

Automatizace mokrého lakování plastových komponent

Jan Kolář

Bakalářská práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav automatizace a řídicí techniky

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Jan Kolář
Osobní číslo: A22634
Studijní program: B0714A150006 Aplikovaná informatika v průmyslové automatizaci
Specializace: Inteligentní systémy s roboty
Forma studia: Kombinovaná
Téma práce: Automatizace mokrého lakování plastových komponent
Téma práce anglicky: Automation of wet painting of plastic parts

Zásady pro vypracování

- Definujte cíl práce, zaměřte se na návrh automatizované lakovací buňky a formulaci výzkumných otázek.
- Zpracujte rešerši dostupných technologií robotizovaného lakování a přípravných procesů.
- Vyberte vhodný plastový díl, navrhnete robotický systém pro lakování, implementujte lakovací buňku a proveďte testování v reálném prostředí.
- Porovnejte výhody automatizované buňky s tradičními lakovacími metodami.
- Navrhnete zlepšení a doporučení pro praxi na základě dosažených výsledků.

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

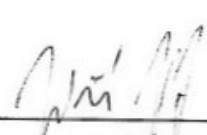
Seznam doporučené literatury:

1. KALA, Rahul. Autonomous Mobile Robots: Planning, Navigation and Simulation. Elsevier, 2023.
2. KOLÍBAL, Zdeněk, et al. Roboty a robotizované výrobní technologie. Brno: VUTUM, 2016.
3. CARBONE, Giuseppe; LARIBI, Med Amine (ed.). Robot Design: From Theory to Service Applications. Springer Nature, 2022.
4. TRACTON, Arthur A. Coatings technology handbook. CRC press, 2005.
5. LAMBOURNE, R. Paint and surface coatings: Theory and practice. Woodhead Publishing Limited Willian Andrew Publishing, 1999.
6. FOTOVVATI, Behzad; NAMDARI, Navid; DEGHANGHADIKOLAEI, Amir. On coating techniques for surface protection: A review. Journal of Manufacturing and Materials processing, 2019, 3.1: 28.

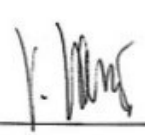
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavel Stoklásek, Ph.D.**
Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání bakalářské práce: **6. prosince 2024**
Termín odevzdání bakalářské práce: **20. listopadu 2025**





doc. Ing. Jiří Vojtěšek, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 6. prosince 2024

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení bakalářské práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – bakalářskou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval; v případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor;
- odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....

podpis autora

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je návrh automatizované lakovací buňky pro mokré lakování plastových komponent s využitím robotizace, zaměřený na zvýšení produkce a efektivity procesu. Práce se zabývá návrhem robotických buněk pro pracoviště ožehu a lakování a jejich srovnání vůči ruční aplikaci. V teoretické části je zpracována rešerše dostupných technologií robotizovaného lakování a metod předúpravy plastových povrchů. Praktická část zahrnuje výběr vhodných robotů, konstrukční návrh kompletního pracoviště s robotickým systémem, implementaci navržené jednotky a realizaci testování ve výrobním prostředí. Výsledky praktických testů prokazují výhody automatizace lakovacího procesu oproti manuálním metodám, zejména v oblasti snížení spotřeby materiálu a zvýšení produktivity. Závěrem jsou navržena doporučení pro další optimalizaci automatického lakovacího pracoviště.

Klíčová slova: robotizace, mokré lakování, automatizovaná lakovací buňka, ožehování, ionizace, adheze, povrchové napětí, plastové díly

ABSTRACT

The aim of this bachelor's thesis is to design an automated robotic painting cell for wet painting of plastic components, focusing on increasing production and process efficiency. The thesis addresses the design of robotic cells for flaming and painting operations, comparing their results against manual applications. The theoretical part reviews available robotic painting technologies and surface pre-treatment methods for plastics. The practical part includes the selection of suitable robots, structural design of the complete robotic workstation, implementation of the proposed units, and testing in a production environment. Practical testing demonstrates the advantages of automating the painting process compared to manual methods, particularly in terms of reduced material consumption and increased productivity. Finally, recommendations are proposed for further optimization of the automated painting workstation.

Keywords: robotics, wet painting, automated painting cell, flaming, ionization, adhesion, surface tension, plastic components

Rád bych vyjádřil upřímné poděkování vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Pavlu Stokláškoví, Ph.D., za jeho odborný přístup, pomoc, ochotu a užitečné připomínky. Také děkuji své rodině a přítelkyni za podporu a povzbuzení po celou dobu mého studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD.....	13
I TEORETICKÁ ČÁST	14
1 PRŮMYSLOVÍ ROBOTI.....	15
1.1 HISTORIE PRŮMYSLOVÉ AUTOMATIZACE A ROBOTIZACE.....	15
1.1.1 První kroky automatizace a průmyslové robotizace.....	16
1.1.2 První průmyslový robot.....	17
1.1.3 Rozvoj robotiky v 70. a 80. letech	18
1.1.4 Moderní průmyslová robotika	19
1.1.5 Výzvy a budoucnost průmyslové robotiky.....	20
1.2 STRUČNÁ HISTORIE ROBOTICKÉHO LAKOVÁNÍ	20
2 POVRCHOVÉ VLASTNOSTI PLASTŮ	22
2.1 ADHEZE.....	22
2.2 SMÁČIVOST	22
2.3 POVRCHOVÉ NAPĚTÍ	23
3 METODY ČIŠTĚNÍ A PŘEDÚPRAVY PLASTOVÝCH DÍLŮ	24
3.1 ČIŠTĚNÍ ROZPOUŠTĚDLY	24
3.2 ČIŠTĚNÍ DETERGENTY	24
3.3 IONIZACE POVRCHU	25
3.4 CHEMICKÉ OŠETŘENÍ.....	25
3.5 OŽEHNUTÍ PLAMENEM.....	25
3.6 KORÓNOVÝ VÝBOJ	27
3.7 PŘEDÚPRAVA ZA POMOCÍ PLAZMY	28
4 TYPY ROBOTICKÉHO LAKOVÁNÍ	30
4.1 PRÁŠKOVÁ APLIKACE	31
4.1.1 Elektrostatická metoda	31
4.1.2 Tribostatická metoda	33
4.2 KAPALINOVÉ APLIKACE	34
4.2.1 Nízkotlaké – konvenční systémy.....	35
4.2.1.1 HVLP (<i>vysoký objem, nízký tlak</i>)	35
4.2.1.2 LVLP (<i>nízký objem, vysoký tlak</i>).....	36
4.2.2 Vysokotlaké lakování	36
4.2.2.1 Vysokotlaké lakování bez pomocného vzduchu – Airless.....	36

4.2.2.2	<i>Vysokotlaké lakování s asistencí vzduchu – Airmix</i>	37
4.2.3	Kapalinové elektrostatické lakování.....	38
4.2.3.1	<i>Elektrostatické lakování pomocí stříkací pistole</i>	39
4.2.3.2	<i>Elektrostatické lakování pomocí rotačního zvonu</i>	40
4.2.4	ABB PixelPaint	41
4.3	POROVNÁNÍ LAKOVACÍCH TECHNOLOGIÍ	42
II	PRAKTICKÁ ČÁST	43
5	POPIS CELÉ TECHNOLOGIE	44
5.1	NAKLÁDACÍ ZÓNA A VSTUPNÍ ČÁST	45
5.2	KABINA OŽEHU	47
5.3	KABINA IONIZACE	49
5.4	LAKOVACÍ KABINA	50
5.5	BARVOVÁ KUCHYŇE, VYTĚKACÍ PROSTOR A SUŠÍCÍ PEC	51
6	HLAVNÍ CÍL PRÁCE	54
7	NÁVRH VHODNÝCH ROBOTŮ PRO APLIKACI	56
7.1	POROVNÁNÍ PARAMETRŮ ROBOTŮ	56
8	NÁVRH APLIKAČNÍ ČÁSTI	57
8.1	OŽEHOVÁ APLIKACE.....	57
8.1.1	Robot ABB IRB 1660id	57
8.1.2	Hořák Aerogen FT Auto – FRC	59
8.2	LAKOVACÍ APLIKACE.....	60
8.2.1	Robot ABB irb 52.....	60
8.2.2	Aplikační část lakování	62
8.2.2.1	<i>Pohony pump</i>	64
8.2.2.2	<i>Ventilový blok</i>	66
8.2.2.3	<i>Dvou komponentní směšovací člen s membránovým ventilem</i>	67
8.2.2.4	<i>Membránový regulátor</i>	68
8.2.2.5	<i>Zubové čerpadlo</i>	69
8.2.2.6	<i>Lakovací pistole DeVilbiss AGMD Pro</i>	70
8.2.2.7	<i>Atomizační nástavec TE30C</i>	71
9	VYTVOŘENÍ DIGITÁLNÍHO DVOJČETE ABB ROBOTSTUDIO	72
9.1	IMPLEMENTACE 3D MODELŮ A USTAVENÍ DLE VÝROBNÍHO VÝKRESU	72
9.2	VYTVOŘENÍ VIRTUÁLNÍCH KONTROLÉRŮ	72
9.3	DEFINICE NÁSTROJŮ	73

9.4	KOLIZNÍ ZÓNY	73
9.5	KALIBRACE POZICE ROBOTA	73
9.6	DEKLARACE DOPRAVNÍKU	73
10	LAKOVÁNÍ VÝROBKU.....	75
10.1	TYP LAKOVANÉHO DÍLU	75
10.2	OŽEH.....	76
10.3	IONIZACE.....	77
10.4	LAKOVÁNÍ.....	77
11	POROVNÁNÍ DAT	80
11.1	ČAS LAKOVÁNÍ A SPOTŘEBA BARVY NA KUS	80
11.2	PROCENTO ZMETKOVITOSTI	81
11.3	ZHODNOCENÍ DAT	81
12	NÁVRH ZLEPŠENÍ TECHNOLOGIE	84
12.1	ÚPRAVA NAKLÁDACÍ ZÓNY	84
12.2	BYPASS VENTIL NA BARVOVÉM ČERPADLE.....	84
ZÁVĚR		85
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		87
SEZNAM OBRÁZKŮ		93
SEZNAM TABULEK.....		95
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....		96

ÚVOD

Téma této bakalářské práce bylo zvoleno na základě aktuálního projektu v mém zaměstnání, který je zaměřen na automatizaci procesu mokrého lakování plastových komponent. Neustále rostoucí požadavky na kvalitu a efektivitu výroby v průmyslových podnicích vedou ke zvýšenému zájmu o robotizovaná řešení. Cílem práce je návrh automatizované lakovací buňky, která plně nahradí ruční aplikaci laku a přinese výrazné zlepšení výrobních parametrů.

Naše firma byla kontaktována zákazníkem s požadavkem na automatizaci své stávající výroby, která se zabývá lakováním malých plastových komponent z ABS plastu. V současnosti je lakování prováděno ručně a zákazník se potýká s několika problémy. Jedná se především o obtíže s dosažením požadovaného množství kusů při stávajícím personálním obsazení. Dalším závažným problémem je dlouhá doba potřebná k zaškolení nového lakýrníka, která se vzhledem k technologii a vysokým požadavkům na kvalitu povrchu pohybuje kolem šesti měsíců. Navíc dochází k problémům s kvalitou finálních lakovaných výrobků a nadměrnou spotřebou lakovacích materiálů.

Po konzultacích se zákazníkem bylo navrženo automatizované pracoviště, jehož zpracování bylo zvoleno jako předmět této bakalářské práce. Hlavním požadavkem byla plná automatizace současné lakovací operace včetně předúpravy povrchu a maximální eliminace lidského faktoru během celého procesu. Další cíle zahrnovaly snížení náročnosti práce obsluhy, zkrácení doby nutné pro zaškolení pracovníků a redukci spotřeby lakovacích materiálů.

Mechanická konstrukce linky byla realizována montážním oddělením naší firmy, přičemž součástí mé práce byla montáž robotů, jejich kalibrace a uvedení do provozu spolu s aplikací ionizace. Montáž barvové kuchyně byla zajištěna firmou MediaCZ a počáteční kalibrace ožehového kontroléru byla provedena technikem společnosti Aerogen. Moje část práce byla kompletní instalace robotů, jejich kalibrace, uvedení do provozu a implementace lakovací aplikace. Dále byly vytvořeny programy pro obě aplikace s následnou optimalizací a finálním odladěním celého procesu.

I TEORETICKÁ ČÁST

1 PRŮMYSLOVÍ ROBOTI

Průmysloví roboti představují základní součást moderní automatizace, zvyšující efektivitu a přesnost ve výrobních procesech.

Podle Mezinárodní federace robotiky bylo v roce 2023 na světě nainstalováno celkem 541 302 nových průmyslových robotů. To je o 2 % méně než v předchozím roce 2022. Celkově ale počet všech robotů, které se v průmyslu používají, vzrostl na více než 4,28 milionu kusů, což znamená, že stále přibývá firem, které je využívají.

Nejvíce robotů v roce 2023 pořídil automobilový průmysl, který měl 25 % podíl na všech instalacích. Na druhém místě byl elektronický průmysl s 23 % a na třetím místě kovozpracující průmysl se 14 %. Z regionálního hlediska se nejvíce robotů stále prodává v Asii, hlavně v Číně, i když zde počet nových robotů poklesl asi o 5 %. V Evropě se naopak instalovalo o 9 % více robotů než v předchozím roce. Amerika zaznamenala malý pokles o 1 %.

Z těchto čísel je vidět, že i přes určité ekonomické obtíže je o roboty stále velký zájem. Firmy je pořízují hlavně proto, aby mohly zefektivnit výrobu a nahradit složité nebo opakující se manuální práce.[4]

1.1 Historie průmyslové automatizace a robotizace

Robotika je interdisciplinární obor, který se věnuje návrhu, konstrukci a řízení robotů, zejména v průmyslovém prostředí. Historie tohoto odvětví sahá hluboko do minulosti, kdy již ve starověku byly snahy o automatizaci procesů prostřednictvím mechanických zařízení. První zmínky o automatonech pochází z děl řeckého inženýra Heróna Alexandrijského z 1. století př. n. l., jenž vyvinul mechanické systémy poháněné parou a vodou, které simulovaly pohyb. Moderní éra robotiky začala až v 20. století. Termín „robot“ poprvé použil český spisovatel Karel Čapek v roce 1921 ve své hře *R.U.R. – Rossum's Universal Robots*, kde „roboti“ označovali umělé pracovníky vytvořené k vykonávání monotónních úkolů. Tento pojem se stal základem pro označení strojů, které měly za úkol nahradit člověka při fyzicky náročných nebo nebezpečných pracích. [5]



Obrázek 1 Heronův model automatického otevírání dveří [16]

1.1.1 První kroky automatizace a průmyslové robotizace

Průmyslová robotika se nemohla rozvíjet bez předchozího pokroku v oblasti automatizace a výpočetní techniky. Počátky mechanizace a racionalizace výroby se datují do období průmyslové revoluce v 18. století, kdy byly nahrazeny manuální procesy strojními zařízeními. Tato zařízení však byla často rigidní a vyžadovala přestavbu při změně výroby, což omezovalo jejich flexibilitu. Zásadní průlom přinesl vývoj numericky řízených (NC) strojů a následně počítačově řízených strojů (CNC) v polovině 20. století. Tyto technologie položily základy pro konstrukci průmyslových robotů, které kombinovaly mechaniku s elektronikou a výpočetní technikou. [5]

1.1.2 První průmyslový robot

Historie moderních průmyslových robotů začala v roce 1954, kdy George Devol získal patent na zařízení nazvané „Programmed Article Transfer“. Toto zařízení bylo schopno vykonávat opakované pohyby podle předem nastaveného programu.

Spolupráce mezi Devolem a Josephem Engelbergerem vedla k založení společnosti Unimation, která vytvořila prvního průmyslového robota UNIMATE. Tento robot byl poprvé nasazen v roce 1961 v továrně General Motors, kde manipuloval s horkými kovovými odlitky. Robot byl navržen tak, aby nahradil člověka při nebezpečných a monotónních úkolech. Instalace tohoto zařízení znamenala revoluci v průmyslové výrobě a položila základy pro budoucí vývoj robotiky. [1][5]



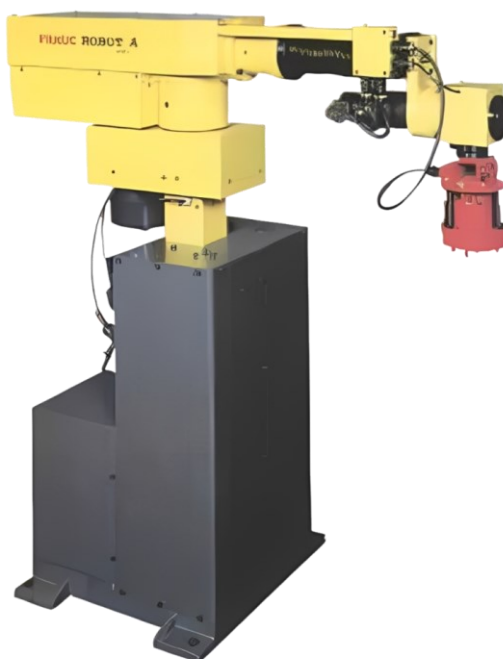
Obrázek 2 Joseph Engelberger (vlevo), George Devol, kde je obsluhuje robot [17]



Obrázek 3 První průmyslový robot UNIMATE [18]

1.1.3 Rozvoj robotiky v 70. a 80. letech

V průběhu 70. let došlo k rapidnímu rozvoji průmyslové robotiky díky technologickým inovacím a globálnímu rozšíření robotů. Například Japonsko se stalo lídrem v implementaci robotických systémů, zejména díky společnostem jako Kawasaki a FANUC. Technologické inovace zahrnovaly zejména vývoj programovacích jazyků specifických pro robotiku. [5]



Obrázek 4 Fanuc model A 200 [18]

V 80. letech došlo k dalšímu pokroku, zejména díky integraci mikroprocesorů a výpočetní techniky. Roboti začali být schopni vykonávat složitější úkoly, jako je svařování, lakování nebo montáž. Tato dekáda byla také svědkem přechodu od hydraulických a pneumatických systémů k plně elektrickým robotům, což zlepšilo jejich přesnost a rychlost.

1.1.4 Moderní průmyslová robotika

Od 90. let se průmyslová robotika zaměřila na vývoj pokročilých technologií, jako je strojové vidění a kolaborativní robotika (tzv. coboty). Moderní roboty jsou schopny adaptivního chování, což jim umožňuje spolupracovat s lidmi a přizpůsobovat se měnícím se podmínkám výroby. Technologie digitálních dvojčat dále umožnila simulaci robotických procesů před jejich nasazením, což snížilo náklady na implementaci.

Významnou oblastí aplikace je automobilový průmysl, kde roboti provádějí svařování a montáž s vysokou přesností. Dalšími oblastmi jsou logistika, zdravotnictví a elektronika.
[2][6]



Obrázek 5 Kolaborativní robot GOFA od firmy ABB [19]

1.1.5 Výzvy a budoucnost průmyslové robotiky

Navzdory pokroku čelí průmyslová robotika mnoha výzvám, včetně integrace s dalšími technologiemi, zajištění bezpečnosti při práci s lidmi a překonání obav spojených s dopadem na zaměstnanost. Budoucnost robotiky však slibuje další rozvoj v oblasti umělé inteligence, autonomních systémů a využití robotů v nových odvětvích, jako je zemědělství a kosmický průmysl.[2]

1.2 Stručná historie robotického lakování

V oblasti lakování se roboti začali uplatňovat až v 70. letech. V roce 1968 švédská firma ABB představila robot IRB 6, který byl jedním z prvních plně elektrických robotů s šestiosým pohybem, vhodným pro aplikace jako je lakování. Tato inovace umožnila přesnější a konzistentnější nanášení nátěrů na složité geometrie dílů. [7]

V 80. letech došlo k významnému pokroku díky integraci mikroprocesorů a pokročilých řídicích systémů. V roce 1982 společnost FANUC uvedla na trh robotické lakovací systémy využívající CNC technologie, což umožnilo programovat komplexní trajektorie pohybu a optimalizovat spotřebu lakovacích materiálů [8]. Tato dekáda také zaznamenala rozšíření robotického lakování do dalších odvětví, jako je letectví a automobilový průmysl.

Devadesátá léta přinesla další zdokonalení senzorových technologií a zpětnovazebních systémů [11]. V roce 1994 byl představen robot P-150 od společnosti FANUC, který byl vybaven laserovými senzory pro detekci povrchu a adaptivní řízení nanášení laku [13]. Tento pokrok umožnil robotům reagovat na variace v površích a tloušťce materiálů v reálném čase. S nástupem 21. století a konceptu Průmyslu 4.0 se robotické lakování stalo ještě sofistikovanějším [13]. V roce 2006 společnost KUKA představila řadu robotů s otevřenou architekturou řídicích systémů, umožňující integraci s dalšími výrobními procesy a IT systémy [9]. Technologie jako offline programování a simulace začaly být běžné, což zkrátilo čas potřebný pro nastavení a optimalizaci lakovacích procesů.[45]

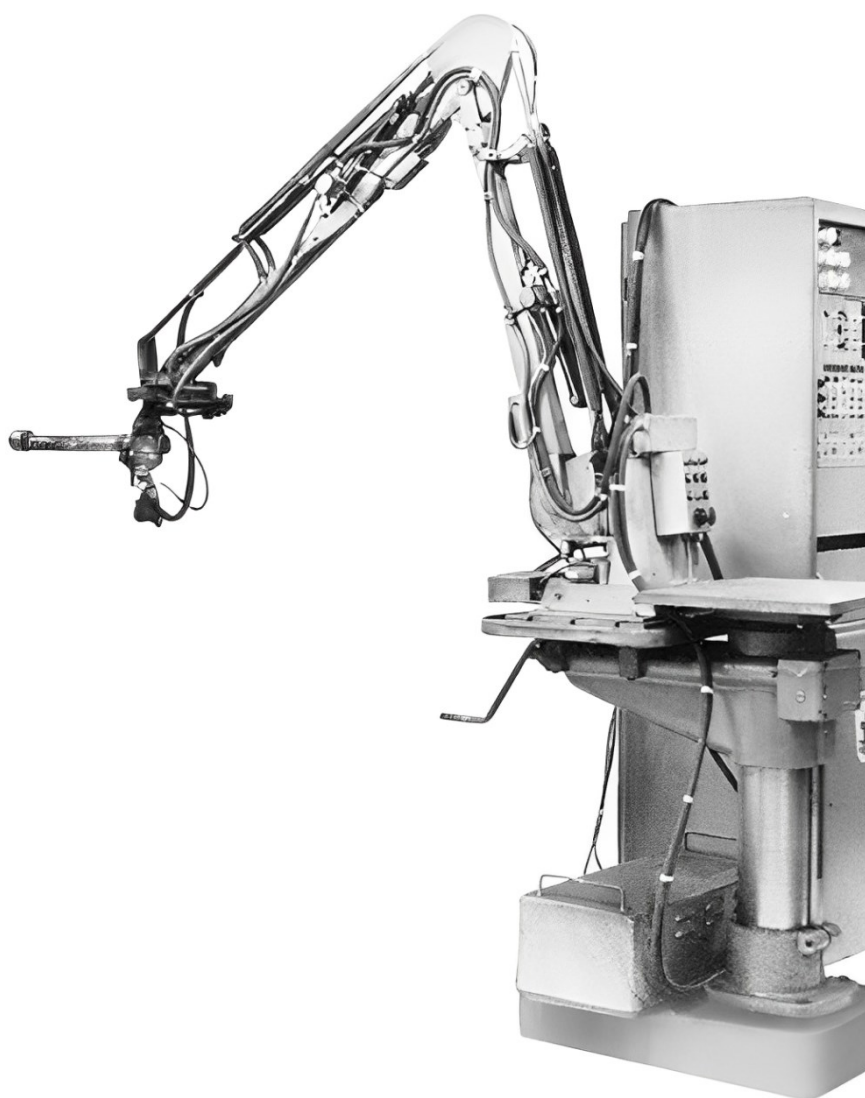
V roce 2015 ABB uvedla na trh robot IRB 5500 s funkcemi "TrueMove" a "QuickMove", které zajišťují extrémně přesné a rychlé pohyby, minimalizující odchylky v nanášení laku. Tyto systémy jsou schopny se učit z předchozích operací a optimalizovat parametry pro dosažení nejvyšší kvality povrchové úpravy [12].

Důležitým milníkem bylo také zavedení kolaborativních robotů (cobotů) do lakovacích procesů [11]. V roce 2018 Universal Robots představili model UR10e, který může bezpečně

spolupracovat s lidskými operátory. To otevřelo nové možnosti pro flexibilní výrobu a individualizaci produktů, zejména v menších sériích [10].

Aktuální trendy zahrnují integraci internetu věcí (IoT) a cloudových služeb pro monitorování a optimalizaci lakovacích procesů v reálném čase. Prediktivní údržba a analýza dat přispívají k vyšší efektivitě a snižování nákladů. Vývoj v oblasti ekologických lakovacích materiálů a technologií také ovlivňuje design a funkčnost robotických lakovacích systémů [13].

Celkově lze říct, že historie robotického lakování je charakterizována neustálým pokrokem v technologiích řízení, senzoriky a materiálového inženýrství. Tyto inovace umožnily průmyslu dosáhnout vyšší kvality, produktivity a bezpečnosti.



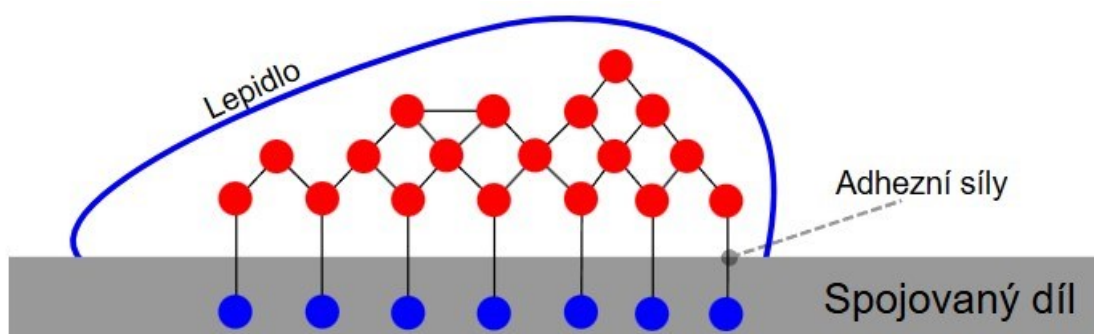
Obrázek 6 První lakovací robot ABB IRB 6 [21]

2 POVRCHOVÉ VLASTNOSTI PLASTŮ

Povrchové vlastnosti plastů mají zásadní vliv na výslednou kvalitu nástřiku a odolnost vůči otěru. Z hlediska lakování je to nejdůležitější krok, který nám zajistí pozitivní výsledek našeho nástřiku. Povrchové vlastnosti plastů ovlivňují tři základní pojmy smáčivost, adheze, povrchové napětí.

2.1 Adheze

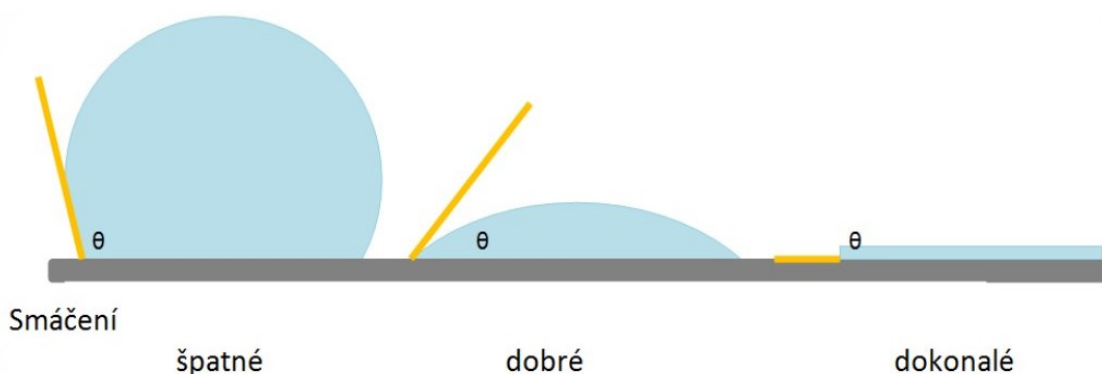
Adheze je schopnost dvou různých materiálů držet pohromadě na základě fyzikálních a chemických interakcí na jejich rozhraní. Nejčastěji se používá přirovnání ke vztahu mezi pavučinou a ranní rosou. V kontextu plastů je adheze často omezena nízkou povrchovou energií materiálu, což vede k slabé přilnavosti nátěrů nebo lepidel. Pro zlepšení adheze se často provádí úpravy povrchu, jako je ožehnutí povrchu dílu, které zvyšuje povrchovou energii plastu a tím zlepšuje jeho schopnost vytvářet pevné vazby s jinými materiály. [14]



Obrázek 7 Znázornění adhezních sil [22]

2.2 Smáčivost

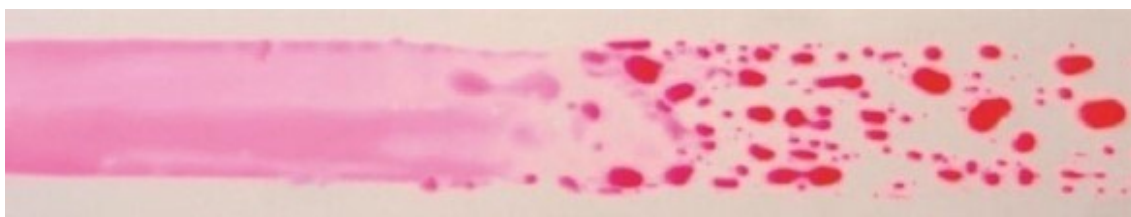
Smáčivost popisuje, jak dobře kapalina rozprostírá na povrchu pevné látky. Je charakterizována kontaktním úhlem Φ mezi kapkou kapaliny a povrchem: čím menší je tento úhel, tím lepší je smáčivost. Dobrá smáčivost je nezbytná pro rovnoměrné nanesení nátěrů nebo lepidel na plastové povrchy. Například, aby inkoust dobře přilnul k plastu, musí být zajištěna dostatečná smáčivost povrchu, což je závislé na povrchovém napětí materiálu. [15]



Obrázek 8 Smáčivost [23]

2.3 Povrchové napětí

Povrchové napětí je síla působící na jednotku délky okraje povrchové blány kapaliny a je vyjádřeno v newtonech na metr (N/m). V případě kapalin jsou povrchová energie a povrchové napětí číselně shodné, protože práce potřebná k vytvoření nového povrchu je přímo úměrná délce okraje tohoto povrchu. Aby kapalina smáčela pevný povrch, musí být její povrchové napětí menší než kritická povrchová energie tohoto pevného materiálu. V praxi to znamená, že materiály s vysokou povrchovou energií jsou lépe smáčeny kapalinami, což je důležité například při nanášení nátěrů. Naopak materiály s nízkou povrchovou energií, jako jsou některé plasty, mohou vyžadovat speciální úpravy povrchu ke zlepšení jejich smáčivosti a adheze. [16]



Obrázek 9 Princip testování povrchového napětí [23]

Povrchové napětí lze velmi snadno otestovat například testovacími inkousty. Princip testu spočívá v několika vzorcích inkoustů, každý je certifikován na jiné povrchové napětí. Postupně na povrch plastového dílu děláme testovací čáry a sledujeme chování inkoustu. Jak je vidět na **obrázku 9** od inkoustu, kde dojde k perfektnímu rozlivu odečteme hodnotu povrchového napětí. Postupujeme postupně od nejnižší hodnoty k nejvyšší a hledáme mez, kde se nám inkoust vlivem velikosti povrchového napětí ošetřeného dílu perfektně rozlije.

3 METODY ČIŠTĚNÍ A PŘEDÚPRAVY PLASTOVÝCH DÍLŮ

Plastové díly se lakují v mnoha odvětvích – od automobilového průmyslu, přes elektroniku a spotřební zboží, až po lékařská zařízení. Na rozdíl od kovů mají plasty obecně nižší povrchovou energii a mohou obsahovat příměsi (např. separační prostředky z formy, zbytky aditiv či olejů), které zhoršují smáčení a přilnavost nátěrů. Pro dosažení kvalitní adheze nátěru je proto nutné povrch před lakováním náležitě připravit – odstranit nečistoty a zvýšit povrchové napětí. U plastů je předúprava stejně důležitá jako u kovů. Plast ABS má střední povrchovou energii a je lépe smáčitelný než polyolefiny, přesto i u něj je nutné důkladné očištění a často i mírná aktivace povrchu pro zajištění spolehlivé přilnavosti barvy. [17]

3.1 Čištění rozpouštědly

Čištění a odmašťování pomocí rozpouštědel patří mezi nejjednodušší a nejrozšířenější metody odstraňování nečistot z povrchu plastů. Princip spočívá v rozpuštění kontaminantů organickými rozpouštědly, jako jsou například aceton, methyl ethyl keton, izopropylalkohol, metylalkohol. Alternativně se využívá také voda, nejčastěji destilovaná či deionizovaná, kvůli riziku kontaminace běžnou vodou. Rozpouštědla lze nanášet prostým otřením navlhčeným hadříkem, ponořením dílů do vyhřívané vířivé lázně, postřikem, kondenzujícími parami (odmašťování parou) nebo ultrazvukem, který pomocí vibrací zvyšuje účinnost čištění. Při čištění rozpouštědly je nezbytné dbát na jejich kompatibilitu s plastem, pravidelnou výměnu či filtrování rozpouštědla a pečlivé sušení povrchů. U termoplastů je nutná opatrnost při sušení teplem kvůli možným deformacím. [17]

3.2 Čištění detergenty

Detergenty a mýdla odstraňují mastné nečistoty emulgací a fungují na podobném principu jako běžné domácí čisticí prostředky (například Ivory, Ajax). Často se využívají v první fázi přípravy povrchu před dalšími metodami úprav. Účinné je zejména namáčení dílů ve vodných roztocích těchto detergentů v kombinaci s mechanickým otěrem. Důležitá je pravidelná kontrola čistoty použitého roztoku, důkladné oplachování čistou vodou a následné sušení při zvýšené teplotě. [17]

3.3 Ionizace povrchu

Při ionizaci se z neutrálních atomů či molekul stávají nabitě částice, ionty – odtržením nebo přidáním elektronů. Tento proces nastává, je-li částici dodána dostatečná energie k uvolnění elektronu, což může zajistit například silné elektrické pole. V průmyslové praxi se pro ionizaci vzduchu často využívá vysoké napětí přivedené na ostrý hrot elektrody. Tím se iniciuje korónový výboj, který štěpí molekuly vzduchu na kladné a záporně nabitě ionty. Vzniká tak směs ionizovaného vzduchu. Pokud tento ionizovaný proud vzduchu nasměrujeme na elektrostaticky nabitý povrch, dojde k neutralizaci povrchového náboje působením opačně nabitých iontů ze vzduchu.[18][19]

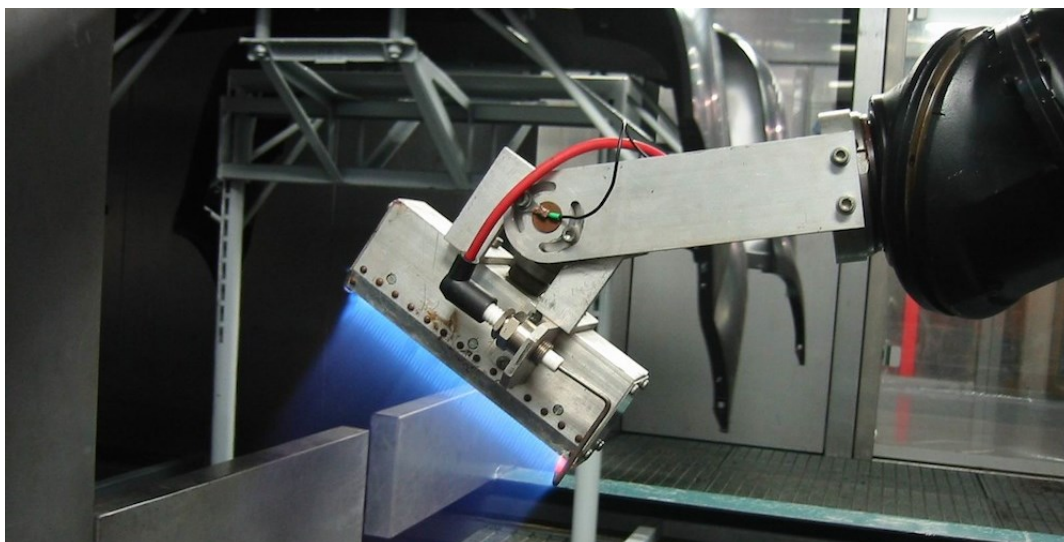
3.4 Chemické ošetření

Chemické leptání představuje nejúčinnější způsob přípravy plastových povrchů pro lakování. Zlepšuje smáčivost povrchu a přilnavost následných povlaků prostřednictvím změny fyzikálních a chemických vlastností povrchové vrstvy. Chemickému leptání předchází obvykle alespoň jeden krok čištění rozpouštědly či detergenty pro eliminaci kontaminace. Mezi nejčastější metody patří leptání směsí kyseliny sírové a dichromanu draselného nebo sodného, používané zejména u plastů jako ABS, acetalu, polyolefiny či polystyren. Konkrétní složení lázní, teplota (až cca 71 °C) a doba expozice (od sekund až po desítky minut) se volí podle typu plastu a požadovaného účinku. U plastů obtížně upravitelných, například fluoroplastů, se využívá agresivnější leptání kovovým sodíkem dispergovaným ve směsi naftalenu a tetrahydrofuranu, po kterém následuje důkladné opláchnutí rozpouštědly a vodou. Jinou metodou je použití zahřátého vodného roztoku hydroxidu sodného (pro polyamidy a polysulfon), satinování, leptání fenolem (nylon) či povrchová chlorace roztokem chlornanu sodného, kyseliny chlorovodíkové a vody, vhodná zejména pro termoplasty. Ve všech případech chemického leptání je nezbytné důkladné opláchnutí vodou, pravidelná kontrola koncentrace aktivních složek lázně a důsledné sušení povrchu za zvýšené teploty. [17]

3.5 Ožehnutí plamenem

Ožeh povrchu spočívá v rychlém ožehnutí otevřeným plamenem. Obvykle se používá plynový hořák s oxidativním plamenem (nadbytek kyslíku) a díl se vystaví plameni na dobu řádově jednotek sekund. Vysoká teplota (typicky kolem 1000–3000 °C na špičce plamene)

způsobí částečné opálení organických nečistot a hlavně oxidaci povrchové vrstvy polymeru. Na povrchu se tak vytvoří polární funkční skupiny (karbonylové, hydroxylové apod.), které zvýší povrchovou energii materiálu. Správně provedené ožehnutí neprohřeje celý objem dílu, působí jen velmi povrchově (řádově mikrometry hluboko). Plamenná úprava je rychlá a efektivní i pro větší plochy. Plamen zároveň povrch lehce očistí od tenké vrstvy mastnot či prachu tím, že je spálí je tedy vhodný i pro povrchy s vyšším obsahem organických nečistot. Technologie je relativně jednoduchá na integraci, hořáky lze konstruovat v různých šířkách a tvarech, takže se dají přizpůsobit i složitějším konturám dílu. Plamen pokryje jedním přejezdem velkou plochu i členitý povrch. Nejde o mokrý proces, nevzniká odpadní voda ani se neaplikují chemikálie, povrch je ihned suchý a připravený k lakování. Nevhodně provedené ožehnutí může povrch přepálit nebo dokonce díl deformovat. U citlivých plastů s nízkou teplotou tání či skelného přechodu (např. PE, některé tenké díly z PMMA) hrozí zkrabatění nebo propálení, pokud se plamen pohybuje pomalu. Nutností jsou proto správně nastavené parametry jako vzdálenost hořáku, rychlost posuvu a chemie plamene. Nevýhodou je práce s otevřeným ohněm z hlediska bezpečnosti provozu je třeba opatření proti požáru. Plamenná úprava také může vytvářet ozón a oxidy dusíku, a proto je nutné odsávání zplodin. Na rozdíl od jiných metod (např. plazma) plamen nezajistí rovnoměrnou aktivaci v hlubších strukturách či otvorech. Jedná se o line-of-sight metodu (působí jen tam, kam plamen přímo dosáhne). Aktivovaný povrch má také omezenou trvanlivost, protože polární skupiny mohou následně pomalu reagovat dále nebo být překryty adsorpcí nečistot ze vzduchu, proto by lakování mělo následovat brzy po ožehnutí, ideálně v řádu minut až hodin. [20][21]

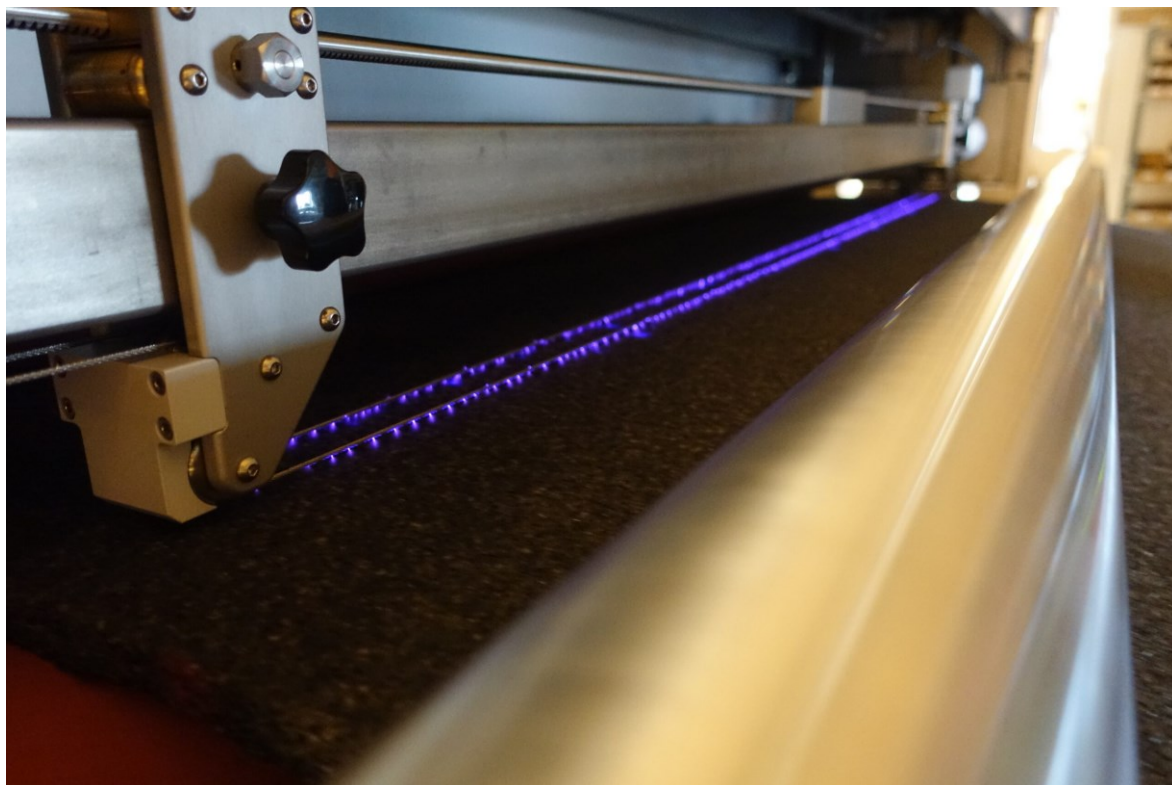


Obrázek 10 Robotický hořák ožehu [26]

3.6 Korónový výboj

Korónová úprava využívá vysokofrekvenční elektrický výboj na ostré elektrodě či drátku, kterým se ionizuje okolní vzduch a vzniká tzv. koróna. Plastový díl nebo fólie se přivede do blízkosti tohoto ionizovaného oblaku. Energetické ionty a radikály vzniklé v koróně bombardují povrch polymeru a štěpí molekuly na povrchu, což vede k tvorbě volných radikálů a následné oxidaci povrchu vzdušným kyslíkem. Důsledkem je zvýšené povrchové napětí a smáčivost materiálu. Typicky se díl umístí mezi elektrodu a uzemněnou desku (nebo válec u fólií), přičemž vzduchové mezeře prochází elektrický výboj o napětí desítek kV. Koróna působí jen na velmi tenkou povrchovou vrstvu (několik jednotek až desítek nm). Je to rychlá, kontinuální a relativně levná metoda pro zvýšení adheze. Nevyžaduje vakuum ani komplikované zařízení, v podstatě stačí vysokonapěťový zdroj a vhodná elektroda. Není třeba chemikálií ani sušení, proces je suchý a ekologický. Korónou lze plošně ošetřovat fólie, pásy a deskové polotovary přímo ve výrobní lince těsně před tiskem nebo lakováním – využívá se hojně v obalovém průmyslu pro potisk plastových fólií a sáčků.[22]

Výsledky jsou opakované a kontrolovatelné, jelikož lze nastavit energii výboje a rychlost posunu a tím dosáhnout požadované úrovně povrchového napětí. Koróna je také bezpečnější než otevřený plamen (nehrozí požár dílu). Korónový výboj se uplatní hlavně pro plošné tvary; pokud má výrobek složitou 3D geometrii, koróna nedosáhne do záhybů a stíněných míst (opět line-of-sight efekt). Obvykle je efektivní do tloušťky materiálu ~1 cm. U silnějších či robustnějších dílů je obtížné zajistit rovnoměrnou aktivaci. Při korónovém výboji vzniká ozón, který je toxický, takže je třeba odsávání. Úroveň aktivace je nižší než u plazmy ve vakuu, koróna dodává méně energie a může být méně účinná na vysoce odolné polymerní povrchy. Dále, trvanlivost efektu je omezená a aktivovaný povrch postupně stárne. V mnoha případech je nutné zpracovaný povrch nalakovat nebo potisknout do 15–30 minut od ošetření, jinak se přilnavost opět zhoršuje. V neposlední řadě, korónový výboj může způsobit mikro jiskření a u citlivých elektronických dílů by mohl indukovat nežádoucí napětí pro integrované elektronické komponenty, tedy není vhodný. [23]



Obrázek 11 Korónový výboj [28]

3.7 Předúprava za pomoci plazmy

Plazmová předúprava využívá ionizovaný plyn (plazmu) k obdobné aktivaci povrchu jako koróna, avšak může probíhat jak ve vakuové komoře (nízkotlaká plazma), tak i za atmosférického tlaku (tzv. atmosférická plazma v podobě plazmových trysek). V plazmovém výboji vznikají vysoce energetické částice – ionty, elektrony, radikály, které dopadají na povrch polymeru a chemicky i fyzikálně jej mění. Dochází k očištění povrchu od organických nečistot a současně ke vzniku polárních skupin navázaných na povrch, čímž se zvýší povrchové napětí a smáčivost. Plazma může také způsobit velmi jemné zdrsnění na nanoskopické úrovni, což dále napomáhá adhezi. Na rozdíl od koróny lze ve vakuové plazmě použít i jiné plyny než vzduch často kyslík, argon, dusík nebo jejich směsi a dosáhnout tak specifických chemických změn povrchu. [14]

Plazmové ošetření je velmi univerzální – lze jej aplikovat na různé materiály (plasty, sklo, kovy) a různé tvary. Vakuová plazma umožňuje naráz ošetřit i složitě tvarované díly, ionizovaný plyn se dostane i do dutin a záhybů a aktivuje celý povrch rovnoměrně, protože působí všude, kam pronikne plyn. Plazma je také šetrná k materiálu jedná se o tzv. studenou plazmu (typicky pod 100 °C), která nepoškodí teplotně citlivé díly. Proces je suchý

a nezanechává rezidua, odstraňuje potřebu použití leptavých chemikálií pro zvýšení adheze. Atmosférická plazma se dá integrovat přímo do výrobní linky před lakováním a lze ji cílit jen na požadovaná místa. Oproti koruně poskytuje plazma hlubší a rovnoměrnější aktivaci povrchu s delší stabilitou vytvořených skupin. Plazmová úprava je ceněna i v lékařském a elektronickém průmyslu, protože kromě zvýšení adheze povrch i vyčistí od mikročástic a může působit i jako dezinfekce (sterilizace povrchu). Z hlediska ekologie a bezpečnosti je plazma příznivější než plamen (žádný otevřený oheň, méně zplodin). [14]

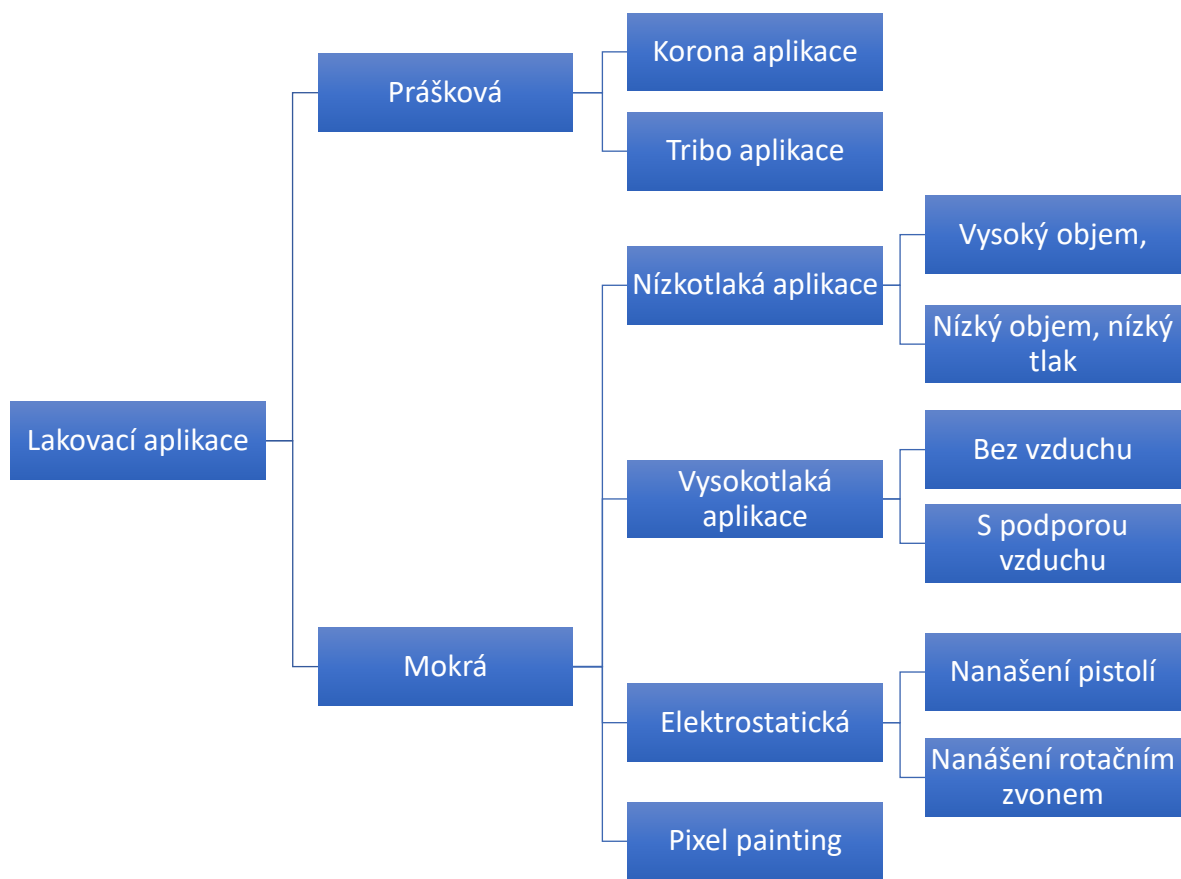
Nevýhodou klasické vakuové plazmy je nutnost vakuové komory, proces je obvykle vsádkový, což omezuje takt výroby a vyžaduje investici do zařízení. Pro velké díly (např. automobilové nárazníky) by komora musela být značně rozměrná. Atmosférická plazma toto obchází, ale zase musí být tryska/elektroda vedena poměrně blízko nad celým povrchem dílu – ošetření rozsáhlých ploch může trvat déle. Celkově jsou plazmové systémy technologicky náročnější a dražší než jednoduchá koróna či plamen. Také upravený povrch stárne, efekt zvýšené povrchové energie může během hodin až dní slábnout, pokud díl není brzy nalakován. U velmi silně znečištěných povrchů nemusí plazma plně nahradit předchozí odmaštění, velké kapky oleje či silná mastnota mohou bránit účinnému působení plazmatu, takže plazmě by vždy mělo předcházet základní odmaštění. [14][24]



Obrázek 12 Ošetření povrchu pomocí plazmy [29]

4 TYPY ROBOTICKÉHO LAKOVÁNÍ

V oblasti lakování existuje několik systémů, které jsou běžně využívány. Níže budou představeny technologie, které se uplatňují při lakování pomocí robotických ramen. Základní rozdělení lakovacích technologií je na lakování prováděné práškovou barvou a na lakování kapalnými barvami. Obě metody mají své specifické využití a jejich výběr je prováděn na základě požadavků konkrétní aplikace.



Graf 1 Rozdělení lakovacích aplikací [30]

4.1 Prášková aplikace

Práškové lakování je technologie povrchové úpravy, při níž se na vodivý předmět nanáší prášková barva a následně se vypaluje v peci do podoby souvislého ochranného povlaku. Hlavní výhodou této metody oproti mokrému lakování je eliminace organických rozpouštědel technologie je ekologičtější (nevznikají VOC emise) a umožňuje lepší využití materiálu, nepoužitý prášek lze z velké části recyklovat. K nabíjení prášku se průmyslově používají dvě hlavní metody elektrostatické nabíjení a tribostatické nabíjení.

4.1.1 Elektrostatická metoda

Elektrostatické práškové lakování využívá elektrody k nabíjení částic práškové barvy. V trysce stříkací pistole je umístěna elektroda s vysokým napětím (typicky 10–100 kV). Vlivem napěťového rozdílu je okolní vzduch ionizován a vzniká tzv. korónový mrak, oblak volných iontů. Když prášek prochází touto zónou, ionty jsou zachyceny na částicích prášku a udělují jim záporný elektrický náboj. Nabité částice jsou poté elektrostaticky přitahovány k uzemněnému obrobku, na jehož povrchu ulpívají a vytvářejí rovnoměrnou vrstvu. Po nanesení prášku je provedeno vytvrzení v peci, kde prášek při teplotách cca 140–200 °C roztaje a vytvoří hladký film. [25]

Pro správnou funkci elektrostatického nabíjení je nezbytné kvalitní uzemnění obrobku i celého pracoviště. Pokud by náboj na povrchu obrobku nemohl být odveden do země, docházelo by k jeho akumulaci a odpuzování dalších nabitých částic, nový prášek by se již nepřichytil a vznikaly by defekty lakovací vrstvy. Při vysokých tloušťkách nanášeného prášku může docházet také k tzv. zpětné ionizaci, kdy nadměrný náboj způsobuje elektrické výboje, které narušují formující se film. [17]

Dalším omezením koronové metody je tzv. efekt Faradayovy klece, kdy silné elektrostatické pole vzniká především kolem hran a výstupků, zatímco do zapuštěných míst a dutin proniká obtížně. Z tohoto důvodu je obtížné nanášet prášek do vnitřních koutů a úzkých prostor, protože prášek ulpívá spíše na hranách blíže k elektrodě. Moderní zařízení tento efekt částečně eliminují regulací proudu iontů, avšak při velmi složitých tvarech může být koronové nanášení méně vhodné. [26]

Technologie koronového nabíjení je v současnosti nejrozšířenější a lze ji využívat s prakticky všemi typy práškových barev. Není omezena složením prášku – aplikovány mohou být polyesterové, epoxidové i polyuretanové prášky včetně těch s metalickými pigmenty či speciálními efekty. Pistole neobsahuje vnitřní povrchy, kde by se prášek mechanicky třel, protože nabíjení prášku probíhá bezkontaktně při průchodu ionizovaným polem. Tím je zajištěno nižší opotřebení dílů pistole v důsledku abraze. Koronové pistole proto mají delší životnost a vyžadují méně častou údržbu. Rovněž dosahují vyšších rychlostí nanášení, neboť částice jsou okamžitě nabity, což umožňuje rychle pokrýt rozsáhlé plochy. Nevýhodou zůstává zmíněný efekt Faradayovy klece a obtíže při lakování tvarově komplikovaných objektů, zejména vnitřních rohů a hlubokých kapes. Systém rovněž vyžaduje vysokonapěťový zdroj, což zvyšuje pořizovací náklady a komplexnost zařízení ve srovnání s jednoduchými tribo pistolemi. Přesto koronová technologie zůstává v praxi preferovanou volbou díky své univerzálnosti a vysokému výkonu. [26]



Obrázek 13 Elektrostatické práškové lakování [32]

4.1.2 Tribostatická metoda

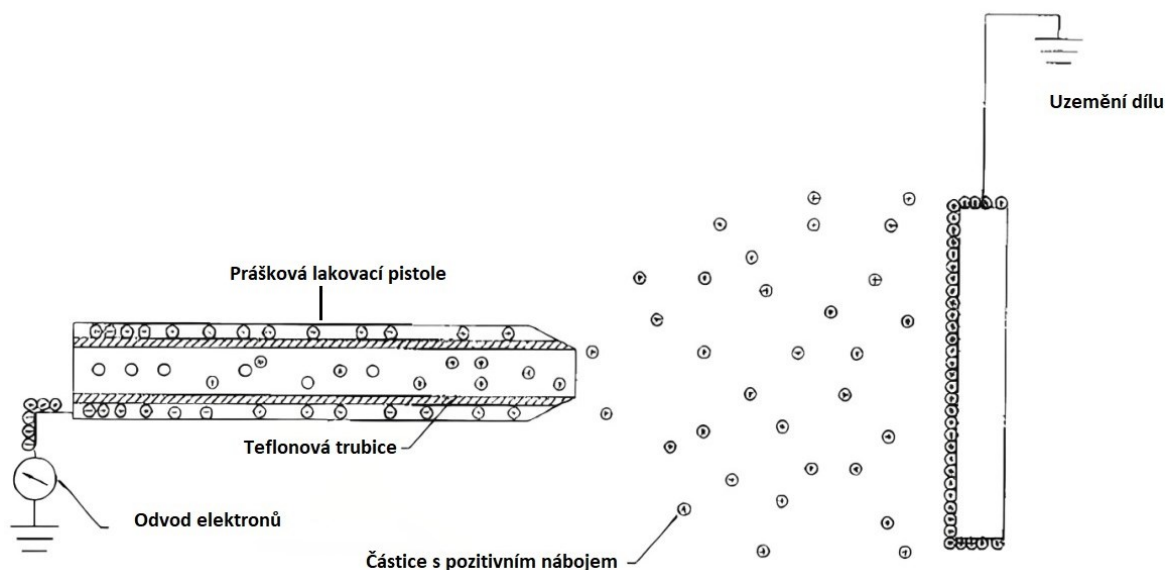
Alternativním způsobem nabíjení práškové barvy je tribostatický princip, založený na tření částic. Při této metodě je prášek nabíjen mechanickým kontaktem s izolačním povrchem, typicky při průchodu trubicí stříkací pistole vyrobené ze speciálního teflonu (PTFE) nebo jiného vhodného materiálu. Třením práškových částic o stěny trubice dochází k přenosu náboje a prášek získává kladný náboj. Uvolněné elektrony jsou odváděny uzemněním pistole, aby nedocházelo k hromadění záporného náboje. Externí vysoké napětí zde není potřeba, neboť nabíjení je zajišťováno samotným pohybem prášku. Prášek je unášen proudem stlačeného vzduchu, jehož průtok řídí rychlost dodávání prášku a výkon nástřiku. Regulací průtoku a konstrukcí pistole je zajištěno, aby prášek setrval v pistoli dostatečně dlouho a získal potřebný náboj třením. [27]

Vzhledem k tomu, že tribo pistole nevytváří mezi pistolí a obrobkem silné elektrostatické pole, nevzniká zde výrazný efekt Faradayovy klece. Nabité částice jsou k uzemněnému předmětu přitahovány slabším polem, které je dáno jejich vlastním nábojem, díky čemuž snadněji pronikají i do obtížně přístupných míst a koutů. Tato vlastnost umožňuje rovnoměrnější pokrytí složitých tvarů. Tribo pistole rovněž nemohou způsobit zpětnou ionizaci vrstvy, protože negenerují přebytek iontů, náboj je přímo vázán na částicích prášku. Z hlediska bezpečnosti odpadá manipulace s vysokým napětím, což konstrukci zařízení zjednodušuje. Tribo systémy jsou proto jednodušší a levnější než koronová zařízení. [27]

Metoda také umožňuje velmi hladké nanesení silnějších vrstev prášku, kde vzhledem k absenci silného elektrického pole nedochází k nadměrnému vzájemnému odpuzování práškových částic, což vede k hladšímu povrchu vrstvy i při větší tloušťce nástřiku. Elektricky jednoduchá konstrukce pistole rovněž snižuje pořizovací náklady a eliminuje rizika spojená s vysokým napětím. [17][27]

Tribo nabíjení však nelze použít pro všechny druhy prášků. Funguje dobře s určitými typy práškových plastů, často čistě epoxidovými nebo některými polyesterovými systémy, avšak u mnoha prášků zejména těch s obsahem kovových pigmentů nelze potřebný náboj třením získat. Omezená triboelektrická řada materiálů vyžaduje speciální formulaci prášků určených právě pro tribo nabíjení, což snižuje univerzálnost této metody ve srovnání s koronovou. Další nevýhodou je nižší rychlost nanášení, protože částice musí strávit určitý

čas třením uvnitř pistole, aby získaly plný náboj. Při příliš vysokém průtoku by částice nestačily získat dostatečný náboj a účinnost nanášení by se snížila. V praxi proto tribo pistole obecně dosahuje menšího výdeje prášku za minutu než koronová pistole, což znamená, že k dosažení stejného pokrytí může být potřeba více tribo pistolí nebo pomalejší pohyb dílu linkou. Z těchto důvodů se tribostatické nabíjení používá méně často a obvykle jen pro specifické účely, například lakování tvarově složitých dílů, kde koronové nabíjení selhává, nebo v provozech se specializací na omezený sortiment prášků vhodných pro tribo. [17]



Obrázek 14 Tribostatické práškové lakování [34]

4.2 Kapalinové aplikace

Mokrý lakování je proces, při kterém je kapalná barva nanášena na povrch výrobku pomocí různých druhů stříkací techniky. Touto technologií lze dosáhnout vysoké kvality povrchu, rovnoměrného pokrytí a efektivního využití materiálu. Díky použití robotizovaných stříkacích zařízení je možné zvýšit produktivitu, snížit spotřebu barev a minimalizovat provozní náklady.

V praxi je při mokřém lakování využíváno několik různých metod atomizace barvy. Mezi nejběžnější patří nízkotlaké stříkání, vysokotlaké (airless) stříkání a elektrostatické stříkání.

4.2.1 Nízkotlaké – konvenční systémy

Klasické stříkání s využitím tlakového vzduchu funguje na principu atomizace barvy proudem stlačeného vzduchu. Barva je přiváděna do trysky pistole a v hlavě pistole se mísí s proudem vzduchu z kompresoru, který ji rozbíjí na jemné kapičky. Tradičně se používaly tzv. vysokotlaké pistole s tlakovým vzduchem okolo 3–4 bar na trysce. Tyto konvenční pistole dosahovaly velmi kvalitní atomizace, ale měly nízký koeficient přenosu barvy, typicky jen 25–50 % barvy skončilo na povrchu, zbytek tvořil mlhu - overspray. To znamená velké ztráty materiálu a znečištění ovzduší. Proto byly postupně vyvinuty technologie HVLP (High Volume Low Pressure) a LVLP (Low Volume Low Pressure), které také pracují se stlačeným vzduchem, ale při nižším tlaku a upravených poměrech objemu.[17]

4.2.1.1 HVLP (vysoký objem, nízký tlak)

Pistole tohoto typu mají konstrukci trysky, která snižuje tlak vzduchu na výstupu (max. kolem 0,7 bar), ale při vysokém průtoku vzduchu. Díky nižšímu tlaku lze pistolí lakovat blíže k povrchu bez rozfoukání mokré vrstvy a více barvy ulpí na objektu místo úniku do ovzduší. Typická přenosová účinnost HVLP pistolí dosahuje až ~65 %, což je výrazné zlepšení oproti konvenčním HP systémům. HVLP ovšem ke správnému rozprašování vyžaduje vyšší množství vzduchu, což však nebývá problém, protože zvýšená spotřeba vzduchu je zanedbatelná v porovnání s úsporou drahého lakovacího materiálu. [28]



Obrázek 15 Automatická HVLP pistole Sagola [35]

4.2.1.2 LVLP (nízký objem, vysoký tlak)

Jde o další vývojový stupeň, kdy pistole potřebuje ještě menší objem vzduchu při nízkém tlaku k dosažení jemné atomizace. Úprava v konstrukci trysky umožňuje zvýšit koeficient přenosu až na ~80 % . Nižší spotřeba vzduchu znamená, že LVLP pistole lze provozovat i s méně výkonným kompresorem. Princip míchání barvy se vzduchem je obdobný jako u HVLP. Díky velmi jemnému rozprášení mohou LVLP pistole nanášet tenčí vrstvy rovnoměrněji, což je ideální např. pro drahé barvy a laky, kde je žádoucí minimální overspray. LVLP technologie je však náročnější na precizní nastavení .[30][31]

4.2.2 Vysokotlaké lakování

Hlavním znakem těchto metod je, že kapalina je protlačována speciální tryskou pod velmi vysokým tlakem, běžně v řádu desítek až stovek barů. Díky tomu je kapalina při výstupu jemně rozprášena na drobné kapičky. Metody umožňují rychlou aplikaci silnějších vrstev nátěrových hmot, a proto jsou oblíbené při lakování velkých ploch nebo tam, kde musí být nanášeny materiály s vyšší viskozitou.

Mezi hlavní vysokotlaké technologie patří zejména bezvzduchové lakování (Airless) a vysokotlaké lakování s asistencí vzduchu (Airmix). Každá z těchto technologií má specifické výhody i nevýhody – Airless umožňuje vysokou rychlost nanášení a práci s velmi hustými barvami, zatímco technologie Airmix kombinuje vysokotlaký nástřik s jemnou regulací paprsku pomocí přídavného vzduchu, čímž se dosahuje lepší kvality povrchu.

Díky vysokému výkonu a schopnosti rychlého nanášení silných vrstev materiálu je vysokotlaké lakování široce využíváno ve stavebnictví, strojírenství a dalších průmyslových aplikacích, které vyžadují vysokou produktivitu při zachování dostatečné kvality povrchu.

4.2.2.1 Vysokotlaké lakování bez pomocného vzduchu – Airless

Při Airless stříkání se k rozprášení nátěru nepoužívá vzduch, ale čistě hydraulický tlak samotné kapaliny. Pístové čerpadlo dopravuje barvu do velmi malé trysky pod vysokým tlakem (běžně 70–250 bar). Po průchodu tryskou se prudce expandující proud barvy tře o okolní vzduch a rozbíjí se na kapky. Tvar a průměr trysky spolu s tlakem určují velikost kapek a šířku paprsku. Airless systém vytváří stříkací vějíř s charakteristickými „ocásky“ barvy po stranách paprsku, protože okraje nemusí být tak jemně atomizované. Nevyužívá se žádný přidaný vzduch – odtud název airless. Výsledkem jsou o něco větší kapky než

u pneumatického stříkání, ale výhoda spočívá ve vysoké rychlosti nanášení, silný proud barvy umožňuje velmi rychle pokrýt velkou plochu a nanést silnou vrstvu při jednom průjezdu. Typické airless zařízení dokáže pracovat až 2× rychleji než vzduchová pistole a dosahuje vyššího naneseného filmu na jeden nástřík. Přenosová účinnost bývá lepší než u konvenčního vzduchového stříkání (řádově 65–70 %), protože chybí jemná mlhovina unášená větrem, kapky jsou větší a více jich dopadne na povrch. Stále však určité přestříky existují a vysoká rychlost částic může způsobit odraz kapek od povrchu. Airless technika se hodí i pro vysoce viskózní nátěry, které by šly vzduchem špatně rozprašovat (airless tryska zvládne husté materiály bez nutnosti ředění). [17] [32]

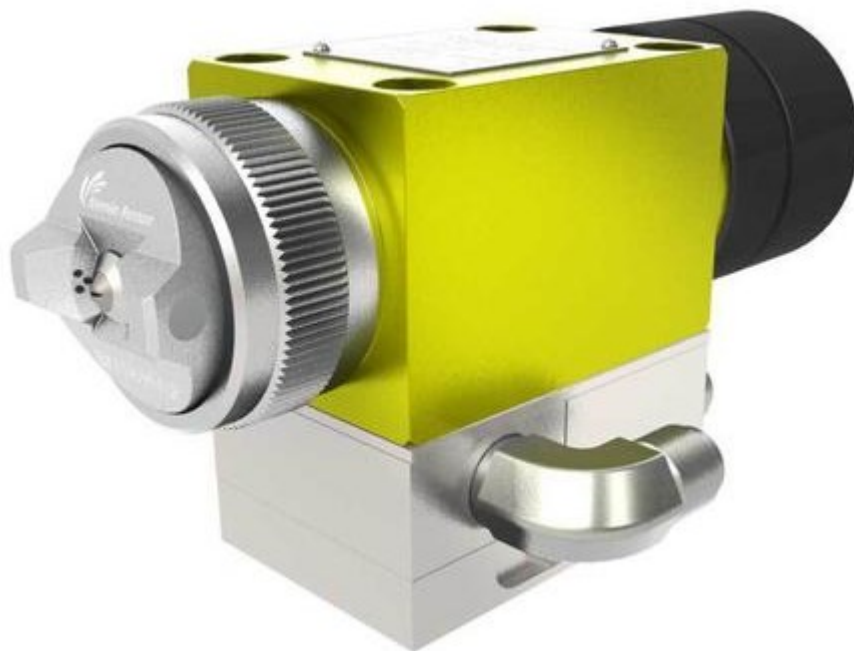


Obrázek 16 Automatická airless pistole [37]

4.2.2.2 Vysokotlaké lakování s asistencí vzduchu – AirMix

Technologie AirMix kombinuje předchozí dva principy, barva je čerpána pod vysokým tlakem k trysce, kde dojde k částečné atomizaci jako u airless, ale navíc je na výstupu přidáno malé množství vzduchu o nižším tlaku, většinou 0,3–2 bar ke zjemnění rozprašeného paprsku a dotvarování vějíře. Prakticky to znamená, že střed paprsku je rozprašen tlakem kapaliny a dohánění vzduchem rozmělní okraje paprsku to odstraní tzv. ocásky a zjemní kapky. Pracovní tlaky jsou nižší než u čistého airless řádově 50–120 bar a dochází k vyšší míře kontroly procesu. Výsledkem je kompromis, kde AirMix dosahuje vyšší kvality povrchu než čistý airless, ale rychlost nástříku a tloušťka jedné vrstvy jsou vyšší než u nízkotlakého lakování. Přenosová účinnost se v ideálních podmínkách blíží HVLP cca okolo 65 %, protože nižší tlak redukuje odraz a přidaný vzduch lépe usměrní barvu na cíl. U

hustších povlaků však AirMix musí zvýšit tlak či množství vzduchu, čímž se účinnost snižuje. Obvykle se uvádí, že AirMix spojuje to nejlepší z obou světů – „měkký“ rozprach jako u vzduchových pistolí a vysoký výkon airless. Tato technologie je vhodná pro střední a vyšší viskozity nátěrů, kde čistě vzduchové pistole nestačí, ale zároveň je požadována lepší kvalita povrchu, než poskytne samotný airless. [33]



Obrázek 17 Automatická AirMix pistole [38]

4.2.3 Kapalinové elektrostatické lakování

Elektrostatické lakování je technologie mokrého nanášení barev založená na principu elektrostatického nabíjení částic barvy. Během tohoto procesu jsou kapky nátěrové hmoty v aplikátoru (stříkáci pistoli nebo rotačním zvonu) nabíjeny vysokým napětím, zatímco lakovaný objekt je uzemněn. Tím je vytvořeno elektrostatické pole, díky němuž jsou nabité částice barvy přitahovány přímo na povrch výrobku. Tímto způsobem je výrazně zvýšena efektivita přenosu barvy a omezena tvorba nadbytečné mlhy a plýtvání materiálem.

Hlavními výhodami elektrostatického lakování jsou významné úspory materiálu a snížení emisí škodlivin, protože větší množství barvy je zachyceno na lakovaném předmětu, což vede k menšímu množství odpadu, nižší prašnosti a redukci emisí těkavých organických látek (VOC) do ovzduší. Aplikace barvy je navíc rychlejší, zvýšení rychlosti procesu až o 50 % ve srovnání s běžným stříkáním. Z těchto důvodů jsou elektrostatické systémy

preferovány tam, kde je požadováno zvýšení produktivity při současném zlepšení ekologických parametrů lakování.[17]

4.2.3.1 Elektrostatické lakování pomocí stříkací pistole

Elektrostatické stříkání probíhá za principu, kdy nabité částice nátěrové hmoty jsou přitahovány k uzemněnému objektu. V praxi elektrostatická stříkací pistole nabíjí kapičky barvy vysokým napětím většinou 10–100 kV, pomocí elektrody umístěné u ústí trysky, zatímco lakovaný předmět je uzemněn. Barva může být atomizována běžným způsobem, vzduchem nebo airless tryskou, elektrostatika je tedy často nadstavbou jiných metod, nikoli zcela odlišnou metodou. Nejčastěji se setkáme s elektrostatickou vzduchovou pistolí, kde kombinujeme princip HVLP konvenční pistole a přidáváme elektrostatický náboj kapičkám barvy v proudu. Nabité částice jsou silovým polem směřovány na povrch a doslova obalují celý předmět, takže pokryjí i hůře přístupné části. Tím dramaticky roste efektivita, přenosová účinnost může za ideálních podmínek dosahovat 85–90 %, tedy většina nastříkané barvy ulpí na výrobku. Díky náboji také dochází k samovolnému vyrovnání tloušťky vrstvy, protože nabitá kapka se odpudí od již nabitého filmu na povrchu, tím nehrozí přestříkání jedné oblasti, jelikož povrch pokrytý izolující vrstvou už nepřitahuje další barvu. Principiálně lze elektrostaticky nanášet různé druhy nátěrů – rozpouštědlové i vodou ředitelné, pokud je pistole konstrukčně uzpůsobena. U vodou ředitelných laků je nutná izolace vysokého napětí, protože jsou vodivé a mohly by zkratovat nabíjecí elektrodu.[34][35]



Obrázek 18 Robotická duální nízkotlaká elektrostatická pistole [39]

4.2.3.2 Elektrostatické lakování pomocí rotačního zvonu

Rotační zvon je často používaný v automatizovaných linkách. Princip se liší v tom, jak dochází k atomizaci barvy, kde místo proudu vzduchu nebo vysokého tlaku zde barva stéká na rychle rotující zvonovitý terčík, turbínou roztáčený disk/zvon a vlivem centrifugální síly se na okraji zvonu rozbíhá do jemné mlhy. Zvon se točí rychlostí 20 000 až 60 000 ot/min, čímž vytváří extrémně jemné a rovnoměrné kapičky barvy menší než u běžného stříkání. Kolem zvonu proudí tzv. tvarovací vzduch, který usměrňuje rozprášený kužel barvy a unáší jej směrem k objektu. Současně je celý zvon na vysokém potenciálu a barva se nabíjí při průletu zvonem, takže kapičky nesou elektrostatický náboj. Kombinace velmi jemné atomizace a elektrostatického přitahování dává nejvyšší přenosové účinnosti vůbec kolem 97 %. Rotační zvony dosahují výborné rovnoměrnosti tloušťky a kvality povlaku a zároveň spotřebují méně vzduchu než klasické pistole. Tato technologie je technologicky náročnější, obvykle pevně zabudovaná do robotizovaných kabin. Rotující zvony se využívají téměř výhradně v automobilovém průmyslu a podobných velkosériových provozech. Je možné i ruční či poloautomatické použití rotačních disků, ale to je výjimečné. Z uvedených běžných technologií se jedná o nejdražší možnou aplikaci. [36][37]



Obrázek 19 Robotická pistole s elektrostatickým rotačním zvonem [40]

4.2.4 ABB PixelPaint

PixelPaint od ABB je technologie robotického lakování automobilů, která radikálně mění dosavadní způsoby vícebarevného lakování. Na rozdíl od tradičních metod eliminuje PixelPaint přestřík barvy díky speciální tiskové hlavici typu inkjet s více než 1000 individuálně ovládanými tryskami, které nanášejí barvu přímo na povrch karoserie jako mikrokapky (průměr 20–50 μm) s účinností 100 %. To znamená, že veškerá barva dopadá pouze na požadovaná místa, což zcela odstraňuje nutnost maskování dílů karoserie a dvojího průchodu lakovnou. Díky tomu PixelPaint zkracuje dobu lakování dvoubarevných a složitých vzorů až o 50 %, šetří barvu a výrazně snižuje emise VOC i CO_2 . Robot vybavený touto hlavici zvládne aplikovat detailní grafické vzory a ostré hrany s rozlišením až 360 dpi, což umožňuje výrobcí nabízet zákazníkům individuální designy efektivně a ekonomicky. Technologie PixelPaint navíc minimalizuje energetické nároky a spotřebu vody tím, že nepotřebuje intenzivní vodní odsávání ani silné větrání lakovny. Aktuálně nachází využití zejména v prémiovém segmentu, například automobilka Mahindra plánuje od roku 2025 sériově lakovat elektrická SUV s touto technologií. Díky své rychlosti, flexibilitě a ekologickým výhodám získal PixelPaint již několik významných ocenění a mění pohled na budoucnost lakování vozidel. Nevýhodou je její vysoká pořizovací cena a úzce specifické využití v průmyslu. [38]



Obrázek 20 ABB PixelPaint [41]

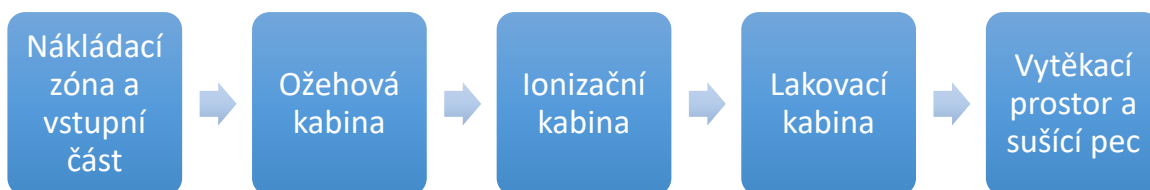
4.3 Porovnání lakovacích technologií

Z uvedených technologií mokrého lakování každá nabízí specifické výhody a nevýhody podle charakteru aplikace. Nízkotlaké technologie HVLP a LVLP poskytují nejvyšší kvalitu povrchu s velmi jemnou atomizací. Jsou ideální pro menší a střední série s důrazem na vzhled a ekonomii barvy, ale mají nižší produktivitu při velkoplošných aplikacích. Vysokotlaké airless lakování se vyznačuje vysokou rychlostí a produktivitou, což jej činí vhodným pro aplikace na velké plochy. Nevýhodou je však hrubší struktura nátěru a větší velikost kapek, která může ovlivnit výslednou kvalitu povrchu. Airless je nejrychlejší metodou, ale s menší flexibilitou pro detaily a větším oversprayem než HVLP/LVLP či elektrostatika. Technologie AirMix nabízí optimální kompromis mezi vysokou produktivitou airless a kvalitou vzduchového lakování, vhodná je proto pro středně velké série, kde se požaduje dobrý vzhled i rychlost. Elektrostatické lakování, jak pistole, tak rotační zvony je technologicky pokročilá metoda s nejvyšší přenosovou účinností (až 95 %), což zásadně snižuje náklady na barvy, filtry a likvidaci odpadů. Elektrostatika se prosazuje ve velkosériových lakovnách kovových dílů a zejména v automotive, kde rotační zvony umožňují dosažení špičkového vzhledu, konzistence a ekologičnosti při obrovské produktivitě. Nevýhodou elektrostatických systémů jsou vysoké investiční náklady, technická náročnost provozu a omezení při lakování izolačních materiálů, jako je dřevo, plast. Závěrem lze říci, že neexistuje univerzálně nejlepší technologie, výběr závisí na požadavcích konkrétní aplikace. Ekonomický trend však jednoznačně směřuje k metodám, které nabízejí lepší účinnost, nižší emise a celkovou ekologičnost (HVLP, AirMix, elektrostatika), zatímco tradiční vysokotlaké systémy jsou dnes nahrazovány.

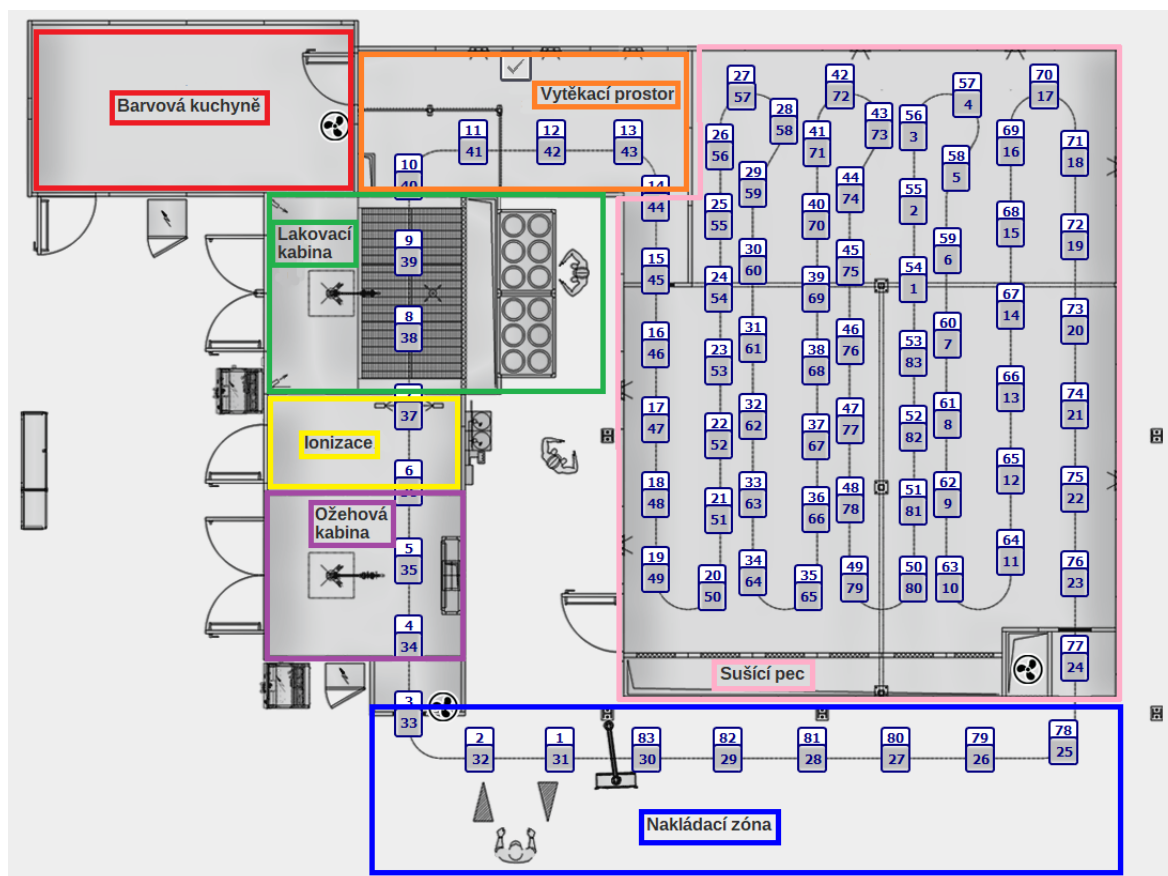
II PRAKTICKÁ ČÁST

5 POPIS CELÉ TECHNOLOGIE

Pro zajištění lepší srozumitelnosti následujících kapitol bude nejprve stručně popsána celková struktura technologie. Lakovací linka je tvořena několika na sebe navazujícími sekcemi, které společně tvoří ucelený a funkčně provázaný celek. Celý proces je technologicky náročný a vyžaduje pečlivou optimalizaci jednotlivých částí s cílem dosažení výsledků odpovídajících stanoveným kvalitativním požadavkům.



Graf 1 Blokové schéma linky [43]



Obrázek 21 Schéma technologie [44]

5.1 Nakládací zóna a vstupní část

Celý proces začíná v tzv. „Loading zóně“, která slouží k nakládání nových dílů, svěšování hotových dílů z dopravníku, balení do krabic a rychlé vizuální kontrole kvality obsluhou. V této fázi se prostřednictvím čtečky čárových kódů zadávají data jednotlivých zakázek do systému, včetně barvy dílů, počtu kusů k lakování a velikosti zakázky. Po nastavení parametrů jsou data přiřazena ke konkrétnímu skidu v okamžiku, kdy projede loading branou.

Speciálně navržené skidy umožňují snadnou manipulaci s díly a zaručují přesnou polohu dílů vůči robotům. Návrh skidů zohledňuje robotické parametry, čímž je eliminováno riziko singularit během lakování. Díky jednotnému uchycení lze skidy využít univerzálně pro všechny typy dílů.



Obrázek 22 Nakládací pracoviště [45]

Rozteč skidů činí 1300 mm, přičemž rychlost dopravníku byla stanovena na 1700 mm za minutu pro dosažení zákazníkem požadovaného taktu linky 80 kusů za hodinu. Maximální délka robotického programu na jeden díl tak vychází přibližně na 46 sekund.

Obsluha je při nakládání dílů řízena LED páskem za dopravníkem, který barvou signalizuje jednotlivé úkony: zelená znamená pozici pro nový díl, modrá označuje díly automaticky směřující na druhé kolo lakování bez manipulace, fialová díly k odebrání a balení, červená pak technologickou mezeru nutnou pro výměnu barvy.

Po projetí loading brány díly pokračují do vstupního ofuku, kde jsou před vstupem do lakovací kabiny očištěny pomocí pěti vzduchových trysek pro minimalizaci kontaminace. Poté díly projedou synchronizační branou, díky které si robot přesně uloží jejich aktuální pozici na dopravníku. Bezpečnost robotického prostoru zajišťuje laserový skener, který zabráňuje vstupu nepovolaných osob.

Jako dopravní systém byl zvolen kontinuální dopravník s konstantní rychlostí, určující takt celé linky. Z důvodu instalace do předem určených prostor bylo nutné prodloužit část dopravníku v oblasti vytvrzovací pece, aby se dosáhlo požadované doby vytvrzení.

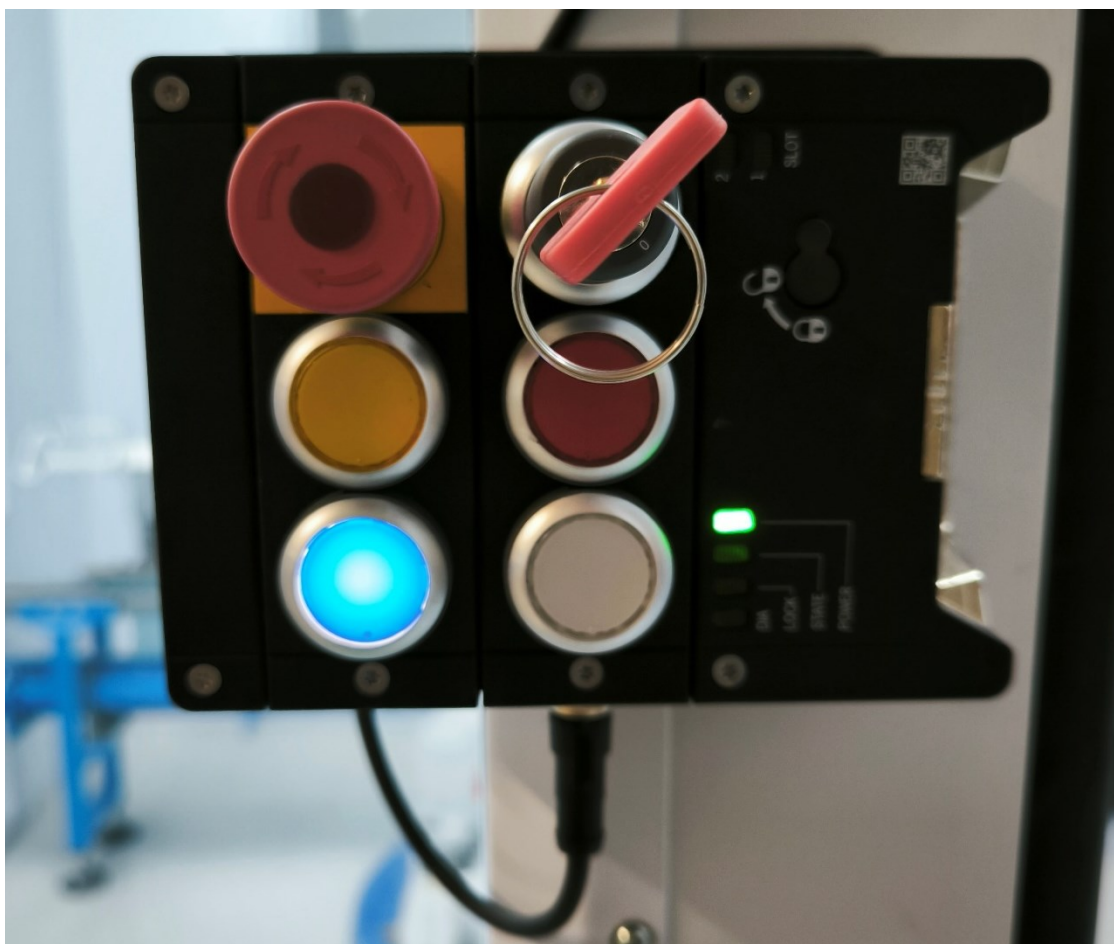


Obrázek 23 Detail vstupní části [46]

5.2 Kabina ožehu

Kabina ožehu je vybavena vzduchotechnikou, která zajišťuje přívod i odtah vzduchu. Odtahový systém je umístěn na zadní straně kabiny a opatřen nehořlavými filtry. Jako robotický manipulátor byl zvolen ABB IRB 1660 ID, jehož duté zápěstí umožňuje vedení kabelů a hadic přímo středem, čímž odpadá potřeba speciální boční příruby pro připojení napájení hořáku a ovládacích kabelů. Typ robota byl vybrán na základě simulací, které ověřily jeho vhodný dosah a nosnost.

Vstupní dveře kabiny jsou zabezpečeny bezpečnostními zámky Euchner MGB, obsahujícími funkční tlačítka, signalizaci, bezpečnostní klíč a nouzové tlačítko („STOP“). Tyto zámky řídí nadřazený PLC systém, který při automatickém režimu plně zabezpečuje vstup obsluhy. Obsluha před spuštěním automatického režimu potvrdí tlačítkem „Auto-stop robota“, že prostor je bezpečný a volný od překážek.



Obrázek 24 Bezpečnostní zámek Euchner řada MGB [47]

Pro aplikaci ožehu byla použita technologie Aerogen FT Auto – FRC s hořákem typu A580, který je speciálně navržen pro automotive sektor a plastové díly. Díky elektronickým průtokoměrům a integrovanému PLC systém přesně reguluje směs vzduchu a plynu, čímž je zajištěn optimální tvar a kvalita plamene.

Bezpečnost systému je zajištěna teplotními senzory, které detekují případné zhasnutí plamene a automaticky zastaví přívod plynu. Dále robot disponuje integrovaným bezpečnostním systémem, který nepřetržitě sleduje správnost jeho pohybů i činnost hořáku. Při jakékoliv chybě pohybu nebo narušení bezpečnostního prostoru robot okamžitě zastaví pohyb a zároveň se automaticky přeruší přívod plynu, čímž je eliminováno riziko požáru.



Obrázek 25 Čidlo detekce zhasnutí plamene [48]

Celý systém ožehu funguje plně automatizovaně, včetně zážehu, odstavení hořáku a regulace optimální směsi a je řízen komunikací mezi robotem a nadřazeným PLC.



Obrázek 26 Kabina robotického ožehu [48]

5.3 Kabina ionizace

Ionizační kabina je vybavena dvěma ionizačními tryskami napájenými vysokonapětovým zdrojem. Bezpečnost vstupu do kabiny zajišťuje čidlo Euchner CES-I-BR-U. Tento typ čidla byl zvolen díky absenci robota v kabině a nemožnosti přímého kontaktu obsluhy s robotickým ramenem. Oproti ostatním kabinám je ionizační kabina vybavena klasickou klikou, otevření tedy není podmíněno bezpečnostním zámkem.

Na vnější stěně kabiny jsou umístěny dva vzduchové ventily ovládané PLC systémem na základě virtuální vzdálenosti dílu od ionizačního rámu. Po dosažení přednastavené vzdálenosti se automaticky aktivují ionizační trysky a zároveň dojde k otevření přívodu filtrovaného tlakového vzduchu přes uvedené ventily. Dodatečná filtrace vzduchu je nutná kvůli zamezení kontaminace dílů před jejich vstupem do aplikační kabiny.

Tlak vzduchu pro ionizační trysky se nastavuje manuálně pomocí manometrů, přičemž tato hodnota zůstává konstantní, a proto ji není nutné během provozu upravovat.



Obrázek 27 Ionizační trysky [49]

5.4 Lakovací kabina

Lakovací kabina je nejdůležitější částí linky, její kvalita však závisí také na správné funkci předchozích pracovišť. Vstup do kabiny je zabezpečen bezpečnostními zámky Euchner, které zabráňují vstupu během automatického režimu robota či probíhajícího lakovacího cyklu. Přístup je možný až po dokončení úloh robotů, kdy je potvrzen signál „job complete“. Tím je eliminováno riziko vzniku zmetků a zvýšena bezpečnost provozu.

Kabina je vybavena vzduchotechnikou, která zajišťuje optimální proudění vzduchu při lakování v doporučené rychlosti 0,3–0,5 m/s. Laminární proudění efektivně odvádí přestřík barvy a vytváří stabilní podmínky pro kvalitní povrch. V odtahu jsou umístěny paint-stop filtry, které zachycují prachové částice vznikající při lakování; tyto filtry je nutné pravidelně měnit kvůli poklesu účinnosti při znečištění. Přiváděný vzduch je upraven pomocí stropních filtrů s přilnavou vrstvou a propustností do 15 µm. Klimatické podmínky v kabině jsou regulovány na teplotu 21–23 °C a relativní vlhkost 65 % za pomoci topného okruhu s výměníkem voda/vzduch a zvlhčovacího skrápěcího filtru.

Prostředí lakovací kabiny je klasifikováno jako ATEX zóna s nebezpečím výbuchu, proto musí všechna zařízení splňovat příslušné certifikace a bezpečnostní normy. Požární bezpečnost kabiny zajišťuje protipožární systém PEKA, který zahrnuje teplotní detektory, manuální hlásiče, opticko-akustickou signalizaci a objemové hašení CO₂. Po překročení kritické teploty je spuštěn alarm a následuje automatické vypnutí technologie, uzavření vzduchotechnických klapek a po prodlevě 30 sekund dojde k uhašení požáru. Tento systém je aplikován také v dalších částech linky. Důležitou součástí protipožárního opatření jsou protipožární klapky na vstupu vzduchotechniky, které při požáru uzavírají přívod vzduchu a tím urychlují hašení.

Kabina obsahuje rovněž doplňková zařízení, jako je čistící válec pro pravidelnou údržbu lakovací pistole a jejího atomizačního nástavce. Válec i vzduchová tryska pro vysoušení pistole jsou poháněny pneumaticky z důvodu prostředí ATEX zóny. Součástí zařízení je vana na čistící kapalinu s výpustným ventilem a odpadní zásobník pro rychlé proplachování lakovací větve (dump ventil).

Hlavním prvkem lakovací kabiny je robot ABB IRB52, speciálně navržený a certifikovaný pro lakovací aplikace v nevýbušném prostředí. Robot umožňuje přímé řízení procesu bez

externích prvků a disponuje proporcionálními ventily pro přesné řízení lakovacího paprsku. Pro nanášení barvy je použita pistole DeVilbiss AGMD PRO s tryskou o průměru 0,7 mm a jemným atomizačním nástavcem, který garantuje vysokou kvalitu výsledného povrchu dílu.



Obrázek 28 Lakovací kabina [51]

5.5 Barvová kuchyně, vytěkáci prostor a sušící pec

Vytěkáci prostor je určen k lehkému zasychání čerstvě zalakovaných dílů před jejich vstupem do sušící pece. Kvůli absenci laserového zabezpečení mezi lakovací kabinou a vytěkáci zónou je prostor opatřen ochranným oplocením. Pro kontrolu kvality zalakovaných dílů je nad dopravníkem instalováno osvětlení. V případě změny barvy nebo lakovacího programu se díly v tomto prostoru automaticky zastaví, aby obsluha mohla provést kontrolu tří vzorků z aktuální dávky. Účelem této kontroly je včas odhalit kontaminaci nebo vady neslučitelné s požadovanou kvalitou. Po schválení kvality obsluhou pokračují díly dále do sušící pece, kde se nastaví teplota a čas vytvrzení tak, aby povrch dílů zavadl natolik, že již nebude náchylný k poškození dotykem nebo otěrem.



Obrázek 29 Vytěkáci prostor a postor kontroly kvality [52]

Důležitou součástí systému je tzv. barvová kuchyně, kde probíhá příprava a plnění barev do zásobníků. Jelikož linka používá dvou komponentní (2K) barvy, systém obsahuje zvlášť zásobníky pro nástřikovou složku, tužidlo a čisticí kapalinu. Celkem systém disponuje pěti

zásobníky pro jednotlivé barvy a dvěma zásobníky pro tužidlo a čistič. Každý zásobník má pneumaticky řízené membránové podávací čerpadlo, které přepravuje kapalinu k aplikačním pumpám a hlavní filtr o jemnosti 200 MESH (50–60 μm), zachycující případné nečistoty. Pro snadnou manipulaci je poklop zásobníku opatřen pneumatickým pístem a integrovaným míchadlem, které průběžně promíchává barvu a zabraňuje její sedimentaci a změně odstínu.



Obrázek 30 Barvová kuchyně – zásobníky barvy [53]

6 HLAVNÍ CÍL PRÁCE

Pro tuto práci je pozornost věnována především robotické části, konkrétně sekcím ožehu a lakování. Ostatní sekce, popsané výše, jsou sice nedílnou součástí lakovacího procesu, avšak nyní jsou považovány za konstantní.

Robotizace ožehu byla zvolena kvůli různorodosti výrobků zákazníka, což znemožnilo použití statického hořáku. Použití statického zařízení by zvyšovalo riziko zpomalení výrobního taktu při změně produkovaného dílu z důvodu nutnosti manuálního nastavování. Robotická sekce ožehu je proto plně variabilní a schopná přizpůsobení změnám výroby na základě předem stanoveného programu.

Nejdůležitější částí projektu je robotizace lakování, kde je kladen velký důraz na variabilitu pohybu robota. Vzhledem k užšímu zaměření a menší aplikační oblasti je pro lakovacího robota klíčová častá změna orientace nástroje, aby dosáhl kvality odpovídající manuální aplikaci. Robot se při lakování zaměřuje jak na čelní plochy, tak zejména na hrany dílů a vnitřní prostory pro usazení tlačítek, které ožehový robot naopak vynechává. Jelikož robot nemá možnost otáčet dílem jako lidský operátor, vzrůstá význam přesných rotačních pohybů při samotném lakování.

V systému lakování je použit dvou komponentní nástřikový systém, který vyžaduje přesné míchání dle poměru stanoveného výrobcem barev. To zabezpečuje MC Engine a softwarová výbava robota spolu s kalibrací aplikace.

Další výhodou robotického lakování je možnost implementace recirkulačního systému vzduchu, který umožňuje opětovné použití až 90 % vzduchu v kabině při dodržení spádové rychlosti 0,5 m/s. Díky tomu dochází k výrazné úspoře provozních nákladů spojených s ohřevem, chlazením a zvlhčováním vzduchu. Zatímco při ruční aplikaci se standardně vyměňuje veškerý vzduch v kabině (například 50 000 m³ přívodu i odvodu), robotická aplikace s recirkulací vyžaduje přívod pouze 10 % čerstvého vzduchu, což značně snižuje náklady na úpravu vzduchu.

Díky takto navrženým robotizovaným a podpůrným sekcím je možné dosáhnout plně automatizovaného lakování plastových komponent s kvalitou požadovanou zákazníkem.



Obrázek 31 Skid osazený rámečkem s dvěma tlačítky [55]



Obrázek 32 Aplikační kabiny [55]

7 NÁVRH VHODNÝCH ROBOTŮ PRO APLIKACI

V tabulkách je uvedeno srovnání několika robotů s obdobnými parametry. Klíčovým faktorem při volbě robotů byl fakt, že zákazník již vlastní několik desítek robotů značky ABB a má zaškolené programátory na tento typ. Významnou výhodou robotů ABB je použití tzv. „MC engine“, který po naprogramování zvládá kompletně řídit aplikační část lakovacího robota bez potřeby externího řízení. Celá obslužná logika je integrována přímo v robotu, což značně ulehčuje proces řízení aplikační části při lakování.

Pro lakovací aplikaci byl zvolen robot ABB IRB 52, který zároveň splňuje požadavky pro práci v nevýbušném prostředí. Programování robotů ABB probíhá v uživatelsky přívětivém jazyce RAPID, vyvinutém firmou ABB, který umožňuje jak pohybové instrukce, tak matematické operace a vytváření vlastních funkcí. Jazyk RAPID je inspirovaný jazykem C.

Pro ožehovou aplikaci byl vybrán robot ABB IRB 1660 ID s dutým zápěstím, které usnadňuje přívod aplikačních hadic k hořáku. Oba roboti využívají starší verze kontrolerů IRC5 a IRC5P s šestou generací softwaru RobotWare, což zjednodušuje jejich integraci do lakovací linky. Díky menším rozměrům kabin byly vybrány kompaktnější typy robotů, jejichž nosnost plně vyhovuje požadavkům aplikace.

7.1 Porovnání parametrů robotů

Tabulka 1 Porovnání lakovacích robotů k datu 31.3.2025 [56]

Robot	Nosnost	Dosah v mm	Opakovatelná přesnost	Počet os	Cena (CZK) bez DPH
ABB irb 52	7 kg	1 200	0.15 mm	6	~1 044 000 Kč
Fanuc P-40iA	5 kg	1 300	0.30 mm	6	~1 080 000 Kč
Yaslaw EPX1250	5 kg	1 256	0.15 mm	6	~1 124 000 Kč
Kawasaki KF121	5 kg	1 240	0.20 mm	6	~1 060 000 Kč

Tabulka 2 Porovnání manipulačních robotů k datu 31.3.2025 [56]

Robot	Nosnost	Dosah v mm	Opakovatelná přesnost	Počet os	Cena (CZK) bez DPH
ABB irb 1660id	6 kg	1 550	0.02 mm	6	~944 000 Kč
Fanuc 100ic	6 kg	1 632	0.08 mm	6	~980 000 Kč
Kuka KR 6-2	6 kg	1 611	0.05 mm	6	~1 024 000 Kč
Yaskawa MA1440	6 kg	1 440	0.08 mm	6	~1 010 000 Kč

8 NÁVRH APLIKAČNÍ ČÁSTI

Zde se dostáváme do nejdůležitějšího kroku, protože sebemenší pochybení nebo vybrání nesprávného komponentu způsobí selhání celé aplikace jako takové.

8.1 Ožehová aplikace

8.1.1 Robot ABB IRB 1660id

ABB IRB 1660ID je šestiosý průmyslový robot střední velikosti s dosahem ramene 1,55 m a užitečným zatížením až 6 kg. Označení „ID“ značí integrované vedení médií uvnitř dutého zápěstí, čímž jsou eliminovány vnější kabelové svazky, což umožňuje vyšší rychlosti a zrychlení bez rizika poškození kabeláže. [39]

Horní rameno robota je navrženo jako pevné, může nést dodatečné vybavení, přičemž celková zátěž ramene může být až 15 kg. Spojení zesíleného ramene a kompaktního zápěstí zajišťuje vysokou přesnost pohybu i při použití těžších nástrojů. Citlivé komponenty jsou chráněny krytím IP67 (zápěstí) a IP40 (některé osy). Integrované vedení kabelů rovněž snižuje nároky na údržbu. Robot může být instalován různými způsoby – na podlahu, strop nebo nakloněnou stěnu, čímž je zvýšena flexibilita využití. [39]



Obrázek 33 Robot ABB 1660 id [57]

Z hlediska výkonu je robot vybaven moderními servomotory a optimalizovanou konstrukcí umožňující vysokou dynamiku pohybu, přičemž osa číslo 6 dosahuje rychlosti až 500 °/s. Trajektorie jsou optimalizovány pokročilými algoritmy řídicího systému, díky čemuž je dosaženo opakovatelnosti dráhy $\pm 0,05$ mm a opakovatelnosti polohy $\pm 0,02$ mm dle ISO 9283. Integrované kabelové vedení snižuje riziko kolizí ve stísněných pracovních prostorech. Robot je kompatibilní s několika variantami řídicích systémů. Napájení se provádí napětím v rozsahu 200–600 V AC (50–60 Hz), typická spotřeba při maximálním zatížení činí přibližně 0,62 kW. [39]

Tabulka 3 Technické parametry robota ABB irb 1660 id [58]

Parametr	Hodnota
Počet os	6 (šesti kloubový robot)
Dosah (max. horizontální)	1,55 m
Užitečné zatížení (nosnost)	6 kg (k dispozici i varianta 4 kg)
Přídavné zatížení na rameni	až 15 kg (např. pro nástroje/kabely)
Opakovatelnost dráhy	$\pm 0,05$ mm
Opakovatelnost polohy	$\pm 0,02$ mm
Max. rychlost osy 6	500 °/s (osy 4 a 5: 320/360 °/s)
Pracovní rozsah osy 1	$\pm 180^\circ$
Pracovní rozsah osy 2	$+150^\circ / -90^\circ$
Pracovní rozsah osy 3	$+79^\circ / -238^\circ$
Pracovní rozsah osy 4	$\pm 175^\circ$
Pracovní rozsah osy 5	$\pm 120^\circ$
Pracovní rozsah osy 6	$\pm 400^\circ$
Krytí (ochrana)	IP67 (zápěstí; osa 4 má IP40)
Možnosti montáže	na podlaze, šikmo na stěnu, stropní montáž
Řídicí systém	ABB IRC5 (Single, Panel, Compact); ABB OmniCore (C30, C90XT, V250XT, V400XT)
Rozměry základny	484 × 648 mm
Výška robotu	1392 mm
Hmotnost robotu	257 kg
Napájecí napětí	200–600 V AC, 50–60 Hz

8.1.2 Hořák Aerogen FT Auto – FRC

Aerogen FT Auto – FRC (hořák A580) se skládá ze dvou hlavních částí – generátoru spalovací směsi a samotného hořáku A580. Generátor míchá palivo (obvykle zemní plyn nebo LPG) se vzduchem v přesně definovaném poměru podle principu Flow Ratio Control, což zajišťuje tvorbu stabilního plamene s optimálními vlastnostmi. Součástí generátoru je směšovač, ventily, automatické zapalování pomocí vysokonapěťové jiskry a senzor plamene, který v případě zhasnutí okamžitě uzavře přívod paliva. Hořák A580 má podlouhlý tvar a obsahuje více tryskových otvorů, které společně vytvářejí rovnoměrně rozložený plošný plamen vhodný pro ošetření větších ploch. Jeho konstrukce je navržena tak, aby udržovala stabilní plamen i při pohybu a zahrnuje opatření proti přehřátí. [16]



Obrázek 34 Ožehová aplikace [59]

8.2 Lakovací aplikace

8.2.1 Robot ABB irb 52

ABB IRB 52 je šestiosý průmyslový robot střední velikosti určený speciálně pro lakovací aplikace. Robot je optimalizován pro malé až středně velké dílce a agresivní prostředí lakoven. Má kompaktní rozměry, vysokou rychlost, přesnost a odolnost vůči hořlavým výparům rozpouštědel. Robot se vyrábí ve dvou variantách s dosahem ramene 1,2 m nebo 1,45 m, přičemž tato konfigurace zahrnuje variantu 1,2 m. Maximální nosnost zápěstí činí 7 kg, což pokrývá běžné lakovací nástroje. Konstrukce antropomorfního typu s otočnou základnou a pěti klouby umožňuje plynulý pohyb ve všech směrech. [41]

Kompaktní provedení robota má hmotnost asi 250 kg a půdorysný rozměr pouhých 484×648 mm, což usnadňuje instalaci do malých lakovacích kabin a snižuje náklady na ventilaci a údržbu prostoru. Úzké a štíhlé rameno dovoluje práci v omezeném prostoru. Instalace je možná na podlahu, stěnu, strop či libovolně nakloněnou konzoli, což zvyšuje flexibilitu rozmístění robota na lakovacích linkách. [41]

Pracovní obálka robota pokrývá vertikálně cca 2,4 m a horizontálně cca 2,0 m. Klouby ramene a zápěstí dosahují rychlosti až 460 %/s, což umožňuje krátké pracovní cykly a vysokou produktivitu. [41]

Opakovatelnost polohy robota činí $\pm 0,15$ mm, což zajišťuje rovnoměrné nanášení laku. Rameno má krytí IP67 (ochrana proti prachu a vodě) a zápěstí krytí IP54 (odolnost proti stříkající barvě). Robot je navíc explozně odolný a splňuje požadavky pro zónu 1 s nebezpečím výbuchu, což umožňuje jeho provoz přímo v lakovacích kabinách s výpary rozpouštědel. [41]

IRB 52 je z výroby připraven pro lakovací procesy, obsahuje tzv. integrovaný procesní systém IPS. To znamená, že do ramene robota lze přímo vestavět lakovací vybavení jako ventilové bloky pro přepínání barev (color change valves), regulátory přívodu vzduchu a barvy atd. Tento systém je úzce spřažen s pohybovým řízením robota a při pohybu a stříkání jsou parametry procesu synchronizovány s dráhou (řízení dávkování barvy, spouštění/ukončení nástřiku v přesných pozicích apod.). Díky IPS a specializovanému softwaru dokáže robot nanášet nátěrové hmoty rovnoměrně a s minimálními ztrátami (omezení přestříků, úspora barvy). Robot je řízen nejnovější generací řídicí jednotky ABB

IRC5P určené pro lakování ta zahrnuje jak standardní pohybový řídicí systém IRC5, tak procesní nadstavbu pro lakování. Ovládání probíhá pomocí Ex certifikovaného programovacího ovladače FlexPendant, případně monitorovacím softwarem RobView 5 na PC. [41]

Tabulka 4 Technické parametry robota ABB irb 52 [61]

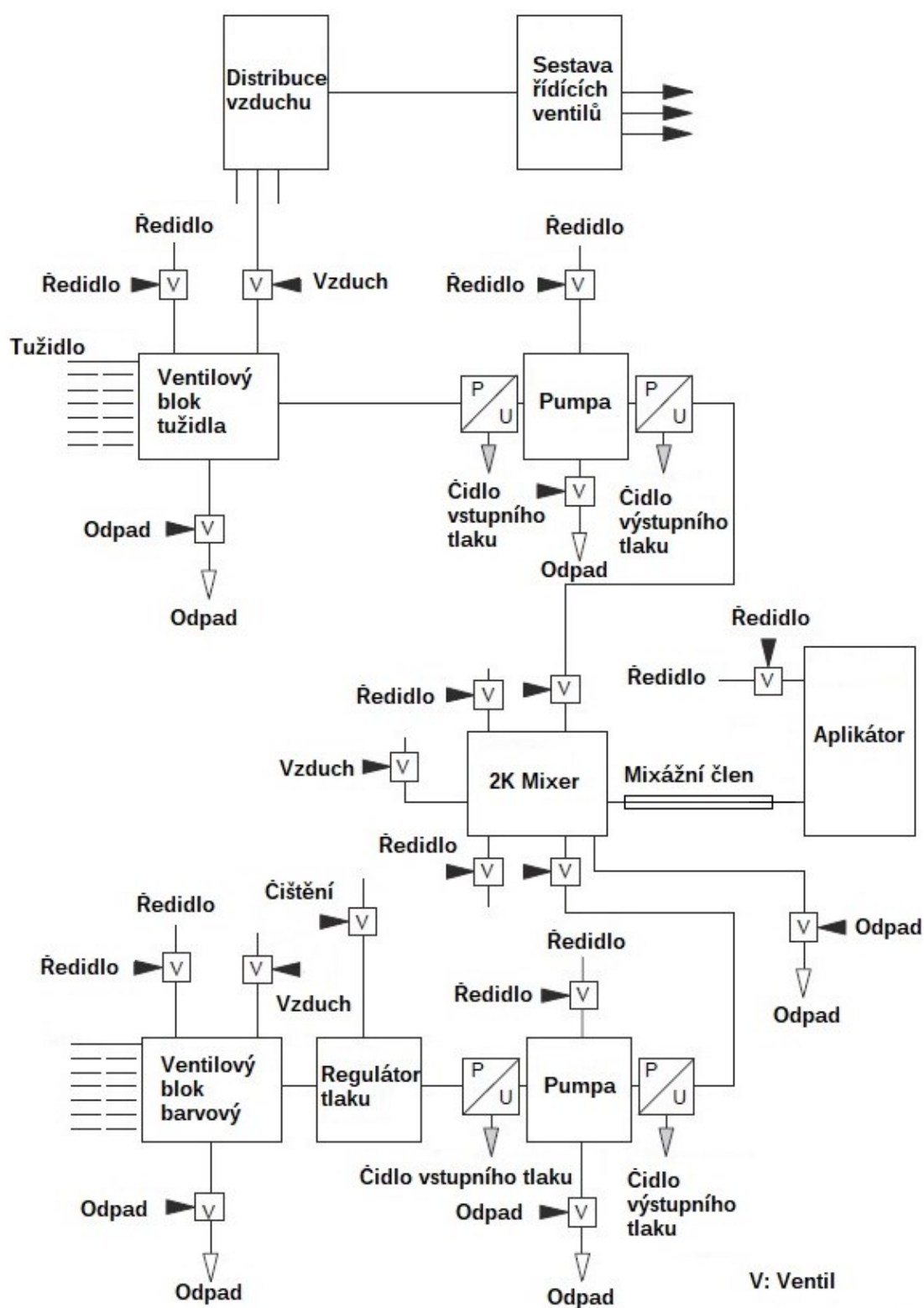
Parametr	Hodnota
Počet os	6
Dosah (max. horizontální)	1,2 m
Užitečné zatížení (nosnost)	7 kg
Opakovatelnost polohy	$\pm 0,15$ mm
Max. rychlost osy 1	180 °/s
Max. rychlost osy 2	180 °/s
Max. rychlost osy 3	180 °/s
Max. rychlost osy 4	320 °/s
Max. rychlost osy 5	400 °/s
Max. rychlost osy 6	460 °/s
Pracovní rozsah osy 1	$\pm 180^\circ$
Pracovní rozsah osy 2	$+110^\circ / -63^\circ$
Pracovní rozsah osy 3	$+55^\circ / -235^\circ$
Pracovní rozsah osy 4	$\pm 200^\circ$
Pracovní rozsah osy 5	$\pm 115^\circ$
Pracovní rozsah osy 6	$\pm 400^\circ$
Krytí (ochrana)	IP67 (zápěstí IP54)
Možnosti montáže	na podlaze, na stropě, na stěně, šikmo
Řídicí systém	ABB IRC5P
Rozměry základny	484 × 648 mm
Výška robota	1069 mm
Hmotnost robota	250 kg
Napájecí napětí	200–600 V AC, 50–60 Hz



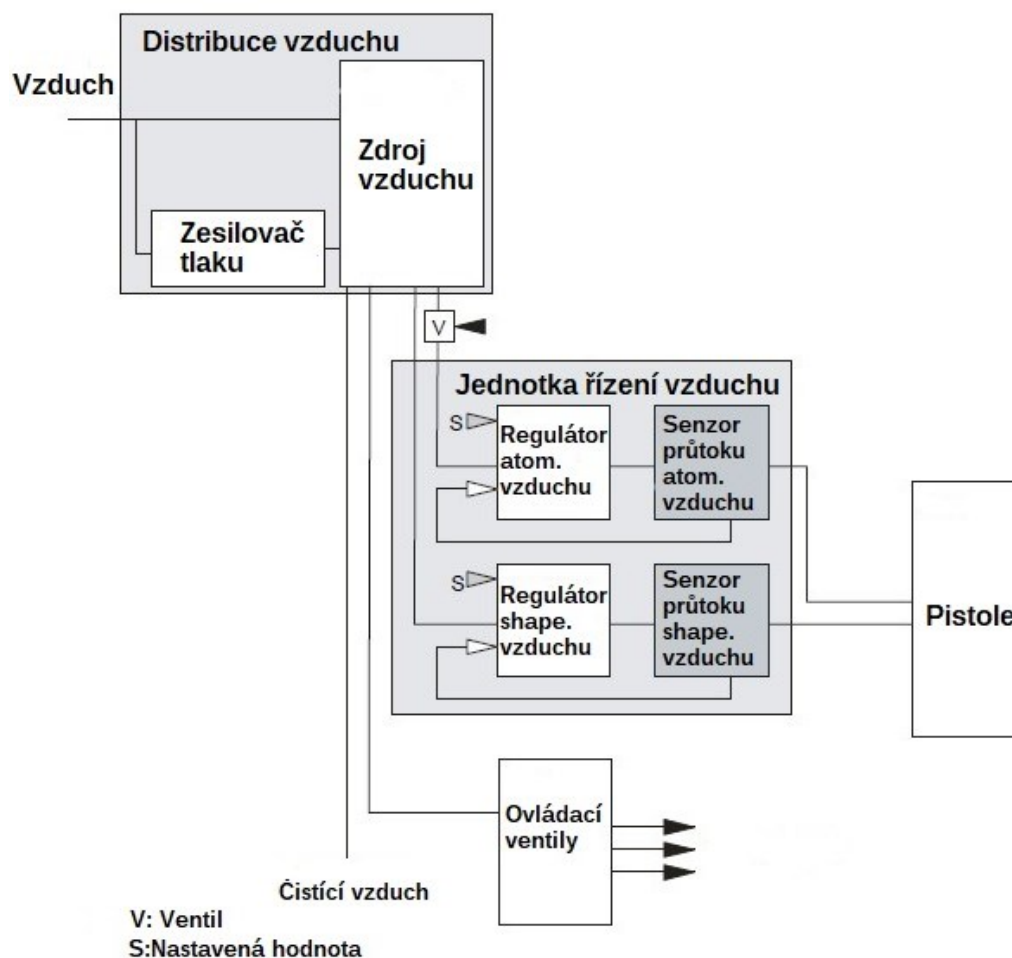
Obrázek 35 Lakovací robot ABB irb 52 [62]

8.2.2 Aplikační část lakování

Aplikační část lakování je poněkud složitější a skládá se z kombinací několika systému. Hlavní ovládací část je pneumatický obvod a vzduchové ventily a výkonová část jsou elektrické pohony pump. Zde se ukazuje nesporná výhoda lakovacích robotů ABB, kde kompletní řízení aplikace zajišťuje samotný systém IRC5P spolu s nastavbou IPS.



Obrázek 36 Schéma kapalinové cesty [63]



Obrázek 37 Schéma řízení vzduchu [64]

8.2.2.1 Pohony pump

Rozvaděč pump slouží jako centrální jednotka pro řízení a dodávku kapalin, primárně v automatizovaných systémech lakování s využitím robotů. Rozvaděč integruje dvě samostatně řízená čerpadla potřebná pro náš dvou komponentní systém, kde jeden pohon má na starost barvové čerpadlo a druhý tužidlové. Oba pohony jsou umístěna v dolní vnitřní části rozvaděče, kde jsou pevně uchycena pro minimalizaci vibrací a zajištění stability dávkování.[42]

Řízení čerpadel zajišťují elektronické ovládací jednotky umístěné v horní části rozvaděče, kde jsou kontrolovány parametry provozu, jako jsou tlak, průtok a množství kapaliny dodávané do robotické aplikační jednotky. To je umožněno na základě parametrů objemu kapaliny vytlačené čerpadlem na jednu otáčku čerpadla. Řídicí systém umožňuje provoz čerpadel nezávisle na sobě, například když je jedno čerpadlo využíváno pro základní barvu a druhé pro tužidlo při dvou komponentním lakování, tak se zadává parametr mixážního

poměru obou složek směsi a obě čerpadla při procesu jedou v rozdílných otáčkách na základě požadavku systému. [42]

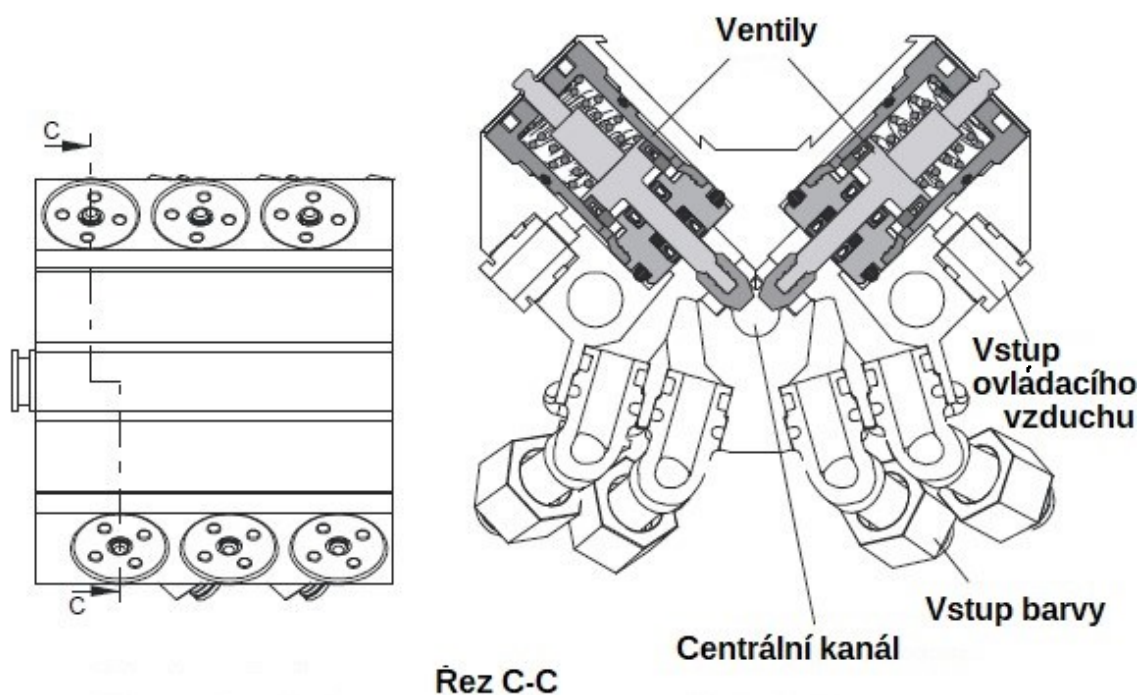
Zařízení také disponuje bezpečnostními ventily a systémem senzorů, které sledují kritické provozní parametry. Mezi tyto parametry například spadá sledování tlaku na vstupu čerpadla a na výstupu nebo sledování točivého momentu pohonu čerpadla na základě čehož je schopen systém vyhodnotit, že čerpadlo se snaží tlačit barvu do uzavřeného okruhu a automaticky jej odstaví, aby nedošlo k poškození systému. To významně přispívá k bezpečnosti a zajišťuje spolehlivost a opakovatelnost procesu. Rozvaděč je navržen tak, aby umožňoval snadný přístup k jednotlivým komponentům při údržbě a servisu, což minimalizuje dobu odstávek. Jeho součástí jsou rovněž rozhraní umožňující integraci do nadřazených řídicích systémů, což usnadňuje sledování stavu, diagnostiku a preventivní údržbu. [42]



Obrázek 38 Rozvaděč pohonu čerpadel [65]

8.2.2.2 Ventilový blok

Ventilový blok je zařízení určené pro rychlou výměnu barev, které umožňuje efektivně připojit více barev k jednomu lakovacímu aplikátoru. Každá barva je vedena samostatným potrubím přes pneumaticky řízený ventil, který v uzavřeném stavu umožňuje cirkulaci barvy zpět do zásobníku. Po otevření ventilu je barva vedena centrálním kanálem přímo k aplikátoru. [42]



Obrázek 39 Ventilový blok [66]

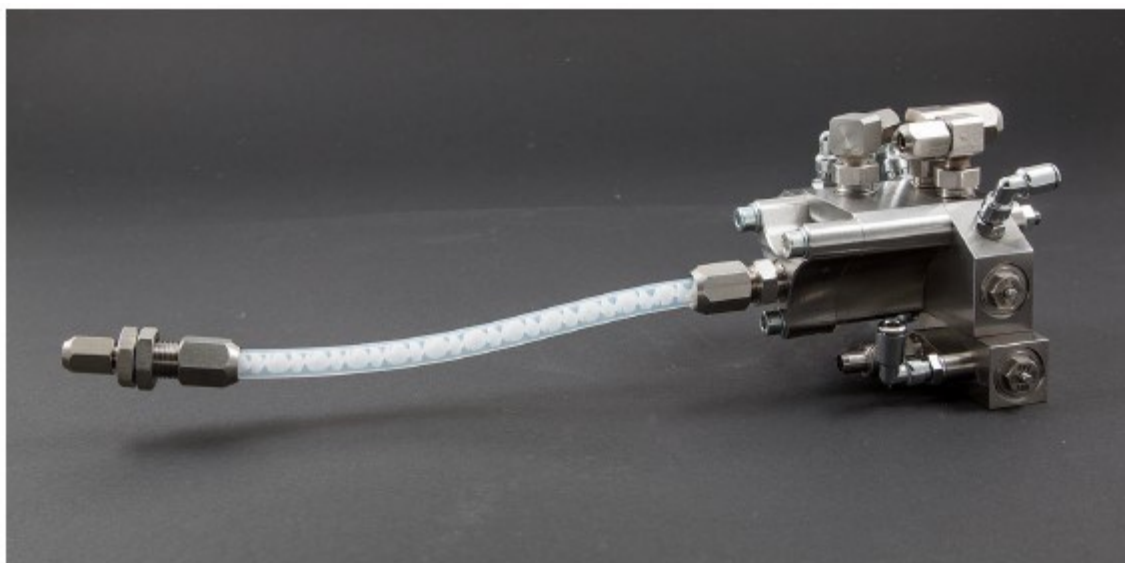
Zařízení je modulární konstrukce, skládá se z bloků obsahujících od 2 do 6 ventilů, což umožňuje flexibilní sestavení dle požadovaného počtu barev. Přechod mezi jednotlivými barvami je prováděn vyčištěním vnitřních kanálů pulzujícím proudem čistící kapaliny a stlačeného vzduchu, čímž jsou minimalizovány zbytky předchozí barvy.

Maximální průtok média je 2,8 l/min, pracovní tlak činí až 20 barů a doporučený tlak ovládacího vzduchu je 8 až 10 barů. Z tohoto důvodu je v systému instalován násobič tlaku, který zajišťuje přesné a rychlé otevírání a zavírání ventilů. Díky absenci „slepých“ míst v konstrukci jsou čistící cykly krátké a efektivní. V systému je pro barvovou cestu použit ventilový modul s deseti ventily a pro tužidlovou cestu dvouventilový modul. [42]

8.2.2.3 Dvou komponentní směšovací člen s membránovým ventilem

Dvou komponentní směšovací člen s membránovým ventilem (2K Mixer) je navržený pro přesné a konzistentní míchání dvousložkových nátěrových hmot v automatizovaných systémech lakování. Tento mixer kombinuje dvě kapaliny, zpravidla barvu a tužidlo v daném poměru. Po smísení obou kapalin začíná chemický proces tuhnutí, proto je nezbytné dodržovat přesný poměr složek, který je řízen přes řídicí jednotky zubových čerpadel. Parametry, jako je průtok a směšovací poměr, jsou zadávány do řídicího systému a ten následně dodává požadované směšovací množství do směšovacího členu. [42]

Zařízení má modulární konstrukci, která standardně sestává ze tří hlavních modulů: modulu s ventily pro barvu a čistící prostředek, modulu s membránovým ventilem pro katalyzátor a modulu s odpadním ventilem („dump valve“). Mixer je vybaven statickou směšovací trubicí, která standardně obsahuje 24 směšovacích elementů.

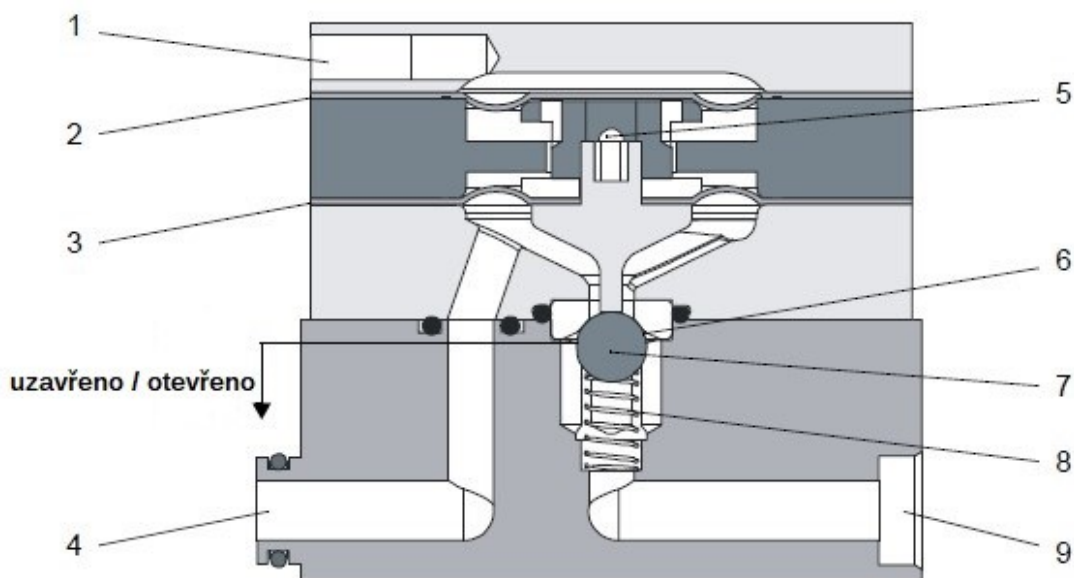


Obrázek 40 2K Mixer se směšovací trubicí [67]

Materiál tělesa mixeru je z kyselinovzdorné nerezové oceli, směšovací elementy jsou z polypropylenu (PP) a směšovací trubice z fluoropolymeru (FEP). Což nám zabezpečuje chemickou odolnost proti kapalinám našeho projektu.

8.2.2.4 Membránový regulátor

Membránový regulátor slouží k udržování konstantního tlaku kapaliny na vstupu zubového čerpadla barvové části. Princip funkce spočívá v regulaci průtoku kapaliny na základě nastaveného tlaku vzduchu, který působí na membránu ventilu. Při průtoku kapaliny mezi vstupním a výstupním portem prochází médium přes škrticí prvek tvořený pružinou, kuličkou a sedlem. Tlak vzduchu, přivedený do ventilu, tlačí přes membránu na kuličku ventilu a tím ventil otevírá, zatímco tlak kapaliny na výstupním portu působí proti této síle. Rovnováha těchto dvou protichůdných sil nastavuje přesnou polohu uzavíracího prvku a tím požadovaný tlak kapaliny na výstupu ventilu. [42]



Obrázek 41 Membránový regulátor [68]

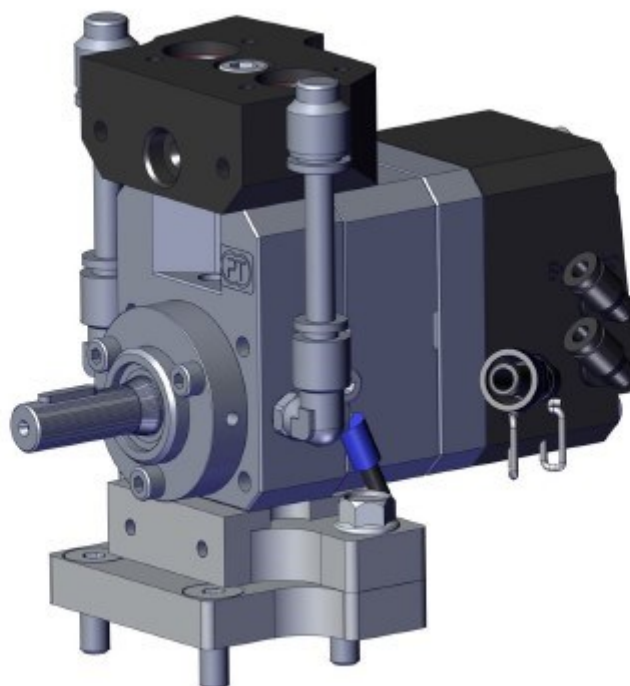
Tabulka 5 Popis membránového regulátoru [68]

číslo	popis	číslo	popis
1	Připojení regulačního vzduchu	6	Sedlo kuličky
2	Vzduchová membrána	7	Kulička
3	Kapalinová membrána	8	Pružina
4	Výstup kapaliny	9	Vstup kapaliny
5	Kontrola úniku		

8.2.2.5 Zubové čerpadlo

Zubové čerpadlo je určeno pro přesné dávkování kapaliny. Je poháněno elektrickým servomotorem, který umožňuje hladký chod a přesné řízení průtoku barvy prostřednictvím integrovaného řídicího systému IPS. Čerpadlo je tvořeno senzory, blokem čerpadla a ozubenými koly. Kapalina je dopravována pomocí ozubených kol, která rotují v opačných směrech.

V projektu bylo použito 3 cm³ čerpadlo pro barvovou větev a 0.3 cm³ čerpadlo pro tužidlovou větev. Materiálové provedení zahrnuje převážně nerezovou ocel s úpravou odolnou vůči opotřebení a hliníku. Maximální povolený krouticí moment na hřídeli je 12 Nm při doporučených otáčkách 30–100 ot/min (podle typu barvy). Provozní životnost pumpy je cca 2 roky při běžném provozu. [42]



Obrázek 42 Zubové čerpadlo [69]

8.2.2.6 Lakovací pistole DeVilbiss AGMD Pro

Automatická nízkotlaká pistole DeVilbiss AGMD Pro je určena pro aplikace v automatizovaných lakovacích linkách. Pistole může být montována na robotická ramena nebo pevné konstrukce (reciprokátory), přičemž je využívána zejména k dosažení precizní kvality povrchů třídy „Class A“, požadované především v automobilovém průmyslu.

Pistole je konstruována robustně a zároveň kompaktně. Tělo je vyrobeno z anodizovaného hliníku, který se vyznačuje nízkou hmotností a vysokou odolností vůči korozi. Všechny díly, jež jsou v kontaktu s barvou (fluidní hlava, tryska a jehla), jsou vyrobeny z vysoce kvalitní nerezové oceli. Díky unikátní konstrukci s rychloupínací hlavou lze servis, čištění nebo výměnu jednotlivých částí provádět během několika sekund, čímž jsou minimalizovány odstávky ve výrobě. Vnitřní konstrukce je navržena minimalisticky s malým počtem součástí, což snižuje riziko poruch a nutnost častých servisních zásahů. [43]

Provoz pistole probíhá při atomizačním tlaku kolem 2,0 barů, přičemž maximální konstrukční tlak vzduchu činí až 12 barů. Tlak barvy může dosahovat až 15 barů. K ovládání jehly je vyžadován pneumatický tlak v rozmezí od 3,5 do 6 barů. Typické velikosti fluidních trysek se pohybují mezi 0,7 mm a 1,2 mm, což umožňuje flexibilní nastavení podle typu použitého materiálu. Pistole rovněž umožňuje cirkulační rozvod barvy, který přispívá k udržení konstantních podmínek během lakování. Tato možnost však v tomto projektu nebyla využita, jelikož cirkulace barvy je zajištěna přes ventilový blok barev.[43]



Obrázek 43 Robotická lakovací pistole AGMD Pro [70]

8.2.2.7 Atomizační nástavec TE30C

Atomizační nástavec TE30C je speciální vzduchové víčko určené pro použití se stříkací pistolí DeVilbiss AGMD Pro. Hlavice tohoto nástavce je označována jako typ Trans-Tech neboli LVMP – Low Volume Medium Pressure. U nástavce TE30C jsou kombinovány výhody klasického vysokotlakého stříkání a technologie HVLP. Díky tomu je splněn požadavek na vysokou účinnost přenosu materiálu na stříkaný povrch, což vede ke snížení množství přestříků a ke zlepšení ekonomiky provozu. [44]

Vzduchový nástavec TE30C je vyroben z mosazi s povrchovou úpravou, čímž je zajištěna dlouhá životnost a vysoká odolnost vůči opotřebení při styku s proudícím vzduchem a kapalinou. Díky přesné výrobě trysek je u tohoto nástavce dosahováno jemné atomizace barvy při relativně nízké spotřebě vzduchu. Ta se pohybuje okolo 210 l/min při pracovním tlaku 1,0 bar. Čímž je TE30C výrazně úspornější ve srovnání s tradičními HVLP nástavci. [44]

Důležitou předností TE30C je možnost snadného nastavení a fixace orientace stříkacího paprsku (vertikální nebo horizontální), čímž je usnadněna opakovatelnost a přesnost lakovacího procesu. Jemným rozprašováním barvy je s tímto atomizačním nástavcem dosaženo vysokého standardu finálního povrchu, který splňuje i náročné požadavky na kvalitu nástřiku. Atomizační nástavec TE30C tak významně přispívá k celkové efektivitě a kvalitě procesu lakování a patří mezi klíčové komponent aplikace. [44]



Obrázek 44 Atomizační nástavec pistole [71]

9 VYTVOŘENÍ DIGITÁLNÍHO DVOJČETE ABB ROBOTSTUDIO

Pro funkčnost naší aplikace je bezpodmínečně nutné vytvořit si digitální dvojče našeho pracoviště. Při složitosti programování lakovacích trajektorií je nepřipustné vytvářet programy přes ovládací modul robota. Největším benefitem digitálního dvojčete je programování nových trajektorií bez nutnosti odstavit výrobu na reálné lince. Díky kolizním setům a kalibraci reálného a virtuálního prostředí má programátor jistotu, že v reálném prostoru robot nenarazí do lakovaného dílu ani do technologie kabiny.

9.1 Implementace 3D modelů a ustavení dle výrobního výkresu

Nejprve se v RobotStudiosu vytvoří nová stanice, kam se importují 3D modely jednotlivých zařízení a komponentů (roboty, hořák, pistole, dopravník, přípravky, okolní konstrukce). Modely mohou být načteny v běžných CAD formátech (STEP, IGES apod.). U robotů ABB, např. IRB 52, se využívá vestavěná knihovna, která již obsahuje mechanické modely s kinematikou. Ostatní prvky jako hořák Aerogen či lakovací pistole jsou importovány z dostupných CAD souborů. Důležitým krokem je přesné rozmístění 3D modelů dle výrobního výkresu projektu. Grafické modely musí odpovídat reálnému rozmístění ve výrobní buňce. K tomu se použijí rozměry a souřadnice uvedené ve výkresové dokumentaci, případně se objekty interaktivně posunou či otočí. Výsledná virtuální buňka je přesným odrazem skutečného pracoviště, což se následně ověří kontrolou kolizí v nulových pozicích.

9.2 Vytvoření virtuálních kontrolérů

Nyní vytvoříme virtuální řídicí jednotky (virtuální kontrolér), které přesně odpovídají reálným kontrolérům ABB robotů, včetně správných volitelných doplňků (např. IRC5P pro lakování, Integrated Paint System, SafeMove, Conveyor Tracking). Po kompletní kalibraci virtuálního dvojčete se ve virtuálních kontrolérech vytvoří a odladí programy pro lakovací i ožehovou část. Výsledkem je realistická simulace procesu s ověřenými trajektoriemi, časy cyklu a bezpečnostními funkcemi, což minimalizuje rizika a usnadňuje následné uvedení do provozu.

9.3 Definice nástrojů

Dalším krokem je definice nástrojů, které roboty uchopí. Robot lakující používá stříkací pistoli, druhý robot plamenový hořák. V RobotStudiosu je klíčové určit pracovní bod nástroje (TCP – Tool Center Point), tedy bod, kde se provádí pracovní operace (výstup barvy nebo střed plamene). TCP se stanovuje zadáním geometrických offsetů od příruby robota podle CAD dat nástroje. Nástroje se připojí k robotům jako grafická komponenta pro vizualizaci a snadnou kontrolu TCP. Souřadný systém nástroje by měl být orientován ve směru aplikace (směr trysky pistole nebo plamene hořáku). Správnost definice TCP se ověří vizuálně přímo v aplikačních kabinách reorientací proti pevnému bodu.

9.4 Kolizní zóny

V případě těsného prostoru, ve kterém roboti pracují je vhodné si vytvořit tzv. kolizní set robota vůči svému okolí, kde předcházíme kolizím s vybavením či samotnou kabinou. RobotStudio k tomu využívá nástroj Visual SafeMove nebo softwarovou detekci kolizí. U obou robotů se na základě rozmístění buňky vytvoří ochranné kapsle kolem objektů, u kterých chceme zakázat pohyb robota kvůli ochraně operátorů nebo vybavení buňky. Pomocí simulace kritických poloh se ověří, že nedochází ke kolizím. Případné konflikty se řeší úpravou trajektorií robotů nebo definováním softwarových podmínek pro sekvenční provoz.

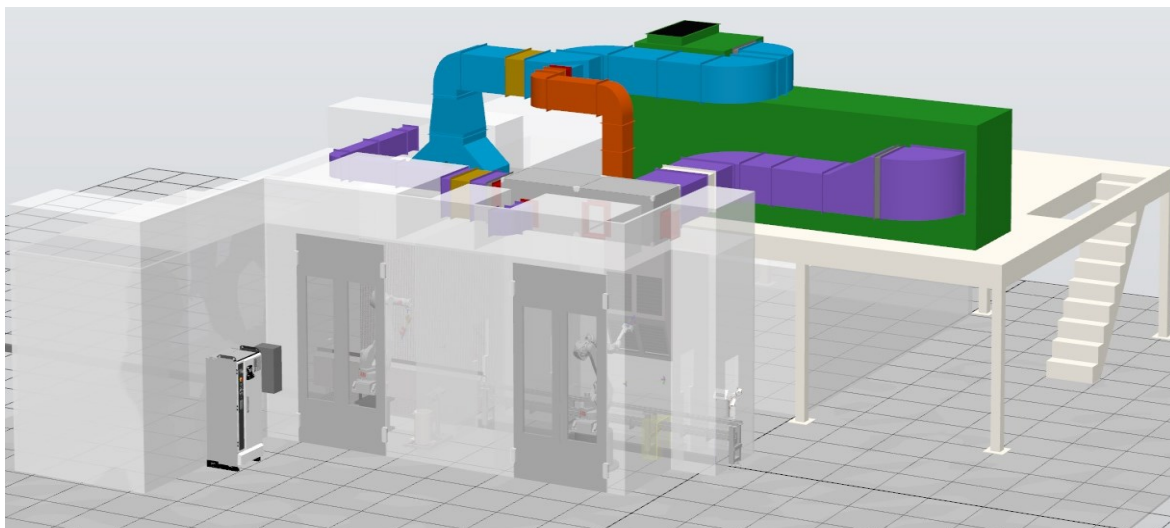
9.5 Kalibrace pozice robota

Kalibrace slouží ke sladění souřadných systémů digitálního dvojčete a reálného světa, protože v praxi bývají mírné odchylky od výkresových hodnot. Pomocí referenčních bodů (např. rohy kabiny, body na dopravníku) se stanoví odchylky a v RobotStudiosu se pak upraví umístění robotů či pracovních objektů. Po úspěšné kalibraci odpovídají virtuální dráhy robotů reálnému provozu.

9.6 Deklarace dopravníku

V digitální buňce se definuje model dopravníku s příslušnými parametry (rychlost, rozměry, zastavení). Následně se stanovují tzv. startovací okna robotů, tedy místa a okamžiky, kdy roboti zahájí svou činnost (např. oblast plamene, lakovací pozice). Pokud je dopravník indexovaný, stanoví se přesná pozice, kde robot zahájí operaci. Při kontinuálním režimu

lakování a ožehu je nutné použít Conveyor Tracking což je náš případ. Dále se na počátek lakovacích oken umístí pracovní souřadné rámce robotů, aby se sjednotil počátek programů. U virtuálního systému sedí deklarace rychlosti pohybu dopravníku vůči robotovi, ale v reálném kontroléru se při zapojování a úvodní kalibraci musí zkalibrovat rychlost pohybu dopravníku. Jelikož máme dva systémy IRC5 a IRC5P, tak se pro každý systém provádí odlišná kalibrace. Kalibrace spočívá ve správné deklaraci pulzů z enkodéru na jeden metr ujeté dráhy dopravníku. V našem případě se provádí kalibrace do doby, než dosáhneme maximální odchylky 1mm na metr ujeté vzdálenosti při robotickém sledování dopravníku.



Obrázek 45 Digitální dvojče pracovní stanice [74]

10 LAKOVÁNÍ VÝROBKU

Po zapojení všech komponentu a obou robotů se musí oba roboti zkalibrovat a do reálných robotů nahrát a naprogramovat logiku chodu linky. Zde bylo několik specifických věcí, které se dodělávají na míru a přání zákazníka. Dále bylo doprogramováno několik bezpečnostních funkcí u ožehavého robota z hlediska bezpečnosti celé aplikace a u lakovacího robota zase z důvodu hlídání spotřeby barvy na jednotlivé díly. Robotické manipulátory od firmy ABB mají nespornou výhodu v programovém prostředí, kde je programátor omezen pouze svými schopnostmi.

Následně se ladila lakovací aplikace, kde je potřeba provést několik rutin – například kalibraci tvarovacího a atomizačního vzduchu, které jsou při lakování používány. Kalibrují se z důvodu atomizačního nastavení, který klade odpor v cestě pro vzduch. Robot má interní rutinu, kde nastavuje postupně hodnoty vzduchů a přes zpětnou vazbu kontroluje skutečný průtok vzduchu. Snaží se docílit, aby nastavená hodnota průtoku byla dosažena v co nejkratším čase od požadavku a také aby nedocházelo k překmitům regulátoru.

Následně se ověřila funkčnost ovládání celého systému, kde se doprogramovaly rutiny na výměnu a natažení barvy do systému robota a samotný lakovací proces, kde se kontroluje chybovost v průtoku jednotlivých čerpadel a jejich dávkování požadovaného množství. Díky velice přesným zubovým čerpadlům jsme dosahovali průměrné odchylky od požadovaného průtoku 0.3 %.

Po celkovém nastavení obou pracovišť jsme připraveni na lakování dílu, který nám byl určen zákazníkem.

10.1 Typ lakovaného dílu

V tomto případě jsou lakovány menší plastové díly, které jsou na jednotlivých skidech rozděleny do sekcí. Na každém skidu je vždy umístěna kompletní sestava dílů, která se skládá z rámu spouštěcího se skládá a dvou se skládá. Toto opatření bylo zavedeno, aby nedocházelo ke změně odstínu v případě lakování jednotlivých částí na různých závěsech. Všechny díly jsou vyrobeny z ABS plastu, který je lisován přímo v závodě zákazníka. Lakovaným výrobkem jsou plastová nástěnná tlačítka pro splachování toalet, která jsou dostupná ve dvou barevných provedeních – černém a bílém.



Obrázek 46 Díl určený k lakování [76]

10.2 Ožeh

Náš proces je tvořen dvěma robotizovanými pracovními stanicemi, proto musí být pro ožehové pracoviště a následné lakování vytvořeny samostatné programy. Při testování a tvorbě programů pro ožeh tlačítek bylo zjištěno, že nejefektivnějším přístupem je jednoduchý program, při kterém je celá plocha dílu rychle přejetá hořákem kolmo k jeho povrchu. Bylo shledáno, že po celou dobu ožehového programu musí být udržována konstantní rychlost, a proto bylo nutno se vyhnout zbytečným reorientacím TCP a targety být ideálně umístěny v jedné rovině.

Pro udržení konstantní rychlosti bylo nutno, aby byly zóny targetů zvětšeny. U ABB robotů je „zóna targetu“ definována jako virtuální koule kolem daného bodu, jakmile je tato koule protnuta TCP robotu, dráha pohybu je automaticky změněna na následující bod. Je-li zóna správně nastavena, je zajištěno, že nebude vytvořeno nechtěné zpomalení a dráha bude projeta konstantní rychlostí.

Finální ladění programu bylo provedeno ve spolupráci s technikem firmy Aerogen, přičemž byla doporučena optimální hodnota povrchového napětí pro plastový dílec ve výši 30 dyn/cm. Tato hodnota byla ověřena pomocí testovacích inkoustů od firmy Aerogen. Při testování je nezbytné, aby byl pro každou láhev s inkoustem použit samostatný aplikační nástroj, jímž bude inkoust nanášen na ožehnutý díl. Tímto opatřením je zabráněno kontaminaci inkoustu určeného pro 30 dyn/cm například inkoustem s normou 32 dyn/cm, což by mohlo vést ke zkreslení výsledků testu.

10.3 Ionizace

Po odladění ožehového programu byl proces ionizace pouze zkontrolován a poloha trysek vůči projížděnému dílu byla přenastavena. Hodnota tlaku vzduchu byla rovněž nastavena na finálních 3 bar. V době lazení byl používán půjčený měřák statického napětí povrchu od firmy Kyence, který se pro naše účely velmi hodil a jeho zakoupení je doporučováno všude tam, kde je klíčová nejvyšší kvalita lakovaných plastových povrchů. Po nastavení polohy a mírném přiblížení k plastovému dílu byla ionizace správně nastavena a její funkčnost ověřena měřákem statického napětí povrchu.

10.4 Lakování

Zde se začíná nutností dodržování konstantní viskozity barvy. Její správné naředění ředidlem musí být pravidelně ověřováno pomocí certifikovaného trychtýře s otvorem DIN 4. Optimální viskozita byla stanovena na 19 s. Měření probíhá tak, že se certifikovaný kalíšek naplní lakovací tekutinou a zaznamená se časový úsek, během kterého kapalina proteče otvorem DIN 4. Po ustálení vstupní viskozity musí být zajištěn správný poměr míchání tužidla s lakem. K tomuto účelu je použit MC Engine od ABB, díky kterému je po kalibraci velikosti pumpy zadán požadovaný poměr. Vnitřním řídicím systémem jsou následně dopočítány otáčky potřebné k jeho dodržení.

Z hlediska trajektorie jsou za nejnáročnější považovány programy pro lakovací roboty. Samotný proces lakování není tak jednoduchý jako u ožehování, proto musí být věnována pozornost rovnoměrnému pokrytí celého povrchu. Lakování musí být čelní pohledové plochy a boční části. Lakování tedy musí být prováděno ze všech směrů při konstantním pohybu dopravníku rychlostí 1,7 metru za minutu. Tvorba programů se řídí obecnými pravidly pro lakování geometricky složitějších výrobků – nejprve jsou lakovány hrany dílů a poté je sjednocen celý povrch konstantním pohybem, kdy je pistole umístěna kolmo k dílu a pohyb zahrnuje pouze čelní plochu.

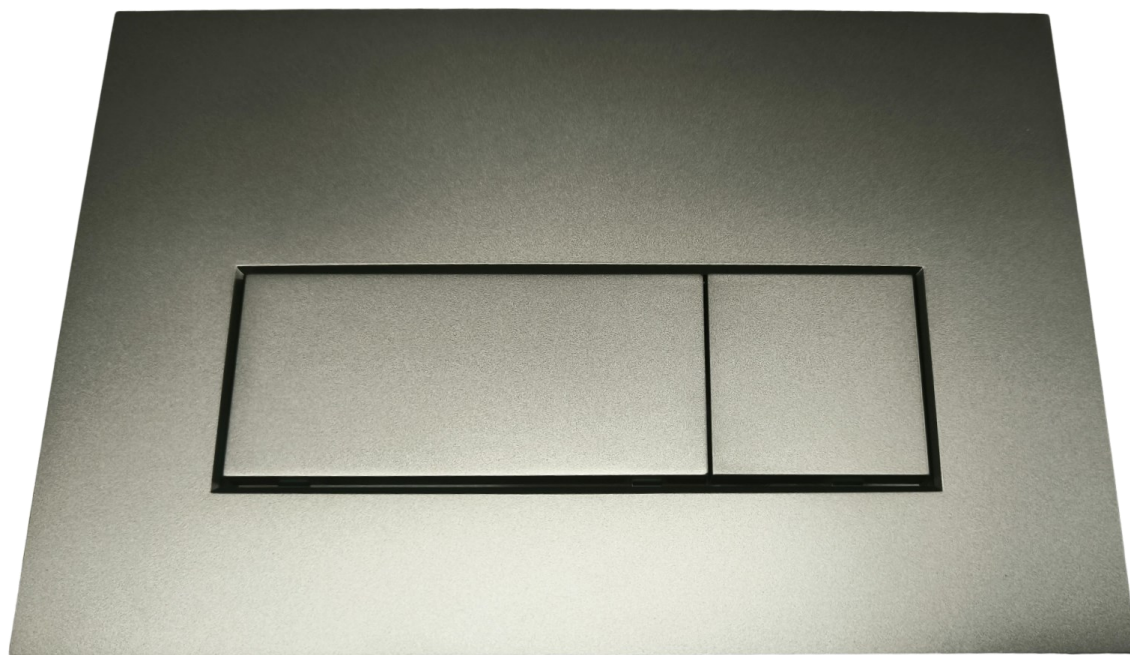
Největší problém při ladění trajektorií byl pozorován na hranách dílů, kde díky fyzikálním vlastnostem lakovací směsi a náklonu dílů docházelo ke vzniku mírných nálitků na spodních hranách. Tato skutečnost je z hlediska kvality nepřijatelná, proto musely být programy laděny až do jejich úplné eliminace. Problém mohl být řešen několika způsoby – zrychlením lakovací trajektorie, změnou vzdálenosti od lakovaného povrchu, nakloněním pistole nebo

změnou nastavení tzv. brushů pistole. Brushe umožňují rozdílné nastavení poměrů barvy, tvarovacího vzduchu a atomizačního vzduchu pro různé části dílu, například odlišné nastavení pro hrany a sjednocení nalakovaného povrchu. Pro dosažení optimálního lakování hran byla zvolena kombinace všech těchto možností.

Po dosažení optimálního výsledku, však stále nebyla kvalita povrchu uspokojivá, protože díly lakované ručně vykazovaly jemnější strukturu povrchu. Jemnější struktury bylo dosaženo použitím trysky o průměru 0,7 mm, čímž byla dosažena kvalita srovnatelná s ručním lakováním. Tím byly splněny požadavky na kvalitu, což bylo schváleno a laboratorní testy potvrdily optimální tloušťku nátěru v rozmezí 80–120 mikronů dle požadavků.

Tyto testy musí být prováděny v laboratoři rozříznutím zalakovaného dílu, protože lakovací směs zákazníka působí na povrch leptáním, což znemožňuje měření tloušťky nátěru hřebínkovou metodou. Tato metoda by vedla ke vtlačení hřebíčku do povrchu spolu s nátěrem, což by zkreslilo naměřené hodnoty. Díky dostupnosti vlastní laboratoře u zákazníka bylo ověření tloušťky nátěru prováděno rychle. V případě nevyhovující tloušťky by její úprava mohla být snadno provedena zvýšením parametru barvy v nastavení brushe.

Po finálním schválení tloušťky nástřiku a vzhledu povrchu bylo ladění programů dokončeno a linka byla připravena ke spuštění do výrobního procesu.



Obrázek 47 Zalakovaný díl dle požadavků kvality [79]

11 POROVNÁNÍ DAT

Po dosažení požadované kvality a spuštění linky do automatizovaného provozu, probíhal tzv. testovací provoz a následná plná výroba. Od zákazníka máme zpětnou vazbu, jak si naše aplikace stojí v porovnání s původní ruční aplikací.

11.1 Čas lakování a spotřeba barvy na kus

Díky datalogu z robota, ve kterém jsou průběžně ukládána data z lakování na základě nastavení MC Enginu, mohou být snadno prezentovány údaje spojené s lakovacím procesem. Z těchto dat vyplývá, že průměrná spotřeba laku na díl činí 14,123 ml a průměrná doba programu je 43,956 sekund.

Podle údajů poskytnutých zákazníkem jsou hodnoty při ručním lakování výrazně vyšší průměrná spotřeba stejného laku na stejný díl je 47,1 ml a průměrná doba lakování jednoho kusu dosahuje 125 sekund. Do této hodnoty se významně promítá ruční příprava celého dílu před samotným lakováním.

```
2025-03-20 08:28:28,Prog:2,Mtrl:111,Brush:11,Usage:14.124,CycleTime:43.870
2025-03-20 08:29:12,Prog:2,Mtrl:111,Brush:11,Usage:14.117,CycleTime:44.173
2025-03-20 08:29:57,Prog:2,Mtrl:111,Brush:11,Usage:14.125,CycleTime:43.959
2025-03-20 08:30:41,Prog:2,Mtrl:111,Brush:11,Usage:14.117,CycleTime:43.867
2025-03-20 08:31:25,Prog:2,Mtrl:111,Brush:11,Usage:14.123,CycleTime:43.876
2025-03-20 08:32:09,Prog:2,Mtrl:111,Brush:11,Usage:14.124,CycleTime:43.886
2025-03-20 08:32:53,Prog:2,Mtrl:111,Brush:11,Usage:14.128,CycleTime:43.907
2025-03-20 08:33:37,Prog:2,Mtrl:111,Brush:11,Usage:14.124,CycleTime:43.672
2025-03-20 08:34:21,Prog:2,Mtrl:111,Brush:11,Usage:14.126,CycleTime:44.272
2025-03-20 08:35:05,Prog:2,Mtrl:111,Brush:11,Usage:14.123,CycleTime:44.169
2025-03-20 08:35:50,Prog:2,Mtrl:111,Brush:11,Usage:14.124,CycleTime:43.879
2025-03-20 08:36:34,Prog:2,Mtrl:111,Brush:11,Usage:14.124,CycleTime:43.975
2025-03-20 08:37:18,Prog:2,Mtrl:111,Brush:11,Usage:14.122,CycleTime:44.264
2025-03-20 08:38:02,Prog:2,Mtrl:111,Brush:11,Usage:14.120,CycleTime:43.662
2025-03-20 08:38:46,Prog:2,Mtrl:111,Brush:11,Usage:14.125,CycleTime:43.870
2025-03-20 08:39:30,Prog:2,Mtrl:111,Brush:11,Usage:14.123,CycleTime:43.892
2025-03-20 08:40:15,Prog:2,Mtrl:111,Brush:11,Usage:14.124,CycleTime:43.968
2025-03-20 08:40:59,Prog:2,Mtrl:111,Brush:11,Usage:14.125,CycleTime:44.066
2025-03-20 08:41:43,Prog:2,Mtrl:111,Brush:11,Usage:14.119,CycleTime:43.976
2025-03-20 08:42:27,Prog:2,Mtrl:111,Brush:11,Usage:14.121,CycleTime:43.672
2025-03-20 08:43:11,Prog:2,Mtrl:111,Brush:11,Usage:14.126,CycleTime:44.173
2025-03-20 08:43:55,Prog:2,Mtrl:111,Brush:11,Usage:14.123,CycleTime:43.974
2025-03-20 08:44:39,Prog:2,Mtrl:111,Brush:11,Usage:14.123,CycleTime:43.967
```

Obrázek 48 Data z paměťového záznamu robota [80]

11.2 Procento zmetkovitosti

Z aktuální zpětné vazby od zákazníka byly potvrzeny hodnoty zmetkovitosti. Původní průměrná zmetkovitost při ručním lakování byla 8,7 %. Toto číslo bylo způsobeno skutečností, že operátor si musel vše připravit sám před vstupem do ruční kabiny, včetně ruční předúpravy dílu tedy otření ubrousky obsahujícími izopropylalkohol a ručního ofouknutí dílu. Tyto operace byly prováděny před ruční kabinou, přičemž časová náročnost přípravy způsobovala usazování poletujících částic, které operátor vzhledem k lakovacímu obleku a masce nebyl schopen rozeznat.

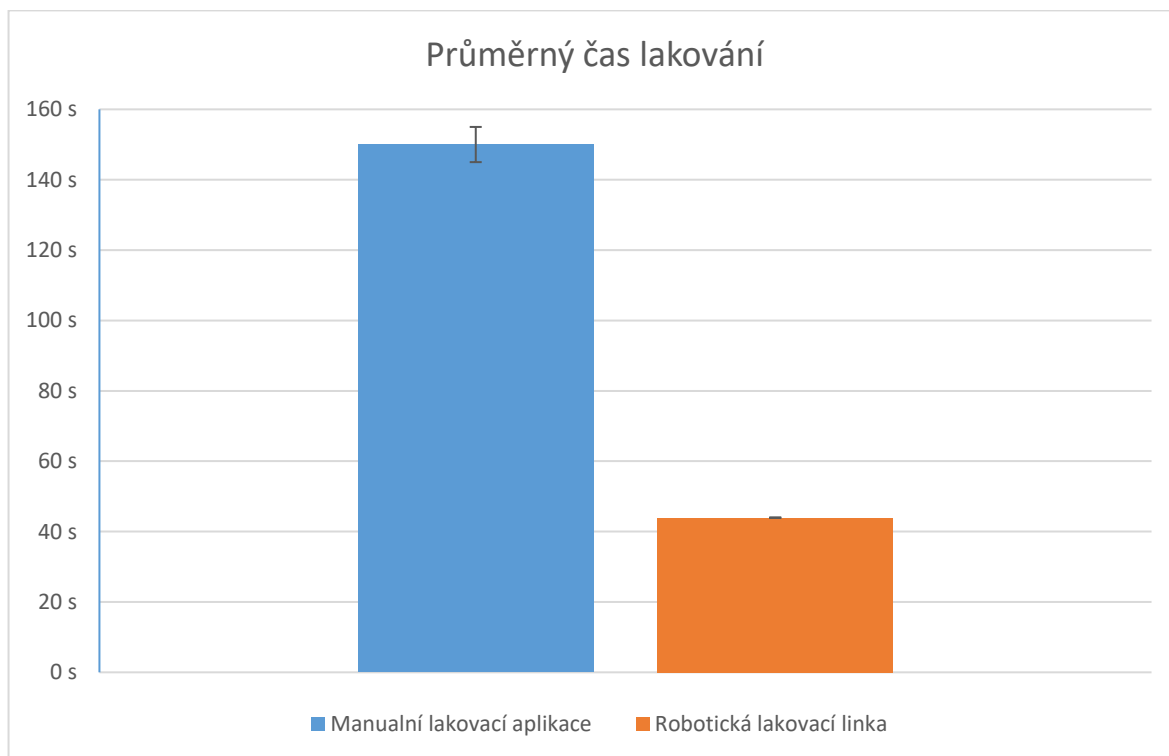
Na nové automatizované lince je průměrné procento zmetkovitosti kolem 2,9 %. Výrazného zlepšení bylo dosaženo díky konstrukci celé lakovací části, která je po vnějším ofouknutí dílu izolována díky nastavení vzduchotechniky celé jednotky na přetlak vůči okolí. Nízkému procentu zmetkovitosti dále přispívá ionizace povrchu, kterou je díl zbaven statického náboje, čímž již neváže poletující nečistoty. Těchto je díky účinné filtraci vzduchu a ochrannému přilnavému nátěru všech vnitřních prostor kabin minimum. Ožeh má díky zvýšení povrchového napětí lakovaného dílu také velkou část na výsledné kvalitě zalakovaného dílu skrze lepší smáčivost dílu.

11.3 Zhodnocení dat

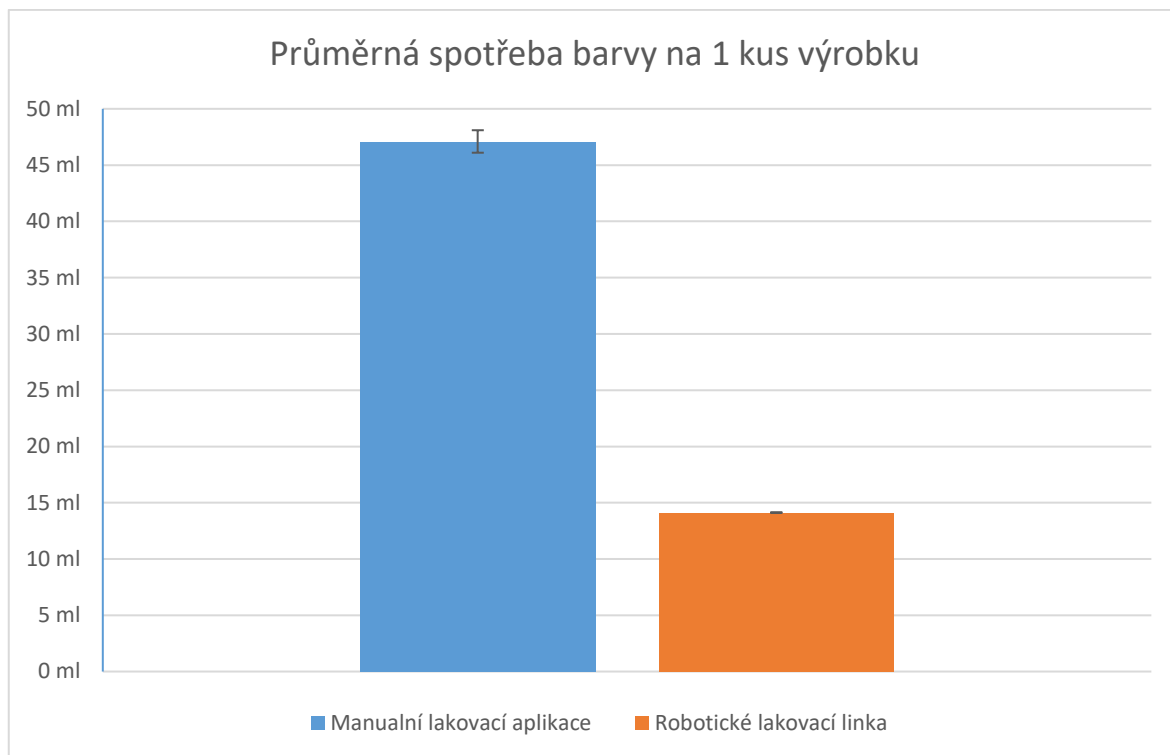
Díky výše uvedeným výsledkům byly exaktně stanoveny přínosy práce. Při přepočtu na procenta bylo dosaženo snížení spotřeby barvy přibližně o 70 %, zmetkovitost klesla o 64,82 % a čas lakování se zkrátil o 64,84 %. Díky těmto hodnotám je jasně patrné, že aplikace splnila své předpoklady.

Dalším nepopíratelným přínosem je snížení požadavků na obsluhu linky. Vzhledem k tomu, že mokré lakování plastů patří mezi výrazně složitější operace ve srovnání například s práškovým lakováním. V důsledku vysokých požadavků na kvalitu je při ruční aplikaci kladen vysoký standard na zručnost lakýrníka. Doba zaučení zaměstnance tak, aby splňoval požadovanou kvalitu dle vnitřních předpisů, činí průměrně 6 měsíců. Proto je obtížné najít vhodného kandidáta na tuto pozici. Takový zaměstnanec si je navíc vědom své hodnoty pro firmu, což vede k tomu, že jeho mzda je výrazně vyšší než u běžných pracovníků.

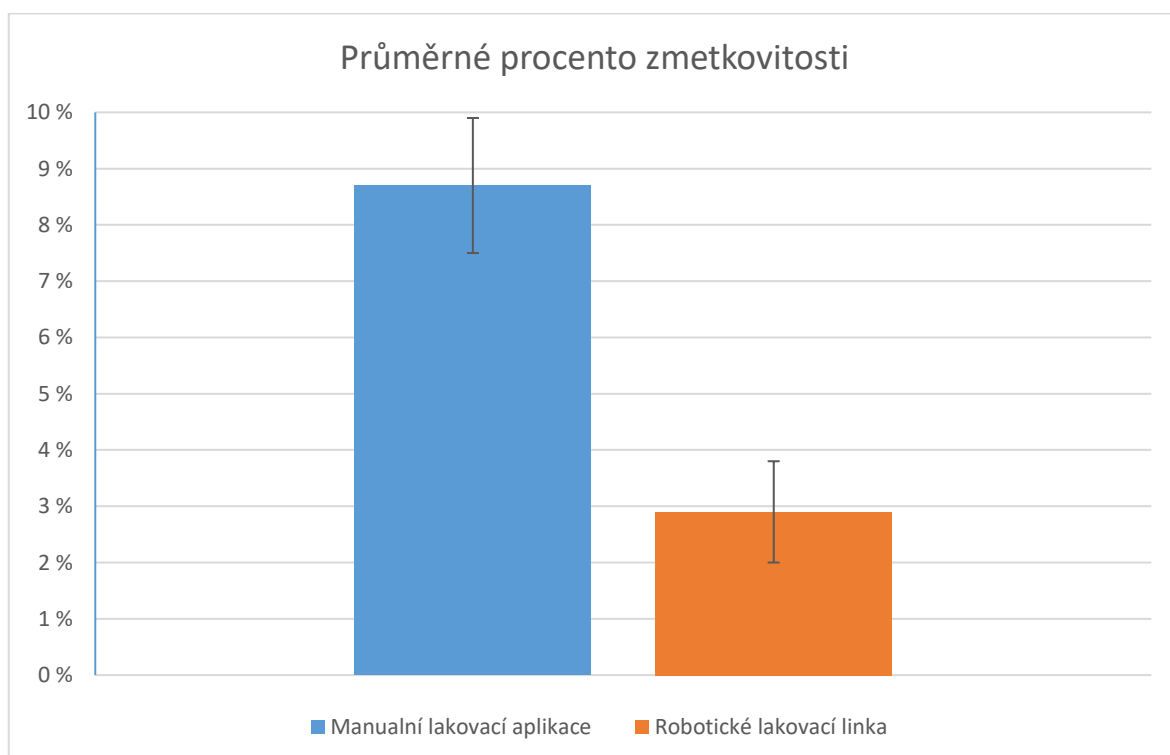
Díky výsledkům dosaženým automatizovanou lakovací linkou a také díky skutečnosti, že zákazník již disponuje kompletním oddělením automatizace s několika desítkami robotů ABB, odpadla potřeba speciálně zaučovat programátory robotů pro tuto aplikaci. Kvalifikační požadavky na obsluhu lakovací linky tak byly sníženy na úroveň operátora, který pouze zadává zakázky do systému a zakládá díly na dopravník.



Graf 1 Čas lakování [82]



Graf 2 Spotřeba barvy na 1 kus výrobku [83]



Graf 3 Procentuální zmetkovitost aplikace [83]

12 NÁVRH ZLEPŠENÍ TECHNOLOGIE

Celý proces od montáže až po výsledný stav byl otázkou tří měsíců práce, během níž byla aplikace důkladně prozkoumána. Během následné podpory přímo na místě byly zaznamenány oblasti, ve kterých by mohlo být dosaženo ještě lepších výsledků.

12.1 Úprava nakládací zóny

Prostor pro zlepšení byl identifikován v nakládací zóně, která je v současné době otevřená. Při nakládání dílů hrozí kontaminace polétavými částicemi. I přes instalaci vstupních ofukových trysek na vstupu do lakovací kabiny stále existuje riziko průniku drobných částic do lakovací sekce, kde mohou ulpět na dílech a zvýšit tak jejich zmetkovitost. Vzhledem k velmi vysoké úrovni požadované kvality je každý díl důkladně kontrolován a prověřován na případné vady lakování. Z tohoto důvodu musí být všechny zdroje kontaminace maximálně eliminovány. Doporučuje se proto kompletní uzavření sekce nakládání vůči okolnímu prostoru, případně zavedení přísných provozních opatření pro vstup personálu do lakovny a nastavení pravidel týkajících se pořádku a pravidelného úklidu v celém prostoru lakovny.

12.2 Bypass ventil na barvovém čerpadle

Bylo zjištěno, že při ladění sekvence pro čištění a výměnu barvy dochází k výraznému prodloužení doby čištění z důvodu absence obtokového (bypass) ventilu na pumpě. Toto prodloužení je způsobeno délkou aplikačního vedení mezi pumpou a lakovací pistolí robota. Dalším faktorem, který prodlužuje dobu čištění, je nižší mazací schopnost ředidla ve srovnání s nátěrovými kapalinami. To vede k nutnosti omezit otáčky pumpy na nižší hodnoty během čištění, než jakých je pumpa schopna dosáhnout při aplikaci barvy. Instalace pumpy vybavené obtokovým ventilem by výrazně přispěla ke zkrácení doby čištění a snížení celkové doby potřebné k lakování jednoho dílu. Avšak vzhledem k finanční náročnosti byla v této aplikaci použita pumpa bez obtokového ventilu.

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala návrhem a realizací automatizovaného pracoviště pro proces mokrého lakování plastových komponent. V teoretické části byla provedena rešerše dostupných technologií v oblasti robotického lakování a metod předúpravy plastových povrchů s důrazem na požadavky zadavatele.

Praktická část se zaměřila na realizaci klíčových prvků automatizovaného systému. Byla provedena montáž a kalibrace robotických jednotek, jejich uvedení do provozu včetně ionizační aplikace a lakovací technologie. Montáž barvové kuchyně zajistila externí firma, stejně jako počáteční kalibraci ožehového kontroléru. Vlastní robotické aplikace byly následně naprogramovány a optimalizovány pro konkrétní výrobní podmínky. Celý proces byl následně odladěn tak, aby splňoval požadavky na kvalitu a spolehlivost.

Po dosažení požadované kvality byl systém uveden do zkušebního provozu a následně do plného výrobního nasazení. V této fázi proběhla analýza dat získaných z provozu. Na základě datalogů z robota a zpětné vazby od zákazníka byla vyhodnocena účinnost automatizované aplikace v porovnání s původní ruční metodou. Průměrná spotřeba laku na díl klesla z 47,1 ml na 14,1 ml, čas lakování se snížil z 125 s na 44 s a zmetkovitost klesla z 8,7 % na 2,9 %. Z těchto hodnot vyplývá, že automatizace přinesla přibližně 70 % úsporu materiálu, zkrácení času lakování o více než 64 % a snížení zmetkovitosti o téměř 65 %.

Dalším významným přínosem bylo snížení nároků na kvalifikaci obsluhy. Zatímco u ručního lakování je doba zaučení nového pracovníka často v řádu měsíců a klade vysoké nároky na jeho dovednosti, automatizované pracoviště umožňuje obsluhu běžným operátorem s minimálním školením. Tento posun přispívá nejen ke snížení personálních nákladů, ale i k větší stabilitě výrobního procesu.

Na základě důkladného sledování provozu byly rovněž navrženy konkrétní možnosti zlepšení stávající technologie. Prvním doporučením je úprava nakládací zóny, která je v současnosti otevřená a náchylná ke kontaminaci polétavými částicemi. Navrhuje se její částečné či úplné uzavření nebo zavedení provozních opatření k minimalizaci vnášených nečistot. Druhým návrhem je doplnění obtokového (bypass) ventilu na barvovém čerpadle, který by významně zkrátil dobu potřebnou pro výměnu barvy a čištění systému. I když z finančních důvodů nebyl ventil v této fázi instalován, jeho pozdější implementace by mohla přispět k dalšímu zvýšení efektivity výroby.

Díky dosaženým výsledkům a návrhům pro budoucí optimalizaci představuje navržené řešení moderní, účinný a flexibilní systém lakování, který odpovídá požadavkům na kvalitu, produktivitu a provozní úspornost ve výrobě plastových komponent.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ARRAIS, R., COSTA, C., RIBEIRO, P., ROCHA, L., SILVA, M. a VEIGA, G. On the development of a collaborative robotic system for industrial coating cells. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Online. 2020, roč. 115, č. 3, s. 853–871. Springer. [cit. 2025-05-08]. DOI 10.1007/s00170-020-06167-z. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06167-z>.
- [2] LI, J. The convergence of artificial intelligence and blockchain in industrial robotics. Applied and Computational Engineering. Online. 2024, roč. 49, č. 1, s. 304–309. Beijing: EWA Publishing. [cit. 2025-05-08]. DOI 10.54254/2755-2721/49/20241541. Dostupné z: <https://doi.org/10.54254/2755-2721/49/20241541>.
- [3] GASPARETTO, A. a SCALERA, L. From the Unimate to the Delta Robot: The Early Decades of Industrial Robotics. Online. Cham: Springer International Publishing, 2018, s. 284–295. [cit. 2025-05-08]. DOI 10.1007/978-3-030-03538-9_23. Dostupné z: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-03538-9_23.
- [4] MEZINÁRODNÍ FEDERACE ROBOTIKY. World Robotics 2024 Industrial Robots. Online. Frankfurt: IFR, 2024. [cit. 2024-12-01]. Dostupné z: https://ifr.org/img/worldrobotics/Press_Conference_2024.pdf.
- [5] WALLÉN, J. The history of the industrial robot. Online. Linköping: Linköping University Electronic Press, 2008, 18 s. [cit. 2025-05-08]. LiTH-ISKY-R-2853. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:316930/fulltext01.pdf>.
- [6] OLSZEWSKI, M. Modern Industrial Robotics. Pomíary Automatyka Robotyka. Online. 2020, roč. 24, č. 1, s. 5–20. [cit. 2025-05-08]. ISSN 1427-9126. DOI 10.14313/PAR_235/5. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/830467831/Modern-Industrial-Robotics>.
- [7] ABB GROUP. Historie průmyslových robotů. Online. [cit. 2023-10-20]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/historie>.

- [8] FANUC CORPORATION. Robotické lakovací systémy. Online. [cit. 2023-10-20]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/kdo-jsme/fanuc-historie>.
- [9] KUKA AG. Historie společnosti KUKA. Online. [cit. 2023-10-20]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/firma/o-spole%c4%8dnosti-kuka/historie>.
- [10] UNIVERSAL ROBOTS. UR10e – Kolaborativní robot. Online. [cit. 2023-10-20]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/cs/produkty/robot-ur10e/>.
- [11] SICILIANO, B. a KHATIB, O., eds. Springer Handbook of Robotics. 2. vyd. Cham: Springer, 2016. ISBN 978-3-319-32552-1.
- [12] ENGELBERGER, J. F. Robotics in Practice: Management and Applications of Industrial Robots. New York: AMACOM, 1980. ISBN 978-0-8144-5594-5.
- [13] PIRES, J. N. Industrial Robotics: Programming, Simulation and Applications. Online. Vienna: InTech, 2007. [cit. 2023-10-20]. Dostupné z: <https://es.scribd.com/doc/39235390/Industrial-Robotics-Programming-Simulation-and-Applications>.
- [14] CHLUPOVÁ, Silvie. *Změna povrchových vlastností ABS plastu pomocí plazmatu* online. Bakalářská práce. Brno: Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta, 2017 [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/th/xb2dr/>
- [15] SVĚT BALENÍ. Nepodceňujte povrchové napětí. Online. 17. 6. 2015. [cit. 2025-01-13]. Dostupné z: <https://www.svetbaleni.cz/2015/06/17/nepodcenujte-povrchove-napeti/>.
- [16] MERITAGE. Technologie. Online. [cit. 2025-03-13]. Dostupné z: <https://www.meritage.cz/preduprava-povrchu-tantec/technologie/>.

- [17] TRACTON, A. A., ed. Coatings technology handbook. 3rd ed. Online. Boca Raton: CRC Press, 2006. [cit. 2025-03-13]. Dostupné z: <https://www.daryatamin.com/wp-content/uploads/2019/12/Coatings-Technology-Handbook-Third-Edition.pdf>.
- [18] TUREK, M. Modeling of ionization in a spherical surface ionizer. *Acta Physica Polonica A*. Online. 2011, roč. 120, č. 1, s. 188–191. ISSN 0587-4246. DOI 10.12693/aphyspola.120.188. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://doi.org/10.12693/aphyspola.120.188>.
- [19] YOSRI, M. H., MUHAMAD, P., ISMAIL, M. A. a YATIM, N. H. M. Air ionizer application for electrostatic discharge (ESD) dust removal in automotive painting industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Online. 2018, vol. 290, článek 012051. DOI 10.1088/1757-899X/290/1/012051. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/290/1/012051>.
- [20] LUKÁŠ, V. Problematika lepení plastů v automobilovém průmyslu. Online. Diplomová práce. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, 2022. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/166700>.
- [21] DiGIACOMO, J. a SABREEN, S. R. Flame plasma surface treatment improves adhesion of polymers. *Plastics Decorating*. Online. říjen/listopad 2005. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://plasticsdecorating.com/articles/2005/flame-plasma-surface-treatment-improves-adhesion-of-polymers/>.
- [22] DING, L., ZHANG, X. a WANG, Y. Study on the behavior of BOPP film treated by corona discharge. *Coatings*. Online. 2020, roč. 10, č. 12, 1195. DOI 10.3390/coatings10121195. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/coatings10121195>.
- [23] WIKIPEDIE. Koronování. Online. Poslední úprava 7. 2. 2023. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Koronov%C3%A1n%C3%AD>.

- [24] FLEISCHER, M., KELAR TUČEKOVÁ, Z., GALMIZ, O. et al. Plasma treatment of large-area polymer substrates for the enhanced adhesion of UV–digital printing. *Nanomaterials*. Online. 2024, roč. 14, č. 5, 426. DOI 10.3390/nano14050426. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/nano14050426>.
- [25] BACHUROVÁ, N. Aplikace práškových hmot. Online. Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2021. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/97279>.
- [26] SCHOLL, M., VOGEL, N. a LANG, S. Electrostatic powder coating as a novel process for high-voltage insulation applications. *Advanced Engineering Materials*. Online. 2023, roč. 25, č. 19, e202300465. DOI 10.1002/adem.202300465. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/adem.202300465>.
- [27] KREIBICH, V. Povlaky z práškových plastů bezchybně. *MM Průmyslové spektrum*. Online. 2010. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/povlaky-z-praskovych-plastu-bezchybne>.
- [28] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. HVLP spray guns in the auto refinishing shop: a success story. Online. Washington, D.C.: EPA, 2000. [cit. 2025-05-08]. EPA 744-F-00-014. Dostupné z: <https://p2infohouse.org/ref/16/15615.pdf>.
- [29] GATANO, B. L. Determining the transfer efficiency of a HVLP spray gun. Online. Master's Thesis. Chapel Hill: University of North Carolina, 1997. DOI 10.17615/hpc5-db10. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://doi.org/10.17615/hpc5-db10>.
- [30] SAMES TECHNOLOGIES. Airspray LVLP. Online. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://www.sames.com/usa/en/technologies-airspray-lvlp.html>.
- [31] AUTOLAKY-ESHOP.COM. Stříkácí pistole a jejich rozdíly. Online. 2. 5. 2023. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://www.autolaky-eshop.com/clanek/41/strikaci-pistole-a-jejich-rozdily/>.

- [32] KTA-TATOR, INC. When to use conventional versus airless spray. Online. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://kta.com/conventional-versus-airless-spray/>.
- [33] VALSPAR. Technický údajový list: Obecné informace – Postup lakování (TI–G7/CZ). Online. Vydání 1/2013. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: https://www.valsparindustrialmix.com/emea/cz/downloads/G7_Spray_Procedure.pdf.
- [34] HITCHCOCK PUBLISHING COMPANY. Understanding electrostatic finishing. Industrial Finishing. Online. září 1990. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://p2infohouse.org/ref/30/29102.pdf>.
- [35] GRACO INC. Electrostatic spray gun basics. Online. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://www.graco.com/us/en/in-plant-manufacturing/solutions/articles/electrostatic-spray-gun-basics.html>.
- [36] INDUSTRA GMBH. Elektrostatische Lackungssysteme: Alles, was Sie wissen sollten. Online. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://www.industra.de/cs/elektrostatische-lackieranlagen-alles-was-man-wissen-sollte/>.
- [37] WATECH (WAGNER GROUP). Rotační atomizér TOPFINISH RobotBell 1 – ideální pro elektrostatische aplikace. Online. Produktová novinka, 2021. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://www.watech.cz/cz/wagner-group-produkty/wagner-produkty-mokry-prumysl/aplikace-strikan-pistole/high-tech-strikan-rotacnimi-zvonky/wagner-topfinish-robotbell-1-detail.html>.
- [38] ABB ROBOTICS. PixelPaint functional module. Online. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/functional-modules/pixelpaint>.
- [39] ABB ROBOTICS. Product specification – IRB 1600/1660ID. Online. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3HAC085911-001&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.

- [40] SHUNZE INTERNATIONAL. FT Auto FRC A4 Leaflets (2). Online. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: [http://www.shunze-international.com/PDF/FT%20Auto%20FRC%20A4%20Leaflets%20\(2\).pdf](http://www.shunze-international.com/PDF/FT%20Auto%20FRC%20A4%20Leaflets%20(2).pdf).
- [41] ABB ROBOTICS. IRB 52 – A compact painting specialist. Online. [s.l.]: ABB Robotics, květen 2020. Rev. F. ROB0037EN. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=ROB0037EN&LanguageCode=en&Action=Launch>.
- [42] ABB ROBOTICS. Unit description: Paint. IRB paint robots. Online. ABB Robotics, 2. prosince 2024. Rev. 45. Dokument 3HNA012856-001. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <sandbox:/mnt/data/3e0343a8-25af-4314-93f7-3ddf3d1ede6a.pdf>.
- [43] CARLISLE FLUID TECHNOLOGIES. AGMD Pro Automatic Gun. Online. Scottsdale (AZ): Carlisle Fluid Technologies, 2025. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://carlisleft.com/product/agmd-pro-automatic-gun/>.
- [44] VPOKRASKU.RU. Воздушные головы. Online. [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: <https://vpokrasku.ru/upload/iblock/581/Vozdushnye-golovy.pdf>.
- [45] KOLÍBAL, Zdeněk. Roboty a robotizované výrobní technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně: VUTIAM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Heronův model automatického otevírání dveří [16]	16
Obrázek 2 Joseph Engelberger (vlevo), George Devol, kde je obsluhuje robot [17]	17
Obrázek 3 První průmyslový robot UNIMATE [18].....	18
Obrázek 4 Fanuc model A 200 [18].....	18
Obrázek 5 Kolaborativní robot GOFA od firmy ABB [19].....	19
Obrázek 6 První lakovací robot ABB IRB 6 [21].....	21
Obrázek 7 Znázornění adhezních sil [22]	22
Obrázek 8 Smáčivost [23].....	23
Obrázek 9 Princip testování povrchového napětí [23].....	23
Obrázek 10 Robotický hořák ožehu [26]	26
Obrázek 11 Korónový výboj [28]	28
Obrázek 12 Ošetření povrchu pomocí plazmy [29].....	29
Obrázek 13 Elektrostatické práškové lakování [32]	32
Obrázek 14 Tribostatické práškové lakování [34]	34
Obrázek 15 Automatická HVLP pistole Sagola [35].....	35
Obrázek 16 Automatická airless pistole [37].....	37
Obrázek 17 Automatická AirMix pistole [38]	38
Obrázek 18 Robotická duální nízkotlaká elektrostatická pistole [39]	39
Obrázek 19 Robotická pistole s elektrostatickým rotačním zvonem [40]	40
Obrázek 20 ABB PixelPaint [41].....	41
Obrázek 21 Schéma technologie [44]	44
Obrázek 22 Nakládací pracoviště [45].....	45
Obrázek 23 Detail vstupní části [46]	46
Obrázek 24 Bezpečnostní zámek Euchner řada MGB [47]	47
Obrázek 25 Čidlo detekce zhasnutí plamene [48]	48
Obrázek 26 Kabina robotického ožehu [48]	48
Obrázek 27 Ionizační trysky [49]	49
Obrázek 28 Lakovací kabina [51].....	51
Obrázek 29 Vytěkáci prostor a postor kotroly kvality [52]	52
Obrázek 30 Barvová kuchyně – zásobníky barvy [53]	53
Obrázek 31 Skid s dílem pro lakování [55]	55
Obrázek 32 Aplikační kabiny [55].....	55
Obrázek 33 Robot ABB 1660 id [57]	57
Obrázek 34 Ožehová aplikace [59].....	59

Obrázek 35 Lakovací robot ABB irb 52 [62]	62
Obrázek 36 Schéma kapalinové cesty [63]	63
Obrázek 37 Schéma řízení vzduchu [64]	64
Obrázek 38 Rozvaděč pohonu čerpadel [65]	65
Obrázek 39 Ventilový blok [66]	66
Obrázek 40 2K Mixer se směšovací trubicí [67]	67
Obrázek 41 Membránový regulátor [68]	68
Obrázek 42 Zubové čerpadlo [69]	69
Obrázek 43 Robotická lakovací pistole AGMD Pro [70]	70
Obrázek 44 Atomizační nástavec pistole [71]	71
Obrázek 45 Digitální dvojče pracovní stanice [74]	74
Obrázek 46 Díl určený k lakování [76].....	76
Obrázek 47 Zalakovaný díl dle požadavků kvality [79]	79
Obrázek 48 Data z paměťového záznamu robota [80].....	80

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Porovnání lakovacích robotů k datu 31.3.2025 [56].....	56
Tabulka 2 Porovnání manipulačních robotů k datu 31.3.2025 [56]	56
Tabulka 3 Technické parametry robota ABB irb 1660 id [58].....	58
Tabulka 4 Technické parametry robota ABB irb 52 [61]	61
Tabulka 5 Popis membránového regulátoru [68]	68

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ, ZKRATEK A POJMŮ

ABB	ASEA Brown Boveri
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
HVLP	High Volume Low Pressure
LVLP	Low Volume Low Pressure
VOC	Volatile Organic Compounds
AirMix	Vysokotlaké lakování s podporou vzduchu
Airless	Vysokotlaké lakování bez podpory vzduchu
Skid	Závěs pro uchycení lakovaného dílu
Brush	Parametry nastavení lakovacího paprsku
NC	Numerical Control
CNC	Computer Numerical Control
IoT	Internet of Things
LED	Light Emitting Diode
2 K	Dvoukomponentní lakovací systém
FRC	Flame Robot Controller
AGMD	Automatic Gun Medium Duty
TE30C	Speciální typ atomizačního nástavce stříkací pistole
PMMA	Polymethylmethakrylát
ESD	Electrostatic Discharge
BOPP	Biaxially Oriented Polypropylene
IRB	Industrial Robot
FT Auto	Fire Treatment Automatic
MGB	Multifunctional Gate Box
LVMP	Low Volume Medium Pressure
TCP	Tool Center Point

PTFE	Polytetrafluorethen
DPI	Dots per inch
SUV	Sport utility vehicle
FEP	Fluoropolymeru
CAD	Computer aided design
STEP	Standard for the Exchange of Product Data
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
DIN	Deutsches Institut für Normung
EX	Zařízení určené do nevýbušného prostředí
ATEX	Atmosphère Explosibles
PLC	Programmable Logic Controller

