostojům způsobeným čištěním zařízení. V těchto případech se vytváří směs různých typů a odstínů práškových plastů, které mají jen velmi omezené využití. Jedním z možných řešení je aplikovat tyto směsi prášků na výrobky, u kterých není důležitý vzhled nebo odstín, ale pouze protikorozní ochrana. Tyto směsi se také mohou použít jako první vrstva u dvouvrstvého povlaku, pokud není požadován epoxidový základ. Avšak nevyužitá množství těchto prášků je mnohem větší, než lze uvedenými způsoby využít a stávají se odpadním produktem. [8]

K likvidaci tohoto odpadu se často používají spalovny nebo skládky, což není nejpřívetivější z hlediska ekologie. Nejvhodnějším způsobem likvidace směsí odpadních práškových barev je předání odpadních prášků k dalšímu zpracování specializované firmě, která vyrábí nové prášky. Před recyklací je však nutné odpadní práškový plast prosít, aby se odstranily případné mechanické nečistoty. Následuje celý výrobní cyklus výroby

práškových plastů, tedy extruze, mletí a prosévání. Pro usnadnění recyklace je vhodné třídit odpadní prášky podle použité pryskyřice, odstínů a druhů barev. Kvalita recyklovaného prášku je prakticky stejná jako kvalita původního prášku. Recyklace použitých práškových nátěrových hmot má perspektivní výhledy, jak z hlediska ekologického, tak pro malé výrobce práškových barev a lakovny, které potřebují likvidovat odpadní prášky a snižovat výrobní náklady. [8]



Obrázek 5: Schéma recyklace práškového platu [10]

## 4. PŘEDÚPRAVA POVRCHU

Prvním krokem v procesu práškového lakování je předúprava povrchu součásti. Vhodně zvolená a správně aplikovaná předúprava povrchu je stěžejním faktorem pro úspěšné provedení povrchové úpravy. Kvalitní předúprava povrchu má zásadní vliv na životnost a kvalitu výsledného povlaku. [4, 11]

Na povrchu součásti se během výroby vytvářejí nečistoty, jež zabraňují správnému ulpění povlaku. Tyto nečistoty se rozdělují na cizí a vlastní. Nečistoty cizí jsou k povrchu přitahovány adhezními silami. Jedná se o nečistoty mastné v podobě např. řezných olejů, kovové (kovový prach), nebo nerozpustné anorganické (zbytky leštících prostředků). Nečistoty vlastní se na povrchu drží chemickou vazbou a nazývají se korozní zplodiny (např. rez, okuje). Vznikají při reakci povrchu s okolním prostředím. [11]

Předúprava povrchu neřeší pouze čistotu povrchu součásti, ale i jeho strukturu, která má velký vliv na přilnavost povlaku k povrchu. Přilnavost nanášených povlaků záleží především na vytvoření vodného kotvícího profilu nebo nanesení tzv. konverzních vrstev. [11]

Základní dělení předúprav povrchu:

- mechanické,
- chemické. [11]

### 4.1 Mechanické předúpravy

Cílem mechanické předúpravy povrchu je: dosažení požadované kvality povrchu, odstranění nečistot z povrchu, vytvoření vhodného kotvícího profilu, zlepšení mechanických vlastností a zvýšení odolnosti vůči korozi. [12]

#### Tryskání

Tryskání (Obrázek 6) je proces čištění, mechanického zpevnění a sjednocení drsnosti povrchové vrstvy součásti. Při tryskání se na součást vysokou rychlostí vrhá tryskací abrazivní materiál, který odstraňuje nežádoucí nečistoty ulpěné na povrchu (rez, okuje). [12, 13, 14]

Charakter tryskaného povrchu je závislý na kinetické energii, velikosti a druhu abraziva. Při dopadu částic na součást dochází k plastické deformaci povrchu (zvýšení napětí na povrchu a plastický tok na povrchové vrstvě), což má za následek cílené zvýšení pevnosti. [12, 13, 14]

Pro maximální zvýšení přilnavosti je nutno tryskat ostrými zrny, které sice při zasekávání do povrchu odstraňují společně s nežádoucími nečistotami i určité množství povrchové vrstvy, dokáží ale na povrchu součásti vytvořit ideální kotvící profil. Kulatá zrna

oproti tomu vytvářejí pouze velmi malé důlky, které vedou k pevnějšímu, hladšímu a korozně odolnějšímu povrchu. Vzniká ale nebezpečí zatlačení nečistot kulatými zrny do povrchu součásti. [12, 13, 14]

Tryskání lze rozdělit na mechanické a pneumatické. Mechanické tryskání využívá k pohánění abraziva rotujících lopatek. Abrazivní částice jsou přiváděny do středu lopatek, odkud jsou při působení odstředivé síly vymrštěny na jejich konec a následně do prostoru stroje, kde se nachází tryskaná součást. Pneumatické tryskání funguje na principu přivádění abraziva do proudu stlačeného vzduchu. Nejpoužívanější abraziva pro tryskání jsou: křemičitý písek, litinová drť, umělý korund a balotina. [12, 13]



*Obrázek 6: Tryskání metacím kolem [15]*

Speciálním případem tryskání je čištění suchým ledem, kdy při nárazu suchého ledu na povrch dochází k termickému šoku, což způsobuje zkřehnutí nečistot a odloupení od povrchu součásti. Tryskání suchým ledem je ekologická (nevyskytuje se žádný odpadní materiál) a velice rychlá technologie čištění povrchu. [12, 13]

### Omílání

Technologie omílání povrchu se používá pro menší součásti v sériové výrobě. Omílání lze rozdělit dle mechanismu na rotační, odstředivé a vibrační. V omílacích bubnech se součásti,

omílací tělíska a vhodně zvolené chemické prostředky dostávají do vzájemného pohybu. Hlavním požadavkem pro technologii omílání je sražení hran a odstranění otřepů, okují po předchozích operacích. [12, 13, 16]

Omílací tělíska a chemické prostředky se volí podle druhu omílací operace. Při hrubování je použito větších omílacích tělísek o vyšší tvrdosti a hrubší zrnitosti. Omílací tělíska je možné rozdělit do několika skupin: přírodní (křemenný písek), umělá (korund) a kovová (broky). Chemické prostředky použité při omílání mají za úkol čištění omílaných součástí a tělísek, dále ovlivňují brusný účinek a zabraňují korozi během a po omílání. [12, 13, 16]

Výhodou omílání je, že do jisté míry dokáže nahradit ruční broušení a leštění, které je náročné na čas a závislé na zručnosti obsluhy. Omílání je nevhodné použít pro součásti, u kterých má hrana funkční charakter, neboť při omílání se největší úběr materiálu odehrává právě na hranách součásti. [12, 13, 16]

#### Broušení, kartáčování, leštění

Broušení je velice jemné obrábění součástí. Broušení je obvykle jedinou metodou, která dokáže odstranit povrchové defekty a škrábance. Břity brusného nástroje jsou tvořeny zrny, která jsou spojena vhodným pojivem. Požadované kvality povrchu je dosaženo postupným zjemňováním použitého brusiva. [12, 17]

Kartáčování (Obrázek 7) je technologická operace, která slouží k odstranění hrubých nečistot (např. rzi), oxidické vrstvy vzniklé po broušení a sjednocení, či zjemnění upravovaného povrchu. [12, 13]



Obrázek 7: Kartáčování [18]

Leštění slouží k odstraňování stop po předchozích operacích. Materiál je odebírán pomocí brusných zrn, která jsou uchycena buď na leštícím nástroji nebo volně rozptýlena v pastě, jež se nanese mezi nástroj a upravovanou součást. Součásti po leštění disponují velmi nízkou drsností a vysokým leskem. [12, 13]

## 4.2 Chemické předúpravy

Chemické předúpravy povrchu se využívají k odstranění nečistot z povrchu materiálu, kde chemické činidlo reaguje s nečistotami na povrchu. Cílem je odstranit cizí a vlastní nečistoty. Cizí nečistoty jsou k povrchu vázány adhezí (např. zbytky mastných látek, kovové nečistoty, nerozpustné anorganické sloučeniny). Odstranění cizích nečistot se docílí pomocí odmašťování. Vlastní nečistoty jsou k povrchu vázány chemickou vazbou. Jedná se o korozní zplodiny, které na povrchu vznikají chemickou přeměnou kovu, jenž reaguje s okolním prostředím (např. okuje, rez). Vlastní nečistoty jsou odstraňovány nejčastěji mořením. [12]

Chemickou předúpravu lze provést v zásadě třemi technologickými postupy. První variantou je, že součást před samotným lakováním pouze odmastím. Tento krok zaručí odstranění mastnoty z povrchu, a tím zvýší zaručenou přilnavost k povrchu, ale již nesplní požadavky na lepší korozní odolnost materiálu. Druhou variantou je odmaštění a vytvoření konverzní vrstvy v jednom kroku (např. železité fosfátování). Konverzní vrstva zlepšuje přilnavost k povrchu a korozní odolnost součásti. Třetí varianta se skládá ze tří částí a to: odmaštění, oplachu a následné vytvoření konverzní vrstvy (např. zirkonové fosfátování). [17]

### Odmašťování

Prvním krokem v chemické předúpravě povrchu bývá odmaštění, které zajistí odstranění cizích nečistot. Lázeň musí dostatečně odstranit mastnotu, oleje a hrubé nečistoty z povrchu součásti. Odmašťovací lázeň se skládá z vody, základu z anorganických či organických solí, tzv. builder, a povrchově aktivních látek, např. tenzidů. Anorganický základ lázně při současném působení tenzidů umožňuje efektivní odmaštění. Upravuje pH a tvrdost vody, zmýdelňuje tuky, disperguje mechanické nečistoty a napomáhá v emulgačním procesu. Tenzidy slouží k převedení ve vodě nerozpustných látek (vosků, olejů, atd.) na rozpustnou formu a jejich odstranění z povrchu součásti. Odstraněná mastnota zůstává emulgována v lázni, nebo se vyloučí na hladině, odkud se odstraní vhodným separačním systémem. [19]

## Moření

Moření je čištění povrchu kovů od vrstev rzi a okují jakékoliv tloušťky chemickým působením kyselin. Zplodiny koroze se převádějí na rozpustnou formu a z povrchu se následně oplachují. Pevně přilnuté okuje se kyselinou zvolna rozpouštějí v místech, kde nejsou celistvé a kyselina může pronikat až k povrchu kovu. Odlupují se účinkem vznikajícího vodíku, přičemž mírné naleptání kovu celý proces moření urychluje. Vznik atomárního vodíku se projevuje nepříznivě, tzn. vodíkovou křehkostí. Tomuto problému podléhají hlavně tenkostěnné součásti, které tím ztrácí pevnost v ohybu. Vodík uzavřený v pórech nosného kovu může způsobit závady povrchové úpravy, neboť povlak puchýřkuje. [20, 21]

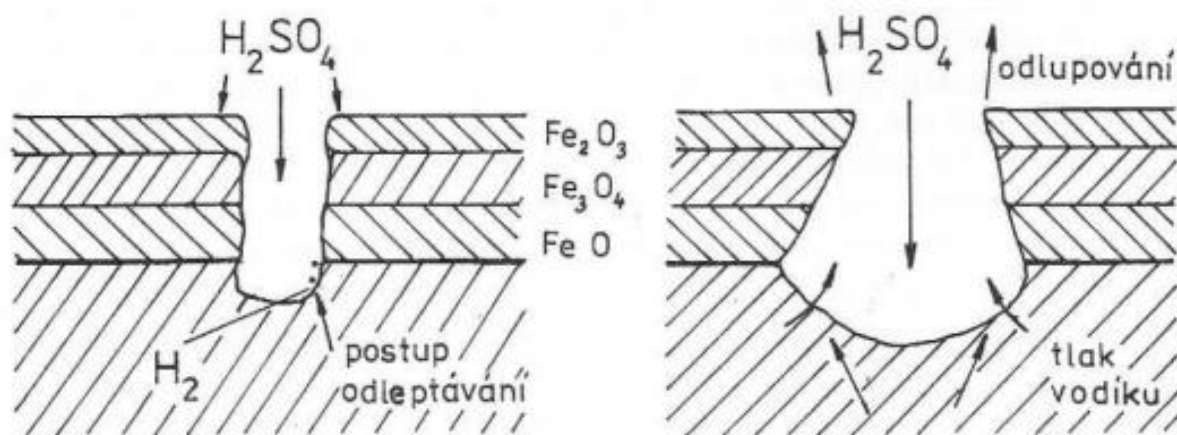
Součásti menších rozměrů se ponořují do lázně ve vanách tepelně izolovaných, opatřených odsávacím zařízením a topnými registry. Před mořením musí být povrch odmaštěn a zbaven nepříznivých nečistot. Co nejdříve po moření následuje několikanásobný oplach vodou, aby zbytky kyselin, solí nenarušovaly jakost nátěrového systému. Má-li být povrch chráněn nátěrem, zařazuje se ještě pasivace přísadou chromové sloučeniny. Po oplachu se zbytky vody odstraní v sušárnách s odsáváním. Moření je ukončeno, když se okuje přemění v prach a povrch po oplachu je mírně drsný, ocelově šedé barvy. Při přemoření nabývá až černošedé barvy. Nejvíce se k moření používá kyselina sírová a chlorovodíková. [20, 21]

V kyselině sírové (Obrázek 8) jsou korozní produkty méně rozpustné než základní kov, z toho důvodu jimi kyselina rychle proniká a při jejich uvolňování spolupůsobí vznikající vodík. Moření probíhá zastudena, zvolna a rovnoměrněji než při teplotách 50–80 °C, kdy je již porušován (naleptáván) základní kov. Při moření ocelí vznikají současně železité a železnaté ionty rozpouštěním korozních produktů a vodíkové ionty rozpouštěním základního materiálu. Tento jev mění složení lázně i korozní proces. Vodík vytěsňuje z lázně kyslík, a kdyby nevznikaly i železité ionty, snižovala by se oxidační schopnost lázně. Rychlost moření začne klesat, když roztok obsahuje více než 20 % síranu železnatého. Průběh moření se urychluje zvyšováním teploty lázně. [20, 21]

Při použití kyseliny chlorovodíkové se povrch kovu čistí především rozpouštěním oxidů. Se zvyšovanou koncentrací lázně se oxidy rozpouštějí rychleji než základní kov. Kyselina méně reaguje se základním materiálem, ale proniká do větší hloubky, takže se nese snadno neutralizuje a vymývá. Optimální koncentrace pro ocel je v rozmezí 12 až 24 %. Zahřívání roztoku kyseliny chlorovodíkové zvyšuje vypařování vodíku a chlorovodíku. Výpary působí silně korozivně na ocelové zařízení a ve větších mořárnách, kde se pracuje za zvýšené teploty,



se vyžaduje zařazení účinného odlučovače do odsávacího systému. Při moření se koncentrace kyseliny chlorovodíkové rychle snižuje a je potřeba ji často doplňovat. Rychlost rozpouštění okují je v kyselině chlorovodíkové za stejné teploty podstatně vyšší než u dříve zmíněné kyseliny sírové. Výsledkem je čistý povrch součásti, který je vhodný pro většinu dalších operací povrchových úprav. Vznikající chlorid železnatý je snáze rozpustný než síran a jeho přítomnost v lázni negativně neovlivňuje průběh moření. [20, 21]



Obrázek 8: Schéma moření povrchu pomocí kyseliny sírové. Na levém obrázku: rozpuštění oxidů a odleptávání základního materiálu. Na pravém obrázku: odlupování nečistot od základního materiálu vlivem vodíku. [11]

### Fosfátování

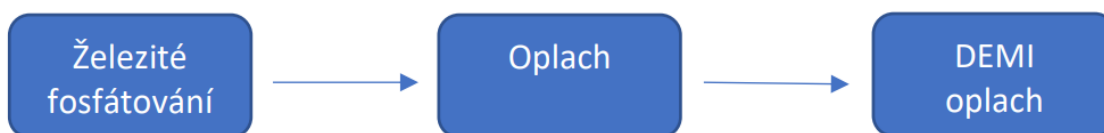
Jedná se o technologii, která vytváří na povrchu základního materiálu konverzní vrstvu. Když je fosfátování aplikováno správně, zajišťuje vyšší korozní odolnost a lepší přilnavost povlaku. Historicky se jedná o nejrozšířenější metodu vytvoření konverzní vrstvy před práškovým lakováním. Nicméně s vývojem nových technologií se od ní ustupuje vzhledem k moderním trendům, které kladou důraz na ekologicky šetrnější metody s lepšími korozními vlastnostmi. [19, 22, 23]

Během procesu se na povrchu základního materiálu vytvoří tenká souvislá vrstva nerostných krystalů fosforečnanu. Tato vrstva má obvykle tloušťku od 1 do 50 mikrometrů, Preferována je však co nejmenší tloušťka, aby se zabránilo odloupenutí vrstvy a naneseného povlaku. Pro předúpravu před práškovým lakováním jsou nejčastěji používány tři typy fosfátování: [19, 22, 23]

- Železnaté fosfátování

Principem fosfátování je vytvoření nerozpustné vrstvy fosforečnanu na povrchu součásti. Ve fosfátovací lázni dochází k rozpouštění povrchové vrstvičky materiálu (železa nebo

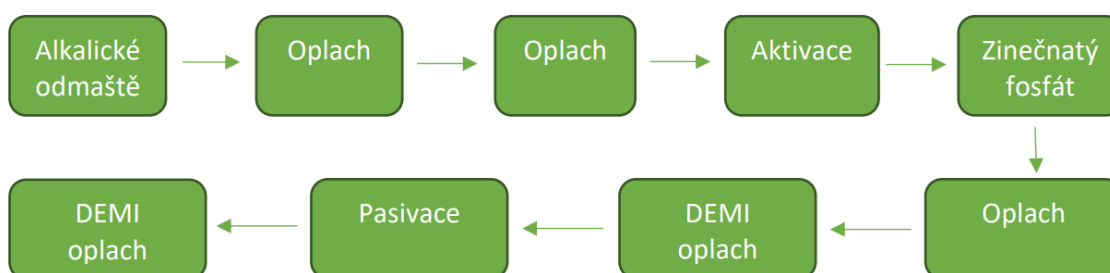
zinku) a díky lokálnímu zvýšení pH u povrchu k vylučování nerozpustného fosforečnanu příslušného kovu. Vzniklá kotvící vrstva je amorfni a zajišťuje kvalitní přilnavost povlaku. Výhodou technologie je nízká náročnost na zařízení, údržbu a obsluhu. Proces železnatého fosfátování je znázorněn na Obrázku 9. [1, 19, 22]



Obrázek 9: Železnaté fosfátování [17]

- Zinečnaté fosfátování

Jedná se o osvědčenou metodu zajišťující vynikající přilnavost a korozní odolnost (vyšší odolnost proti podkorodování). Při tvorbě povlaku se krom železa ze základního materiálu využívají další kovy z lázně (Ni, Zn, Ca, Mn). Zinečnaté fosfátování (Obrázek 10) je přes své nesporné výhody technologií, která je zastaralá a ve většině aplikací překonána kvůli náročnosti na počet provozních kroků (odmaštění – oplachy – aktivace – Zn fosfátování – oplachy – pasivace) a značné produkci vedlejších produktů (odpadů). Při samotném fosfátovacím procesu vzniká velké množství kalů, které je nutné odstraňovat. Pracovní vanu, postřikový box je potřeba pravidelně čistit. Odpadní a oplachové vody obsahují velké množství fosforečnanů, dusičnanů a těžkých kovů (Ni). Všechny tyto složky se musí z odpadních vod složitě odstraňovat. [1, 19]

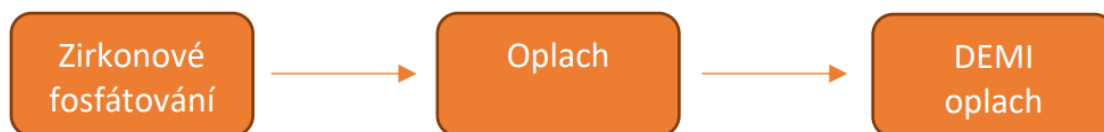


Obrázek 10: Zinečnaté fosfátování [17]

- Zirkonové fosfátování

V současné době se od konvenčních metod železitého a zinečnatého fosfátování ustupuje kvůli jejich ekologické zátěži. Odpadní látky z těchto procesů způsobují rychlejší růst sinic. Z tohoto důvodu je vhodné používat zirkonové fosfátování (Obrázek 11), které má navíc nižší energetickou náročnost než předchozí dvě metody (není potřeba ohřívat lázně). Výhodou této technologie je její univerzálnost, jelikož může být aplikována na železné, hliníkové

i pozinkované materiály. Díky této technologii je zaručena dvakrát vyšší korozní odolnost než u konvenčních metod. [23, 24]

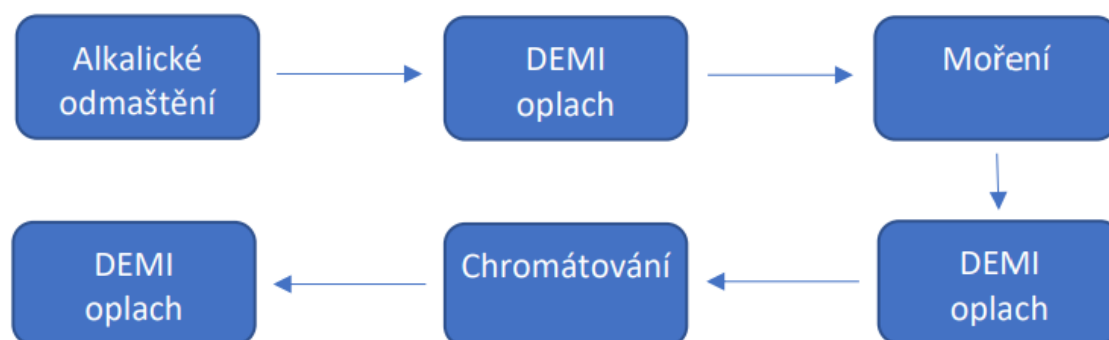


Obrázek 11: Zirkonové fosfátování [17]

### Konverzní pasivace

- Chromátování

Alternativní chemickou předúpravou je použití konverzní pasivace. Obdobně jako při fosfátování se rozpouští povrchová vrstvička materiálu součásti, a díky lokálnímu nárůstu pH se na povrchu součásti vysráží soli chromu a zirkonu. Cíl je shodný s předchozími variantami, a to vyloučit na povrchu nerozpustnou krystalickou látku, která zvětší povrch součásti pro ukotvení práškové barvy. Rozdíl mezi konverzní pasivací a fosfátem je ve složení vrstvy a procesním hledisku. Pasivační lázně na bázi trojmocného chromu a zirkonu umožňují snížit náklady na čištění odpadních vod, energie a hlavně údržbu linky. Oproti fosfátování se netvoří téměř žádný kal a odpadní voda neobsahuje fosfor či nikl. Technologický postup chromátování je zobrazen na Obrázku 12. [19]



Obrázek 12: Technologický postup chromátování [17]

## 4.3 Sušení

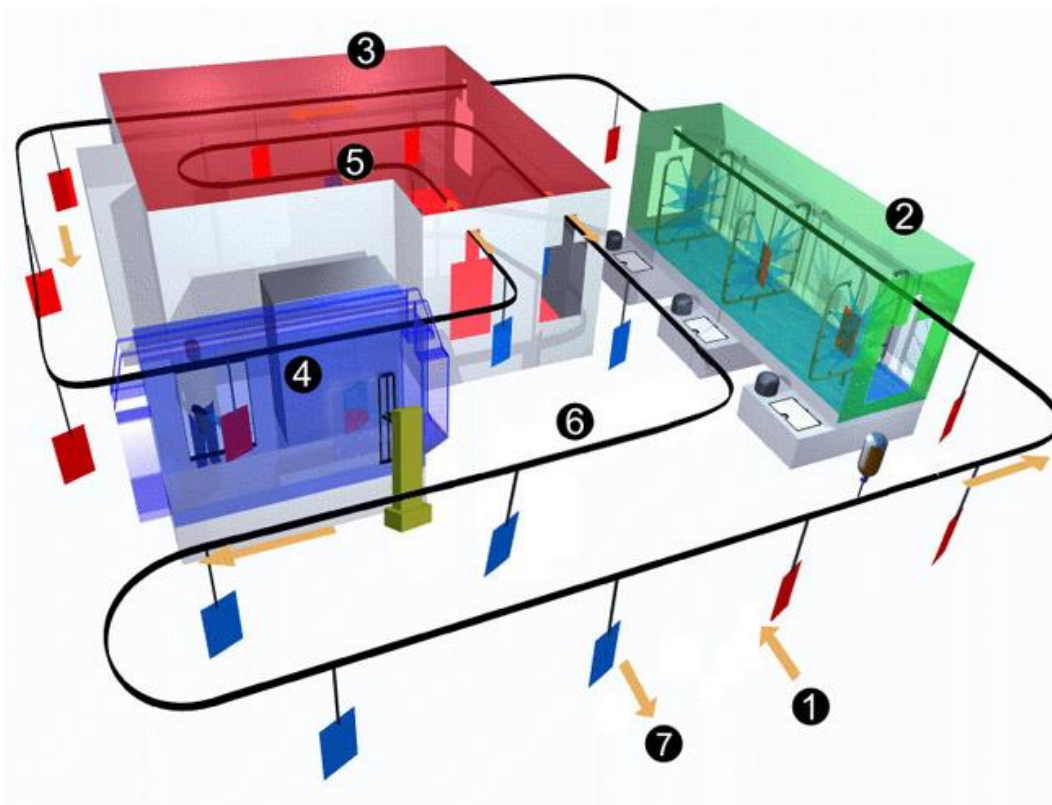
Poslední fází předúpravy povrchu je sušení součásti, která je pro celý proces předúpravy nesmírně důležitá. Připravená povrchová vrstva musí být suchá, jinak práškový plast není možné správně aplikovat. Čím déle vlhkost na součásti zůstane, tím více je povrch náchylný na vytváření vrstvy oxidů (blesková koroze). Pec na vysušení rychle odstraní veškerou vlhkost, zároveň mírně ohřeje povrch, a připraví tak součást na aplikaci prášku. [25]

## 4.4 Neutralizace

Tento proces se týká zpracování oplachových vod z chemické předúpravy s cílem zajistit jejich bezpečné vypuštění do kanalizace. V neutralizačních stanicích není prováděno čištění těchto vod, ale pouze dochází ke změně pH hodnoty. Po ověření správné pH hodnoty jsou tyto vody vypuštěny do kanalizace. Pro udržení správné funkce neutralizačních stanic je nezbytné pravidelně kontrolovat a kalibrovat pH sondy. [25]

## 5. PRINCIPY NANÁŠENÍ PRÁŠKOVÝCH NÁTĚROVÝCH HMOT

Práškové lakování spočívá v nanesení práškové barvy na povrch dílu a její tepelné zpracování. Existuje vícero způsobů, jak celý proces lakování provést. Před samotným procesem nanášení práškového plastu je nutné si stanovit velikost a typ výrobních zařízení a stěžejních podmínek pro realizaci povlaku. Příklad linky na aplikaci práškového plastu je na Obrázku 13. [1]



Obrázek 13: Schéma automatické linky na aplikaci práškového plastu: 1. vstup, 2. chemická předúprava, 3. sušení, 4. aplikace práškového plastu, 5. vytvrzování, 6. ochlazení hotové součásti vzduchem, 7. výstup [26]

### 5.1 Prostory a zařízení potřebné k nanášení (nanášecí kabiny)

Kabiny jsou kompaktní zařízení s minimálními nároky na prostor a vynikají svou provozní jednoduchostí a spolehlivostí. Práškové kabiny jsou navrženy tak, aby bezpečně absorbovaly přestřík prášku. Vstupní a výstupní otvor musí být správně dimenzován pro umožnění vsunutí a vysunutí součástí do pracovního prostoru kabiny. Proudění vzduchu kabinou musí být dostatečně velké, aby odvádělo veškerý přestřík prášku do regeneračního systému, na druhou stranu ne tak silné, aby nenarušilo ulpělou vrstvu prášku na součásti. [4]

### Jednostranné kabiny

Kabiny jsou určeny převážně pro ruční pracoviště. Navěšování dílů se provádí z čela kabiny na otočný závěs nebo zavezením na podvěsném dopravníku s točnou (Obrázek 14). [4, 27]



*Obrázek 14: Jednostranná nanášecí kabina [27]*

### Průjezdné jednostranné, oboustranné kabiny

Kabiny (Obrázek 15) jsou určeny pro lakování dílů procházejících kabinou na podvěsném dopravníku. Stříkání dílů je jednostranné, díly se v místě nástřiku musí otáčet. Lakování lze provádět ručně nebo automaticky. [4, 27]

U oboustranných kabin je nástřik prováděn z obou stran součásti najednou, a lze tak dosáhnout vyšší kapacity výroby. [4, 27]



*Obrázek 15: Oboustranná nanášecí kabina [27]*

### Velkoprostorové kabiny s podlahovým odsáváním

Kabiny (Obrázek 16) jsou určeny pro lakování součástí velkých rozměrů. Zavážení součástí se provádí vraty, nejčastěji na podvěsném dopravníku. Vrata mohou být na obou stranách kabiny – průjezdné provedení. Aplikace práškového plastu se provádí ručně, obsluha se pohybuje uvnitř kabiny kolem upravované součásti. Proudění vzduchu je svislé ve směru od stropu k roštové podlaze. [4, 27]



Obrázek 16: Velkoprostorová nanášecí kabina [27]

## **5.2 Podmínky potřebné k realizaci povlaku**

U práškových nátěrových hmot existuje jen velmi omezená možnost úpravy dodávaného prášku a ve většině případů je speciálně připraven pro určitý technologický proces. Pro eliminaci vzniku problémů je nutná vhodná volba technologie zhotovení povlaku. Aby se docílilo co nejlepšího výsledku, je důležité přesně dodržovat návody a doporučení, jak dodavatele práškového plastu, tak výrobce zařízení. V následujících bodech jsou uvedeny vhodné podmínky pro zajištění bezproblémové aplikace práškových nátěrových hmot. [28, 29]

### Kvalita práškového plastu

Vlhkost práškového plastu nesmí být vyšší než 0,4 %. Práškový plast má obsahovat majoritní podíl částic o velikosti 35–40  $\mu\text{m}$ .  $T_g$  (teplota skelného přechodu) by neměla být nižší než 50 °C. Podíl částic prášku menších než 10  $\mu\text{m}$  by neměl překročit 10 %. Požadovaný je co nejmenší rozdíl ve velikosti částic prášku. Je důležité určit správný poměr použitého prášku po recyklaci, neboť ten má vlastnosti mírně odlišné od prášku nepoužitého. [28, 29]

### Kvalitní uzemnění předmětu

Tento parametr je nutné dodržovat při elektrostatickém i elektrokinetickém nanášení prášku. Při elektrostatickém nanášení prášku se na upravovanou součást přenáší velké množství záporného náboje. Není-li tento velký přebytek elektronů účinně odveden dostatečným uzemněním, rychle se vytvoří na upravované součásti silný záporný náboj, který následně odpuzuje záporně nabitě částice prášku. [28, 29]

Při elektrokinetickém nanášení vychází ze stříkací pistole prášek pouze s kladným nábojem, což znamená, že má deficit elektronů. Pokud je upravovaná součást nevhodně uzemněna, vytvoří se silný kladný náboj, který pak odpuzuje kladně nabitý prášek opouštějící aplikační pistoli. Výsledkem je pak nerovnoměrná a nedostatečná tloušťka vrstvy prášku. U elektrokinetického nanášení je kvalitní uzemnění stříkací pistole zásadní podmínkou pro úspěšnou aplikaci prášku. Z důvodu, že prášek obdrží kladný náboj, je nutné uvolněné elektrony odvádět od země. Při absenci uzemnění stříkací pistole by se záporný náboj hromadil a prášek by následně procházel stříkací pistolí bez potřebného nabití. [28, 29]

### Kvalita stlačeného vzduchu

Do stříkacího zařízení je možné přivádět pouze stlačený vzduch, který je čistý a suchý. Kvalita stlačeného vzduchu má vliv na celý proces nabíjení a transportní vlastnosti prášku. Vzduch, který by nebyl čistý, může způsobovat vzhledové vady na zhotoveném povlaku. Maximální přípustná hmotnostní koncentrace vody ve stlačeném vzduchu je  $1,3 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  a oleje  $0,1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ . [28, 29]

### Kvalita vzduchu v lakovně

Relativní vlhkost pracovního prostředí by se měla pohybovat v rozmezí 45–50 %. Regulováním vlhkosti lze získat rychlejší a rovnoměrnější vytváření povlaků. [28, 29]

## **5.3 Metody nanášení práškových nátěrových hmot**

Nanášení práškových plastů lze rozdělit dle technologie vytváření povlaků na:

- bez předehřevu materiálu – nanášení elektrostatickým stříkáním (korona, tribo, rotační atomizér),
- s předehřevem materiálu – nanášení fluidní,
- kombinované,
- nanášení žárovým nástřikem. [12]



### 5.3.1 Elektrostatické nanášení

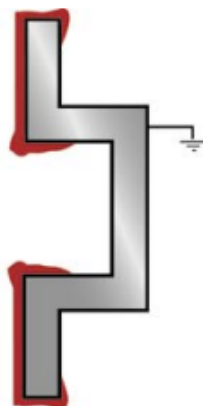
Součást je elektricky spojena se zemí. Působením elektrostatické síly jsou částice prášku přitahovány k součásti. Proud vzduchu z pistole přidává částicím rychlost směrem k součásti. Existují dva typy elektrostatických pistolí, korona a tribo pistole. Liší se svými prostředky pro přivádění elektrostatického náboje do prášku. [4, 30]

#### Korona

Nabíjení prášku koronovým efektem (Obrázek 18) je nejběžnější používanou metodou. Skládá se z trubice nesoucí vzdušný prášek do otvoru, ve kterém je umístěna elektroda. Elektroda je připojena na zdroj vysokého napětí (30–100 kV) a nízkého proudu. To umožňuje, aby energie přenášená na prášek zůstala poměrně nízká. Elektrony emitované elektrodou reagují s molekulami ve vzduchu a vytvářejí oblak iontů (většinou OH<sup>-</sup>) nazývaný korona. Během průchodu prášku ionizovaným vzduchem se volné ionty přichytí na částicích prášku, čímž se vytvoří záporný náboj, který přidrží částice práškového plástu na uzemněné součásti. Nevýhodou procesu elektrostatického rozprašování prášku s použitím koronových výbojových pistolí je to, že se mezi pistolí a součástí vytvoří pole vysokého napětí. Jelikož siločáry mají tendenci soustředit se na body nejbližší ke stříkací pistoli, je obtížné povlakovat součásti složitější geometrie (vnitřní plochy, dutiny). Tomuto jevu se říká efekt Faradayovy klece (Obrázek 17). [4, 30, 31, 32]

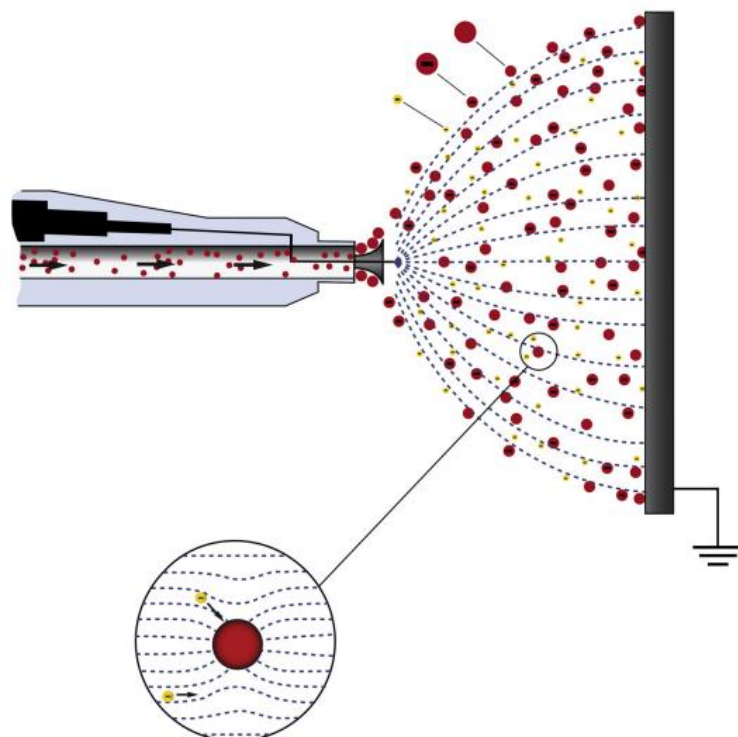
K zamezení tohoto problému se docílí úpravou důležitých parametrů:

- úpravou rychlosti proudění vzduchu,
- je nutné řídit elektrostatické pole tak, aby prášek nebyl Faradayovou klecí téměř ovlivněn,
- snížením napětí a zmenšením nebo zvětšením vzdálenosti mezi aplikační pistolí a součástí. [4, 30, 31, 32]



Obrázek 17: Důsledek Faradayovy klece [33]

Tloušťku povlaku naneseného elektrostatickým nástřikem pomocí koronové pistole lze upravit změnou napětí pistole a vzdálenosti mezi pistolí a součástí. Pro zvýšení tloušťky povlaku je třeba zvýšit napětí a zároveň zmenšit vzdálenost mezi aplikační pistolí a součástí. Silnějšího povlaku lze docílit přehřátím součásti před nanášením. [4, 30]



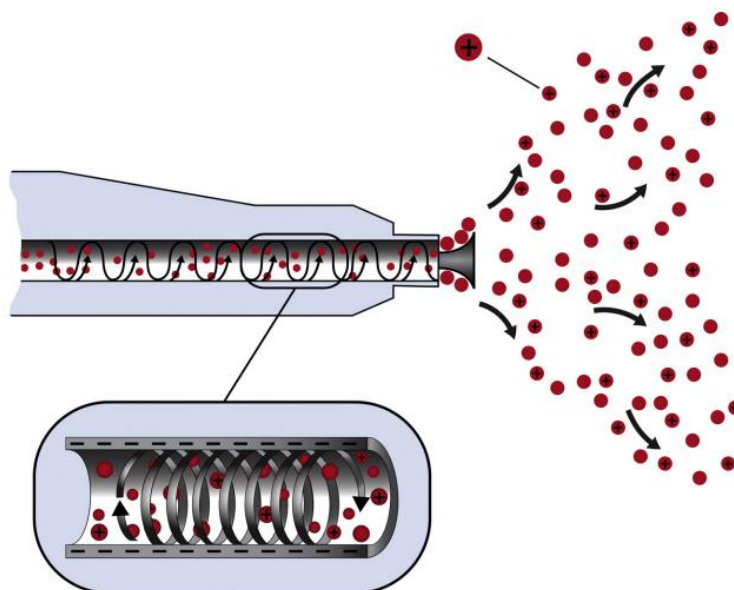
Obrázek 18: Schéma korona nabíjení prášku [34]

### Tribo

Tribostatické nabíjení (Obrázek 19) nevyužívá vysokého napětí, a tedy neprodukuje volné ionty. Účinnost této metody nanášení je přímo závislá na rychlosti, kterou se prášek pohybuje v trysce stříkací pistole. Výkon lze ovládat množstvím vzduchu, který protéká stříkací pistolí, a poměrem množství prášku a vzduchu. Vnitřek stříkacího válce pistole je potažen speciálním izolačním materiálem, který dodává elektrokinetický náboj do částic prášku třením. [12]

Částice prášku jsou nabíjeny třením generovaným prouděním skrz polytetrafluorethylenovou trubici v pistolí. Protože mezi pistolí a uzemněnou součástí není velký rozdíl v náboji, nebudou se vytvářet žádné významné magnetické siločáry. To vede pouze k minimálnímu efektu Faradayovy klece a z tohoto důvodu je možné prášek aplikovat na součásti složitější geometrie.

[4, 30, 32]



Obrázek 19: Schéma tribo nabíjení [34]

### Rotační atomizér

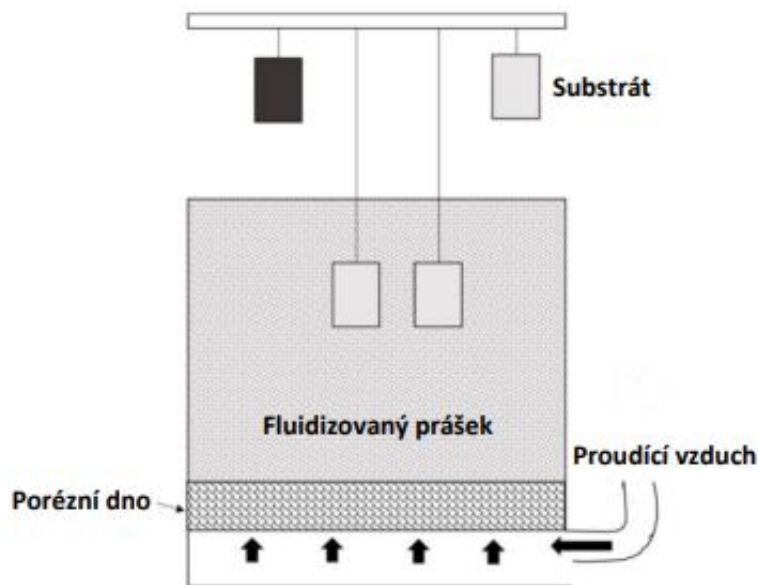
Prášek lze také aplikovat rozprašovací zařízením nazývaným zvon nebo rotační atomizér (Obrázek 20). Rotační atomizéry používají turbínu, která se otáčí v uzavřené hlavě zvonu. Prášek je dodáván do hlavy zvonu a pomocí odstředivé síly rozprášen do kruhového vzoru. Prášek prochází elektrickým polem mezi hlavou zvonu a externě namontovanou elektrodou a sbírá náboj. Rotační atomizér poskytuje vysokou účinnost elektrostatického nabíjení a tím pádem efektivní přenos prášku na základní materiál. Využití rotačního atomizéru je vhodné pro aplikaci na velké ploché součásti. [4]



Obrázek 20: Práškový zvonový atomizér [35]

### 5.3.2 Nanášení fluidní

Nanášení se provádí ponorem přehřátého předmětu do zfluidizovaného prášku (do tohoto stavu se prášek dostane pomocí vhněného čistého vzduchu ve spodní části lože skrz pórovité dno) ve fluidní vaně, kde působením akumulovaného tepla dojde k natavení částic práškového plastu na povrch předmětu (Obrázek 21). Celý proces je zakončen vytvrzením povlaku v dokončovací peci. [12, 36, 37]



Obrázek 21: Schéma znázorňující fluidní nanášení [32]

Pracoviště je tvořeno dvojicí pecí – přehřívací a dokončovací, mezi nimiž je umístěna fluidní vana. Termoplastický povlak se nechá vychladnout naopak termosetový se dále ohřívá až na teplotu vytvrzení. [36, 37]

Vytvořené povlaky mají vysokou odolnost proti korozi i proti mechanickému poškození. Fluidní nanášení využijeme v případě, kdy je požadována jednotná a tlustá vrstva povlaku (nad 250  $\mu\text{m}$ ). Možné využití: díly vodovodních potrubních sítí, drátěné koše myček nádobí, ledniček a mrazniček, zahradní kovový nábytek apod. [36, 37]

Výhody:

- možnost vytvoření povlaku větších tloušťek,
- vynikající odolnost povlaků proti korozi i proti mechanickému poškození,
- rychlá aplikace,
- téměř 100 % využití materiálu,
- automatický proces vhodný pro sériovou výrobu. [37]

Nevýhody:

- nutný předehřev základního materiálu,
- složitá výměna barvy během výrobního procesu,
- nelze použít na tenkostěnné součásti z důvodu nízké tepelné kapacity,
- aplikace je umožněna pouze na součásti jednoduchého tvaru,
- potřeba velkého objemu prášku při nanášení (zaplnění celé fluidní vany),
- vytvoření pouze tlustých povlaků. [10, 32]

### 5.3.3 Nanášení žárovým nástřikem

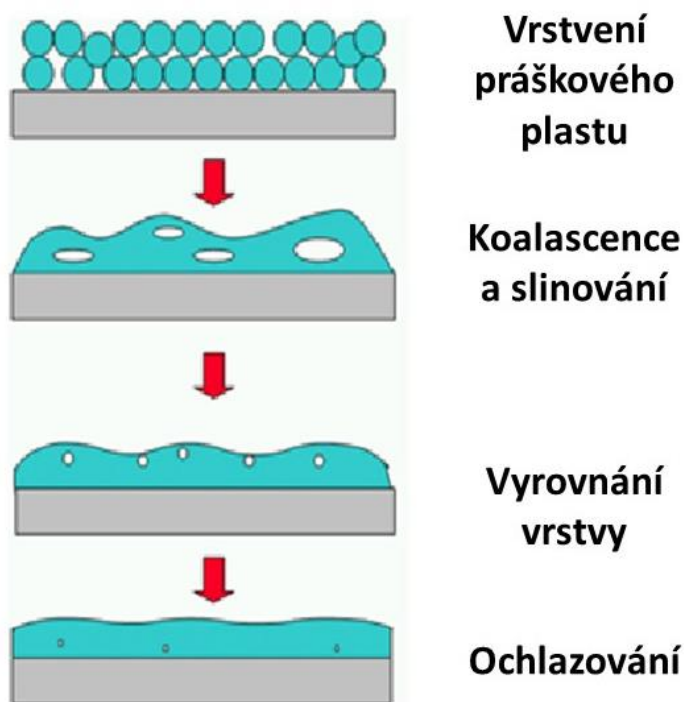
Technologie žárového nástřiku je používána pro ochranu především kovových povrchů. Tato technologie nanášení práškové barvy funguje na principu nasávání prášku z termoplastu do hořáku pomocí podtlaku z Venturiho trubice. Zásobník prášku je vybaven generátorem vibrací, který zabraňuje shlukování prášku. Speciální hořák má oddělené přívody pro plyn (nejčastěji propan nebo směs propan-butan), stlačený vzduch a práškový termoplast. V první fázi se zapálí směs plynu se vzduchem a v druhé fázi se do plamene dávkuje správná množství práškového termoplastu. Horké plyny, vzniklé při hoření, způsobují roztavení práškového termoplastu a nástřik na upravovanou čistou plochu. Na povrchu vzniká souvislá, pružná a vodotěsná vrstva, která je snadno opravitelná při poškození. [12]

## 6. VYTVRZOVÁNÍ

Po nanesení práškového plastu se součást dopraví do vytvrzovací pece, kde se částice prášku spojí do souvislého filmu, tečou a zesíťují (v závislosti na typu povlaku). Objemový podíl nastříkaného prášku, který skončí na součásti, se nazývá účinnost přenosu. Účinnost přenosu závisí na geometrii předmětu a velikosti částic. [32]

Vytvrzování je proces s velkým vlivem na výsledné vlastnosti povlaku. Správné podmínky vytvrzování mohou ovlivnit mechanické vlastnosti, protikorozní a chemickou odolnost a vzhled povrchu. U termoplastických plastů se povlak vytváří natavením polymeru bez jakékoliv další chemické reakce, zatímco u práškových plastů z termosetů dochází k vytvrzení. Tepelná tvrdidla se aktivují a dochází k vytvrzovací reakci mezi molekulami pryskyřice a tvrdidla. Po stanovené době se prášek vytvrdí a výsledkem je trojrozměrné zesíťování makromolekul. [10, 32, 38]

Volba teploty a času vytvrzování závisí na tloušťce materiálu, tepelné vodivosti a tvaru součásti. Obvykle se pohybují v rozmezí 140–200 °C po dobu 10–30 minut. Proces vytvrzování je znázorněn na Obrázku 22. [10, 32, 38]



Obrázek 22: Proces vytvrzování práškového plastu [34]

## 6.1 Typy pecí podle uspořádání

### Komorové

Komorové pece (Obrázek 23) jsou vybaveny vraty s bezpečnostním uzávěrem. Zavážení součástí je prováděno vsázkovým způsobem. Komorové pece jsou konstruovány buď jako vratné (zaváženy jedněmi hlavními dveřmi) nebo průchozí (disponují jedním párem dveří umístěných proti sobě), u kterých je zjednodušena manipulace s upravovanými předměty. Pro umístění součástí v peci se využívá závěsná drážka nebo naváděcí lišty pro zavážecí vozíky. Vzhledem k dobré teplotní setrvačnosti se v poměrně krátké době dají vyhřát na pracovní teplotu. [39, 40]



Obrázek 23: Komorová pec [39]

### Kontinuální

Součásti prochází pracovním prostorem plynule na dopravníku. Proti úniku tepla jsou pece opatřeny vzduchovou clonou nebo sifónovým uzávěrem.

Jsou koncipovány jako přímočaré (Obrázek 24), které jsou vhodné především pro dlouhé součásti. Jejich nevýhodou je velká prostorová náročnost a poměrně velký únik tepla. Druhým typem jsou pece vratné s jedním či více ohyby dopravníku. Průběžné vratné pece mají pouze jediný otvor, který slouží ke vstupu i výstupu součástek. Tímto je zmenšena prostorová náročnost i únik tepla. [37, 39, 40]





Obrázek 24: Kontinuální pec plynová [41]

## 6.2 Typy pecí podle zdroje tepla

### 6.2.1 Konvekční, horkovzdušná vytvrzovací pec

Konvekční neboli horkovzdušné pece (Obrázek 25) jsou nejčastěji využívaným prostředkem na vytvrzení práškového plastu na povrchu základního materiálu. Vzhledem k univerzálnosti těchto pecí je možné vytvrzovat všechny typy práškových plastů a nejrůznější tvary součástí. Při aplikaci této metody vzniká riziko výskytu pórů na povrchu součástí vypařujícím se vzduchem. Pece lze rozdělit podle druhu topného média, kterým může být elektrické vyhřívání, zemní plyn s přímým/nepřímým ohřevem či vyhřívání lehkými topnými oleji. Přímé vytápění zemním plynem oproti nepřímému šetří energii, znamená však také riziko spojené s přítomnými spalinami v pracovním prostoru. [1, 10, 17]

Z důvodu rovnoměrného prohřátí součásti a konstantní teplotě v celém pracovním prostoru pece je potřeba u průběžných pecích vytápěných stejným typem média zaručit potřebnou cirkulaci vzduchu. Cirkulaci vzduchu, která se vytváří pomocí vzduchových ventilátorů, je nutné regulovat tak, aby nedocházelo k odfouknutí nevytvrzeného práškového plastu z povrchu součásti. Rychlost proudícího vzduchu by se měla pohybovat mezi 1 až 2 m·s<sup>-1</sup>. Na vstupu a výstupu průběžných pecí jsou umístěny teplotní clony, které snižují teplotní ztráty. Clony jsou vytvořeny proudem teplého vzduchu, který rozhání ventilátory. Využití průběžných pecí je provozně jednoduché a hojně rozšířené. Nevýhodou těchto pecí je pomalé rozehtání na požadovanou teplotu a drahý provoz. [1, 10, 17]





Obrázek 25: Horkovzdušná konvekční pec [42]

### 6.2.2 Infračervené vytvrzování (IR)

Infračervená energie je forma záření, které v elektromagnetickém spektru spadá mezi viditelné světlo a mikrovlny. Obdobně jako jiné formy elektromagnetické energie se IR šíří ve vlnách, které lze popsat známým vztahem mezi vlnovou délkou, frekvencí a energií. V praxi toto znamená, že teplota roste s klesající vlnovou délkou. [43, 44]

Vytvrzení pomocí IR se dosahuje buď absorpcí, kdy se energie přenáší přímo do prášku, nebo transmisí, kde nabývá na teplotě povrch součásti. Infračervená energie se přenáší pouze v přímé linii podobně jako osvětlující baterka. U tvarově složitých součástí z tohoto důvodu vzniká velké množství slepých míst. Vzhledem k tomu, že tepelná vodivost kovů je vynikající, přenáší se určitá část energie na základní materiál selektivně. Toto vede k vytvrzení skrytých oblastí pomocí vodivého mechanismu, který umožňuje vytvrzení například na vnitřní straně ocelové trubky. [43, 44]

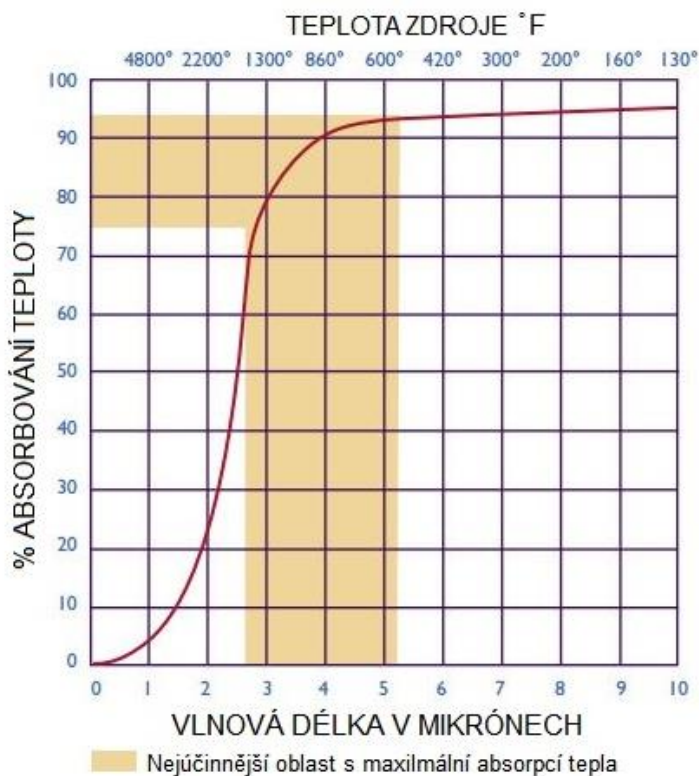
#### Jednotlivé vlnové délky

Krátká vlnová délka IR se vyznačuje vyzařováním jasného viditelného světla. Většina energie je přenášena na povrch součásti. Tento typ vytvrzování je vhodný pro složité tvary součástí, kdy je využito výše zmíněného vodivého mechanismu. Krátkovlnné IR pece disponují nejvyšší rychlostí ohřevu. [1, 43]

Střední vlnová délka IR (Obrázek 26) je nejrozšířenější volbou pro vytvrzování, jelikož energie je absorbována přímo povlakem. Tento typ vlnění je vhodné používat na jednoduché,

symetrické součásti. Na výslednou kvalitu vytvrzení má velký vliv umístění jednotlivých zářičů např. použití stropních a podlahových zářičů. [1, 43]

Dlouhé vlnové délky IR nejsou pro vytvrzování dostatečně účinné. Velká část vyprodukované energie se ztrácí neefektivním konvekčním ohřevem. Nepatrné množství IR energie, které se dostane k povlaku, je pohlceno již na povrchu a vzniká tak riziko vzniku vizuálních defektů. [43]



Obrázek 26: Optimální délka IR vlny [30]

### Řízení IR pecí

Většina IR zdrojů vyzařuje energii v určitém vlnovém pásmu. Šířka tohoto pásma určuje stupeň penetrace a má velký vliv na výsledné vytvrzení. Některé systémy jsou schopny ladit výstupné vlnění, kdy zabudovaný optický pyrometr sleduje povrchovou teplotu zářiče. [43]

Dalším kontrolním bodem je množství energie na povrchu povlaku. Tento parametr je známý jako Wattova hustota. Pokud je Wattova hustota příliš vysoká, povlak se na povrchu spálí a degraduje. Tento parametr lze upravit snížením počtu zářičů nebo zvětšením vzdálenosti mezi zářičem a součástí. [43]

IR záření je generováno z elektrických či plynových zdrojů. V případě elektrického IR zdroje záření generují wolframová vlákna krátkou vlnovou délku (1 650–2 200 °C) a nichromové střední vlnovou délku (980–1 100 °C). Vlákna jsou nejčastěji umístěna

v křemenné trubici. Generátory s dlouhou vlnovou délkou pracují při povrchové teplotě 540–650 °C a pouze 40–50 % energie je přeměněno na IR, přičemž zbytek energie působí pouze konvekčním ohřevem. [43, 44]

IR záření je fokusováno pomocí reflektorů umístěných na zářiči. Aby bylo dosaženo ideální odrazivosti a čistoty IR záření, jsou reflektory opatřeny povrchovou úpravou z drahých kovů (nejčastěji zlata). Stěny infračervené pece mohou sloužit jako sekundární reflektor. Na výkon zářiče má hlavní vliv jeho čistota. Zářiče s krátkou vlnovou délkou disponují životností přibližně 5 000 pracovních h. [43, 44]

Plynové IR pece používají plamen k ohřevu keramické tyče, která po zahřátí generuje IR záření o střední a dlouhé vlnové délce. Plynové IR pece jsou obvykle kombinovány s plynovými konvekčními pecemi. [43, 44]

#### Výhody a nevýhody, porovnání s konvekcí

IR vytvrzovací pece jsou velice rychlé (významná časová úspora), čisté (eliminace vedlejších produktů spalování) a efektivní. Nemalou výhodou je významné šetření provozních nákladů za energie, úsporou času a místa na výrobní lince. IR pece nevyžadují proudění vzduchu kolem součásti a v důsledku toho je podstatně minimalizováno znečištění prachem a dalšími nečistotami v okolí výrobní linky. [43, 44]

Hlavní nevýhodou IR pecí je obtížné vytvrzení tvarově složitých dílů, kdy se elektromagnetické vlnění šíří pouze v přímé linii. Skryté vnitřní povrchy pak nemusí být správně vytvrzeny a vzniká zde riziko vad. Tento problém řeší kombinace IR a konvekční horkovzdušné pece. Dalším problémem při použití IR je složení a stav povrchově upravované součásti. Jednotlivé kovy absorbují IR energii odlišně. Tato vlastnost je známá jako emisivita. Například zlato, které má velmi nízkou emisivitu, se používá jako reflektor kvůli své nízké absorpci. Běžné materiály jako je železo, ocel a hliník mají emisivity ve stejném obecném rozsahu. Povrchová úprava leštěním může změnit emisivní vlastnosti těchto materiálů z dobrých absorbérů na reflektory. [43, 44].

Oproti konvekčním pecím mají IR pece kratší vytvrzovací cyklus a menší požadavek na prostor pro umístění celého zařízení. Infračervené pece ohřívají součástky sálavým teplem, což znamená, že se teplo přenáší přímo na povrch součásti. Prášek zahříván zevnitř směrem ven. [43, 44]

Sálavým způsobem přenosu tepla se vytvrzuje prášek mnohem rychleji, než je tomu u pecí konvekčních. Pořizovací náklady infračervených pecí jsou oproti konvekčním pecím

výrazně vyšší. Infračervené pece se používají v sériové výrobě plochých součástek jednoduchého tvaru. [43, 44]

#### Kombinace IR s konvekcí

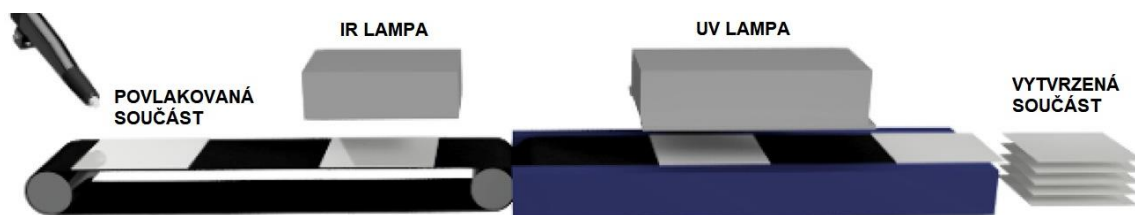
Kombinované pece používají v první fázi IR záření, které slouží k rychlému roztavení prášku. Konvekční horkovzdušná pec pak následně může využívat větší proudění vzduchu, které již nenaruší nezapečenou vrstvu prášku na povrchu součásti. Větší průtok vzduchu umožňuje rychlejší přenos tepla a díky tomu kratší celkovou dobu vytvrzení. Další možností je kombinace IR zdrojů s konvekčním v jeden čas, kdy je možné vytvrzovat součásti různých tloušťek v prostoru pece. IR zdroj se směřuje na součásti o větší tloušťce, zatímco konvekční zdroj obstará zbytek. Všechny tyto aspekty vedou ke zvýšení produkce linky. [4, 45]

### 6.2.3 Radiálně vytvrzovací pece (UV)

Základní výhodou UV práškových plastů (Tabulka 2) je možnost jejich zpracování při mnohem nižších teplotách než tradiční termosetové prášky. Zatímco běžné termosetové prášky vyžadují teploty v rozmezí 177–204 °C, běžné UV vytvrditelné prášky vyžadují teploty v rozmezí 104–121 °C (Tabulka 1). Z tohoto důvodu lze UV práškové plasty aplikovat i na materiály, které jsou citlivé na teplo (dřevo, plasty, atd.) [7]

*Tabulka 1: Porovnání teplot a časů běžných termosetových a UV vytvrditelných prášků [7]*

Termosetové prášky				
Zahřívání/Vytvrzování		Teploty [°C]	Celkový čas [min]	Povlakovaný materiál
Konvekční		140–220	15–30	Kov
IR + konvekce		140–220	10–25	Kov
Infračervené (IR)		160–250	1–15	Kov
Indukční		240–300	<1	Kov
UV vytvrditelné prášky				
Zahřívání	Vytvrzování			
IR/Konvekce (1–2 min)	UV (v sekundách)	90–120	1–3	Kov, dřevo, plast, atd.



Obrázek 27: Princip vytvrzování UV práškových plastů [46]

U UV vytvrzovaných prášků jsou procesy tavení a vytvrzování odděleny. K roztavení prášku se používá konvenční či IR zdroj, k vytvrzení dochází až pod UV zářením. Celý proces je znázorněn na Obrázku 27. Teplota a čas potřebný pro roztavení UV práškových plastů se pohybuje v rozmezí 80–121 °C po dobu 1 až 2 minut. Vytvrzování pomocí UV záření je téměř okamžité (v řádu sekund). [7]

#### Chemické procesy UV vytvrzovaných prášků

Pro UV vytvrditelné práškové plasty musí výchozí materiál obsahovat nenasycené dvojnásobné vazby. Pojivo se skládá ze dvou komponent: pryskyřice a koreakčního činidla. Pryskyřice je nenasycený polyesterový polymer, do kterého je zakomponována kyselina maleinová či fumarová. Koreakčním činidlem je polyuretan obsahující nenasycený vinil-ether. UV vytvrzování pojiva je založeno na kopolymerizaci elektronově pozitivních vinyl-etherních skupin s elektronegativními maleinovými nebo fumarovými skupinami. [7]

Ultrafialové záření, známo jako neionizující nebo aktinické záření, je součástí elektromagnetického spektra s vlnovou délkou v rozmezí od 40 do 400 nm (Obrázek 28). Ultrafialové záření je rozděleno do následujících čtyř oblastí: [7]

- vakuové UV (VUV): 40–200 nm:

Vakuové UV (VUV) je silně absorbováno křemenem, který se používá jako materiál obalu pro žárovky. Z důvodu, že disponuje malou hloubkou průniku, VUV není vhodné pro běžné vytvrzování zářením. [7]

- UV C: 100–280 nm:

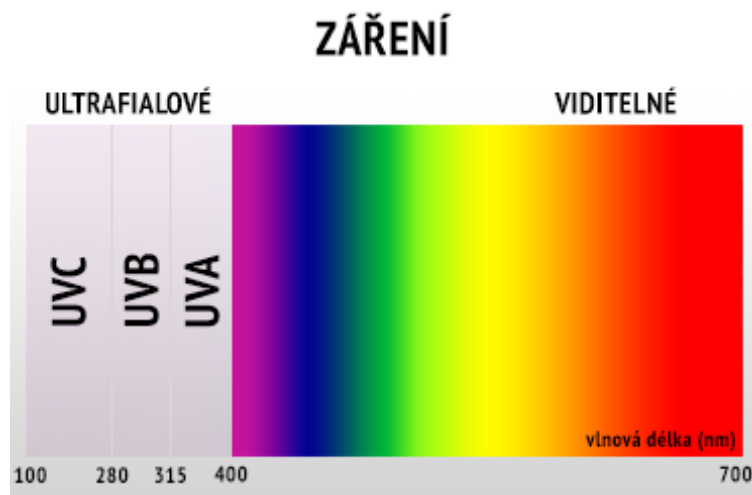
Rozmezí vlnové délky UV C záření se pohybuje od 100 do 280 nm. Spodní hranici tohoto záření je možné nalézt pouze ve vesmíru. [47]

- UV B: 280–315 nm:

UV B obsahuje nejkratší vlnové délky záření na zemském povrchu a vážně poškozuje polymerní materiál. Toto záření je absorbováno okenním sklem. [47]

- UV A: 315–400 nm:

UV A je přítomné v slunečním záření. Vlnová délka se pohybuje v rozmezí od 315 do 400 nm. Vlnové délky UV A jsou výhodné z hlediska zpracování a disponují menším bezpečnostním rizikem. Spodní hranice ultrafialového záření způsobuje nežádoucí změny pigmentace některých polymerních materiálů. [47]



Obrázek 28: Rozdělení UV záření [48]

Tabulka 2: Výhody a nevýhody technologie UV vytvrzování [46]

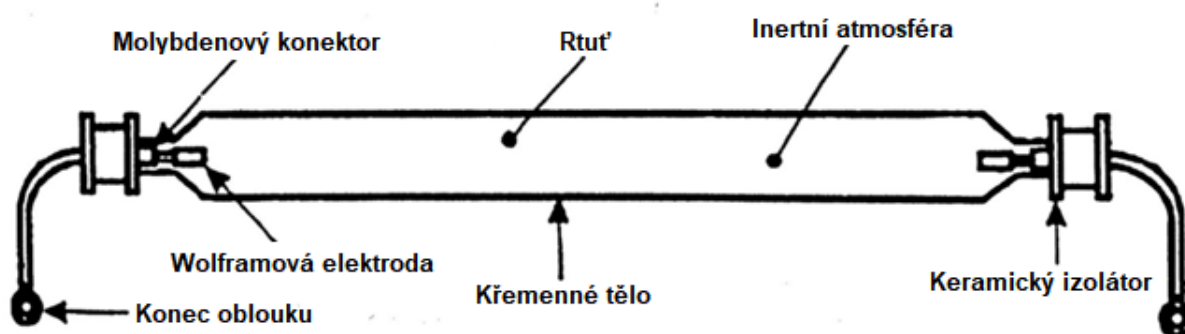
Výhody	Nevýhody
Hladký povrch, vysoký lesk, odolnost proti oděru, tvrdost a chemická odolnost	Omezeno na určité materiály
Šetrné k životnímu prostředí, úspora energie, snížená produkce odpadu	UV vytvrzované povlaky jsou citlivé na inhibici kyslíku
Nízká teplota	UV světlo musí „vidět“ fotoiniciátor, aby zahájilo proces vytvrzování, z tohoto důvodu je obtížné vytvrzování složitých geometrií
Velmi rychlé výrobní rychlosti, prostorově úsporné instalace	Vysoké investiční náklady na vybavení a materiál

## ZDROJE UV

Důležitou podmínkou pro UV vytvrzování je zdroj UV záření, který generuje vysoce intenzivní UV záření. [7]

Nejčastěji používaným zářičem pro procesy UV vytvrzování je středotlaký rtuťový zářič. Jeho emisní spektrum lze využít k excitaci běžně používaných fotoiniciátorů. Kromě toho má tento typ zářiče relativně jednoduchý design, je levný, lze jej snadno dodatečně namontovat na výrobní linku a je k dispozici v délkách až 2,5 m. Běžně používané úrovně výkonu jsou v rozsahu 40–240 W·cm<sup>-2</sup>. [7]

Středotlaká rtuťová oblouková výbojka se skládá z utěsněné válcové křemenné trubice s wolframovými elektrodami na každém konci. Křemenná trubice je zvolena z důvodu vysoké propustnosti ultrafialového záření a nízkého koeficientu tepelné roztažnosti, což jí umožňuje odolávat vysokým provozním teplotám. Trubice obsahuje rtuť a inertní startovací plyn (obvykle argon). Příklad zdroje je na Obrázku 29. [7]



Obrázek 29: Středotlaká rtuťová oblouková výbojka [7]

Spektrální výkon středotlaké výbojky lze měnit pomocí dopingu tj. přidání malého množství halogenidu kovu do výplňového materiálu (rtuti). Běžně přidávané halogenidy kovu jsou: gallium, antimon, hořčík, kobalt, olovo a thalium. Středotlaké výbojky mají dlouhou životnost (typicky přesahující 3 000 h). Intenzita vyzařovaného světla a relativní intenzita spektrálních čar se s časem mění, z tohoto důvodu je nutné výstup periodicky kontrolovat spektrometrem. Tyto zářiče obvykle ztratí 10 % svého počátečního výkonu během prvních 100–200 h provozu. Životnost je ovlivněna spínacím cyklem (zapínání a vypínání zářiče) a příkonem. [7]

Pro zvýšení účinnosti a bezpečnosti jsou zářiče vybaveny skleněným filtrem, který většinu viditelného světla a složky UV-B a UV-C eliminuje. [49]

### UV-LED

UV obloukové a středotlaké zářiče jsou velmi účinné, ale mají svá omezení:

- jsou energeticky neefektivní,
- zářiče vyzařují infračervené teplo,

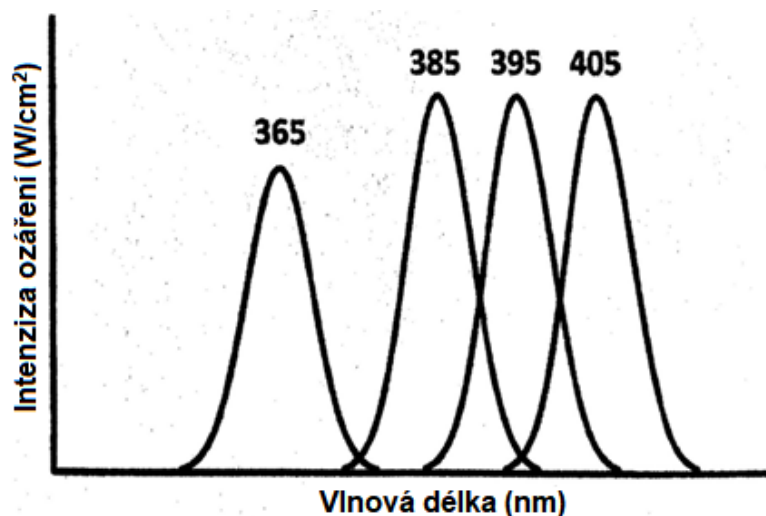
- v průběhu času účinnost zářiče klesá,
- jsou dopovány těžkými kovy, aby se změnilo spektrum záření,
- větší zařízení vyžadují vzduchový chladicí systém,
- obtížnost nastavení a umístění zařízení na robota. [50]

UV-LED diody řeší mnoho z těchto omezení:

- energetická účinnost,
- generované teplo LED zářiče je výrazně menší,
- okamžité zapnutí/vypnutí,
- delší životnost LED zářičů,
- vyšší výkon LED zářičů,
- regulace rtuti v rámci ekologie. [7]

Dioda vyzařující světlo je polovodičovým zdrojem světla se dvěma vodiči. Jedná se o p-n přechodovou diodu, která při aktivaci emituje světlo. Když je na vodiče aplikováno vhodné napětí, elektrony jsou schopny rekombinovat se s elektronovými dírami v zařízení a uvolňovat energii ve formě fotonů. Dioda vede elektrický proud pouze jedním směrem. [7]

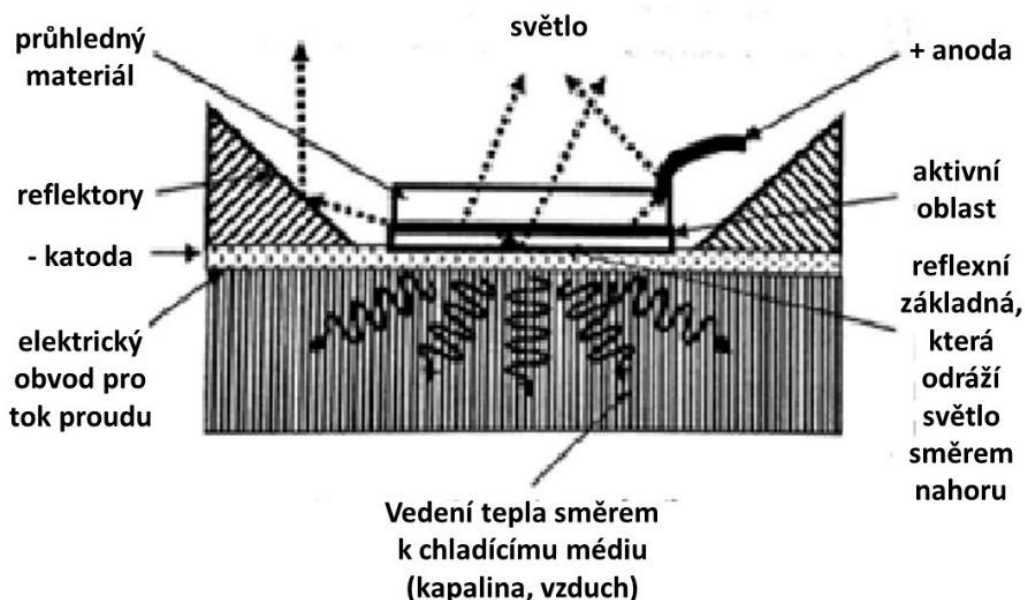
UV-LED čipy, stavební kameny pro UV-LED žárovky, jsou vyrobeny z velmi malých tenkých plátek polovodičových materiálů jako je nitrid gallia (GaN), které jsou dopovány nebo impregnovány přísadami. Typ materiálu a jeho složení určují vyzařovanou vlnovou délku. Komerční ultrafialové světelné diody vyzařující světlo (UV-LED) jsou polovodičové světelné zdroje, které vyzařují velmi diskrétní vlnové délky světelné energie, což vede k zvonovitému emisnímu spektru, jak je znázorněno na Obrázku 30. [7]



Obrázek 30: Křivky emitovaných vlnových délek pro běžné UV-LED [7]



Výhodou soustavy je, že pokud jedna dioda selže, je intenzita světla ovlivněna jen minimálně. LED zářiče vyzařují UV pouze v úzkém pásmu vlnové délky s jediným vrcholem. Ten je středem specifické vlnové délky, což snižuje přenos tepla do součástí. Schéma základního UV-LED zářiče je znázorněno na Obrázku 31. [7]



Obrázek 31: Schéma UV-LED zářiče [7]

Nejčastější vlnové délky UV-LED výbojek jsou v oblasti UV A. Typické vlnové délky jsou 365, 385, 395 a 405 nm. Rozdíly mezi typickými rtuťovými obloukovými a UV-LED zářiči jsou uvedeny v Tabulce 3. [7]

Tabulka 3: Porovnání rtuťového obloukového a UV-LED zářiče [7]

Vlastnosti	Rtuťový obloukový zářič	UV-LED zářič
Životnost [hod]	1500–2000	Až 40000
Zapnuto/Vypnuto	10 minut	Okamžité
Generované teplo	~ 350	~ 60
Konzistence výstupu	Časem klesá až o 50 %	95 % +
Údržba	Výměna žárovek a čištění reflektoru	Minimální
Příkon	Velký	Malý
Ekologie	Rtuťový odpad + vznik ozonu	Bez odpadů a ozonu
Energetická úspora	X	50 % až 70 %

#### **6.2.4 Indukční pece**

Indukční pece se používají k předeřtí součástí před práškovým lakováním, aby se urychlila celková tvorba povlaku. Součást je ohřívána pomocí indukovaných vířivých proudů, při vysokých rychlostech linky a běžné jsou vrstvy větší než 250  $\mu\text{m}$ . Lze aplikovat pouze na materiály, které se dají indukovat. Tato forma předeřtí se využívá při aplikaci práškového plastu na trubky používaných např. pro přenos plynu. [4, 10]

#### **6.2.5 Laser**

Laserové vytvrzování je velmi okrajově využívanou metodou. Používá se na lokální vytvrzování termosetových práškových plastů (obsahující fotosenzitivní vytvrzovací činidla). Díky fokusaci paprsku je možné vytvrzovat různé druhy práškových plastů, které jsou aplikovány na jedné ploše. Vytvrzení probíhá v rozmezí 1–2 min. Pro uspokojivý výsledek vzniklého povlaku je nutné pracovat s řadou parametrů – výkon zdroje, ohniskové vzdálenosti a rychlosti pohybu laserové hlavy. Celý proces je velmi složitě optimalizovat a z tohoto důvodu je momentálně využíván pouze experimentálně. [51]

## 7. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 7.1 Návrh experimentu

Experimentální část diplomové práce se zabývá porovnáním a následným vyhodnocením dvou metod vytvrzování povlaku. Jedná se o porovnání metody vytvrzování v horkovzdušné peci s vytvrzováním pomocí IR záření.

Pro experimentální část práce bylo připraveno celkem 20 vzorků dvou typů rozměrů (14 pro zkoušení povlaku + 6 pro stanovení času a vzdálenosti při IR vytvrzování). Prvním typem vzorku byla kovová destička (dále označována jako "deska") o rozměrech 150 x 100 x 3 mm, druhým typem byl kovový plech (dále označován jako "plech") o rozměrech 265 x 165 x 1 mm. Použití obou typů vzorků bylo nezbytné pro následné zkoušky přilnavosti povlaku. Pro různé typy zkoušek přilnavosti se nehodí stejný typ vzorku (např. pro odtrhovou zkoušku se nehodí stejný typ vzorku jako pro zkoušku odolnosti proti oděru za mokra právě kvůli rozměrům). Všechny vzorky byly z nelegované konstrukční oceli S235JRG1. Chemické složení je uvedeno v Tabulce 4.

Tabulka 4: Chemické složení oceli S235JRG1 [52]

Prvky v oceli	C	Mn	N	P	S
Chem. složení v % hmot	max 0,17	max 1,40	0,007	0,045	0,045

Celý proces povrchové úpravy je složen z předúpravy povrchu (mechanická, chemická), nanesení práškového plastu a vytvrzení.

Na všechny zkoušené vzorky byla pro zajištění stejných podmínek pro všechny povlaky použita stejná prášková barva, a to termosetový epoxidový prášek FAPROXYD 620. Aplikace práškového plastu byla provedena elektrostatickým nanášením, technologií tribo. Po nanesení práškového plastu na povrch vzorků následovalo vytvrzení. Prvním metodou vytvrzování povlaku byla konvekční komorová horkovzdušná pec s elektrickým ohřevem. Pec byla nastavena podle technických požadavků použitého práškového plastu. Druhou metodou vytvrzování povlaku bylo vytvrzování pomocí IR záření, jednotrubicový krátkovlnný IR zářič pracující s krátkými vlnami o vlnové délce 1,2  $\mu\text{m}$ .

Po dokončení povrchové úpravy, povlaku práškového plastu byly na všech vzorcích provedeny následující zkoušky:

- zkouška přilnavosti křížovým řezem podle ČSN EN ISO 16276-2,
- soudržnost povlaku nátěrového systému pomocí odtrhové zkoušky dle ČSN EN ISO 4624,
- přilnavost povlaku mřížkovou zkouškou podle normy ČSN EN ISO 2409
- korozní zkouška dle normy ČSN EN ISO 9227,
- zkouška odolnosti proti oděru za mokra dle normy ČSN EN ISO 11998 u vzorků typu plech.

V poslední části experimentu byla provedena analýza a vyhodnocení všech aplikovaných zkoušek. Na základě těchto výsledků jsou vyhodnoceny obě použité metody vytvrzování z hlediska efektivity časové náročnosti a výsledných vlastností povlaku. Vzorky vytvrzeny v horkovzdušné peci jsou v další části práce označovány HRK (1-5), vzorky vytvrzeny pomocí infračerveného záření jsou označovány IR (1-5).

## 7.2 Předúprava povrchu

U všech vzorků typu deska byla nejdříve provedena mechanická předúprava v podobě tryskání na metacím stroji od firmy S.A.F Praha (Obrázek 32). Jako abrazivum byly použity ocelové kuličky. Celková doba tryskání vzorků činila 4 minuty. Účelem tryskání bylo nejen očistit povrch od nečistot, ale především zajistit vhodný kotvící profil pro následné lepší uchycení povlaku.



Obrázek 32: Tryskací zařízení od firmy S.A.F. Praha [foto autora práce]

Jelikož se v další části experimentu aplikovala zkouška odolnosti proti oděru za mokra, musely být použity delší a tenčí plechy. V případě použité mechanické předúpravy tryskání by došlo z důvodu malé tloušťky plechu k jeho deformaci. U všech vzorků typu plech byla jako předúprava použita technologie broušení. Plechy se brousily ručně pomocí brusného papíru zrnitosti P40.

Po mechanické předúpravě byly vzorky odmaštěny pomocí přípravku Isopropanol (Příloha 1). Odmašťovacím prostředkem byly uvolněny ulpělé nečistoty z povrchu (nejčastěji v podobě mastnot), které byly k povrchu chemicky vázány.

### 7.3 Měření drsnosti

Měření drsnosti bylo provedeno podle normy ČSN EN ISO 21920-3. Měřilo se celkem sedm vzorků. Na šesti vzorcích typu deska, které prošly předúpravou tryskáním a na vzorku typu plech, který byl mechanicky předupraven pomocí brusného papíru. Samotné měření drsnosti je proces, který slouží k určení povrchové hrubosti a textury. Tato metoda je klíčová pro hodnocení materiálů z hlediska kotvícího profilu, který je nezbytný pro správnou přilnavost povlakové vrstvy. [61]

K měření drsnosti vzorků byl použit drsnoměr, konkrétně přístroj Mitutoyo SJ-301 (Obrázek 33). Tento přístroj je vybaven sondou, která se pohybuje po povrchu vzorku a zaznamenává výškové rozdíly. Poté se vypočítá aritmetický průměr těchto výškových rozdílů a přístroj ukáže na displeji výsledné hodnoty Ra a Rz. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 5.



Obrázek 33: Drsnoměr Mitutoyo Surftest SJ-301 [foto autora práce]

#### Postup měření drsnosti

V prvním kroku bylo zařízení zkalibrováno. Poté byl každý vzorek měřen na 10-ti místech. U každého vzorku se nejmenší a největší naměřená hodnota vyloučila a pro další výpočet již nebyla využita. Ze zbylých 8-mi hodnot se vypočítal aritmetický průměr (1) a směrodatná odchylka (2).

Aritmetický průměr byl vypočten pomocí vztahu (1):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{n} \cdot (x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \dots + x_n) \quad (1)$$

Kde,

$\bar{x}$ .....aritmetický průměr [ $\mu\text{m}$ ]

$x_i$ .....jednotlivé naměřené hodnoty [ $\mu\text{m}$ ]

$n$ .....počet měření [-]

Směrodatná odchylka byla vypočtena pomocí vztahu (2):

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

Kde,

$s$ .....směrodatná odchylka [ $\mu\text{m}$ ]

$x_i$ .....jednotlivé naměřené hodnoty [ $\mu\text{m}$ ]

$\bar{x}$ .....aritmetický průměr [ $\mu\text{m}$ ]

$n$ .....počet měření [-]

#### Výsledné hodnoty

Tabulka 5: Výsledná drsnost vzorků

Vzorek	Deska		Plech	
	Ra	Rz	Ra	Rz
$\phi$	6,87	40,91	1,60	12,17
S. odchylka	1,51	7,49	0,20	0,834

## 7.4 Nanášení práškového plastu

Nanášení práškového plastu na vzorky bylo provedeno pomocí elektrostatického nanášení. Byla zvolena technologie nanášení pomocí tribostatického nabíjení. (Obrázek 34). Účinnost této metody nanášení je přímo úměrná rychlosti proudění prášku stříkací pistolí. Stříkací válec pistole je potažen speciálním izolačním materiálem, který do otírajících se částic prášku vnáší elektrokinetický náboj. Tento elektrokinetický náboj ukotví prášek

na uzemněném předmětu. Tribostaticky byl nanášen termosetový epoxydový prášek FAPROXYD 620 (Příloha 6). Aplikace práškového plastu byla provedena v nanášecí kabině od firmy DATEL Ledec s.r.o. (Příloha 12).

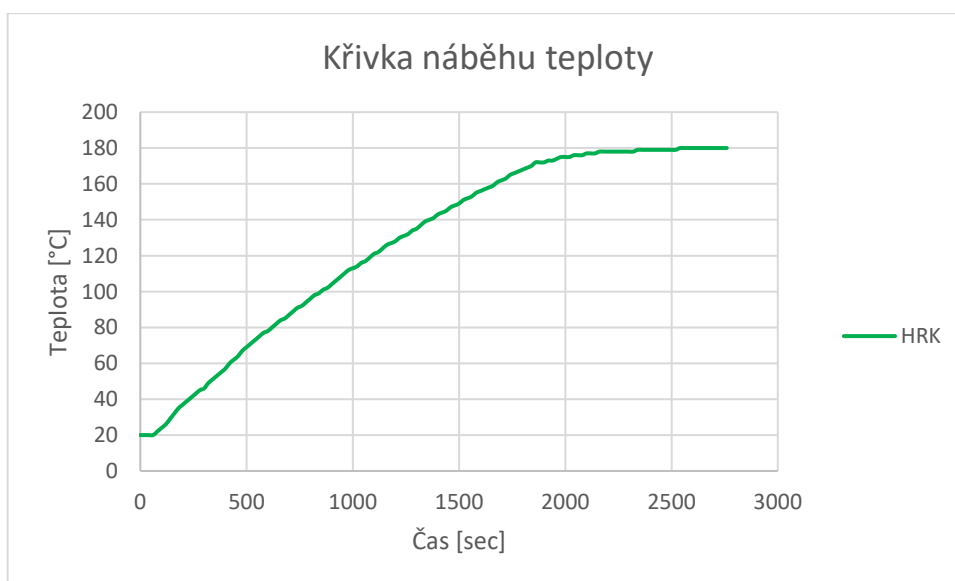


Obrázek 34: Elektrostatické nanášení pomocí tribostatického náboje [foto autora práce]

## 7.5 Vytvrzování práškového plastu

### 7.5.1 Konvekční horkovzdušná pec

Prvním médiem pro vytvrzení byl horký vzduch. Vytvrzování vzorků proběhlo v komorové elektricky vytápěné horkovzdušné peci od firmy Thermo Scientifi (Příloha 11). Teplota byla nastavena, dle materiálového listu práškového plastu (Příloha 6), na 180 °C, čas vytvrzování vzorků činil 15 minut. Teplotní diagram náběhu teploty v peci je znázorněn na Grafu 1. Potřebný čas k nahřátí pece na 180 °C činil 2760 sekund, tedy 46 minuty.

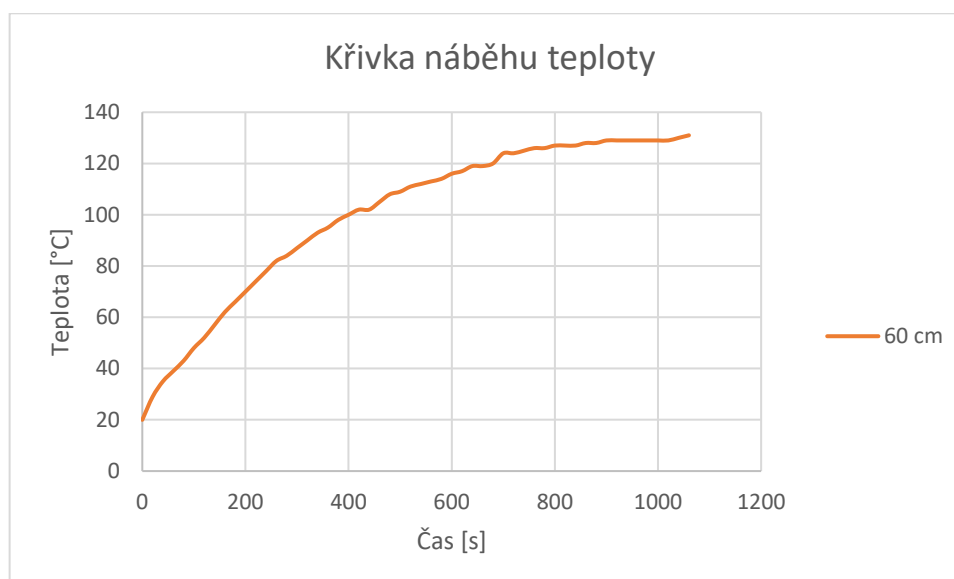


Graf 1: Křivka náběhu teploty horkovzdušné pece [excel]

## 7.5.2 Infračervený jednotrubicový zářič

Druhá metoda vytvrzování povlaku prostřednictvím IR záření byla provedena použitím jednotrubicového IR zářiče od firmy Hedson. Z materiálového listu práškového plastu lze vyčíst pouze hodnotu teploty, která je potřebná k jeho vytvrzení. Parametry jako vzdálenost zářiče od povlakovaného dílu a potřebný čas na vytvrzení v materiálovém listě uvedeny nejsou. Tyto parametry bylo nutné zjistit experimentálně. Pro určení stupně vytvrzení byla provedena u vzorků zkouška odtrhem. Jako výchozí hodnoty rozhodné pro porovnání, byly použity odtrhové síly pro povlaky vytvrzené pomocí horkovzdušné pece.

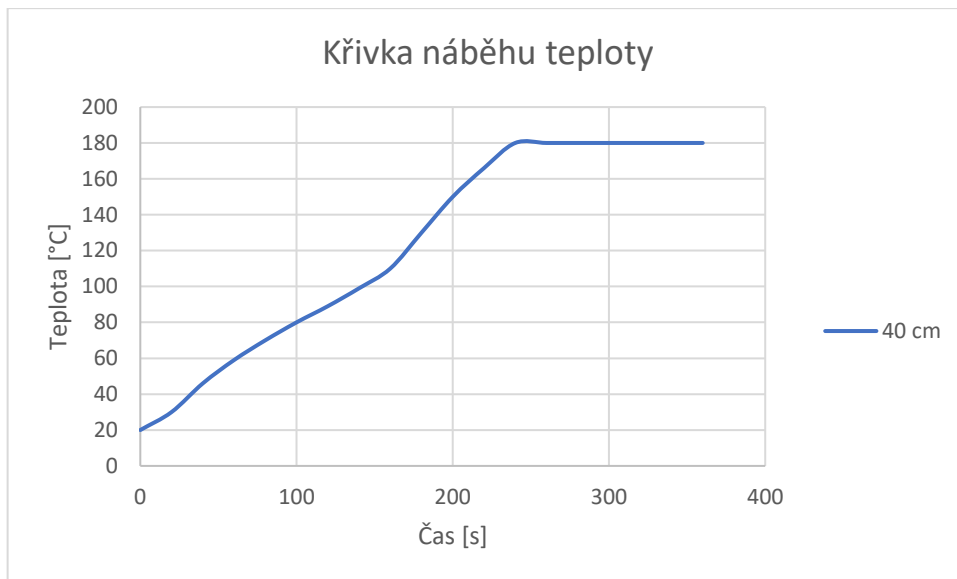
V prvním fázi byla nejdříve zkoušena optimální vzdálenost. Na produktovém listě od firmy Hedson (viz Příloha 7) je doporučené rozmezí vzdálenosti pro vytvrzování. Z Grafu 2 je patrné, že při horní doporučené hranici vzdálenosti 60 cm není součást schopna dosáhnout potřebné teploty pro vytvrzení, tedy 180 °C.



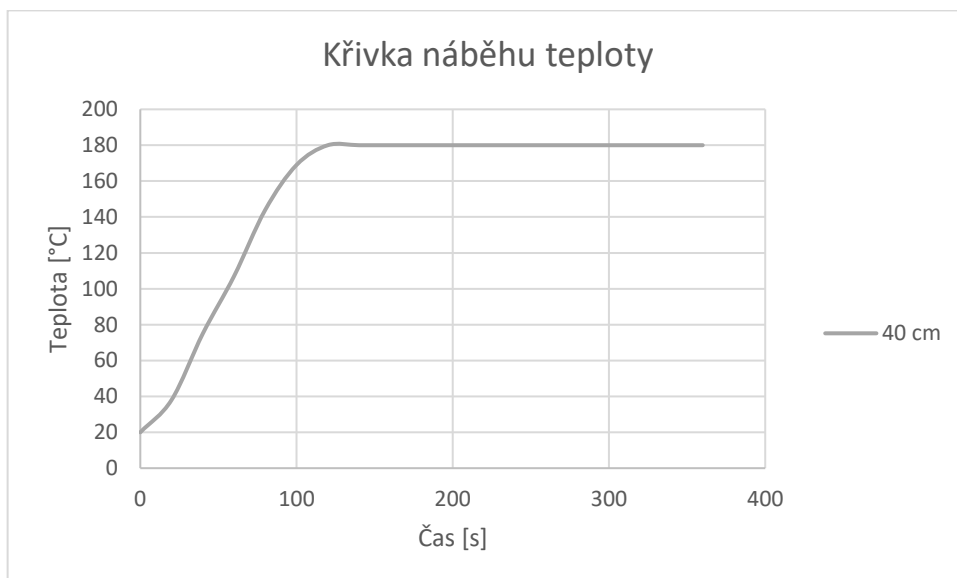
Graf 2: Křivka náběhu teploty [excel]

Vzdálenost mezi zářičem a vzorkem byla z tohoto důvodu snížena na dolní doporučenou hranici 40 cm. Křivky náběhu teplot jsou znázorněny na Grafu 3 a Grafu 4. Při vzdálenosti 40 cm byla požadovaná vytvrzovací teplota u tlustých plechů dosažena za 240 s (4 min), u tenkých plechů byl potřebný čas z důvodu jejich menší tloušťky a rychlejšímu zahřátí podkladu poloviční, konkrétně 120 s (2 min).





Graf 3: Křivka náběhu teploty – vzorky typu deska [excel]



Graf 4: Křivka náběhu teploty – vzorky typu plech [excel]

Dalším potřebným parametrem pro vytvrzení je hodnota času, který povlak potřebuje k vytvrzení. Vycházelo se z předpokladu, že v případě použití IR záření pro vytvrzení povlaků bude celkový čas výrazně kratší, než je tomu u pecí horkovzdušných. Z Grafu 5 je ale patrné, že tento předpoklad byl mylný. Výsledný potřebný čas pro vytvrzení prostřednictvím IR záření odpovídá materiálovému listu práškového plastu. Potřeba bylo setrvání na teplotě, jak u pecí horkovzdušných, po dobu 15 min.



Graf 5: Stanovení optimální doby vytvrzování [excel]

## 7.6 Měření tloušťky povlaku

Před zahájením všech zkoušek povlaku byly nejprve naměřeny jeho tloušťky. Měření tloušťky povlaku bylo provedeno pomocí přístroje ELCOMETER 456 (Obrázek 35), který pracuje s přesností  $\pm 1\%$ . Měření probíhalo dle normy ČSN EN ISO 2808. Metoda využívá magnetický indukční měřič, který umožňuje neinvazivně měřit tloušťku zhotoveného povlaku na kovových vzorcích. [62]

### Postup měření tloušťky povlaku

V prvním kroku bylo zařízení zkalibrováno pomocí přiložené kalibrační fólie. Poté byl každý vzorek měřen na 12-ti místech. U každého vzorku se nejmenší a největší naměřená hodnota vyloučila a pro další výpočet již nebyla použita. Ze zbylých 10-ti hodnot se vypočítal aritmetický průměr (1) a směrodatná odchylka (2). [62]



Obrázek 35: Digitální tloušťkoměr Elcometer 456 [53]

## Výsledné hodnoty

Tabulka 6: Naměřené hodnoty tloušťky povlaku v  $\mu\text{m}$  pro vzorky typu deska

Vzorek	HRK (1)	HRK (2)	HRK (3)	IR (1)	IR (2)	IR (3)
$\varnothing$ hodnoty tloušťky	33,48	33,31	34,12	51,92	53,83	56,61
S. odchylka	4,02	4,74	4,05	4,89	2,86	9,36

V Tabulce 6 jsou zaznamenány naměřené hodnoty tloušťky povlaku. Výsledná tloušťka povlaku je závislá, jak na schopnostech a zkušenostech lakýrníka, tak i na nastavení množství proudícího vzduchu stříkací pistolí. Z výsledků je patrné, že se bohužel nepodařilo nanést stejnou tloušťku povlaku na vzorcích HRK a IR. Průměrná tloušťka HRK vzorků činila necelých 34  $\mu\text{m}$ , u vzorků IR byla průměrná tloušťka povlaku téměř 55  $\mu\text{m}$ .

## **7.7 Mechanické zkoušky povlaku**

### **7.7.1 Mřížková zkouška**

Mřížková zkouška slouží ke stanovení adhezní pevnosti, kterou odolává nátěr mechanickému odtržení od podkladu. Zkouška byla provedena a vyhodnocena podle normy ČSN EN ISO 2409. [54]

#### Postup mřížkové zkoušky

Podstatou této zkušební metody je provedení šesti rovnoběžných řezů a šesti dalších, které jsou na ně kolmé. Rozestupy mezi jednotlivými řezy se řídí tloušťkou zhotoveného povlaku:

- do 60  $\mu\text{m}$ : 1 mm rozestup pro tvrdé podklady,
- do 60  $\mu\text{m}$ : 2 mm rozestup, pro měkké podklady,
- 61–120  $\mu\text{m}$ : 2 mm rozestup, pro tvrdé i měkké podklady,
- 121–250  $\mu\text{m}$ : 3 mm rozestup, pro tvrdé i měkké podklady. [54]

Podle Tabulky 6 je zřejmé, že tloušťka povlaku se pohybuje pod 60  $\mu\text{m}$ . Rozestup mezi řezy byl zvolen, dle normy, 1 mm.

Po zhotovení mřížky na povrchu vzorků následovalo oblepení mřížky samolepící páskou. Páska se uhladila prstem a následně odtrhla pod úhlem 60°. Zkušební pomůcky jsou znázorněny na Obrázku 36. Hodnocení kvality přilnavosti je založeno na stupnici, která je přiřazena k různým stupňům nedostatků, jako jsou trhliny, loupání nebo odchlípnutí

povlaku od základního materiálu. Klasifikuje se dle šestistupňové stupnice přilnavosti 0–5 (viz Tabulka 7). [54]



Obrázek 36: Zkušební pomůcky pro provedení mřížkové zkoušky [foto autora práce]

#### Snímací zařízení pro vyhodnocení zkoušky

- Mikroskop: Olympus SZ61 (Příloha 8)
- Kamera: Lumenera INFINITY 1 (Příloha 9)
- Software: QuickPHOTO CAMERA 3.1

Tabulka 7: Hodnocení podle normy ČSN EN ISO 2409 [54]

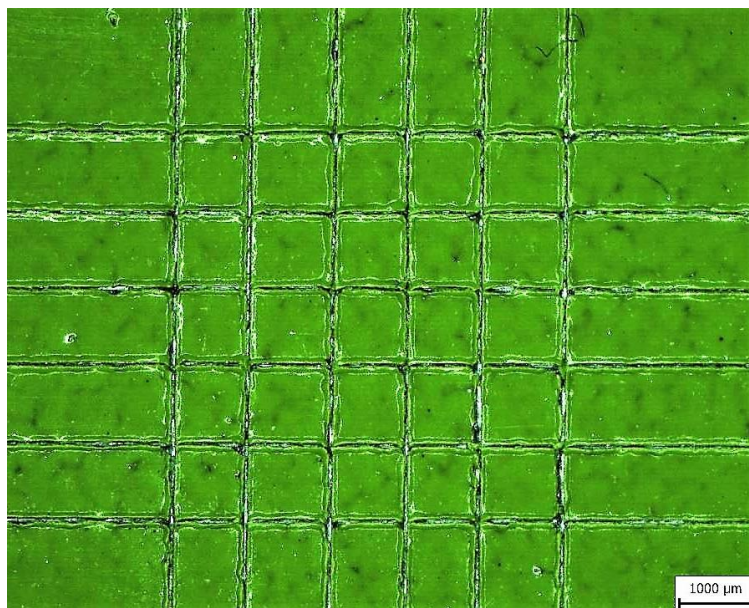
Označení	Popis	Vzhled
0	Hrany řezů jsou zcela hladké; žádný čtverec mřížky není odloupen.	
1	Odloupení malých šupinek povlaku v místech křížení řezů. Zasažená plocha není větší než 5 % plochy mřížky.	
2	Nátěr odloupen podél hran řezů a v místech jejich křížení. Zasažená plocha převyšuje 5 %, ale není větší než 15 % plochy mřížky.	
3	Nátěr částečně nebo zcela odloupen ve velkých pásech podél hran řezů a/nebo částečně nebo zcela odloupen na různých částech čtverců. Zasažená plocha převyšuje 15 %, ale není větší než 35 % plochy mřížky.	
4	Nátěr odloupen ve velkých pásech podél hran řezů a/nebo se některé čtverce částečně nebo zcela odlouply. Zasažená plocha převyšuje 35 %, ale není větší než 65 % plochy mřížky.	
5	Jakýkoliv rozsah odloupení, který nelze klasifikovat ani stupněm. 4.	-

## Výsledné hodnoty

Tabulka 8: Vyhodnocení mřížkové zkoušky dle normy ČSN EN ISO 2409 [54]

Vzorek	HRK (1)	HRK (2)	HRK (3)	IR (1)	IR (2)	IR (3)
Klasifikace	0	0	0	1	1	2

Z výsledků měření přilnavosti (Tabulka 8) pomocí mřížkové zkoušky je zřejmé, že všechny vzorky vytvrzené pomocí horkovzdušné trouby jsou hodnoceny stupněm 0, který představuje nejlepší adhezi k základnímu materiálu, tedy hrany řezů jsou zcela hladké a žádný čtverec mřížky není odloupen. Příkladem tohoto výsledku zkoušky je Obrázek 37, kde je hodnocen vzorek HRK (1). Vzorky vytvrzené pomocí infračerveného záření jsou na základě mřížkové zkoušky vyhodnoceny horším stupněm, kdy dokonce vzorek IR (3) (viz Obrázek 38), je hodnocen stupněm 2. Hodnocení stupněm 2 reprezentuje skutečnost, že nátěr je odloupen podél hran řezů a v místech jejich křížení. Zasažená plocha převyšuje 5 %, ale není větší než 15 % plochy mřížky.



Obrázek 37: Vzorek HRK (1); zoom 1,2; hodnocení zkoušky 0 [foto autora práce]



Obrázek 38: Vzorek IR (3); zoom 1,2; hodnocení zkoušky 2 [foto autora práce]

### 7.7.2 Zkouška křížovým řezem

Zkouška křížovým řezem slouží stejně jako zkouška mřížková ke stanovení adhezni pevnosti, kterou odolává nátěr mechanickému odtržení od podkladu. Při zkoušce křížovým řezem je možné hodnotit povlaky tlustší než 250  $\mu\text{m}$ , což při mřížkové zkoušce umožněné není. Zkouška byla provedena a vyhodnocena podle normy ČSN EN ISO 16276-2. [55]

#### Postup zkoušky křížovým řezem



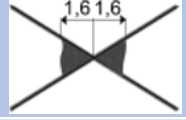



Zkouška křížovým řezem spočívá v provedení dvou řezů svírající 30–45°. Řez je proveden rovnoměrným tahem ostrým nástrojem, například skalpelem nebo odlamovacím nožem. Po provedení řezu se oblast zkoušky očistí štětcem a přilepí se samolepící páska, která se vyhladí prstem. Poté se páska odtrhne pod úhlem 60°. Zkušební pomůcky jsou znázorněny na Obrázku 39. Hodnotí odlupování povlaku podél řezů nebo v místě jejich protnutí. Klasifikuje se dle šestistupňové stupnice přilnavosti 5A–0A (viz Tabulka 9). [55]



Obrázek 39: Zkušební pomůcky pro provedení zkoušky křížovým řezem [foto autora práce]



Tabulka 9: Hodnocení podle normy ČSN EN ISO 16276-2 [55]

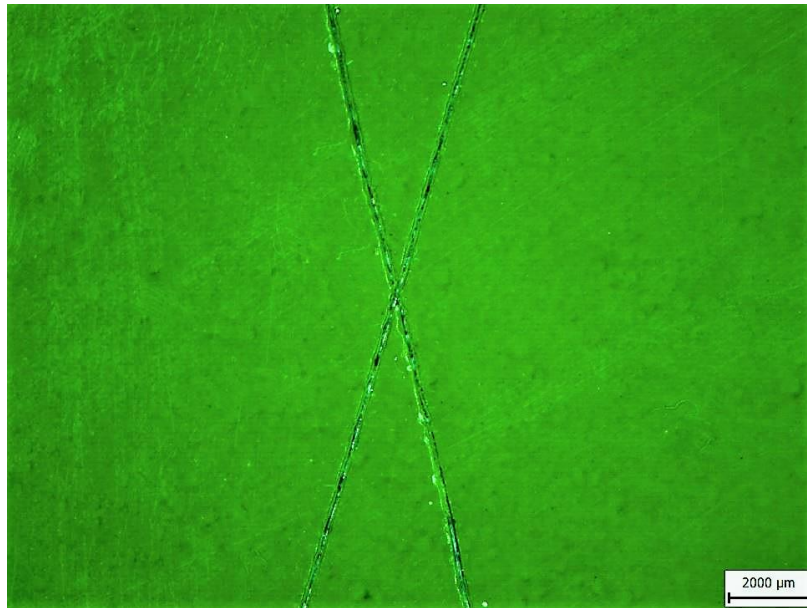
Označení	Popis	Vzhled
5A	Žádný odlup.	
4A	Nepatrný odlup podél řezů.	
3A	Odlup podél řezu, v ploše max. do vzdálenosti 1,6 mm od křížení řezů.	
2A	Odlup podél řezu, v ploše max. do vzdálenosti 3,2 mm od křížení řezů.	
1A	Odstranění povlaku z většiny plochy mezi řezy.	
0A	Odstranění povlaku i mimo plochu křížového řezu.	

### Výsledné hodnoty

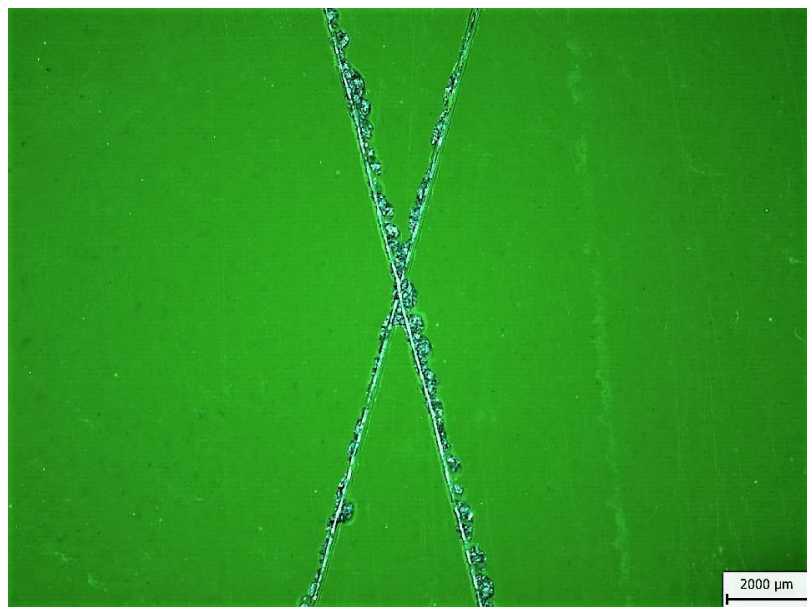
Tabulka 10: Vyhodnocení zkoušky křížovým řezem dle normy ČSN EN ISO 16276-2 [55]

Vzorek	HRK (1)	HRK (2)	HRK (3)	IR (1)	IR (2)	IR (3)
Klasifikace	5A	5A	5A	4A	4A	4A

Výsledné hodnoty zkoušky křížovým řezem jsou znázorněny v Tabulce 10. Z tabulky je zřejmé že, stejně jako u zkoušky mřížkové jsou všechny vzorky vytvrzené pomocí horkovzdušné trouby hodnoceny nejlepším klasifikačním stupněm 5A. Na Obrázku 40 je hodnocen vzorek HRK (2). U vzorků vytvrzených pomocí infračerveného záření (viz Obrázek 41) je patrný odlup podél hran řezu. Tento popis označuje klasifikační stupeň 4A.



Obrázek 40: HRK (2); zoom 0,67; hodnocení 5A [foto autora práce]



Obrázek 41: IRT (1); zoom 0,67; hodnocení 4A [foto autora práce]

#### Snímací zařízení pro vyhodnocení zkoušky

- Mikroskop: Olympus SZ61 (Příloha 8)
- Kamera: Lumenera INFINITY 1 (Příloha 9)
- Software: QuickPHOTO CAMERA 3.1

### **7.7.3 Odtrhová zkouška povlaku**

Pro stanovení soudržnosti povlaku byla provedena odtrhová zkouška dle normy ČSN EN ISO 4624. Soudržnost povlaku je vyjádřena silou v MPa potřebnou k odtržení plochy. V tomto případě se jedná o soudržnost práškového laku k základnímu materiálu.



Výsledkem odtrhové zkoušky je stanovení nejslabšího článku systému. Dále se hodnotí způsob prasknutí spoje. Zjišťuje se, zda dojde k adheznímu lomu, kdy dochází k lomu mezi jednotlivými vrstvami nátěrového systému, nebo ke koheznímu lomu, kdy dochází k porušení uvnitř jednotlivých vrstev (např. ve vrstvě použitého lepidla). Na základě získaných hodnot a identifikovaných typů lomu je možné porovnat vzorky s různými metody vytvrzení. Měřící sada se skládá z: automatického odtrhoměru Elcometer 510 Model, zkušebního tělíška, ručního řezného nástroje a dvousložkového epoxidového lepidla UHU PLUS ENDFEST 300 (Obrázek 42). [56]



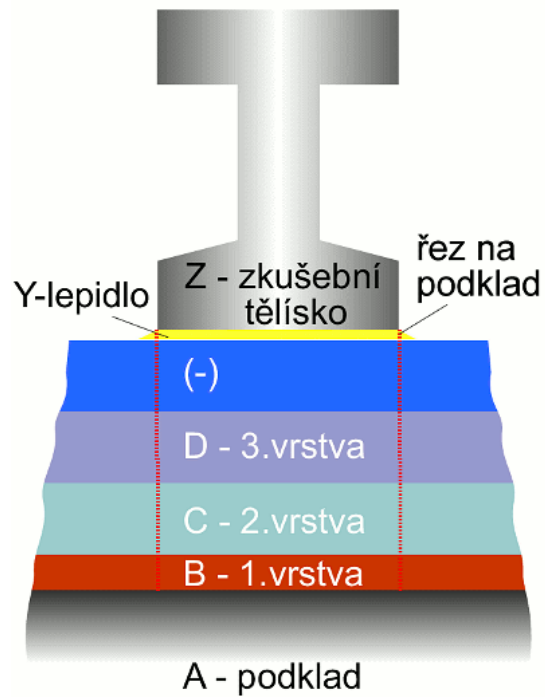
Obrázek 42: Měřící sada pro zkoušku odtrhem [foto autora práce]

### Postup odtrhové zkoušky

V prvním kroku se místo na zkušební vzorku, kde se provádí měření, povrch se odmastí, zdrsí pomocí brusného papíru a opět odmastí pomocí přípravku Isopropanol. Zkušební tělíška jsou odmaštěna a přilepena na měřené místo pomocí výše zmíněného řádně promíchaného epoxidového lepidla. Lepidlo se nechá vytvrdit dle technického listu (Příloha 10) v horkovzdušné peci při 100 °C po dobu 10 minut. Po vytvrzení lepidla se povlak kolem panenky prořízne ručním řezným nástrojem. Poté jsou panenky odtrženy pomocí automatického odtrhovacího zařízení a získané hodnoty se zaznamenají. Následně se určí charakter porušení (Obrázek 43), který je vyhodnocen dle normy podle Tabulky 11. Procentuální zastoupení jednotlivých druhů porušení se určuje vizuálně lidským okem. [56]

### Podmínky zkoušky

- Rychlost odtrhu: 1 MPa·s<sup>-1</sup>
- Průměr zkušebního tělíška: 10 mm
- Pevnost lepidla po vytvrzení: 250 kg·cm<sup>-2</sup>



Obrázek 43: Rozdělení jednotlivých vrstev pro stanovení charakteru porušení [63]

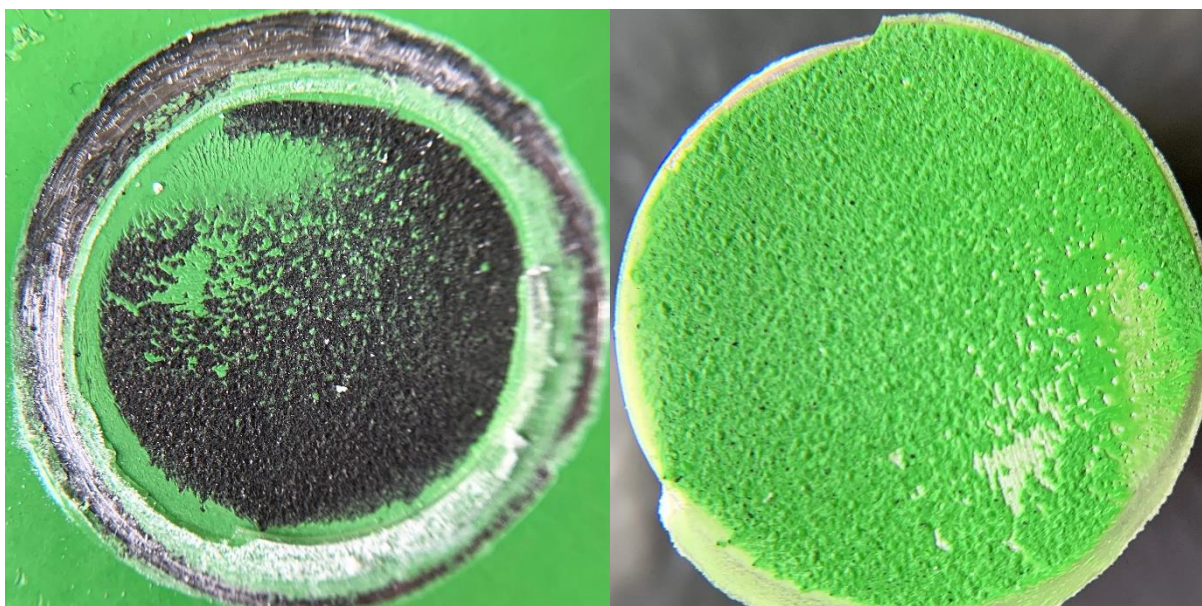
Tabulka 11: Charakter porušení dle normy ČSN EN ISO 4624 [56]

<b>A</b>	Kohezní lom v podkladu
<b>A/B</b>	Adhezní lom mezi podkladem a první vrstvou
<b>B</b>	Kohezní lom první vrstvy
<b>B/C</b>	Adhezní lom mezi první a druhou vrstvou
<b>-</b>	Kohezní lom poslední vrstvy
<b>-/Y</b>	Adhezní lom mezi poslední vrstvou a lepidlem
<b>Y</b>	Kohezní lom v lepidle
<b>Y/Z</b>	Adhezní lom mezi lepidlem a zkušebním tělískem

## Vyhodnocení zkoušky

Tabulka 12: Vyhodnocení odtrhové zkoušky na vzorcích vytvrzených pomocí HRK

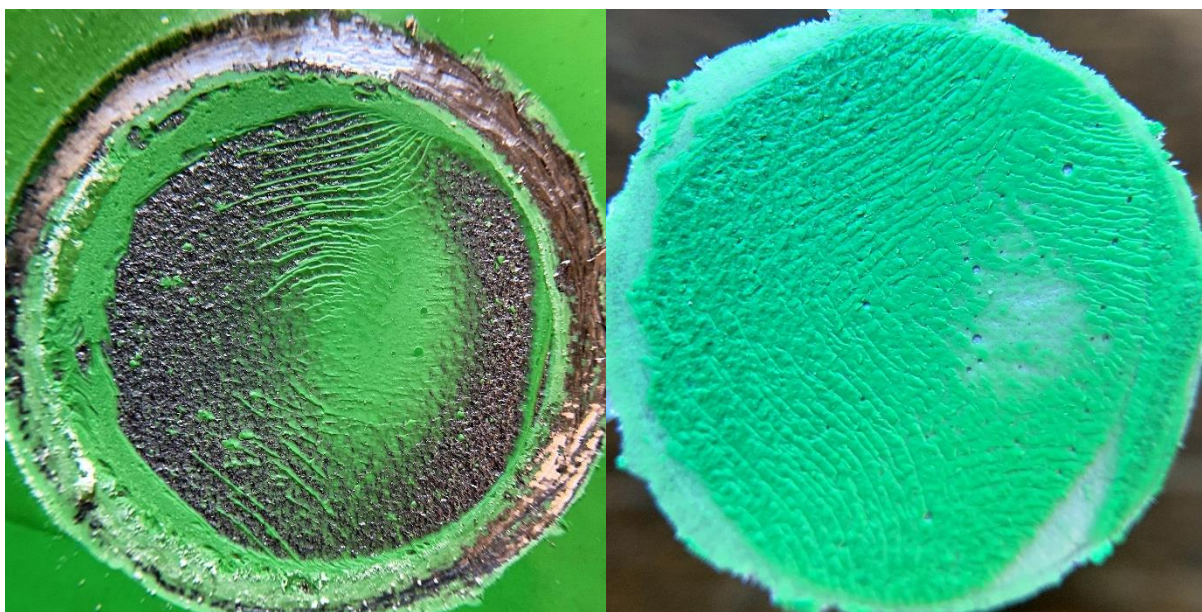
Vzorek	Číslo odtrhu	Velikost odtrhové síly [MPa]	Druh porušení
HRK (1)	1	5,91	93 % A/B; 7 % B/Y
	2	4,94	93 % A/B; 7 % B/Y
	3	6,97	93 % A/B; 7 % B/Y
HRK (2)	1	5,69	93 % A/B; 7 % B/Y
	2	5,88	93 % A/B; 7 % B/Y
	3	6,15	97 % A/B; 3 % B/Y
HRK (3)	1	5,01	90 % A/B; 10 % B/Y
	2	5,73	75 % A/B; 5 % B; 20 % B/Y
	3	6,57	92 % A/B; 8 % B/Y
	∅	5,87	91 % A/B; 1 % B; 8 % B/Y



Obrázek 44: Vzorek: HRK (3); číslo odtrhu: 2; odtrhová síla: 5,73 MPa; charakter porušení: 75 % A/B; 5 % B; 20 % B/Y [foto autora práce]

Tabulka 13: Vyhodnocení odtrhové zkoušky na vzorcích vytvrzených pomocí IR

Vzorek	Číslo odtrhu	Velikost odtrhové síly [MPa]	Druh porušení
IR (1)	1	11,44	15 % A/B; 5 % B; 80 % B/Y
	2	10,21	40 % A/B; 40 % B; 20 % B/Y
	3	9,35	15 % A/B; 5 % B; 80 % B/Y
IR (2)	1	12,32	70 % A/B; 25 % B; 5 % B/Y
	2	10,07	50 % A/B; 40 % B; 10 % B/Y
	3	9,93	60 % A/B; 30 % B; 10 % B/Y
IR (3)	1	9,87	50 % A/B; 35 % B; 15 % B/Y
	2	10,63	50 % A/B; 35 % B; 15 % B/Y
	3	10,15	50 % A/B; 35 % B; 15 % B/Y
	∅	<b>10,44</b>	<b>44 % A/B; 28 % B; 28 % B/Y</b>



Obrázek 45: Vzorek: IR (3); číslo odtrhu: 1; odtrhová síla: 9,87 MPa; charakter porušení: 50 % A/B; 35 % B; 15 % B/Y [foto autora práce]

Z naměřených hodnot se získala hodnota pevnosti a charakter porušení, kdy daný spoj praskl. Průměrná odtrhová síla pro vzorky vytvrzené pomocí HRK (dle Tabulky 12) činila



5,87 MPa. Téměř dvojnásobnou odtrhovou silou disponovaly vzorky vytvrzené pomocí IR (Tabulka 13). Průměrná odtrhová síla dosahovala k 10,44 MPa.

Druh porušení u vzorků vytvrzených pomocí HRK, znázorněn na Obrázku 44, byl v převážné míře hodnocen jako adhezní lom mezi základním materiálem a povlakem. Obrázek 45 reprezentuje vzorky vytvrzené pomocí IR. Průměrný druh porušení u takto vytvrzených vzorků byl 44 % A/B; 28 % B; 28 % B/Y. Shodně jako u vzorků HRK dominoval téměř z 50 % adhezní lom mezi základním materiálem a povlakem. Dále se v menší míře vyskytl lom kohézní v samotném povlaku a lom adhezní mezi povlakem a lepidlem.

Z výsledků je zřejmé, že lepší stupeň přilnavosti práškové barvy k základnímu materiálu vykazují vzorky vytvrzené infračerveným zářením.

## 7.8 Korozní zkouška povlaku

Kromě zkoumání mechanických vlastností povlaků z práškového plastu na základě různých metod vytvrzování byla provedena korozní zkouška povlaku v neutrální solné mlze podle normy ČSN EN ISO 9227. Cílem zkoušky je zjistit vliv metody vytvrzování na výsledné protikorozní vlastnosti práškového povlaku. Zkouška v solné mlze je zrychlenou zkouškou korozní odolnosti povlaků. Tato zkouška však nemůže být považována jako důkaz korozní odolnosti povlaku na daném materiálu, jelikož jen málokdy existuje vztah mezi zkouškou v solné mlze a podmínkami v reálném prostředí. Zkouška je vhodná pro porovnání a kontrolu kvality na vzorcích se stejným povlakem. [57]

### Postup korozní zkoušky

Uprostřed každého vzorku se provede řez o délce 100 mm a šířce 0,5 mm podle normy ČSN EN ISO 17872. Řez je proveden až k základnímu materiálu. Aby nedošlo ke zkreslení výsledků jsou okraje zkušebních vzorků oblepeny po celém obvodu samolepící páskou (Obrázek 47). Všechny vzorky se následně umístily do stojanů v solné komoře. [57]

V solné komoře (Obrázek 46) se nachází atmosféra (viz Tabulka 14), do které se rozprašuje 5 % roztok chloridu sodného. Vzorky se postupně kontrolovaly po časových intervalech 24 h, 48 h, 72 h, 168 h, 240 h, 408 h, 480 h, 576 h, 720 h a 1000 h. Při těchto kontrolách se stanovilo hodnocení stupně prorezavění podle normy ČSN EN ISO 4628-3 a určil se stupeň puchýřkování podle normy ČSN EN ISO 4628-2. [55, 57, 58]



Obrázek 46: Truhlová korozní komora SKB400ATR [66]

K finálnímu vytažení vzorků ze solné komory došlo po 1000 h, kdy se provedlo hodnocení stupně delaminace a podkorodování v okolí řezu podle normy ČSN EN ISO 4628-8. [57, 59]



Obrázek 47: Připravený vzorek pro korozní zkoušku [foto autora práce]

### Zkušební podmínky

Tabulka 14: Zkušební podmínky pro korozní zkoušku v neutrální solné mlze [57]

Parametr zkušební metody	Neutrální solná mlha
Teplota	$35 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$
Průměrná rychlost shromažďování mlhy z vodorovné sběrné plochy $80 \text{ cm}^2$	$1,5 \text{ ml}\cdot\text{h}^{-1} \pm 0,5 \text{ ml}\cdot\text{h}^{-1}$
Obsah chloridu sodného (v nashromážděném roztoku)	$50 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1} \pm 5 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$
pH (nashromážděného roztoku)	6,5 až 7,2

### 7.8.1 Puchýřkování

Prvním z hodnocení, které se hodnotilo průběžně v předem daných časových intervalech, bylo hodnocení puchýřkování. Toto kritérium je hodnoceno pomocí komparační metody dle příslušné normy. Norma ČSN EN ISO 4628-2 obsahuje několik vzorníků s různou hustotou a velikostí puchýřků. Klasifikace vzorků začíná číslem, které udává množství puchýřků. Velikost puchýřků se zapisuje za prvním číslem v závorce. Menší čísla označují vzorky s nižší hustotou puchýřků a menší velikostí. [60]

#### Vyhodnocení zkoušky

Tabulka 15: Hodnocení stupně puchýřkování podle normy ČSN EN ISO 4628-2 [60]

Vzorek	HRK (4)	HRK (5)	IR (4)	IR (5)
24 h	0 (S0)	0 (S0)	0 (S0)	0 (S0)
48 h	0 (S0)	2 (S2)	2 (S2)	2 (S2)
72 h	3 (S2)	2 (S2)	3 (S2)	3 (S2)
168 h	3 (S3)	3 (S3)	4 (S2)	3 (S3)
240 h	3 (S3)	4 (S3)	4 (S2)	4 (S3)
408 h	3 (S3)	4 (S3)	4 (S2)	4 (S3)
480 h	3 (S3)	4 (S4)	4 (S3)	4 (S4)
576 h	4 (S4)	4 (S4)	4 (S3)	4 (S4)
720 h	4 (S4)	5 (S4)	4 (S4)	4 (S4)
1000 h	4 (S4)	5 (S4)	4 (S4)	4 (S4)

Hodnocení stupně puchýřkování podle normy ČSN EN ISO 4628-2 je znázorněno v Tabulce 15. U převážné většiny vzorků vytvrzené HRK i IR se již po 48 h začaly objevovat malé puchýřky, které postupem času získávaly na velikosti i množství. Hodnocení puchýřkování neprokázalo rozdíl mezi povlaky vytvrzených HRK a IR.

### 7.8.2 Stupeň prorezavění

Dalším průběžným sledováním v časových intervalech bylo hodnocení stupně prorezavění, které měří množství koroze vzniklé na daném povlaku. Nezohledňuje se rez v blízkosti řezu. Toto hodnocení využívá komparační metodu, kdy norma ČSN EN ISO 4628-3 obsahuje vzorníky s různým množstvím rzi na povrchu vzorku. Stupeň

prorezavění je vyjádřen jako hodnota Ri. Menší čísla za Ri označují vzorky s nižším procentem výskytu rzi (viz Tabulka 16). [58]

*Tabulka 16: Stupeň prorezavění a plocha s výskytem rzi dle normy [58]*

Stupeň prorezavění	Plocha s výskytem rzi [%]
Ri 0	0
Ri 1	0,05
Ri 2	0,5
Ri 3	1
Ri 4	8
Ri 5	40 – 50

#### Vyhodnocení zkoušky

*Tabulka 17: Hodnocení stupně prorezavění podle normy ČSN EN ISO 4628-3 [58]*

Vzorek	HRK (4)	HRK (5)	IR (4)	IR (5)
24 h	Ri 0	Ri 1	Ri 1	Ri 1
48 h	Ri 1	Ri 1	Ri 1	Ri 2
72 h	Ri 1	Ri 2	Ri 1	Ri 3
168 h	Ri 4	Ri 4	Ri 1	Ri 3
240 h	Ri 4	Ri 4	Ri 2	Ri 3
408 h	Ri 5	Ri 5	Ri 3	Ri 3
480 h	Ri 5	Ri 5	Ri 4	Ri 4
576 h	Ri 5	Ri 5	Ri 5	Ri 5
720 h	Ri 5	Ri 5	Ri 5	Ri 5
1000 h	Ri 5	Ri 5	Ri 5	Ri 5

V Tabulce 17 je vyhodnocen stupeň prorezavění podle normy ČSN EN ISO 4628-3. Všechny vzorky postupně korodovaly až do nejvyššího stupně prorezavění Ri 5. U vzorků IR jsou do kontrolního intervalu 408 h vidět lepší hodnoty, než je tomu u vzorků HRK. Tento efekt může být důsledkem menších tloušťek povlaku u vzorků HRK (viz Tabulka 6). Hodnocení prorezavění neprokázalo velké rozdíly mezi povlaky vytvrzených metodou HRK a IR.



### 7.8.3 Delaminace

Delaminace povlaku je termín používaný k popisu pevnosti povlaku po provedení korozních zkoušek. V neutrální solné mlze se postupem času uvolňuje povlak z práškové barvy od základního materiálu, začínajíc směrem od řezu. Aby se určila míra delaminace, je nezbytné odstranit uvolněný povlak ze vzorku. K tomu se používá ruční špachtle. Poté se změří vzdálenost obnaženého vzorku od řezu v rozestupech 10 mm. Získané hodnoty jsou použity k výpočtu průměrné vzdálenosti, která je následně použita ve vzorci pro stanovení míry delaminace (3).

$$d = \frac{d_1 - w}{2} \quad (3)$$

Kde,

d.....míra delaminace [mm]

$d_1$ .....průměrná celková plocha delaminace [mm]

w.....šířka původního řezu [mm]

#### Vyhodnocení zkoušky

Tabulka 18: Hodnocení stupně delaminace dle normy ČSN EN ISO 4628-8 [59]

Vzorek	HRK (4)	HRK (5)	IR (4)	IR (5)
$d_1$ [mm]	80	80	62	58,5
w [mm]	0,5	0,5	0,5	0,5
<b>d [mm]</b>	<b>39,75</b>	<b>39,75</b>	<b>29</b>	<b>30,75</b>

Výsledky hodnocení stupně delaminace jsou znázorněny v Tabulce 18. Vzorky vytvrzené IR, konkrétně vzorky IR (4) i IR (5), dosahují výrazně lepších výsledků, než je tomu u vzorků HRK. Výsledky delaminace se liší o více než 10 mm. Ilustrativně jsou výsledky patrné z Obrázku 48 a Obrázku 49. Jak již bylo zmíněno dříve, tento efekt může nastávat v důsledku menších tlouštěk povlaku u vzorků HRK (viz Tabulka 6).



Obrázek 48: Vzorek HRK (4) pro hodnocení stupně delaminace [foto autora práce]



Obrázek 49: Vzorek IR (4) pro hodnocení stupně delaminace [foto autora práce]

#### 7.8.4 Koroze v okolí řezu

Po vyhodnocení míry delaminace bylo provedeno vyhodnocení stupně podkorodování, což představuje korozi v okolí řezu. Prvním krokem k úspěšnému vyhodnocení je odstranění veškerého povlaku ze vzorků. K tomuto účelu se používá odstraňovač nátěrových hmot (Příloha 2), který se nanese na celý povrch každého vzorku. Poté se pomocí špachtle odstraní veškerý povlak ze vzorku. Po očištění vzorků se změří vzdálenosti koroze od řezu v rozestupech 10 mm. Tyto hodnoty se zprůměrují a následně dosadí do vzorce pro stanovení stupně koroze (4).

$$c = \frac{w_c - w}{2}$$

(4)

Kde,

c.....stupeň koroze [mm]

$w_c$ .....průměrná celková šíře plochy koroze [mm]

w.....šířka původního řezu [mm]

Tabulka 19: Hodnocení koroze v okolí řezu dle normy ČSN EN ISO 4628-8 [59]

Vzorek	HRK (4)	HRK (5)	IR (4)	IR (5)
w <sub>c</sub> [mm]	62,4	80	32,5	33,5
w [mm]	0,5	0,5	0,5	0,5
c [mm]	<b>30,95</b>	<b>39,75</b>	<b>16</b>	<b>16,5</b>

Z hodnocení koroze v okolí řezu (Tabulka 19) je viditelné, že vzorky vytvrzené IR (Obrázek 51) jsou, stejně jako při hodnocení stupně delaminace, o více než 15 cm lepší oproti vzorkům HRK (Obrázek 50). Tento výsledek, jak již bylo zmíněno v předchozích zkouškách, může nastávat v důsledku menších tloušťek povlaku u vzorků HRK. Pro dokonalé srovnání dvou vytvrzovacích metod by měla být u všech vzorků tloušťka shodná (viz Tabulka 6 ).



Obrázek 48: Vzorek HRK (4) pro hodnocení koroze v okolí řezu [foto autora práce]



Obrázek 51: Vzorek IR (4) pro hodnocení koroze v okolí řezu [foto autora práce]

## 7.9 Stanovení odolnosti nátěrů proti oděru za mokra

S ohledem na využití práškových povlaků v různých provozech je důležité srovnání a hodnocení povlaků i z hlediska schopnosti odolávat opakovaným čistícím postupům. Pojem odolnost proti oděru za mokra vyjadřuje schopnost suchého nátěru odolat 200 odíracím cyklům za mokra, přičemž úbytek tloušťky povlaku, daná průměrem na definované ploše, musí být menší než předem stanovený úbytek. [64]



Na základě porovnání úbytku tloušťky povlaku s předem specifikovanou hodnotou, která je předmětem dohody mezi zúčastněnými stranami, se určí třída odolnosti povlaku proti oděru za mokra. [64]

#### Zkušební zařízení pro oděr za mokra

Zkušební zařízení pro oděr za mokra se skládá se z obousměrného odíracího zkušebního zařízení TQC Sheen (Obrázek 49) s délkou záběru přibližně 300 mm a provozní rychlosti kolem 37 odíracími cykly za minutu. [64]



Obrázek 49: Zkušební zařízení pro zkoušku proti oděru za mokra [67]

#### Podmínky zkoušky

- Počet cyklů: 200
- Provozní rychlost: 37 cyklů·min<sup>-1</sup>
- Délka posuvu: 140 mm
- Množství tekutiny: 1 ml·min<sup>-1</sup>
- Materiál oděru: abrazivní nástroj “Large sponge tool” (AB5050) [75] + 300 g závaží a “Abrasive pad tool” (AB5013) [75] + 300 g závaží

#### Podstata zkoušky

Zkušební vzorek s naneseným povlakem se zváží a podrobí se 200 cyklům odírání za mokra ve zkušebním odíracím zařízení. Po ukončení zkoušky se vzorek usuší a znovu zváží. Z úbytku hmotnosti se vypočte střední hodnota úbytku tloušťky povlaku.

### 7.9.1 Výpočet úbytku hmotnosti nátěru na jednotku plochy

Plocha dráhy odírajícího tamponu: [64]

Plocha, po které se pohybuje čistící tampon, se vypočítá s použitím rovnice (5):

$$A = \frac{S \cdot W}{10^6} \quad (5)$$

$$A = \frac{140 \cdot 80}{10^6} = 0,00112 \text{ m}^2$$

Kde,

A.....plocha daná oděrem [m<sup>2</sup>]

S.....délka tahu [mm]

W....šířka tahu [mm]

Úbytek hmotnosti nátěru na jednotku plochy: [64]

Hmotnost úbytku hmotnosti nátěru na jednotku plochy se vypočítá s použitím rovnice (6):

$$L = \frac{m_1 - m_2}{A} \quad (6)$$

$$L_{IR} = \frac{m_1 - m_2}{A} = \frac{235,963 - 235,957}{0,00112} = 5,36 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$L_{HRK} = \frac{m_1 - m_2}{A} = \frac{236,632 - 236,616}{0,00112} = 14,29 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$$

Kde,

L.....hmotnost úbytku hmotnosti nátěru na jednotku plochy [g·m<sup>-2</sup>]

A.....plocha daná oděrem [m<sup>2</sup>]

m<sub>1</sub>...počáteční hmotnost zkušební vzorku [g]

m<sub>2</sub>...hmotnost zkušební vzorku po 200 cyklech oděru [g]

Tabulka 20: Výsledné hodnoty hmotnosti před a po zkoušce oděrem za mokra

PŘED		HRK	IR
	∅ m <sub>1</sub> [g]	236,632	235,963
PO		HRK	IR
	∅ m <sub>2</sub> [g]	236,616	235,957

#### Vypočet hustoty suchého nátěrového filmu: [64]

Měrná hmotnost suchého nátěrového filmu se vypočítá podle následující rovnice (7):

$$\rho_{df} = \frac{m}{A \cdot d} \cdot 1000 \quad (7)$$

Kde,

$\rho_{df}$ ...měrná hmotnost suchého nátěrového filmu [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]

A.....plocha zkušební vzorku pro změření hustoty [ $\text{mm}^2$ ]

d.....průměrná tloušťka suchého nátěrového filmu [ $\mu\text{m}$ ]

m.....je průměrná hmotnost suchého nátěrového filmu [mg]

$$\rho_{df} = \frac{1590,7}{7000 \cdot 62,55} \cdot 1000$$
$$\rho_{df} = 3,93 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$$

#### Vypočet průměrného úbytku tloušťky nátěru: [64]

Průměrného úbytku tloušťky nátěru se vypočítá s použitím rovnice (8):

$$L_{dft} = \frac{m_1 - m_2}{A \cdot \rho_{df}} \quad (8)$$

$$L_{dft(IR)} = \frac{m_1 - m_2}{A \cdot \rho_{df}} = \frac{L_{IR}}{\rho_{df}} = \frac{5,36}{3,93} = 1,36 \mu\text{m}$$

$$L_{dft(HRK)} = \frac{m_1 - m_2}{A \cdot \rho_{df}} = \frac{L_{HRK}}{\rho_{df}} = \frac{14,29}{3,93} = 3,63 \mu\text{m}$$

Kde,

$L_{dft}$ ...průměrného úbytku tloušťky nátěru [ $\mu\text{m}$ ]

A.....plocha daná oděrem [ $\text{mm}^2$ ]

$m_1$ ....počáteční hmotnost zkušební vzorku [g]

$m_2$ ....hmotnost zkušební vzorku po 200 cyklech oděru [g]

$\rho_{df}$ .....měrná hmotnost suchého nátěrového filmu [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]

#### Hodnocení odolnosti proti oděru za mokra

Byla vypočtena průměrná hodnota úbytku tloušťky nátěrového filmu. Pro hodnocení nátěru se tato hodnota porovná se stanovenými maximálními úbytky tloušťky suchého filmu vycházejících z hodnot normy DIN EN 13 300.

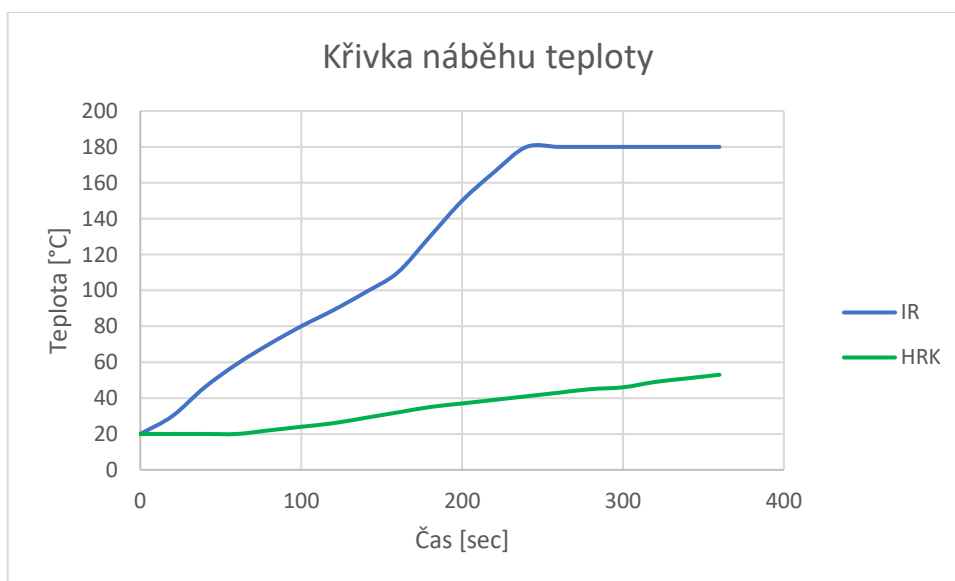
Tabulka 21: Hodnocení velikosti oděru dle normy [65]

<b>Třída 1</b>	Oděr < 5 μm při 200 cyklech oděru
<b>Třída 2</b>	≥ 5 μm a < 20 μm při 200 cyklech oděru
<b>Třída 3</b>	≥ 20 μm a < 270 μm při 200 cyklech oděru
<b>Třída 4</b>	Oděr < 70 μm při 40 cyklech oděru
<b>Třída 5</b>	≥ 70 μm při 40 cyklech oděru

Oba typy vytvrzování byly hodnoceny (dle Tabulky 21) shodně, a to třídou 1. Norma tento výsledek hodnotí takto: čištění povlaku je možné vodou a kartáčem z přírodních štětín za použití neutrálního čističe. Vytvořený povlak je vhodný pro extrémně namáhané plochy.

## Výsledky a diskuze

V praktické části diplomové práce byl navržen a následně proveden experiment s cílem porovnat výsledné vlastnosti povlaků z práškových plastů při použití dvou různých vytvrzovacích metod. Na všechny použité vzorky byla pro zajištění stejných podmínek aplikována stejná prášková barva, a to termosetový epoxidový prášek FAPROXYD 620. Aplikace práškového plastu byla provedena elektrostatickým nanášením, technologií tribo. Prvním metodou vytvrzování povlaku byla konvekční komorová horkovzdušná pec s elektrickým ohřevem. Hlavní sledované parametry u použitých metod vytvrzování povlaku jsou čas k nahřátí vzorku na vytvrzovací teplotu a hodnota času, který potřebuje povlak na vytvrzení. Potřebný čas k nahřátí vzorku na vytvrzovací teplotu činil 2760 sekund, tedy 46 minuty. Druhou metodou vytvrzování povlaku bylo vytvrzování pomocí IR záření. Vzdálenost mezi zářičem a vzorkem byla optimalizována na vzdálenost 40 cm. Při této vzdálenosti byla požadovaná vytvrzovací teplota u vzorků dosažena za 240 s (4 min) (viz Graf 6).



Graf 6: Porovnání rychlosti náběhu teploty mezi HRK a IR [excel]

V případě parametru hodnoty času, který povlak potřebuje k vytvrzení, se vycházelo z předpokladu, že v případě použití metody IR záření pro vytvrzení povlaků bude celkový čas výrazně kratší, než je tomu u pecí horkovzdušných. Z Grafu 7 je ale patrné, že tento předpoklad byl mylný. Výsledný potřebný čas pro vytvrzení prostřednictvím metody IR záření odpovídá materiálovému listu práškového plastu. Potřeba času pro vytvrzení povlaků byla stejná



v případě metody IR záření jako u pecí horkovzdušných, a to setrvání na teplotě po dobu 15 min, což bylo ověřeno odtrhovou zkouškou.



Graf 7: Stanovení optimální doby vytvrzování pro IR vzorky [excel]

Celková doba vytvrzování se skládá z náběhové doby na teplotu vytvrzování a samotného času chemického procesu, tedy vytvrzení. Náběhová doba u horkovzdušné trouby je o celých 42 minut delší, než je tomu u infračervených pecí. Díky rychlejšímu vytvrzení lze navýšit kapacitu lakovací linky a zkrácením procesu vytvrzování šetřit elektrickou energii.

Vlastnosti vzorků povrchové úpravy u obou použitých metod vytvrzování byly vyhodnoceny prostřednictvím mechanických a korozních zkoušek povlaků. Všechny zkoušky byly provedeny v souladu s příslušnými normami. Byla provedena zkouška mřížková, křížovým řezem, odtrhová, zkouška odolnosti proti oděru za mokra a korozní zkouška v neutrální solné mlze.

U použitých vzorků bylo v první fázi hodnocení provedeno měření tloušťky povlaku. Bylo zjištěno, že se nepodařilo nanést tloušťku povlaku u všech vzorků ve stejné míře. Průměrná tloušťka povlaku HRK vzorků činila cca 34  $\mu\text{m}$ , u vzorků IR byla průměrná tloušťka povlaku téměř 55  $\mu\text{m}$ . Výsledná tloušťka povlaku je závislá nejen na schopnostech a zkušenostech lakýrníka, ale i na nastavení množství proudícího vzduchu stříkací pistolí. Tato skutečnost mírně ovlivnila výsledky korozní zkoušky.

Prostřednictvím mřížkové zkoušky a zkoušky křížovým řezem byla analyzována adhezní pevnost, kterou odolává povlak mechanickému odtržení od základního materiálu. Všechny vzorky vytvrzené v horkovzdušné peci byly hodnoceny v případě mřížkové zkoušky stupněm 0 a v případě zkoušky křížovým řezem stupněm 5A, tedy v obou případech jako vyhovující.

Vzorky vytvrzené infračerveným zářením byly hodnoceny stupněm 1, respektive 4A. Hodnocení je o stupeň horší než u vzorků HRK, jedná se však stále o stupeň vyhovující.

Dále byla provedena u každého vzorku tři měření odtrhovou zkouškou. Hodnoty odtrhových napětí byly u vzorků vytvrzených infračerveným zářením v porovnání se vzorky vytvrzených horkým vzduchem, téměř dvojnásobné. Odtrhové napětí u vzorků IR dosahovalo téměř 11 MPa. Tento výsledek velice dobře demonstruje přilnavost povlaku k základnímu materiálu, jelikož dominovalo porušení právě v tomto rozmezí, hodnoceno jako adhezní lom mezi základním materiálem a povlakem.

Výraznější rozdíl v kvalitě povlaků u testovaných vzorků se neprojevil po testech v solné mlze. U této zkoušky je významným faktorem rovnoměrnost výsledné tloušťky zhotoveného povlaku u vzorků HRK a IR. Rozdílná tloušťka povlaků u vzorků HRK a IR ovlivnila konečné výsledky. Vzorky HRK byly hodnoceny dle puchýřkování a prorezavěná v počáteční fázi experimentu hůře. V průběhu času se výsledky vyrovnaly. Větší rozdíl byl pouze při hodnocení delaminace a korozi v místě řezu po 1 000 h. Vzorky vytvrzené IR dosahují výrazně lepších výsledků, než je tomu u vzorků HRK. Výsledky delaminace se liší o 10 mm, koroze v okolí řezu o více než 15 mm.

S ohledem na rozsáhlé využití práškových povlaků v různých průmyslových výrobních provozech je důležité i srovnání a hodnocení povlaků z hlediska schopnosti odolávat opakovaným čistícím postupům. Oba typy vytvrzování byly hodnoceny po provedené zkoušce shodně, a to třídou 1.

Na základě provedených experimentů a analýz byly získány důležité informace o fyzikálních a chemických vlastnostech povlaků vytvořených pomocí různých vytvrzovacích metod. Výsledky naznačují, že vytvrzování prostřednictvím IR metody přináší ve srovnání s metodou horkovzdušného vytvrzování řadu výhod několik.

Povlaky vytvrzené infračerveným zářením vykazují větší adhezi k základnímu materiálu. Tento parametr je zásadní pro zachování dlouhodobé trvanlivosti materiálů vystavených mechanickému namáhání.

Při porovnání potřebné doby pro vytvrzení s konvenčními technologiemi se ukazuje, že v tomto směru je metoda infračerveného vytvrzování opravdu účinná. Metoda IR dokáže v násobně kratším čase nahřát vytvrzovanou součást na požadovanou vytvrzovací teplotu. Náklady na energii potřebné pro vytvrzování se tím teoreticky sníží při využívání více pecí na principu těchto zdrojů tepla používaných v provozu.

Metodě vytvrzování pomocí infračerveného záření je věnována i část diplomové práce pana Vojtěcha Klečka. V praktické části diplomové práce je testováno vytvrzování povlaků pomocí infračerveného záření pomocí zářiče od firmy Hedson. Nedošlo však k optimalizaci času a potřebné vzdálenosti pro vytvrzování, a tak celkové výsledky nebyly uspokojivé. Například mřížková zkouška hodnocena dle normy ČSN EN ISO 2409 vycházela s průměrným hodnocením 4. Tato hodnota odpovídá tomu, že nátěr byl odloupen ve velkých pásech podél hran řezů, anebo se některé čtverce částečně, nebo zcela odlouply. Zasažená plocha převyšuje 35 %, ale není větší než 65 % plochy mřížky. Odtrhová zkouška byla hodnocena dle normy ČSN EN ISO 4624. Výsledné hodnoty odtrhu byly velmi malé. Průměrná hodnota odtrhu činila pouze 0,89 MPa. Po provedené optimalizaci se podařilo, v této diplomové práci, dosáhnout výrazně lepších výsledků. Mřížková zkouška byla hodnocena s převažujícím hodnocením klasifikačním stupněm 1, tedy jako vyhovující, průměrné napětí potřebné k odtržení povlaku dosahovalo téměř 10,5 MPa. [74]

Výsledky této práce mají praktický význam především pro průmyslové aplikace povrchových úprav materiálů. Porovnání vlastností povlaků po horkovzdušném a IR vytvrzování přispívá k efektivnímu využití práškových povlaků. Umožňuje výběr optimální vytvrzovací metody v závislosti na konkrétních požadavcích na vlastnost povlaku. Metoda IR vytvrzování povlaků je metodou, která nabízí výhody rychlejšího procesu, lepších mechanických vlastností povlaku a nižší energetické spotřeby, ale má také své nevýhody pro tvarově složitě výrobky, kdy vzniká riziko slepých míst.

## Závěr

Cílem této diplomové práce bylo porovnat vlastnosti práškových povlaků po horkovzdušném a IR vytvrzování a podrobit je vybraných zkouškám. Práškové povlaky jsou často preferovanou volbou v povrchové úpravě materiálů díky svým výhodám, jako je vysoká odolnost proti opotřebení, korozní stabilita a estetický vzhled.

Teoretická část diplomové práce byla zpracována jako literární rešerše problematiky použití práškových plastů. V práci byla detailně popsána technologie povlaků z práškových plastů, shrnuty požadavky na úspěšnou aplikaci práškových plastů, a to především v souvislosti s vhodně zvolenými mechanickými či chemickými předúpravami povrchů, shrnutí rozdílů použitých práškových plastů a volba optimální technologie nanášení, vytvrzení práškových plastů.

V praktické části diplomové práce byl navržen a následně proveden experiment s cílem porovnat vlastnosti povlaků po dvou vytvrzovacích metodách. Parametry vytvrzování pro konvekční vytvrzování byly převzaty z materiálového listu práškového plastu. Pro druhou metodu IR záření bylo nutné optimální parametry získat pomocí několika experimentů.

Vlastnosti vzorků povrchové úpravy obou metod vytvrzování byly vyhodnoceny prostřednictvím mechanických a korozních zkoušek povlaku. Povlaky vytvrzené infračerveným zářením vykazovaly větší adhezi k základnímu materiálu, což je zásadní předpoklad pro materiály vystavené mechanickému namáhání, a zajišťuje tak jejich dlouhodobou trvanlivost. Výraznější rozdíl v kvalitě povlaků u obou metod se neprojevil po testech v solné mlze, i když tato zkouška mohla být ovlivněna rozdílnou tloušťkou zhotoveného povlaku u vzorků HRK a IR. V případě porovnání parametru potřebné doby pro vytvrzení s konvekčními technologiemi se ukazuje, že infračervené vytvrzování je účinnější a energeticky úspornější. Prostřednictvím použití této metody vytvrzení se významně sníží potřeba času na nahřátí vytvrzované součásti na požadovanou vytvrzovací teplotu. Využitím této vytvrzovací metody je možné navýšit celkovou kapacitu výrobní linky a zkrácením procesu vytvrzování snížit spotřebu elektrické energie. Pro potvrzení, ověření a rozšíření výsledků této práce doporučuji provedení dalších studií a testů.

Tato diplomová práce poskytuje užitečné poznatky o vlastnostech práškových povlaků po horkovzdušném a IR vytvrzování. Její výsledky přispívají k optimalizaci povrchové úpravy materiálů a mohou sloužit jako podklad pro další výzkum v oblasti povrchových úprav a vytvrzování práškových povlaků.

## Bibliografie

- [1] *Powder Coating Made Easy* [online]. TECHNICALHELP4U [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: [http://www.ppss.co.th/publication\\_document/57.pdf](http://www.ppss.co.th/publication_document/57.pdf)
- [2] Hedson Technologies AB [online]. *Průmyslová řešení*. 2017 [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: [https://www.hedson.com/wp-content/uploads/2018/02/IRT\\_Industrial\\_Solutions\\_2017\\_CZ\\_20180118\\_v07.pdf](https://www.hedson.com/wp-content/uploads/2018/02/IRT_Industrial_Solutions_2017_CZ_20180118_v07.pdf)
- [3] *UV-Curable Powder Coatings: Benefits and Performance* [online]. Pcmag, 2000 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.pcmag.com/articles/85628-uv-curable-powder-coatings-benefits-and-performance>
- [4] TALBERT, Rodger. The Powder Coating Process. In: *Pfonline* [online]. Products Finishing, 2022 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.pfonline.com/articles/fundamentals-of-powder-coating>
- [5] *Guide to Manufacturing Processes for Plastics* [online]. Formlabs, 2023 [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/guide-to-manufacturing-processes-for-plastics/>
- [6] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. Svitavy: Code Creator, 2016 [cit. 2023-04-26]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/04.html>
- [7] DROBNY, Jiri George. *Radiation Technology for Polymers*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2021. ISBN 978-0-367-18932-7.
- [8] STRATIL, Jaroslav. Recyklace práškových nátěrových hmot a likvidace odpadů. *Povrcháři* [online]. 2017, (7), 5-6 [cit. 2023-04-26]. ISSN 1802-9833. Dostupné z: [http://www.povrchari.cz/kestazeni/201707\\_povrchari.pdf](http://www.povrchari.cz/kestazeni/201707_povrchari.pdf)
- [9] Prosévačka PROSET 40 C. In: *Datel-ledec* [online]. DATEL Ledec, © 2016 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.datel-ledec.cz/zarizeni-pro-cisteni-prasku>
- [10] NOBEL, Akzo. *Complete Guide to Powder Coating* [online]. Interpon Powder Coatings, 1999 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://pdfcoffee.com/complete-guide-to-powder-coating-pdf-free.html>
- [11] KREIBICH, Viktor. *Koroze a technologie povrchových úprav*. Praha: ČVUT, 1991. ISBN 80-01-00476-7.
- [12] KREIBICH, Viktor. *Teorie a technologie povrchových úprav*. Praha: ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01472-X.
- [13] ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. ISBN 80-718-3337-1.

- [14] *Blasting* [online]. Corrosionpedia, 2019 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.corrosionpedia.com/definition/163/blasting>
- [15] Principles of blast cleaning. In: *Blastwashsystems* [online]. Blastwashsystems, © 2013 [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://blastwashsystems.com/wp-content/uploads/2016/05/Principles-of-Blast-Cleaning.pdf>
- [16] *Omílání jako univerzální metoda pro úpravu povrchů* [online]. MM Průmyslové spektrum, 2002 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/omilani-jako-univerzalni-metoda-pro-upravu-povrchu>
- [17] TLASKAL, Filip. *Vliv předúpravy povrchu pro technologie nanášení práškových povlaků*. Praha, 2022. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní
- [18] Brushing Solution for Finishing. In: *Kullen* [online]. KULLEN-KOTI GmbH, © 2023 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.kullen.de/en/applications/finishing/>
- [19] KONVALINKA, Roman. Nahrazování fosfátování konverzními povlaky na bázi zirkonu. *POVRCHÁŘI* [online]. 2018, (7), 3-5 [cit. 2023-04-27]. ISSN 1802-9833. Dostupné z: [http://www.povrchari.cz/kestazeni/201807\\_povrchari.pdf](http://www.povrchari.cz/kestazeni/201807_povrchari.pdf)
- [20] LUKAVSKÝ, Ladislav, Stanislav BOUŠKA a Václav FIALA. *Nátěrové hmoty - 1.díl*. 3. dopl. vyd. Praha: MERKUR, 1993. ISBN 80-7032-301-9.
- [21] *What is Steel Pickling?* [online]. MSKS IP, 2021 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.metalsupermarkets.com/what-is-steel-pickling/>
- [22] SZELAG, Petr a Jaroslav CHOCHOLOUŠEK. Železnaté fosfátování. In: *Mmspektrum* [online]. MM průmyslové spektrum, 2008 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zeleznate-fosfatovani>
- [23] DUNHAM, Bruce. Zirconium Pretreatments: Not Just for Early Adopters Anymore. *Metal Finishing* [online]. 2012, (6), 18-21 [cit. 2023-04-27]. ISSN 0026-0576. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026057613702150>
- [24] *Testujeme novinky v oblasti zirkonového fosfátování* [online]. IDEAL-Trade Service, spol. s.r.o., 2021 [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://www.itsbrno.cz/novinka-v-oblasti-zirkonoveho-fosfatovani>
- [25] *A guide to applying powder coatings* [online]. Ifscoatings, 2023 [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://www.ifscoatings.com/content/assets/Uploads/PDF/Ebook-A-Guide-to-applying-powder-coatings.pdf>

- [26] Automatic Powder Coating Plant. In: *Generalcoat* [online]. GeneralCoat Technologies, © 2023 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.generalcoat.com/product-detail/automatic-powder-coating-plant/>
- [27] *NANÁŠECÍ KABINY* [online]. DATEL Ledec, 2016 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.datel-ledec.cz/nanaseci-kabiny>
- [28] KREIBICH, Viktor. Povlaky z práškových plastů bezchybně. In: *Mmspektrum* [online]. MM průmyslové spektrum, 2010 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/povlaky-z-praskovych-plastu-bezchybne.html>
- [29] KREIBICH, Viktor. Práškové plasty chrání nejen proti korozi. In: *Inovace* [online]. Jihomoravské inovační centrum, 2010 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <http://www.inovace.cz/novinky/199-praskove-plasty-chrani-nejen-proti-korozi>
- [30] *Powder Coating Troubleshooting Guide* [online]. TCI Powder, 2016 [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://www.tcipowder.com/resources/troubleshooting-guide/chapter-eleven-powder-curing-process/>
- [31] *What is Faraday Cage and how to avoid it in powder coating?* [online]. Hangzhou Feifu Import and Export Co., 2020 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.powdergunparts.com/What-is-Faraday-Cage-and-how-to-avoid-it-in-powder-coating-id3367211.html>
- [32] PÉLISSIER, Krystal a Dominique THIERRY. Powder and High-Solid Coatings as Anticorrosive Solutions for Marine and Offshore Applications? A Review. In: *Coatings* [online]. MDPI, 2020 [cit. 2023-04-27]. ISSN 2079-6412. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2079-6412/10/10/916>
- [33] What is Faraday Cage?. In: *Tcipowdercoatings* [online]. TCI Powder Coatings, © 2015 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <http://www.tcipowdercoatings.com/2015/10/what-is-faraday-cage-part-1.html>
- [34] KUMARI PRASAD, Leena , James MCGINITY a Robert WILLIAMS. Electrostatic powder coating: Principles and pharmaceutical applications. *International Journal of Pharmaceutics* [online]. 2016, (1-2), 289-302 [cit. 2023-04-26]. ISSN 0378-5173. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037851731630299X>
- [35] When to Use Air Spray Guns or Rotary Bell Atomizers for Robotics. In: *Pfonline* [online]. Products Finishing, © 2020 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z:

<https://www.pfonline.com/articles/when-to-use-air-spray-guns-or-rotary-bell-atomizers-for-robotics>

[36] KREIBICH, Viktor. *POVLAKY Z PRÁŠKOVÝCH PLASTŮ* [online]. doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: [https://www.kreibichpovrchy.cz/?page\\_id=277](https://www.kreibichpovrchy.cz/?page_id=277)

[37] *Lakovny pro fluidní nanášení práškových barev* [online]. DATEL Ledec, 2016 [cit. 2023-04-26].

[38] *How does a powder coating oven work? Lets find out!* [online]. Institute of Supply Chain Management, 2020 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.ioscm.com/blog/how-does-a-powder-coating-oven-work-lets-find-out/>

[39] *Vytvzovací a sušící pece* [online]. DATEL Ledec, 2016 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.datel-ledec.cz/public/soubory/editor/files/242cz.pdf>

[40] STRATIL, Jaroslav. *K problematice správného vytvzování práškových nátěrových hmot* [online]. iol, 2006 [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <http://wev.iol.cz/povrchoveupravy/>

[41] Průběžná plynová pec. In: *Lac* [online]. LAC, 2023 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.lac.cz/cs/pece-a-susarny/zakazkove-projekty/automotive/prubezna-plynova-pec-vnitri-pnuti-ocelovych-pistu/prubezna-susarna-sp-2800-25>

[42] Industrial convection oven for powder coating. In: *Hangzhou Color Powder Coating Equipment Co., Ltd* [online]. © 2023 [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://www.colopowdercoating.com/Industrial-Convection-Oven-for-Powder-Coating-pd40626806.html>

[43] *Understanding Infrared Curing* [online]. Products Finishing, 2003 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.pfonline.com/articles/understanding-infrared-curing>

[44] HARMON, Patrick. Powder Coating Oven Selection – A Complete Guide. *Pittsburghsprayequip* [online]. Pittsburgh Spray Equipment Company, 2017 [cit. 2023-04-23].

[45] *Powder curing: Some lessons learned* [online]. CSC Publishing, 2012 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://cdn.ymaws.com/www.ihea.org/resource/collection/01C9C4DA-9519-4EBE-9F81-0CEC55F05A6D/IR-Shoptalk-0812.pdf>

[46] CZACHOR-JADACKA, Dominika a Barbara PILCH-PITERA. Progress in development of UV curable powder coatings. In: *Progress in Organic Coatings* [online]. 2021, (158) [cit. 2023-04-27]. ISSN 0300-9440. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300944021002265>



- [47] WILLIAM, Andrew. Effect of UV Light and Weather on Plastics and Elastomers. In: *Plastics Design Library*. 1994, s. 50 - 80. ISBN 978-0-8155-1926-3.
- [48] Co je to UV záření?. In: *Solarianovotny* [online]. Solária Zdeněk Novotný, © 2018 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.solarianovotny.cz/co-je-to-uv-zareni>
- [49] BLACK, Sara. Technologies for UV curing of composite laminates demonstrated. *Compositesworld* [online]. 2004 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/techonologies-for-uv-curing-of-composite-laminates-demonstrated>
- [50] KNOBLAUCH, Michael. UV-Cured Powder Coatings and LED-Curing Technology. In: *Pfonline* [online]. Products Finishing, 2019 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.pfonline.com/articles/uv-cured-powder-coatings-and-led-curing-technology->
- [51] GIUSEPPINA, Simone. An experimental investigation on the laser cure of thermosetting powder: An empirical model for the local coating. *Progress in Organic Coatings* [online]. 2010, 340-346 [cit. 2023-04-26]. ISSN 0300-9440. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300944010000627>
- [52] *Steel Material-Nr.: 1.0036 Data Sheet* [online]. Pauly-stahlhandel, 2023 [cit. 2023-07-01]. Dostupné z: <https://pauly-stahlhandel.com/en/werkstoff-nr/1.0036>
- [53] Digitální tloušťkoměr Elcometer 456. In: *Elcometer* [online]. Gamin, © 2023 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.elcometer.cz/elcometer-456/>
- [54] ČSN EN ISO 2409. *Nátěrové hmoty - Mřížková zkouška*. Praha: ÚNMZ, 2021.
- [55] ČSN EN ISO 16276-2. *Ochrana ocelových konstrukcí proti korozi ochrannými nátěrovými systémy - Hodnocení a kritéria přijetí, adheze/koheze (odtrhová pevnost) povlaku - Část 2: Mřížková zkouška a křížový řez*. Praha: ÚNMZ, 2008.
- [56] ČSN EN ISO 4624. *Nátěrové hmoty - Odtrhová zkouška přilnavosti*. Praha: ÚNMZ, 2016.
- [57] ČSN EN ISO 9227. *Korozní zkoušky v umělých atmosférách - Zkoušky solnou mlhou*. Praha: ÚNMZ, 2023.
- [58] ČSN EN ISO 4628-3. *Nátěrové hmoty - Hodnocení degradace nátěrů - Klasifikace množství a velikosti defektů a intenzity jednotných změn vzhledu - Část 3: Hodnocení stupně prorezavění*. Praha: ÚNMZ, 2016.
- [59] ČSN EN ISO 4628-8. *Nátěrové hmoty - Hodnocení degradace nátěrů - Klasifikace množství a velikosti defektů a intenzity jednotných změn vzhledu - Část 8: Hodnocení stupně delaminace a koroze v okolí řezu nebo jiného umělého defektu*. Praha: ÚNMZ, 2013.

- [60] ČSN EN ISO 4628-2. *Nátěrové hmoty - Hodnocení degradace nátěrů - Klasifikace množství a velikosti defektů a intenzity jednotlivých změn vzhledu - Část 2: Hodnocení stupně puchýřkování*. Praha: ÚNMZ, 2016.
- [61] ČSN EN ISO 21920-3. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Profil - Část 3: Operátory specifikací*. Praha: ÚNMZ, 2023.
- [62] ČSN EN ISO 2808. *Nátěrové hmoty - Stanovení tloušťky nátěru*. Praha: ÚNMZ, 2020.
- [63] Odtrhová zkouška dle ČSN EN ISO 4624. In: *Atryx* [online]. Atryx, © 2018 [cit. 2023-06-30]. Dostupné z: <https://atryx.cz/prakticka-prirucka/16-hodnoceni-prilnavosti>
- [64] ČSN EN ISO 11998. *Nátěrové hmoty - Stanovení odolnosti nátěrů proti oděru za mokra a stanovení čistitelnosti*. Praha: ÚNMZ, 2007.
- [65] DIN EN 13300. *Paints and varnishes - Paints and varnishes for interior walls and ceilings - Classification*. Německo, 2023.
- [66] Korozní komory. In: *Mmspektrum* [online]. Mmspektrum, © 2015 [cit. 2023-07-14]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/korozni-komory>
- [67] TQC Sheen Scrub Abrasion and Washability Tester. In: *Industrialphysics* [online]. Industrialphysics, © 2023 [cit. 2023-07-14]. Dostupné z: <https://industrialphysics.com/product/scrub-abrasion-and-washability-tester/>
- [68] *Farba proszkowa poliestrowa FAPROXYD 620* [online]. Promesa-farby [cit. 2023-07-23]. Dostupné z: <http://www.promesa-farby.pl/download/ATESTY/PCW/katalog%20faproxydy%20-%20proszkowe%20wyroby.pdf>
- [69] *Assembly, instruction & spares manual - IRT 1 PREPCURE* [online]. Hedson [cit. 2023-07-23]. Dostupné z: [https://www.hedson.com/wp-content/uploads/2018/02/713682\\_irt1\\_irt2\\_PrepCure\\_Assembly\\_Operating\\_Spares\\_manual\\_INT\\_rev12.pdf](https://www.hedson.com/wp-content/uploads/2018/02/713682_irt1_irt2_PrepCure_Assembly_Operating_Spares_manual_INT_rev12.pdf)
- [70] Zoom Stereomicroscope SZ61. In: *Olympus-lifescience* [online]. Olympus-lifescience, 2023 [cit. 2023-07-23]. Dostupné z: <https://www.olympus-lifescience.com/en/microscopes/stereo/sz61/>
- [71] *Technical data sheet - UHU plus endfest 300* [online]. Uhubostik [cit. 2023-07-23]. Dostupné z: <https://www.uhubostik.it/images/uploads/uhu/st-D5476.pdf>
- [72] Thermo Scientific Heratherm OGS400 General Protocol Oven, Gravity Convection, 14.8 Cu.Ft. 208-240V. In: *Globalindustrial* [online]. Globalindustrial, © 2023 [cit. 2023-07-27].

Dostupné z: <https://www.globalindustrial.com/p/ogs400-general-protocol-oven-gravity-convection-14-8-cu-ft-208-240v>

[73] Práškovací kabina M 1203. In: *Datel-ledec* [online]. Datel-ledec, © 2023 [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://www.datel-ledec.cz/public/soubory/reference/435/foto/1.jpg>

[74] KLEČKA, Vojtěch. *Energetické úspory při vytvrzování práškových plastů*. Praha, 2017. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní

[75] *TQC Sheen Scrub Abrasion and Washability Tester* [online]. Industrialphysics [cit. 2023-08-11]. Dostupné z: <https://industrialphysics.com/wp-content/uploads/2022/02/tqc-sheen-scrub-abrasion-and-washability-tester-ab6000-m44-10.pdf>

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Porovnání teplot a časů běžných termosetových a UV vytvrzitelných prášků [7] .	44
Tabulka 2: Výhody a nevýhody technologie UV vytvrzování [46] .....	46
Tabulka 3: Porovnání rtuťového obloukového a UV-LED zářiče [7] .....	49
Tabulka 4: Chemické složení oceli S235JRG1 [52] .....	51
Tabulka 5: Výsledná drsnost vzorků .....	54
Tabulka 6: Naměřené hodnoty tloušťky povlaku v $\mu\text{m}$ pro vzorky typu deska.....	59
Tabulka 7: Hodnocení podle normy ČSN EN ISO 2409 [54].....	60
Tabulka 8: Vyhodnocení mřížkové zkoušky dle normy ČSN EN ISO 2409 [54].....	61
Tabulka 9: Hodnocení podle normy ČSN EN ISO 16276-2 [55] .....	63
Tabulka 10: Vyhodnocení zkoušky křížovým řezem dle normy ČSN EN ISO 16276-2 [55] .....	63
Tabulka 11: Charakter porušení dle normy ČSN EN ISO 4624 [56] .....	66
Tabulka 12: Vyhodnocení odtrhové zkoušky na vzorcích vytvrzených pomocí HRK.....	67
Tabulka 13: Vyhodnocení odtrhové zkoušky na vzorcích vytvrzených pomocí IR .....	68
Tabulka 14: Zkušební podmínky pro korozní zkoušku v neutrální solné mlze [57].....	70
Tabulka 15: Hodnocení stupně puchýřkování podle normy ČSN EN ISO 4628-2 [60] .....	71
Tabulka 16: Stupeň prorezavění a plocha s výskytem rzi dle normy [58] .....	72
Tabulka 17: Hodnocení stupně prorezavění podle normy ČSN EN ISO 4628-3 [58].....	72
Tabulka 18: Hodnocení stupně delaminace dle normy ČSN EN ISO 4628-8 [59].....	73
Tabulka 19: Hodnocení koroze v okolí řezu dle normy ČSN EN ISO 4628-8 [59] .....	75
Tabulka 20: Výsledné hodnoty hmotnosti před a po zkoušce oděrem za mokra .....	77
Tabulka 21: Hodnocení velikosti oděru dle normy [65] .....	79

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Logo formy Hedson Technologies AB [2] .....	13
Obrázek 2: Příklady dřevěných textur práškových plastů [4] .....	14
Obrázek 3: Proces výroby práškových plastů: 1. pryskyřice, 2. pigmenty, 3. plniva, 4. aditiva, 5. míchání jednotlivých složek, 6. tavení a vytlačování v extrudéru, 7. ochlazovací jednotka s drtičem, 8. mlýn , 9. filtrační zařízení, 10. prosévací zařízení, 11. materiál podle specifikace do pytlovací stanice, 12. nevyhovující materiál. [7] .....	17
Obrázek 4: Zařízení pro čištění prášku - je určeno pro pneumatickou dopravu práškové barvy přes cyklon v horní části zařízení. Prosátá barva spadává do odvětrávaného zásobníku umístěného pod prosévačkou. Většinou je použit přímo zásobník stříkací techniky, nebo lze dodat včetně zásobníku. [9] .....	18
Obrázek 5: Schéma recyklace práškového plastu [10] .....	19
Obrázek 6: Tryskání metacím kolem [15] .....	21
Obrázek 7: Kartáčování [18] .....	22
Obrázek 8: Schéma moření povrchu pomocí kyseliny sírové. Na levém obrázku: rozpuštění oxidů a odleptávání základního materiálu. Na pravém obrázku: odlupování nečistot od základního materiálu vlivem vodíku. [11] .....	25
Obrázek 9: Železnaté fosfátování [17] .....	26
Obrázek 10: Zinečnaté fosfátování [17] .....	26
Obrázek 11: Zirkonové fosfátování [17] .....	27
Obrázek 12: Technologický postup chromátování [17] .....	27
Obrázek 13: Schéma automatické linky na aplikaci práškového plastu: 1. vstup, 2. chemická předúprava, 3. sušení, 4. aplikace práškového plastu, 5. vytvrzování, 6. ochlazení hotové součásti vzduchem, 7. výstup [26] .....	29
Obrázek 14: Jednostranná nanášecí kabina [27] .....	30
Obrázek 15: Oboustranná nanášecí kabina [27] .....	30
Obrázek 16: Velkoprostorová nanášecí kabina [27] .....	31
Obrázek 17: Důsledek Faradayovy klece [33] .....	33
Obrázek 18: Schéma korona nabíjení prášku [34] .....	34
Obrázek 19: Schéma tribo nabíjení [34] .....	35
Obrázek 20: Práškový zvonový atomizér [35] .....	35
Obrázek 21: Schéma znázorňující fluidní nanášení [32] .....	36

Obrázek 22: Proces vytvrzování práškového plastu [34] .....	38
Obrázek 23: Komorová pec [39] .....	39
Obrázek 24: Kontinuální pec plynová [41] .....	40
Obrázek 25: Horkovzdušná konvekční pec [42] .....	41
Obrázek 26: Optimální délka IR vlny [30] .....	42
Obrázek 27: Princip vytvrzování UV práškových plastů [46] .....	45
Obrázek 28: Rozdělení UV záření [48] .....	46
Obrázek 29: Středotlaká rtuťová oblouková výbojka [7] .....	47
Obrázek 30: Křivky emitovaných vlnových délek pro běžné UV-LED [7] .....	48
Obrázek 31: Schéma UV-LED zářiče [7] .....	49
Obrázek 32: Tryskací zařízení od firmy S.A.F. Praha [foto autora práce] .....	52
Obrázek 33: Drsnoměr Mitutoyo Surftest SJ-301 [foto autora práce] .....	53
Obrázek 34: Elektrostatické nanášení pomocí tribostatického náboje [foto autora práce] .....	55
Obrázek 35: Digitální tloušťkoměr Elcometer 456 [53] .....	58
Obrázek 36: Zkušební pomůcky pro provedení mřížkové zkoušky [foto autora práce] .....	60
Obrázek 37: Vzorek HRK (1); zoom 1,2; hodnocení zkoušky 0 [foto autora práce] .....	61
Obrázek 38: Vzorek IR (3); zoom 1,2; hodnocení zkoušky 2 [foto autora práce] .....	62
Obrázek 39: Zkušební pomůcky pro provedení zkoušky křížovým řezem [foto autora práce] .....	62
Obrázek 40: HRK (2); zoom 0,67; hodnocení 5A [foto autora práce] .....	64
Obrázek 41: IRT (1); zoom 0,67; hodnocení 4A [foto autora práce] .....	64
Obrázek 42: Měřicí sada pro zkoušku odtrhem [foto autora práce] .....	65
Obrázek 43: Rozdělení jednotlivých vrstev pro stanovení charakteru porušení [63] .....	66
Obrázek 44: Vzorek: HRK (3); číslo odtrhu: 2; odtrhová síla: 5,73 MPa; charakter porušení: 75 % A/B; 5 % B; 20 % B/Y [foto autora práce] .....	67
Obrázek 45: Vzorek: IR (3); číslo odtrhu: 1; odtrhová síla: 9,87 MPa; charakter porušení: 50 % A/B; 35 % B; 15 % B/Y [foto autora práce] .....	68
Obrázek 46: Truhlová korozní komora SKB400ATR [66] .....	70
Obrázek 47: Připravený vzorek pro korozní zkoušku [foto autora práce] .....	70
Obrázek 48: Vzorek HRK (4) pro hodnocení koroze v okolí řezu [foto autora práce] .....	75
Obrázek 49: Zkušební zařízení pro zkoušku proti oděru za mokra [67] .....	76

## Seznam příloh

Příloha 1: Odmašťovací přípravek Isopropanol [foto autora práce] .....	96
Příloha 2: Odstraňovač starých nátěrových hmot [foto autora práce] .....	96
Příloha 3: Měření tloušťky u vzorků HRK.....	97
Příloha 4: Měření tloušťky u vzorků IR .....	97
Příloha 5: Měření hmotnosti vzorků při zkoušce odolnosti proti oděru za mokra .....	98
Příloha 6: Materiálový list termosetového práškové plastu FAPROXYD 620 [68] .....	99
Příloha 7: Technický list k jednorubicovému infračervenému zářiči IRT 1 od firmy Hedson [69] .....	101
Příloha 8: Technický list mikroskopové kamery INFINITY 1 od firmy Lumenera scientific [70] .....	102
Příloha 9: Mikroskop Olympus SZ61 [70] .....	104
Příloha 10: Technický list lepidla UHU plus endfest 300 [71].....	104
Příloha 11: Elektricky vytápěná horkovzdušná pec [72].....	105
Příloha 12: Nanášecí kabina od firmy DATEL Ledecř s.r.o. [73] .....	105

## Přílohy

Příloha 1: Odmašťovací přípravek Isopropanol [foto autora práce]



Příloha 2: Odstraňovač starých nátěrových hmot [foto autora práce]





Příloha 3: Měření tloušťky u vzorků HRK

HORKOVZDUCH (150x100x3 mm)					
HRK (1)		HRK (2)		HRK (3)	
Měření	μm	Měření	μm	Měření	μm
1	21,70	1	34,00	1	36,50
2	31,70	2	27,00	2	27,70
3	39,50	3	22,20	3	22,50
4	30,90	4	38,10	4	45,20
5	25,50	5	36,70	5	35,40
6	37,50	6	27,40	6	31,90
7	42,90	7	29,90	7	44,50
8	32,10	8	41,20	8	36,30
9	30,80	9	44,60	9	36,90
10	37,90	10	31,40	10	35,30
11	36,10	11	29,40	11	33,40
12	32,80	12	38,00	12	36,60
∅	33,48	∅	33,31	∅	34,12
sm. od.	4,02	sm. od.	4,74	sm. od.	4,05

Příloha 4: Měření tloušťky u vzorků IR

IR (150x100x3 mm)					
IR (1)		IR (2)		IR (3)	
Měření	μm	Měření	μm	Měření	μm
1	62,80	1	52,50	1	66,00
2	45,40	2	55,60	2	45,60
3	46,80	3	55,30	3	63,90
4	43,20	4	49,40	4	60,90
5	57,50	5	49,70	5	54,20
6	59,40	6	55,50	6	74,60
7	53,30	7	54,50	7	73,30
8	56,40	8	53,40	8	52,70
9	45,90	9	62,70	9	58,20
10	50,00	10	48,40	10	40,20
11	49,00	11	59,60	11	50,80
12	55,50	12	52,80	12	40,50
∅	51,92	∅	53,83	∅	56,61
sm. od.	4,89	sm. od.	2,86	sm. od.	9,36

Příloha 5: Měření hmotnosti vzorků při zkoušce odolnosti proti oděru za mokra

PŘED		IR		HRK	
	vážení 1	236,984	234,939	235,563	237,698
vážení 2	236,983	234,944	235,557	237,708	
∅	<b>236,9835</b>	<b>234,9415</b>	<b>235,56</b>	<b>237,703</b>	
PO		IR		HRK	
	vážení 1	236,973	234,941	235,53	237,704
vážení 2	236,975	234,94	235,528	237,702	
∅	<b>236,974</b>	<b>234,9405</b>	<b>235,529</b>	<b>237,703</b>	

# FAPROXYD®



## FAPROXYD® 620

Farba proszkowa poliestrowa  
nie zawieraj ca TGIC

Kolorystyka wg systemu RAL oraz karty kolorów farb proszkowych Polifarbu  
Cieszyn-Wrocław S.A.

**Norma:**

ZN-PCW-1251:2002

**Atesty:**

Atest Państwowego Zakładu Higieny Nr HK/B/1434/01/98

**Zakres  
stosowania:**

Farby **FAPROXYD® 620** przeznaczone są do malowania przedmiotów metalowych narażonych na bezpośrednie działanie czynników atmosferycznych. Dają powłoki gładkie, dekoracyjne, o wysokiej odporności na działanie promieniowania UV, bardzo dobrych właściwościach antykorozyjnych i mechanicznych.

**Metody  
aplikacji:**

Farby **FAPROXYD® 620** przeznaczone są do nakładania metodą natrysku elektrostatycznego lub elektrokinetycznego (tribo). Czas utwardzania w piecu w zależności od temperatury (detalu):

- 160° C - 20 min.
- 180° C - 15 min.
- 200° C - 9 min.

**Wydajno :**

8-12 m<sup>2</sup> z 1 kg farby przy grubości powłoki 60-80 μm i założeniu 100% wykorzystania farby.

**W asno ci  
u ytkowe:**

Farby **FAPROXYD® 620** dają powłoki dekoracyjne o wysokim połysku i bardzo dobrych właściwościach mechanicznych i antykorozyjnych oraz wysokiej odporności na działanie czynników atmosferycznych.

Nie zawierają TGIC.

Podstawowe parametry:

- połysk (Gardner 60°), co najmniej:		80
- odporność na uderzenie, co najmniej:	[cm * 1kg]	20
- tłoczność, co najmniej:	[mm]	5

# FAPROXYD®

## Sposób stosowania:

Farby **FAPROXYD® 620** nakłada się metodą natrysku elektrostatycznego lub elektrokinetycznego (tribo). Powierzchnie przeznaczone do malowania powinny być suche, odtłuszczone, wolne od rdzy i innych zanieczyszczeń. W celu zwiększenia przyczepności farby do podłoża oraz poprawienia własności antykorozyjnych zaleca się jego fosforanowanie (stal) lub chromianowanie (aluminium) przed nałożeniem farby.

## Wskazówki BHP i przeciwpoarowe:

Farby proszkowe stwarzają pewne zagrożenie wybuchowe, należy więc:

- unikać gromadzenia się osadów farby proszkowej poza urządzeniami i pojemnikami,
  - stosować wyłącznie urządzenia elektryczne pyłoszczelne zgodnie z normą PN- 79/E-08106,
- instalować i konserwować uziemienia wszystkich elementów metalowych stykających się z farbą proszkową unoszoną przez powietrze,
- prowadzić okresowe czyszczenie i badanie izolacji urządzeń napylających (pistoletów), pod kątem narażenia na przebicie elektryczne.

## Warunki przechowywania:

Farby **FAPROXYD® 620** powinny być przechowywane w miejscach suchych w temperaturze poniżej 25°C.



## 2. Intended use of the product

The IRT 1 / IRT 2 PrepCure, infrared dryer, can be used either on stand with timer or handheld for the following applications:

- heating of old putty prior to removal
- heating of old paint prior to scraping
- fast-drying of putty, filler and paint
- heating of strips prior to removal
- heating of glued joints
- hardening of paint drips

## 3. Technical data

Short wave infrared radiators

	IRT 1	IRT 2
Supply Voltage	220 - 240 V	220 - 240 V
Frequency	50 - 60 Hz	50-60 Hz
Current	4 A	9 A
Fuse *	10 A	10 A
Output	1000 W	2000 W
Weight product	1,8 kg	2,8 kg
incl packaging	2,5 kg	3,5 kg

\*The dryer must be operated with the recommended fuse rating. Electrical diagrams - see page 21

## 4. Site

If the dryer is used for drying of solvent-based materials, explosion prevention has to be guaranteed by providing sufficient ventilation. The solvent concentration in the air must always be below 25% of the lower explosion limit.

## 5. Operating instructions

Insert the plug in an grounded electrical outlet. Switch the circuit breaker in the handle. Set the timer (optional) to desired time. The lamp will illuminate and full output will be reached within a few seconds. To turn off the equipment, switch the circuit breaker in the handle once again.

By radiating only the needed areas and not heating any air, a lower energy consumption is achieved.

Since the reflector of IRT 1 is elliptical, distance acts as both the temperature and surface area regulator. In most cases it is suitable to start at a distance of 30 cm from the surface to be heated. Move the

IRT 1 sideways to maintain an even temperature.

The IRT 2 is equipped with 2 FreeForm reflectors. A more even surface temperature is obtained by distributing the energy evenly. Optimum distance is 40-60 cm.

**Warning!** If a shorter distance to the object being heated is used, the temperature of the object rapidly increases to a very high level.

If for any reason an IR lamp should be defect, the equipment must immediately be disconnected from the electrical outlet.

## 6. Hazards

Electrical equipment

The equipment operates under with dangerous electrical voltage.

If maintenance on the equipment is necessary:

- Remove the plug from the wall socket.
- Contact an electrician. Only an qualified electrician may work with the equipment.

If the supply cord is damaged, it must be replaced by the manufacturer, its service agent or electrically qualified persons in order to avoid a hazard.

### Warning! Intensive heat radiation!

Heating body parts (hands, face etc.) is strictly prohibited. Never point the heater towards flammable material.

Not to be used without supervision.

The focal point of the IRT 1 is 16 mm in front of the edge of the reflector. If the object comes within or close to this focal point, the object becomes extremely hot, and risk of fire could arise.

Do not store, prepare or use solvent-containing materials within a 5 m/16 feet radius of the dryer. Flammable materials should not be placed close to a drying device in use.

The dryer must not be exposed to paint fog, sanding dust or solvents, due to fire and explosion risk. Furthermore, the lifetime of the dryer will otherwise be reduced. Allow for sufficient cooling time of the dryer.

### Warning!

Ensure that the supply cable is placed appropriately, so it cannot be damaged by heat radiation.



## 7. Instructions to the owner

The owner of the infrared lamp has to draw up a list of instructions on how to use the lamp, in clear language that the user can understand, and taking into account the manual and the prevailing conditions at the work place. These instructions must be available, and kept in a place known and accessible to the user.

Everyone using the infrared heater must follow the instructions for use.

This appliance is not intended for use by persons (including children) with reduced physical, sensory or mental capabilities, or lack of experience and knowledge, unless they have been given supervision or instruction concerning use of the appliance by a person responsible for their safety.





# INFINITY 1

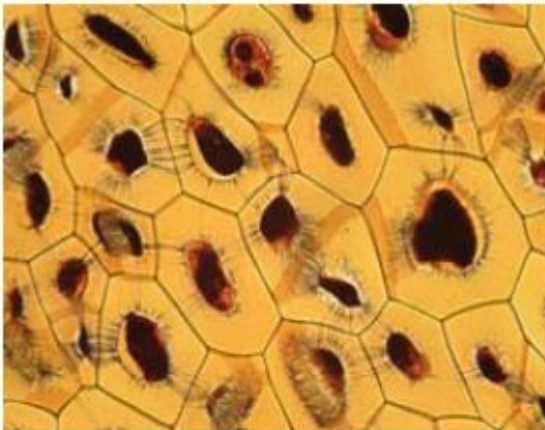
High Resolution USB2 Color Microscopy Camera  
for Qualitative Image Archiving.

*Superb Detail for a Wide Range  
Scientific Documentation!*



## Sophisticated Design

Lumenera Scientific's new Infinity1 digital camera is designed to be a cost-effective versatile solution for clinical, life science, materials science and educational professionals. With 1280x1024 resolution and on-board processing, the Infinity 1 delivers outstanding image quality for a wide variety of scientific applications.



Live video preview provides for real-time focus. Infinity1 auto-exposure and auto-white-balance efficiently captures your optimal image. An intuitive user application provides camera controls while full integration to popular third-party imaging applications are available through our TWAIN drivers.

The USB2 digital interface ensures a simple plug and play installation – and one standard cable minimizes camera clutter. No frame-grabber required.

Infinity1 is supported by an experienced team of technical support and imaging experts. We understand your imaging needs and are here to help you get the most out of your camera.

## Performance Features

- ❑ The High Speed USB2 interface eliminates a framegrabber and facilitates ease of installation on both laptop and desktop computers.
- ❑ The low noise characteristics of the Infinity1 progressive scan 1.3 Megapixel Image Sensor results in crisp color quality for the most demanding brightfield and darkfield microscopy applications including clinical pathology and cytology, life science and geology.
- ❑ Full color sub-windowing allows for rapid focus and scanning of samples: 15 fps at full 1280x1024 resolution and 60 fps at 640x480 resolution.
- ❑ Select 8 & 10 bit pixel Data modes.
- ❑ The RGB data captured through each pixel contains 30 bits of color image information resulting in 1024 intensity values per color.
- ❑ Camera control through an intuitive user TWAIN interface results in rapid image capture archiving and documentation for high throughput applications, demanding research environments and teaching facilities.
- ❑ The Infinity I has a compact design equipped with a C-mount facilitating installation on all microscope configurations including upright, inverted and stereo.
- ❑ Supports Windows 98/SE, 2000, ME and XP operating systems.

Lumenera Corporation • 2470 Don Reid Drive, Ottawa, Ontario, K1H 1E1 • [www.lumenera-scientific.com](http://www.lumenera-scientific.com) • 613-736-4077

©2004 Lumenera Corporation, all rights reserved.  
Design, features, and specifications are subject to change without notice.

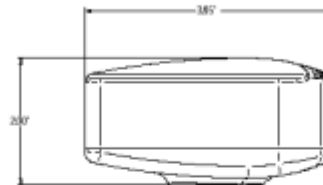
# INFINITY 1 Specifications

## Camera Sensor

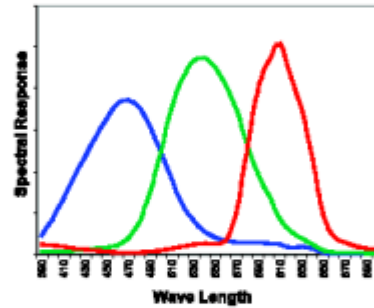
Image Sensor	1/2" format, color or mono, 6.6mm x 5.3mm array
Effective Pixels	1280 x 1024, 5.2um square pixels
Digital Output	8 and 10 bit uncompressed
Frame Rate	15 fps at 1280x1024, 60fps at 640x480
Dark Current (e-/s)	20
Dynamic Range	60dB

## Camera Controls

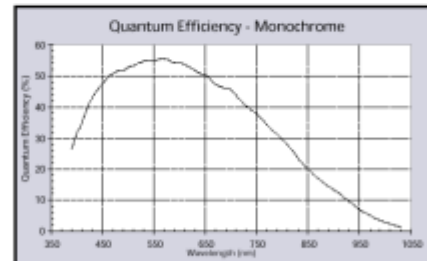
Integration Time	1/1000 to 2 sec.
Shutter	Rolling shutter with single frame capture
ROI	User Selectable through mouse click and drag
Auto Exposure	Automatic / Manual
White Balance	Automatic / Manual
Gain	Programmable / 0 to 10X optimizable
Optical Mount	C-mount lens adapter
Interface	USB 2.0 high speed interface
Dimensions (L x W x H)	3.85 x 2.00 x 2.75 inches
Mass	300g
Power Requirement	USB bus power, or external 6VDC - 500mA
Power Consumption	~2.5Watts
Operating Temperature	0° C to +50° C
Operating Humidity	20%-80%, Non-condensing



Light Source 5,000° K



<p><b>Recommended PC Specs:</b>                  Pentium 4, 1.3GHz or more                  512Mb RAM                  60 GB HDD or more                  USB2.0 Port                  Windows 2000 or XP</p>	<p><b>Minimum PC Specs:</b>                  600MHz Processor                  256Mbytes of SDRAM                  Empty capacity of 20GB HDD                  USB2.0 Port                  Windows 98 or ME with a USB 2.0                  Add-in card and driver</p>
---	---



Lumenera Scientific  
 2470 Don Reid Drive  
 Ottawa, Ontario, Canada  
 Telephone: 613-736-4077  
[www.Lumenera-Scientific.com](http://www.Lumenera-Scientific.com)

## Ordering Information

- Infinity 1 C – Color Camera  
 Infinity 1 M – Monochrome Camera
- Product Includes:
- Infinity 1 digital camera for USB 2.0
  - CD-ROM with Infinity user application software
  - TWAIN driver
  - Documentation
  - USB 2.0 cable

Lumenera Corporation • 2470 Don Reid Drive, Ottawa, Ontario, K1H 1E1 • [www.lumenera-scientific.com](http://www.lumenera-scientific.com) • 613-736-4077

©2004 Lumenera Corporation, all rights reserved.  
 Design, features, and specifications are subject to change without notice.

Příloha 9: Mikroskop Olympus SZ61 [70]



Příloha 10: Technický list lepidla UHU plus endfest 300 [71]

# UHU Technical Data Sheet

## UHU plus endfest 300

**Testing:** In accordance with DIN 53286; testing fixed at pressure of 1 bar; seven days' storage at 20°C/65% relative humidity prior to testing; Zwick testing machine with temperature chamber (testing speed: 50mm/min.).

**Test conditions:** Application surface: 25 x 10mm = 250 mm<sup>2</sup>  
Test piece: AlCuMg 1, sandblasted (Korund ELK 90): 82,5 x 25 x 1,5mm

Adhesion of UHU plus endfest 300 according to temperature		
Temperature	Hardening time	Bond strength*
20°C	12 hrs.	approx. 1200 N/cm <sup>2</sup>
40°C	3 hrs.	approx. 1800 N/cm <sup>2</sup>
70°C	45 mins.	approx. 2000 N/cm <sup>2</sup>
100°C	10 mins.	approx. 2500 N/cm <sup>2</sup>
180°C	5 mins.	approx. 3000 N/cm <sup>2</sup>

\* at combined tension and shear strain for aluminium

When sticking together materials with different coefficients of the thermal expansion, care must be taken that the adhesive makes only a small difference in length if the temperature varies. In such cases it is therefore recommended that the proportion of hardener in the mix should be increased, rendering the end product more flexible. (cf. page 1)

Relatively large metal parts, such as signs, are extremely difficult to remove subsequently from glass surfaces as resin solvent can only reach the adhesive near the edges.

UHU plus endfest 300 should therefore not be used for sticking signs, letters and similar items to large glass surfaces such as shop windows, since the bond is so strong that dimensional changes in the metal could result in the glass breaking under unfavourable conditions.

**Resistance:**

UHU plus joins are resistant to moisture, oil, dilute acids and alkalis and many solvents. Moisture, dilute acids and alkalis have very little effect on bond strength, even in the event of lengthy exposure. No universally valid data can be given as there are always many factors, such as the possibility of corrosion, duration of exposure and temperature, that affect the assembly.

Some solvents, such as methylene chloride and trichloroethylene (Warning! Precautions must always be taken when using these substances!), soften the adhesive over a period of time. This effect can be made use of for dissolving adhesive joints.

UHU plus is resistant to ageing and weathering. The adhesive is not affected by even extremely low temperatures. At temperatures below -60°C, resistance to combined tension and shearing is reduced to approximately 75-80% of the value measured at room temperature; if the samples are heated up to room temperature once more, the original bond strength is also regained.

**Physical Properties:**

Hardened UHU plus has exceptional electrical insulation properties:

Specific resistance: 5.6 - 5.8; 10<sup>13</sup> Ω.cm at 100 V and 21 °C.

Heat Conductivity according to DIN 52612 is 0.249 W/m K at 28.3 °C.

The linear coefficient of thermal expansion is 90.10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup> at 20°C.

Compression resistance (according to DIN 53454 measured using cubes measuring 10 mm)

100 : 50 parts weight approx.	69 N/mm <sup>2</sup>
100 : 80 parts weight approx.	45 N/mm <sup>2</sup>
100 : 100 parts weight approx.	16 N/mm <sup>2</sup>



*Příloha 11: Elektricky vytápěná horkovzdušná pec [72]*



*Příloha 12: Nanášecí kabina od firmy DATEL Ledec s.r.o. [73]*

