

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

TECHNICKÁ FAKULTA



KATEDRA TECHNOLOGICKÝCH ZAŘÍZENÍ STAVEB

**Disertační práce**

VLIV VSTUPNÍCH PARAMETRŮ NA PROCES ELEKTROSTATICKÉHO  
NANÁŠENÍ PLASTŮ VE VÝROBNÍM PROCESU

Doktorand:

ING. MICHAL NEŠKUDLA

Vedoucí práce:

DOC. ING. JAN MALAŤÁK, PH.D.

2023 ČZU v Praze

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma: „Vliv vstupních parametrů na proces elektrostatického nanášení plastů ve výrobním procesu“ vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním disertační práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje disertační práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom že, na moji disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

JMÉNO A PŘÍJMENÍ: Ing. Michal Neškudla

PODPIS:

DATUM:

# Poděkování

Rád bych poděkoval svému školiteli doc. Ing. Janu Malatřákovi, Ph.D., za odborné a vytrvalé vedení během celého studia a školiteli specialistovi doc. RNDr. Přemyslovi Jedličkovi, Ph.D. za pomoc s vypracováním této disertační práce.

Dále bych rád poděkoval svým rodičům za jejich celoživotní podporu, za kterou jsem jim nesmírně vděčný a moc si jí vážím.

Rovněž bych chtěl poděkovat i své přítelkyni, která mi byla při psaní disertační práce oporou a vždy podporovala můj zájem o vědu.

# Abstrakt

Hlavním cílem disertační práce je zhodnotit vliv parametrů při procesu elektrostatického nanášení plastů ve výrobním procesu. Práce je zaměřená na vliv jednotlivých parametrů různých technických zařízení, které jsou zapojeny v procesu elektrostatického nanášení práškové barvy. Postupně byly měněny hodnoty jednotlivých parametrů na konkrétních zařízeních s cílem zhodnotit jejich vliv na finálně nalakovaný dílec. Začátek procesu elektrostatického nanášení práškových plastů zajišťují zařízení na mechanickou a chemickou předúpravu, neboť správně předupravený dílec je velmi důležitý pro finální nanesení práškové barvy. Další částí procesu elektrostatického nanášení práškových plastů je samotné nanášení práškové vrstvy na ocelové dílce, které poté pokračují do vytvrzovací pece.

Pomocí mřížkové zkoušky, testu tloušťky vrstvy a estetického testu byly zhodnoceny jednotlivé výsledky u všech naměřených hodnot uvedených parametrů, které byly dále statisticky zpracovány pomocí tří statistických metod.

Výsledky ukázaly, že byly potvrzeny jednotlivé doporučené hodnoty sledovaných parametrů dob tryskání, odmašťování, sušení, oplachu, nanášení i vytvrzování. Stejně tak i teploty odmašťovací lázně, vzduchu v sušící a vytvrzovací peci. Kratší doba odmašťování 3 minuty s extrémem v nulové hodnotě vedla k výrazně horším výsledkům. Rovněž i nižší teplota odmašťovací lázně 25 °C potvrdila významnost chemické předúpravy. Stejně výrazně horší výsledky ukázala i kratší doba sušení 8 minut a nižší teplota vzduchu 60 °C. Kratší doba nanášení práškové barvy 7 sekund opět vykazovala nedostatečné výsledky hlavně v estetickém testu. Nedostatečnou kvalitu ukázaly i výsledky kratší doby vytvrzování 10 minut a nižší teplota na povrchu ocelového dílce 120 °C. Vyšší hodnoty parametru doby sušení 30 minut vykazaly stejné hodnoty, jako doporučovaná hodnota 15 minut a podobně to bylo i u delší doby oplachu 15 minut. Ve většině parametrů však nižší/vyšší hodnoty, než hodnoty doporučené výrobcem technologií vykazaly zhoršené výsledky jednotlivých testů.

**Klíčová slova:** mechanická předúprava, chemická předúprava, povrchová úprava, nanášení plastu, vytvrzování, mřížková zkouška

# Abstract

The main goal of the thesis is to evaluate the influence of parameters during the process of electrostatic application of plastics in the production process. The thesis is focused on the influence of individual parameters in various technical machineries that are involved in the process of electrostatic application of powder coating. The values of individual parameters on the specific devices were gradually changed in order to evaluate their influence on the painted part. The beginning of the powder coating process is ensured by equipment for mechanical and chemical pretreatment. Correctly pretreated part is crucial for the final application of powder coating. Further part of the powder coating process is the application of the powder layer on the steel parts, which then proceed to the curing oven.

With a help of grid method, Coating thickness and esthetic test individual results were evaluated for all measured values of the mentioned parameters, which were subsequently statistically evaluated using three statistical methods.

The results showed that the recommended values of the observed parameters of blasting, degreasing, drying, rinsing, application and curing times were confirmed. So are the temperatures of the degreasing bath and the air in the drying and curing oven. A shorter degreasing time of 3 minutes with an extreme value of zero led to significantly worse results. The lower temperature of the degreasing bath of 25 °C also confirmed the importance of chemical pretreatment. A shorter drying time of 8 minutes and a lower air temperature of 60 °C also showed significantly worse results. The shorter powder coating time of 7 seconds showed insufficient results again mainly in the aesthetic test. Insufficient quality was also shown by the results of a shorter curing time of 10 minutes and a lower surface temperature of 120 °C. Higher values of the drying time parameter of 30 minutes showed the same values as the recommended value of 15 minutes, and this was also the case with a longer rinsing time of 15 minutes. In the most parameters, lower/higher values compared to the recommended by producers showed worsened results of individual tests.

**Key words:** mechanical pretreatment, chemical pretreatment, surface treatment, powder coating, curing, grid method

# Obsah

Prohlášení .....	i
Poděkování .....	ii
Abstrakt .....	iii
Abstract .....	iv
Seznam obrázků .....	vii
Seznam tabulek .....	viii
Seznam zkratk a symbolů .....	x
1 Úvod .....	1
2 Přehled o současném stavu poznání .....	2
2.1 Historie .....	2
2.2 Práškové nátěrové hmoty .....	3
2.2.1 Charakteristika práškových plastů .....	3
2.2.2 Výhody práškových plastů .....	4
2.2.3 Výroba a složení práškových plastů .....	4
2.2.4 Druhy práškových plastů na základě vytvrzovacích vlastností .....	6
2.2.5 Druhy práškových plastů dle struktury povrchu .....	7
2.3 Předúprava .....	8
2.3.1 Mechanická předúprava .....	8
2.3.2 Chemická předúprava .....	9
2.4 Technologie nanášení plastů .....	14
2.4.1 Metody technologie nanášení plastů .....	14
2.4.2 Faktory optimálního nanášení práškových plastů .....	18
2.4.3 Technická zařízení k nanášení plastů stříkáním .....	20
2.5 Hodnocení kvality povrchů .....	26
2.5.1 Stanovení optimálního technologického postupu povrchové úpravy .....	26
2.5.2 Průběžná kontrola .....	27
3 Vědecké hypotézy a cíle práce .....	31
4 Materiály a metody .....	32
4.1 Materiál .....	34
4.2 Tryskací zařízení Optima New 12-22-Y-3/5,5 FM .....	34
4.3 Odmašťovací a oplachové zařízení .....	37
4.4 Sušící zařízení TKS 080.OTPCO .....	39
4.5 Zařízení pro nanášení práškové vrstvy .....	41
4.5.1 Aplikační zařízení OptiFlex 2B .....	41
4.5.2 Nanášecí kabina – MAJKA 1161-PDM .....	41
4.5.3 Prášková barva .....	44
4.6 Vytvrzovací pec – IDEAL-LINE .....	44
4.7 Ostatní zařízení .....	47
4.8 Vyhodnocování měření .....	48
4.8.1 Mřížková zkouška .....	48
4.8.2 Test tloušťky naměřené vrstvy práškové barvy. ....	50
4.8.3 Estetický test .....	51
4.9 Statistické vyhodnocení .....	51
4.9.1 Základní statistika .....	51
4.9.2 ANOVA .....	52
4.9.3 Multikriteriální analýza .....	53
5 Výsledky .....	55
5.1 Tryskací zařízení .....	55

5.1.1	Doba otryskání .....	56
5.1.2	Rychlost abraziva při otryskání .....	58
5.2	Odmašťovací zařízení .....	60
5.2.1	Doba odmašťování .....	60
5.2.2	Teplota odmašťovací lázně .....	63
5.2.3	Koncentrace odmašťovací lázně .....	65
5.3	Oplachové zařízení .....	67
5.3.1	Doba oplachu .....	67
5.4	Sušící pec .....	70
5.4.1	Doba sušení .....	70
5.4.2	Teplota vzduchu v sušícím zařízení .....	72
5.5	Kabina pro nanášení práškové vrstvy .....	74
5.5.1	Doba nanášení .....	74
5.5.2	Tlak vzduchu .....	77
5.5.3	Uzemnění .....	79
5.5.4	Nabíjecí napětí v aplikačním zařízení .....	81
5.6	Vytvrzovací pec .....	83
5.6.1	Doba vytvrzování .....	83
5.6.2	Maximální teplota na povrchu ocelového dílce při vytvrzování .....	85
5.7	Diskuse .....	90
6	Závěry a doporučení pro využití poznatků v praxi nebo další rozvoj oboru .....	92
7	Seznam použité literatury .....	100

## Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Vzorník barev RAL .....	5
Obrázek 2.2: Tryskací zařízení.....	9
Obrázek 2.3: Chemická předúprava .....	10
Obrázek 2.4: Schéma zapojení korona .....	17
Obrázek 2.5: Schéma zapojení tribo .....	18
Obrázek 2.6: Stříkací kabina .....	21
Obrázek 2.7: Vytvrzovací pec .....	26
Obrázek 2.8: Mřížková metoda .....	29
Obrázek 4.1: Schéma procesu elektrostatického nanášení plastů .....	32
Obrázek 4.2: Schéma systému měření .....	33
Obrázek 4.3: Ocelové dílce EN 10219 .....	34
Obrázek 4.4: Tryskací stroj Optima New.....	35
Obrázek 4.5: Odmašťovací a oplachové zařízení.....	37
Obrázek 4.6: Sušící pec TKS 080.OTPCO .....	40
Obrázek 4.7: Stříkací kabina MAJKA 1161-PDM .....	42
Obrázek 4.8: Vytvrzovací pec Ideal-Line .....	45
Obrázek 4.9: Systém měření teploty .....	46
Obrázek 4.10: Vyhodnocení mřížkové zkoušky .....	49
Obrázek 4.11: Provedení mřížkové zkoušky.....	50
Obrázek 4.12: Měření tloušťkoměrem eXacto F.....	50
Obrázek 5.1: Praktická ukázka rozmístění sond při měření.....	88
Obrázek 5.2: Průběh měření teploty uvnitř vytvrzovací pece při maximální teplotě na povrchu ocelového dílce 170 °C .....	88
Obrázek 5.3: Průběh měření teploty uvnitř vytvrzovací pece při maximální teplotě na povrchu ocelového dílce 120 °C .....	89
Obrázek 5.4: Průběh měření teploty uvnitř vytvrzovací pece při maximální teplotě na povrchu ocelového dílce 210 °C .....	89



## Seznam tabulek

Tabulka 4.1: Technická specifikace tryskacího stroje Optima New .....	36
Tabulka 4.2: Technická specifikace odmašťovací a oplachové linky TKS 025-15 .....	39
Tabulka 4.3: Technická specifikace sušící peci TKS 080.OTPCO.....	40
Tabulka 4.4: Technická specifikace aplikačního zařízení Optiflex 2B.....	43
Tabulka 4.5: Technická specifikace stříkací kabiny Majka 1161 – PDM.....	44
Tabulka 4.6: Technické specifikace vytvrzovací peci Ideal-Line.....	46
Tabulka 4.7: Technická specifikace dopravníku TYP 300-100.....	47
Tabulka 4.8: Technická specifikace sušičky vzduchu Artic 150 .....	47
Tabulka 4.9: Hodnocení výsledků estetického testu .....	51
Tabulka 4.10: Přepočet tloušťky vrstvy na body .....	54
Tabulka 5.1: Výsledky ideálních hodnot všech měřených parametrů.....	55
Tabulka 5.2: Výsledné parametry naměřených testů (MT, TV, ET) v závislosti na době tryskání .....	56
Tabulka 5.3: Výsledný parametr tloušťky vrstvy zpracovaný jednofaktorovou ANOVOU v závislosti na době tryskání .....	57
Tabulka 5.4: Výsledné parametry naměřených testů zpracované multikriteriální analýzou v závislosti na době tryskání .....	58
Tabulka 5.5: Výsledné parametry naměřených testů (MT, TV, ET) v závislosti na rychlosti abraziva při otryskání .....	58
Tabulka 5.6: Výsledný parametr tloušťky vrstvy zpracovaný jednofaktorovou ANOVOU v závislosti na rychlosti abraziva při otryskání .....	59
Tabulka 5.7: Výsledné parametry naměřených testů zpracované multikriteriální analýzou v závislosti na rychlosti abraziva při otryskání .....	60
Tabulka 5.8: Výsledné parametry naměřených testů (MT, TV, ET) v závislosti na době odmašťování.....	61
Tabulka 5.9: Výsledný parametr tloušťky vrstvy zpracovaný jednofaktorovou ANOVOU v závislosti na době odmašťování .....	62
Tabulka 5.10: Výsledné parametry naměřených testů zpracované multikriteriální analýzou v závislosti na době odmašťování .....	62
Tabulka 5.11: Výsledné parametry naměřených testů (MT, TV, ET) v závislosti na teplotě odmašťovací lázně.....	63
Tabulka 5.12: Výsledný parametr tloušťky vrstvy zpracovaný jednofaktorovou ANOVOU v závislosti na teplotě odmašťovací lázně .....	64
Tabulka 5.13: Výsledné parametry naměřených testů zpracované multikriteriální analýzou v závislosti na teplotě odmašťovací lázně .....	65
Tabulka 5.14: Výsledné parametry naměřených testů (MT, TV, ET) v závislosti na koncentraci odmašťovací lázně.....	65
Tabulka 5.15: Výsledný parametr tloušťky vrstvy zpracovaný jednofaktorovou ANOVOU v závislosti na koncentraci odmašťovací lázně .....	66
Tabulka 5.16: Výsledné parametry naměřených testů zpracované multikriteriální analýzou v závislosti na koncentraci odmašťovací lázně .....	67
Tabulka 5.17: Výsledné parametry naměřených testů (MT, TV, ET) v závislosti na době oplachu .....	68
Tabulka 5.18: Výsledný parametr tloušťky vrstvy zpracovaný jednofaktorovou ANOVOU v závislosti na době oplachu.....	69
Tabulka 5.19: Výsledné parametry naměřených testů zpracované multikriteriální analýzou v závislosti na době oplachu.....	69

Tabulka 5.20: Výsledné parametry naměřených testů (MT, TV, ET) v závislosti na době sušení .....	70
Tabulka 5.21: Výsledný parametr tloušťky vrstvy zpracovaný jednofaktorovou ANOVOU v závislosti na době sušení .....	71
Tabulka 5.22: Výsledné parametry naměřených testů zpracované multikriteriální analýzou v závislosti na době sušení .....	72
Tabulka 5.23: Výsledné parametry naměřených testů (MT, TV, ET) v závislosti na teplotě vzduchu .....	72
Tabulka 5.24: Výsledný parametr tloušťky vrstvy zpracovaný jednofaktorovou ANOVOU v závislosti na teplotě vzduchu.....	73
Tabulka 5.25: Výsledné parametry naměřených testů zpracované multikriteriální analýzou v závislosti na teplotě vzduchu.....	74
Tabulka 5.26: Výsledné parametry naměřených testů (MT, TV, ET) v závislosti na době nanášení.....	75
Tabulka 5.27: Výsledný parametr tloušťky vrstvy zpracovaný jednofaktorovou ANOVOU v závislosti na době nanášení .....	76
Tabulka 5.28: Výsledné parametry naměřených testů zpracované multikriteriální analýzou v závislosti na době nanášení .....	76
Tabulka 5.29: Výsledné parametry naměřených testů (MT, TV, ET) v závislosti na tlaku vzduchu .....	77
Tabulka 5.30: Výsledný parametr tloušťky vrstvy zpracovaný jednofaktorovou ANOVOU v závislosti na tlaku vzduchu .....	78
Tabulka 5.31: Výsledné parametry naměřených testů zpracované multikriteriální analýzou v závislosti na tlaku vzduchu .....	79
Tabulka 5.32: Výsledné parametry naměřených testů (MT, TV, ET) v závislosti na uzemnění .....	79
Tabulka 5.33: Výsledný parametr tloušťky vrstvy zpracovaný jednofaktorovou ANOVOU v závislosti na uzemnění .....	80
Tabulka 5.34: Výsledné parametry naměřených testů zpracované multikriteriální analýzou v závislosti na uzemnění .....	81
Tabulka 5.35: Výsledné parametry naměřených testů (MT, TV, ET) v závislosti na nabíjecím napětí .....	81
Tabulka 5.36: Výsledný parametr tloušťky vrstvy zpracovaný jednofaktorovou ANOVOU v závislosti na nabíjecím napětí.....	82
Tabulka 5.37: Výsledné parametry naměřených testů zpracované multikriteriální analýzou v závislosti na nabíjecím napětí.....	83
Tabulka 5.38: Výsledné parametry naměřených testů (MT, TV, ET) v závislosti na době vytvrzování.....	83
Tabulka 5.39: Výsledný parametr tloušťky vrstvy zpracovaný jednofaktorovou ANOVOU v závislosti na době vytvrzování .....	84
Tabulka 5.40: Výsledné parametry naměřených testů zpracované multikriteriální analýzou v závislosti na době vytvrzování .....	85
Tabulka 5.41: Výsledné parametry naměřených testů (MT, TV, ET) v závislosti na maximální teplotě na povrchu dílce .....	86
Tabulka 5.42: Výsledný parametr tloušťky vrstvy zpracovaný jednofaktorovou ANOVOU v závislosti na maximální teplotě na povrchu dílce .....	87
Tabulka 5.43: Výsledné parametry naměřených testů zpracované multikriteriální analýzou v závislosti na maximální teplotě na povrchu dílce .....	87

# Seznam zkratek a symbolů

%	procento
°C	stupeň Celsia
μm	mikrometr
ANOVA	analýza rozptylu
dm	decimetr
EP+PES	epoxy-polyestery
ET	estetický test
F	testová statistika
g	gram
H <sub>0</sub>	hypotéza
H <sub>1</sub>	alternativní hypotéza
hod	hodina
HV	tvrdost abraziva
Kč	koruna česká
kg	kilogram
ks	kus
kV	kilovolt
kW	kilowat
m	metr
max	maximum
min	minuta
min	minimum
mm	milimetr
MPa	megapascal
MT	mřížkový test
MZ	mřížková zkouška
MΩ	megaohm
N	Newton
Nm <sup>3</sup>	Normativní metr krychlový
PES	polyestery
pH	potential of Hydrogen
PTFE	přívodní kabel k sondám měření teploty
RAL	vzorník barev
s	sekunda
s.r.o.	společnost s ručením omezeným
S <sup>2</sup>	rozptyl
S230	označení abraziva
SO	směrodatná odchylka
SRN	Spolková republika Německo
SSE	vnitroskupinový součet čtverců
SSH	meziskupinový součet čtverců
TV	test tloušťky vrstvy
USA	Spojené státy americké
UV	ultrafialové
V	volt
VAC	Jmenovité vstupní napětí

# 1 Úvod

V současné době již téměř není oblast, kde by nebyly výsledky povrchové úpravy kovů formou elektrostatického nanášení plastů a zemědělství, jako takové, není výjimkou. Tato moderní a stále se rozšiřující metoda profituje ze svých specifíků, na které je v současném světě kladen velký důraz.

Technologie nanášení plastů má velkou budoucnost, neboť splňuje ta nejprísnejší kritéria pro ochranu životního prostředí a ochrany lidského zdraví, které se navíc postupem času zpřísňují. V posledních letech nabrala tato problematika extrémní důležitost. Efektivní způsob vytváření povlaků z práškových plastů navíc přináší i značné ekonomické úspory. Jednak ekonomickou výhodností, ale taky vyšší kvalitou a delším časovým obdobím, po které není třeba další úpravy. Z estetického hlediska je k dispozici prakticky nekonečně široká škála barevných odstínů s libovolnou strukturou povrchu. Při všech zmíněných výhodách vykazují práškové plasty stále dokonalejší vlastnosti.

K výslednému finálnímu povlaku, který bude splňovat veškeré technologické a vizuální požadavky, vede však náročná cesta. V celém technologickém procesu je řada fyzikálních parametrů, které do značné míry ovlivňují úroveň výsledné kvality povlaku včetně doby jeho životnosti.

Disertační práce je zaměřena na vliv jednotlivých parametrů u různých technických zařízeních, které jsou zapojeny v procesu elektrostatického nanášení práškové barvy. Postupně byly měněny hodnoty jednotlivých parametrů s cílem zhodnotit jejich vliv na finálně nalakovaný dílec. Začátek procesu zajišťují zařízení na mechanickou a chemickou předúpravu, neboť správně předupravený dílec je velmi důležitý pro finální nanesení práškové barvy. Další částí procesu je samotné nanášení práškové vrstvy na ocelové dílce, které poté pokračují do vytvrzovací pece. Pomocí tří testů byly zhodnoceny jednotlivé výsledky u všech naměřených hodnot uvedených parametrů, které byly dále statisticky zpracovány pomocí tří statistických metod.

Tato práce je přínosná zejména svým komplexním pohledem na optimální nastavení fyzikálních parametrů ovlivňujících různé fáze technologického procesu vedoucího k dosažení ještě kvalitnějších práškových povlaků v poměru k ekonomickým nákladům. Nejen z hlediska estetického, ale zejména z hlediska kvality a maximálního prodloužení jejich životnosti v různých provozních podmínkách.

## 2 Přehled o současném stavu poznání

### 2.1 Historie

Od vzniku oceli, mosazi, či stříbra se lidé snažili zachovat co možná nejdéle jejich funkční vlastnosti. Hlavním smyslem byla ochrana nástroje před korozi a opotřebením. K ošetření nástrojů využívali v té době dostupný živočišný tuk případně včelí vosk. (Brun et al., 2010; Montemor, 2014) Postupně pak našly uplatnění i rostlinné oleje a různé druhy jílovitých materiálů. S nadsázkou by se dal tento způsob ochrany nástrojů považovat za primitivní úpravu povrchu kovů.

Mohutný rozmach nátěrových hmot odstartovala ve druhé polovině 18. století průmyslová revoluce. Technický pokrok se promítl prakticky do všech průmyslových odvětví. Konkurenceschopnost a snaha o estetickou stránku vedly na začátku 20. století k objevení řady nových barviv. Používané nátěrové hmoty však byly více či méně zatíženy poměrně vysokým obsahem těkavých látek v podobě nejrůznějších rozpouštědel a ředidel. Snaha omezit tyto nebezpečné nežádoucí frakce vedla k hledání nových možností povrchových úprav kovových materiálů. (Brun et al., 2010)

Na konci 40. let minulého století se objevily první zmínky o novém typu ekologické barvy ve formě prášku. Rozhodující však bylo, jakým způsobem tuto barvu aplikovat na daný povrch. V roce 1953 přišel s novým konceptem německý vědec Dr. Erwin Gemmer. (Tkadlec, 2019) Svoji převratnou technologii využití fluidního lože, ve kterém byla duroplastická prášková barva nanášena na kovový materiál pomocí žárového stříkání si nechal v témže roce i patentovat. Do této doby byly známy práškové barvy složené zejména z nylonu, měkčeného polyvinylchloridu, polyethylenu a chlorovaného polyethylenu. Duroplastická barva vykazovala až nečekaně výborné tepelně izolační vlastnosti. (Misev & van der Linde, 1998)

Nová technologie Dr. Gemmera však neměla dlouhého trvání. Příliš silná vrstva na povrchu (150–500  $\mu\text{m}$ ) vedla americké vědce v šedesátých letech minulého století k vývoji nové a současně mnohem lépe průmyslově využitelné technologii. (Misev & van der Linde, 1997) Na trh byl uveden firmou Sames převratný způsob aplikace práškové barvy využívající elektrostatického nabíjení částic pomocí nástřikových pistolí. Tento způsob aplikace umožňoval nově ošetřit povrch materiálu tenkým filmem při zachování požadovaných funkčních vlastností.

Nemalou měrou přispěly k rozvoji této technologie i kvalitnější a zároveň ekologičtější práškové barvy vhodné pro variabilní prostředí, povrchy i pro různé účely. Čtyři základní typy duroplastických práškových barev-epoxid, epoxi-polyester, polyester a polyuretan jsou používány dodnes. (Emady et al., 2015a) Moderní technologie povrchové úpravy pomocí práškových barev našla okamžitě uplatnění napříč různými odvětvími průmyslové výroby na celém světě. Jen v samotném Německu se koncem šedesátých let minulého století za pouhé 4 roky zvýšil počet práškových lakoven v zemi více než 10krát. Ale vývoj šel nezadržitelně dál. Nový impuls na poli práškového lakování přinesla 80. léta minulého století, kdy se vedle dostupnosti jednotlivých technických komponentů zvýšil i komfort spojený s výměnou jednotlivých odstínů barev. Jednoduchá obměna zásobníků a poměrně snadná údržba technických prostor zvýšila poptávku po nových technologiích. (Brun et al., 2010) Současně s tím se otevřel prostor pro využití neomezeného spektra barevných odstínů, struktur a efektů barev. Pozadu nezůstal ani vývoj práškových plastů z hlediska jejich funkčnosti. Dnes jsou na trhu vysoce tepelně odolné, nízkoteplotní, strukturní, voděodolné, antistatické, metalické, tenkovrstvé a další práškové barvy.

Práškové nanášení plastů je dnes moderní a vysoce účinnou formou povrchové úpravy kovů. Tato technologie v současnosti splňuje přísná kritéria kladená na ochranu životního prostředí. Její další vývoj má dnes z hlediska technického, ekologického i ekonomického budoucnost.

## **2.2 Práškové nátěrové hmoty**

### **2.2.1 Charakteristika práškových plastů**

Práškové barvy se řadí mezi průmyslové nátěrové hmoty. Svým složením a vlastnostmi se však blíží spíše plastům než běžným nátěrovým hmotám, a proto se v souvislosti s touto povrchovou úpravou hovoří spíše o práškových plastech. Jinak vžitý název KOMAXIT vznikl od takto označené vývojové řady barev společnosti Balakom a.s., která v 90. letech minulého století s práškovými barvami začínala. (Tulka, 2005)

Práškové plasty jsou jemně dispergované částice o velikosti od 10 do 500  $\mu\text{m}$  s obsahem syntetických pryskyřic, případně plnidel, polymerů, aditiv a pigmentů. Z fyzikálně – chemického hlediska se řadí mezi koloidní a disperzní látky s lineárním rozměrem částic. Před aplikací se dále již neředí ani nerozpouští v žádné tekutině. (Kreibich, n.d.; Poux et al., 1991)

Hlavní funkcí těchto povlaků je především bariérová ochrana před korozi a opotřebením, odolnost vůči teplotnímu nebo chemickému prostředí, antibakteriální ochrana, stanovený elektrický odpor či vodivost, stálé vlastnosti, voděodolný izolační povrch a další požadavky zejména ve stavebnictví, strojírenského a elektrotechnického průmyslu. (Kreibich, n.d.; Zastempowski & Bochat, 2020)

### **2.2.2 Výhody práškových plastů**

Povrchová úprava pomocí práškových plastů má ve srovnání s klasickými nátěrovými hmotami mnoho výhod. Tyto výhody pramení zejména ze způsobu aplikace ochranného povlaku. Jednoduchý proces nanášení a možnost (Selvan et al., 2019) provozu zvyšuje produktivitu práce až o 400 %, což v konečném důsledku vede k poklesu výrobních nákladů až na čtvrtinu. (Kreibich, n.d.) Kvalita plastových barev je významná nejen pro svoji ekonomickou stránku, ale má i svůj význam estetický, funkční a v neposlední řadě i ekologický. (Fedotov, 2011; Kreibich, n.d.)

### **2.2.3 Výroba a složení práškových plastů**

U tekutých nátěrových hmot dochází při výrobě ke smíchání jednotlivých složek v roztoku vody nebo rozpouštědla. Naproti tomu výroba práškových barev je založena na smísení jednotlivých složek barvy v tavenině. (Lothongkum et al., 2007)

Plastové nátěrové hmoty jsou tuhé látky v podobě velmi jemného prášku (10–500  $\mu\text{m}$ ). Jejich obsah je zpravidla tvořen převažující syntetickou pryskyřicí a dále pak plnidlem, pigmentem a dalšími pomocnými složkami pro snadnější rozliv a vytvrzování. (Moravcová et al., 2006; Tulka, 2005)

- **Syntetické pryskyřice**

Pryskyřice (lidově smola, smůla) je výměšek, který produkuje řada rostlin, zejména jehličnatých stromů a obsahující zejména uhlovodíky. Syntetické pryskyřice lze uplatnit jak u nátěrových hmot a lepidel, tak i jako pojiva kompozitních materiálů. (Cong & Fellner, n.d.) Kromě výše zmíněných přírodních pryskyřic existuje také celá řada pryskyřic syntetických. Ty jsou základní složkou barvy, která určuje fyzikálně-mechanické a chemické vlastnosti povlaku jinak také nazývanou filmtvornou látkou. V práškových barvách je zpravidla pojivem pryskyřice na bázi reaktoplastů jako jsou epoxidy, polyestery, polyuretany, nebo epoxi-polyestery. (Ágreda et al., 2012; Lukavský et al., 1993)

- **Plnidla**

Nedílnou složkou práškových barev jsou i plnidla plnicí funkci nastavovací přísady. Jejich úkolem je vytvořit barvu konzistentní. S jeho koncentrací v prášku se zvyšuje stupeň tvrdosti povrchu. Ve srovnání s pigmenty mají nižší hodnotu indexu lomu. (Kunaver et al., 2003)

- **Pigmenty**

Pigmenty dodávají nátěrovým hmotám barevný odstín. Jeho množství v práškové barvě má rovněž schopnost dokonale zakrýt původní povrch. Standardně jsou v Evropě práškové plasty vyráběny v široké škále barev dle mezinárodní stupnice RAL, která zahrnuje více jak 215 barevných odstínů s označením konkrétním typovým číslem. (*Pigmenty a Barviva*, n.d.)

- **Pomocné složky**

Pomocné složky tvoří zanedbatelnou součást práškových nátěrových hmot co do objemu, avšak co do významu mají velký vliv zejména na regulaci rozlivu a kvalitu vytvrzování.

Všechny uvedené segmenty práškových plastů jsou smíchány v různých poměrech a různém složení s cílem dosažení maximálního požadovaného funkčního efektu.

Barevný odstín dle ČSN EN ISO 3668 je udáván čtyřmístným číslem, kde první dvě číslice určují barevný tón a druhé dvě pak jejich odstín. Mezinárodní stupnice barevných odstínů RAL čítá více než 215 barev. (*Vzorník RAL, Barvy a Odstíny Dle Vzorkovnice RAL*, n.d.)

Obrázek 2.1: Vzorník barev RAL

1000	1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007
1011	1012	1013	1014	1015	1016	1017	1018
1019	1020	1021	1023	1024	1027	1028	1032
1033	1034	2000	2001	2002	2003	2004	2008
2009	2010	2011	2012	3000	3001	3002	3003
3004	3005	3007	3009	3011	3012	3013	3014
3015	3016	3017	3018	3020	3022	3027	3031
4001	4002	4003	4004	4005	4006	4007	4008
4009	5000	5001	5002	5003	5004	5005	5007
5008	5009	5010	5011	5012	5013	5014	5015
5017	5018	5019	5020	5021	5022	5023	5024
6000	6001	6002	6003	6004	6005	6006	6007
6008	6009	6010	6011	6012	6013	6014	6015
6016	6017	6018	6019	6020	6021	6022	6024
6025	6026	6027	6028	6029	6032	6033	6034
7000	7001	7001	7002	7003	7004	7005	7006
7008	7009	7010	7011	7012	7013	7015	7016
7021	7022	7023	7024	7026	7030	7031	7032
7033	7034	7035	7036	7037	7038	7039	7040
7042	7043	7044	8000	8001	8002	8003	8004
8007	8008	8011	8012	8014	8015	8016	8017
8019	8022	8023	8024	8025	8028	9001	9002
9003	9004	9005	9010	9011	9016	9017	9018

(*Vzorník Barev RAL*, n.d.)



## 2.2.4 Druhy práškových plastů na základě vytvrzovacích vlastností

S implementací mezinárodních pravidel do českého normalizačního systému došlo ke změně názvosloví v oblasti povrchových úprav. Stěžejní evropskou normou pro nátěrové hmoty je ČSN EN ISO 8044 (03 8001), dle které je možné dělit povrchovou úpravu hned do několika segmentů. (ČSN EN ISO 8044 (038001), 2016; Kubátová, 2000)

- **Termoplasty**

Jedná se o plasty, které se při vyšších teplotách mění na tvárnou až tekutou hmotu. Při následném ochlazení se vrací do tuhého skupenství. Tento proces lze přitom provádět opakovaně. Pro tuto jejich vlastnost jsou nazývány vratné plasty. Po vytvrzení je jejich tloušťka od 150 do 600  $\mu\text{m}$  v závislosti na způsobu nanášení práškových plastů. Na dnešním trhu mají již malé zastoupení.

- **Termosety**

Vzhledem k technologickému postupu jejich použití se jedná o pravý opak termoplastů. Po zahřátí termosetů proběhne uvnitř chemická reakce, vedoucí po následném vytvrzení k nevratným změnám na povrchu dílce. Z tohoto důvodu se jim také říká nevratné plasty.

Na rozdíl od termoplastů vykazují tyto práškové barvy řadu vynikajících technologických vlastností jako je vysoká kryvost (30–90  $\mu\text{m}$ ), nízká vytvrzovací teplota (130 °C až 180 °C) či dobré aplikační vlastnosti. Předností pro konečného spotřebitele je pak široká škála jejich barevných odstínů. Nízké provozní náklady a tím pádem i nižší cena je další neopominutelnou výhodou, díky které se termosety staly masivně používanou formou povrchové úpravy. (Ebewe, 2000)

- **Epoxidy (EP)**

Strukturu termosetického prášku tvoří pevné epoxidové pryskyřice, vybraná tvrdidla, pigmenty plniva a vhodná aditiva. Optimální tloušťka povlaků z práškových epoxidů je 60–90  $\mu\text{m}$ . Jejich výhodou je flexibilita podmínek při samotném vytvrzování. Při 130 °C je práškový povlak na epoxidové bázi u plechu o tloušťce 1 mm vytvrzen za 10 minut. Kromě toho vykazují epoxidové práškové barvy vynikající přilnavost, chemickou stabilitu a odolnost proti korozi. Díky těmto vlastnostem našel epoxid využití jako základový bariérový primer (základ pro vrchní laky) v antikorozních systémech. Na druhou stranu, pokud jsou vystaveny epoxidové plasty působení UV záření pozvolna ztrácejí lesk, křídovají a mění odstín. (Puig et al., 2014, 2015; Trabelsi et al., 2006)

- **Epoxi-polyestery (EP+PES)**

Epoxi-polyestery, jinak zvané též hybridy, jsou hojně využívané práškové plasty. Vhodné jsou zejména do interiéru. V konfrontaci s povětrnostními vlivy jsou odolnější než epoxidy, a tudíž našly své uplatnění i u povrchů krátkodobě vystavených povětrnostním vlivům. Naproti tomu jejich chemická odolnost je v porovnání s epoxidy nižší. Vytvrzovací teplota epoxi-polyesterových práškových plastů je od 140 °C. Čas potřebný pro správný rozliv a tloušťka výsledného povlaku jsou přibližně stejné jako u epoxidových barev. Předností těchto práškových plastů je vedle jejich příznivé ceny i široké spektrum možných barev, lesků, struktur povrchů či metalických úprav. V omezeném sortimentu barev je možné využití i tzv. tenkovrstvých epoxi-polyesterů, které spolehlivě kryjí již při tloušťce 30 µm. Epoxi-polyestery jsou používány při výrobě radiátorů, regálů, domácích spotřebičů, výpočetní techniky apod. (Kausar, 2020)

- **Polyestery (PES)**

Polyestery jsou práškové plasty vykazující vynikající odolnost vůči UV záření a povětrnostním vlivům. Jsou proto využívány zejména v exteriérech. Členění polyesterů na fasádní a průmyslové vychází z jejich používání v praxi.

Průmyslové polyesterové plasty jsou levnější formou práškových barev určených pro venkovní použití, avšak za cenu nižší trvanlivosti spojené s nestálostí barevného odstínu a lesku. Uplatnění nacházejí tyto plasty zejména při výrobě zemědělských strojů, osvětlení, kol, zahradního nábytku apod. (Cai et al., 2020; Hluchý & Haněk, 1998; Kozakiewicz et al., 2015; Mojtaba Mirabedini et al., 2002a)

## **2.2.5 Druhy práškových plastů dle struktury povrchu**

Z estetického hlediska lze dělit práškové barvy dle struktury jejich povrchu:

- Lesklá
- Matná
- Pololesklá
- Polomatná
- Strukturální
- Metalická
- Kladívková (Emady et al., 2015b; Kreibich, 2010)

## 2.3 Předúprava

Základem pro optimalizaci procesu práškového nanášení plastů, která vede ke splnění všech požadovaných vizuálních, mechanických i chemických vlastností konečného produktu je klíčová kvalitní předúprava. Povrchy určené k nanášení plastů jsou mnohdy vlivem předešlých technologických operací znečištěny různými emulzemi, oleji, mastnotami, okujemi, rzi, případně jsou záměrně ošetřeny antikorozií vrstvou. Pouze vhodně zvolená forma předúpravy zaručuje odstranění těchto nežádoucích nečistot z povrchu materiálu a současně vytvořená konverzní vrstva s výbornými adhezními a antikoroziími vlastnostmi je garancí dlouhé životnosti výrobku. Nedostatečná předúprava je příčinou nízké přilnavosti a brzkého podkorodování povlaku. Následná oprava těchto nežádoucích projevů je neproveditelná bez estetických změn na povrchu. Z hlediska principu provedení předúpravy lze volit mezi mechanickou nebo chemickou cestou. (Cong & Fellner, n.d.; Karaoglan & Ozden, 2021a; Mojtaba Mirabedini et al., 2002b)

### 2.3.1 Mechanická předúprava

Principem mechanické předúpravy je:

- Odstranění všech mechanických nečistot z výrobku, jakými jsou okuje, struska, rez apod., které jsou pozůstatkem předešlých technologických operací
- Zlepšení mechanických vlastností upravovaného materiálu
- Zvýšení korozní ochrany
- Zlepšení podmínek adheze (Blažek, 2009; Gururaj et al., 2011)

Mechanickou předúpravu obrobku lze provádět různými způsoby:

- **Broušení**

Broušení je forma mechanické předúpravy, při které se za pomoci brusného kotouče nebo brusného pásu odstraňují zbytky rzi, okují apod. Jedná se o mnohdy namáhavou předúpravu a je proto vhodná pro malé množství připravovaných dílců. (Mohyla, 2006; Podjuklová, 1994)

- **Tryskání**

Tryskání jinak zvané pískování je forma mechanické předúpravy založené na úpravě povrchu proudem jemných částic. (Blažek, 2009)

Tryskáním jsou z povrchu odstraněny veškeré nečistoty, staré vrstvy barvy a koroze. Touto předúpravou dochází na povrchu obrobku k plastické deformaci, při níž se zvyšuje povrchové napětí vedoucí k celkovému zpevnění ošetřovaného povrchu. (Klimeš, 2003; Podjuklová, 1994)

Příliš velké zdrsnění je vzhledem ke sníženému krytí barvou nežádoucí. Příznivým efektem tryskání je rovněž zvýšená adheze materiálu.

Před samotným tryskáním je třeba materiál očistit od nečistot a odmastit. Dle povahy materiálu a stupně jeho znečištění se volí vhodné abrazivo. V praxi je to nejčastěji kovový granulát o velikosti zrn od 0,4 do 0,8 mm, křemičitý písek, litinová drť, brusiva na bázi karbidu křemíku nebo umělého korundu, sekaný drát, balotina (skleněné kuličky) a dále speciální materiály jako jsou například plastické hmoty. (Mohyla, 2006; Podjuklová, 1994)

Tryskací zařízení mohou být v závislosti na nosném prostředí pneumatická, hydraulická nebo mechanická. Nejvíce v praxi využívaná jsou právě mechanická tryskací zařízení. Jejich výkon je závislý na druhu a velikosti zvoleného abraziva, velikosti a tlaku trysek, jejich úhlu nastavení a vzdálenosti od ošetřovaného povrchu. (Liberto, 2010)

Obrázek 2.2: Tryskací zařízení



(Tryskací Zařízení, n.d.)

### 2.3.2 Chemická předúprava

Smyslem chemické předúpravy je materiál zbavit všech nečistot, okují, rzi, olejů a emulzí z předchozích technologických procesů a současně povrch materiálu ošetřit antikoročním a adhezním povlakem.

Chemické konverzní povlaky jsou ve své podstatě nerozpustnou vrstvou anorganických krystalů na povrchu materiálu. Dochází k ní chemickou reakcí kovového povrchu s roztokem. V povlacích část kovu konvertuje na sloučeninu, která je více odolná korozi než samotný kov. Konverzní povlaky mají svůj význam i pro zvýšení adheze následných povrchových úprav. Jejich nespornou výhodou je rychlost a ekonomická nenáročnost procesu. (Barcova et al., 2006a; Kraus, 2000)

Chemická předúprava je volbou vhodného média ve vztahu k povaze materiálu mnohem složitější než ta mechanická. Ke vhodným metodám se zpravidla řadí odmaštění, moření, pasivace, fosfátování, eloxování a chromátování. Tyto formy chemické předúpravy jsou specifické pro různé druhy povrchů. (Barcova et al., 2006b; Withy et al., 2012)

Druhy chemické předúpravy dle způsobu jejího provedení:

- **Tunelové**

nejpoužívanější způsob, při kterém je materiál zavěšen na podvěsný dopravník, po kterém postupně prochází jednotlivými fázemi chemických i vodních oplachů pomocí trysek rozmístěných uvnitř tunelu.

- **Komorové**

používají se tam, kde jsou omezené prostory pro linku. Jedná se o automatickou kompaktní komoru, ve které jsou nainstalované rámy s postřikovými pistolemi. Ty za pohybu vykonávají chemický postřik dílců navezených do komory.

- **Ruční**

pomocí vysokotlakého stroje s ohřevem je dílec v komorovém prostoru ručně předupraven. Tento způsob je časově, ekonomicky i hygienicky náročný. Z těchto důvodů není již běžně v praxi využíván.

- **Ponorové**

slouží k předúpravě rozměrných, případně těžkých výrobků, u kterých nelze právě z těchto důvodů využít tunelové technologie. Výrobek je tak pomocí pojezdového jeřábu postupně spouštěn do jednotlivých ponorových lázní.

Obrázek 2.3: Chemická předúprava



(*Předúprava Povrchů, n.d.*)

## ➤ **Odmašťování**

Odmašťování je nejučinnější, a tudíž nepostradatelnou formou každé chemické předúpravy. Při tomto technologickém procesu jsou z povrchu dílce odstraněny veškeré mastnoty, soli, prach, případně jiné chemické nečistoty. Pro správný výběr vhodného odmašťovacího média je nezbytné akceptovat skladbu nečistot i podkladového materiálu. Nejvhodnějšími odmašťovacími látkami jsou činidla obsahující kyselé, neutrální nebo alkalické chemikálie. Ta jsou schopna odstranit z povrchu nejen mastný film, ale i známky koroze, okuje a případně i jiné oxidy. (Balijepalli et al., 2014; Korecký, 1947)

### **Způsoby odmašťování**

#### • **Odmašťování v emulzních roztocích**

Emulzní odmaštění je aplikovatelné na hrubé vrstvy mastnoty v kombinaci s případnými nečistotami. Emulze složená z organických rozpouštědel, emulzátorů, smáčedel, alkálií, inhibitorů a vody jsou nátěrem, postříkem případně ponorem aplikována na ošetřovaný povrch. Organickými rozpouštědly je uvolněna mastnota, která je následně vyplavena vodou.

Dopad této technologie na životní prostředí je značný, a proto je její další využití nežádoucí. (Lukavský et al., 1993)

#### • **Odmašťování v neutrálních roztocích**

Roztok vody a saponátu, jehož využití je u velkorozměrných předmětů, je dnes vzhledem k jeho vysoké pěnovitosti a ekologickým dopadům okrajovou technologií. (Lukavský et al., 1993)

#### • **Odmašťování v organických rozpouštědlech**

Tento hojně využívaný způsob odmašťování je aplikován tam, kde nelze použít alkalické chemikálie. Principem této předúpravy je rozpuštění a uvolnění mastnot v roztoku, který je následně regenerován destilací. Poté je nezbytné povrch odmastit benzínem případně chlorovanými uhlovodíky. Rozpouštědla zpravidla ropného původu nezpůsobují korozi a dokážou rozpustit i silné usazeniny. Nároky kladené na životní prostředí, bezpečnostní předpisy a schopnost regenerace jejich médií však tuto metodu upozadňují. (Mohyla, 2006)

#### • **Odmašťování v alkalických roztocích**

Principem této metody je emulgace a následná dispergace nečistot. Nečistoty rostlinného nebo živočišného původu procesem alkalického odmaštění zneutralizují a v podobě rozpustných mýdel se usazují na hladině zásobníků s roztokem. Nečistoty minerálního původu jako např. oleje, vazelíny či vosky emulgují při vyšší teplotě ve formě malých kapiček do roztoku odmašťovadla. (Mohyla, 2006; Podjuklová, 1994)

Nejčastěji používaným médiem je hydroxid sodný nebo uhličitan sodný ředěný smáčedly v koncentraci do 10 % účinné látky. Optimální provozní teplota se pohybuje mezi 40 až 70 °C dle daného média a doba expozice je 1–20 minut. K zamezení hydrolyzy mýdla je žádoucí vysoká alkalita odmašťovací lázně. Případné nežádoucí korozi lehkých a barevných kovů vyvolané vyšší alkalitou lze předejít přidáním křemičité složky do odmašťovací lázně. (Novák, 2005)

Účinnost technologie odmašťování v alkalických roztocích snižuje tvrdost vody, kterou lze upravovat fosfáty. Poslední fází odmašťování alkalickými chemikáliemi je doporučován oplach demineralizovanou vodou. Demi voda, jak se jí také jinak říká, by měla mít vodivost nižší než 50 µS a svou absencí příměsí solí zaručuje vyšší kvalitu zvolené předúpravy. (Badila et al., 2014; Bajat et al., 2010a; Berger et al., 2006; Dillard et al., 2006)

K dokonale odmaštěnému povrchu je vhodné do roztoku zakomponovat tenzidy. Tenzidy jsou povrchově aktivní látky, které snižují povrchové napětí rozpouštědel, čímž usnadňují rozpouštění a odstraňování nečistot. Vynikají vysokou smáčecí, pěnicí, emulgační a detergenční schopností. Dnes jsou řazeny mezi nejvíce používané tenzidy anionaktivní (Ve vodném prostředí mají záporný náboj) a neionogenní. (Nemají v molekule náboj, ve vodném prostředí tedy neionizují a rozpustnost ve vodě je dána přítomností hydrofilních skupin) (Feng et al., 2021)

- **Elektrolytické odmašťování**

Elektrolytické odmašťování je nejvhodnější předúpravou pro galvanické pokovování. Principem této metody je vylučování vodíku a alkalického kovu na katodě. Nejproduktivnější je katodicko-anodické odmašťování, při němž se nejdříve omašťuje na katodě a poté je kov přemístěn na anodu, kde dochází ke zlepšení jeho mechanických vlastností. (Mohyla, 2006)

### **Technická zařízení pro odmašťování**

- **Vanová**

Odmašťovaný materiál je umístěn jednotlivě či hromadně do ponorných košů, které jsou pomocí podvěsného jeřábu vkládány do odmašťovacích van. Mastnoty jsou z povrchu hladiny odsávány rámem s přepadem.

- **Postřiková**

Tryskami je odmašťovací látka nanášena na povrch materiálu. Tato technologie odmašťování je rychlejší než vanová a současně ji lze využít jak jednorázově, tak i pro průběžnou práci.

- **Komorová**

Materiál je pomocí pohyblivého roštu vsunut do komorového odmašťovacího stroje. Ten se následně uzavře a probíhá postřik odmašťovací látkou včetně následného oplachu. Tato technologie je vhodná pro značně znečištěný materiál, případně materiál tvarově složitý.

- **Bubnová**

Drobný materiál je posouván šnekovým dopravníkem, který je spolu s obrobky uvnitř bubnu ponořeného do odmašťovací lázně. Buben se otáčí a zajistí tak dokonalé odmaštění včetně následného oplachu a sušení všech ploch jednotlivých obrobků. (Korecký, 1947; Mohyla, 2006; Serec Corp., 1997)

- **Moření**

Moření je odstraňování oxidické vrstvy jako je rez či okuje z oceli, hliníku, zinku a jiných kovů chemickou cestou. Pomocí kyselin a louhů dochází k přeměně oxidů na rozpustné soli, které se následně odstraní z povrchu oplachem čistou vodou. Při moření se kromě odstranění nečistot částečně naleptá povrch kovu, což pozitivně přispívá ke zlepšení jeho adheze. Výsledný povrch je nepatrně drsný a má šedě ocelovou barvu. Pro materiály jako je měď, ocel nebo zinek jsou optimálními médii kyseliny. K moření povrchů z hliníku nebo zinku se využívá hydroxidů. Samotný proces trvá od několika sekund až minut v závislosti na míře znečištění, použitém mořidle a povaze ošetřovaného materiálu. Nevýhodou technologie moření je vnikání uvolněného vodíku a rozpustných solí do povrchu materiálu. Následný oplach sice zbaví povrch solí, ale vodík vstupuje do krystalické mřížky materiálu, kde se koncentruje a při následném procesu vypalování práškových plastů se může uvolňovat a zapříčinit tak předčasnou korozi materiálu. K odstranění tohoto nežádoucího efektu je vhodné v další fázi předúpravy provést pasivaci. (Blažek, 2009; Mohyla, 1995; Pérez et al., 2002; Scrinzi & Rossi, 2010)

- **Fosfátování**

Fosfátování je povrchová úprava kovových materiálů, jejímž výsledkem je vytvoření nevodivého, nerozpustného, adhezního a antikorozního povlaku, který je rovněž vhodným nosičem lubrikantů zamezujících valivému a vlečnému tření. Tato metoda povlakování patří mezi nejvyužívanější formy povrchových úprav nelegovaných ocelí a zinkových materiálů. (Kraus, 2000; Szélag & Chocholoušek, 2008)

Fosfátování je založeno na principu vylučování nerozpustných fosforečnanů kovů z vodných roztoků kyseliny fosforečné s alkalickými solemi s minimálně jedním kovovým kationtem



na povrch ošetřovaného materiálu. Do lázně se dále přidávají akcelerátory k usnadnění tvorby povlaku a látky zaručující stabilitu lázně a kompaktnost povlaku. (Narayanan, 2005)

#### ➤ **Eloxování**

Způsob povrchové úpravy hliníkových materiálů, jejímž výsledkem je ochranná vrstva oxidu hliníku. Umělých eloxováním se nejdříve otevrou póry na povrchu, které se následně v parní lázni uzavřou. Povlak dále již neoxiduje a chrání tak hliník před korozi. (Korecký, 1947)

#### ➤ **Chromátování**

Chromátování je proces chemické úpravy, při které se vytváří pasivační vrstva tvořená zejména dvojchromanem draselným. Povlak má funkci antikorozi a adhezní. Doba expozice je velmi krátká a pohybuje se řádově v desítkách sekund. Pasivační vrstva je bezbarvá případně je zbarvena do žluta až zelena. Tento způsob předúpravy je vhodný na pozinkované a zinkované materiály, kde chromátové sloučeniny vyloučené na povrchu chrání materiál před tzv. bílou rzí. (Korecký, 1947)

## **2.4 Technologie nanášení plastů**

Práškové plasty jako náhrada za klasické rozpouštědlové nátěrové hmoty se staly zejména svým šetrným přístupem k životnímu prostředí nejrozšířenější a pokrokovou formou povrchové úpravy zejména kovů. Povlaky z práškových plastů jsou levné, technologicky nenáročné, kvalitní, ekologické a nenáročné na předúpravu. Povlaky z plastů neplní pouze funkci estetickou a antikorozi. Dnes je na ně kladena celá řada požadovaných vlastností jako je ořezuvzdornost, barevná stálost, odolnost vůči vyšším teplotám, antibakteriálnost, definovaný elektrický odpor či vodivost, nesmáčivost povrchu, neměnnost i v extrémních podmínkách atmosféry, fasádní kvalita a řada dalších požadavků zejména strojírenského, elektrotechnického, spotřebního průmyslu a stavebnictví. (Carboneras et al., 2010; Kreibich, n.d.; Kreibich & Kudláček, 2014; Ulrich & Association for Finishing Processes of SME., 1993)

### **2.4.1 Metody technologie nanášení plastů**

Od vzniku práškových plastů si technologie jejich nanášení prošla svým vývojem:

- **Extruzní nanášení**

Tento způsob nanášení plastů využívá extruzi. Práškový plast se nejdříve zahřeje v extrudéru na požadovanou teplotu, při které se prášek roztaví na formovatelný plast. Ten je prostřednictvím šnekového závitu dopraven do zahříváné komory. Jejím smyslem je udržení teploty plastu. Jeho výstup z komory je koncipován tak, aby se zajistil potřebný rozliv na ošetřovaném materiálu. Kontinuální tloušťku vrstvy zaručí dopravník, na kterém je materiál umístěn. Stěžejní pro tuto metodu je zajištění identické rychlosti posunu dopravníku s materiálem spolu s rychlostí vytlačování plastu z ústí komory. Následně je materiál posouván dopravníkem mimo tepelný zdroj, čímž dochází k ochlazení a přilnutí plastu k povrchu. (Kreibich, n.d.; Latypov et al., 2012; Tilmatine et al., 2009)

Extruzní metoda nachází své využití při povlakování válcových ploch a drátů. U válcových ploch je profil ústí komory ve tvaru obdélníku. Vytlačovaný plast vytváří tenkou vrstvu podobnou plechu, která je nanášena na rotující válec. Po následném vychladnutí vrstva plastu přilne k povrchu válce. Při aplikaci extruzního nanášení práškových plastů na drát je profil ústí komory ve tvaru mezikruží. Jejím vnitřkem prochází drát. Plast je vytlačován prostorem v mezikruží stejnou rychlostí, s jakou vystupuje drát. (*Powder Coating. Plastic Coatings Limited*, n.d.; Tilmatine et al., 2009)

- **HVOF A HVOF**

Název této metody nanášení plastů je zkratkou anglického názvu High Velocity Oxygen Fuel a High Velocity Air Fuel. Principem této technologie je vznětový efekt při vysoké rychlosti média. Obě výše zmíněné metody se od sebe liší pouze typem paliva. U technologie HVOF je jím kyslík, naproti tomu u HVOF je palivem vzduch. U obou variant prochází médium pod vysokým tlakem a za vyšší teploty vyvolané vznícením komorou, která je zakončena zužující se tryskou zvyšující rychlost. Prášek může být přidán přímo do komory za vysokého tlaku, nebo až za výstí trysky při nižším tlaku. Zahřáté částice prášku dokáží na povrchu materiálu vytvořit silnou vrstvu povlaku. Při použití vzduchu je na rozdíl od kyslíku technologický proces účinný již při nižší teplotě. Výhodou této metody je nižší provozní teplota kompenzovaná vyšší kinetickou energií polymeru. (Baiaomonte et al., 2021; *HVOF High Velocity Air Fuel Thermal Spray Process*, n.d.; *HVOF High Velocity Oxygen Fuel Thermal Spray Process*, n.d.; *Powder Coating. Plastic Coatings Limited*, n.d.)

- **Elektrostatické nanášení**

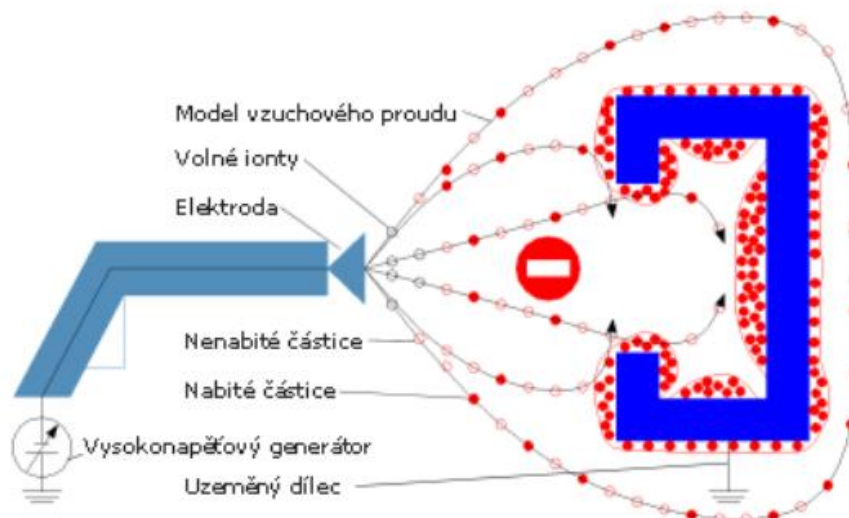
V dnešní době jsou prakticky všechny práškové plasty určené na kovy běžných rozměrů nanášeny nástřikem v elektrostatickém poli jinak zvaném KORONA. (Louati et al., 2021; Tulka, 2005)

Tato technologie nanášení práškových plastů využívá fyzikálního jevu, při kterém se v elektrostatickém poli opačně nabitě části přitahují. Mezi ošetřovaným materiálem a práškovým plastem dojde k nabití protikladnými náboji, čímž se záměrně vytvoří elektrické pole a prášek tak snadněji přilne k povrchu. Následně je ve vypalovací peci roztaven, aby vytvořil na povrchu souvislou vrstvu povlaku. (Karaoglan & Ozden, 2021b; Louati et al., 2021) Zdrojem elektrického napětí (40–100 kV) je tryskáč pistolí s tenkou elektrodou vysokého napětí, která způsobí ionizaci vzduchu případně plynu procházejícího pistolí. Volné ionty se přichytávají na prášek, který proudí tryskou pistolí a nabíjejí jej. Na povrch uzemněného materiálu jsou nanášeny záporně nabitě částice prášku, které zde ulpí a vytvoří tak na povrchu odpovídající vrstvu. (Prasad et al., 2016)

Cílem je maximalizovat počet nabitých částic prášku, což lze ovlivnit do značné míry kvalitní stříkáč pistolí. Nežádoucí volné ionty jsou menší a mnohem pohyblivější než částice prášku. Dorazí proto na uzemněný materiál rychleji a přenesou na něho záporný náboj, což vede v konečném důsledku ke špatnému rozlivu a zhoršení fyzikálních i chemických vlastností povlaku. Tento nežádoucí jev lze do značné míry ovlivnit snížením napětí. U složitějších tvarů materiálu může docházet k tzv. efektu Faradayovy klece. Tento negativní jev způsobuje, že se prášek díky elektrostatickým siločarám koncentruje na hranách prostorově složitěho výrobku než v místech s jeho menší hustotou, tj. v ohybech. Cirkulující vzduch pak volný prášek odnáší z míst ohybu pryč. Výsledkem je pak nestejná tloušťka vrstvy povlaku. Eliminovat se dá tento nežádoucí jev opět snížením napětí na stříkáč pistolí, případně zvětšením vzdálenosti mezi tryskou a materiálem. (Kreibich, n.d.; Lothongkum et al., 2007; Shah et al., 2006)

Jiným nežádoucím jevem je zpětná ionizace. Jedná se o jev, který se projeví na estetickém vzhledu povrchu připomínajícím drobné krátery vystupující z porušené vrstvy plastu označované jako „starring“, případně vzhled povrchu připomínajícího pomerančovou kůru označovaný jako „orange peel“. K tomuto negativnímu efektu dochází v případě, že je příliš velká vrstva prášku na povrchu materiálu. Při něm se zvětšuje síla elektrického pole. Vznikají kladné a záporné ionty. Kladné ionty se tak začnou pohybovat směrem k záporně nabitě elektrodě na stříkáč pistolí. Předějit tomuto efektu lze změnou velikosti napětí, případně použitím anti-ionizačních kroužků. (Barletta et al., 2007) (Karimi et al., 2021)

Obrázek 2.4: Schéma zapojení korona



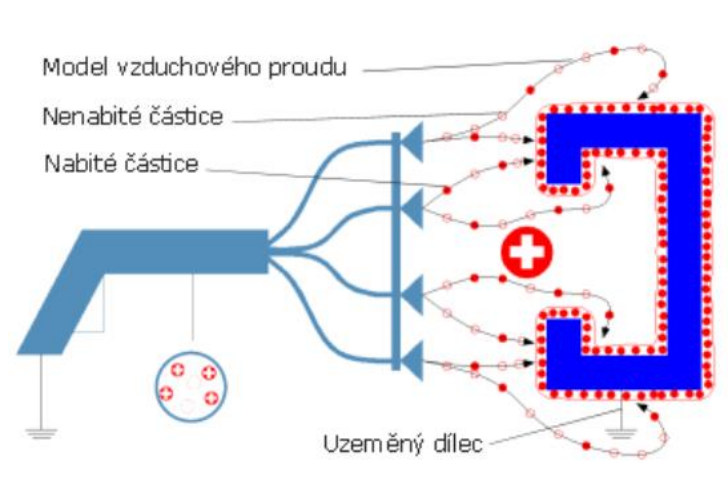
(Statická Elektřina a Povrchové Úpravy Plastů, n.d.)

- **Elektrokinetické nabíjení**

Zatímco technologie elektrostatičkého nabíjení částic barvy probíhá pomocí elektrody vysokého napětí, dochází u elektrokinetického nabíjení tzv. TRIBO k nabití částic vlivem třecí energie vyvolané v aplikační pistolí. (Dastoori et al., 2001; Nomura et al., 2003)

Do trysky stříkací pistolie je vysokou rychlostí vhnán vzduch. Částice prášku se třou o stěny pistolie a frikčně (tribostatically) se nabíjejí. Vnitřní povrch je nejčastěji z PTFE, který splňuje vlastnosti k dostatečnému tření a současně má tendenci být záporně nabitý. V prostoru mezi elektrokinetickou pistolí a povrchem materiálu se pohybují jednak kladně nabitě a současně nenabitě částice prášku. Optimalizovat poměr nabitých částic lze při této metodě regulací průtoku vzduchu a změnou koncentrace částic prášku v něm. Některé elektrokinetické pistolie jsou vybaveny mikroampérmetrem, který nepřímou udává hodnotu elektrického proudu a tím i účinnost nabíjení částic. V poslední fázi je prášek ve vytvrzovací peci roztaven. (Kreibich, n.d.; *Technologie - Technolak*, n.d.)

Obrázek 2.5: Schéma zapojení tribo



(*Statická Elektřina a Povrchové Úpravy Plastů*, n.d.)

## 2.4.2 Faktory optimálního nanášení práškových plastů

Dnes je prakticky veškerá povrchová úprava práškovými plasty aplikována metodou elektrostatického nanášení případně elektrokinetického nabíjení. Obě metody jsou nástřikové za využití stříkacích pistolí. Optimální rozliv, tloušťka vrstvy, požadované fyzikální i chemické vlastnosti povrchu a v neposlední řadě i estetické hledisko jsou ovlivněny celou řadou faktorů, které tyto technologie mnohdy zásadně ovlivňují. (Kreibich, n.d.; Kreibich & Kudláček, 2020)

- **Dodržování technologických postupů**

Základem úspěšného nanášení práškových plastů je používání k tomu určeného strojního zařízení s maximálním využitím jeho možností v souladu s návodem na používání a současně dodržování technických parametrů doporučených jejich výrobcem. Žádná případně nesprávně provedená údržba strojního zařízení může do značné míry nežádoucím způsobem ovlivnit proces nanášení plastů.

U práškových plastů je nezbytné před jejich aplikací prostudovat technický list, ve kterém jsou stanoveny nejvhodnější parametry pro jejich užití dané výrobcem. (Kreibich, n.d.)

- **Kvalita vzduchu v pracovním prostředí**

Vzduch v provozním prostředí do značné míry ovlivňuje rovnoměrné nanášení práškových plastů. Velký význam má ukazatel relativní vlhkosti prostředí zejména na povrch ošetřovaného materiálu. Ideální je udržovat její hodnotu po celou dobu mezi 40–50 %. Při nanášení dalších vrstev práškových plastů je pak zvýšená hodnota vlhkosti přímo nezbytná. (*Powder Coating. Plastic Coatings Limited*, n.d.; Prasad et al., 2016)

- **Kvalita práškového plastu**

Relativní vlhkost vzduchu ovlivňuje nejen rovnoměrný rozliv ale i kvalitu práškového plastu. Jeho vlhkost by neměla být vyšší než 0,4 % a teplota skelného přechodu by neměla klesnout pod 50 °C. Velikost zrn v prášku by se měla většinou pohybovat mezi 35–40 μm. Částic menších než 10 μm by nemělo být v prášku více jak 10 % a současně by ve směsi neměly být žádné velké částice. Opatrnost je z toho hlediska na místě v případě recyklace prášku, neboť opakovaně použitý plast má již odlišné vlastnosti ve srovnání s novým. (Kreibich, 2010; Kreibich & Kudláček, 2020)

- **Kvalita stlačeného vzduchu**

Do stříkacího zařízení se smí přivádět pouze suchý a čistý stlačený vzduch. V opačném případě dojde ke snížení účinnosti nabíjení a tím pádem i k nižší efektivnosti proudícího prášku směrem k povrchu materiálu. Případné nečistoty obsažené ve vzduchu se spolu s práškem přenášejí na nově vytvářený povlak a jsou příčinou jeho vzhledových vad. Stlačený vzduch nesmí obsahovat ani žádné další látky jako třeba olej či vodu. Jejich dovolená koncentrace je u vody maximálně 1,3 g.m<sup>-3</sup> a oleje 0,1 g.m<sup>-3</sup>. Optimální procesní teplota vzduchu je 3 °C. (Kreibich & Kudláček, 2020)

- **Uzemnění materiálu**

Při elektrostatickém nanášení plastů se na materiál přenáší prostřednictvím částic prášku velké množství záporného náboje. Při jeho nedostatečném uzemnění se na povrchu materiálu vytvoří přenesený záporný náboj, který odpuzuje záporně nabitě částice prášku. Tento nežádoucí efekt vede k tomu, že barva nepřilne k povrchu materiálu a její množství je nedostatečné. Pro bezpečný provoz je nezbytné uzemnění jak stříkací kabiny, tak i stříkacího zařízení. (Bajat et al., 2010b; Sedláček, 1992)

Při elektrokinetickém nabíjení se na ošetřovaný povrch přináší prášek s kladným nábojem. Pokud není materiál dostatečně uzemněn, vytváří se na povrchu silný kladný náboj, který následně odpuzuje kladně nabitě částice prášku. V důsledku toho dochází k vytvoření nedostatečné tloušťky povlaku. Nezbytnou podmínkou je dokonale uzemněná stříkací pistole. V praxi je často špatné uzemnění ošetřovaného materiálu zapříčiněno dostatečně neočištěnými závěsy na dopravníku. (Kreibich, n.d.)

- **Teplota a čas tepelného zpracování**

Vhodně zvolená teplota a čas tepelného zpracování je odvislá od tloušťky, tepelné vodivosti a tvaru materiálu. Nepřiměřená teplota vede k příliš nízké adhezi povlaku. Problém je rovněž

u povlaků větší tloušťky 10–20 mm. Podstatnou roli hraje také průběh nárůstu teploty vytvrzovaného povlaku. Nežádoucím efektem pak je nestejná kvalita povlaku. (Kreibich, n.d.; Prasad et al., 2016)

### **2.4.3 Technická zařízení k nanášení plastů stříkáním**

Technologie nanášení práškových plastů elektrostatickým případně elektrokinetickým nabíjením částic prášku vyžaduje k tomu určené technické vybavení. V dnešní době je často v praxi využívaná linka na povrchovou úpravu, jejíž součástí je i vhodně zvolená předúprava. Materiál je tak na samotném začátku zavěšen na podvěsný dopravník, díky kterému postupně prochází odmaštěním, oplachy včetně následného dokonalého osušení povrchu. Dopravník následně zaváží materiál do stříkací kabiny, kde je nanesen požadovaný povlak práškových plastů. Ze stříkací kabiny se materiál přesouvá do vytvrzovací pece, kde je povrchová úprava dokončena. Začátek i konec celého technologického cyklu počínaje navěšováním materiálu na dopravník až po svěšování povrchově upravených dílců je tak možné koncipovat v případě potřeby do jednoho výrobního prostoru. (Critchlow & Brewis, 1996; Jankura & Bacova, 2009; Liberto, 2010)

Základní součásti technického zařízení určené k elektrostatickému, případně elektrokinetickému nanášení práškových plastů:

- Stříkací kabina
- Aplikační zařízení
- Vytvrzovací pec

#### **➤ Stříkací kabina**

Stříkací kabina je prostor, ve kterém probíhá technologie nanášení práškových plastů. Její hlavní funkcí je dokonalé odsávání přestříků práškového polymeru, jejich zachycení ve filtrační části kabiny a současně recyklace prášku k opakovanému použití. Práškový plast, který neulpí na ošetřovaném povrchu je třeba z technologického prostoru odstranit, aby nenarušil kvalitu následujících povrchů. Práškové plasty lze téměř 100 % recyklovat. Z toho důvodu jsou stříkací kabiny vybaveny odlučovacími systémy, které zaručí jednak odsání nevyužitých částic prášku a současně jeho zpětné použití. (ČSN EN 16985 (824015), 2020; Girijappa et al., 2022; Kreibich, 1999)

Druhy stříkacích kabin dle obslužnosti:

- **Stříkací kabina s obsluhou mimo kabinu**

Tato varianta je aplikována ve většině běžných pracovišť s technologií nanášení práškových plastů za využití závěsného dopravníku. Obsluha stojí mimo prostor stříkací kabiny a je tak eliminována jejich expozice. (Girijappa et al., 2022; Kreibich, 1999)

- **Stříkací kabina bez obsluhy**

Tyto stříkací kabiny jsou osazeny stojany pro automatické stříkací zařízení umístěné mimo prsto kabiny. Tyto kabiny jsou vhodné zejména pro stálou povrchovou úpravu stejných, prostorově jednoduchých materiálů. (Kreibich, 1999; Liberto, 2010)

- **Stříkací kabina s obsluhou a částečnou automatizací**

V případě stříkací kabiny s částečnou obsluhou je zpravidla jedna profilově méně náročná strana zastoupena automatickým stříkacím zařízením, zatímco na druhé straně je klasická obsluha, která lépe vyhoví požadavkům prostorově složitějšího povrchu. (ČSN EN 16985 (824015), 2020; Kreibich, 1999)

Obrázek 2.6: Stříkací kabina



(Reference Práškové Lakování, n.d.)

➤ **Aplikační zařízení**

Aplikačním zařízením se rozumí zařízení určená k vlastnímu nanášení práškových plastů na povrch materiálu. Podle stupně automatizace provozu práškového povlakování je možné se v praxi setkat s ručním, automatizovaným a robotickým nanášením plastů. (Liberto, 2011; Vanamu & Sahoo, 2022)



- **Ruční aplikační zařízení**

Tento způsob aplikace práškových plastů je běžný v menších provozech. Obsluha stojící uvnitř případně vně stříkací kabiny pomocí aplikační pistole nanáší barvu na povrch materiálu. Stříkací zařízení je díky ručnímu ovládní přizpůsobivé i prostorově složitějším tvarům, které je lidský faktor schopen kvalitně a celoplošně zachytit. Pro ulehčení práce jsou voleny pro výrobu pistolí odlehčené materiály. Ovládní některých funkcí je možné přímo na rukojeti pistole. Kromě toho je k dispozici celá řada příslušenství, které umožňuje přidávat různé nástavce na trysky a jejich variabilitou tak měnit tvar a rychlost výstupu prášku. Pro jeho přesné cílení je praktické využití polohovadla, které splňuje vysoké ergonomické nároky na obsluhu. Výhodou je rovněž používání barvy přímo z krabice, případně ze zásobníku umístěného na pistolí. (Kreibich, 1999; Liberto, 2011)

- **Automatické aplikační zařízení**

Automatické aplikační zařízení je součástí stříkací kabiny, která bývá zpravidla vybavena manipulátory s dlouhým zdvihem, na které jsou ukotveny stříkací pistole. Množství těchto pistolí je závislé na velikosti ošetřovaného povrchu a je koncipováno tak, aby byl zaručen rozptyl prášku po celé ploše ošetřovaného povrchu. Nejčastěji bývá automatická pistole nastavena vodorovně, případně je ukotvena kloubem, což umožňuje libovolné natočení toku prášku. Pro neomezené směřování prášku se volí trysky s manipulačním kloubem. Automatizované zařízení je vhodné zejména pro materiály velkých rozměrů s menším sortimentem. (Girijappa et al., 2022; Kreibich, 1999; Liberto, 2011)

- **Robotické aplikační zařízení**

Robotické aplikační zařízení se nachází v provozech povrchových úprav složitějších dílů, případně při velkosériové výrobě jako je např. provoz lakování karosérií v automobilovém průmyslu. Robot disponuje celou škálou výhod jako je např. automatická změna pohybu při změně výrobku, nekomplikované polohování pistole, stoprocentní opakovatelnost lakovacího postupu, automatické čištění kabiny apod. Celý robotický proces je efektivnější a tím pádem i úspornější. (Girijappa et al., 2022; Kreibich, 1999; Liberto, 2011)

Technickými komponenty aplikačního zařízení jsou zpravidla stříkací pistole a řídicí jednotka.

## Stříkací pistole

Stříkací pistole je vlastním stříkací zařízením, kterým je prášek přiváděn na povrch materiálu. Právě na kvalitě aplikační pistole záleží, jak dokonalý povrch bude vytvořen. Hlavními faktory jsou optimální ergonomická konstrukce a dostatečně nabitý prášek vystupující v požadovaném množství a rychlosti z ústí nabíjecí trubice. Poměr množství prášku, který se zachytí na stříkaném materiálu a prášku, který zůstane v prostoru stříkací kabiny nevyužitý, udává účinnost nanášení plastů. V současné době nejvíce využívané způsoby aplikace práškových barev elektrostatickým a elektrokinetickým nanášením přinášejí do praxe stále se vyvíjející stříkací pistole vhodné pro corunu i tribo aplikace. (Elsevier, 1998; Iuga et al., 2015; Jing et al., 2022; Vančata, 2017)

Elektrostatická stříkací pistole: vzhledem k principu elektrostatického nanášení plastů se jedná o vzduchovou manuální pistolí s integrovanou vysokonapěťovou kaskádou pro aplikaci materiálů s nízkou vodivostí na organické bázi, což je v podstatě práškový plast. Při konstrukci pistole je kladem zvláštní důraz na absolutní těsnost všech součástí, bránící tvoreni nežádoucích svodových proudů. S kvalitou povlakování úzce souvisí rovněž nezbytná rovnoměrná doprava prášku a snadno čistitelné vnitřní prostory stříkací pistole. Optimální vnitřní uspořádání ejektoru s integrovanou ejektorovou tryskou dovoluje jednoduché čištění profouknutím. (Liberto, 2010; *Nová Technologie pro Nanášení Práškových Plastů*, 2001; Vanamu & Sahoo, 2022)

Elektrokinetická stříkací pistole: princip stříkání metodou tribo spočívá v přitahování nabitého prášku, který dosedá na uzemněnou plochu stříkaného materiálu. Za tím účelem mají pistole pro elektrokinetické stříkání delší základní trubici, kterou prášek při nabíjení prochází. Vzhledem k rychlému opotřebení vlivem tření je její vnitřní povrch osazen speciální nabíjecí vložkou, která je oboustranná a při včasném otočení se zvýší její životnost na dvojnásobek. S nižší koncentrací práškového plastu ve směsi se vzduchem, bude dosahováno jeho vyššího náboje. V praxi je ale žádoucí rychlost provedení povrchové úpravy a tím pádem je zapotřebí větší objem práškových plastů na výstupu z pistole. Mezi těmito protichůdnými faktory je nutné najít vhodně zvolený kompromis. Nezbytné je při nanášení tribo používat prášek, který se dobře nabíjí. Pro zvýšení účinnosti lze opatřit pistolí doplňkovým příslušenstvím jako jsou speciální trubice na stříkání vnitřního povrchu trubek různých délek a průměrů, případně různé rozprašovače určené například ke stříkání velkých ploch, trubkových konstrukcí, koutů, štěrbin mezi žebry a jiných těžko dostupných ploch. (Iuga et al., 2015; Pustiulha et al., 2020; Vančata, 2017)

## **Řídící jednotka**

Řídící jednotka je nedílnou součástí stříkací pistole u obou výše uvedených metod nanášení práškových plastů. Jejím úkolem je zajistit na základě volitelných parametrů optimální průběh a výsledný požadovaný efekt povrchové úpravy s ohledem na jednoduchost ovládání a docílení pokaždé opakovatelných výsledků práškování bez ohledu na typ plastu.

Množství prášku lze nastavit nezávisle na množství přiváděného vzduchu. Rozdělení ejektorového a přídavného vzduchu zajišťuje řídicí jednotka automaticky. Volbou vhodného aplikačního programu se automaticky nastaví napětí a proud na optimální hodnoty. Funkční poruchy zařízení jsou signalizovány pomocí diod na čelní ploše panelu řídicí jednotky. Při vypnutí zařízení se automaticky uloží všechna nastavení a mohou být následně opakovaně vyvolána. (Kreibich, 1999; *Nová Technologie pro Nanášení Práškových Plastů*, 2001)

Pojízdný stojan stříkacího zařízení je na své spodní části osazen šikmým vibračním stolem. Na něho je posazena původní krabice s práškovou barvou od výrobce. Do ní je vsunuta fluidní nasávací jednotka, která je rovněž pevně ukotvena ke stojanu. Její hlavní funkcí je prášek provzdušnit a zajistit jeho přísun prostřednictvím injektoru do stříkací pistole. Její přívod tvoří jednak práškový plast, dále stlačený vzduch přiváděný z kompresoru a vedený přes chladicí jednotku a regulátor tlaku a třetí zajistí přívod elektrické energie. V horní části stojanu je systémová jednotka, která umožňuje optimální řízení všech funkcí stříkacího zařízení. (Liberto, 2011; Ye & Domnick, 2003)

### **➤ Vytvrzovací pec**

Třetí ale neméně důležitou součástí vytváření povlaků z práškových plastů je proces vytvrzování. Nanesený práškový plast je na materiálu ve formě jemných krupiček. Ve vytvrzovací peci se prášek zahřátím roztaví a vytvoří tak celistvou homogenní vrstvu povlaku. Vlivem vyšší teploty dochází na povrchu materiálu k chemické reakci způsobující sesíťování polymerů. (*Powder Coating Ovens*, 2002)

#### **• Horkovzdušné pece**

Horkovzdušné pece jsou pro svoji univerzálnost, možnost vytvrzování všech typů práškových plastů a variabilitu tvarů materiálu nejčastěji využívaným způsobem vytvrzování práškových plastů. Topným médiem je buď plyn s přímým ohřevem, plyn s nepřímým ohřevem, elektrická energie, případně lehký topný olej. (*How Oven Conditions Affect Powder Coating Performance*, 2018; *Powder Coating Ovens*, 2002)

V praxi se nejčastěji zastoupeny plynové pece s přímým ohřevem, neboť náklady na jejich provoz jsou nejnižší. Pomocí plynového hořáku je do prostoru pece vháněn ohřátý vzduch, který zde cirkuluje a přenáší tak lineární teplotu na povrch materiálu. Velikost a množství hořáků je závislé na velikosti pece. Nevýhodou této metody vytvrzování jsou spaliny z hořáku, které zůstávají v prostoru pece a mohou tak zapříčinit sníženou kvalitu vytvrzeného povrchu.

Pec s nepřímým ohřevem je založena na principu výměníku tepla, kdy je hořákem umístěným mimo vytvrzovací pec ohříván vzduch vháněný do trubkového potrubí. Pomocí ventilátorů je zajištěna plynulá cirkulace ohřátého vzduchu uvnitř pece. Spaliny z hoření jsou tak mimo vytvrzovací proces, čímž je zajištěna čistota technologického prostředí. Vytvrzovací pece ohřívané prostřednictvím elektrické energie nebo lehkých topných olejů jsou využívány tam, kde je obtížné případně nemožné přivést plyn. (Liberto & Powder Coating Institute (Alexandria, 1994)

- **Infračervené pece**

U infračervených pecí není ohříván vzduch uvnitř pece, nýbrž samotný povrch materiálu. Touto bezplamennou technologií vzniká nežhavé teplo o nízké intenzitě. Tepelná energie o střední vlnové délce je tak účinně absorbována práškovými plasty. Celý proces vytvrzování je ve srovnání s horkovzdušnými pecemi rychlejší. Zdrojem infračerveného záření těchto pecí je buď elektrická energie nebo katalytický plyn.

Elektrické infračervené pece představují trubice, vyzařující infračervené záření. Jejich vysoká energetická náročnost a značné servisní náklady jsou důvodem, proč jsou dnes tyto pece na ústupu.

Infračervené katalytické pece fungují na principu redukce chemické oxidace. Vzduch potřebný pro reakci prochází povrchem ohříváče do míst reakce na plynovém rozhraní. Katalytický ohříváč je schopen při teplotě 482 °C převést 80 % přiváděného plynu na infračervené záření o vlnové délce 3,5 mikronů. Tato vlnová délka zaručuje, že všechny organické materiály efektivně absorbují toto záření za výrazného zvýšení jejich teploty. Vhodným katalyzátorem infračervených pecí je platina. Výhodou tohoto způsobu vytvrzování je rychlost spojená s nízkými provozními náklady, možnost regulace teploty a minimální prostorová náročnost. Nevhodné jsou tyto pece u složitě profilovaných materiálů, případně povlakovaných dutin, kam obtížně infračervené záření pronikne a může tak docházet k nedostatečnému vytvrzení povlaku. (*How Oven Conditions Affect Powder Coating Performance*, 2018; *Powder Coating Ovens*, 2002)

Obrázek 2.7: Vytvrzovací pec



(Průběžná Lakovací Linka, n.d.)

## 2.5 Hodnocení kvality povrchů

Příprava povlaků ocelových výrobků sestává z několika fází technologického procesu povrchové úpravy. Zanedbání jediného z nich vede ve svém důsledku k degradaci výsledného efektu celé povrchové úpravy. Je proto nezbytné pro zajištění kvality povlaku vnímat jednotlivé technologické fáze jako soubor vlivů působících ať už pod, uvnitř nebo na povrchu povlaku. (Sedláček, n.d.; Svobodová & Kuśmierczak, 2013)

### 2.5.1 Stanovení optimálního technologického postupu povrchové úpravy

Po specifikaci všech nezbytných technických vlastností materiálu a vyhodnocení kvality jeho povrchu jak z mechanického, tak i chemického hlediska je nutné stanovit veškeré požadavky kladené zákazníkem na nový povrch, jakými jsou například elasticita, barevná stálost, pevnost, voděodolnost, životnost, vlastnosti antistatické, tepelně odolné, tenkovrstvé, izolační apod. Při tom je třeba brát v úvahu vnější prostředí, ve kterém bude materiál působit (klimatické podmínky, působení UV záření, mráz, vlhkost, chemické prostředí jak z hlediska korozního, tak z hlediska mechanického namáhání). Významným parametrem je rovněž estetická stránka s možností výběru v široké škále barev a ve struktuře povrchu-mat, lesk, struktura nebo metal. Výsledné ekonomické posouzení pak může hrát mnohdy významnou roli při konečném výběru. Po vyhodnocení všech kritérií je možné přistoupit ke stanovení optimálního technologického postupu vedoucího k dosažení výsledného efektu. Tato fáze je stěžejní a je proto žádoucí, aby byl odborně kvalifikovanou osobou důkladně zpracován technologický postup od stanovení

optimální předúpravy, přes vhodně zvolenou metodu aplikace plastů včetně správné volby adekvátní práškové barvy až k následnému optimálnímu vytvrzení povlaku s přesnou specifikací všech technických parametrů procesu. (Sedláček, n.d.; Svobodová & Kuśmierczak, 2013)

## 2.5.2 Průběžná kontrola

Po celou dobu procesu povrchové úpravy práškovými plasty je třeba průběžně dohlížet na kvalitu a dodržování postupů tak, jak byly stanoveny technologem na svém začátku. Jedná se zejména o:

- **Kontrola předúpravy**

Vhodně zvolená předúprava by měla vést k dosažení maximální čistoty povrchu materiálu před jeho vlastním povlakováním. Důležitá je proto kontrola kvality mechanické předúpravy i důkladného odmaštění po celé ploše povrchu, kontrola teploty a doby expozice chemické předúpravy včetně potřebného počtu následných oplachů a neméně důležitá je rovněž kontrola teploty v sušící peci, tak aby byl materiál řádně osušený, a přitom nedošlo k jeho nežádoucí tepelné akumulaci. (Mindoš & Geiplová, n.d.; Svobodová & Kuśmierczak, 2013)

- **Kontrola mechanické předúpravy**

V praxi je nejčastěji používané tryskání jako forma mechanické předúpravy vhodná zejména pro následné nanášení práškovými plasty. Podstatnými parametry kontroly kvality při tryskání jsou stupeň čistoty a drsnost povrchu po jeho provedení. Na těchto ukazatelích závisí adheze následného povlaku. Obecně platí, že čím je povrch materiálu drsnější, tím vyšší bude stupeň přilnavosti. Na druhou stranu příliš velká drsnost povrchu vyvolá vyšší spotřebu práškového plastu k docílení potřebného celistvého povlaku a v konečném důsledku tak vede ke zvýšení nákladů spojených s povrchovou úpravou. Optimální hodnoty obou sledovaných parametrů jsou uváděny v doporučeních výrobců práškových plastů, případně v příslušných normách jako např. ČSN EN ISO 21920-3 zabývající se strukturou povrchu nebo norma ČSN EN ISO 8501-3, která stanovuje 3 stupně přípravy svárů, hran a ploch nezbytných ke kvalitní následné povrchové úpravě. (ČSN EN ISO 8501-3 (038221), 2008; ČSN EN ISO 21920-3 (014457), 2022; Sedláček, n.d.)

- **Kontrola chemické předúpravy**

V praxi je dnes běžná účinná a zároveň ekonomická forma sdružené chemické předúpravy povrchu. V jedné technologické operaci tak probíhá odmaštění povrchu a současně fosfátování. Požadavky na kvalitu výsledné vrstvy fosfátu vycházejí z normy ČSN EN ISO 9717.

- **Kontrola při aplikaci práškových plastů**

Aplikace práškovými barvami musí být provedena neprodleně po dokončení přípravy povrchu. Tloušťka nanesené vrstvy musí být aplikována v jedné operaci a její minimální hodnota by neměla klesnout pod 60  $\mu\text{m}$ . Maximální hodnota pak smí dosahovat až 120  $\mu\text{m}$ . Důsledná kontrola dostatečného uzemnění zamezí negativní reakci náboje předmětu na opačný náboj vysílaného prášku. Špatné uzemnění bývá často zapříčiněno nedostatečně očištěnými háčky a závěsy dopravníku. Výsledkem je pak příliš tenká tloušťka vrstvy povlaku. Účelné je provádění průběžné kontroly napětí na stříkacím zařízení, sledování teploty povrchu materiálu a provozní teploty, tlaku a kvality přiváděného vzduchu. Relativní vlhkost pracovního prostředí by se měla pohybovat mezi 45 až 50 %. Na druhou stranu vlhkost prášku musí být velmi nízká. Teplota skelného přechodu by neměla u práškových plastů klesnout pod 50 °C. Jeho částice mají mít přibližně stejnou velikost. Podíl menších částic v prášku smí tvořit maximálně 10 %. Vzhledem k této skutečnosti je obezřetnost na místě v případě recyklace práškového plastu. (Liberto, 2010; Mindoš & Geiplová, n.d.)

- **Kontrola vytvrzení**

Materiál s dostatečnou vrstvou naneseného prášku je přiveden do vytvrzovací pece. Teplota uvnitř musí být konstantní s minimálními odchylkami a v souladu s doporučením výrobce dané práškové barvy. Její hodnotu a čas vytvrzování v peci je třeba průběžně sledovat, a to přímým proměřováním teploty materiálu, nikoliv pouze z odečtů kontrolních teploměrů na peci. Nedostatečná výkonnost, energetický výpadek, případně nevhodný typ pece mají negativní dopad na výslednou kvalitu povrchu materiálu. Rozdílnost lesku, matu či drsnosti závisí na způsobu zavěšení a množství materiálu, které je v daný okamžik ve vytvrzovací peci. (Kreibich, n.d.; Mindoš & Geiplová, n.d.)

- **Tloušťka povlaku**

Tloušťka povlaku má vliv na celou řadu jeho vlastností např. korozní odolnost, životnost, paropropustnost apod. Tloušťka jednovrstvého povlaku se pohybuje mezi 50 až 150  $\mu\text{m}$  v závislosti na zvoleném práškovém plastu a jeho vlastnostech vyplývajících z daného technického listu. (Herrmann & Schiller, n.d.)

- **Adhezivita povlaku**

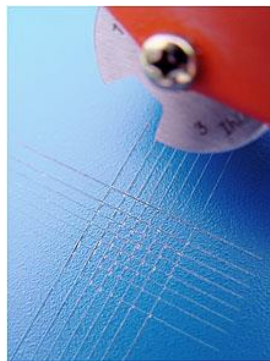
Přilnavost povlaku k podkladovému materiálu je významným faktorem pro zajištění životnosti a účinné ochrany. Ze všech technologických kroků povrchové úpravy adhezi nejvíce ovlivňuje vhodně zvolená a kvalitně provedená předúprava povrchu. Zbytky okují, nečistot, mastnoty případně starých špatně odstraněných povlaků mají za následek špatnou přilnavost nových povlaků. Ke stanovení míry adheze existuje v praxi celá řada metod. Nejpoužívanější je tzv. mřížková zkouška dle normy ČSN EN ISO 2409. (ČSN EN ISO 2409 (673085), 2021; Herrmann & Schiller, n.d.)

- **Mřížková metoda**

Tato metoda vyhodnocuje výsledky jako vyhovuje/nehovuje, případně jako šestistupňovou klasifikaci. Metodu mřížkové zkoušky lze aplikovat jak v laboratoři, tak i přímo ve výrobním provozu. Při vícevrstvých povlacích lze použít tuto metodu k vyhodnocení adheze jednotlivých vrstev. Nevýhodou metody je, že jí nelze aplikovat při tloušťce povlaku větší než 250  $\mu\text{m}$  a pro povlaky s texturou. (ČSN EN ISO 16276-2 (673202), 2008)

Smyslem této metody je vyřezat daným nástrojem do povlaku mřížku z pravoúhlých řezů. Řezy musí být provedeny kolmo v celé tloušťce povlaku až k podkladovému materiálu. Tlak na nástroj musí být proto dostatečně velký. Velikost vzorků musí být minimálně tak velká, aby bylo možné na něm provést alespoň 3 různá měření. V další fázi se místa řezu očistí kartáčem a přiloží se adhezivní páska. Ta musí přesahovat mřížku alespoň o 20 mm. Pro lepší soudržnost je třeba ji řádně na povrchu mřížky prstem uhladit. Výsledná kvalita nátěru se hodnotí podle stupně poškození povrchu po odtržení pásky na základě klasifikační tabulky. Přičemž páska má být odtržena tažením pod úhlem přibližně 60 ° za 0.5 až 1 sekundu do 5 minut po jejím přiložení na mřížku. (Chen et al., 2007; ČSN EN ISO 2409 (673085), 2021)

Obrázek 2.8: Mřížková metoda



(Mřížková Zkouška , n.d.)



- **Zkouška křížovým řezem**

Zkouška křížovým řezem je jinou metodou testu adheze povrchové úpravy materiálu. Jedná se jako v případě mřížkové zkoušky o způsob, při kterém se ostrým nástrojem vytvoří řez do povlaku. U této zkoušky se ovšem jedná o jednobřítý nástroj, a řez je veden ve tvaru X. Dle platné normy EN ISO 16276-2 je třeba, aby obě ramena řezu měla délku 40 mm a úhel, který spolu svírají byl mezi 30 až 45 °. Pro jednodušší zhotovení řezu je možné použít přípravek s měrkou. Lepicí páska shodných vlastností jako u zkoušky mřížkovou metodou se přilepí na místa řezu. Tentokrát se ovšem nechá 4–5 minut a teprve následně se odtrhne. Hodnocení zkoušky probíhá na základě šestistupňové klasifikační tabulky. (ČSN EN ISO 16276-2 (673202), 2008; ISO 2409:2013, 2013)

- **Odtrhová zkouška**

Odtrhovou zkouškou se stanovují parametry přilnavosti jednovrstvého, případně vícevrstvého povlaku měřením minimálního tažného napětí mezi nanesenou vrstvou a povrchem materiálu, případně mezi vrstvami povlaku. Pravidla pro správnou aplikaci této zkoušky stanovuje norma ČSN EN ISO 24624. Přístrojová sada se skládá z odtrhoměru, zkušebního tělíska a lepidla. Ve směru kolmém k podkladu je pomocí speciálního lepidla s vysokou viskozitou určeného k lepení kovů připevněno k povlaku zkušební tělísko vyrobené z nerezové oceli. Lepidlo dosahuje pevnosti v tahu 20 N.mm<sup>-2</sup>. Doba potřebná pro jeho plné vytvrzení je 24 hodin. Poté se ke zkušebnímu tělísku připevní odtrhoměr. Pomocí šroubovice v přístroji se plynulým otáčením po dobu 90 vteřin postupně začne zkušební tělísko odtrhovat od povlaku. Po úplném oddělení zafixuje digitální měřič maximální hodnotu síly uvedené v MPa potřebné k odtrhu. Hodnocení velikosti porušení povlaku po odtržení se vyjadřuje procentuálním podílem. Tyto testy jsou důležité při kontrolních zkouškách kvality povrchových úprav v různých oblastech průmyslu. (ČSN EN ISO 16276-1 (673202), 2008; “Zkoušky Povrchové Přídržnosti, Odtrhové Zkoušky Materiálů,” n.d.)

- **Optické vlastnosti povlaku**

Optické vlastnosti povlaků bývají spojovány s estetickou stránkou. Někdy však změnou barevného odstínu, zejména vlivem povětrnostních vlivů a UV zářením, dochází ke snížení nebo dokonce ztrátě ochranných vlastností povlaku. K optickým vlastnostem jsou řazeny hlavně vzhled, barva, lesk a textura. (Herrmann & Schiller, n.d.)

### 3 Vědecké hypotézy a cíle práce

Cílem této disertační práce je zhodnotit vliv vstupních parametrů na proces elektrostatického nanášení plastů ve výrobním procesu. Aby byl cíl splněn bylo nutné provést jednotlivá měření na úrovni sledovaných parametrů technických zařízení a jejich různých hodnot.

Dílčími cíli práce bylo posouzení vlivu doby otryskání, rychlosti abraziva při otryskání, doby odmašťování, teploty odmašťovací lázně, koncentrace odmašťovací lázně, doby oplachu, doby sušení, teploty vzduchu v sušící peci, doby nanášení práškové barvy, tlaku vzduchu v aplikačním zařízení, uzemnění dílců, nabíjecí napětí, doby vytvrzování a teploty na povrchu dílce při vytvrzování na kvalitu finálně nalakovaného ocelového dílce.

Po potvrzení dílčích cílů práce byly stanoveny vědecké hypotézy, přičemž všechny mají alternativní  $H_0$ , že daný předpoklad neplatí.

Hypotéza č. 1 ověří předpoklad, že nárůst rychlosti abraziva a prodloužení doby otryskávání je přímo úměrné kvalitě estetického vzhledu.

Hypotéza č. 2 ověří předpoklad, že kvalita přilnavost nanesené vrstvy k povrchu dílce je přímo závislá na rostoucí době a teplotě odmašťování.

Hypotéza č. 3 ověří předpoklad, že při elektrostatickém nanášení plastů je provedení odmaštění pro finální kvalitu povrchu ocelového dílce významnější než provedení sušení.

Hypotéza č. 4 ověří předpoklad, že při úspoře nákladů při nižší vypalovací teplotě na povrchu dílce zůstane zachována požadovaná kvalita nanesené vrstvy.

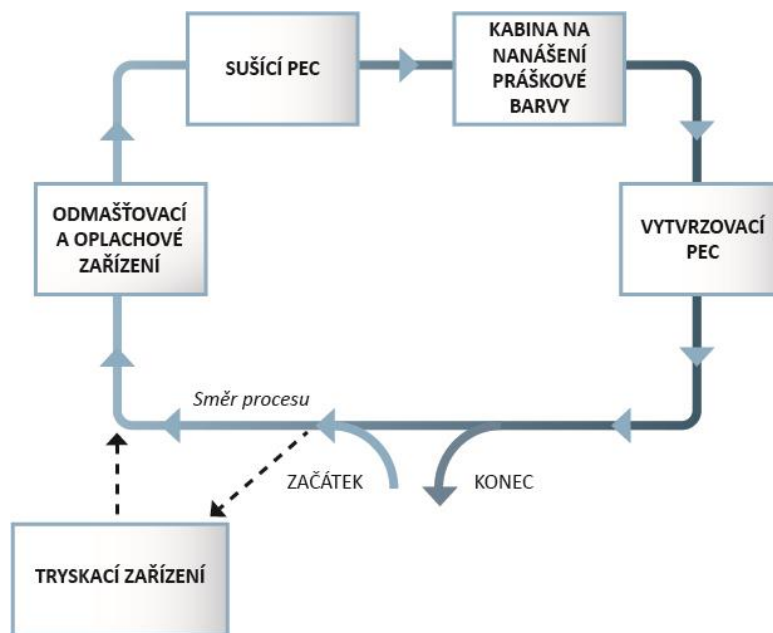
## 4 Materiály a metody

Pro experimentální měření, následné vyhodnocení a statistické zpracování naměřených hodnot byly využity níže uvedené technické stroje, měřicí přístroje, vybavení a software.

Technická zařízení jsou koncipována v rámci výrobního prostoru jako celistvá výrobní linka pro povrchovou úpravu. Měření probíhalo v Sobkovicích ve firmě Progressa s.r.o., Česká republika, která se specializuje na výrobu stavební mechanizace. Součástí provozu je i vlastní lakovací linka včetně nedílné součásti zařízení předúpravy.

Proces elektrostatického nanášení plastů obsahuje technické stroje počínaje mechanickou předúpravou, kterou představuje tryskácké zařízení. chemickou předúpravu zastupuje odmaštění, oplach a vysušení přes následné nanesení práškové vrstvy v nanášecí kabině a finálním vytvrzením v peci.

Obrázek 4.1: Schéma procesu elektrostatického nanášení plastů



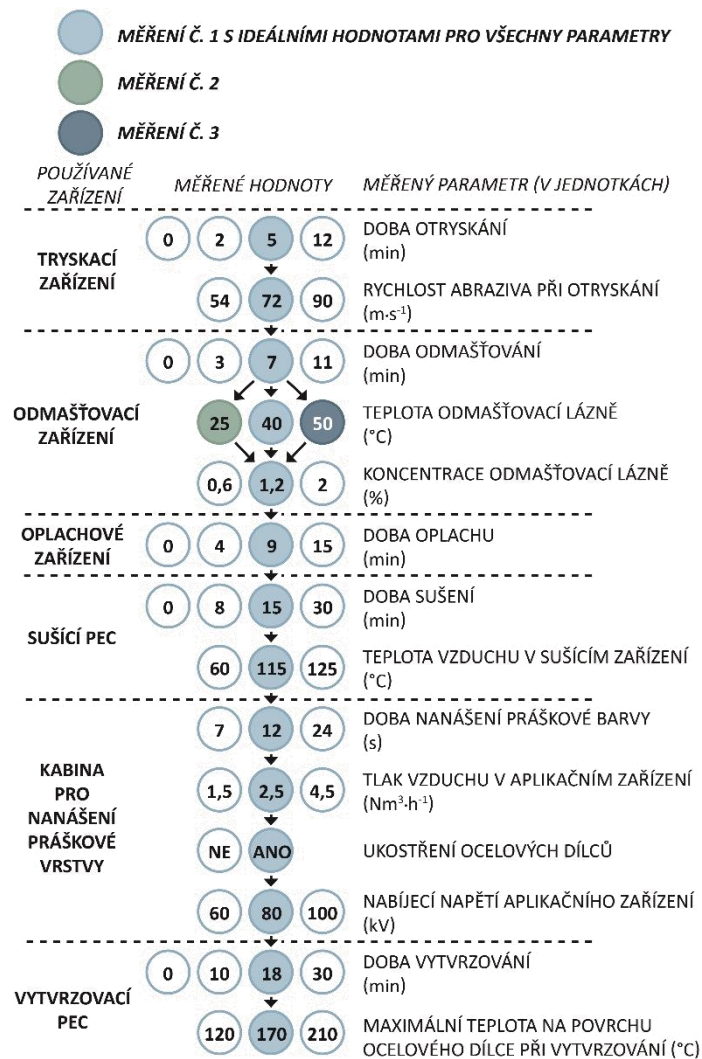
(Vlastní zpracování)

U každého zařízení byly stanoveny různé parametry (doba, teplota atd.), které ovlivňují finální kvalitu nalakovaného ocelového dílce. Následně byly v souladu s doporučeními výrobců jednotlivých zařízení a materiálů stanoveny ideální hodnoty jednotlivých parametrů. Dále byly stanoveny nižší, vyšší a případně nulové hodnoty těchto parametrů pro zjištění výsledného

efektu. Finální výsledky byly měřeny pomocí mřížkové zkoušky, estetického testu a testu tloušťky nanesené vrstvy a následně statisticky vyhodnoceny.

Struktura a organizace celkového měření představovala v prvním kroku měření všech doporučených parametrů u jednotlivých technických zařízeních, jak ukazuje obrázek č. 4.2. Následně byly zafixovány jednotlivé proměnlivé parametry všech strojů a vždy právě u jednoho parametru se změnila hodnota. Ostatní parametry zůstaly na svých výchozích hodnotách a byl proveden celý proces elektrostatického nanášení plastů v souladu s obrázkem č. 4.2. Takto se měření opakovalo pro všech 14 parametrů na jednotlivých technických zařízeních. Jednotlivé měření probíhaly vždy v sériích po 10 dílcích.

Obrázek 4.2: Schéma systému měření



Možných parametrů pro měření je na všech technických strojích více, nicméně pro účely této práce byly vybrány významné parametry s největším očekávaným vlivem na finální výsledek.

## 4.1 Materiál

Pro experimentální měření byly použity ocelové duté svařované profily EN 10219, zn. S235JRH (1.0039) dle EN 10219-1, TDP dle ČSN EN 10219-1. Tyto profily se šířkou 80 mm, hloubkou 40 mm a šířkou plechu 3 mm a hmotností  $5,343 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$  byly vyrobeny společností Třinecké Železářny a.s., Česká republika. Délka jednotlivých měřených dílců byla v průměru 300 mm.

Tento materiál je přednostně používán v zemědělských technických zařízeních a byl využit pro zjištění vlivu různých metod předúpravy na přilnavost prášku na konečný produkt z důvodu velkého uplatnitelnosti v praxi.

Obrázek 4.3: Ocelové dílce EN 10219



## 4.2 Tryskací zařízení Optima New 12-22-Y-3/5,5 FM

Mechanická předúprava je v tomto experimentu reprezentována pouze otryskáním. Tryskací stroj Optima New: typ 12-22-Y-3/5,5 FM, výrobní číslo F84/61-71, byl vyrobený v roce 2013 firmou OTECO CZ, spol. s r.o., Česká republika. Zařízení tryská abrazivo na měřené ocelové dílce zavěšené na rotujícím a pohybujícím se háku uvnitř tryskací kabiny. Abrazivo bylo tryskáno prostřednictvím metacích kol umístěných na boku stříkací kabiny ve třech vertikálních úrovních. Ve spodní části kabiny je rotační sběrný systém abraziva, který jej vrací přes čistící systém zpět do tryskacího cyklu. Jako abrazivo byl použit ocelový granulát s označením S230 dle ČSN EN ISO 11124-3, SAE J444. Jedná se o metalický tryskací prostředek z ocelového

šrotu s velikostí zrn dle frakce SAE J444 dle ČSN EN ISO 11124-2, tvrdost 390-530 HV s obsahem uhlíku 0,8–1,2 % a velikostí hlavní frakce 0,5–0,6 mm. Výrobce firma I.D.D. abrasive s.r.o., Česká republika.

Obrázek 4.4: Tryskací stroj Optima New



V prvním měření byl zkoumán vliv doby tryskání na kvalitu povrchu finálně nalakovaného dílce. Dle doporučení výrobce tryskacího zařízení je doba otryskání běžně tryskaných ocelových dílců 5 minut. Byly stanoveny další doby otryskání pro 3 měření, aby bylo zjištěno výsledného efektu. Záměrně byla zvolena i nulová hodnota doby tryskání, kde tato série dílců nebyla vůbec zařízením dotčena. Dále pak nižší a vyšší hodnota než doporučovaná. Konkrétně se jedná o 0, 2 a 15 minut. Doba otryskání se měřila od zavření vstupních dveří tryskacího zařízení po vypnutí funkce metacích kol.

Tryskané dílce byly zavedeny do kabiny najednou ve 3 označených sériích po 10 kusech. Po uplynutí příslušné doby otryskání bylo zařízení zastaveno a konkrétní série 10 dílců byla vyjmuta. Zařízení bylo poté znovu uvedeno do chodu a pokračovalo v otryskání, než bylo měření dokončeno.

Doby otryskání byly měřeny stopkami HS-80TW-1EF, Casio Computer Co., Ltd., Japonsko, které byly využity po dobu celého experimentálního měření na všech zařízeních a byly využity pro měření veškerých ostatních časových údajů.

Kromě doby tryskání je důležitým parametrem rychlost pohybu abraziva ve vnitřní části tryskacího stroje. Tentokrát byly 3 série po 10 dílcích do tryskacího zařízení umístěvány odděleně a po uplynutí standardní doby tryskání vyjmuty. Rychlost pohybu abraziva byla

nastavena na ovládacím panelu tryskacího stroje. Dle výrobce tryskacího zařízení je optimální rychlost  $72 \text{ m.s}^{-1}$ . Opět byly stanoveny další rychlosti pohybu abraziva pro měření, aby bylo zjištěno výsledného efektu. Záměrně tentokrát nebyla zvolena nulová hodnota, neboť by se jednalo o naprosto stejnou situaci jako při nulové době tryskání. Zvolena byla menší hodnota  $54 \text{ m.s}^{-1}$  a větší hodnota  $90 \text{ m.s}^{-1}$ .

Tabulka 4.1: Technická specifikace tryskacího stroje Optima New

<b>Provozní technické údaje</b>		<b>Provozní technické údaje</b>	
Instalovaný příkon	27 kW	Hustota korečků	$5 \text{ ks.m}^{-1}$
Spotřeba tlakového vzduchu	$30 \text{ m}^3.\text{hod}^{-1}$	Hmotnost	120 kg
Maximální rozměry tryskaných dílů	průměr 1200 x výška 2200 mm	<b>Čistička</b>	
Nosnost háku	500 kg	Provedení	sesypná
Počet metacích kol	3 ks	Objem	$100 \text{ dm}^3$
<b>Kabina</b>		Počet výpadů	3 ks
Vyložení kabiny	pryž + kov	Hmotnost se zásobníkem	210 kg
Uzavírání dveří	ruční – pákou	<b>Dávkovací ventil abraziva</b>	
Hmotnost	3 260 kg	Počet	3 ks
<b>Metací kola</b>		Provedení	elektrické – kyvné
Počet	3 ks	Typ pohonu	servomotor LUFBERG DA08F220
Typ	MK-OT 360	<b>Dráha</b>	
Průměr	360 mm	Typ	„Y“ s výhybkou
Počet lopatek	6 ks	Motor	1LA 7090-8AB12-0,37kW/8p – 2ks
Příkon motoru	3 x 5,5 kW	Pojezd vozíku – závěsu	ruční
Počet otáček	$49.\text{s}^{-1}$	Hmotnost	265 kg
Výstupní rychlost	optim. $72 \text{ m.s}^{-1}$	Ovládání točny dráhy	ruční ventil s pákou
Maximální kapacita	cca $100 \text{ kg.min}^{-1}$	<b>Rozvaděč</b>	
<b>Elevátor</b>		Typ	RM84
Příkon	1,5kW	Hmotnost	180 kg
Rychlost pásu	$1,3 \text{ m.s}^{-1}$		

Výsledné hodnoty byly zaznamenány do bloku, následně přepsány do programu Excel 365 od firmy Microsoft Ltd., USA a finálně statisticky zpracovány.

### 4.3 Odmašťovací a oplachové zařízení

Chemická předúprava je v měřeném experimentu tvořena odmaštěním, oplachem a osušením. Povrch měřených kovových dílců je již od výrobce záměrně opatřen olejovou vrstvou, která má za úkol chránit povrch dílů před vlivy prostředí. Odmašťovací a oplachová linka je konstrukčně spojena v jedno technické zařízení. I přes toto propojení se však ovládá separátně a z toho důvodu jsou v této práci posuzovány i příslušné parametry odděleně.

Odmašťovací a oplachová linka TKS 025-15 je vyrobena firmou H+V VMD Grygov spol. s r.o., Česká republika. Skládá se z jedné kabiny určené pro odmaštění a dvou oplachových kabin. Odmašťovací kabina je osazena 12 oplachovými rámy, z nichž každý má po svém obvodu 10 trysek. Z centrálního rozvaděče je pak uváděno do provozu čerpadlo kabiny. Spodní část linky tvoří polypropylenové vany, nad kterými jsou kabiny usazeny. Měřené dílce byly zavěšeny na háku podvěsného dopravníku.

Obrázek 4.5: Odmašťovací a oplachové zařízení



Aplikovaným médiem pro odmašťovací lázeň je kapalný výrobek na bázi kyselých fosforečnanů a směsi vysoce účinných povrchově aktivních látek s označením BONDERITE M-FE 3803 od firmy Henkel ČR, spol. s r.o., Česká republika. Tato látka účinně odmašťuje a čistí ocel a při správné aplikaci tvoří na oceli jedolitou vrstvu tvořenou fosforečnanem železitým o plošné měrné hmotnosti  $0,2-0,4 \text{ g.m}^{-2}$ . Skládá se převážně z kyselých fosfátů alkalických kovů, urychlovačů, neionogenních povrchově aktivních a hydrotropních látek.

Jako první parametr byl tentokrát zkoumán vliv doby odmašťování na kvalitu povrchu finálně nalakovaného dílce. Dle doporučení dodavatele odmašťovacího zařízení by doba odmašťování



ocelových dílců měla být 7 minut. Byly stanoveny další doby odmašťování pro 3 měření, aby bylo zjištěno výsledného efektu. Záměrně byla zvolena nulová, nižší a vyšší hodnota než doporučená. Konkrétně se jedná o 0, 3 a 11 minut. Nulová hodnota byla standardně odmaštěním nedotčena. 3 série dílců po 10 byly pomocí podvěsného dopravníku umístěny do odmašťovací kabiny, kde se následně spustil proces odmašťování zapnutím příslušného čerpadla. Doba odmašťování byla stopkami měřena mezi zapnutím a vypnutím čerpadla.

Kromě doby odmašťování je rovněž důležitým parametrem teplota odmašťovací lázně, kterou výrobce odmašťovací linky doporučuje 40 °C. Opět byly stanoveny další teploty odmašťovací lázně, aby bylo zjištěno výsledného efektu pro jednotlivé hodnoty. Nulová hodnota tentokrát nemá opodstatnění. Jako další hodnoty byly zvoleny nižší hodnota 25 °C a vyšší hodnota 50 °C. Opět proběhlo odmašťování dvou označených sérií dílců po 10 dílcích, které byly postupně umístěny do odmašťovací kabiny pro přesně stanovenou teplotu média. Měření teploty probíhalo pomocí integrovaného teploměru, který je nedílnou součástí odmašťovací linky.

Poslední parametr odmašťovací linky souvisel s koncentrací roztoku. Výchozí hodnota koncentrace doporučená výrobcem je 1,2 %. Dále byly standardně zvoleny nižší a vyšší koncentrace 0,6 % a 1,8 %. Chemickým procesem v destilované vodě byly připraveny roztoky Bonderite M-FE 3803 o koncentraci 0,6 % a 1,8 %. Pro optimální podmínky odmašťování je dle výrobce nutné udržet pH faktor v rozmezí 4,0–5,6. Pro měření byla zvolena optimální hodnota pH 4,6, což se korigovalo přidáním 10% roztoku hydroxidu sodného. Hodnota pH byla měřena přenosným ponorným přístrojem modelem HI 8314 od společnosti Hanna Instruments Czech s.ro., Česká republika.

## **Oplach**

Druhá a třetí kabina technického zařízení slouží k oplachům. V každé z nich je nainstalováno 8 oplachových rámců po 10 tryskách. Oplachovým médiem je studená voda, která během oplachu cirkuluje v jednotlivých kabinách. Při provozu je čistá voda dopouštěna a cirkuluje mezi kabinami.

Dle doporučení dodavatele oplachového zařízení by doba oplachu ocelových dílců měla být 9 minut. Opět byly stanoveny další doby oplachování pro 3 měření, aby bylo zjištěno výsledného efektu. Záměrně byla zvolena nulová, menší a větší hodnota než doporučená. Konkrétně se jedná o 0, 4 a 15 minut. Doba oplachu byla měřena na stopkách od zapnutí do vypnutí příslušných čerpadel.

Tabulka 4.2: Technická specifikace odmašťovací a oplachové linky TKS 025-15

<b>Provozní technické údaje</b>	
Vnější rozměr – šířka	1 800 mm
Vnější rozměr – výška	2 350 mm + podstavec 1 150 mm
Vnější rozměr – délka	15 000 mm
Vnitřní rozměr – šířka	1 700 mm
Vnitřní rozměr – výška	2 250 mm
Vnitřní rozměr – délka	15 000 mm
Maximální rychlost dopravníku	1,06 m.s <sup>-1</sup>
Elektrický příkon	8,34 kW
<b>Odmašťovací tunel</b>	
Délka	6 500 mm
Šířka	1 700 mm
Výška	2 350 mm + podstavec 1 150 mm
Počet oplachových rámců	12 ks
Počet oplachových trysek	120 ks
Typ čerpadla	A30PP/EPDM- 2,2 kW
<b>Oplachový tunel</b>	
Délka	4 250 mm
Šířka	1 700 mm
Výška	2 350 mm + podstave 1 150 mm
Počet oplachových rámců	8 ks
Počet oplachových trysek	80 ks
Typ čerpadla	GS -3-02-16 dm <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>

Výsledné hodnoty byly zaznamenány do excelu a finálně statisticky zpracovány.

#### 4.4 Sušící zařízení TKS 080.OTPCO

Poslední část chemické předúpravy je sušení. Sušící pec TKS 080.OTPCO od výrobce H+V VMD Grygov s.r.o., Česká republika z roku 1999 je vytápěna zemním plynem pomocí dvou nízkotlakých hořáků. Rozvod vzduchu pak zajišťují dva cirkulátory, ventilátor pak odstraňuje odpadní plyny. Řídící panel umístěný na peci umožňuje ovládání regulace teploty, odsávání a cirkulace vzduchu.

Obrázek 4.6: Sušící pec TKS 080.OTPCO



Dle doporučení dodavatele sušícího zařízení by doba sušení ocelových dílců měla být 15 minut. Byly stanoveny další doby sušení pro 3 měření, aby bylo zajištěno výsledného efektu. Záměrně byla zvolena nulová, nižší a vyšší hodnota než doporučovaná. Konkrétně se jedná o 0, 8 a 30 minut. 2 série ocelových dílců po 10 kusech byly příslušnou dobu sušeny, přičemž doba sušení byla měřena stopkami. Měření začalo vstupem prvního vzorku zavěšeného na dopravníku do vyhřívaného prostoru pece a následně končilo výstupem prvního vzorku z vyhřívaného prostoru pece.

Kromě doby sušení je důležitým parametrem ještě teplota vzduchu v sušící peci, která je výrobcem udávána 115 °C. Opět byly stanoveny další doby sušení pro měření, aby bylo zjištěno výsledného efektu. Nulová hodnota tentokrát nedává smysl a jako další hodnota byla zvolena nižší hodnota 60 °C a vyšší hodnota 125 °C. Opět proběhly 2 série sušení ocelových dílců, kde se teplota pro jednotlivé série měnila na ovládacím panelu sušící pece. Teplota se měřila integrovaným teploměrem v ovládacím panelu sušící pece.

Tabulka 4.3: Technická specifikace sušící pece TKS 080.OTPCO

<b>Provozní technické údaje</b>	
Vnější rozměr – šířka	1 710 mm + 500 mm hořáky
Vnější rozměr – výška	3 380 mm + podstavec 360 mm
Vnější rozměr – délka	8 000 mm
Vnitřní rozměr – šířka	1 200 mm
Vnitřní rozměr – výška	2 300 mm
Vnitřní rozměr – délka	8 000 mm
Elektrický příkon	9 kW
Maximální teplota	125 °C
<b>Ohřev</b>	
Topné médium	Zemní plyn
Tepelný výkon	2 x 40 kW

Výsledné hodnoty byly zaznamenány do excelu a finálně statisticky zpracovány.

## **4.5 Zařízení pro nanášení práškové vrstvy**

Samotné nanášení práškové vrstvy vykonávají dvě technické zařízení, které jsou obě nezbytnou součástí lakovacího cyklu. Jedná se o stříkací kabinu a samotné aplikační zařízení.

### **4.5.1 Aplikační zařízení OptiFlex 2B**

Pojízdná jednotka Opti Flex 2B vyrobená firmou ITW Gema, GmbH, Švýcarsko je elektrostatické ruční práškovací zařízení sestávající ze tří integrálních částí – práškovací lakovací pistole Opti Flex 2GM03, řídicí jednotky práškovací pistole Opti Flex 2CG09 a stojanu. V horní části stojanu je umístěna řídicí jednotka, v dolní části pak box s práškovým plastem.

Do ruční práškovací pistole Opti Flex 2GM03 vstupuje odděleně vzduch a práškový plast. Přívod prášku zajišťuje fluidní jednotka s injektorem instalovaná na výkyvném rameni stojanu. Vzduch je přiváděn z rozvodu stlačeného vzduchu přes regulátor tlaku. Regulace průtoku celkového vzduchu a profukovacího vzduchu je přímo na stříkací pistoli. Nastavení základních parametrů se provádí na řídicí jednotce.

### **4.5.2 Nanášecí kabina – MAJKA 1161-PDM**

Nanášení práškové barvy na před upravené ocelové dílce se provádělo v kabině MAJKA 1161-PDM od výrobce DATEL, s.r.o., Česká republika. Stříkací kabina slouží pro aplikaci technologie elektrostatického nanášení práškových plastů. Nanášecí kabina je určena pro dva pracovníky, kdy každý provádí aplikaci z jedné strany práškovací kabiny pomocí ruční pistole OptiFlex 2GM03. Součástí kabiny jsou dva mobilní filtrační moduly, které jsou osazeny šesti papírovými vložkami. Jejich čištění je za provozu prováděno automaticky rázy tlakového vzduchu se stanovenou četností. Prášek z filtrů spadá do sběrného žlábků umístěného pod filtračním modulem. Odsávacím ejektorem je pak zfluidizovaný (rozvířený vzdušným proudem) prášek vrácen zpět do aplikačního zařízení. V horní části kabiny jsou nainstalovány dva ventilátory pro zajištění dostatečného odsávání přestříků, aby prášek neunikal do okolí kabiny. Uvnitř kabiny je integrovaný odvod vzduchu o výkonu  $2,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Nedílnou součástí je

ovládací panel sloužící zejména k regulaci napětí, činnosti ventilátorů, tlaku vzduchu pro čištění filtrů a pro recyklaci prášku.

Na základě principu elektrostatického nanášení práškového plastu typu korona je záporně nabitý práškový plast nanášen na kladně nabitě ocelové dílce zavěšené na podvěsném dopravníku. Dílce jsou spojené s kastrou práškovací kabiny, respektive aplikačním zařízením Opti Flex2B. Již zfluidizovaný práškový plast přichází do lakovací pistole Opti Flex 2GM03 v předem nastavené koncentraci vzduchu. Záporně nabitá elektroda vytváří při ústí pistole magnetické pole. Průchodem prášku tímto polem se jednotlivé částičky prášku nabíjí záporným nábojem a při pohybu směrem ke kladně nabitým ocelovým dílcům se zachytávají na jejich povrchu.

Obrázek 4.7: Stříkací kabina MAJKA 1161-PDM



V této kapitole jsou popsána měření 4 parametrů ovlivňujících finální výsledek nanášení plastu. Dle doporučení dodavatele aplikačního zařízení by doba nanášení práškových plastů pro rozměry měřených vzorků měla být 12 sekund na jeden dílec. Tento čas byl stanoven vzhledem k jednoduchému profilu měřeného vzorku. Standardně byly stanoveny další doby pro aplikaci nanášení plastů pro 2 měření, aby bylo zjištěno výsledného efektu. Konkrétně se jedná o 7 sekund a 24 sekund. V tomto případě se ze zřejmých důvodů neuvažuje s nulovou hodnotou. Pro stanovení optimálního času nanášení obsluha lakovací linky vystavila ocelové dílce ve dvou sériích po 10 kusech stanovené době nanášení práškové barvy. Jednotlivé doby nanášení byly měřeny stopkami. Doba aplikace práškového plastu jedné série vzorků byla měřena z obou stran od okamžiku jejího spuštění do jejího ukončení. Výsledný součet časů – 120 sekund je celkovou dobou aplikace pro 10 vzorků. Optimální hodnota doby nanášení práškového plastu jednoho vzorku je proto stanovena na 12 sekund.

Kromě doby nanášení je důležitým parametrem ještě hodnota průtoku celkového vzduchu ve stříkací pistoli, který se dle výrobce aplikačního zařízení jako optimální uvádí  $2,5 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Opět byly stanoveny další parametry průtoku vzduchu pro měření, aby bylo zjištěno výsledného efektu. Byla zvolena nižší hodnota  $1,5 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  a vyšší hodnota  $4,5 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Tyto tři hodnoty průtoku celkového vzduchu se postupně pro každou sérii 10 vzorků nastavily na displeji řídicí jednotky.

Dalším významným měřeným parametrem, který vstupuje do procesu nanášení práškové barvy je odpovídající uzemnění (uzemnění) kovových dílců zavěšených na dopravníku lakovací linky. Tento parametr nabývá pouze dvou hodnot – ano/ne. Ukazatel uzemnění se měřil mezi kovovým dílcem a kostrou stříkací kabiny pomocí Ohmetru R-200 od firmy Voltraft s.r.o., Česká republika. Dle výrobce lakovacího zařízení je dostatečné uzemnění do hodnoty přechodového odporu  $1 \text{ M}\Omega$ .

Poslední parametr, který vstupuje do měření tohoto zařízení je nabíjecí napětí v aplikačním zařízení. Hodnoty napětí se nastavují na displeji řídicí jednotky. Pro optimální nanášení práškového plastu byla nastavena hodnota nabíjecího napětí 80 kV. Pro další měření byla stanovena nižší hodnota nabíjecího napětí 60 kV a vyšší hodnota 100 kV.

Výsledné hodnoty byly zaznamenány do tabulky a následně statisticky zpracovány.

Tabulka 4.4: Technická specifikace aplikačního zařízení Optiflex 2B

Provozní technické údaje		Injektor	
Šířka	460 mm	Délka hadice	6 m
Výška	1 105 mm	Průměr hadice pro prášek	10 mm
Hloubka	862 mm	Vstupní tlak	0,55 MPa
Hmotnost	42 kg	Průměr trysky dopravního vzduchu	1,6 mm
Jmenovité vstupní napětí	100-240 VAC	<b>Průtoková množství vzduchu</b>	
Jmenovité vstupní napětí k pistoli	10 V	Hodnota průtoku fluidizačního vzduchu	0-1,0 $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
Jmenovitý výstupní proud u pistole	Max. 1,2 A	Hodnota průtoku profukovacího vzduchu elektrod	0-3,0 $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
Rozsah teplot	0 °C až 40 °C	Hodnota průtoku celkového vzduchu	1,8-6,5 $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
<b>Pneumatické údaje</b>			
Maximální vstupní tlak	1 MPa		
Minimální vstupní tlak	0,6 MPa		
Maxim. Obsah vodní páry ve stlač. vzduchu	1,3 $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$		
Maximální spotřeba stlač. Vzduchu	8 $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$		

Tabulka 4.5: Technická specifikace stříkací kabiny Majka 1161 – PDM

<b>Provozní technické údaje</b>	
Šířka	840 mm
Výška	1 820 mm
Odsávané množství vzduchu	2 x 1,3 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>
Počet filtru v modulu	6 ks
Celková filtrační plocha modulu	47,52 m <sup>2</sup>
Výkon elektromotorů ventilátorů	2 x 4 kW
Spotřeba tlakového vzduchu	cca 35 Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>
Maximální množství vystř. prášku	20 kg.h <sup>-1</sup>
Maximální upravená plocha při účinnosti 50 %	cca 100 m <sup>2</sup> .h <sup>-1</sup>

### 4.5.3 Prášková barva

V průběhu celého experimentálního měření byl použit práškový plast TRBT FAST RED RAL 3000 od výrobce INVER, SPA, Itálie. Tento teplem tvrditelný prášek je na bázi epoxypolyesteru a obsahuje epoxidové a polyesterové pryskyřice. P/CL092 specifická hmotnost je v rozmezí 1,631–1698 kg.dcm<sup>-2</sup>, přičemž P/YC120 distribuce částic o velikosti menší než 63 mikrometrů je 74–91 %. P/CC050 lesk 60 ° 88–92 dle UNI EN ISO 2813:2001. Dle doporučení výrobce musí být upravovaný povrch očištěn od olejů, mastnot a rzi. Práškovou barvu je nutné skladovat za teplot nižších než 30 °C, přičemž vyšší teploty mohou prášek poškodit nežádoucími změnami a hrudkovatěním. Zbytky směsi je nutné odstranit jako nebezpečný odpad.

Výrobce barev doporučuje tuto konkrétní barvu ve vrstvách o tloušťce 60–80 mikrometrů.

## 4.6 Vytvrzovací pec – IDEAL-LINE

Vytvrzovací pec Ideal-Line od výrobce IDEAL-LINE, Faaborg, Dánsko je určena pro finální vytvrzení ocelových dílců po aplikování práškového plastu. Jedná se o pec vytápěnou zemním plynem pomocí přetlakového hořáku PZ 150 o výkonu 150 kW. Pohyb tepla v peci zajišťují 2 cirkulátory vzduchu. Pec vyhovuje svým vstupem i výstupem provozu podvěsného dopravníku při minimalizaci tepelných ztrát.

Obrázek 4.8: Vytvrzovací pec Ideal-Line



Dle doporučení dodavatele práškové barvy by doba vytvrzování běžně tryskaných ocelových dílců měla být 18 minut. Byly stanoveny další doby vytvrzování pro 2 měření, aby bylo zjištěno výsledného efektu. Záměrně byla zvolena nižší a vyšší hodnota než doporučovaná. Konkrétně se jedná o 10 a 30 minut. Opět byly 2 série 10 kusů ocelových dílců vytvrzeny specifickou dobu, která byla ohraničena vstupem a výstupem do/z vyhřívaného prostoru vytvrzovací pece. Doba byla měřena stopkami.

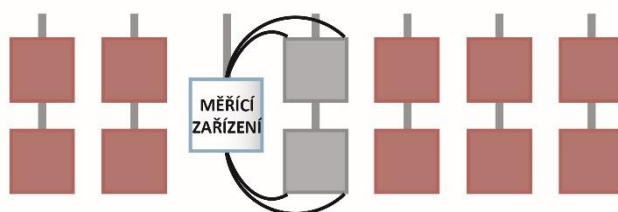
Poslední parametr, který byl měřen je maximální teplota na povrchu materiálu ve vytvrzovací peci, kde výrobcem barvy je doporučená přepočtená maximální teplota na povrchu dílce 170 °C. Nižší hodnota doporučené maximální teploty na povrchu dílce je 120 °C a vyšší hodnota doporučené maximální teploty na povrchu dílce je pak 210 °C.

Teplota vzduchu ve vytvrzovací peci byla regulována na ovládacím panelu pece, která obsahuje integrovaný teploměr. Teplota na povrchu ocelového dílce je však odlišná od teploty ve vytvrzovací peci a byla měřena teploměrem Easytrack 2 od společnosti Prominent spol. s r.o., Česká republika. Tento 4kanálový sběrač dat ET4041 váží 2,6 kg s výškou 111 mm, šířkou 74 mm a délkou 260 mm měří s přesností na 0,5 °C.

Teplotní měřicí zařízení Easytrack 2 byl obsluhou zařízení umístěn na volný závěs vedle dvou ocelových dílců zavěšených na jednom závěsu. Na těchto dvou dílcích nebyla z důvodu objektivního měření provedena aplikace práškové vrstvy. Po obou stranách tohoto měřícího setu byly na další závěsy vždy po dvou navěšeny dílce včetně aplikované práškové barvy dle obrázku č. 4.9.



Obrázek 4.9: Systém měření teploty



Dvě měřicí sondy MicroMag PA0973 s kabelem PTFE a teplotním rozpětí 0 až 265 °C byly použity pro měření teploty na povrchu jednotlivých dílců, přičemž druhá dvojice sond TQC sheen CX2073 sloužila pro měření teploty vypalovacího vzduchu na úrovni horní a dolní hrany zavěšených dílců.

Po celou dobu vypalovacího cyklu kontinuálně zaznamenával měřicí přístroj průběhy teplot v závislosti na čase. Po ukončení vypalování byly naměřené hodnoty přeneseny do počítače a vyhodnoceny pomocí programu Paqfile viewer od společnosti Prominent spol s r.o., Česká republika. 3 sady dílců po 10 kusech byly tak postupně vytvrzeny při různých teplotách vzduchu s příslušnými teplotami na povrchu.

Výsledkem posouzení vyhovujícího vypálení vrstvy práškového plastu pro daný zkušební vzorek a použitý práškový plast je veličina Datapaq, jejíž hodnota pro správně vypálený zkušební dílec musí být větší než 100.

Tabulka 4.6: Technické specifikace vytvrzovací peci Ideal-Line

<b>Provozní technické údaje</b>	
Vnější rozměr – výška	3 000 mm
Vnější rozměr – šířka	3 500 mm
Vnější rozměr – délka	9 000 mm
Vnitřní rozměr – výška	2 400 mm
Vnitřní rozměr – šířka	3 100 mm
Vnitřní rozměr – délka	8 800 mm
Izolace	200 mm
Maximální teplota	230 °C
<b>Ohřev</b>	
Počet výhřevných jednotek	1 ks
Celkový tepelný výkon	150 kW
Průměrný tepelný výkon	115 kW
Celkový motorový výkon	7,5 kW
<b>Odsávání</b>	
Odsávání	300 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>
Výkon motoru	0,5 kW

Výsledné hodnoty byly zaznamenány do tabulky a následně statisticky zpracovány.

## 4.7 Ostatní zařízení

### Dopravník IDEAL-LINE Typ 300-100

Podvěsný dopravník se dvěma napínacími stanicemi slouží k manipulaci s lakovanými díly v průběhu celého technologického procesu elektrostatického nanášení plastů včetně předúpravy.

Tabulka 4.7: Technická specifikace dopravníku TYP 300-100

Provozní technické údaje	
Délka dopravníku	100 m
Dělení řetězu	300 mm
Maximální tahová nosnost řetězu	2 800 kg
Počet pohonných stanic	1 ks
Rozsah rychlosti dopravníku	0,4 - 1,3 m.min <sup>-1</sup>
Účinnost motoru	0,37 kW
Maximální zatížení na metr	100 kg.m <sup>-1</sup>

### Šroubový kompresor renner RS 15-10

Šroubový kompresor Renner RS 15-10 od výrobce RENNER Kompressoren GmbH, Německo, slouží na výrobu stlačeného vzduchu pro ruční práškovací zařízení OptiFlex 2B, stříkací kabínu MAJKA a napínací jednotky dopravníku.

### Sušička vzduchu – Artic 150

Kondenzační sušička stlačeného vzduchu DONALDSON DC 0225 AB, typ 1119A od výrobce Donaldson Filtration Deutschland GmbH, Německo, je doplňkovým zařízením kompresoru určené k odvlhčení stlačeného vzduchu.

Tabulka 4.8: Technická specifikace sušičky vzduchu Artic 150

Provozní technické údaje		Provozní technické údaje	
Konečný přetlak	1,4 MPa	Výška	870 mm
Teplota na výstupu	2–70 °C	Šířka	480 mm
Výkon motoru	0,68 kW	Délka	660 mm
Napětí/frekvence	230 V.50 Hz <sup>-1</sup>	Hmotnost	68 kg
Pojistka	10:00 dop.	Průtok	3,75 m <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup>

## 4.8 Vyhodnocování měření

Pro reálné vyhodnocení experimentálního měření následuje přehled tří testů a zkoušek, pomocí kterých jsou výsledky interpretovány.

### 4.8.1 Mřížková zkouška

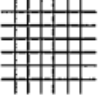
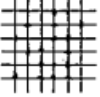
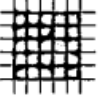

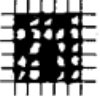
Výsledná kvalita finálního nanesení práškové vrstvy byla hodnocena mřížkovou zkouškou (mřížkový testem) podle příslušné normy ČSN EN ISO 2409, 2021. Jedná se o subjektivní metodu měření.

Mezi předpoklady testu patří rovné a nedeformované vzorky, kdy samotná zkouška se provádí při teplotě 23 °C (+2) a relativní vlhkosti 50 % (+5) po dobu nejméně 16 hodin. Pro barvy s tloušťkou nátěru 61 až 120 mikrometrů je předepsaná vzdálenost mezi řezy 2 mm a běžně se provede jedno stanovení.

Řezný nástroj je držen ostřím kolmo k povrchu zkušební vzorku. Tlakem na řezný nástroj s pomocí vhodné šablony je do nátěru rovnoměrnou rychlostí směrem ke zkoušejícímu provedeno šest řezů. Každý řez musí přesahovat oba z krajních řezů k němu kolmým alespoň o 1 mm, aby vznikly zřetelné průsečíky. Všechny řezy pak musím v podkladu zanechat stopu nebo vryp. Opakováním tohoto postupu se vytvoří šest dalších navzájem rovnoběžných řezů křížící původní řezy pod úhlem 90 °, takže vznikne mřížka. Následně je z oblastí řezů odstraněn např. štětcem či samolepící páskou veškerý uvolněný nátěr a může se přejít k vyhodnocení.

Vyhodnocení probíhá při dobrém osvětlení, kde se oblast řezu zkoušeného nátěru pozorně prohlédne okem, popřípadě lupou. Během prohlížení se vzorek otáčí tak, aby nebyl pozorován a osvětlen pouze z jednoho směru. Zkušební plocha se porovnáním s tabulkou č. 5.9 oklasifikuje na šestistupňové škále 0–6 bodů. (ČSN EN ISO 2409 (673085), 2021)

Obrázek 4.10: Vyhodnocení mřížkové zkoušky

Klasifikace	Popis	Vzhled povrchu plochy s mřížkou, na které se vyskytlo odlupování <sup>a</sup> (Příklad pro šest rovnoběžných řezů) <sup>a</sup>
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	Jakýkoli rozsah odloupení, který nelze klasifikovat ani stupněm 4.	-

<sup>a</sup> Obrázky znázorňují příklady mřížek v rámci jednotlivých klasifikačních stupňů. Uvedené procentuální podíly jsou založeny na vizuálním dojmu z obrázků a při digitálním zpracování obrazu nemusí být nutně dosaženy stejné podíly.

(ČSN EN ISO 2409 (673085), 2021)

45 minut po finálním vytvrzení byly postupně veškeré ocelové dílce podrobeny mřížkové zkoušce. Zkušební vzorky byly umístěny na pevný rovný povrch a autor práce ručně vždy provedl dva řezy předepsaným postupem vedoucí k finální mřížce. Řezy s vzdáleností jednotlivých řezů 2 mm byly provedeny pomocí zařízení Elcometer 107 od firmy GAMIN s.r.o., Česká republika. Poté byl vždy odstraněn uvolněný nátěr pomocí štětce a následovalo vyhodnocení.

V souladu s tabulkou 5.9 proběhlo vyhodnocení každého jednotlivého dílce. Hodnocení probíhalo okem a pro větší detaily za pomoci lupy, která je součástí zařízení. Výsledky byly poté zaznamenány do Excelu.

Rovněž byly potvrzené předpoklady teplota a vlhkosti měřicím zařízením HM16 od Beurer GmbH, SRN.

Obrázek 4.11: Provedení mřížkové zkoušky



#### 4.8.2 Test tloušťky naměřené vrstvy práškové barvy.

Druhým testem je test tloušťky nanesené vrstvy práškové barvy. Tento test ukáže, zdali se výsledná hodnota pohybuje v rozmezí 60–80  $\mu\text{m}$ , které jsou výrobcem barev požadovány pro optimální krytí. Jedná se o objektivní metodu měření.

Tloušťka naměřené vrstvy práškové barvy byla měřena speciálním tloušťkoměrem eXacto F od společnosti AMT měřicí technika, spol. s r.o., Česká republika. Tento tloušťkometr na bázi magneticko-indukční metody s rozhraním IR RS 232 měří rozsah 0–3000  $\mu\text{m}$  s přesností  $\pm 2 \mu\text{m}$ .

Měření probíhalo spuštěním zařízení a po krátké kalibraci přiložením čidla ke středu nalakovaného ocelového dílce. Displej obratem ukázal výslednou hodnotu v mikrometrech.

Obrázek 4.12: Měření tloušťkoměrem eXacto F



### 4.8.3 Estetický test

Poslední z testů je estetický test, který zohledňuje pohledové vlastnosti finálně nalakovaného dílce z hlediska vizuální hladkosti, lesklosti a celistvosti nanášené vrstvy podle tabulky č. 4.9. Jedná se o subjektivní metodu měření.

Tabulka 4.9: Hodnocení výsledků estetického testu

Hodnota	Popis
0	Ocelové dílce jsou na pohled hladké, lesklé a celistvé bez jakýchkoliv vizuálních nedostatků
1	Ocelové dílce jsou na pohled skoro hladké. Lesklé a celistvé s procentem vizuálních nedostatků do 5 % plochy
2	Ocelové dílce jsou na pohled poměrně hladké, lesklé a celistvé se středním procentem vizuálních nedostatků kolem 10 %
3	Ocelové dílce jsou na pohled hladké, lesklé a celistvé s vizuálními nedostatky kolem 20 %
4	Ocelové dílce nejsou na pohled hladké, lesklé a celistvé s množstvím vizuálních nedostatků okolo 50 % plochy
5	Ocelové dílce jsou na pohled naprosto nevyhovující a nelze kvalifikovat ani stupněm 4

Estetický test byl proveden autorem práce 30 minut po finálním vytvrzení vizuálním pohledem a hodnocen na škále od 0 (nejlepší) do 5 (nejhorší). Výsledky byly v souladu s níže uvedeným přehledem nakonec zaznamenány do bloku a dále pak statisticky zpracovány.

## 4.9 Statistické vyhodnocení

Výsledné hodnoty z aplikovaných testů byly následně statisticky zpracovány v programu Excel 365 od firmy Microsoft Ltd., USA.

### 4.9.1 Základní statistika

Aritmetický průměr (Budíková et al., 2007)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.1)$$

Rozptyl (Budíková et al., 2007)

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (1.2)$$

Směrodatná odchylka (Budíková et al., 2007)

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (1.3)$$

Maximum je matematická funkce, jejíž funkční hodnota představuje nejvyšší hodnotu ze zkoumaných dat.

Minimum je matematická funkce, jejíž funkční hodnota představuje nejnižší hodnotu ze zkoumaných dat.

Modus je hodnota, která se v daném statistickém souboru vyskytuje nejčastěji.

Medián je prostřední hodnota ze seřazené posloupnosti hodnot.

## 4.9.2 ANOVA

V případě hodnot tloušťky naměřené vrstvy práškového povlaku byl proveden statistický výpočet průměrů a směrodatných odchylek měřených parametrů spolu s analýzou rozptylu (ANOVA). 1 faktorová ANOVA porovnála varianty testu na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ .

Základním cílem ANOVY je zjistit, zda střední hodnoty sledovaného znaku v různých skupinách se liší.

Jsou uvažovány předpoklady, že  $k$  nezávislých náhodných výběrů, každý o rozsahu  $n$ . Dále je předpokládáno, že tyto výběry pocházejí z normálního rozdělení se stejnými rozptyly.

Hypotézy (Meloun & Militký, 2004)

$$H_0 = \mu_1 = \dots = \mu_k, \quad H_1: \text{non } H_0 \quad (1.4)$$

Alternativní hypotéza  $H_1$  znamená, že existuje alespoň jedna dvojice (Meloun & Militký, 2004)

$$i, j \in \{1, \dots, k\}, \quad i \neq j \quad (1.5)$$

Testová statistika F (Meloun & Militký, 2004)

$$F = \frac{\frac{SSH}{k-1}}{\frac{SSE}{k(n-1)}} \quad (1.6)$$

Kde SSH je meziskupinový součet čtverců a SSE je vnitroskupinový součet čtverců.

Kritický obor:

Porušení  $H_0$  povede ke zvýšení meziskupinové variability, zatímco vnitroskupinová variabilita zůstane neovlivněna. Velké hodnoty testové statistiky F tedy hovoří pro zamítnutí  $H_0$ , čímž je dostáván kritický obor. (Meloun & Militký, 2004)

$$F > F_{1-\alpha}(k-1, k(n-1)) \quad (1.7)$$

Ověření předpokladů použití ANOVY:

Nezávislost náhodných výběrů je zaručena změnou konkrétního parametru při experimentálním měření. Je uvážováno  $k = (2,3,4)$  měřících sad v závislosti na konkrétním parametru a skupinu  $n = 10$  pozorování. Pro ověření normality  $k$  náhodných výběrů pro každou sadu jednotlivých parametrů byl použit Shapiro-Wilkův test, který potvrdil předpoklad. Posledním předpokladem je shodnost rozptylů jednotlivých sad měření. Sady jednotlivých parametrů byly statisticky otestovány Leveneovým testem, který rovněž potvrdil předpoklad.

Veškeré výpočty pro jednotlivé měření tloušťky nanosené vrstvy pomocí ANOVY byly prováděny v programu Microsoft Excel 365. Záměrně byl pro tento test zvolen pouze test tloušťky, neboť nabývá vhodných hodnot.

### 4.9.3 Multikriteriální analýza

Multikriteriální analýza je jednou z možností, jakým způsobem je možné porovnání a vyhodnocení více variant. Ty jsou vyjádřeny různými kritérii, která slouží jako měřítka pro srovnání a mohou mít různé jednotky (počet osob, Kč, počet bodů). Principem multikriteriální analýzy je nalézt řešení, které vybere nejvhodnější možnost a zároveň bude respektovat různé jednotky.



V měřeném experimentu je multikriteriální analýza založená na váženém aritmetickém průměru naměřených hodnot třech, případně čtyřech parametrů v závislosti na začlenění nulové hodnoty.

Hodnotící kritéria byla nastavena na mřížkový test, estetický test a test tloušťky nanesené vrstvy. Mřížkový test je důležitý z hlediska přilnavosti, která je významným ukazatelem kvality výsledné nanesené práškové vrstvy. Z tohoto důvodu mu byla přiřazena nejvyšší váha 0,5. Tloušťka nanesené vrstvy je relativně méně důležité kritérium. Větší vrstva je ekonomicky nevýhodná, přičemž váha kritéria je 0,2. Estetický test je poslední hodnotící kritérium, který zohledňuje pohledové vlastnosti. Jedná se o hodnotící kritérium s váhou 0,3.

Jelikož je tloušťka vrstvy udávána v mikrometrech, a nikoliv v bodech jako ostatní dva testy, tak byl použit přepočítání mikrometrů na body podle vzdálenosti od ideálu.

Tabulka 4.10: Přepočítání tloušťky vrstvy na body

Body	Tloušťka vrstvy ( $\mu\text{m}$ )
0	59,01 - 81
1	49,01-59; 81,01-91
2	1-49; 91,01-300

## 5 Výsledky

V úvodu experimentu bylo provedeno výchozí měření, kde byly použity doporučené hodnoty všech sledovaných parametrů v souladu s metodikou. V tabulce č. 5.1 je uveden jejich přehled, který potvrdil ideální výsledky testů. Tato tabulka ideálních hodnot je pro přehlednost a možnost porovnání přidána do každého tabulky jednotlivých měření.

Tabulka 5.1: Výsledky ideálních hodnot všech měřených parametrů

Číslo měření	Mřížková zkouška*	Tloušťka nanesené vrstvy* (μm)	Estetický test*
1	0	79	0
2	0	70	0
3	0	79	0
4	0	70	0
5	0	83	0
6	0	74	0
7	0	84	0
8	0	80	0
9	0	84	0
10	0	75	0
SO	0	5,33	0
Průměr	0	77,80	0
Rozptyl	0	28,40	0
Modus	0	79	0
Medián	0	79	0
Min	0	70	0
Max	0	84	0

\*Výsledky jednotlivých měření zaznamenány v bodech, pokud není uvedeno jinak.

V této kapitole jsou předloženy výsledky jednotlivých měření a následné statistické zpracování u jednotlivých měřených parametrů u jednotlivých zařízení.

### 5.1 Tryskací zařízení

První zařízení, na kterém probíhalo měření je tryskací zařízení. Měřeny byly vybrané parametry doba otryskání a rychlost abraziva při otryskání. Po absolvování celého procesu nanášení plastů bylo měření vyhodnoceno pomocí 3 testů a následně statisticky posouzeno.

### 5.1.1 Doba otryskání

Doba otryskání je důležitý parametr, který stanovuje po jak dlouhou dobu působilo abrazivo uvnitř tryskacího zařízení na ocelové dílce.

V tabulce č. 5.2 jsou zaznamenány naměřené hodnoty výsledných testů – mřížková zkouška (MZ), tloušťka nanesené vrstvy (TV) a estetický test (ET) v závislosti na jednotlivé doby tryskání. Následně byly údaje statisticky zpracovány a zobrazeny hodnoty deskriptivní statistiky. Bodové hodnoty nabývají rozmezí 0 (nejlepší) až 5 (nejhorší).

Tabulka 5.2: Výsledné parametry naměřených testů (MT, TV, ET) v závislosti na době tryskání

Číslo měření	Doba otryskání 0 min			Doba otryskání 2 min			Doba otryskání 5 min			Doba otryskání 15 min		
	MT *	TV* $\mu\text{m}$	ET *	MT *	TV* $\mu\text{m}$	ET *	MT *	TV* $\mu\text{m}$	ET *	MT *	TV* $\mu\text{m}$	ET*
1	0	90	1	0	87	0	0	79	0	0	86	0
2	1	70	2	0	79	1	0	70	0	0	79	0
3	0	89	1	0	88	0	0	79	0	0	89	0
4	0	89	1	1	87	0	0	70	0	0	76	0
5	1	73	2	0	80	0	0	83	0	0	75	0
6	0	81	2	0	75	0	0	73	0	1	82	1
7	1	81	2	1	70	1	0	84	0	0	88	0
8	0	84	1	0	77	0	0	80	0	0	83	0
9	1	74	2	0	87	0	0	84	0	0	73	0
10	0	80	1	1	70	1	0	75	0	0	77	0
<b>Směr. O.</b>	<b>0,52</b>	<b>7,09</b>	<b>0,53</b>	<b>0,48</b>	<b>7,04</b>	<b>0,48</b>	<b>0</b>	<b>5,42</b>	<b>0</b>	<b>0,32</b>	<b>5,65</b>	<b>0,32</b>
<b>Průměr</b>	<b>0,40</b>	<b>81,10</b>	<b>1,50</b>	<b>0,30</b>	<b>80,00</b>	<b>0,30</b>	<b>0</b>	<b>77,70</b>	<b>0</b>	<b>0,10</b>	<b>80,80</b>	<b>0,10</b>
<b>Rozptyl</b>	<b>0,27</b>	<b>50,32</b>	<b>0,28</b>	<b>0,23</b>	<b>49,56</b>	<b>0,23</b>	<b>0</b>	<b>29,34</b>	<b>0</b>	<b>0,10</b>	<b>31,96</b>	<b>0,10</b>
<b>Modus</b>	<b>0</b>	<b>89</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>87</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>79</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>N/A</b>	<b>0</b>
<b>Medián</b>	<b>0</b>	<b>81</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>79,5</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>79</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>80,5</b>	<b>0</b>
<b>Min</b>	<b>0</b>	<b>70</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>70</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>70</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>73</b>	<b>0</b>
<b>Max</b>	<b>1</b>	<b>90</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>88</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>84</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>89</b>	<b>1</b>

\*Výsledky jednotlivých měření zaznamenány v bodech, pokud není uvedeno jinak.

Z výsledku jednotlivých testů je zřejmé, že se potvrdil předpoklad nejlepší doby otryskání 5 minut. Delší doba otryskání 15 minut má nižší průměr mřížkového testu 0,1 bodu oproti 0,3 bodu u 2minutového a 0,4 bodu bez otryskávání. Estetický test dopadl relativně podobně u otryskaných sad. S velkým odstupem skončila nulová doba tryskání, kde estetický test skončil s výrazně horší průměrnou hodnotou 1,5 bodu.

Pro zjištění, zdali je statisticky významný rozdíl mezi středními hodnotami tloušťky vrstvy při jednotlivých dobách otryskání byla použita metoda ANOVA s následujícími hypotézami:

$H_0$ : Střední hodnota tloušťky vrstvy je stejná pro všechny naměřené sady hodnot dob otryskání.

$H_1$ : Existují alespoň 2 soubory dat, v nichž je střední hodnota tloušťky vrstvy odlišná.

Tabulka 5.3: Výsledný parametr tloušťky vrstvy zpracovaný jednofaktorovou ANOVOU v závislosti na době tryskání

Faktor					
<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>	
0	10	811	81,1	50,32222	
2	10	800	80	49,55556	
5	10	777	77,7	29,34444	
15	10	808	80,8	31,95556	

ANOVA							
<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>	
Mezi výběry	71	3	23,6666667	0,587343	0,627242534	2,8663	
Všechny výběry	1450,6	36	40,2944444				
Celkem	1521,6	39					

Metodou ANOVA bylo zjištěno, že nejsou průkazné rozdíly mezi střední hodnotou souborů.

Na hladině významnosti 5 % tedy není hypotéza  $H_0$  zamítnuta.

Metoda multikriteriální analýzy na základě vážených průměrů s váhami mřížkové zkoušky 0,5, tloušťky vrstvy 0,2 a estetického testu 0,3 porovnává výsledky měření na základě jednoho finálního ukazatele s nejlepší hodnotou minima bodů. Tato metoda rovněž potvrdila předpoklad, že nejlepšího výsledku 0 bodů bylo dosaženo při době otryskání 5 minut. Následuje vyšší doba otryskání s výsledkem 0,08 bodů a nižší 0,24 bodů. S odstupem nejhůře s hodnotou 0,85 bodů dopadla nulová doba otryskání. V tabulce č. 5.4 jsou zobrazeny detailní hodnoty v bodech.

Tabulka 5.4: Výsledné parametry naměřených testů zpracované multikriteriální analýzou v závislosti na době tryskání

Test*	Doba otryskání 0 min	Doba otryskání 2 min	Doba otryskání 5 min	Doba otryskání 15 min
Mřížková Zkouška	0,2	0,15	0	0,05
Tloušťka vrstvy	0,2	0	0	0
Estetický test	0,45	0,09	0	0,03
<b>Suma</b>	<b>0,85</b>	<b>0,24</b>	<b>0</b>	<b>0,08</b>

\*Výsledky zobrazeny v bodech.

### 5.1.2 Rychlost abraziva při otryskání

Rychlost abraziva je další důležitý parametr při otryskání. Tento parametr stanovuje, jakou rychlostí působilo abrazivo uvnitř tryskacího zařízení na ocelové dílce.

V tabulce č. 5.5 (viz níže) jsou zaznamenány naměřené hodnoty výsledných testů – mřížková zkouška (MZ), tloušťka nanesené vrstvy (TV) a estetický test (ET) v závislosti na jednotlivé rychlosti abraziva. Následně byly údaje statisticky zpracovány a zobrazeny hodnoty deskriptivní statistiky. Bodové hodnoty nabývají rozmezí 0 (nejlepší) až 5 (nejhorší).

Tabulka 5.5: Výsledné parametry naměřených testů (MT, TV, ET) v závislosti na rychlosti abraziva při otryskání

Číslo měření	Rychlost abraziva* 54 m.s <sup>-1</sup>			Rychlost abraziva* 72 m.s <sup>-1</sup>			Rychlost abraziva* 90 m.s <sup>-1</sup>		
	MT*	TV* (μm)	ET*	MT*	TV* (μm)	ET*	MT*	TV* (μm)	ET*
1	0	73	0	0	79	0	1	85	0
2	0	85	0	0	70	0	0	80	0
3	0	86	0	0	79	0	0	72	0
4	1	77	0	0	70	0	0	83	1
5	1	77	1	0	83	0	0	80	0
6	0	74	0	0	73	0	0	81	0
7	0	80	0	0	84	0	1	78	1
8	0	80	0	0	80	0	0	82	0
9	1	73	1	0	84	0	0	77	0
10	0	73	0	0	75	0	0	71	0
<b>Směr. O.</b>	<b>0,48</b>	<b>4,87</b>	<b>0,42</b>	<b>0</b>	<b>5,42</b>	<b>0</b>	<b>0,42</b>	<b>4,53</b>	<b>0,42</b>
<b>Průměr</b>	<b>0,30</b>	<b>78,00</b>	<b>0,20</b>	<b>0</b>	<b>77,70</b>	<b>0</b>	<b>0,20</b>	<b>78,90</b>	<b>0,20</b>
<b>Rozptyl</b>	<b>0,23</b>	<b>23,73</b>	<b>0,18</b>	<b>0</b>	<b>29,34</b>	<b>0</b>	<b>0,18</b>	<b>20,54</b>	<b>0,18</b>
<b>Modus</b>	<b>0</b>	<b>73</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>79</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>80</b>	<b>0</b>

Číslo měření	Rychlost abraziva* 54 m.s <sup>-1</sup>			Rychlost abraziva* 72 m.s <sup>-1</sup>			Rychlost abraziva* 90 m.s <sup>-1</sup>		
	MT*	TV* (μm)	ET*	MT*	TV* (μm)	ET*	MT*	TV* (μm)	ET*
<b>Medián</b>	<b>0</b>	<b>77</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>79</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>80</b>	<b>0</b>
<b>Min</b>	<b>0</b>	<b>73</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>70</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>71</b>	<b>0</b>
<b>Max</b>	<b>1</b>	<b>86</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>84</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>85</b>	<b>1</b>

\* Výsledky jednotlivých měření zaznamenány v bodech, pokud není uvedeno jinak.

Z výsledku jednotlivých testů je zřejmé, že se potvrdil předpoklad nejlepší rychlosti abraziva 72 m.s<sup>-1</sup>, neboť takto vyšly mřížkový i estetický test nejlépe s průměrem 0 bodů. Zvýšená rychlost abraziva 90 m.s<sup>-1</sup> má výborné hodnoty mřížkového testu 0 bodu, avšak zaostává při estetickém testu. Snížená rychlost abraziva 54 m.s<sup>-1</sup> znamená porovnatelný estetický, avšak horší mřížkový test proti rychlejší variantě. Tloušťka vrstvy v průměru pod 80 μm u všech měření.

Pro zjištění, zdali je statisticky významný rozdíl mezi středními hodnotami tloušťky vrstvy při jednotlivých dobách otryskání byla použita metoda ANOVA s následujícími hypotézami:

H<sub>0</sub>: Střední hodnota tloušťky vrstvy je stejná pro všechny naměřené sady hodnot rychlosti abraziva.

H<sub>1</sub>: Existují alespoň 2 soubory dat, v nichž je střední hodnota tloušťky vrstvy odlišná.

Tabulka 5.6: Výsledný parametr tloušťky vrstvy zpracovaný jednofaktorovou ANOVOU v závislosti na rychlosti abraziva při otryskání

Faktor	<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>
	54	10	778	77,8	23,7333333
	72	10	777	77,7	29,3444444
	90	10	789	78,9	20,5444444

#### ANOVA

<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	8,86666667	2	4,4333333	0,18065198	0,83572644	3,3541
Všechny výběry	662,6	27	24,54074			
Celkem	671,466667	29				

Metodou ANOVA bylo zjištěno, že nejsou průkazné rozdíly mezi střední hodnotou souborů. Na hladině významnosti 5 % tedy není hypotéza  $H_0$  zamítnuta.

Metoda multikriteriální analýzy vypočtena na základě vážených průměrů s váhami mřížkové zkoušky 0,5, tloušťky vrstvy 0,2 a estetického testu 0,3 porovnává výsledky měření na základě jednoho finálního ukazatele s nejlepší hodnotou minima bodů. Tato metoda rovněž potvrdila předpoklad, že nejlepšího výsledku 0 bodů bylo dosaženo při rychlosti otryskání 72 m.s<sup>-1</sup>. Následuje vyšší rychlost abraziva při otryskání s výsledkem 0,16 bodu a nejhůře dopadla nižší rychlost abraziva s průměrem 0,21 bodu. V tabulce č. 5.7 jsou zobrazeny detailní hodnoty.

Tabulka 5.7: Výsledné parametry naměřených testů zpracované multikriteriální analýzou v závislosti na rychlosti abraziva při otryskání

Test*	Rychlost abraziva 54 m.s <sup>-1</sup>	Rychlost abraziva 72 m.s <sup>-1</sup>	Rychlost abraziva 90 m.s <sup>-1</sup>
<b>Mřížková metoda</b>	0,15	0	0,10
<b>Tloušťka vrstvy</b>	0	0	0
<b>Estetický test</b>	0,06	0	0,06
<b>Suma</b>	<b>0,21</b>	<b>0</b>	<b>0,16</b>

\*Výsledky zobrazeny v bodech.

## 5.2 Odmašťovací zařízení

Měření na odmašťovacím zařízení proběhlo jako druhé v pořadí. Měřeny byly vybrané parametry doby odmašťování, teplota odmašťovací lázně a koncentrace odmašťovací lázně. Po následném absolvování celého procesu nanášení práškové vrstvy (včetně dřívějšího otryskání) bylo měření vyhodnoceno pomocí 3 testů a následně statisticky posouzeno.

### 5.2.1 Doba odmašťování

Doba odmašťování je významný parametr, který stanovuje, jak dlouhou dobu probíhalo odmašťování měřených ocelových dílců.

V tabulce č. 5.8 jsou zaznamenány naměřené hodnoty výsledných testů – mřížková zkouška (MZ), tloušťka nanesené vrstvy (TV) a estetický test (ET) v závislosti na jednotlivých dobách odmaštění. Následně byly údaje statisticky zpracovány a zobrazeny hodnoty deskriptivní statistiky. Bodové hodnoty nabývají rozmezí 0 (nejlepší) až 5 (nejhorší).

Tabulka 5.8: Výsledné parametry naměřených testů (MT, TV, ET) v závislosti na době odmašťování

Číslo měření	Doba odmašťování 0 min			Doba odmašťování 3 min			Doba odmašťování 7 min			Doba odmašťování 11 min		
	MT*	TV* (μm)	ET*	MT*	TV* (μm)	ET*	MT*	TV* (μm)	ET*	MT*	TV* (μm)	ET*
1	2	81	5	1	70	1	0	79	0	0	75	0
2	2	73	4	1	79	1	0	70	0	1	77	1
3	3	86	4	1	70	1	0	79	0	0	71	0
4	3	80	5	1	86	0	0	70	0	0	81	0
5	2	81	4	2	75	1	0	83	0	0	89	0
6	3	86	5	1	76	0	0	73	0	1	81	0
7	2	83	4	1	86	1	0	84	0	0	76	0
8	3	84	5	1	83	1	0	80	0	0	79	0
9	2	87	4	1	71	1	0	84	0	0	71	0
10	2	81	5	2	88	1	0	75	0	0	79	0
Směr. O.	0,52	4,08	0,53	0,42	7,01	0,42	0	5,42	0	0,42	5,3	0,32
Průměr	2,4	82,2	4,5	1,20	78,40	0,80	0	77,7	0	0,20	77,9	0,10
Rozptyl	0,27	16,62	0,28	0,18	49,16	0,18	0	29,34	0	0,18	28,10	0,10
Modus	2	81	5	1	70	1	0	79	0	0	71	0
Medián	2	82	5	1	78	1	0	79	0	0	78	0
Min	2	73	4	1	70	0	0	70	0	0	71	0
Max	3	87	5	2	88	1	0	84	0	1	89	1

\* Výsledky jednotlivých měření zaznamenány v bodech, pokud není uvedeno jinak.

Z výsledku jednotlivých testů je zřejmé, že se potvrdil předpoklad nejlepší doby odmašťování 7 minut, neboť takto vyšly mřížkový i estetický test nejlépe s průměrem 0 bodů. Delší doba odmašťování 11 minut má dobré výsledky mřížkového i estetického testu, přičemž kratší doba odmašťování 3 minuty dopadla výrazně hůře. S významným odstupem skončila nulová doba odmašťování, kde naprosto propadly mřížkový a hlavně estetický test. Tloušťka vrstvy v průměru pod 80 μm u všech měření kromě nulové doby odmaštění.

Pro zjištění, zdali je statisticky významný rozdíl mezi středními hodnotami tloušťky vrstvy při jednotlivých dobách odmašťování byla použita metoda ANOVA s následujícími hypotézami:

H<sub>0</sub>: Střední hodnota tloušťky vrstvy je stejná pro všechny naměřené sady hodnot dob odmaštění.

H<sub>1</sub>: Existují alespoň 2 soubory dat, v nichž je střední hodnota tloušťky vrstvy odlišná.



Tabulka 5.9: Výsledný parametr tloušťky vrstvy zpracovaný jednofaktorovou ANOVOU v závislosti na době odmašťování

Faktor				
Výběr	Počet	Součet	Průměr	Rozptyl
0	10	822	82,2	16,6222222
3	10	784	78,4	49,1555556
7	10	777	77,7	29,3444444
11	10	779	77,9	28,1

ANOVA						
Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	134,9	3	44,967	1,45969342	0,241792	2,866265551
Všechny výběry	1109	36	30,806			
Celkem	1243,9	39				

Metodou ANOVA bylo zjištěno, že nejsou průkazné rozdíly mezi střední hodnotou souborů. Na hladině významnosti 5 % tedy není hypotéza  $H_0$  zamítnuta.

Metoda multikriteriální analýzy vypočtena na základě vážených průměrů s váhami mřížkové zkoušky 0,5, tloušťky vrstvy 0,2 a estetického testu 0,3 porovnává výsledky měření na základě jednoho finálního ukazatele s nejlepší hodnotou minima bodů. Tato metoda rovněž potvrdila předpoklad, že nejlepšího výsledku 0 bodů bylo dosaženo při době odmašťování 7 minut. Následuje vyšší doba odmašťování s výsledkem 0,13 bodů a nižší 0,84 bodů. S odstupem nejhůře s hodnotou 2,75 bodů dopadla nulová doba odmašťování. V tabulce č. 5.10 jsou zobrazeny detailní hodnoty.

Tabulka 5.10: Výsledné parametry naměřených testů zpracované multikriteriální analýzou v závislosti na době odmašťování

Test*	doba odmašťování 0 min	doba odmašťování 3 min	doba odmašťování 7 min	doba odmašťování 11 min
<b>Mřížková metoda</b>	1,20	0,60	0	0,10
<b>Tloušťka vrstvy</b>	0,20	0	0	0
<b>Estetický test</b>	1,35	0,24	0	0,03
<b>Suma</b>	<b>2,75</b>	<b>0,84</b>	<b>0</b>	<b>0,13</b>

\*Výsledky zobrazeny v bodech.

## 5.2.2 Teplota odmašťovací lázně

Teplota odmašťovací lázně je další významný parametr, který stanovuje, jakou teplotou působila odmašťovací lázeň na ocelové dílce.

V tabulce č. 5.11 jsou zaznamenány naměřené hodnoty výsledných testů – mřížková zkouška (MZ), tloušťka nanesené vrstvy (TV) a estetický test (ET) v závislosti na jednotlivých teplotách odmašťovací lázně. Následně byly údaje statisticky zpracovány a zobrazeny hodnoty deskriptivní statistiky. Bodové hodnoty nabývají rozmezí 0 (nejlepší) až 5 (nejhorší).

Tabulka 5.11: Výsledné parametry naměřených testů (MT, TV, ET) v závislosti na teplotě odmašťovací lázně

Číslo měření	Teplota odmašťovací lázně 25 °C			Teplota odmašťovací lázně 40 °C			Teplota odmašťovací lázně 50 °C		
	MT*	TV* (μm)	ET*	MT*	TV* (μm)	ET*	MT*	TV* (μm)	ET*
1	2	70	4	0	79	0	0	89	1
2	2	89	4	0	70	0	0	87	0
3	2	89	4	0	79	0	0	81	0
4	1	74	3	0	70	0	0	70	0
5	1	76	3	0	83	0	0	84	0
6	1	77	3	0	73	0	1	81	0
7	2	90	4	0	84	0	0	82	0
8	2	83	4	0	80	0	0	75	0
9	3	86	4	0	84	0	0	83	1
10	3	82	4	0	75	0	0	85	0
<b>Směr. O.</b>	<b>0,74</b>	<b>7,04</b>	<b>0,48</b>	<b>0</b>	<b>5,42</b>	<b>0</b>	<b>0,32</b>	<b>5,60</b>	<b>0,42</b>
<b>Průměr</b>	<b>1,90</b>	<b>81,60</b>	<b>3,70</b>	<b>0</b>	<b>77,70</b>	<b>0</b>	<b>0,10</b>	<b>81,70</b>	<b>0,20</b>
<b>Rozptyl</b>	<b>0,54</b>	<b>49,60</b>	<b>0,23</b>	<b>0</b>	<b>29,34</b>	<b>0</b>	<b>0,10</b>	<b>31,34</b>	<b>0,18</b>
<b>Modus</b>	<b>2</b>	<b>89</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>79</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>81</b>	<b>0</b>
<b>Medián</b>	<b>2</b>	<b>82,5</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>79</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>82,5</b>	<b>0</b>
<b>Min</b>	<b>1</b>	<b>70</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>70</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>70</b>	<b>0</b>
<b>Max</b>	<b>3</b>	<b>90</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>84</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>89</b>	<b>1</b>

\* Výsledky jednotlivých měření zaznamenány v bodech, pokud není uvedeno jinak.

Z výsledku jednotlivých testů je zřejmé, že se potvrdil předpoklad nejlepší teploty odmašťovací lázně 40 minut, neboť takto vyšly mřížkový i estetický test nejlépe s průměrem 0 bodů. Zvýšená teplota odmašťovací lázně má lehce nižší průměr mřížkového testu 0,1 bodu i estetického testu 0,2 bodu. S výrazným odstupem skončila nižší teplota odmašťovací lázně, kde naprosto propadly mřížkový, a hlavně estetický test. Tloušťka vrstvy v průměru nad 80 μm u obou vychýlených hodnot.

Pro zjištění, zdali je statisticky významný rozdíl mezi středními hodnotami tloušťky vrstvy při jednotlivých teplotách odmašťovací lázně byla použita metoda ANOVA s následujícími hypotézami:

$H_0$ : Střední hodnota tloušťky vrstvy je stejná pro všechny naměřené sady hodnot teploty odmašťovací lázně.

$H_1$ : Existují alespoň 2 soubory dat, v nichž je střední hodnota tloušťky vrstvy odlišná.

Tabulka 5.12: Výsledný parametr tloušťky vrstvy zpracovaný jednofaktorovou ANOVOU v závislosti na teplotě odmašťovací lázně

Faktor					
<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>	
25	10	816	81,6	49,6	
40	10	777	77,7	29,3444444	
50	10	817	81,7	31,3444444	

ANOVA						
<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	104,066667	2	52,03333	1,41537377	0,260282502	3,3541
Všechny výběry	992,6	27	36,76296			
Celkem	1096,66667	29				

Metodou ANOVA bylo zjištěno, že nejsou průkazné rozdíly mezi střední hodnotou souborů.

Na hladině významnosti 5 % tedy není hypotéza  $H_0$  zamítnuta.

Metoda multikriteriální analýzy vypočtena na základě vážených průměrů s váhami mřížkové zkoušky 0,5, tloušťky vrstvy 0,2 a estetického testu 0,3 porovnává výsledky měření na základě jednoho finálního ukazatele s nejlepší hodnotou minima bodů. Tato metoda rovněž potvrdila předpoklad, že nejlepšího výsledku 0 bodů bylo dosaženo při teplotě odmašťovací lázně 40 °C. Následuje vyšší teplota s výsledkem 0,31 bodu a s výrazným odstupem nižší teplota 2,26 bodu. V tabulce č. 5.13 jsou zobrazeny detailní hodnoty.

Tabulka 5.13: Výsledné parametry naměřených testů zpracované multikriteriální analýzou v závislosti na teplotě odmašťovací lázně

Test*	Teplota odmašťovací lázně 25 °C	Teplota odmašťovací lázně 40 °C	Teplota odmašťovací lázně 50 °C
Mřížková metoda	0,95	0	0,05
Tloušťka vrstvy	0	0	0,20
Estetický test	1,11	0	0,06
<b>Suma</b>	<b>2,26</b>	<b>0</b>	<b>0,31</b>

\*Výsledky zobrazeny v bodech.

### 5.2.3 Koncentrace odmašťovací lázně

Koncentrace odmašťovací lázně je další z měřených parametrů, který stanovuje, jakou koncentrací působí odmašťovací lázeň na měřené ocelové dílce.

V tabulce č. 5.14 níže jsou zaznamenány naměřené hodnoty výsledných testů – mřížková zkouška (MZ), tloušťka nanesené vrstvy (TV) a estetický test (ET) v závislosti na jednotlivých koncentracích odmašťovací lázně. Následně byly údaje statisticky zpracovány a zobrazeny hodnoty deskriptivní statistiky. Bodové hodnoty nabývají rozmezí 0 (nejlepší) až 5 (nejhorší).

Tabulka 5.14: Výsledné parametry naměřených testů (MT, TV, ET) v závislosti na koncentraci odmašťovací lázně

Číslo měření	Koncentrace odmašťovací lázně 0,6 %			Koncentrace odmašťovací lázně 1,2 %			Koncentrace odmašťovací lázně 1,8 %		
	MT*	TV* (μm)	ET*	MT*	TV* (μm)	ET*	MT*	TV* (μm)	ET*
1	1	81	1	0	79	0	0	71	0
2	2	85	1	0	70	0	0	78	0
3	2	73	0	0	79	0	0	80	1
4	1	76	1	0	70	0	0	85	1
5	2	77	1	0	83	0	0	85	0
6	1	81	1	0	73	0	0	78	0
7	1	85	0	0	84	0	0	74	0
8	1	85	1	0	80	0	0	75	0
9	1	83	1	0	84	0	1	79	0
10	2	80	1	0	75	0	0	82	0
<b>Směr. O.</b>	<b>0,52</b>	<b>4,17</b>	<b>0,42</b>	<b>0</b>	<b>5,42</b>	<b>0</b>	<b>0,32</b>	<b>4,57</b>	<b>0,42</b>
<b>Průměr</b>	<b>1,40</b>	<b>80,60</b>	<b>0,80</b>	<b>0</b>	<b>77,70</b>	<b>0</b>	<b>0,10</b>	<b>78,70</b>	<b>0,20</b>
<b>Rozptyl</b>	<b>0,27</b>	<b>17,38</b>	<b>0,18</b>	<b>0</b>	<b>29,34</b>	<b>0</b>	<b>0,10</b>	<b>20,90</b>	<b>0,18</b>
<b>Modus</b>	<b>1</b>	<b>85</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>79</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>78</b>	<b>0</b>
<b>Medián</b>	<b>1</b>	<b>81</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>79</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>79</b>	<b>0</b>

Číslo měření	Koncentrace odmašťovací lázně 0,6 %			Koncentrace odmašťovací lázně 1,2 %			Koncentrace odmašťovací lázně 1,8 %		
	MT*	TV* (μm)	ET*	MT*	TV* (μm)	ET*	MT*	TV* (μm)	ET*
Min	1	73	0	0	70	0	0	71	0
Max	2	85	1	0	84	0	1	85	1

\*Výsledky jednotlivých měření zaznamenány v bodech, pokud není uvedeno jinak.

Z výsledku jednotlivých testů je zřejmé, že se potvrdil předpoklad nejlepší koncentrace odmašťovací lázně 1,2 %, neboť takto vyšly mřížkový i estetický test nejlépe s průměrem 0 bodů. Koncentrace 1,8 % vykázala výrazně lepší hodnoty mřížkového i estetického testu než koncentrace 0,6 %, která má průměr hodnot 0,8 estetického testu a 1,4 mřížkového testu spolu s vyšším průměrem tloušťky vrstvy. Tloušťka vrstvy v průměru pod 80 μm u obou dalších hodnot měření.

Pro zjištění, zdali je statisticky významný rozdíl mezi středními hodnotami tloušťky vrstvy při jednotlivých koncentracích odmašťovací lázně byla použita metoda ANOVA s následujícími hypotézami:

H<sub>0</sub>: Střední hodnota tloušťky vrstvy je stejná pro všechny naměřené sady hodnot koncentrací odmašťovací lázně.

H<sub>1</sub>: Existují alespoň 2 soubory dat, v nichž je střední hodnota tloušťky vrstvy odlišná.

Tabulka 5.15: Výsledný parametr tloušťky vrstvy zpracovaný jednofaktorovou ANOVOU v závislosti na koncentraci odmašťovací lázně

Faktor	<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>
	0,6	10	806	80,6	17,3777778
	1,2	10	777	77,7	29,3444444
	1,8	10	787	78,7	20,9

#### ANOVA

<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	43,4	2	21,7	0,96270128	0,39458335	3,3541
Všechny výběry	608,6	27	22,54074			
Celkem	652	29				

Metodou ANOVA bylo zjištěno, že nejsou průkazné rozdíly mezi střední hodnotou souborů.

Na hladině významnosti 5 % tedy není hypotéza  $H_0$  zamítnuta.

Metoda multikriteriální analýzy vypočtena na základě vážených průměrů s váhami mřížkové zkoušky 0,5, tloušťky vrstvy 0,2 a estetického testu 0,3 porovnává výsledky měření na základě jednoho finálního ukazatele s nejlepší hodnotou 0 bodů. Tato metoda rovněž potvrdila předpoklad, že nejlepší výsledek 0 bodů bylo dosaženo při koncentraci odmašťovací lázně 1,2 %. Následuje vyšší koncentrace 1,8 % s výsledkem 0,11 bodu. S odstupem nejhůře s hodnotou 1,14 bodu dopadla nižší hodnota koncentrace 0,6 %. V tabulce č. 5.16 jsou zobrazeny detailní hodnoty.

Tabulka 5.16: Výsledné parametry naměřených testů zpracované multikriteriální analýzou v závislosti na koncentraci odmašťovací lázně

Test*	Koncentrace odmašťovací lázně 0,6 %	Koncentrace odmašťovací lázně 1,2 %	Koncentrace odmašťovací lázně 1,8 %
Mřížková metoda	0,70	0,00	0,05
Tloušťka vrstvy	0,20	0,00	0,00
Estetický test	0,24	0,00	0,06
Suma	1,14	0,00	0,11

\*Výsledky zobrazeny v bodech.

## 5.3 Oplachové zařízení

Další zařízení, na kterém probíhalo měření je oplachové zařízení. Měřen byl vybraný parametr doba oplachu. Po absolvování celého procesu nanášení práškové vrstvy bylo měření vyhodnoceno pomocí 3 testů a následně statisticky posouzeno.

### 5.3.1 Doba oplachu

Doba oplachu je důležitý parametr, který stanovuje po jak dlouhou dobu byly ocelové dílce oplachovány ve 2 oplachových komorách.

V tabulce č. 5.17 jsou zaznamenány naměřené hodnoty výsledných testů – mřížková zkouška (MZ), tloušťka nanesené vrstvy (TV) a estetický test (ET) v závislosti na jednotlivé doby oplachu. Následně byly údaje statisticky zpracovány a zobrazeny hodnoty deskriptivní statistiky. Bodové hodnoty nabývají rozmezí 0 (nejlepší) až 5 (nejhorší).

Tabulka 5.17: Výsledné parametry naměřených testů (MT, TV, ET) v závislosti na době oplachu

Číslo měření	Doba oplachu 0 min			Doba oplachu 4 min			Doba oplachu 9 min			Doba oplachu 15 min		
	MT *	TV* (μm)	ET*	MT *	TV* (μm)	ET*	MT *	TV* (μm)	ET*	MT *	TV* (μm)	ET*
1	0	76	0	0	89	0	0	79	0	0	82	0
2	1	90	1	1	89	0	0	70	0	0	86	0
3	0	73	0	0	80	0	0	79	0	0	88	0
4	1	83	1	1	89	1	0	70	0	0	70	0
5	1	75	0	0	71	0	0	83	0	0	78	0
6	1	71	0	0	74	0	0	74	0	0	84	0
7	1	90	1	0	81	0	0	84	0	0	82	0
8	1	89	0	0	83	0	0	80	0	0	72	0
9	1	80	1	1	70	1	0	84	0	0	84	0
10	1	70	1	0	71	0	0	75	0	0	84	0
<b>Směr. O.</b>	<b>0,42</b>	<b>7,89</b>	<b>0,53</b>	<b>0,48</b>	<b>7,82</b>	<b>0,42</b>	<b>0</b>	<b>5,33</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>5,91</b>	<b>0</b>
<b>Průměr</b>	<b>0,80</b>	<b>79,70</b>	<b>0,50</b>	<b>0,30</b>	<b>79,70</b>	<b>0,20</b>	<b>0</b>	<b>77,80</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>81,00</b>	<b>0</b>
<b>Rozptyl</b>	<b>0,18</b>	<b>62,23</b>	<b>0,28</b>	<b>0,23</b>	<b>61,12</b>	<b>0,18</b>	<b>0</b>	<b>28,40</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>34,89</b>	<b>0</b>
<b>Modus</b>	<b>1</b>	<b>90</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>89</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>79</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>84</b>	<b>0</b>
<b>Medián</b>	<b>1</b>	<b>78</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>81</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>79</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>83</b>	<b>0</b>
<b>Min</b>	<b>0</b>	<b>70</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>70</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>70</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>70</b>	<b>0</b>
<b>Max</b>	<b>1</b>	<b>90</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>89</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>84</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>88</b>	<b>0</b>

\*Výsledky jednotlivých měření zaznamenány v bodech, pokud není uvedeno jinak.

Z výsledku jednotlivých testů je zřejmé, že se potvrdil předpoklad nejlepší doby oplachu 9 minut, neboť takto vyšly mřížkový i estetický test nejlépe s průměrem 0 bodů. Delší doba oplachu 15 minut však ukázala rovněž mřížkový i estetický test s hodnotou 0. Kratší doba oplachu vedla k horší výsledkům, přičemž nulová doba oplachu je očekávaně výrazně horší. Tloušťka vrstvy v průměru pod 80 μm u všech dob oplachu kromě doby 15 minut.

Pro zjištění, zdali je statisticky významný rozdíl mezi středními hodnotami tloušťky vrstvy při jednotlivých dobách oplachu byla použita metoda ANOVA s následujícími hypotézami:

H<sub>0</sub>: Střední hodnota tloušťky vrstvy je stejná pro všechny naměřené sady hodnot dob oplachu.

H<sub>1</sub>: Existují alespoň 2 soubory dat, v nichž je střední hodnota tloušťky vrstvy odlišná.

Tabulka 5.18: Výsledný parametr tloušťky vrstvy zpracovaný jednofaktorovou ANOVOU v závislosti na době oplachu

Faktor					
<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>	
0	10	794	79,4	62,93333	
4	10	778	77,8	42,17778	
9	10	777	77,7	29,34444	
15	10	810	81	34,88889	

ANOVA						
<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota</i>	
					<i>P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	15,875	3	5,29166667	0,124992	0,944718	2,86626555
Všechny výběry	1524,1	36	42,3361111			
Celkem	1539,975	39				

Metodou ANOVA bylo zjištěno, že nejsou průkazné rozdíly mezi střední hodnotou souborů.

Na hladině významnosti 5 % tedy není hypotéza  $H_0$  zamítnuta.

Metoda multikriteriální analýzy vypočtena na základě vážených průměrů s váhami mřížkové zkoušky 0,5, tloušťky vrstvy 0,2 a estetického testu 0,3 porovnává výsledky měření na základě jednoho finálního ukazatele s nejlepší hodnotou 0 bodů. Tato metoda rovněž potvrdila předpoklad, že nejlepší výsledek 0 bodů bylo dosaženo při době oplachu 9 minut. Následuje vyšší doba oplachu s výsledkem 0,2 bodů a nižší 0,21 bodů. S odstupem nejhůře s hodnotou 0,55 bodů dopadla nulová doba oplachu. V tabulce č. 5.19 jsou zobrazeny detailní hodnoty.

Tabulka 5.19: Výsledné parametry naměřených testů zpracované multikriteriální analýzou v závislosti na době oplachu

Test*	Doba oplachu 0 min	Doba oplachu 4 min	Doba oplachu 9 min	Doba oplachu 15 min
<b>Mřížková metoda</b>	0,40	0,2	0	0
<b>Tloušťka vrstvy</b>	0	0	0	0,20
<b>Estetický test</b>	0,15	0,06	0	0
<b>Suma</b>	<b>0,55</b>	<b>0,21</b>	<b>0</b>	<b>0,20</b>

\*Výsledky zobrazeny v bodech.



## 5.4 Sušící pec

Další zařízení, na kterém probíhalo měření je sušící pec. Měřeny byly vybrané parametry doba sušení a teplota vzduchu v sušící peci. Po absolvování celého procesu nanášení práškové vrstvy bylo měření vyhodnoceno pomocí 3 testů a následně statisticky posouzeno.

### 5.4.1 Doba sušení

Doba sušení je důležitý parametr, který stanovuje po jak dlouhou dobu působil vzduch uvnitř sušící pece na ocelové dílce.

V tabulce č. 5.20 jsou zaznamenány naměřené hodnoty výsledných testů – mřížková zkouška (MZ), tloušťka nanesené vrstvy (TV) a estetický test (ET) v závislosti na jednotlivé doby sušení. Následně byly údaje statisticky zpracovány a zobrazeny hodnoty deskriptivní statistiky. Bodové hodnoty nabývají rozmezí 0 (nejlepší) až 5 (nejhorší).

Tabulka 5.20: Výsledné parametry naměřených testů (MT, TV, ET) v závislosti na době sušení

Číslo měření	Doba sušení 0 min			Doba sušení 8 min			Doba sušení 15 min			Doba sušení 30 min		
	MT*	TV* ( $\mu\text{m}$ )	ET*	MT*	TV* ( $\mu\text{m}$ )	ET*	MT*	TV* ( $\mu\text{m}$ )	ET*	MT*	TV* ( $\mu\text{m}$ )	ET*
1	3	87	4	2	70	1	0	79	0	0	70	0
2	4	83	5	2	78	1	0	70	0	0	87	0
3	3	79	4	2	78	1	0	79	0	0	89	0
4	4	85	5	3	72	2	0	70	0	0	77	0
5	3	83	4	2	83	1	0	83	0	0	82	0
6	3	84	4	2	77	1	0	73	0	0	70	0
7	4	72	4	2	88	1	0	84	0	0	74	0
8	3	70	4	1	83	1	0	80	0	0	71	0
9	3	77	4	2	86	2	0	84	0	0	79	0
10	4	83	5	2	86	2	0	75	0	0	84	0
<b>Směr. O.</b>	<b>0,52</b>	<b>5,68</b>	<b>0,48</b>	<b>0,47</b>	<b>6,10</b>	<b>0,48</b>	<b>0</b>	<b>5,42</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>7,06</b>	<b>0</b>
<b>Průměr</b>	<b>3,40</b>	<b>80,30</b>	<b>4,30</b>	<b>2,00</b>	<b>80,10</b>	<b>1,30</b>	<b>0</b>	<b>77,70</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>78,30</b>	<b>0</b>
<b>Rozptyl</b>	<b>0,27</b>	<b>32,23</b>	<b>0,23</b>	<b>0,22</b>	<b>37,21</b>	<b>0,23</b>	<b>0</b>	<b>29,34</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>49,79</b>	<b>0</b>
<b>Modus</b>	<b>3</b>	<b>83</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>78</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>79</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>70</b>	<b>0</b>
<b>Medián</b>	<b>3</b>	<b>83</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>81</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>79</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>78</b>	<b>0</b>
<b>Min</b>	<b>3</b>	<b>70</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>70</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>70</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>70</b>	<b>0</b>
<b>Max</b>	<b>4</b>	<b>87</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>88</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>84</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>89</b>	<b>0</b>

\*Výsledky jednotlivých měření zaznamenány v bodech, pokud není uvedeno jinak.

Z výsledku jednotlivých testů je zřejmé, že se potvrdil předpoklad nejlepší doby sušení 15 minut, neboť takto vyšly mřížkový i estetický test nejlépe s průměrem 0 bodů. Delší doba sušení

30 minut však rovněž ukázala výborný výsledek 0 bodů u mřížkového i estetického testu. Kratší doba sušení 8 minut vedla k výrazně horším výsledkům, přičemž nulová doba sušení byla ještě signifikantně horší. Tloušťka vrstvy v průměru pod 80  $\mu\text{m}$  u dob sušení 15 a 30 minut. Kratší doby sušení pak ukázaly průměrnou tloušťku vrstvy nad 80  $\mu\text{m}$ .

Pro zjištění, zdali je statisticky významný rozdíl mezi středními hodnotami tloušťky vrstvy při jednotlivých dobách sušení byla použita metoda ANOVA s následujícími hypotézami:

$H_0$ : Střední hodnota tloušťky vrstvy je stejná pro všechny naměřené sady hodnot dob sušení.

$H_1$ : Existují alespoň 2 soubory dat, v nichž je střední hodnota tloušťky vrstvy odlišná.

Tabulka 5.21: Výsledný parametr tloušťky vrstvy zpracovaný jednofaktorovou ANOVOU v závislosti na době sušení

Faktor					
<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>	
0	10	803	80,3	32,23333	
8	10	801	80,1	37,21111	
15	10	777	77,7	29,34444	
30	10	783	78,3	49,78889	

#### ANOVA

<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	50,4	3	16,8	0,452288	0,71726	2,86626555
Všechny výběry	1337,2	36	37,1444444			
Celkem	1387,6	39				

Metodou ANOVA bylo zjištěno, že nejsou průkazné rozdíly mezi střední hodnotou souborů.

Na hladině významnosti 5 % tedy není hypotéza  $H_0$  zamítnuta.

Metoda multikriteriální analýzy vypočtena na základě vážených průměrů s váhami mřížkové zkoušky 0,5, tloušťky vrstvy 0,2 a estetického testu 0,3 porovnává výsledky měření na základě jednoho finálního ukazatele s nejlepší hodnotou 0 bodů. Tato metoda rovněž potvrdila předpoklad, že nejlepší výsledek 0 bodů bylo dosaženo při době sušení 15 minut. Doba sušení 30 minut však měla naprosto stejné výsledky. Z toho důvodu je na stejné úrovni jako výchozí

hodnota 15 minut. Z ekonomických důvodů se však používá kratší doba sušení. Doba sušení 8 minut vykázala výrazně horší výsledky s hodnotou 1,59 bodů. S odstupem nejhůře s hodnotou 3,19 bodů dopadla nulová doba sušení. V tabulce č. 5.22 jsou zobrazeny detailní hodnoty.

Tabulka 5.22: Výsledné parametry naměřených testů zpracované multikriteriální analýzou v závislosti na době sušení

Test*	Doba sušení 0 min	Doba sušení 8 min	Doba sušení 15 min	Doba sušení 30 min
<b>Mřížková metoda</b>	1,70	1,00	0	0
<b>Tloušťka vrstvy</b>	0,20	0,20	0	0
<b>Estetický test</b>	1,29	0,39	0	0
<b>Suma</b>	<b>3,19</b>	<b>1,59</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

\*Výsledky zobrazeny v bodech.

#### 5.4.2 Teplota vzduchu v sušícím zařízení

Teplota vzduchu v sušící peci je důležitý parametr, který stanovuje, jak vysoká teplota působila na ocelové dílce uvnitř sušící pece.

V tabulce č. 5.23 jsou zaznamenány naměřené hodnoty výsledných testů – mřížková zkouška (MZ), tloušťka nanesené vrstvy (TV) a estetický test (ET) v závislosti na jednotlivých teplotách vzduchu v sušící peci. Následně byly údaje statisticky zpracovány a zobrazeny hodnoty deskriptivní statistiky. Bodové hodnoty nabývají rozmezí 0 (nejlepší) až 5 (nejhorší).

Tabulka 5.23: Výsledné parametry naměřených testů (MT, TV, ET) v závislosti na teplotě vzduchu

Číslo měření	Teplota vzduchu 60 °C			Teplota vzduchu 115 °C			Teplota vzduchu 125 °C		
	MT*	TV* $\mu\text{m}$	ET*	MT*	TV* $\mu\text{m}$	ET*	MT*	TV* $\mu\text{m}$	ET*
<b>1</b>	3	74	3	0	79	0	0	72	0
<b>2</b>	3	88	3	0	70	0	0	88	0
<b>3</b>	2	75	3	0	79	0	0	83	0
<b>4</b>	2	87	2	0	70	0	0	77	0
<b>5</b>	2	83	2	0	83	0	0	76	0
<b>6</b>	3	85	3	0	73	0	1	88	0
<b>7</b>	3	73	3	0	84	0	0	83	0
<b>8</b>	2	83	2	0	80	0	0	87	1
<b>9</b>	2	70	2	0	84	0	0	79	0
<b>10</b>	3	90	3	0	75	0	0	79	0
<b>Směr. O.</b>	<b>0,53</b>	<b>7,15</b>	<b>0,52</b>	<b>0</b>	<b>5,42</b>	<b>0</b>	<b>0,32</b>	<b>5,49</b>	<b>0,32</b>

Číslo měření	Teplota vzduchu 60 °C			Teplota vzduchu 115 °C			Teplota vzduchu 125 °C		
	MT*	TV* μm	ET*	MT*	TV* μm	ET*	MT*	TV* μm	ET*
<b>Průměr</b>	<b>2,50</b>	<b>80,80</b>	<b>2,60</b>	<b>0</b>	<b>77,70</b>	<b>0</b>	<b>0,10</b>	<b>81,20</b>	<b>0,10</b>
<b>Rozptyl</b>	<b>0,28</b>	<b>51,07</b>	<b>0,27</b>	<b>0</b>	<b>29,34</b>	<b>0</b>	<b>0,10</b>	<b>30,18</b>	<b>0,10</b>
<b>Modus</b>	<b>3</b>	<b>83</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>79</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>88</b>	<b>0</b>
<b>Medián</b>	<b>3</b>	<b>83</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>79</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>81</b>	<b>0</b>
<b>Min</b>	<b>2</b>	<b>70</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>70</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>72</b>	<b>0</b>
<b>Max</b>	<b>3</b>	<b>90</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>84</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>88</b>	<b>1</b>

\*Výsledky jednotlivých měření zaznamenány v bodech, pokud není uvedeno jinak.

Z výsledku jednotlivých testů je zřejmé, že se potvrdil předpoklad nejlepší teploty vzduchu v sušící peci 115 °C, neboť takto vyšly mřížkový i estetický test nejlépe s průměrem 0 bodů. Vyšší teplota 125 °C vedla k hodnotám 0,1 u mřížkového i estetického testu, přičemž nižší hodnota vzduchu 60 °C znamenala výrazně horší mřížkový i estetický test s průměry 2,5 a 2,6 bodu. Tloušťka vrstvy v průměru nad 80 μm u obou vychýlených teplot vzduchu.

Pro zjištění, zdali je statisticky významný rozdíl mezi středními hodnotami tloušťky vrstvy při jednotlivých teplotách sušení byla použita metoda ANOVA s následujícími hypotézami:

H<sub>0</sub>: Střední hodnota tloušťky vrstvy je stejná pro všechny naměřené sady hodnot teplot vzduchu v sušící peci.

H<sub>1</sub>: Existují alespoň 2 soubory dat, v nichž je střední hodnota tloušťky vrstvy odlišná.

Tabulka 5.24: Výsledný parametr tloušťky vrstvy zpracovaný jednofaktorovou ANOVOU v závislosti na teplotě vzduchu

Faktor					
<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>	
60	10	808	80,8	51,0666667	
115	10	777	77,7	29,3444444	
125	10	812	81,2	30,1777778	

#### ANOVA

<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	73,4	2	36,7	0,99557922	0,382671068	3,3541
Všechny výběry	995,3	27	36,86296			
Celkem	1068,7	29				

Metodou ANOVA bylo zjištěno, že nejsou průkazné rozdíly mezi střední hodnotou souborů.

Na hladině významnosti 5 % tedy není hypotéza  $H_0$  zamítnuta.

Metoda multikriteriální analýzy vypočtena na základě vážených průměrů s váhami mřížkové zkoušky 0,5, tloušťky vrstvy 0,2 a estetického testu 0,3 porovnává výsledky měření na základě jednoho finálního ukazatele s nejlepší hodnotou 0 bodů. Tato metoda rovněž potvrdila předpoklad, že nejlepšího výsledku 0 bodů bylo dosaženo při teplotě sušení 115 °C. Následuje vyšší teplota s výsledkem 0,28 bodů. Nižší teplota dopadla výrazně hůře s průměrem 2,23 bodů. V tabulce č. 5.25 jsou zobrazeny detailní hodnoty.

Tabulka 5.25: Výsledné parametry naměřených testů zpracované multikriteriální analýzou v závislosti na teplotě vzduchu

Test*	Teplota vzduchu 60 °C	Teplota vzduchu 115 °C	Teplota vzduchu 125 °C
<b>Mřížková metoda</b>	1,25	<b>0</b>	0,05
<b>Tloušťka vrstvy</b>	0,20	<b>0</b>	0,20
<b>Estetický test</b>	0,78	<b>0</b>	0,03
<b>Suma</b>	<b>2,23</b>	<b>0</b>	<b>0,28</b>

\*Výsledky zobrazeny v bodech.

## 5.5 Kabina pro nanášení práškové vrstvy

Další zařízení, na kterém probíhalo měření je nanášecí kabina. Měřeny byly vybrané parametry doba nanášení, tlak vzduchu, uzemnění a napětí. Po absolvování celého procesu nanášení práškové vrstvy bylo měření vyhodnoceno pomocí 3 testů a následně statisticky posouzeno.

### 5.5.1 Doba nanášení

Doba nanášení je důležitý parametr, který stanovuje, jak dlouhou dobu byla nanášena prášková barva na ocelové dílce.

V tabulce č. 5.26 jsou zaznamenány naměřené hodnoty výsledných testů – mřížková zkouška (MZ), tloušťka nanesené vrstvy (TV) a estetický test (ET) v závislosti na jednotlivých dobách nanášení práškové barvy. Následně byly údaje statisticky zpracovány a zobrazeny hodnoty deskriptivní statistiky. Bodové hodnoty nabývají rozmezí 0 (nejlepší) až 5 (nejhorší).

Tabulka 5.26: Výsledné parametry naměřených testů (MT, TV, ET) v závislosti na době nanášení

Číslo měření	Doba nanášení 7 s			Doba nanášení 12 s			Doba nanášení 24 s		
	MT*	TV* (μm)	ET*	MT*	TV* (μm)	ET*	MT*	TV* (μm)	ET*
1	0	28	5	0	79	0	0	119	1
2	1	35	5	0	70	0	0	123	1
3	0	40	5	0	79	0	0	137	1
4	0	37	5	0	70	0	0	135	1
5	0	38	5	0	83	0	0	118	2
6	0	32	5	0	73	0	0	122	1
7	0	38	5	0	84	0	0	131	1
8	1	29	5	0	80	0	0	135	1
9	0	32	5	0	84	0	0	128	1
10	0	35	5	0	75	0	0	127	1
<b>Směr. O.</b>	<b>0,42</b>	<b>4,03</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>5,42</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>6,90</b>	<b>0</b>
<b>Průměr</b>	<b>0,2</b>	<b>34,4</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>77,7</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>127,5</b>	<b>1,10</b>
<b>Rozptyl</b>	<b>0,18</b>	<b>16,3</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>29,34</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>47,61</b>	<b>0</b>
<b>Modus</b>	<b>0</b>	<b>35</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>79</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>135</b>	<b>1</b>
<b>Medián</b>	<b>0</b>	<b>35</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>79</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>128</b>	<b>1</b>
<b>Min</b>	<b>0</b>	<b>28</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>70</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>118</b>	<b>1</b>
<b>Max</b>	<b>1</b>	<b>40</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>84</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>137</b>	<b>2</b>

\*Výsledky jednotlivých měření zaznamenány v bodech, pokud není uvedeno jinak.

Z výsledku jednotlivých testů je zřejmé, že se potvrdil předpoklad nejlepší doby nanášení 12 sekund, neboť takto vyšly mřížkový i estetický test nejlépe s průměrem 0 bodů.

Delší doba nanášení 24 sekund má rovněž výborný mřížkový test 0 bodů, avšak horší hodnotu estetického testu 1,1 bodu. Kratší doba nanášení vedla k relativně dobrému výsledku mřížkového testu 0,2 bodu, nicméně úplně propadl estetický test s průměrnou hodnotou 5. Tloušťka vrstvy ukázala výrazné rozdíly oproti standardu, neboť kratší doba nanášení ukázala průměrnou hodnotu 34,3 mikronů a delší doba nanášení 127,5 mikronů.

Pro zjištění, zdali je statisticky významný rozdíl mezi středními hodnotami tloušťky vrstvy při jednotlivých dobách nanášení byla použita metoda ANOVA s následujícími hypotézami:

H<sub>0</sub>: Střední hodnota tloušťky vrstvy je stejná pro všechny naměřené sady hodnot dob nanášení práškové barvy.

H<sub>1</sub>: Existují alespoň 2 soubory dat, v nichž je střední hodnota tloušťky vrstvy odlišná.

Tabulka 5.27: Výsledný parametr tloušťky vrstvy zpracovaný jednofaktorovou ANOVOU v závislosti na době nanášení

Faktor					
Výběr	Počet	Součet	Průměr	Rozptyl	
7	10	344	34,4	16,2666667	
12	10	777	77,7	29,3444444	
24	10	1275	127,5	47,6111111	

ANOVA						
Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	43408,4667	2	21704,23	698,46758	5,64E-24	3,3541
Všechny výběry	839	27	31,07407			
Celkem	44247,4667	29				

Metodou ANOVA bylo zjištěno, že jsou průkazné rozdíly mezi střední hodnotou souborů.

Na hladině významnosti 5 % tedy byla zamítnuta hypotéza  $H_0$  a přijata alternativní hypotéza  $H_1$ .

Metoda multikriteriální analýzy vypočtena na základě vážených průměrů s váhami mřížkové zkoušky 0,5, tloušťky vrstvy 0,2 a estetického testu 0,3 porovnává výsledky měření na základě jednoho finálního ukazatele s nejlepší hodnotou 0 bodů. Tato metoda rovněž potvrdila předpoklad, že nejlepší výsledek 0 bodů bylo dosaženo při době nanášení 12 sekund. Následuje vyšší doba nanášení 24 sekund s výsledkem 0,93 bodů. S odstupem nejhůře s hodnotou 2,20 bodů dopadla nižší doba nanášení 7 sekund. V tabulce č. 5.28 jsou zobrazeny detailní hodnoty.

Tabulka 5.28: Výsledné parametry naměřených testů zpracované multikriteriální analýzou v závislosti na době nanášení

Test*	Doba nanášení 7 sekund	Doba nanášení 12 sekund	Doba nanášení 24 sekund
<b>Mřížková metoda</b>	0,10	0	0
<b>Tloušťka vrstvy</b>	0,6	0	0,6
<b>Estetický test</b>	1,50	0	0,33
<b>Suma</b>	<b>2,20</b>	<b>0</b>	<b>0,93</b>

\*Výsledky zobrazeny v bodech.

## 5.5.2 Tlak vzduchu

Tlak vzduchu je důležitý parametr, který stanovuje, jakým tlakem celkového vzduchu v pistolích je vynášen práškový plast při aplikaci na ocelové dílce.

V tabulce č. 5.29 jsou zaznamenány naměřené hodnoty výsledných testů – mřížková zkouška (MZ), tloušťka nanesené vrstvy (TV) a estetický test (ET) v závislosti na jednotlivých tlacích vzduchu. Následně byly údaje statisticky zpracovány a zobrazeny hodnoty deskriptivní statistiky. Bodové hodnoty nabývají rozmezí 0 (nejlepší) až 5 (nejhorší).

Tabulka 5.29: Výsledné parametry naměřených testů (MT, TV, ET) v závislosti na tlaku vzduchu

Číslo měření	Tlak vzduchu 1,5 Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>			Tlak vzduchu 2,5 Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>			Tlak vzduchu 4,5 Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>		
	MT*	TV* (μm)	ET*	MT*	TV* (μm)	ET*	MT*	TV* (μm)	ET*
1	0	45	5	0	79	0	0	114	1
2	0	50	5	0	70	0	0	122	1
3	0	55	4	0	79	0	0	138	1
4	1	52	5	0	70	0	0	131	1
5	0	53	4	0	83	0	0	119	1
6	0	55	4	0	73	0	0	123	1
7	0	51	5	0	84	0	0	134	1
8	0	56	4	0	80	0	0	120	1
9	0	50	5	0	84	0	0	124	1
10	0	48	5	0	75	0	0	124	1
<b>Směr. O.</b>	<b>0,32</b>	<b>3,44</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>5,42</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>7,32</b>	<b>0</b>
<b>Průměr</b>	<b>0,1</b>	<b>51,5</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>77,7</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>124,9</b>	<b>1</b>
<b>Rozptyl</b>	<b>0,10</b>	<b>11,8</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>29,34</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>53,66</b>	<b>0</b>
<b>Modus</b>	<b>0</b>	<b>50</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>79</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>124</b>	<b>1</b>
<b>Medián</b>	<b>0</b>	<b>52</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>79</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>124</b>	<b>1</b>
<b>Min</b>	<b>0</b>	<b>45</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>70</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>114</b>	<b>1</b>
<b>Max</b>	<b>1</b>	<b>56</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>84</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>138</b>	<b>1</b>

\*Výsledky jednotlivých měření zaznamenány v bodech, pokud není uvedeno jinak.

Z výsledku jednotlivých testů je zřejmé, že se potvrdil předpoklad nejlepšího tlaku vzduchu 2,5 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>, neboť takto vyšly mřížkový i estetický test nejlépe s průměrem 0 bodu. Vyšší tlak vzduchu 4,5 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> vedl k hodnotě mřížkového testu 0 bodu s průměrnou hodnotou estetického testu 1 bod. V případě nižšího tlaku 1,5 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> vyšel estetický test výrazně hůře s průměrnou hodnotou 5 bodů. Tloušťka vrstvy ukázala výrazné rozdíly oproti standardu, neboť menší tlak vzduchu ukázal průměrnou hodnotu 51,5 mikronů a delší tlak vzduchu 124,9 mikronů.



Pro zjištění, zdali je statisticky významný rozdíl mezi středními hodnotami tloušťky vrstvy při jednotlivých tlacích vzduchu v nanášecích pistolích byla použita metoda ANOVA s následujícími hypotézami:

$H_0$ : Střední hodnota tloušťky vrstvy je stejná pro všechny naměřené sady hodnot tlaku vzduchu.

$H_1$ : Existují alespoň 2 soubory dat, v nichž je střední hodnota tloušťky vrstvy odlišná.

Tabulka 5.30: Výsledný parametr tloušťky vrstvy zpracovaný jednofaktorovou ANOVOU v závislosti na tlaku vzduchu

Faktor					
<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>	
1,5	10	515	51,5	11,8333333	
2,5	10	777	77,7	29,3444444	
4,5	10	1249	124,9	53,6555556	

ANOVA						
<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	27672,8	2	13836,4	437,706854	2,66339E-21	3,3541
Všechny výběry	853,5	27	31,61111			
Celkem	28526,3	29				

Metodou ANOVA bylo zjištěno, že jsou průkazné rozdíly mezi střední hodnotou souborů.

Na hladině významnosti 5 % tedy byla zamítnuta hypotéza  $H_0$  a přijata alternativní hypotéza  $H_1$ .

Metoda multikriteriální analýzy vypočtena na základě vážených průměrů s váhami mřížkové zkoušky 0,5, tloušťky vrstvy 0,2 a estetického testu 0,3 porovnává výsledky měření na základě jednoho finálního ukazatele s nejlepší hodnotou 0 bodů. Tato metoda rovněž potvrdila předpoklad, že nejlepšího výsledku 0 bodů bylo dosaženo při tlaku vzduchu 2,5  $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Následuje vyšší tlak vzduchu s výsledkem 0,9 bodu a poté nižší tlak vzduchu 1,5  $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  s hodnotou 1,63 bodu. V tabulce č. 5.31 jsou zobrazeny detailní hodnoty.

Tabulka 5.31: Výsledné parametry naměřených testů zpracované multikriteriální analýzou v závislosti na tlaku vzduchu

Test*	Tlak vzduchu 1,5 Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	Tlak vzduchu 2,5 Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	Tlak vzduchu 4,5 Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>
Mřížková metoda	0,05	0	0
Tloušťka vrstvy	0,20	0	0,60
Estetický test	1,38	0	0,30
<b>Suma</b>	<b>1,63</b>	<b>0</b>	<b>0,90</b>

\*Výsledky zobrazeny v bodech.

### 5.5.3 Uzemnění

Přítomnost uzemnění (uzemnění) je důležitý parametr, který stanovuje, zdali bylo přítomno uzemnění ocelových dílců v průběhu nanášení práškové barvy. Tato hodnota má pouze 2 možnosti – ANO/NE.

V tabulce č. 5.32 jsou zaznamenány naměřené hodnoty výsledných testů – mřížková zkouška (MZ), tloušťka nanesené vrstvy (TV) a estetický test (ET) v závislosti na přítomnosti uzemnění. Následně byly údaje statisticky zpracovány a zobrazeny hodnoty deskriptivní statistiky. Bodové hodnoty nabývají rozmezí 0 (nejlepší) až 5 (nejhorší).

Tabulka 5.32: Výsledné parametry naměřených testů (MT, TV, ET) v závislosti na uzemnění

Číslo měření	Uzemnění - ne			Uzemnění - ano		
	MT*	TV* (μm)	ET*	MT*	TV* (μm)	ET*
1	0	66	2	0	79	0
2	0	59	2	0	70	0
3	0	68	2	0	79	0
4	0	71	2	0	70	0
5	0	51	3	0	83	0
6	0	52	3	0	73	0
7	0	54	3	0	84	0
8	0	49	3	0	80	0
9	0	58	3	0	84	0
10	0	55	3	0	75	0
<b>Směr. O.</b>	<b>0</b>	<b>7,63</b>	<b>0,52</b>	<b>0</b>	<b>5,42</b>	<b>0</b>
<b>Průměr</b>	<b>0</b>	<b>58,3</b>	<b>2,60</b>	<b>0</b>	<b>77,7</b>	<b>0</b>
<b>Rozptyl</b>	<b>0</b>	<b>58,2</b>	<b>0,27</b>	<b>0</b>	<b>29,34</b>	<b>0</b>
<b>Modus</b>	<b>0</b>	<b>N/A</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>79</b>	<b>0</b>
<b>Medián</b>	<b>0</b>	<b>57</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>79</b>	<b>0</b>
<b>Min</b>	<b>0</b>	<b>49</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>70</b>	<b>0</b>
<b>Max</b>	<b>0</b>	<b>71</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>84</b>	<b>0</b>

\*Výsledky jednotlivých měření zaznamenány v bodech, pokud není uvedeno jinak.

Z výsledku jednotlivých testů je zřejmé, že se potvrdil předpoklad přítomnosti uzemnění, neboť takto vyšly mřížkový i estetický test s průměrem 0 bodů. Bez uzemnění vyšel mřížkový test s hodnotou 0 a estetický výrazně hůře s průměrem 2,6 bodu. Tloušťka vrstvy měřená bez uzemnění ukázala sníženou průměrnou hodnotu 58,3 mikrometru.

Pro zjištění, zdali je statisticky významný rozdíl mezi středními hodnotami tloušťky vrstvy při obou možnostech uzemnění byla použita metoda ANOVA s následujícími hypotézami:

$H_0$ : Střední hodnota tloušťky vrstvy je stejná pro všechny naměřené sady hodnot přítomnosti uzemnění.

$H_1$ : Existují alespoň 2 soubory dat, v nichž je střední hodnota tloušťky vrstvy odlišná.

Tabulka 5.33: Výsledný parametr tloušťky vrstvy zpracovaný jednofaktorovou ANOVOU v závislosti na uzemnění

Faktor					
<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>	
ne	10	583	58,3	58,233	
ano	10	777	77,7	29,344	

ANOVA						
<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	1881,8	1	1881,8	42,974	3,6869E-06	4,413873419
Všechny výběry	788,2	18	43,78888889			
Celkem	2670	19				

Metodou ANOVA bylo zjištěno, že jsou průkazné rozdíly mezi střední hodnotou souborů.

Na hladině významnosti 5 % tedy byla zamítnuta hypotéza  $H_0$  a přijata alternativní hypotéza  $H_1$ .

Metoda multikriteriální analýzy vypočtena na základě vážených průměrů s váhami mřížkové zkoušky 0,5, tloušťky vrstvy 0,2 a estetického testu 0,3 porovnává výsledky měření na základě jednoho finálního ukazatele s nejlepší hodnotou minima bodů. Tato metoda rovněž potvrdila předpoklad, že nejlepšího výsledku 0 bodů bylo dosaženo za přítomnosti uzemnění. V případě bez uzemnění je výsledkem 0,98 bodu. V tabulce č. 5.34 jsou zobrazeny detailní hodnoty.

Tabulka 5.34: Výsledné parametry naměřených testů zpracované multikriteriální analýzou v závislosti na uzemnění

Test*	Uzemnění - ne	Uzemnění - ano
Mřížková metoda	0	0
Tloušťka vrstvy	0,20	0
Estetický test	0,78	0
<b>Suma</b>	<b>0,98</b>	<b>0</b>

\*Výsledky zobrazeny v bodech.

#### 5.5.4 Nabíjecí napětí v aplikačním zařízení

Nabíjecí napětí je důležitý parametr, který stanovuje, jakým nabíjecím napětím elektrody aplikační pistole jsou nabíjeny práškové plasty při nanášení práškové barvy na ocelové dílce.

V tabulce č. 5.35 jsou zaznamenány naměřené hodnoty výsledných testů – mřížková zkouška (MZ), tloušťka nanesené vrstvy (TV) a estetický test (ET) v závislosti na jednotlivých nabíjecích napětích. Následně byly údaje statisticky zpracovány a zobrazeny hodnoty deskriptivní statistiky. Bodové hodnoty nabývají rozmezí 0 (nejlepší) až 5 (nejhorší).

Tabulka 5.35: Výsledné parametry naměřených testů (MT, TV, ET) v závislosti na nabíjecím napětí

Číslo měření	Nabíjecí napětí 60 kV			Nabíjecí napětí 80 kV			Nabíjecí napětí 100 kV		
	MT*	TV* (μm)	ET*	MT*	TV* (μm)	ET*	MT*	TV* (μm)	ET*
1	0	41	5	0	79	0	0	95	1
2	0	46	4	0	70	0	0	101	1
3	0	47	4	0	79	0	0	98	1
4	0	51	3	0	70	0	0	104	1
5	0	52	4	0	83	0	0	105	1
6	0	49	4	0	73	0	0	102	1
7	0	41	4	0	84	0	0	99	1
8	0	43	5	0	80	0	0	102	1
9	0	44	4	0	84	0	0	99	1
10	0	42	4	0	75	0	0	98	1
<b>Směr. O.</b>	<b>0</b>	<b>4,06</b>	<b>0,57</b>	<b>0</b>	<b>5,42</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>3,06</b>	<b>0</b>
<b>Průměr</b>	<b>0</b>	<b>45,60</b>	<b>4,10</b>	<b>0</b>	<b>77,70</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>100,30</b>	<b>1</b>
<b>Rozptyl</b>	<b>0</b>	<b>16,5</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>29,34</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>9,34</b>	<b>0</b>
<b>Modus</b>	<b>0</b>	<b>41</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>79</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>98</b>	<b>1</b>
<b>Medián</b>	<b>0</b>	<b>45</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>79</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>100</b>	<b>1</b>
<b>Min</b>	<b>0</b>	<b>41</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>70</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>95</b>	<b>1</b>
<b>Max</b>	<b>0</b>	<b>52</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>84</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>105</b>	<b>1</b>

\*Výsledky jednotlivých měření zaznamenány v bodech, pokud není uvedeno jinak.

Z výsledku jednotlivých testů je zřejmé, že se potvrdil předpoklad nejlepšího nabíjecího napětí 80 kV, neboť takto vyšly mřížkový i estetický test nejlépe s průměrem 0 bodů. Vyšší nabíjecí napětí 100 kV vedlo k nulové hodnotě mřížkového testu a hodnoty 1 při estetickém testu. Nižší nabíjecí napětí 60 kV vedlo k výbornému výsledku 0 v mřížkovém testu, avšak výrazně propadlo u estetického testu s hodnotou 4,1 bodu. Tloušťka vrstvy ukázala rozdíly oproti standardu, neboť nižší nabíjecí napětí 60 kV ukázalo průměrnou hodnotu 45,6 mikronů a vyšší nabíjecí napětí hodnotu 100,3 mikronů.

Pro zjištění, zdali je statisticky významný rozdíl mezi středními hodnotami tloušťky vrstvy při různých úrovních nabíjecího napětí byla použita metoda ANOVA s následujícími hypotézami:  
 $H_0$ : Střední hodnota tloušťky vrstvy je stejná pro všechny naměřené sady hodnot nabíjecího napětí.

$H_1$ : Existují alespoň 2 soubory dat, v nichž je střední hodnota tloušťky vrstvy odlišná.

Tabulka 5.36: Výsledný parametr tloušťky vrstvy zpracovaný jednofaktorovou ANOVOU v závislosti na nabíjecím napětí

Faktor				
<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>
60	10	456	45,6	16,48888889
80	10	777	77,7	29,34444444
100	10	1003	100,3	9,34444444

ANOVA						
<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	15110,87	2	7555,43333	410,7867499	6E-21	3,35413083
Všechny výběry	496,6	27	18,3925926			
Celkem	15607,47	29				

Metodou ANOVA bylo zjištěno, že jsou průkazné rozdíly mezi střední hodnotou souborů.

Na hladině významnosti 5 % tedy byla zamítnuta hypotéza  $H_0$  a přijata alternativní hypotéza  $H_1$ .

Metoda multikriteriální analýzy vypočtena na základě vážených průměrů s váhami mřížkové zkoušky 0,5, tloušťky vrstvy 0,2 a estetického testu 0,3 porovnává výsledky měření na základě jednoho finálního ukazatele s nejlepší hodnotou 0 bodů. Tato metoda rovněž potvrdila

předpoklad, že nejlepší výsledek 0 bodů bylo dosaženo při nabíjecím napětí 80 kV. Následuje vyšší nabíjecí napětí 100 kV s výsledkem 0,7 bodu a nižší nabíjecí napětí 60 kV s hodnotou 1,63 bodu. V tabulce č. 5.37 jsou zobrazeny detailní hodnoty.

Tabulka 5.37: Výsledné parametry naměřených testů zpracované multikriteriální analýzou v závislosti na nabíjecím napětí

Test*	Nabíjecí napětí 60 kV	Nabíjecí napětí 80 kV	Nabíjecí napětí 100 kV
<b>Mřížková metoda</b>	0	0	0
<b>Tloušťka vrstvy</b>	0,40	0	0,40
<b>Estetický test</b>	1,23	0	0,30
<b>Suma</b>	<b>1,63</b>	<b>0</b>	<b>0,70</b>

\*Výsledky zobrazeny v bodech.

## 5.6 Vytvrzovací pec

Poslední zařízení, na kterém probíhalo měření je vytvrzovací pec. Měřeny byly vybrané parametry doba vytvrzování a maximální teplota na povrchu ocelového dílce ve vytvrzovací peci. Po absolvování celého procesu nanášení práškové vrstvy bylo měření vyhodnoceno pomocí 3 testů a následně statisticky posouzeno.

### 5.6.1 Doba vytvrzování

Doba vytvrzování je důležitý parametr, který stanovuje po jak dlouhou dobu působil vzduch uvnitř vytvrzovací pece na ocelové dílce.

V tabulce č. 5.38 jsou zaznamenány naměřené hodnoty výsledných testů – mřížková zkouška (MZ), tloušťka nanesené vrstvy (TV) a estetický test (ET) v závislosti na jednotlivé doby vytvrzování. Následně byly údaje statisticky zpracovány a zobrazeny hodnoty deskriptivní statistiky. Bodové hodnoty nabývají rozmezí 0 (nejlepší) až 5 (nejhorší).

Tabulka 5.38: Výsledné parametry naměřených testů (MT, TV, ET) v závislosti na době vytvrzování

Číslo měření	Doba vytvrzování 10 min			Doba vytvrzování 18 min			Doba vytvrzování 30 min		
	MT*	TV* (μm)	ET*	MT*	TV* (μm)	ET*	MT*	TV* (μm)	ET*
<b>1</b>	2	73	1	0	79	0	0	76	1
<b>2</b>	2	75	1	0	70	0	0	72	0
<b>3</b>	3	82	1	0	79	0	0	83	1

Číslo měření	Doba vytvrzování 10 min			Doba vytvrzování 18 min			Doba vytvrzování 30 min		
	MT*	TV* (μm)	ET*	MT*	TV* (μm)	ET*	MT*	TV* (μm)	ET*
4	3	78	1	0	70	0	0	87	1
5	2	90	1	0	83	0	0	89	0
6	2	82	1	0	73	0	0	86	1
7	2	85	1	0	84	0	0	78	1
8	2	71	1	0	80	0	0	81	0
9	2	84	1	0	84	0	0	80	1
10	2	86	1	0	75	0	0	84	1
<b>Směr. O.</b>	<b>0,42</b>	<b>6,15</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>5,42</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>5,27</b>	<b>0,48</b>
<b>Průměr</b>	<b>2,2</b>	<b>81</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>77,7</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>81,6</b>	<b>0,7</b>
<b>Rozptyl</b>	<b>0,18</b>	<b>37,82</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>29,34</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>27,82</b>	<b>0,23</b>
<b>Modus</b>	<b>2</b>	<b>82</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>79</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>N/A</b>	<b>1</b>
<b>Medián</b>	<b>2</b>	<b>82</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>79</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>82</b>	<b>1</b>
<b>Min</b>	<b>2</b>	<b>71</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>70</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>72</b>	<b>0</b>
<b>Max</b>	<b>3</b>	<b>90</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>84</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>89</b>	<b>1</b>

\*Výsledky jednotlivých měření zaznamenány v bodech, pokud není uvedeno jinak.

Z výsledku jednotlivých testů je zřejmé, že se potvrdil předpoklad nejlepší doby vytvrzování 18 minut, neboť takto vyšly mřížkový i estetický test nejlépe s průměrem 0 bodů. Delší doba vytvrzení 30 minut má rovněž průměr mřížkového testu 0 bodu, avšak zaostává při estetickém testu s hodnotou 0,7 bodu. Nižší doba vytvrzování ukázala výrazně horší mřížkový test s hodnotou 2,2 bodu. Průměrná tloušťka vrstvy u nižší doby vytvrzování 81 mikrometrů a 81,6 mikrometrů u delší doby vytvrzování.

Pro zjištění, zdali je statisticky významný rozdíl mezi středními hodnotami tloušťky vrstvy při jednotlivých dobách vytvrzování byla použita metoda ANOVA s následujícími hypotézami:

H<sub>0</sub>: Střední hodnota tloušťky vrstvy je stejná pro všechny naměřené sady hodnot dob vytvrzování.

H<sub>1</sub>: Existují alespoň 2 soubory dat, v nichž je střední hodnota tloušťky vrstvy odlišná.

Tabulka 5.39: Výsledný parametr tloušťky vrstvy zpracovaný jednofaktorovou ANOVOU v závislosti na době vytvrzování

Faktor					
	<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>
	10	10	806	80,6	37,822
	18	10	777	77,7	29,344
	30	10	816	81,6	27,822

ANOVA						
Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	82,06667	2	41,03333333	1,2959	0,29012215	3,354130829
Všechny výběry	854,9	27	31,66296296			
<b>Celkem</b>	<b>936,9667</b>	<b>29</b>				

Metodou ANOVA bylo zjištěno, že nejsou průkazné rozdíly mezi střední hodnotou souborů.

Na hladině významnosti 5 % tedy není hypotéza  $H_0$  zamítnuta.

Metoda multikriteriální analýzy vypočtena na základě vážených průměrů s váhami mřížkové zkoušky 0,5, tloušťky vrstvy 0,2 a estetického testu 0,3 porovnává výsledky měření na základě jednoho finálního ukazatele s nejlepší hodnotou 0 bodů. Tato metoda rovněž potvrdila předpoklad, že nejlepšího výsledku 0 bodů bylo dosaženo při době vytvrzování 18 minut. Následuje vyšší doba vytvrzování 30 minut s výsledkem 0,21 bodu a nižší doba vytvrzování 10 minut s hodnotou 1,4 bodu. V tabulce č. 5.40 jsou zobrazeny detailní hodnoty.

Tabulka 5.40: Výsledné parametry naměřených testů zpracované multikriteriální analýzou v závislosti na době vytvrzování

Test*	Doba vytvrzování 10 min	Doba vytvrzování 18 min	Doba vytvrzování 30 min
<b>Mřížková metoda</b>	1,10	0	0
<b>Tloušťka vrstvy</b>	0	0	0
<b>Estetický test</b>	0,30	0	0,21
<b>Suma</b>	<b>1,40</b>	<b>0</b>	<b>0,21</b>

\*Výsledky zobrazeny v bodech.

## 5.6.2 Maximální teplota na povrchu ocelového dílce při vytvrzování

Teplota na povrchu ocelového dílce je důležitý parametr, který stanovuje, jakou maximální teplotou na povrchu působil vzduch na ocelové dílce.

V tabulce č. 5.41 jsou zaznamenány naměřené hodnoty výsledných testů – mřížková zkouška (MZ), tloušťka nanesené vrstvy (TV) a estetický test (ET) v závislosti na jednotlivé doby vytvrzování. Následně byly údaje statisticky zpracovány a zobrazeny hodnoty deskriptivní statistiky. Bodové hodnoty nabývají rozmezí 0 (nejlepší) až 5 (nejhorší).



Tabulka 5.41: Výsledné parametry naměřených testů (MT, TV, ET) v závislosti na maximální teplotě na povrchu dílce

Číslo měření	Max. teplota materiálu na povrchu 120 °C			Max. teplota materiálu na povrchu 170 °C			Max. teplota materiálu na povrchu 210 °C		
	MT*	TV* (μm)	ET*	MT*	TV* (μm)	ET*	MT*	TV* (μm)	ET*
1	4	72	0	0	79	0	0	78	3
2	4	86	1	0	70	0	0	77	3
3	4	87	0	0	79	0	0	85	2
4	4	73	1	0	70	0	0	81	3
5	4	70	0	0	83	0	0	81	3
6	4	90	1	0	73	0	0	71	3
7	4	81	0	0	84	0	0	81	3
8	4	90	0	0	80	0	0	84	2
9	4	78	0	0	84	0	0	75	3
10	4	72	0	0	75	0	0	71	3
SO	0,00	7,94	0	0	5,42	0	0	4,93	0,42
Průměr	4,0	79,9	0	0	77,7	0	0	78,4	2,8
Rozptyl	0,00	62,99	0	0	29,34	0	0	24,27	0,18
Modus	4	72,00	0	0	79,00	0	0	81,00	3
Medián	4	79,50	0	0	79,00	0	0	79,50	3
Min	4	70	0	0	70	0	0	71	2
Max	4	90	1	0	84	0	0	85	3

\*Výsledky jednotlivých měření zaznamenány v bodech, pokud není uvedeno jinak.

Z výsledku jednotlivých testů je zřejmé, že se potvrdil předpoklad nejlepší maximální teploty na povrchu 170 °C, neboť takto vyšly mřížkový i estetický test nejlépe s průměrem 0 bodů. Vyšší maximální teplota na povrchu dílce 210 °C má rovněž průměr mřížkového testu 0 bodu, avšak zaostává při estetickém testu s průměrnou hodnotou 2,8 bodu. Nižší doba vytvrzování ukázala výrazně horší mřížkový test s průměrnou hodnotou 4 body. Průměrná tloušťka vrstvy pod 80 μm u obou teplot.

Pro zjištění, zdali je statisticky významný rozdíl mezi středními hodnotami tloušťky vrstvy při jednotlivých maximálních teplotách na povrchu dílce při vytvrzování byla použita metoda ANOVA s následujícími hypotézami:

H<sub>0</sub>: Střední hodnota tloušťky vrstvy je stejná pro všechny naměřené sady hodnot maximální teploty na povrchu dílce při vytvrzování.

H<sub>1</sub>: Existují alespoň 2 soubory dat, v nichž je střední hodnota tloušťky vrstvy odlišná.

Tabulka 5.42: Výsledný parametr tloušťky vrstvy zpracovaný jednofaktorovou ANOVOU v závislosti na maximální teplotě na povrchu dílce

Faktor					
<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>	
0	10	799	79,9	62,98888889	
20	10	777	77,7	29,34444444	
30	10	784	78,4	24,26666667	

ANOVA						
<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	25,26666667	2	12,63333333	0,32504288	0,725284	3,354131
Všechny výběry	1049,4	27	38,86666667			
<b>Celkem</b>	<b>1074,666667</b>	<b>29</b>				

Metodou ANOVA bylo zjištěno, že nejsou průkazné rozdíly mezi střední hodnotou souborů.

Na hladině významnosti 5 % tedy není hypotéza  $H_0$  zamítnuta.

Metoda multikriteriální analýzy vypočtena na základě vážených průměrů s váhami mřížkové zkoušky 0,5, tloušťky vrstvy 0,2 a estetického testu 0,3 porovnává výsledky měření na základě jednoho finálního ukazatele s nejlepší hodnotou 0 bodů. Tato metoda rovněž potvrdila předpoklad, že nejlepšího výsledku 0 bodů bylo dosaženo při maximální teplotě na povrchu dílce 170 °C. Následuje vyšší hodnota maximální teploty na povrchu dílce 210 °C s výsledkem 0,84 bodu a nižší hodnota maximální teploty na povrchu dílce 210 °C s výsledkem 2,09 bodu. V tabulce č. 5.43 jsou zobrazeny detailní hodnoty.

Tabulka 5.43: Výsledné parametry naměřených testů zpracované multikriteriální analýzou v závislosti na maximální teplotě na povrchu dílce

Test*	Maximální teplota na povrchu dílce 120 °C	Maximální teplota na povrchu dílce 170 °C	Maximální teplota na povrchu dílce 210 °C
<b>Mřížková metoda</b>	2,00	0	0
<b>Tloušťka vrstvy</b>	0	0	0
<b>Estetický test</b>	0,09	0	0,84
<b>Suma</b>	<b>2,09</b>	<b>0</b>	<b>0,84</b>

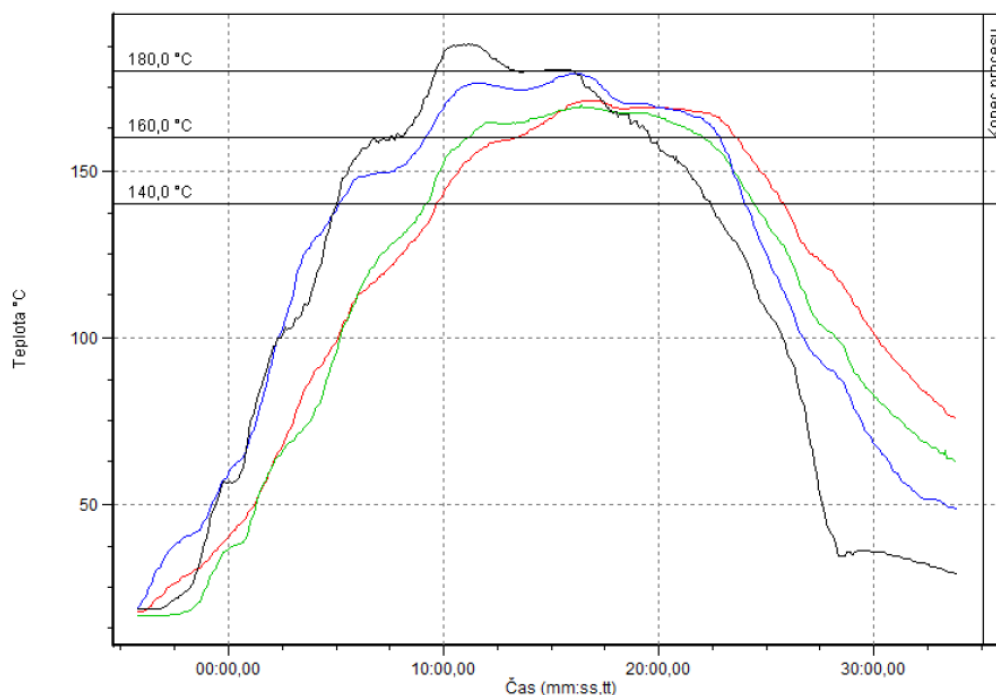
\*Výsledky zobrazeny v bodech.

Na následujících obrázcích a tabulkách jsou zobrazeny počítačové výstupy ze všech 3 průběhů měření, kde jsou barevně rozlišeny jednotlivé měřicí sondy. Červenou a zelenou sondou byla měřena teplota na povrchu ocelového dílce, modrou a zelenou poté teplotu vzduchu. Při nižší teplotě na povrchu 120 °C nebyla splněna podmínka koeficientu datapaq přes 100 bodů.

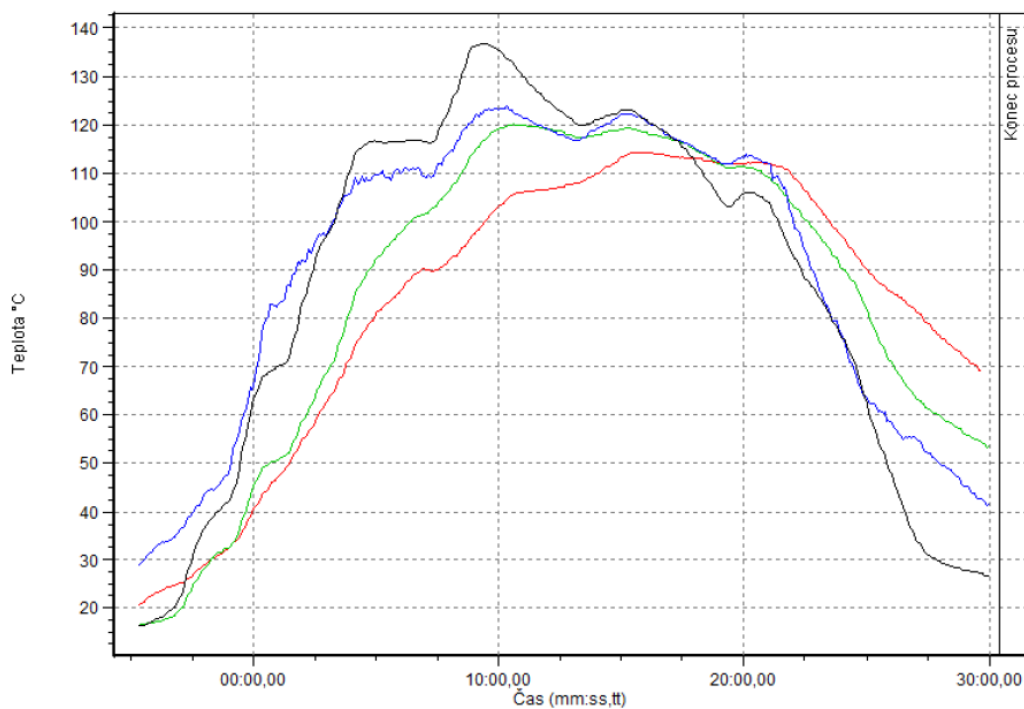
Obrázek 5.1: Praktická ukázka rozmístění sond při měření



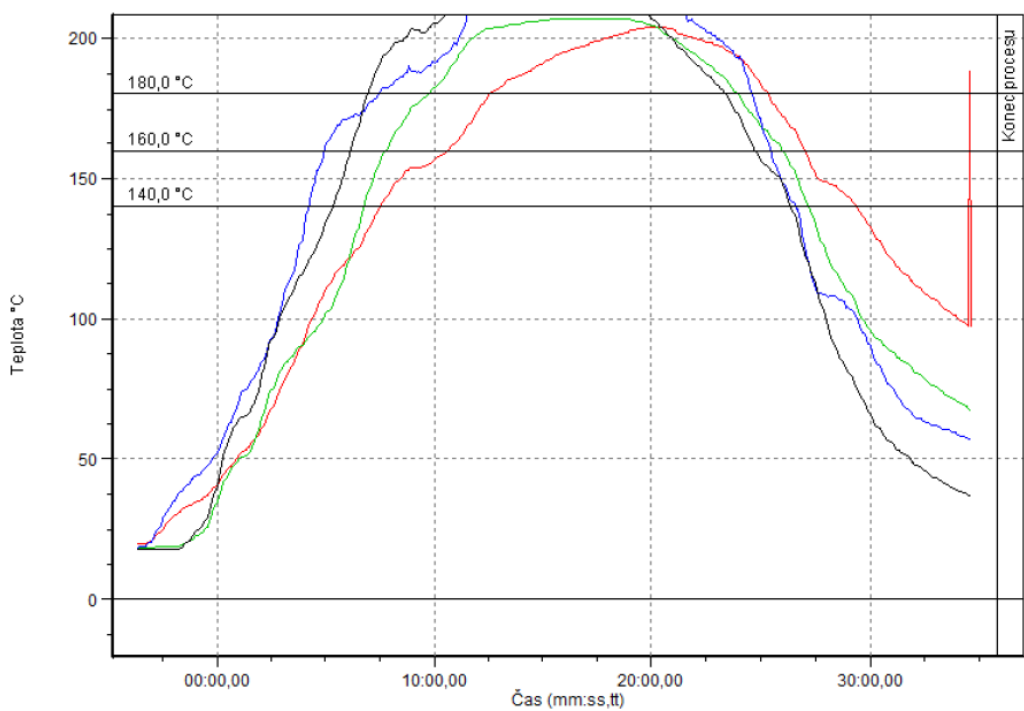
Obrázek 5.2: Průběh měření teploty uvnitř vytvrzovací pece při maximální teplotě na povrchu ocelového dílce 170 °C



Obrázek 5.3: Průběh měření teploty uvnitř vytvrzovací pece při maximální teplotě na povrchu ocelového dílce 120 °C



Obrázek 5.4: Průběh měření teploty uvnitř vytvrzovací pece při maximální teplotě na povrchu ocelového dílce 210 °C



## 5.7 Diskuse

Základem pro optimalizaci procesu práškového lakování plastů je klíčová kvalitní předúprava. Povrchy určené k nanášení plastů jsou často kontaminovány předchozími technologickými operacemi. Pouze vhodně zvolená forma předúpravy zajistí odstranění těchto nežádoucích nečistot z povrchu materiálu. Nedostatečná předúprava je příčinou nízké přilnavosti, tvorby puchýřů a časné koroze nátěru. (Cong & Fellner, n.d.; Karaoglan & Ozden, 2021a; Mojtaba Mirabedini et al., 2002b) Mechanická předúprava zlepšuje podmínky adheze (Blažek, 2009).

Podle (Klimeš, 2003) tryskání vede k odstranění nečistot. Podle charakteru materiálu a stupně znečištění se volí vhodné brusivo. Nejčastěji se volí kovový granulát o zrnitosti 0,4 až 0,8 mm (Mohyla, 1995). Z technologického hlediska jsou častou příčinou defektů na plastovém povlaku nekvalitní předúprava. (Kreibich & Kudláček, 2020) Chemická předúprava je volba vhodného média ve vztahu k povaze materiálu mnohem složitější než mechanická. Jednou z nejvyužívanějších metod je odmašťování (Withy et al., 2012). Důležitá je kontrola kvality mechanické předúpravy i důkladného odmaštění po celé ploše povrchu, kontrola teploty a doby expozice chemické předúpravy včetně potřebného počtu následných oplachů a neméně důležitá je rovněž kontrola teploty v sušící peci, tak aby byl materiál řádně osušený. (Mindoš & Geiplová, n.d.; Svobodová & Kuśmierczak, 2013) Při nedostatečném uzemnění materiálu se na jeho povrchu vytvoří přenesený záporný náboj, který odpuzuje záporně nabitě částice prášku. Tento nežádoucí efekt vede k tomu, že barva nepřilne k povrchu materiálu a její množství bylo nedostatečné. (Bajat et al., 2010b; Sedláček, 1992) Orange peel effect je vadou povlaku, která vizuálně připomíná pomerančovou kůru. Nejčastější příčinou tohoto efektu je příliš vysoká tloušťka vrstvy, špatné napětí stříkací pistole, příliš nízká vzdálenost aplikačního zařízení od ošetřovaného materiálu. (*Přesné Měření Tloušťky Powlaků*, 2015; Reichert et al., 2008) Pokud stéká povlak z povrchu materiálu je důvodem příliš rychlý náběh teploty, případně velká vrstva prášku. (Kreibich & Kudláček, 2020)

Vhodně zvolená teplota a čas tepelného zpracování je odvislá od tloušťky, tepelné vodivosti a tvaru materiálu. Nepřiměřená teplota vede k příliš nízké adhezi povlaku. Podstatnou roli hraje také průběh nárůstu teploty vytvrzovaného povlaku. Nežádoucím efektem pak je nestejná kvalita povlaku. (Kreibich, n.d.; Prasad et al., 2016) Pokud dojde v průběhu celého technologického procesu k nedodržení, byť jediného postupu, může být celý proces degradován a výsledný povrch pak nesplňuje nejen požadovaný estetický vzhled, nýbrž i ostatní požadované technologické vlastnosti. V konečném důsledku pak nežádoucí defekty vedou ke koroznímu napadení podkladového materiálu. Lokální oprava těchto vad je bez zhoršení

dekorativních vlastností velmi obtížná a často nezbývá, než povlak sejmout a celý technologický proces včetně předúpravy provést znovu. (Lee & Lee, 2016; Mindoš & Geiplová, n.d.)

## 6 Závěry a doporučení pro využití poznatků v praxi nebo další rozvoj oboru

V této kapitole je závěrečné shrnutí konkrétních výsledků jednotlivých experimentálních měření strukturovaných po jednotlivých strojích a parametrech.

První zařízení, na kterém bylo prováděno experimentální měření bylo tryskací zařízení, které bylo v této práci představitelem mechanické předúpravy. Měřeny byly parametry doba otryskávání a rychlost abraziva.

U parametru doby otryskání potvrdila výchozí hodnota 5 minut předpoklady nejlepší hodnoty tohoto parametru. Následovanou delší dobou otryskání 15 minut s hodnotou multikriteriální analýzy 0,08 bodu. Dále pak kratší dobou otryskání 2 minut s hodnotou 0,24 bodu. Výrazně hůře dopadla hodnota nulové doby tryskání, která ztrácela hlavně v estetickém testu, nicméně s hodnotou multikriteriální analýzy 0,85 bodu. Výsledky ukázaly, že vliv parametru doby otryskání na finální výsledky nalakovaných dílců může být označen jako spíše menší za předpokladu, že otryskání proběhlo. Z ekonomického pohledu se v případě snížené doby otryskání jedná o možnou úsporu energií za předpokladu, že by požadavky na kvalitu povrchu lakovaného dílce akceptovaly i mírně zhoršený výsledek kompenzovaný nižší cenou. V případě nulové doby otryskání by platil stejný předpoklad s ještě nižší cenou i kvalitou, která však může být pro spousty použití dostatečná.

Měření u parametru rychlosti abraziva potvrdilo předpoklady s nejlepší hodnotou  $72 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a následovanou vyšší rychlostí otryskání  $90 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  s hodnotou multikriteriální analýzy 0,16 bodu. Dále pak nižší rychlost otryskání  $54 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  s hodnotou 0,21 bodu. Veškeré hodnoty u tohoto parametru jsou blízké nule a vliv rychlosti abraziva na finální výsledky nalakovaného dílce může být označen jako relativně menší. Při ekonomickém zhodnocení tohoto parametru byly při nižší i vyšší rychlosti abraziva vyzkoumány velmi podobné výsledky, přičemž energetické náklady se mění pouze minimálně. Při vyšších rychlostech dochází k častější potřebě doplnění abraziva, což finančně prodražuje provoz.

Druhým měřeným strojem bylo odmašťovací zařízení, které je zástupcem chemické předúpravy. V tomto případě byly měřeny parametry doba odmašťování, teplota odmašťovací lázně a koncentrace odmašťovací lázně.

U parametru doby odmašťování potvrdila výchozí hodnota 7 minut předpoklady nejlepší hodnoty tohoto parametru. Následovanou delší dobou odmašťování 11 minut s hodnotou multikriteriální analýzy 0,13 bodu. Výrazně hůře pak skončila kratší doba odmašťování 3

minuty s hodnotou 0,84 bodu. S velkým odstupem dopadla hodnota nulové doby odmašťování, která ztrácela hlavně v mřížkovém i estetickém testu a hodnotou 2,75 bodu je absolutně nedostatečná. Výsledky ukázaly, že vliv parametru doby odmašťování na finální výsledky nalakovaných dílců může být označen jako významný a s poklesem doby odmašťování klesá i finální výsledek s extrémní hodnotou, pokud by doba odmašťování byla 0 minut. Z ekonomického pohledu má nižší doba odmaštění snížené požadavky na energie, avšak kvalita povrchu dílce byla více ovlivněna. Nulová doba odmaštění vykazovala téměř nulové náklady, ale rovněž i výrazně horší výsledky. Ty by vzhledem k počtu neakceptovaných dílců nevykompenzovala ani nižší prodejní cena. V tomto případě se tedy ekonomicky vyplatí odmaštění provést, případně snížit dobu odmaštění na 6 minut v závislosti na požadované kvalitě.

Dalším měřeným parametrem byla teplota odmašťovací lázně, kde byly opět potvrzeny předpoklady s nejlepší hodnotou teploty 40 °C. Následovanou vyšší teplotou 50 °C s hodnotou multikriteriální analýzy 0,31 bodu. Dále pak nižší teplota odmašťovací lázně 25 °C s hodnotou 2,26 bodu. Tento parametr opět potvrdil, že nižší teplota odmašťovací lázně je nedostatečná podobně jako kratší doba odmašťování. Nižší hodnota tohoto parametru je ekonomicky vzato velmi podobná jako doba odmaštění a snížená teplota odmašťovací lázně vede k výrazně horším výsledkům. Ty se ekonomicky nevyplatí i přes úsporu nákladů na energie. Vyšší hodnota parametru vede ke zhoršení výsledků i vyšším nákladům na energie.

Posledním měřeným parametrem tohoto zařízení je koncentrace odmašťovací lázně, kde byl rovněž potvrzen předpoklad nejlepší koncentrace 1,2 %, následovaný vyšší koncentrací 2 % s hodnotou multikriteriální analýzy 0,11 bodu a nižší 0,6 % s hodnotou 1,14 bodu. Tento parametr opět potvrdil, že nižší koncentrace odmašťovací lázně je nedostatečná podobně jako zkracující se doba odmašťování a teplota odmašťovací lázně. Ekonomické zhodnocení tohoto parametru vykazuje výrazně menší vliv koncentrace roztoku na finální výsledek než ostatní parametry na tomto zařízení. Z ekonomických důvodů je možné snížit koncentraci odmašťovací lázně za předpokladu mírně nižší kvality povrchu finálního dílce a snížených nákladů na roztok. Třetím měřeným strojem bylo oplachové zařízení, které je součástí chemické předúpravy. V tomto případě byl měřen parametr doba oplachu.

U parametru doby oplachu potvrdila výchozí hodnota 9 minut předpoklady nejlepší hodnoty tohoto ukazatele a následovanou delší dobou oplachu 15 minut s hodnotou multikriteriální analýzy 0,20 bodu. Mřížkový i estetický test dopadly stejně při rozdílu tloušťky vrstvy. Nižší doba oplachu 4 minuty s hodnotou 0,21 bodu však přinesla horší výsledek mřížkového testu.



Ještě hůře dopadla hodnota nulová doba oplachu, která ztrácela hlavně v mřížkovém testu, s hodnotou multikriteriální analýzy 0,55 bodu. Výsledky ukázaly, že vliv parametru doba oplachu na finální výsledky nalakovaných dílců může být označen jako relativně významný s tím, že delší doba oplachu znamená stejné výsledky mřížkového i estetického testu. Ekonomické zhodnocení vede k možnosti snížení doba oplachu, který má omezený vliv na finální výsledek. Náklady na energie a vodu mohou vést k celkové finální úspoře za předpokladů akceptace mírně nižší finální kvality povrchu v závislosti na uplatnění.

Čtvrtým měřeným strojem bylo sušící zařízení, které je posledním zástupcem chemické předúpravy. V tomto případě byly měřeny parametry doba sušení a teplota vzduchu v sušící peci.

U parametru doba sušení potvrdila výchozí hodnota 15 minut předpoklady nejlepší hodnoty tohoto parametru stejně tak jako delší doba sušení 30 minut s hodnotou multikriteriální analýzy 0 bodu. Výrazně hůře pak skončila kratší dobou sušení 8 minut s hodnotou 1,59 bodu. S velkým odstupem dopadla hodnota nulové doba sušení, která ztrácela hlavně v mřížkovém, ale i estetickém testu a hodnotou 3,19 bodu je absolutně nedostatečná. Výsledky ukázaly, že vliv parametru doba sušení na finální výsledky nalakovaných dílců může být označen jako významný a s poklesem doba sušení významně klesá i finální výsledek s extrémní hodnotou, pokud by doba sušení byla 0 minut. Delší doba sušení na druhou stranu znamená shodné výsledky jako optimální doba sušení. Ekonomické zhodnocení vede k jednoznačnému závěru, že případě tohoto parametru delší doba sušení vede ke stejné kvalitě povrchu finálních dílců, avšak se zvýšenými náklady na energie. Nižší doba sušení vykazuje již velmi zhoršené výsledky, přičemž nulová doba sušení je absolutně nedostatečná. V tomto případě se tedy ekonomicky nevyplatí snižovat dobu sušení za cenu snížených energií.

Posledním měřeným parametrem byla teplota vzduchu v sušící peci, kde byly opět potvrzeny předpoklady s nejlepší hodnotou teploty vzduchu 115 °C následovanou vyšší teplotou 125 °C s hodnotou multikriteriální analýzy 0,28 bodu. Dále pak nižší teplota vzduchu 60 °C s hodnotou 2,23 bodu. Tento parametr opět potvrdil, že nižší teplota vzduchu v sušící peci je nedostatečná podobně jako zkracující se doba sušení. Ekonomické zhodnocení tohoto parametru je velmi podobné době sušení, neboť i tady se ekonomicky nevyplatí snižování teploty vzduchu s cílem nižších nákladů na energie.

Pátým měřeným strojem byla kabina pro nanášení práškové vrstvy, která zajišťuje samotnou aplikaci. V tomto případě byly měřeny parametry doba nanášení práškové barvy, velikost tlaku v pistolích, přítomnost uzemnění a velikost nabíjecího napětí v aplikačním zařízení.

U parametru doby nanášení práškové barvy potvrdila výchozí hodnota 12 sekund předpoklady nejlepší hodnoty tohoto parametru následovanou delší dobou nanášení 24 sekund s výrazně horší hodnotou multikriteriální analýzy 0,93 bodu. Ještě hůře pak skončila kratší doba nanášení 7 sekund s hodnotou 2,2 bodu, kde propadl hlavně estetický test z důvodu nedostatečného množství barvy, což potvrzuje i test tloušťky vrstvy. Výsledky ukázaly, že vliv parametru doby nanášení na finální výsledky nalakovaných dílců může být označen jako významný. U tohoto parametru je rovněž důležitá tloušťka vrstvy, která pozitivně koreluje s časem nanášení. Ekonomické zhodnocení tohoto parametru vede k závěru, že nižší doba nanášení umožní snížení nákladů na energie i práškovou barvu, nicméně finální výsledek je velmi zhoršený. Vyšší doba nanášení vede ke zvýšení nákladů a zároveň snížení finální kvality.

Dalším měřeným parametrem byl tlak vzduchu v aplikačních pistolích, kde byly opět potvrzeny předpoklady s nejlepší hodnotou tlaku vzduchu  $2,5 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  následovaný vyšším tlakem vzduchu  $4,5 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  s hodnotou multikriteriální analýzy 0,90 bodu. Při této hodnotě vyšel zhoršený estetický test, a hlavně test tloušťky vrstvy, která byla výrazně vyšší. Nižší tlak vzduchu  $1,5 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  s výsledkem 1,63 bodu pak snižoval hlavně estetický test. Ekonomické zhodnocení tohoto parametru vede k závěru, že snížení tlaku vzduchu v pistolích vede za cenu nižších nákladů na energie ke zhoršení hlavně estetického testu. V tomto případě by úspora energií nevykompenzovala výrazně horší kvalitu. Počet finálně akceptovaných dílců by byl nižší.

V případě měřeného parametru přítomnosti uzemnění dílců byly opět potvrzeny předpoklady kladného výsledku přítomnosti uzemnění. Bez uzemnění vyšla multikriteriální analýza s hodnotou 0,98 bodu, kterou snižoval estetický test. Jednorázové, relativně nízké, náklady na uzemnění vedou k jednoznačnému ekonomickému závěru o ekonomickém smyslu využití uzemnění. Další výhodou jsou prakticky nulové provozní náklady.

Dalším měřeným parametrem bylo nabíjecí napětí v aplikačním zařízení, kde byly opět potvrzeny předpoklady s nejlepší hodnotou nabíjecího napětí 80 kV následovaný vyšším nabíjecím napětím 100 kV s hodnotou multikriteriální analýzy 0,70 bodu. Při této hodnotě vyšel zhoršený estetický test. Rovněž tak i test tloušťky vrstvy, která byla výrazně vyšší. Nižší hodnotu nabíjecího napětí 60 kV s výsledkem 1,63 bodu pak snižoval hlavně estetický test. V tomto parametru nabízí ekonomické zhodnocení jednoznačný závěr o minimální nákladové úspoře při využití sníženého nabíjecího napětí výměnou za relativně výrazně sníženou kvalitu finálních povrchů dílců.

Šestým a posledním měřeným zařízením byla vytvrzovací pec, která zajišťuje finální vytvrzení jakožto poslední část procesu elektrostatického nanášení plastů. V tomto případě byly měřeny parametry doba vytvrzování měřených dílců a teplota vzduchu na povrchu měřených dílců.

U parametru doby vytvrzování potvrdila výchozí hodnota 18 minut předpoklady nejlepší hodnoty tohoto parametru následovanou delší dobou vytvrzování 30 minut s hodnotou multikriteriální analýzy 0,21 bodu. Dále pak kratší dobou vytvrzení 10 minut s hodnotou 1,40 bodu, kterou ovlivnil hlavně výrazně zhoršený mřížkový test. Ekonomické zhodnocení tohoto parametru vede k možnosti snížení nákladů na energie výměnou za mírně sníženou kvalitu finálního dílce. Opět záleží na využití konkrétního dílce. Delší doba vytvrzování ekonomicky smysl nedává, neboť vykazuje zvýšené náklady i horší finální kvalitu.

Posledním měřeným parametrem byla maximální teplota na povrchu ocelového dílce ve vytvrzovací peci, kde byly opět potvrzeny předpoklady s nejlepší hodnotou maximální teplota na povrchu ocelového dílce 170 °C následovanou vyšší teplotou 210 °C s hodnotou multikriteriální analýzy 0,84 bodu. Dále pak nižší maximální teplota na povrchu ocelového dílce 120 °C s hodnotou 2,09 bodu. Tento parametr opět potvrdil, že nižší maximální teplota na povrchu ocelového dílce ve vytvrzovací peci je nedostatečná podobně jako zkracující se doba vytvrzování. Ekonomické zhodnocení posledního parametru opět vede k možnosti snížení maximální teploty na povrchu dílce vedoucí k snížení nákladů na energie. Na druhou stranu je zhoršen výsledek testů a opět záleží, jaké budoucí využití má konkrétní ocelový dílec.

Hypotéza č. 1 ověří předpoklad, že nárůst rychlosti abraziva a prodloužení doby otryskávání je přímo úměrné kvalitě estetického vzhledu.

Dle výsledků měření byla tato hypotéza  $H_1$  potvrzena od 0 minut do doby otryskání mezi 5 a 15 minutami, kde spolu s nárůstem rychlosti abraziva naměřené výsledky estetického testu začaly následně mírně klesat.

Hypotéza č. 2 ověří předpoklad, že kvalita přilnavost nanesené vrstvy k povrchu dílce je přímo závislá na rostoucí době a teplotě odmašťování.

Dle výsledků měření byla tato hypotéza  $H_1$  potvrzena, neboť se průměrná hodnota mřížkového testu od doby odmašťování 0 minut až 7 minut spolu s rostoucí teplotou až směrem k 50 °C neustále zlepšovala. Při 11 minutách a 50 °C se začaly hodnoty mřížkového testu zhoršovat.

Hypotéza č. 3 ověří předpoklad, že při elektrostatickém nanášení plastů je provedení odmaštění pro finální kvalitu povrchu ocelového dílce významnější než provedení sušení.

Dle výsledků měření nebyla tato hypotéza  $H_1$  potvrzena, neboť vynechání odmaštění vedlo k hodnotě multikriteriální analýzy 2,75 bodu a vynechání sušení 3,19 bodu. Je tedy přijata alternativní hypotéza  $H_0$ .

Hypotéza č. 4 ověří předpoklad, že při úspoře nákladů při nižší vypalovací teplotě na povrchu dílce zůstane zachována požadovaná kvalita nanesené vrstvy. Dle výsledků měření nebyla tato hypotéza  $H_1$  potvrzena, neboť snížení vypalovací teploty na 120 °C vedlo k výraznému zhoršení mřížkové zkoušky a hodnota multikriteriální analýzy ukázala 2,09. Je tedy přijata alternativní hypotéza  $H_0$ .

Z hlediska celkového ekonomického posouzení nákladové efektivity vede snížení hodnot jednotlivých parametrů k rozdílnému snížení nákladů za energie a další nákladové vstupy. V případě snížené teploty vzduchu v sušící a vytvrzovací peci jsou úspory nákladů výrazně vyšší než v při snížení rychlosti abraziva v tryskacím zařízení, či snížení nabíjecího napětí na aplikačním zařízení. Požadovaná kvalita finálně nalakovaného ocelového dílce rovněž nabývá různých úrovní dle konkrétního způsobu využití. Lze konstatovat, že mírné snížení hodnot jednotlivých parametrů vede ke snížení kvality povrchu. V konkrétních situacích, kde je vyžadována vysoká kvalita, by takové výsledky nebyly akceptovány. Ve specifických situacích to však může být i tak považováno za splnění požadavků na kvalitu. Tyto požadavky jsou rozdílné z hlediska účelu, prostředí, ale i teritoriálního zaměření.

Praktický dopad získaných výsledků je posouzení parametrů a jejich jednotlivých vlivů na finální kvalitu povrchu. Dle výsledků měření bylo zjištěno, že největší vliv na kvalitu povrchu finálně nalakovaného ocelového dílce má kvalitně zpracované odmaštění a následné usušení ocelových dílců, kde výsledek je funkcí dob trvání a teplot médií. Následováno vhodnou dobou nanášení práškové barvy a vytvrzením na požadovanou teplotu. V případě vytvrzování se opět jedná o funkci doby vytvrzování a teploty vzduchu v peci. U některých běžně dodávaných ocelových dílců není nutné provádět mechanickou předúpravu, neboť její vliv na finální výsledek je relativně nevýznamný. Z ekonomického hlediska jsou pak ušetřeny náklady na energii pro provoz stroje, náklady na obnovu využívaného abraziva a v neposlední řadě i mzda pracovníka obsluhy stroje.

Výsledky práce mohou být přímo využity v praxi nebo sloužit pro další rozvoj oboru jako zdroj informací pro další výzkum při měření např. odlišných parametrů procesu elektrostatického nanášení plastů. Případně v kombinaci s použitím jiného typu materiálu, práškové barvy či použitých technických zařízení. Tento vědecký obor rozšířený o další podobná měření má jistě spousty dalších příležitostí pro další rozvoj.

Publikační a činnost a konference související s tématem disertační práce:

Neškudla, M.; Jeníček, L.; Malat'ák, J.; **Determining the suitability of various surface treatment methods with control of the blasting time with respect to the quality of powder coating.** Acta Technologica Agriculturae 2023 (JCI 2021 = 0.43)

22<sup>nd</sup> International Conference of Young Scientists ICYS 2020, Prague, Czech Republic

XXIII. ročník Medzinárodnej vedeckej konferencie mladých, Zvolen, Slovakia

Publikační činnost a spolupráce na projektech:

JENÍČEK, Lukáš, NEŠKUDLA, Michal, MALAŤÁK, Jan, VELEBIL, Jan and PASSIAN, Luboš, 2021. **Spruce and Barley Elemental and Stochiometric Analysis Affected by the Impact of Pellet Production and Torrefaction.** Acta Technologica Agriculturae. 1 December 2021. Vol. 24, no. 4, pp. 166–172. DOI 10.2478/ATA-2021-0028.

JENÍČEK, Lukáš, TUNKLOVÁ, Barbora, MALAT'ÁK, Jan, NEŠKUDLA, Michal and VELEBIL, Jan, 2022. **Use of Spent Coffee Ground as an Alternative Fuel and Possible Soil Amendment.** Materials 2022, Vol. 15, Page 6722. Online. 27 September 2022. Vol. 15, no. 19, pp. 6722. DOI 10.3390/MA15196722.

TUNKLOVÁ, Barbora, JENÍČEK, Lukáš, MALAŤÁK, Jan, NEŠKUDLA, Michal, VELEBIL, Jan and HNILIČKA, František, 2022. **Properties of Biochar Derived from Tea Waste as an Alternative Fuel and Its Effect on Phytotoxicity of Seed Germination for Soil Applications.** Materials 2022, Vol. 15, Page 8709. Online. 7 December 2022. Vol. 15, no. 24, pp. 8709. DOI 10.3390/MA15248709.

**Práce k publikaci připravené:**

JENÍČEK, Lukáš, TUNKLOVÁ, Barbora, MALAŤÁK, Jan, VELEBIL, Jan, MALAŤÁKOVÁ, Jitka and NEŠKUDLA, Michal. **Nutshell biochar impact on the environment as an alternative fuel or as a soil applicant.** Materials 2023

- IGA 2020 - **Analýza vlivu peletizace biomasy na její uhlíkovou stopu**
- IGA 2021 - **Analýza vlivu peletizace a torifikace na palivářské vlastnosti odpadní biomasy**
- UGS 2021 - **Slow pyrolysis technology processing of selected agricultural waste into biochar and its soil application with cost and benefit analysis**
- IGA 2022 - **Možnost využití torifikované ořechové slupky jako doplňkového paliva k fosilním zdrojům**

## 7 Seznam použité literatury

- Ágreda, C. G., Mendes, M. W. D., Bressiani, J. C., & Bressiani, A. H. A. (2012). Apatite Coating on Titanium Samples Obtained by Powder Metallurgy. *Biomedical Applications of Smart Technologies*, 86, 28–33. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AST.86.28>
- Badila, M., Jocham, C., Zhang, W., Schmidt, T., Wuzella, G., Müller, U., & Kandelbauer, A. (2014). Powder coating of veneered particle board surfaces by hot pressing. *Progress in Organic Coatings*, 77(10), 1547–1553. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2013.09.018>
- Baiamonte, L., Björklund, S., Mulone, A., Klement, U., & Joshi, S. (2021). Carbide-laden coatings deposited using a hand-held high-velocity air-fuel (HVOF) spray gun. *Surface and Coatings Technology*. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2020.126725>
- Bajat, J. B., Popić, J. P., & Mišković-Stanković, V. B. (2010a). The influence of aluminium surface pretreatment on the corrosion stability and adhesion of powder polyester coating. *Progress in Organic Coatings*, 69(4), 316–321. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2010.07.004>
- Bajat, J. B., Popić, J. P., & Mišković-Stanković, V. B. (2010b). The influence of aluminium surface pretreatment on the corrosion stability and adhesion of powder polyester coating. *Progress in Organic Coatings*, 69(4), 316–321. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2010.07.004>
- Balijepalli, S. K., Ceschini, L., Chiavari, C., Kaciulis, S., Martini, C., Mezzi, A., Montanari, R., & Verona Rinati, G. (2014). Corrosion effect to the surface of stainless steel treated by two processes of low temperature carburization. *Surface and Interface Analysis*. <https://doi.org/10.1002/SIA.5456>
- Barcova, K., Mashlan, M., Zboril, R., Filip, J., Podjuklova, J., Hrabovska, K., & Schaaf, P. (2006a). Phase composition of steel–enamel interfaces: Effects of chemical pre-treatment. *Surface and Coatings Technology*, 201(3–4), 1836–1844. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2006.03.015>
- Barcova, K., Mashlan, M., Zboril, R., Filip, J., Podjuklova, J., Hrabovska, K., & Schaaf, P. (2006b). Phase composition of steel–enamel interfaces: Effects of chemical pre-treatment. *Surface and Coatings Technology*, 201(3–4), 1836–1844. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2006.03.015>

- Barletta, M., Lusvardi, L., Mantini, F. P., & Rubino, G. (2007). Epoxy-based thermosetting powder coatings: Surface appearance, scratch adhesion and wear resistance. *Surface and Coatings Technology*, 201(16–17), 7479–7504. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.02.017>
- Berger, R., Bexell, U., Stavlid, N., & Grehk, T. M. (2006). The influence of alkali-degreasing on the chemical composition of hot-dip galvanized steel surfaces. *Surface and Interface Analysis*. <https://doi.org/10.1002/SIA.2364>
- Blažek, J. (2009). Optimalizace teploty vytvrzování při práškovém lakování. 68. <http://dspace.vutbr.cz/handle/11012/5233>
- Brun, L. C., Golini, R., Gereffi, G., & Moro, C. (2010). The development and diffusion of powder coatings in the United States and Europe. [https://www.researchgate.net/publication/228590220\\_THE\\_DEVELOPMENT\\_AND\\_DIFFUSION\\_OF\\_POWDER\\_COATINGS\\_IN\\_THE\\_UNITED\\_STATES\\_AND\\_EUROPE](https://www.researchgate.net/publication/228590220_THE_DEVELOPMENT_AND_DIFFUSION_OF_POWDER_COATINGS_IN_THE_UNITED_STATES_AND_EUROPE)
- Budíková, M., Mikoláš, S., Osecký, P., & Masarykova univerzita. Přírodovědecká fakulta. (2007). *Popisná statistika*.
- Cai, Y., Wang, X., Wan, L., Yang, J., & Gao, Y. (2020). Preparation of Antimony-doped Stannate Chemical Conversion Coating on AZ31B Mg Alloy. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 73(7), 1891–1898. <https://doi.org/10.1007/S12666-020-01996-8/FIGURES/5>
- Carboneras, M., Hernández, L. S., del Valle, J. A., García-Alonso, M. C., & Escudero, M. L. (2010). Corrosion protection of different environmentally friendly coatings on powder metallurgy magnesium. *Journal of Alloys and Compounds*, 496(1–2), 442–448. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2010.02.043>
- Chen, H., Sims, R. A., Mountain, J. R., Burnside, G., Reddy, R. N., Mazumder, M. K., & Gatlin, B. (2007). Powder coating process parameters for a transfer efficiency model. <Http://Dx.Doi.Org.Infozdroje.Czu.Cz/10.1080/02726359608906698>. <https://doi.org/10.1080/02726359608906698>
- Cong, P. K., & Fellner, P. (n.d.). Influence of the Pretreatment of Silicon Powder by Electroless Nickel Coating on Its Codeposition with Nickel.
- Critchlow, G. W., & Brewis, D. M. (1996). Review of surface pretreatments for aluminium alloys. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 16(4). [https://doi.org/10.1016/S0143-7496\(96\)00014-0](https://doi.org/10.1016/S0143-7496(96)00014-0)



- ČSN EN 16985 (824015). (2020). Stříkáčské Kabiny pro Organické Nátěrové Hmoty - Bezpečnostní Požadavky. <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-16985-824015-229657.html>
- ČSN EN ISO 2409 (673085). (2021). Nátěrové Hmoty - Mřížková Zkouška. <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-iso-2409-673085-216405.html>
- ČSN EN ISO 8044 (038001). (2016). Koroze Kovů a Slitin. Praha: Český Normalizační Institut. <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-iso-8044-038001-162593.html>
- ČSN EN ISO 8501-3 (038221). (2008). Příprava Ocelových Povrchů Před Nanesením Nátěrových Hmot a Obdobných Výrobků - Vizuální Vyhodnocení Čistoty Povrchu - Část 3: Stupně Přípravy Svarů, Hran a Ostatních Ploch s Povrchovými Vadami. <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-iso-8501-3-038221-162814.html>
- ČSN EN ISO 16276-1 (673202). (2008). Ochrana Ocelových Konstrukcí Proti Korozi Ochrannými Nátěrovými Systémy - Hodnocení a Kritéria Přijetí, Adheze/Koheze (Odtrhová Pevnost) Povlaku - Část 1: Odtrhová Zkouška. <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-iso-16276-1-673202-216580.html>
- ČSN EN ISO 16276-2 (673202). (2008). Ochrana Ocelových Konstrukcí Proti Korozi Ochrannými Nátěrovými Systémy - Hodnocení a Kritéria Přijetí, Adheze/Koheze (Odtrhová Pevnost) Povlaku - Část 2: Mřížková Zkouška a Křížový Řez. <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-iso-16276-2-673202-216581.html>
- ČSN EN ISO 21920-3 (014457). (2022). Geometrické Specifikace Produktu (GPS) - Struktura Povrchu: Profil - Část 3: Operátory Specifikace. <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-iso-21920-3-014457-246398.html>
- Dastoori, K., Makin, B., & Telford, J. (2001). Measurements of thickness and adhesive properties of electrostatic powder coatings for standards and modified powder coating guns. *Journal of Electrostatics*. [https://doi.org/10.1016/S0304-3886\(01\)00126-7](https://doi.org/10.1016/S0304-3886(01)00126-7)
- Dillard, J. G., Jackson, F. R., Holmes, B. L., Aartun, L., Parvatareddy, H., Dillard, D. A., & Zatorski, R. (2006). The Durability of Adhesively-Bonded Titanium: Performance of Plasma-Sprayed Polymeric Coating Pretreatments. [Http://Dx.Doi.Org.Infozdroje.Czu.Cz/10.1080/00218469808012247](http://Dx.Doi.Org.Infozdroje.Czu.Cz/10.1080/00218469808012247), 65(1–4), 217–238. <https://doi.org/10.1080/00218469808012247>
- Ebewele, O. , R. (2000). *Polymer Science and Technology*. University of Benin.

- Elsevier. (1998). Powder coating spray gun. *Metal Finishing*. [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(98\)80345-0](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(98)80345-0)
- Emady, H. N., Wittman, M., Koynov, S., Borghard, W. G., Muzzio, F. J., Glasser, B. J., & Cuitino, A. M. (2015a). A simple color concentration measurement technique for powders. *Powder Technology*, 286, 392–400. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2015.07.050>
- Emady, H. N., Wittman, M., Koynov, S., Borghard, W. G., Muzzio, F. J., Glasser, B. J., & Cuitino, A. M. (2015b). A simple color concentration measurement technique for powders. *Powder Technology*. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2015.07.050>
- Fedotov, A. F. (2011). Elastic and plastic properties of powder materials: A continuum model. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 50(5–6), 301–312. <https://doi.org/10.1007/S11106-011-9333-X>
- Feng, Y., Yang, H., Yang, Z., Hu, C., Wu, C., & Wu, L. (2021). A review of the design, properties, applications, and prospects of Ni-based composite powders. *Materials & Design*, 208, 109945. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2021.109945>
- Girijappa, Y. G. T., Ayyappan, V., Puttegowda, M., Rangappa, S. M., Parameswaranpillai, J., & Siengchin, S. (2022). *Plastics in Automotive Applications*. *Encyclopedia of Materials: Plastics and Polymers*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820352-1.00052-3>
- Gururaj, T., Subasri, R., Raju, K. R. C. S., & Padmanabham, G. (2011). Effect of plasma pretreatment on adhesion and mechanical properties of UV-curable coatings on plastics. *Applied Surface Science*, 257(9), 4360–4364. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2010.12.060>
- Herrmann, F., & Schiller, M. (n.d.). Zkoušení nátěrových hmot a ochranných povlaků.
- Hluchý, Miroslav., & Haněk, V. (1998). *Strojírenská technologie 2. Díl 2, Koroze, základy obrábění, výrobní postupy*.
- How Oven Conditions Affect Powder Coating Performance. (2018). *Focus on Powder Coatings*; Elsevier. <https://doi.org/10.1016/J.FOPOW.2018.10.028>
- HVAF High Velocity Air Fuel Thermal Spray Process. (n.d.). Retrieved January 28, 2022, from <https://www.gordonengland.co.uk/hvaf.htm>
- HVOF High Velocity Oxygen Fuel Thermal Spray Process. (n.d.). Retrieved January 28, 2022, from <https://www.gordonengland.co.uk/hvof.htm>
- ISO 2409:2013. (2013). *Paints and Varnishes — Cross-Cut Test*. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:2409:ed-4:v1:en>

- Iuga, A., Samuila, A., Morar, R., Bilici, M., & Dascalescu, L. (2015). Tribocharging techniques for the electrostatic separation of granular plastics from waste electric and electronic equipment. <https://doi.org/10.1080/02726351.2015.1043675>
- Jankura, D., & Bacova, V. (2009). Formation and properties of composite coatings on a steel substrate. <http://www.kovmat.sav.sk/full.php?rr=47&cc=6&ss=359>
- Jing, Z., Ma, Y., & Zhu, J. (2022). Application of electrostatic dry powder coating technology on capsules to achieve sustained release. *Powder Technology*. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2022.117786>
- Karaoglan, A. D., & Ozden, E. (2021a). Electrostatic powder coating process optimisation by implementing design of experiments. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*. <https://doi.org/10.1080/00202967.2020.1846349>
- Karaoglan, A. D., & Ozden, E. (2021b). Electrostatic powder coating process optimisation by implementing design of experiments. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 99(1), 46–52. <https://doi.org/10.1080/00202967.2020.1846349>
- Kausar, A. (2020). High performance epoxy/polyester-based nanocomposite coatings for multipurpose applications: A review. <https://doi.org/10.1177/8756087920910481>
- Klimeš, L. (2003). O historii a výrobě práškových plastů.
- Korecký, J. 1905-1963. (1947). *Povrchové zušlechťování kovů: praktické pokyny pro broušení, leštění, odmašťování, moření, oxydování, fosfátování, galvanické i mechanické pokovování, tvrdé a porézní chromování, lakování a smaltování kovů* (2. dopl. vyd.). Hokr,.
- Kozakiewicz, J., Ofat, I., Trzaskowska, J., & Kuczyńska, H. (2015). Studies on silicone-acrylic hybrid aqueous dispersions and corresponding silicone-acrylic nanopowders designed for modification of powder coatings and plastics: Part II - Effect of modification with silicone-acrylic nanopowders and of composition of silicone resin contained in those nanopowders on properties of epoxy-polyester and polyester powder coatings. *Progress in Organic Coatings*. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2014.01.010>
- Kraus, V. (2000). *Povrchy a jejich úpravy* (1.). Západočeská univerzita.
- Kreibich, V. (n.d.). *Povlaky z práškových plastů*. Kreibichpovrchy. Retrieved September 25, 2022, from [https://www.kreibichpovrchy.cz/?page\\_id=277](https://www.kreibichpovrchy.cz/?page_id=277)
- Kreibich, V. (1999). *Teorie a technologie povrchových úprav*. Praha: České Vysoké Učení Technické.

- Kreibich, V. (2010). Povlaky z práškových plastů bezchybně. MM Průmyslové Spektrum. <https://www.mmspektrum.com/clanek/povlaky-z-praskovych-plastu-bezchybne>
- Kreibich, V., & Kudláček, J. (2014). Nové trendy v mechanických úpravách povrchů. [http://www.povrchari.cz/kestazeni/201405\\_povrchari.pdf](http://www.povrchari.cz/kestazeni/201405_povrchari.pdf)
- Kreibich, V., & Kudláček, J. (2020). Příčiny defektů a vad povlaků z práškových plastů. Povrcháři. [http://povrchari.cz/kestazeni/202001\\_povrchari.pdf](http://povrchari.cz/kestazeni/202001_povrchari.pdf)
- Kubátová, Hana. (2000). Nátěry kovů.
- Kunaver, M., Klanjšek Gunde, M., Mozetič, M., & Hrovat, A. (2003). The degree of dispersion of pigments in powder coatings. *Dyes and Pigments*, 57(3). [https://doi.org/10.1016/S0143-7208\(03\)00030-5](https://doi.org/10.1016/S0143-7208(03)00030-5)
- Latypov, M. I., Alexandrov, I. v., Beygelzimer, Y. E., Lee, S., & Kim, H. S. (2012). Finite element analysis of plastic deformation in twist extrusion. *Computational Materials Science*. <https://doi.org/10.1016/J.COMMATSCI.2012.03.035>
- Lee, H. B., & Lee, J. H. (2016). Pretreatment condition of Cu by ammonium-based mixed solvent and its effects on the fabrication of Ag-coated Cu particles. *Korean Journal of Materials Research*, 26(3), 109–116. <https://doi.org/10.3740/MRSK.2016.26.3.109>
- Liberto, N. P. (2010). Powder coating equipment. *Metal Finishing*. [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(10\)80229-6](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(10)80229-6)
- Liberto, N. P. (2011). Understanding Powder Coating Equipment and Application. *Metal Finishing*. [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(13\)70038-2](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(13)70038-2)
- Liberto, N. P., & Powder Coating Institute (Alexandria, Va. ). (1994). Powder coating : the complete finisher's handbook. 409.
- Lothongkum, A. W., Nonthapone, R., Seangkiatiyuth, K., & Tanthapanichkoon, W. (2007). Powder characteristics and coating conditions of fresh and reused polyester resins for electrostatic powder coating: powder recycling and loss prevention. *Advanced Powder Technology*, 18(2), 175–186. <https://doi.org/10.1163/156855207780208664>
- Louati, H., Zouzou, N., Tilmatine, A., Zouaghi, A., & Ouiddir, R. (2021). Experimental investigation of an electrostatic adhesion device used for metal/polymer granular mixture sorting. *Powder Technology*, 391, 301–310. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.06.019>
- Lukavský, L., Bouška, Stanislav., Fiala, V., & Karásek, Otakar. (1993). Nátěrové hmoty. Díl 2.
- Meloun, M., & Militký, J. (2004). Statistická analýza experimentálních dat. ACADEMIA.

- Mindoš, L., & Geiplová, H. (n.d.). Povlaky práškových nátěrových hmot. Retrieved January 28, 2022, from <https://www.engineering.sk/strojarstvo-extra/1996-povlaky-prakovych-natrovych-hmot>
- Misev, T. A., & van der Linde, R. (1997). Powder coatings technology: New developments at the turn of the century. *Progress in Organic Coatings*, 34(1–4), 160–168. [https://doi.org/10.1016/S0300-9440\(98\)00029-0](https://doi.org/10.1016/S0300-9440(98)00029-0)
- Misev, T. A., & van der Linde, R. (1998). Powder coatings technology: new developments at the turn of the century. *Progress in Organic Coatings*. [https://doi.org/10.1016/S0300-9440\(98\)00029-0](https://doi.org/10.1016/S0300-9440(98)00029-0)
- Mohyla, M. (2006). *Technologie povrchových úprav kovů* (Issue 3.). VŠB - Technická univerzita Ostrava.
- Mohyla, Miroslav. (1995). *Technologie povrchových úprav kovů*.
- Mojtaba Mirabedini, S., Moradian<sup>3</sup>, S., Scantlebury<sup>2</sup>, J. D., & Thompson, G. E. (2002a). The Role Of Interfacial Layers On The Performance Of An Epoxy/Polyester Powder Coated Aluminium Alloy. In *Iranian Polymer Journal* (Vol. 11, Issue 3, pp. 167–176). IRANIAN POLYMER JOURNAL (ENGLISH). <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?ID=16761>
- Mojtaba Mirabedini, S., Moradian<sup>3</sup>, S., Scantlebury<sup>2</sup>, J. D., & Thompson, G. E. (2002b). The Role Of Interfacial Layers On The Performance Of An Epoxy/Polyester Powder Coated Aluminium Alloy. In *Iranian Polymer Journal* (Vol. 11, Issue 3, pp. 167–176). IRANIAN POLYMER JOURNAL (ENGLISH). <https://www.sid.ir/en/Journal/ViewPaper.aspx?ID=16761>
- Montemor, M. F. (2014). Functional and smart coatings for corrosion protection: A review of recent advances. *Surface and Coatings Technology*, 258, 17–37. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2014.06.031>
- Moravcová, Drašař, & Lapčík. (2006). *Biologicky aktivní přírodní látky*. VŠCHT.
- Mřížková zkouška . (n.d.). Retrieved January 23, 2022, from <https://www.lpm.cz/cs/kunststofflexikon/gitterschnittpruefung>
- Narayanan, T. S. N. (2005). A review: Surface pretreatment by phosphate conversion coatings. *Rev. Adv. Mater. Sci*, 9, 130–177.
- Nomura, T., Satoh, T., & Masuda, H. (2003). The environment humidity effect on the tribo-charge of powder. *Powder Technology*. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(03\)00157-8](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(03)00157-8)

- Nová technologie pro nanášení práškových plastů. (2001). MM Průmyslové Spektrum.  
<https://www.mmspektrum.com/clanek/nova-technologie-pro-nanaseni-praskovych-plastu>
- Novák, P. (2005). Druhy koroze kovů. <https://adoc.pub/12-druhy-koroze-kov.html>
- Pérez, C., Collazo, A., Izquierdo, M., Merino, P., & Nóvoa, X. R. (2002). Comparative study between galvanised steel and three duplex systems. *Corrosion Science*, 44(3), 481–500.  
[https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(01\)00070-1](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(01)00070-1)
- Pigmenty a barviva. (n.d.). Institutut Geologického Inženýrství, Vysoká Škola Báňská, Ostrava.  
 Retrieved January 25, 2022, from  
[http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/pigmenty\\_barviva.html](http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/pigmenty_barviva.html)
- Podjuklová, J. (1994). Speciální technologie povrchových úprav I (1.). Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- Poux, M., Fayolle, P., Bertrand, J., Bridoux, D., & Bousquet, J. (1991). Powder mixing: Some practical rules applied to agitated systems. *Powder Technology*, 68(3), 213–234.  
[https://doi.org/10.1016/0032-5910\(91\)80047-M](https://doi.org/10.1016/0032-5910(91)80047-M)
- Powder coating ovens. (2002). *Metal Finishing*; Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(02\)80947-3](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(02)80947-3)
- Powder Coating. Plastic Coatings Limited. (n.d.). Retrieved January 28, 2022, from  
<https://www.plasticcoatings.co.uk/plastic-coating-processes/powder-coating/>
- Prasad, L. K., McGinity, J. W., & Williams, R. O. (2016). Electrostatic powder coating: Principles and pharmaceutical applications. *International Journal of Pharmaceutics*, 505(1–2), 289–302. <https://doi.org/10.1016/J.IJPHARM.2016.04.016>
- Předúprava povrchů. (n.d.). Retrieved January 23, 2022, from  
<https://www.itsbrno.cz/produkty/preduprava-povrchu>
- Přesné měření tloušťky povlaků. (2015). MM Průmyslové Spektrum.  
<https://www.mmspektrum.com/clanek/presne-mereni-tloustky-povlaku>
- Průběžná lakovací linka . (n.d.). Retrieved January 23, 2022, from  
<https://www.itsbrno.cz/reference/prubezna-lakovaci-linka>
- Puig, M., Cabedo, L., Gracenea, J. J., Jiménez-Morales, A., Gámez-Pérez, J., & Suay, J. J. (2014). Adhesion enhancement of powder coatings on galvanised steel by addition of organo-modified silica particles. *Progress in Organic Coatings*, 77(8), 1309–1315.  
<https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2014.03.017>

- Puig, M., Cabedo, L., Gracenea, J. J., & Suay, J. J. (2015). The combined role of inhibitive pigment and organo-modified silica particles on powder coatings: Mechanical and electrochemical investigation. *Progress in Organic Coatings*, 80, 11–19. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2014.11.014>
- Pustiulha, S., Holovachuk, I., Samchuk, V., Samostian, V., & Prydiuk, V. (2020). Improvement of the technology of tribostate application of powder paints using fractal analysis of spray quality. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_28)
- Reference práškové lakování. (n.d.). Retrieved January 23, 2022, from <https://www.watech.cz/realizovane-projekty-a-vyssi-technologicke-dodavky/technologie-pro-praskove-lakovani.html>
- Reichert, V., Basu, S. K., Francis, L. F., McCormick, A. v., & Scriven, L. E. (2008). An analysis of starburst defects in wrinkled powder coatings. *Progress in Organic Coatings*. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2008.04.004>
- Scrinzi, E., & Rossi, S. (2010). The aesthetic and functional properties of enamel coatings on steel. *Materials and Design*, 31(9), 4138–4146. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.04.030>
- Sedláček, A. (n.d.). Chyby při přípravě povrchu a jejich dopad na kvalitu. Retrieved January 28, 2022, from <https://www.engineering.sk/clanky2/povrchove-upravy/4175-chyby-pri-priprave-povrchu-a-jejich-dopad-na-kvalitu>
- Sedláček, V. (1992). *Povrchy a povlaky kovů. České Vysoké Učení Technické.*
- Selvan, A., Madhankumar, S., & Sneha, S. (2019). Design and Fabrication of Automated Powder Coating System. [https://www.researchgate.net/publication/336665411\\_Design\\_and\\_Fabrication\\_of\\_Automated\\_Powder\\_Coating\\_System](https://www.researchgate.net/publication/336665411_Design_and_Fabrication_of_Automated_Powder_Coating_System)
- Serec Corp. (1997). Cleaning and degreasing equipment. *Metal Finishing*. [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(97\)89071-X](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(97)89071-X)
- Shah, U., Zhu, J., Zhang, C., & Nother, J. H. (2006). Numerical investigation of coarse powder and air flow in an electrostatic powder coating process. *Powder Technology*, 164(1), 22–32. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2006.02.002>
- Statická elektřína a povrchové úpravy plastů. (n.d.). Retrieved January 23, 2022, from <https://www.mmspektrum.com/clanek/staticka-elektrina-a-povrchove-upravy-plastu>

- Svobodová, J., & Kuśmierczak, S. (2013). Vliv předúpravy povrchu na výslednou kvalitu práškového povlaku. <https://dk.upce.cz/handle/10195/54205>
- Technologie - Technolak. (n.d.). Retrieved January 28, 2022, from <http://www.technolak.cz/technologie/index.html>
- Tilmatine, A., Medles, K., Bendimerad, S. E., Boukholda, F., & Dascalescu, L. (2009). Electrostatic separators of particles: Application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures. *Waste Management*, 29(1), 228–232. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2008.06.008>
- Tkadlec, O. (2019). Technologie práškového lakování.
- Trabelsi, W., Triki, E., Dhouibi, L., Ferreira, M. G. S., Zheludkevich, M. L., & Montemor, M. F. (2006). The use of pre-treatments based on doped silane solutions for improved corrosion resistance of galvanised steel substrates. *Surface and Coatings Technology*, 200(14–15), 4240–4250. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.01.044>
- Tryskací zařízení. (n.d.). Retrieved January 23, 2022, from <http://www.kovostanek.cz/tryskaci-zarizeni>
- Tulka, J. (2005). Povrchové úpravy materiálů. *Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická*.
- Ulrich, D. L., & Association for Finishing Processes of SME. (1993). *User's guide to powder coating*.
- Vanamu, J., & Sahoo, A. (2022). An overview on dry powder coating in advancement to electrostatic dry powder coating used in pharmaceutical industry. *Powder Technology*. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2022.117214>
- Vančata, P. (2017). Zvýšení výkonu u tribo stříkání. *MM Průmyslové Spektrum*. <https://www.mmspektrum.com/clanek/zvyseni-vykonu-u-tribo-strikani>
- Vzorník barev RAL. (n.d.). Retrieved January 23, 2022, from <https://katalog.ambra.cz/vzorniky-barev-ral-a62.htm?cook=set>
- Vzorník RAL, barvy a odstíny dle vzorkovnice RAL,. (n.d.). Retrieved September 25, 2022, from <https://www.vzornikral.cz/>
- Withy, B., Hyland, M., & James, B. (2012). Pretreatment effects on the surface chemistry and morphology of aluminium. <https://doi.org/10.1142/S0217979206040076>



- Ye, Q., & Domnick, J. (2003). On the simulation of space charge in electrostatic powder coating with a corona spray gun. *Powder Technology*.  
<https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2003.08.019>
- Zastempowski, M., & Bochat, A. (2020). Gyroscopic Effect in Machine Working Assemblies. *Acta Technologica Agriculturae*, 23(1), 24–29. <https://doi.org/10.2478/ATA-2020-0005>
- Zkoušky povrchové přídržnosti, odtrhové zkoušky materiálů. (n.d.). Vysoké Učení Technické v Praze, Ústav Stavebního Zkušebnictví. Retrieved January 9, 2022, from <http://www.fce.vutbr.cz/SZK>