

# Intenzifikace výrobního procesu lakování pružin

Bc. Viktor Fous

---

Diplomová práce  
2023



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	<b>Bc. Viktor Fous</b>
Osobní číslo:	<b>T21418</b>
Studijní program:	<b>N3909 Procesní inženýrství</b>
Studijní obor:	<b>Výrobní inženýrství</b>
Forma studia:	<b>Prezenční</b>
Téma práce:	<b>Intenzifikace výrobního procesu lakování pružin</b>

## Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární studii na dané téma.
2. Popište současný stav výrobního pracoviště.
3. Navrhněte intenzifikaci výrobního pracoviště.
4. Zhodnoťte výsledky řešení.

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

**Seznam doporučené literatury:**

1. Finding Optimal Manipulator Arm Shapes to Avoid Collisions in a Static Environmen  
Kot, T.; Bobovský, Z.; Brandstötter, M.; Kryš, V.; Virgala, I.; Novák, P.  
Finding Optimal Manipulator Arm Shapes to Avoid Collisions in a Static Environment. Appl. Sci. 2021, 11, 64. <https://doi.org/10.3390/app11010064>.
2. Skařupa, J. Průmyslové roboty a manipulátory. 1. vyd. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007. 260 s. ISBN 978-80-248-1522-0.
3. BAILEY, Adrian G. The science and technology of electrostatic powder spraying, transport and coating. Journal of electrostatics, 1998, 45.2: 85-120.  
[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304388698000497?casa\\_token=xQpCJn00dHwAAAAA:SQSsILr4uSLzxLj\\_j08](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304388698000497?casa_token=xQpCJn00dHwAAAAA:SQSsILr4uSLzxLj_j08)
4. LEGNANI, Giovanni a Irene FASSI, ed. Robotics: state of the art and future trends. New York: Nova Science Publishers, c2012, viii, 362 s. Computer science, technology and applications. ISBN 9781621004035.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Václav Janošík, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2023**

**prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.**  
děkan

L.S.

**Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 7. února 2023

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou 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 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou 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 diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové 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 diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Výroba vinutých pružin je komplexní proces, který se skládá z kroků jako vinutí drátu, fosfátování a práškové lakování. Tato diplomová práce se zabývá popisem výroby pružin v nejmenované společnosti a analýzou současného stavu pracoviště svěšující pružiny, které následuje po práškovém lakování. Další částí této práce je návrh automatizovaného pracoviště a ekonomické porovnání mezi současným stavem. Výsledkem této diplomové práce je zadávací dokumentace, která může sloužit jako předloha pro realizaci automatizovaného pracoviště svěšování pružin.

Klíčová slova: vinuté pružiny, fosfátování, práškové lakování, automatizace, robotizace

## **ABSTRACT**

The manufacture of coil springs is a complex process consisting of steps such as wire winding, phosphating and powder coating. This thesis deals with the description of spring production in an unnamed company and the analysis of the current state of the workplace following after powder coating. Another part of this thesis is the design of an automated workplace and an economic comparison between the current state of the art. The result of this thesis is a specification document that can serve as a template for the implementation of an automated spring droop workstation.

Keywords: coil springs, phosphating, powder coating, automation, robotization

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Václavu Janoščíkovi Ph.D. za odborné vedení této práce a odborný dohled. Dále bych chtěl poděkovat panu J. Lakomému za vstřícnost, pomoc při konzultacích a cenné rady, které pomohly tuto práci zkompletovat.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 ODPRUŽENÍ</b> .....	<b>11</b>
1.1 LISTOVÉ PRUŽINY .....	11
1.2 VINUTÉ PRUŽINY .....	12
1.2.1 Výrobní proces vinutých pružin.....	13
1.2.2 Materiál vinutých pružin .....	14
<b>2 POVRCHOVÉ ÚPRAVY</b> .....	<b>15</b>
2.1 FOSFÁTOVÁNÍ .....	15
2.1.1 Manganaté fosfátování .....	16
2.1.2 Železnaté fosfátování .....	16
2.1.3 Zinečnaté fosfátování .....	17
2.1.4 Zinečnato-vápenaté fosfátování .....	18
2.1.5 Technologický postup .....	19
2.2 PRÁŠKOVÉ LAKOVÁNÍ .....	21
2.2.1 Parametry prášku.....	22
2.2.2 Druhy prášku .....	23
2.2.3 Technologický postup .....	24
2.3 ABRAZIVNÍ POVRCHOVÁ ÚPRAVA – KULIČKOVÁNÍ.....	28
<b>3 PRŮMYSL 4.0</b> .....	<b>29</b>
3.1 ROBOTIKA .....	29
3.2 ROZDĚLENÍ ROBOTŮ .....	30
3.3 KONCOVÉ EFEKTORY .....	32
3.3.1 Klasifikace podle druhu efektoru .....	32
3.3.2 Klasifikace podle typu pohonu.....	34
3.3.3 Senzory.....	38
3.3.4 Výrobci.....	40
3.4 ROBOTICKÁ PRACOVNÍŠTĚ.....	41
3.5 BEZPEČNOST PRACOVNÍŠTĚ .....	42
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>46</b>
<b>4 CÍL PRÁCE</b> .....	<b>47</b>
<b>5 POPIS SOUČASNÉHO STAVU</b> .....	<b>48</b>
5.1 DRUHY VINUTÝCH PRUŽIN .....	49
5.2 NAVĚŠENÍ PRUŽIN .....	49
5.3 LAKOVACÍ LINKA .....	52
5.3.1 Schéma lakovny .....	52
5.4 SVĚŠENÍ PRUŽIN .....	53

5.5	POŽADAVKY NA KVALITU .....	54
5.5.1	Kontrola předúpravy .....	54
5.5.2	Kontrola tloušťky laku .....	55
5.5.3	Kontrola kvality laku.....	55
<b>6</b>	<b>INTENZIFIKACE LAKOVÁNÍ.....</b>	<b>56</b>
6.1	FINANČNÍ NÁKLADY .....	56
6.2	VOLBA ROBOTA.....	57
6.2.1	Yaskawa GP35L.....	57
6.2.2	Yaskawa GP50 .....	59
6.3	UCHOPOVAČE.....	60
6.3.1	Pneumatické .....	60
6.3.2	Tříprsté .....	60
6.3.3	Elektromagnetické.....	61
6.4	SENZORY .....	62
6.4.1	Stabilizátor háčků .....	62
6.4.3	Kontrola nezalakovaného místa .....	63
6.4.4	Zalakování.....	68
6.4.5	Kontrola zalakovaného místa .....	68
<b>7</b>	<b>NAVRŽENÍ PRACOVIŠTĚ .....</b>	<b>69</b>
7.1	VARIANTA 1 .....	70
7.1.1	Layout pracoviště .....	70
7.1.2	Rychlost cyklu.....	71
7.1.3	Výpočet ceny pracoviště .....	72
7.2	VARIANTA 2 .....	74
7.2.1	Layout pracoviště .....	74
7.2.2	Rychlost cyklu.....	75
7.2.3	Životnost manipulátorů .....	76
7.2.4	Výpočet ceny pracoviště .....	77
7.2.5	Doporučení .....	78
<b>8</b>	<b>POROVNÁNÍ SOUČASNÉHO A AUTOMATIZOVANÉHO PRACOVIŠTĚ.....</b>	<b>82</b>
8.1	SPOTŘEBA MATERIÁLU .....	82
8.2	EFEKTIVITA VÝROBY .....	82
8.3	ČASOVÝ SNÍMEK PRACOVIŠTĚ .....	83
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>84</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>89</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>90</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>92</b>
	<b>SEZNAM ROVNIC .....</b>	<b>93</b>
	<b>SEZNAM GRAFŮ .....</b>	<b>94</b>



## ÚVOD

Automatizace a robotizace v průmyslu jsou klíčové pro zajištění konkurenceschopnosti firem a pro zlepšení efektivity a kvality výroby. V dnešní době se výrobní procesy stávají stále složitějšími a náročnějšími, a to zejména s ohledem na rostoucí konkurenci a potřebu rychle se měnících trhů. Proto se firmy snaží najít nové způsoby, jak zefektivnit své výrobní procesy a dosáhnout větší flexibility a kvality svých produktů.

Automatizace a robotizace jsou jedním z možných řešení, které umožňují firmám dosáhnout těchto cílů s využitím nejmodernějších technologií, jako jsou roboti, IoT, umělá inteligence a další. Tyto technologie umožňují firmám nejen dosáhnout větší rychlosti a efektivity výroby, ale také zvýšit kvalitu a flexibilitu svých produktů a procesů.

Dalším faktorem, který podporuje automatizaci a robotizaci, je průmysl 4.0. Tento termín označuje čtvrtou průmyslovou revoluci, která se odehrává v současné době. Průmysl 4.0 umožňuje firmám využívat data pro zlepšení svých výrobních procesů a produktů. Tento trend vývoje přináší nové možnosti pro firmy a výrobní podniky, ale zároveň s sebou nese i nové výzvy, jako jsou například potřeba investic do nových technologií a potřeba odborně kvalifikovaného personálu.

Vzhledem k výše uvedeným faktorům se dnes stává automatizace a robotizace nedílnou součástí moderního průmyslu. Je to trend, který se nevyhýbá žádnému odvětví a jeho výhody jsou zřejmé. Avšak, automatizace a robotizace výrobních procesů není pouze otázkou nasazení nových technologií, ale také otázkou strategického plánování a správného řízení výrobního procesu. Z toho důvodu je třeba zohlednit mnoho faktorů při rozhodování o nasazení automatizace a robotizace ve firmě. Tyto faktory zahrnují například výběr správných technologií, stanovení optimálního nákladového rozpočtu, vytvoření vhodného pracovního prostředí a zajištění odborně kvalifikovaného personálu pro nasazení a údržbu technologií.

Cílem této práce je navrhnout automatizované pracoviště v nejmenované společnosti s ohledem na specifické požadavky této firmy a analyzovat výhody a rizika spojená s automatizací a robotizací výrobních procesů. Důkladná analýza a plánování jsou klíčové pro úspěšné nasazení automatizace a robotizace v průmyslové firmě.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 ODPRUŽENÍ

Celkový mechanismus odpružení je v automobilovém průmyslu jedním z nejdůležitějších prvků, který určuje především bezpečnost vozu a jízdní komfort. [1] Odpružení zabraňuje tomu, aby se otřesy a vibrace z vozovky nepřenesly na karoserii, cestující a náklad. Odpružení musí udržovat pneumatiky v kontaktu s vozovkou bez ohledu na povrch vozovky. Základní systém odpružení se skládá z dílů pružiny, nápravy a tlumiče. [2]

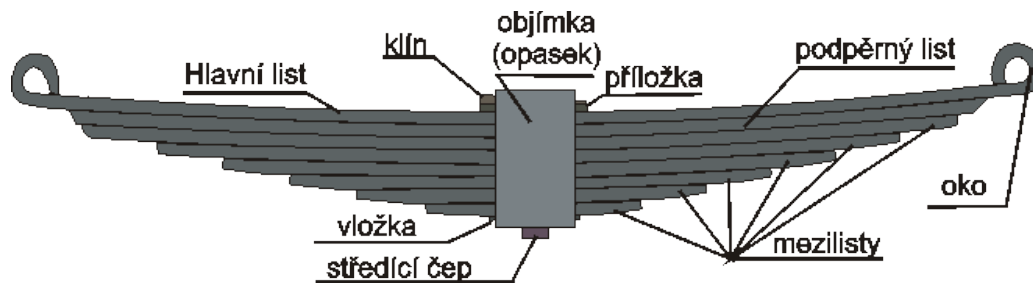
Moderní cestovní vozidla obvykle používají lehké vinuté pružiny. Lehčí užitková vozidla mají těžší pružiny než osobní vozidla a mohou mít vinuté pružiny vpředu a listové pružiny vzadu. [2]

Mechanická pružina je definována jako elastické těleso, jehož primární funkcí je vychýlení nebo deformace pod zatížením a vrácení se do původního tvaru, když je zatížení odstraněno. [3]

## 1.1 Listové pružiny

Listové pružiny jsou základními prvky v systémech odpružení užitkových vozidel, nákladních automobilů, SUV a železničních vozů. Účelem listových pružin je oddělit a chránit podvozek vozidla před vibracemi, které vzniknou při jízdě po nerovnostech a hrbolatém terénu. Kromě toho pomáhají ovládat kola při brzdění, zrychlování a při obecných manévrech vozidla, které se vyskytují při zvlněné vozovce. [4]

Listová pružina se skládá z několika (nebo někdy jen jednoho) tenkých kovových pásků neboli listů, které jsou na sobě uspořádány tak, aby tvořily zakřivenou pružinu. Délka těchto pásků se od středu pružiny zvětšuje. Ohýbání listů a tření mezi nimi, protože se lehce posouvají jeden přes druhý, tlumí hmotnost vozidla i případné nárazy. Většina listových pružin je zakřivená, často se jim říká eliptické pružiny. Zakřivení pomáhá pružině pohlcovat nárazy. Listová pružina je obvykle připevněna ke karoserii nebo rámu vozidla na obou koncích, zatímco kolo nebo sestava nápravy je připevněna ke středu pružiny. [5]



Obr. 1: Diagram listové pružiny. [5]

Listové pružiny jsou poměrně jednoduché na výrobu a používaly se na vozech a kočárech dávno před vznikem osobních a nákladních automobilů. Mnoho prvních automobilů, včetně Fordu Model T, používalo listové pružiny.

Listové pružiny jsou vhodné pro rozložení velkého zatížení na velkou plochu a pro konstrukce zavěšení, které zahrnují "pevnou" nápravu místo nezávislého zavěšení každého kola. Pevná náprava byla běžná u automobilů až do 70. let 20. století a u těžkých vozidel, jako jsou nákladní automobily, je to stále standard. Díky těmto faktorům jsou listové pružiny vhodné pro nákladní a jiná těžká vozidla, ale méně vhodné pro osobní automobily, protože mají nežádoucí vliv na jízdní vlastnosti vozidla. [5]

## 1.2 Vinuté pružiny

Vinuté pružiny se používají téměř u všech osobních automobilů. Pružiny zde fungují jako elastický předmět sloužící k ukládání mechanické energie. Mohou se kroutit, táhnout nebo natahovat silou a následně se vrátit do původního tvaru, když je síla odstraněna. Vinutá pružina je vyrobena z jedné délky speciálního drátu, který se navíjí na formy, aby se vytvořil požadovaný tvar. Nosnost pružiny závisí na průměru drátu, celkového průměru pružiny, tvaru, rozteče závitů a materiálové tuhosti. [2]

Specifické vlastnosti pružinám dodává stupeň stoupání vinutí a průměr drátu. Podle způsobu vinutí rozlišujeme lineární a progresivní pružiny. Lineární vinuté pružiny mají tu vlastnost, že se vzrůstajícím zatížením vzrůstá i odpor pružiny proti stlačení a to lineárně. Lineární pružina má po celé své délce stejnou rozteč jednotlivých závitů. Jednou z vlastností lineární pružiny je její tuhost. Tuhost se u lineární pružiny rovnoměrně zvyšuje při stlačení, jinak řečeno zatížení.

Progresivní vinuté pružiny s rostoucím zatížením nejprve mění svůj odpor proti stlačení pomalu a následně strměji, tedy parabolicky. Progresivní pružina má na celé své délce proměnnou rozteč závitů nebo proměnlivý průměr těla – jednotlivých závitů. Progresivní

pružiny mají progresivní nerovnoměrnou změnu tuhosti. V závislosti na zatížení se tuhost nezvyšuje po rovné přímce, jako je tomu u lineární pružiny, ale má různý průběh podle typu pružiny. [6]

Vinuté pružiny můžeme dále dělit podle [7] :

- Podle tvaru: válcové, kuželové, soudečkové, zeštíhlené.
- Podle umístění: svislé, šikmé, vodorovné.
- Podle zapouzdření: zapouzdřené, nezapouzdřené.



Obr. 2: Tvary vinutých pružin.

### 1.2.1 Výrobní proces vinutých pružin

Převážná většina automobilů s pohonem předních kol používá vinuté pružiny. Zvolený postup jejich výroby je podmíněn kvalitou, provedením a cenou. Průmysl vyvíjí potenciálně úsporný proces vinutí za studena, při kterém se věnuje méně času úpravě kovu pružiny při zvýšené teplotě. Obecně existují dva způsoby vinutí pružin – vinutí za tepla a vinutí za studena. [8]

Vinutí za tepla znamená, že materiál pružiny je vinut při teplotě nebo nad teplotou rekrystalizace. Pevnost a únavová odolnost jsou následně kontrolovány vhodným tepelným zpracováním. [8]

Vinutí za studena znamená, že vinutí probíhá při nízké teplotě poté, co byl materiál vytvrzen a popuštěn. Vinutí za studena umožňuje tepelné zpracování při vysoké teplotě na tyčovém materiálu, s nímž se lépe manipuluje než se svinutým konečným produktem. Vzniklá

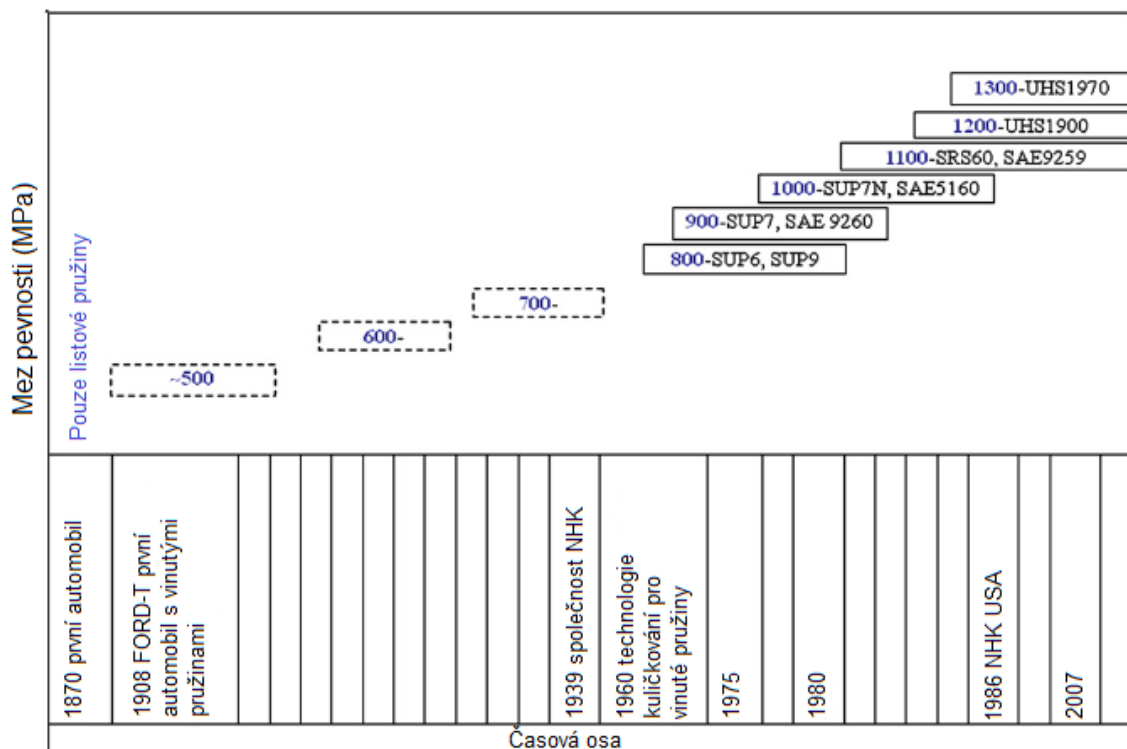
zbytková napětí lze v podstatě eliminovat relativně nízkoteplotním popouštěním, které následuje po vinutí za studena. [8]

V okamžiku vinutí prochází drát pružiny současně ohybem a krutem. Výrazné zbytkové napětí v pružině vinuté za studena je nežádoucí pro svůj nepředvídatelný vliv na únavové a korozní chování. Tato napětí se obvykle získávají rentgenovým měřením povrchového napěťového pole spolu s modelováním vnitřních napětí. Úspěšnost těchto postupů vyžaduje nezávislé ověření skutečného pole zbytkových napětí v průřezu původního drátěného materiálu. Jedinou dostupnou a dobře zavedenou metodou pro tento účel je neutronová difrakce. [8]

### 1.2.2 Materiál vinutých pružin

První automobilová vinutá pružina byla použita v automobilu Ford model T v roce 1910, kde odpružení kombinovalo listové a vinuté pružiny. Nejdříve se používal materiál vinutých pružin s mezí pevnosti přibližně 500 MPa. Materiály vinutých pružin se vyvinuly do té míry, že dnes je běžné mít vinutou pružinu s mezí pevnosti 1 300 až 2 000 MPa. [3]

Obecně platí, že dnes jsou vinuté pružiny vyráběny z uhlíkové oceli SAE 5160, SAE 51420 a SAE 9260. [9]



Obr. 3: Materiály pro vinuté pružiny. [3]

## 2 POVRCHOVÉ ÚPRAVY

Většina poruch konstrukčních materiálů, jako je únavové selhání, třecí únava, opotřebení a koroze, je velmi citlivá na strukturu a povrchové vlastnosti materiálu a většina poruch souvisí s vnější vrstvou dílce. Proto je velmi efektivní použití přístupu, který zlepšuje materiálové vlastnosti povrchu součásti.

Pružiny díky jejich funkci musí odolávat agresivním podmínkám okolního prostředí a musí mít dobrou životnost. Při používání jsou pružiny namáhány jak mechanicky, tak i chemicky. Hlavním problémem je oxidace, která tvoří účinkem kyslíku a vlhkého prostředí hydratovaný oxid železitý neboli rez. Rez na rozdíl od jiných kovů nevytváří souvislou vrstvu a nechrání tak materiál před další korozi. Mezi nejznámější a nejpoužívanější povrchové úpravy patří fosfátování a práškové lakování.

### 2.1 Fosfátování

Fosfátování je známý konverzní proces v současnosti hojně používaný v automobilové výrobě. Je to jeden z nejdůležitějších procesů předúpravy aplikovaný na kovové povrchy. Může být použit jako ochranný prostředek a základní nátěr na lakované materiály. [10]

Fosfátová vrstva na železných a neželezných kovech zlepšuje jejich povrchové vlastnosti změnou fyzikálně-chemických vlastností. Hlavní aplikace fosfátování jsou pro přilnavost nátěrů, k zvýšení odolnosti proti korozi, k impregnaci olejů a k podpoře elektrické izolace. [11]

Přestože se fosfátové vrstvy používají k ochraně proti korozi, samy o sobě nepřinášejí výrazné zlepšení odolnosti kovového substrátu proti korozi a musí být spojeny s dalšími metodami ochrany proti korozi. Procesy fosfátování se vyvíjejí již mnoho let s použitím různých přísad, jako jsou dusitaný, dusičnany, chlorečnany, hydroxylaminy, kyseliny citronové, vápník, nikl a mangan. Tato aditiva se používají jako urychlovače nebo ke zlepšení kvality vlastností fosfátových vrstev. [11]

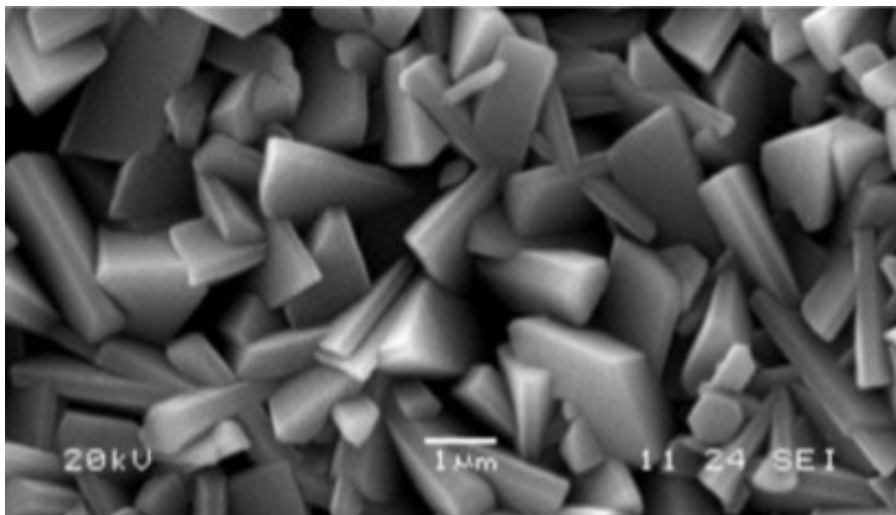
Z těchto urychlovačů se mohou uvolňovat škodlivé plyny (např. oxidy dusíku nebo skleníkové plyny) a vést k mnoha ekologickým problémům. Například u dusitanů – nejoblíbenějšího chemického urychlovače v nízkoteplotních fosfátovacích lázních – bylo prokázáno, že jsou toxické, což potvrdily agentury pro ochranu životního prostředí. [12]

## Druhy fosfátových povrchů

Fosfátové povlaky můžeme dle kovového kationtu fosfatizačního roztoku dělit na manganaté, železnaté, zinečnaté a zinečnato-vápenaté.

### 2.1.1 Manganaté fosfátování

Lázně manganatého fosfátování obsahují dihydrogenfosforečnan manganatý. Lázně produkují na oceli velice tmavý povlak jehlicovitých zrn. Železo a zinek se v huréalitech navzájem zastupují, mluvíme o krystalové diadochii. Huréality krystalují vždy v krystalové soustavě monoklinické. Tyto krystaly jsou jednoznačně nejtvrďší ze všech vylučovaných forem a dosahují tvrdosti 4-4,5 Mohsovy stupnice tvrdosti. Dalším unikátem mezi konverzními fosfáty je jednoznačně nejhorší štěpnost této krystalové skupiny. Lázně manganatého fosfátování pracují při teplotách 70-98 °C a expoziční čas bývá běžně okolo 5-10 minut. Vyloučená plošná hmotnost krystalů bývá větší než 7,5 g/m<sup>2</sup>. Protože struktura vyloučeného fosfátu je tvrdá, používá se tato povrchová technologie při ošetřování ozubených soukolí pro usnadnění jeho záběhu. Využívá se také všude tam, kde je nutné snížit vlečné tření. [13]



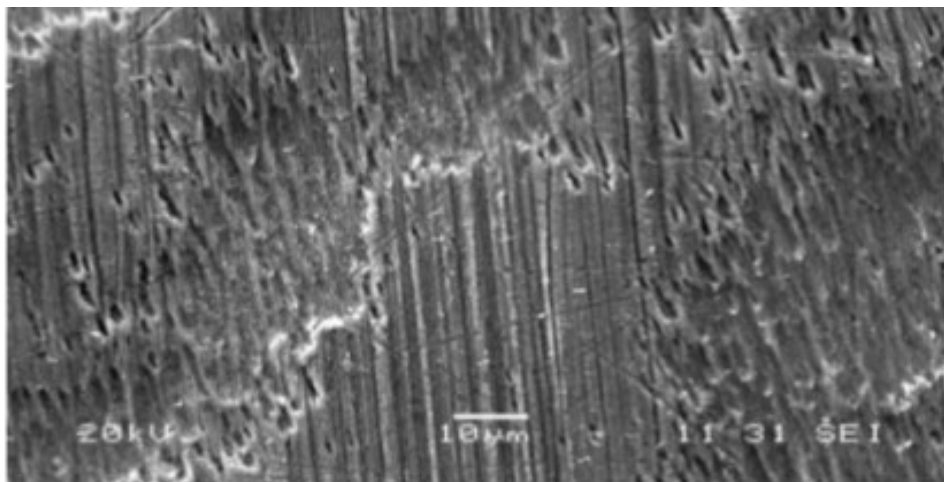
Obr. 4: Mikroskopický snímek hurealitického povlaku. [14]

### 2.1.2 Železnaté fosfátování

Jedná se o netradiční formu fosfátování. Pracovní lázeň tohoto druhu fosfátování nikdy neobsahuje dihydrogenfosforečnan železnatý ale dihydrogenfosforečnan amonný případně dihydrogenfosforečnan sodný. Vyloučená konverzní vrstva je velice tenká a zcela amorfní. Pracovní lázně produkující amorfní fosfátovou vrstvu pracují při teplotách 50-60 °C a doba expozice bývá okolo 1-5 minut. Vyloučené struktury mají plošnou hmotnost mezi



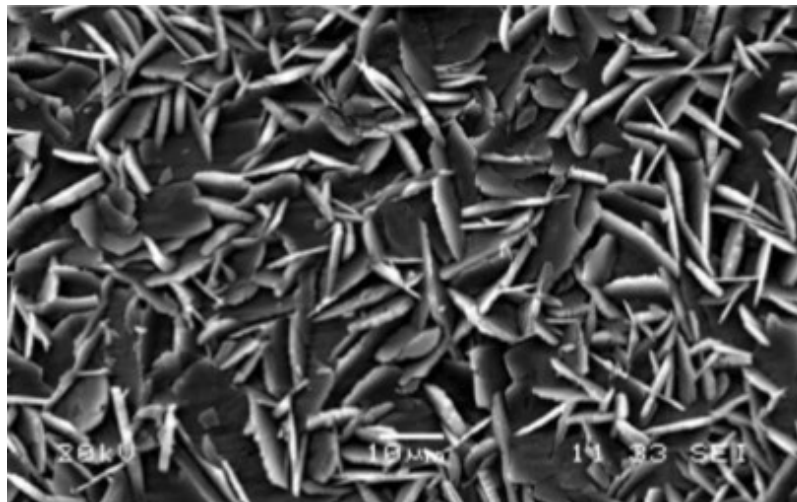
0,1-0,4 g/m<sup>2</sup> lze dosáhnout i parakrystalických vrstev s plošnou hmotností do 1,5 g/m<sup>2</sup>. Proces železnatého fosfátování je velice jednoduchý s minimální průběžnou kontrolou složení pracovní lázně v průběhu procesu. Ovšem vyloučená vrstva je tenká a poskytuje pouze minimální ochranné vlastnosti jako vylepšení přilnavosti nátěru a zesílení korozní ochrany bariérového systému je velice malé. Tato vrstva bývá využívána především jako dočasná mezioperační ochrana proti prvotním náznakům koroze. [13]



*Obr. 5: Mikroskopický snímek amorfního povlaku vytvořený technologií železnatého fosfátování. [14]*

### 2.1.3 Zinečnaté fosfátování

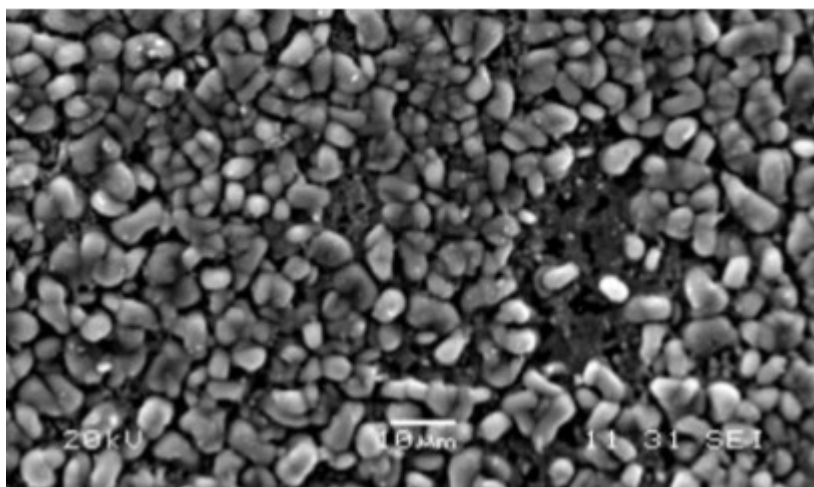
Povlaky zinečnatého fosfátu tvoří nejčastější adhezní vrstvu na oceli, která slouží k dobrému ukotvení organického povlaku. Lázeň obsahuje vždy dihydrogenfosforečnan zinečnatý. Lázně produkují tlustou ryze krystalickou vrstvu zvanou hopeit, který krystaluje v krystalové soustavě ortorombické a má lupenité zrna. Lázně pracují při teplotách 40-70 °C po dobu 3-10 minut. Běžná plošná hmotnost vzniklá touto technologií je 1-10 g/m<sup>2</sup>. Lze vytvořit i silnější povlaky o plošné hmotnosti až 35 g/m<sup>2</sup>. Tento druh fosfátu bývá využíván nejen pod organický povlak, ale také pro usnadnění záběhu točivých součástí, pro usnadnění tažení drátů, či jako dobrá elektroizolační vrstva při výrobě transformátorových plechů. [13]



Obr. 6: Mikroskopický snímek krystalového povlaku vzniklého technologií zinečnatého fosfátování. [14]

#### 2.1.4 Zinečnato-vápenaté fosfátování

Jedná se o velice speciální druh fosfatizační technologie. Složení lázni je definováno podobně jako u fosfátování zinečnatého, ale roztok obsahuje ještě dihydrogenfosforečnan vápenatý. Lázně produkují mimořádně jemné zrna „vejčitého“ tvaru. Minerál toho složení se nazývá scholzit a krystaluje v soustavě kosočtverečné. Scholzit se vylučuje z lázni pracujících při teplotách 50-70 °C po době expozice 5-10 minut. Povlak dosahuje plošné hmotnosti 1-4,5 g/m<sup>2</sup>. Tento druh fosfátového povlaku je velice vhodný pro ukotvení nátěrového systému a samozřejmě vylepšuje protikorozi vlastnosti, v oblasti aplikace je vhodnou alternativou k hopeitickému povlaku. Jemný scholzitický povlak našel také speciální uplatnění při ukotvování složitých spojů guma + vulkanizovaný kaučuk. [13]



Obr. 7: Mikroskopický snímek krystalového povlaku vzniklého technologií zinečnato-vápenatého fosfátování. [14]

### 2.1.5 Technologický postup

Obecně se fosfátování skládá ze sedmi operací, jak je uvedeno na obrázku níže. Nicméně, v závislosti na povrchových podmínkách kovu, mohou být některé z těchto operací vynechány nebo mohou být do postupu zařazeny další operace. Typický sedmistupňový postup fosfátové předúpravy je uveden na obrázku níže. [15]



Obr. 8: Technologický postup fosfátování. [15]

#### 1. Čištění

Pravděpodobně nejdůležitějším předpokladem pro správnou tvorbu povlaku je čistý podklad, zbavený nečistot, jako jsou oleje, tuky, vosky, korozní produkty a další nečistoty. Mnoho vad povlaku lze přičíst špatné přípravě povrchu kovu. Ideální čisticí prostředek je takový, který je schopen odstranit všechny kontaminanty z povrchu kovu a zabraňuje jejich opětovnému usazování nebo vzniku dalších škodlivých reakčních produktů. K tomu slouží řada metod, jako například pískování, odmašťování rozpouštědlem, odpařování nebo čištění vodou. [15]

K odstranění organických nečistot z kovových substrátů se hojně používají organická rozpouštědla. Jsou však toxická a hořlavá a musí se používat ve velkém množství, což je neekonomické. To vedlo k jejich nahrazení technikou parního odmašťování. Jedinečnou výhodou této techniky oproti odmašťování rozpouštědlem je, že je možné průběžné čištění malým množstvím rozpouštědla. [15]

Dalším typem čištění je alkalické čištění, které představuje ekonomickou a účinnou alternativu k používání organických rozpouštědel k odstraňování tuků, olejů a vosků. Alkalické čisticí prostředky jsou obzvláště účinné při použití za tepla (cca 79 °C). Při alkalickém čištění sice nehrozí nebezpečí požáru a toxicity spojené s čištěním organickými rozpouštědly (pokud nejsou použita emulgovaná rozpouštědla), je však třeba se vyvarovat korozivních účinků alkalických materiálů na kůži a na běžný oděv. [15]

Čištění kyselinou nebo moření pomocí kyselin, jako jsou např. HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> je taky velmi účinná metoda odstranění rzi a okují. Zředěné roztoky se

používají v přítomnosti inhibitorů k odstranění anorganických kontaminantů jejich přeměnou na železité soli. Moření pomocí  $H_2SO_4$  se obvykle provádí při vyšších teplotách, zhruba  $60\text{ }^\circ\text{C}$  a je vynikajícím čistícím prostředkem, který nejen odstraňuje organické a anorganické pevné látky přítomné na povrchu, ale také způsobuje chemické leptání kovu. Alternativou chemického moření je elektrolytické moření, které zajišťuje lepší a rychlejší čištění díky zvýšenému vývinu vodíku. [15]

## 2. Oplach

Oplachování a následné čištění hraje zásadní roli ve fosfátovací sekvenci. Oplachování zabraňuje vytahování chemikálií použitých při předchozím čištění, které mohou kontaminovat následující fáze. [15]

## 3. Fosfátování

Vhodně vyčištěné povrchy se dále podrobí fosfátování, které způsobí vytvoření nerozpustné fosfátové vrstvy odolné proti korozi na povrchu substrátu. K dispozici je široká škála fosfátovacích složek. Správná volba složek a provozních podmínek fosfátovací lázně se však provádí na základě povahy ošetřovaného materiálu a jeho konečného použití. Všechny fosfátovací kompozice jsou v podstatě zředěné roztoky na bázi kyseliny fosforečné, které kromě vhodných urychlovačů obsahují ionty alkalických/těžkých kovů. Na základě povahy kovového iontu, který tvoří hlavní složku fosfátových roztoků, se tyto kompozice dělí na zinečnaté, manganové a železité fosfátovací lázně. [15]

Depozice fosfátů lze dosáhnout pomocí postřiku nebo ponoření a volba vhodné metody závisí na velikosti a tvaru substrátu a na konečném použití, pro které je povlak určen. Fosfátování lze provádět při teplotách v rozmezí  $30\text{-}99\text{ }^\circ\text{C}$  a doba zpracování se pohybuje od několika sekund do několika minut. Vhodná volba těchto parametrů je dána faktory, jako je povaha pokovovaného kovu, tloušťka a hmotnost požadovaného povlaku a složení lázně. [15]

## 4. Oplach po fosfátování

Povrch, který byl podroben fosfátování, je třeba důkladně opláchnout deionizovanou vodou, aby se odstranily zbytky kyselin, rozpustných solí a nečistot, které by na něm jinak mohly způsobit tvorbu puchýřů na nátěrových vrstvách. Obecně se upřednostňuje oplachování přepadem a oplachování rozprašováním. [15]

## 5. Pasivace

Fosfátové povlaky jsou obvykle porézní. Pórovitost má nepříznivý vliv na korozní odolnost fosfátových povlaků. Z tohoto důvodu se používá horká (70-80 °C) zředěná kyselina chromová, která pórovitosti povlaku zamezí. Toto ošetření snižuje pórovitost přibližně o 50 %. Zlepšuje odolnost proti korozi usazováním nerozpustných chromanů na obnažených místech povlaku. Kromě výhod plynoucích z vysrážení nerozpustných solí a pasivace všech kovů, které by mohly být vystaveny, je ošetření zředěnou kyselinou chromovou výhodné v tom, že pomáhá rozpouštět vyčnívající krystaly fosfátového povlaku. Kromě toho po ošetření kyselinou chromovou zůstává mírně kyselý zbytek, který je pro většinu nátěrových hmot ideální. [15]

## 6. Sušení

Po opláchnutí kyselinou chromovou se díly musí před konečnou úpravou vysušit. K tomu se používají konvenční metody jako odpařování, nucené sušení vyfukovaným vzduchem nebo zahříváním. Pokud jsou podmínky odpařování dobré, sušení ventilátory s cirkulací teplého vzduchu nebo stlačeným vzduchem jsou nejhospodárnějšími metodami. Po vysušení jsou fosfátované výrobky připraveny k aplikaci dalších povrchových úprav, jako jsou barvy, oleje a laky. [15]



Obr. 9: Obrobky s povlakem fosforečnanu manganu a bez něj. [16]

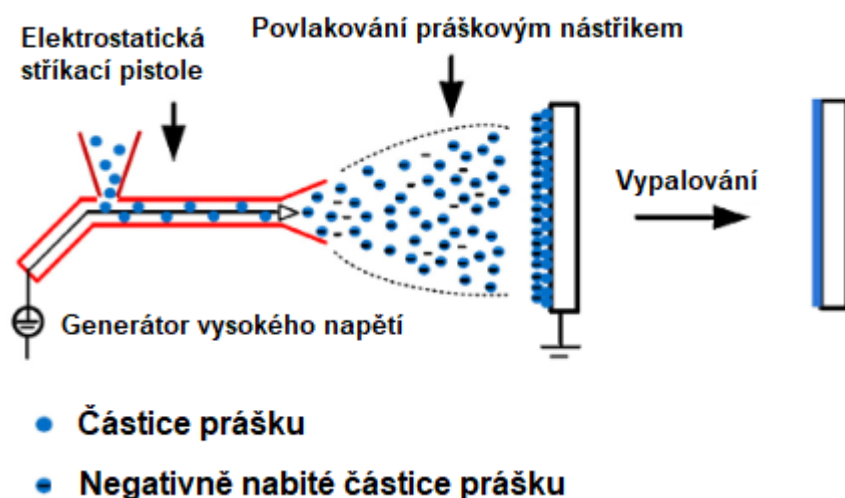
## 2.2 Práškové lakování

Základním principem práškového lakování je nanášení prášku na povrch dílce, po kterém následuje vytvrzení v peci. V prášku jsou obsaženy pryskyřice, aditiva, pigmenty či tvrdidla a vytváří se suchá prášková konzistence. Při práškovém lakování se využívá stlačený vzduch, který se mísí s práškem a vytváří tekutou směs. Aby došlo k ulpění prášku na dílci,

dá se mu v aplikačním zařízení elektrostatická energie. Ta využívá fyzikálního jevu, kdy se opačně nabitě částice vzájemně přitahují. [17]

Koncept elektrostatického práškového lakování vznikl v USA v 50. letech minulého století. Od počátku 60. let však započal vývoj i v Evropě, konkrétně v práškové formulaci, výrobě a aplikačních technikách. V této době se v USA používaly prášky epoxidové, které měly uplatnění hlavně jako odolné povlakování potrubí a dalších venkovních struktur. V Evropě byl vývoj práškových nátěrových hmot pro dekorativní a trvanlivostní účely. [18]

Elektrostatické práškové lakování bylo poprvé představeno v průmyslu povrchových úprav v Británii v roce 1962. Doplněovalo stávající elektrostatické lakování, ale nabízelo důležité výhody, zejména to, že proces práškového lakování nevyužívalo rozpouštědla, a tak bylo atraktivní z hlediska ochrany životního prostředí, neboť přestříkaný prášek mohl být v zásadě shromažďován a recyklován, takže využití produktu se mohlo přiblížit 100 %. [18] K výhodám práškového lakování patří nejen ekonomická a ekologická šetrnost, ale i vynikající vnější trvanlivost, odolnost vůči nárazům, poškrábání a chemická odolnost. [19]



Obr. 10: Proces elektrostatického práškového lakování. [19]

### 2.2.1 Parametry prášku

#### Fluidita prášku

Všechny pistole na nanášení práškových barev vyžadují plynulou dodávku prášku rychlostí několika gramů za sekundu. Fluidita prášku je kriticky důležitá, protože i malé změny v disperzi a toku mění konečné vlastnosti práškového filmu. U některých prášků, zejména u těch, které obsahují vysoký podíl jemných částic, může být proudění vzduchu přes prášek nedostatečné, a proto je třeba navíc použít vibrace nebo míchání. Povrch částic prášku může

být také chemicky ošetřen, aby se podpořila fluidizace. Důležité je si uvědomit, že různé prášky s velmi podobnou velikostí částic mají zcela odlišné tokové vlastnosti, které lze přičíst rozdílné povrchové úpravě částic. [18]

### **Tvar a velikost částic**

Všechny práškové barvy se skládají z částic různých tvarů a velikostí, a tak mohou být charakterizovány distribucí velikosti částic. V literatuře se o významu tvaru částic prášku nehovoří, obvykle se předpokládá, že částice jsou přibližně kulového tvaru. Nicméně jak jsou částice přenášeny z práškovací pistole vzduchem, trajektorie částic se řídí aerodynamickými silami, které závisí na aerodynamickém průměru částic. Účinnost přenosu prášku a kvalita výsledného povlaku závisí v rozhodující míře na středním průměru velikosti částic prášku. Průměrná velikost částic je přibližně 30-40  $\mu\text{m}$ . Konzistence a rovnoměrnost vrstvy práškového povlaku bývá tím lepší, čím menší jsou velikosti částic a čím více se šířka distribuce zužuje. [18]

### **Odpor částic**

V praxi bylo zjištěno, že vodivé částice mají tendenci se při průchodu korónovým výbojem nabíjet více. Pokud je ale vodivost příliš vysoká, částice při kontaktu s uzemněným materiálem rychle ztrácejí náboj a mohou se tak oddělit od povrchu. [18]

Většina prášků používaných při elektrostatickém práškovém lakování mají hodnoty odporu vyšší než  $10^{10} \Omega\text{m}$ . Nižší hodnoty odporu mohou vést k rychlejšímu rozptylu náboje a ztrátě elektrostatických sil, které spojují částice s podkladem. Vyšší hodnoty odporu umožňují akumulaci náboje s pomalým rozptylem náboje, což usnadňuje přilnavost k podkladu během procesu vytvrzování. Velmi vysoká rezistivita však může vést k vysoké akumulaci náboje a zpětné ionizaci, to často vede k samovolnému omezení tloušťky vrstvy. [20]

### **2.2.2 Druhy prášku**

Existují dva hlavní systémy nátěrů – termoplastické a termosetové. Termosetové práškové nátěrové hmoty se skládají z termosetové pryskyřice, tvrdidla, pigmentu, plniva a přísad. Termoplastické práškové nátěrové hmoty se vyrábějí z termoplastické pryskyřice, pigmentu, plniva, změkčovadla a stabilizátoru. [17]

Mezi termosetové nátěry patří epoxidová pryskyřice, polyesterová pryskyřice a akrylová pryskyřice spolu s různými tvrdidly. Práškové nátěry z epoxidové pryskyřice mají vynikající

vlastnosti, jako je odolnost proti korozi, tvrdost, pružnost a rázová houževnatost. Díky polyesterové pryskyřici s polárními skupinami má prášková barva z polyesterové pryskyřice vysoký lesk, dobrou tekutost a dobré dekorativní vlastnosti. Práškový nátěr z akrylové pryskyřice má výhody dobré odolnosti proti povětrnostním vlivům a zachování barvy, odolnost proti znečištění, silnou přilnavost ke kovu, vynikající vzhled filmu a je vhodný pro dekorativní práškové lakování. [17]

Termoplastické povlaky jsou obvykle polyethylen, polyamid, polyvinylchlorid a polyvinylidenfluorid. Polyethylenový práškový povlak má vynikající odolnost proti korozi, výbornou elektrickou izolaci a odolává ultrafialovému záření. Polyamidový práškový povlak má výhody vysoké mechanické pevnosti, odolnosti proti nárazu a tvrdost. Polyvinylchloridový práškový nátěr má vynikající odolnost proti rozpouštědlům, dobrou odolnost proti korozi, nárazu, solné mlze a vysokou izolační pevnost elektrostatičkého nástřiku. Polytrifluorovinylchlorid je levný, má lepší odolnost proti korozi než kyselinovzdornost, odolnost proti korozi kyselinou chlorovodíkovou, zředěnou kyselinou sírovou, chlorovodíkem a chlorem. [17]

### 2.2.3 Technologický postup

#### Předúprava povrchu

Předúprava povrchu je důležitá ve všech případech práškového lakování, aby se zajistily dlouhodobé výsledky. Předběžná úprava má zásadní význam pro konzistenci a je stejně důležitá pro účinnost hotového práškově lakovaného výrobku jako materiály použité při jeho výrobě, konstrukci a podmínkách, v nichž se používá. Předúprava povrchu zahrnuje čištění, které může být provedeno dvěma způsoby: [21]

- Mechanicky – Skládá se z technik, jako je například kartáčování a pískování. Odstraňuje nejen povrchové nečistoty, ale také praskliny a povrchové vady abrazivním působením. Mechanický způsob čištění je velmi účinný, ale nátěr musí být proveden okamžitě, protože očištěný povrch je ve vysoce reaktivním stavu a velmi rychle dochází ke korozi. [21]
- Chemicky – Chemické čištění zahrnuje odstranění prachu, oleje, mastnoty a oxidačních chemikálií z povrchu. Chemikálie mohou být stírány, stříkány nebo máčeny. Obecně se chemická předúprava provádí za účelem odstranění prachu, aby se zabránilo korozi a zajistila se dobrá přilnavost pro práškové lakování. [21]

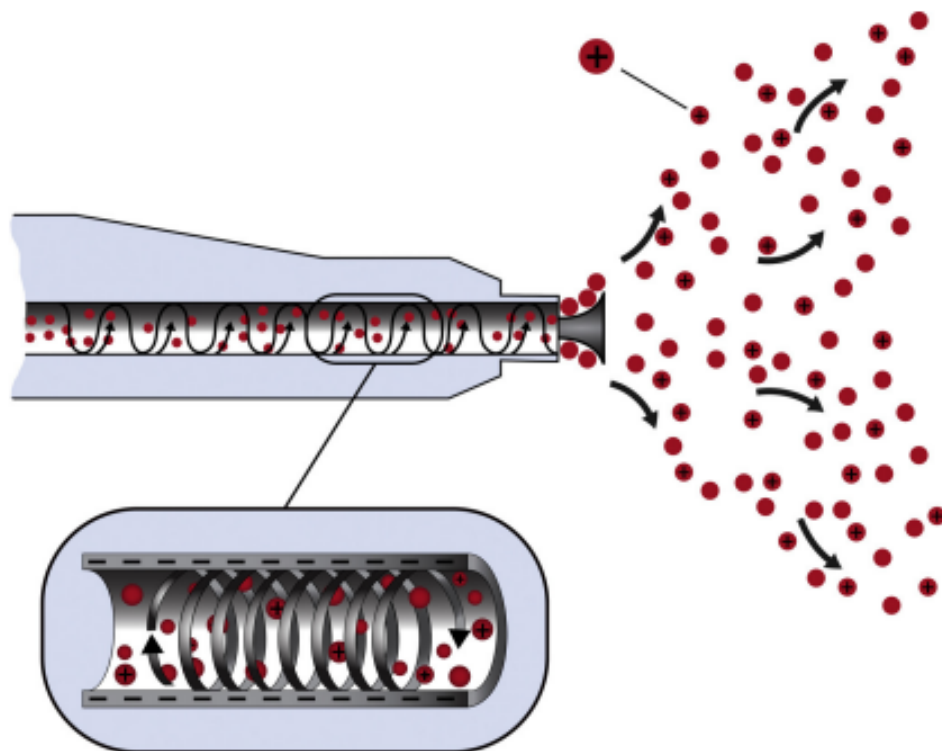


## Práškové lakování

Částice mohou být nabity dvěma mechanismy:

- Elektrostaticky – korónové nabíjení
- Elektrokinematicky – triboelektrické nabíjení

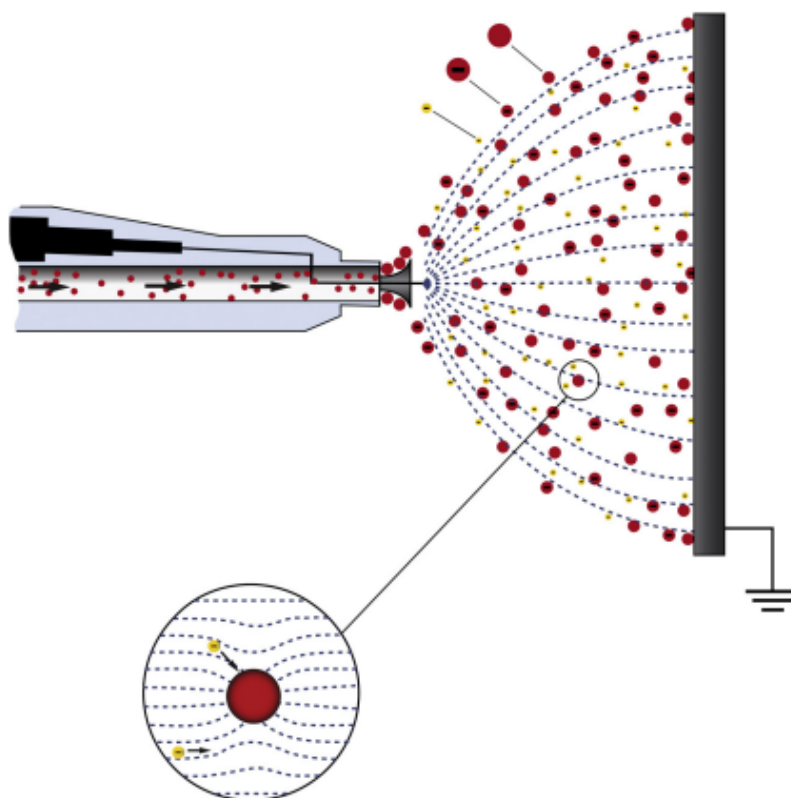
Triboelektrické nabíjení popisuje akumulaci náboje v důsledku tření. Slovo "tribo-" pochází z řečtiny a znamená "k tření". Tento mechanismus nabíjení je výsledkem kontaktu nebo tření dvou různorodých povrchů, přenosu elektronů z jednoho povrchu na druhý a následného oddělení obou povrchů, což vede k opačně nabitým povrchům nebo oddělení nábojů. Triboelektrické pistole jsou navrženy tak, aby umožnily maximální interakci částic se stěnou pistole a tím zvyšují akumulaci náboje ve fluidní směsi částic. Stěna pistole se obvykle skládá z PTFE, který má tendenci se negativně nabíjet, což vede k tvorbě částic, které jsou nabitě kladně. Triboelektrické nabíjení je silně ovlivněn mnoha faktory, včetně podmínek prostředí (relativní vlhkost, teplota), počtu srážek a doby trvání kontaktu a vlastností částic, jako je elektrický odpor a drsnost povrchu. [20]



Obr. 11: Schéma triboelektrické pistole. [20]

Nabíjení korónou popisuje nabíjení částic průchodem elektrickým polem za přítomnosti volných iontů, také se označuje jako korónový výboj. Korónový výboj je proces, při kterém proud teče, obvykle plynem, z místa s vysokou hladinou k neutrálnímu nebo uzemněnému

substrátu, přičemž vznikají volné ionty v blízkosti oblasti vysokého potenciálu. Zdroj korónového výboje, jako je korónová pistole, se skládá z elektrody, obvykle vysoce zakřivené tyče nebo drátu o malém průměru, který vytváří elektrodu co největšího potenciálového gradientu a vysokého napětí (obvykle 60-100 kV), které slouží k odpojování elektronů z molekul okolního plynu, aby bylo možné dosáhnout vzniku volných iontů. V oblasti mezi emitující elektrodou s vysokým potenciálem a uzemněným substrátem vzniká silné elektrické pole, které usnadňuje výboj. [20]



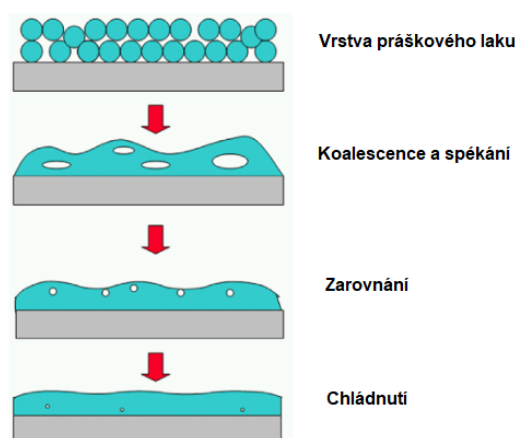
Obr. 12: Schéma korónové pistole. [20]

Částice se mohou v přítomnosti volných iontů nabíjet dvěma způsoby: polním nabíjením a difuzním nabíjením. Vložení částice do elektrického pole dojde ke změně pole, což má za následek, že volné ionty jsou směřovány k částici a jsou jí absorbovány. To se označuje jako nabíjení polem. Difuzní nabíjení je vyvoláno srážkami mezi ionty a částicemi v důsledku náhodného pohybu iontů v plynu. K difuznímu nabíjení dochází spíše v nepřítomnosti elektrického pole a obvykle u velmi malých částic (menší než 0,2 mm). Vzhledem k silnému elektrickému poli vytvářenému korónovým výbojem a doporučenému rozsahu velikosti částic (1-100 mm) pro použití s korónovými pistolemi, je nabíjení polem převládajícím způsobem nabíjení pro elektrostatické nanášení povlaků pomocí korónového nabíjení. [20]

## Vypalování

Vypalování je proces, při kterém dochází ke spékání polymerních částic a vytvoření ochranné vrstvy laku.

U termoplastických polymerů dochází k deformaci částic při teplotách tání polymeru nebo vyšších, kdy materiál přechází z pevného skupenství na kapalné, nebo nad teplotou skelného přechodu polymeru, kdy dochází ke zvýšené molekulární pohyblivosti pevného skupenství. Většina polymerů používaných pro procesy nanášení povlaků je syntetická nebo polysyntetická a jedná se o relativně velké molekulární struktury, které mají spíše polykrystalickou nebo amorfni povahu. Při zpracování nad teplotou skelného přechodu nátěrového materiálu je povrch více "tekutý" a náchylnější k plastické deformaci. V závislosti na rozdílu mezi teplotou skelného přechodu a teplotou zpracování se může viskozita nátěrového materiálu snížit natolik, že dojde k vytvoření kapilárních sil, které napomáhají přilnutí prášku k povrchu. Za takových podmínek mohou rozdíly povrchové energie napomáhat roztírání polotaveného polymeru a zvyšovat tak účinnost povlakování. Aplikace suchého práškového povlakování se rovněž spoléhají na mechanické zhutňování, ke kterému přirozeně dochází během procesu, aby se usnadnila adheze a koalescence. Během tohoto procesu dochází vlivem namáhání povlakové vrstvy ke konsolidaci lože a k deformaci způsobené šířením přes rozhraní. Pokud povlaky vykazují plastické chování, je deformace nevratná a mechanické zhutnění vede k větší přilnavosti povrchové vrstvy v důsledku větší plochy pro kontakt mezi substrátem a povlakem a také k možnému mechanickému propojení materiálů. Za účelem snížení teploty zpracování práškového povlaku a zkrácení vytvrzovacích fází se polymery, které vykazují příliš vysokou  $T_g > 60\text{ }^\circ\text{C}$ , kombinují s plastifikátory schopnými snížit  $T_g$  práškových povlaků. [22]



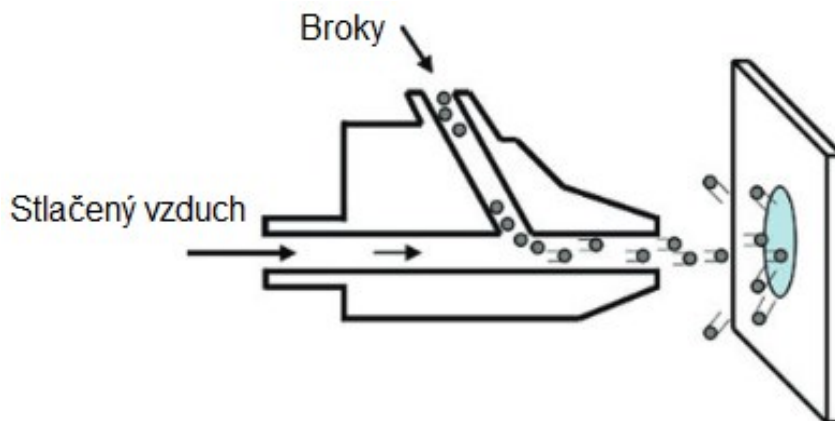
Obr. 13: Proces vypalování. [22]

### 2.3 Abrazivní povrchová úprava – kuličkování

Kuličkování je proces tváření povrchové vrstvy za studena otryskáváním dostatečně tvrdými kulovitými částicemi neboli broky. Zpevňování povrchu kuličkováním se jako proces povrchové úpravy často používá ke zvýšení únavové životnosti kovových součástí. Tato metoda je známá i pod názvem brokování nebo balotínování. [23]

Každý brok zasahující materiál vytváří na povrchu malý důlek. Překrývající se důlky tvoří rovnoměrnou vrstvu zbytkového tlakového napětí na povrchu. Je dobře známo, že únavové vlastnosti materiálů jsou velmi citlivé jak na velikost zrn materiálu, tak na zbytková napětí. Malá velikost zrn může účinně zvýšit práh iniciace únavové trhliny. Naopak hrubá zrna mohou vychýlit dráhy šíření únavových trhlin hranicemi zrn a tím uzavřít trhliny a snížit rychlost jejich růstu. Jelikož většina únavových trhlin vzniká na povrchu a šíří se směrem do materiálu, očekává se, že součást s nanostrukturovanou povrchovou vrstvou a hrubozrnným vnitřkem bude mít vysoce zlepšené únavové vlastnosti, protože iniciaci i šíření únavových trhlin brání jemná zrna u povrchu, respektive hrubozrnná uvnitř. Kromě toho mohou zbytková tlaková napětí vzniklá během procesu plastické deformace také účinně zastavit nebo zpomalit iniciaci a šíření únavových trhlin a tím značně prodloužit životnost, protože téměř všechny poruchy způsobené únavou a korozi se vyskytují na povrchu součásti. [23]

Kuličkování je výhodné nejen pro zvýšení odolnosti proti únavovým poruchám, ale také korozi, koroznímu praskání, praskání za pomoci vodíku, třepení, zadírání a erozi způsobené kavitací. Mezi výhody získané v důsledku kuličkování za studena patří pracovní zpevnění, mezikrystalická odolnost proti korozi, strukturování povrchu, uzavírání pórovitosti a testování vazby povlaků. [23]



Obr. 14: Schéma kuličkování. [23]

### 3 PRŮMYSL 4.0

Průmysl je část ekonomiky, která vyrábí hmotné statky, jež jsou vysoce mechanizované a automatizované. Od počátku industrializace vedly technologické pokroky ke změnám paradigmat, které jsou dnes nazývány "průmyslové revoluce". Rozlišujeme:

1. průmyslové revoluce – v oblasti mechanizace.
2. průmyslové revoluce – v oblasti intenzivní využívání elektrické energie.
3. průmyslová revoluce – v oblasti digitalizace. [24]

Na počátku 21. století je svět svědkem čtvrté průmyslové revoluce a digitální transformace podnikatelského světa, která se běžně označuje jako Průmysl 4.0. Od zveřejnění termínu "Průmysl 4.0" v roce 2011 digitální transformace, kterou Průmysl 4.0 vyžaduje, okamžitě upoutala pozornost průmyslníků a vlád po celém světě. Od první průmyslové revoluce v 18. století se svět potýká s výzvou vyrábět více zboží z omezených a vyčerpávajících se přírodních zdrojů, aby uspokojil neustále rostoucí poptávku po spotřebě a zároveň omezit negativní dopady na životní prostředí a společnost. [25]

#### 3.1 Robotika

Robotika je vědní a technický obor zabývající se problematikou mechanické analýzy, konstrukce, řízení, měření, aplikací a údržby robotů. Roboti se dnes hojně využívají ve vědeckém výzkumu, výrobních technologiích, stavebnictví, dopravě a zemědělství, ale také v medicíně, při podvodním výzkumu a výzkumu vesmíru. [26]

V poslední době jsme svědky rychlého rozvoje průmyslových robotů používaných ve strojírenském a elektromechanickém průmyslu při operacích, jako je svařování, lakování a montáž, a také u lisů a dokončovacích obráběcích strojů, jako jsou brusky a leštičky. Hlavním účelem používání robotů je zvýšit kvalitu práce a zbavit obsluhu těžké nebo namáhavé práce, a zejména nebezpečných úkolů. Největším odběratelem průmyslových robotů je stále automobilový průmysl, ale významným zákazníkem je také elektrotechnický a elektronický průmysl a v poslední době roste poptávka po robotech ze sektoru služeb. [26]

Počet vyrobených a instalovaných robotů stále roste. Zvyšuje se také úroveň složitosti těchto strojů, zejména pokud jde o umělou inteligenci, snímání a vidění. [26]

### 3.2 Rozdělení robotů

Robotická manipulační zařízení lze klasifikovat podle různých kritérií, jako je počet stupňů volnosti, struktura pohybu, druh pohonu, geometrie pracovního prostoru, charakteristika pohybu a metody řízení a programování. Historicky první klasifikace byly založeny na formulaci definic robotů a zpočátku se zaměřovaly na rozdíly v řízení a programování mezi manipulátory a roboty. [27]

- Manipulátor
- Synchronní manipulátor (člověk ve smyčce, man online, master – slave manipulátor)
- Robot (manipulátor s flexibilním programem)
- Adaptivní robot (robot reagující na změny pracoviště)
- Kognitivní robot (robot s určitým stupněm umělé inteligence)

Klasifikace robotů je založena na těchto kritériích:

#### 1. Počet stupňů volnosti:

- Univerzální roboti – mají šest stupňů volnosti a jasně definují polohu a orientaci manipulovaného objektu v kartézském souřadném systému.
- Redundantní roboti – mají více než šest stupňů volnosti a využívají je k vyhýbání se překážkám a pohybu v omezeném prostoru.
- Deficitní roboti – mají méně než šest stupňů volnosti (některé Scara roboty).

#### 2. Podle kinematické struktury:

- Sériové – manipulátory s otevřenými kinematickými řetězci.
- Paralelní – manipulátory s uzavřenými kinematickými řetězci.
- Hybridní – kombinující oba typy řetězců.

#### 3. Podle druhu pohonů:

- Elektrické
- Hydraulické
- Pneumatické

V současné době v konstrukci PRaM převažují elektrické pohony. Hydraulické pohony se používají tam, kde je vyžadována vysoká nosnost a pneumatické pohony pro vyšší rychlosti.

4. Podle vykonávaných činností a oblastí nasazení:

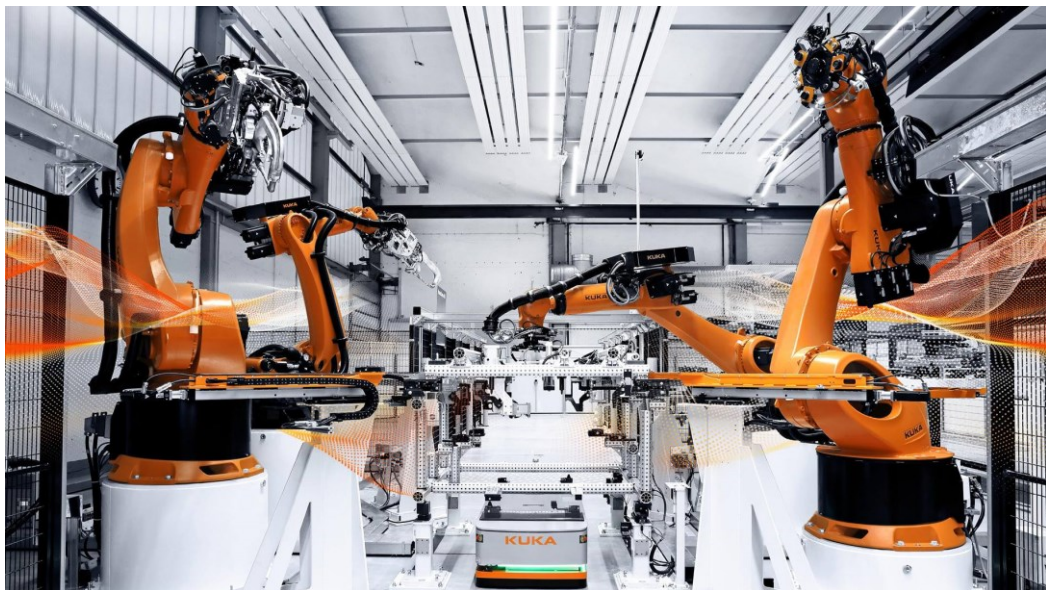
- Průmyslové – používají se při činnostech spojených s výrobou různých produktů.
- Servisní – používají se při obslužných činnostech, buď humánních (zdravotnictví, domácí práce), v průmyslu nebo službách (stavebnictví, hlídání objektů, údržba).

5. Podle geometrie pracovního prostoru:

- Kartézské
- Cylindrické
- Sférické
- Angulární
- Scara

6. Podle kompaktnosti konstrukce a funkční autonomnosti pohybových jednotek robotů:

- Univerzální
- Modulární



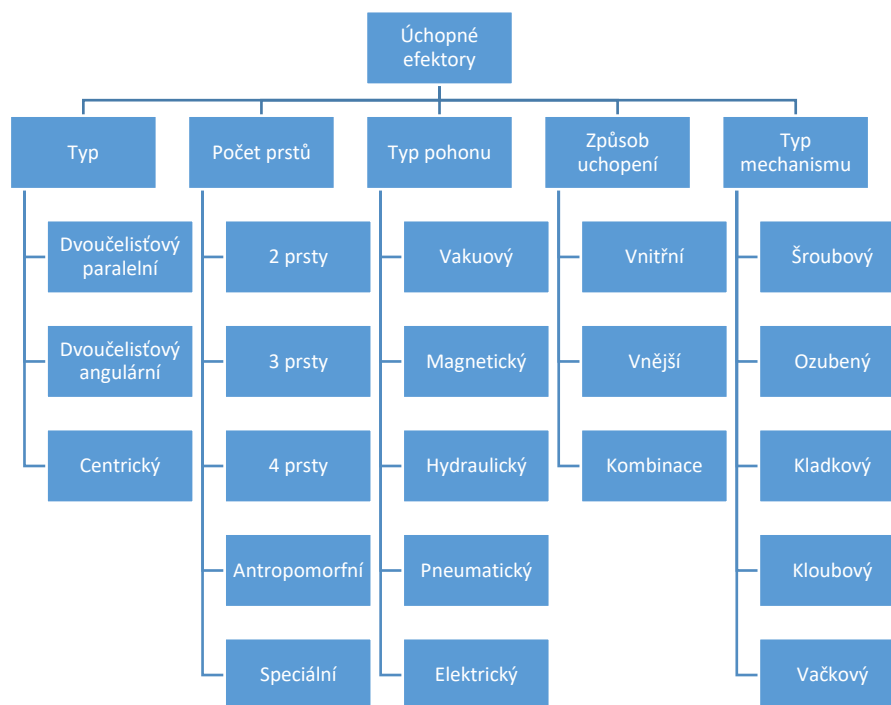
*Obr. 15: Průmysloví roboti.*

### 3.3 Koncové efekторы

Robotické manipulátory se hojně využívají jako pomocníci při nebezpečných, monotónních a únavných pracích. Většina z robotických manipulátorů je navržena a konstruována tak, aby maximalizovala tuhost ve snaze minimalizovat vibrace koncového efektoru a dosáhnout tak dobré přesnosti polohy [28].

#### 3.3.1 Klasifikace podle druhu efektoru

Robotický manipulátor může být vybaven různými typy koncových efektorů, které umožňují provádět různé činnosti. Účelem efektoru je realizace úkolu, pro které je robot předurčen, to znamená manipulace různými objekty se zadanými parametry polohy, orientace, vzdálenosti, rychlosti a zrychlením. Podle toho, o jaké manipulace se jedná a kde jsou použity, se efekторы dělí na uchopovací a technologické, popřípadě hybridní. V případě technologických efektorů se jedná většinou o přímou nebo zprostředkovanou manipulaci technologickými nástroji, které zajišťují například obrábění, svařování, stříkání a montáž [27]. Uchopovací efekторы jsou jedním z nejčastěji používaných koncových efektorů manipulátorů. V závislosti na dané aplikaci jsou zapotřebí různé typy úchopových hlavic. Důležitými faktory při volbě správného efektoru jsou rychlost manipulace, tvar objektu nebo hmotnost. Při návrhu robotického pracoviště proto musíme dbát na tyto aspekty a podle nich volit správný efektor [29].



Obr. 16: Rozdělení úchopných efektorů. [30]



### **Robotické chapadlo s 2 prsty**

Chapadla s 2 prsty se považují za základní nevhodnější úchopné efektory robotů, protože se snadno používají a vyrábějí, jsou cenově efektivní, hospodárné a jsou vhodné pro řadu průmyslových aplikací. Roboti s tímto chapadlem mají schopnost vykonávat různé úlohy, jako je montáž, kompletace a umístění a jednoduché manipulace [29].

### **Robotická chapadla se 3 prsty**

Tento typ chapadla není tak běžně používaný jako dvouprstý typ. Ve většině aplikací je dvouprsté chapadlo pro provedení úkolu dostatečně dobré. Avšak potřeba větší přesnosti a preciznosti při uchopování citlivých a křehkých předmětů vede k tomu, že je rozumné použít tříprstá chapadla i přes jejich vyšší výrobní cenu a větší složitost [29].

### **Víceprstá a adaptivní chapadla**

Tato relativně nová konstrukce umožňuje robotům uchopit širokou škálu výrobků, se kterými dříve nebylo možné spolehlivě manipulovat. Tato chapadla mohou poskytovat zpětnou vazbu síly do řídicí jednotky a mohou také uchopovat nepravidelně tvarované, měkké nebo kulovité předměty [29].

### **Pružná chapadla plněná zrny**

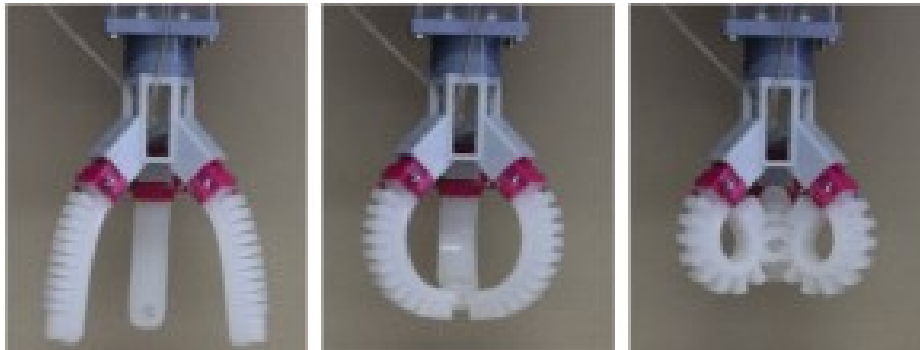
Tento typ chapadla má balónek naplněný zrny nebo sypkým materiálem. Při uchopení předmětu se z balónku vysaje vzduch a tvar chapadla se změní tak, aby odpovídal tvaru předmětu. Toto chapadlo je inspirováno způsobem, jakým chameleon loví hmyz. Toto chapadlo s pomocí tvarového přizpůsobení má schopnost uchopit několik předmětů různého tvaru v jednom úchopu [29].



*Obr. 17: Pružné chapadlo. [29]*

### Měkká chapadla

Měkká chapadla by se dala zařadit mezi speciální typy koncových efektorů. Na rozdíl od pevných uchopovačů jsou tato chapadla vyrobena z měkkých a pružných materiálů, díky čemuž mohou uchopit nebo manipulovat s větším množstvím různých objektů. Díky své povaze jsou bezpečné pro kontakt s lidmi, protože eliminují nebezpečí poškození během provozu. Proto se měkké koncové efekторы často využívají u lékařských robotů, kde je vyžadován měkký a jemný pohyb. Mezi výhody těchto chapadel patří flexibilita a snadnost se přizpůsobit různým prostředím a manipulace s křehkými předměty [29] [31].



Obr. 18: Měkký uchopovač. [32]

#### 3.3.2 Klasifikace podle typu pohonu

Pro různé druhy uchopovačů se používají různé typy pohonů. U pevných koncových efektorů se používají pohony pneumatické, hydraulické, vakuové a elektrické. Elektricky a pneumaticky poháněná chapadla pokrývají širokou škálu manipulačních úloh, zatímco hydraulické pohony se používají převážně pro chapadla manipulující s vysokými zatíženími. Pro měkké uchopovače se využívají pohony, díky nimž se přizpůsobují objektům různých tvarů, materiálů a tuhosti. Mezi tyto pohony se řadí například pohon slitiny s tvarovou pamětí, kabelový pohon nebo pohon založený na elektroaktivním polymeru [29] [31].

#### Pneumatický pohon

Pneumatický pohon je nejoblíbenějším typem ovládní používaný v robotice pro uchopení různých předmětů pomocí přetlaku. Pneumatický pohon vyniká jednoduchostí a dlouhou životností, kvalitní tlak vzduchu je pro něj obvykle k dispozici v prostředí výrobních dílen. Pneumatika umožňuje kompaktní uložení pohonného prvku. Tento typ pohonu je chráněn proti přetížení tlakem stlačitelného vzduchu. Pneumaticky poháněné uchopovače jsou schopny zvládat extrémní podmínky. Tyto pohony navíc spolehlivě pracují v silných

elektrických nebo magnetických polích. Další výhodou je rychlá doba otevření a zavření čelisti. Ve srovnání s jinými typy pohonů mají pneumatické pohony velmi nízké primární náklady a šetří náklady na energii, mají vysoké uchopovací síly a jsou nevybušné. Nastavitelnost pneumatických pohonů je ve srovnání s jinými typy pohonů velmi omezená. Odpadní vzduch, který je odváděn přímo z chapadla, je třeba upravovat odděleně pro speciální aplikace v čistých prostorách nebo v prostředí s přísnou hygienou. Pneumatické pohony často vyžadují stabilizátory konečné polohy, aby se zabránilo poškození v případě, že se chapadlo do konečné polohy přesune příliš silně. Hlučnost pneumatických pohonů je vyšší než u jiných typů pohonů. [33].

### **Hydraulický pohon**

Zdrojem energie pro hydraulická chapadla je hydraulické čerpadlo. Tento typ chapadla může vyvinout větší sílu než jiné typy chapadel a dokáže držet předmět i po přerušení dodávek tlaku. To znamená, že při klidovém stavu není potřeba žádná energie, což snižuje spotřebu energie. Hydraulický pohon dokáže přenášet velké síly i přes své malé rozměry. Navíc umožňuje plynulou regulaci konstantní rychlosti pojezdu a uchopovací sílu lze udržovat po celé dráze uchopení. Maximální síly se dosahuje i při malých vzdálenostech, protože moment setrvačnosti pohybovaných prvků a stlačitelnost oleje jsou nízké [29] [33].

Jednou z nevýhod hydraulických pohonů je finančně náročný servis, protože únik kapaliny z chapadla nebo jeho přívodů může vést k vážnému poškození. V porovnání s jinými typy pohonů je dodávka energie komplikovanější, protože hydraulické systémy jsou zřídka součástí vnitropodnikové technologie výroby. Ve většině případů by musely být zakoupeny a instalovány samostatně. Recyklace hydraulického oleje pro opětovné použití v rámci okruhu vyžaduje další výdaje. Dodávání energie hydraulickým chapadlům v rámci robotických systémů vybavených osami s ruční orientací je mnohem obtížněji realizovatelné než u jiných typů energie. K omezení uchopovací síly je nutný přívodní ventil [33].

### **Elektrický pohon**

Nejdůležitější součástí servoelektrického chapadla je elektronický motor, který se používá k ovládání prstů nebo čelistí. Elektrické pohony umožňují vynikající řízení generující síly a pohyby, dalšími výhodami jsou nízké primární a provozní náklady. Kompaktní konstrukce elektromotorů a zlepšení účinnosti přitahují v posledních letech stále větší pozornost k elektrickým pohonům pro uchopovací techniku. Moderní chapadla s integrovanou

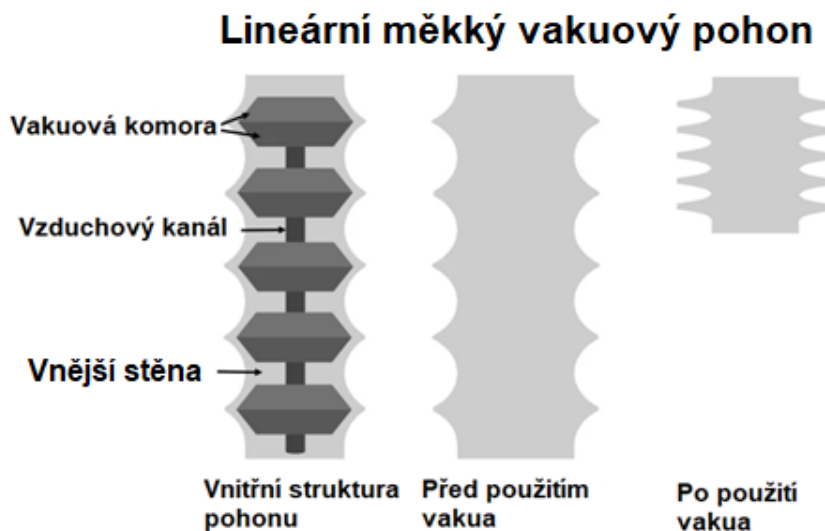
technologií snímačů v kombinaci s elektrickými pohony umožňují přímé řízení uchopovací síly [29] [33].

### Piezoelektrický pohon

Piezoelektrický pohon je užitečný zejména pro malé rychlé pohyby. Tato technologie pohonu se vyznačuje vysokou hustotou energie a nabízí vynikající možnost výroby kompaktních pohonů mikrochapadel. Vzhledem k malým silám a malým vzdálenostem jsou piezoelektrické pohony omezeny na mikrorozsah a neporadí si dobře s různorodostí předmětů [33].

### Vakuvý pohon

Vakuová chapadla pracují na Bernoulliho principu a vytvářejí vysokou rychlost proudění vzduchu mezi chapadlem a povrchem předmětu, čímž se vytváří vakuum. Povrch těchto chapadel se skládá z pryže nebo pěny, která drží předmět. Výhoda vakuového ovládání je, že má vysokou úroveň flexibility a poskytuje dobré uchopení předmětu. Protože vzduch je čistý a může být přenášen trubkami a hadicemi, je tento typ uchopovače upřednostňován v aplikacích, kde by mohl nastat problém kontaminace. [29]

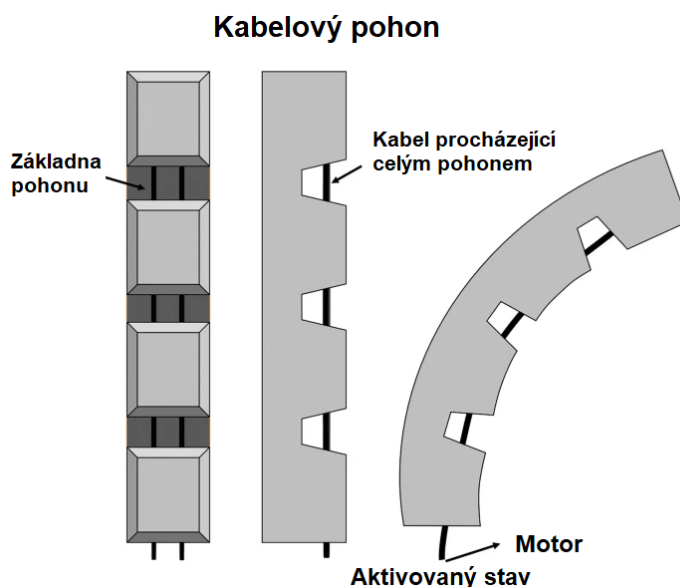


Obr. 19: Schéma vakuového pohonu. [31]

### Kabelový pohon

Dalším hojně využívaným ovládacím mechanismem v měkkých robotických uchopovačích a manipulátorech je ovládání pomocí kabelů. Funguje tak, že se pohyb měkkého tělesa řídí zatahováním kabelů, které jsou zabudovány do konstrukce a ukotveny v určitých bodech.

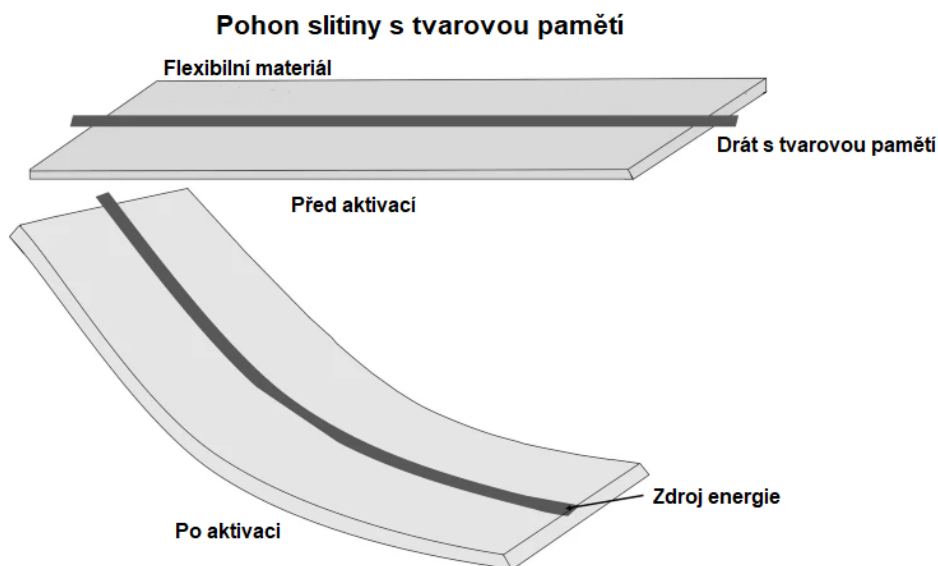
Přestože je flexibilní a pohotově reaguje, návrh jeho nastavení je náročný úkol kvůli umístění motorů, kladek, snímačů síly a dalších senzorů. [31]



Obr. 20: Schéma kabelového pohonu. [31]

### Pohon slitiny s tvarovou pamětí

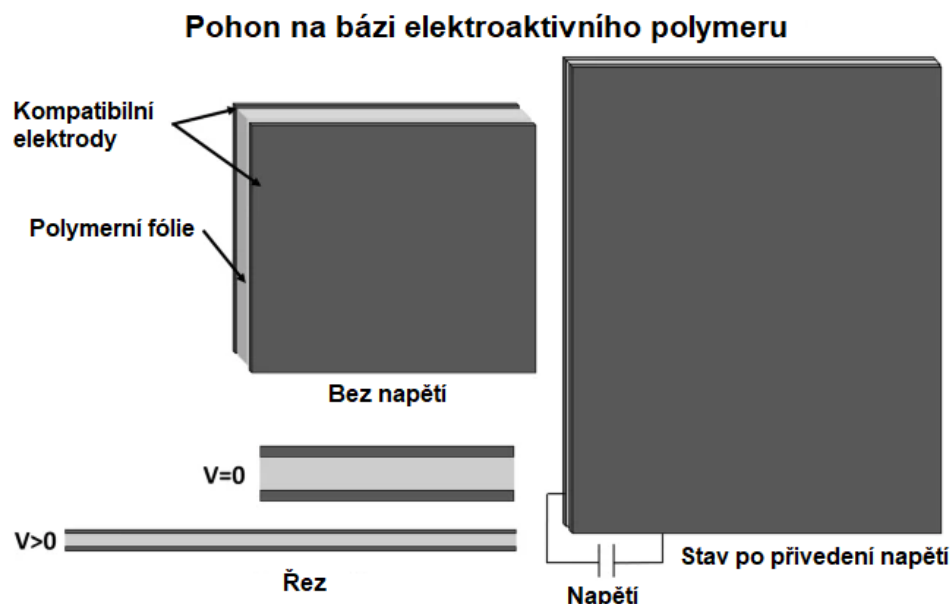
Slitiny s tvarovou pamětí se používají také v měkkých uchopovačích pro účely ovládání, a to díky řadě výhod, jako je nízká hlučnost, vysoký poměr síly k hmotnosti, malé rozměry a snadné použití. Yin a spol. navrhli chapadlo sestávající ze dvou měkkých prstů potažených snímací kůží, které jsou ovládány drátem SMA. Měkké chapadlo přepínalo mezi otevřeným a zavřeným stavem díky Jouleovu ohřevu. Tato konstrukce pomohla při pasivním držení předmětů, protože chapadla zůstávala v zavřené poloze i při absenci napájení. [31]



Obr. 21: Schéma pohonu slitiny s tvarovou pamětí. [31]

### Pohon založený na elektroaktivním polymeru

Elektroaktivní polymery využívají elastomerní materiály, které lze uvést do pohybu elektrickou stimulací na dvou bočních elektrodách, které mají tendenci se přitahovat a vytvářet velké deformace. Xu a spol. se při vývoji svého měkkého chapadla založeného na této technologii aktivace inspirovali Venušinou muškou. Navrhli dvoulistou strukturu, která může vytvářet opačné axiální prodloužení pro otevírání a zavírání chapadla. Použili dielektrický elastomer jako rekonfigurovatelnou hmotu, takže může měnit svůj tvar a vlastnosti. Po přivedení napětí vykazuje vysoký aktivační tlak, krátkou dobu odezvy a vysokou účinnost roztažení. [31]



Obr. 22: Schéma pohonu na bázi elektroaktivního polymeru. [31]

#### 3.3.3 Senzory

Aby bylo možné roboty flexibilně využívat, je nutné, aby si byli vědomi svého okolí. Toho lze dosáhnout buď naprogramováním podmínek prostředí předem, nebo získáním informací pro robota. Souřadnice pohybu, rychlost a zrychlení při manipulaci s předměty mohou být ovlivněny informacemi z okolí. Lidská ruka je senzor i manipulační nástroj v jednom. Lidské senzory fungují na základě hmatu, jinými slovy jsou to hmatové senzory. Kromě hmatového vnímání mohou lidé vizuálně sledovat manipulační operace, což je funkce nehmatová. V automatizaci se snímače obecně dělí na hmatové a nehmatové. Hmatové snímače vyžadují sílu nebo točivý moment působící přímo na ně, aby byly schopny něco zaznamenat. Nedotykové senzory pracují na vzdálenost mezi senzorem a sledovaným objektem.

Mezi nedotkové senzory patří například vizuální a video-vizuální senzory. Tato skupina nedotkových snímačů pracuje se světlem jako měřicím médiem. Využívané fyziologické principy jsou ultrazvuk, indukce, kapacita, magnetismus a piezoelektrický jev. V automatizaci se používají také mikrovlnné a pneumatické senzory. Další metody se vyvíjejí, aby bylo možné realizovat stále více aplikací. Pro mechanické uchopení je důležité vědět, že podle požadovaných informací jsou senzory integrovány do uchopovače. Dochází k přímému kontaktu s obrobkem, což snadno umožňuje hmatové měření, například pokud je požadována přesná informace o síle uchopení. Nedotkové i dotkové senzory lze dále rozdělit na spínací senzory a měřicí senzory [33].

**Spínací senzory** se většinou používají k určení, zda bylo dosaženo určité polohy. Tento typ monitorování chapadel se používá již více než deset let a je standardem pro mechanická chapadla. Bez snímačů by bylo jen stěží možné dosáhnout procesní spolehlivosti automatizovaných výrobních systémů. Časy cyklů manipulačních procesů lze optimalizovat pomocí senzorů namísto programování čekacích dob na otevření chapadel. Spínací senzory mohou sledovat stav chapadla následovně: [33]

- Chapadlo otevřeno
- Chapadlo zavřeno
- Chapadlo uzavřeno/otevřeno pro vnitřní uchopení



Obr. 23: Příklady senzorů. [33]

**Měřicí senzory** se obvykle používají k měření obrobků, k polohování zdvihu chapadla nebo k řízení uchopovací síly. Tyto měřicí úlohy mohou být zajímavé pro operace pick and place i pro dopravu obrobků. Kromě toho lze snímače namontovat na přírubu chapadla pro pohyblivou jednotku.

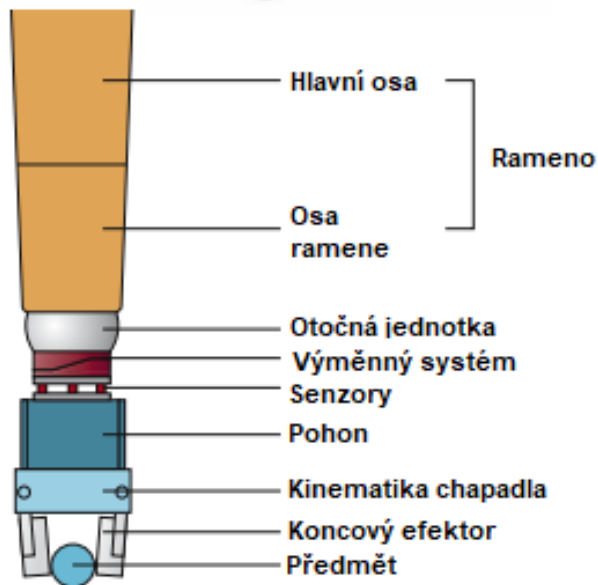
Prsty chapadla lze využít jako snímače pro indukci síly pomocí adhezivních senzorů, které jsou na prstech chapadla připevněny. Tento tzv. adaptér pro měření síly může zaznamenávat a analyzovat síly uchopení pomocí tenzometrického můstku DMS. Můstek pro měření síly je pro svůj účel namontován mezi kinematiku prstů a chapadla. Výsledkem těchto hmatových měřících senzorů je tzv. dynamické měření síly paralelně s procesem uchopení. Toto měření je vizualizováno softwarem, který jej přímo převádí do grafu, např. pro stoprocentní protokol řízení uchopení. Výsledkem je, že obrobky lze klasifikovat podle dosažené síly. Pomocí dat z protokolu je možné provádět preventivní údržbu uchopovače [33].

### 3.3.4 Výrobci

První chapadla byla nejprve vyvinuta pro průmyslové aplikace, poté se aplikace robotických chapadel rozšířily i do dalších oblastí každodenního života. Vzhledem k tomu, že chapadlo významně přispívá k praktickému úspěchu při používání automatizovaného nebo robotizovaného řešení, může mít jeho správný návrh zásadní význam. Správný návrh chapadla může také zjednodušit celkovou montáž robotického systému, zvýšit celkovou spolehlivost systému a snížit náklady na jeho realizaci [30].

Zajímavostí je, že výrobci efektorů a robotů jsou většinou odlišné podniky. Většina společností, které vyrábějí roboty, samy robotická chapadla nevyrábějí. Motivací pro vývoj a výzkum chapadel je zvýšení stupně automatizace a splnění požadavků robotů při uchopování a dalších úkolech interakce s okolím. Mezi nejznámější výrobce efektorů patří SCHUNK, SMC, Festo, Yamaha Motor, Zimmer. SCHUNK je světovou jedničkou v oblasti upínací techniky a uchopovacích systémů – od nejmenšího paralelního uchopovače až po největší program upínacích čelistí. Společnost nabízí nejširší nabídku standardních komponent na trhu. Chapadla SCHUNK jsou známá svou přesností, dlouhou životností a robustností. Jsou synonymem stability procesů a efektivity při montáži a manipulaci. S více než 4000 standardních komponent, SCHUNK nabízí nejvíce ucelený sortiment hydraulických, pneumatických a elektrických uchopovačů na světě [30].





Obr. 24: Schéma robotického ramene. [33]

### 3.4 Robotická pracoviště

1. Roboti: Roboti jsou klíčovým prvkem robotizovaného pracoviště a mohou být různých typů, jako jsou průmyslové roboti, kolaborační roboti, mobilní roboti a další.
2. Řídicí jednotka: Řídicí jednotka spojuje robota a další prvky pracoviště a řídí jejich činnost.
3. Senzory: Senzory se používají ke sledování stavu robota a okolí a k poskytování informací o jejich stavu.
4. Manipulační nástroje: Manipulační nástroje jsou používány ke konkrétním úkolům, jako je sběr a umístění materiálů, svařování, lepení atd.
5. Zdroj energie: Zdroj energie může být napájení elektrickým proudem, plynem nebo jiným zdrojem energie.
6. Bezpečnostní zařízení: Bezpečnostní zařízení jsou používána k zajištění bezpečnosti pracovníků a okolí v průběhu provozu robota.
7. Periférie: Periférie zahrnuje vstupní a výstupní zařízení, jako jsou dotykové obrazovky, tiskárny, skenery a další zařízení potřebná k plnění úkolů.
8. Software: Software se používá ke správě a řízení robota a jeho činnosti.
9. Údržba a opravy: Roboti a další prvky pracoviště vyžadují pravidelnou údržbu a opravy, aby zůstaly v dobrém stavu a fungovaly bez problémů.

### 3.5 Bezpečnost pracoviště

Většina průmyslových robotů si neuvědomuje své okolí, a proto mohou být pro lidi nebezpeční. Průmyslové roboty mohou na základě svého původu představovat několik typů nebezpečí: [34]

- Mechanická nebezpečí, jako jsou nebezpečí vznikající v důsledku neúmyslných a neočekávaných pohybů nebo uvolnění nástrojů.
- Elektrická nebezpečí, jako jsou kontakty s živými částmi nebo spoji nebo vystavení obloukovému záblesku.
- Tepelná nebezpečí, jako jsou nebezpečí spojená s horkými povrchy nebo vystavení extrémním teplotám.
- Nebezpečí hluku.
- Další nebezpečí, jako jsou vibrace, záření a chemické látky.

Existují dvě hlavní kategorie úrazů pracovníků při práci s průmyslovými roboty, úrazy způsobené chybami techniky, anebo lidskými chybami. Technické chyby zahrnují chyby v mechanice robota (uvolněné spoje mezi součástmi, vadná elektronika), chyby řídicí jednotky (programovací chyby, chybný algoritmus). V důsledku toho se může stát, že se robot například nezastaví, nebo že robotické rameno dosáhne vysoké, nekontrolovatelné rychlosti, prudkého pohybu nebo zrychlení.

Lidské zdroje zranění, jako jsou chyby v programování, propojení periferních zařízení, připojení vstupních/výstupních senzorů, mohou mít za následek nepředvídaný pohyb nebo činnost robota, což může mít za následek zranění personálu nebo poškození zařízení. Největší chyby lidského úsudku vznikají v důsledku toho, že se personál natolik seznámí s redundantními pohyby robota, že příliš důvěřuje předpokládané povaze těchto pohybů a při programování nebo provádění údržby v pracovní zóně robota se dostává do nebezpečných pozic. [34]

V posledních letech byla přijata řada strategií k zajištění bezpečnosti lidí. Tyto strategie se zaměřují na různé typy bezpečnosti, jako například: [35]

- Bezpečnost při nehodách – zajišťuje, že mezi roboty, lidmi a překážkami mohou být použity pouze bezpečné/kontrolované kolize.

- Aktivní bezpečnost – včas rozpozná kolizi osob a zařízení a zastaví pohyb. Lze použít snímače přiblížení, systémy vidění a snímače síly/kontaktů.
- Adaptivní bezpečnost – zasahuje do hardwarového vybavení a uplatňuje nápravná opatření, aby zabránila kolizím bez zastavení provozu zařízení.

Proto byly v tomto směru zavedeny národní a mezinárodní normy, směrnice a právní předpisy, které umožňují systémovým integrátorům snadno integrovat bezpečnost do svých systémů. Vzhledem k tomu, že na společných pracovištích pracují nejen lidé a roboti, ale také další pomocná zařízení, má každá buňka svá specifická rizika, která je třeba bezpečně řešit. Proto je třeba dodržovat i normy a právní předpisy pro jednotlivé typy zařízení a operace. V současné době existuje přibližně 30 směrnic EU a 600 bezpečnostních norem. [35]

### 3.5.1 Legislativa a normativa

ČSN EN ISO 12100 (83 3001)	<i>Bezpečnost strojních zařízení – Všeobecné zásady pro konstrukci – Posouzení rizika a snižování rizika</i>
ČSN EN ISO 13849-1 (83 3205)	<i>Bezpečnost strojních zařízení – Bezpečnostní části ovládacích systémů – Část 1: Obecné zásady pro konstrukci</i>
ČSN EN ISO 13850 (83 3311)	<i>Bezpečnost strojních zařízení – Nouzové zastavení – Zásady pro konstrukci</i>
ISO 14118	<i>Safety of machinery – Prevention of unexpected start-up (neharmonizovaná; jako ČSN nepřevzata)</i>
ČSN EN ISO 13857 (83 3212)	<i>Bezpečnost strojních zařízení – Bezpečné vzdálenosti k zamezení dosahu do nebezpečných prostor horními a dolními končetinami</i>
ČSN EN ISO 13855 (83 3303)	<i>Bezpečnost strojních zařízení – Umístění ochranných zařízení s ohledem na rychlosti přiblížení částí lidského těla</i>
ČSN EN ISO 10218-1 (18 6502)	<i>Roboty a robotická zařízení – Požadavky na bezpečnost průmyslových robotů – Část 1: Roboty</i>
ČSN EN ISO 10218-2 (18 6502)	<i>Roboty a robotická zařízení – Požadavky na bezpečnost průmyslových robotů – Část 2: Systémy robotů a integrace</i>

Obr. 25: Přehled norem uplatňovaných při posuzování bezpečnosti pracovišť s roboty. [36]  
Strojními zařízeními všeobecně se zabývá nařízení vlády č.176/2008 Sb. Například je třeba zdůraznit, že robot sám o sobě není stroj, ale stává se strojem, když je integrován do robotické stanice nebo výrobní linky nebo se stane součástí jiného stroje.

#### ČSN EN ISO 12100

Tato mezinárodní norma specifikuje základní terminologii, zásady a metodologii pro dosažení bezpečnosti při konstrukci strojního zařízení. Norma specifikuje zásady posouzení a snižování rizika jako pomoc konstruktérům k dosažení tohoto cíle. Tyto zásady jsou založeny na znalosti a zkušenosti z konstrukce, používání, nehod, úrazů a rizik u strojních

zařízení. Jsou popsány postupy pro identifikaci nebezpečí a pro odhad a hodnocení rizik v relevantních fázích životního cyklu stroje, a pro vyloučení nebezpečí nebo pro opatření dostatečně snižující riziko. Je uveden návod na dokumentaci a ověřování procesu posouzení rizika a snížení rizika.

Základním účelem této mezinárodní normy je vybavit konstruktéry souhrnným systémem a návody pro rozhodnutí při vývoji strojních zařízení, které umožní konstrukci strojů tak, aby byly bezpečné při jejich předpokládaném používání. Norma také poskytuje strategii tvůrcům norem a napomáhá při zpracovávání odpovídajících a vhodných norem typu B a norem typu C. Pojem bezpečnost strojního zařízení bere v úvahu schopnost stroje vykonávat jeho předpokládanou funkci (funkce) během jeho životnosti při odpovídajícím snížení rizika. Tato norma je typu A.

Tato mezinárodní norma je základem pro tvorbu norem, které mají následující strukturu:

- **normy typu A** (základní bezpečnostní normy), uvádějí základní pojmy, zásady pro konstrukci a všeobecná hlediska, která mohou být aplikována na všechna strojní zařízení;
- **normy typu B** (skupinové bezpečnostní normy), se zabývají jedním bezpečnostním hlediskem nebo jedním typem bezpečnostního zařízení, které může být použito pro větší počet strojních zařízení:

normy typu B1 se týkají jednotlivých bezpečnostních hledisek (např. bezpečných vzdáleností, teploty povrchu, hluku);

normy typu B2 se týkají příslušných bezpečnostních zařízení (např. dvouručních ovládacích zařízení, blokovacích zařízení, zařízení citlivých na tlak, ochranných krytů);

- **normy typu C** (bezpečnostní normy pro stroje), se zabývají detailními bezpečnostními požadavky pro jednotlivý stroj nebo skupinu strojů.

### ČSN EN ISO 13855

Tato mezinárodní norma určuje umístění bezpečnostních zařízení s ohledem na rychlosti přiblížení částí lidského těla. Norma specifikuje parametry založené na hodnotách rychlosti přiblížení částí lidského těla a poskytuje metodologii k určení minimálních vzdáleností od detekčního prostoru k nebezpečnému prostoru nebo od ovládacích prvků bezpečnostních zařízení k nebezpečnému prostoru. Hodnoty rychlosti přiblížení (rychlost chůze a pohyb

horní končetiny) v této mezinárodní normě jsou neustále přezkušovány a ověřovány praktickými zkušenostmi. Tato mezinárodní norma uvádí návod pro typická přiblížení. Jiné typy přiblížení, například během, skokem nebo pádem nejsou v této mezinárodní normě uvažovány.

### **ČSN EN ISO 10218-1**

Požadavky na samotného robota lze nalézt v normě ČSN EN ISO 10218-1: Roboty a robotická zařízení – požadavky na bezpečnost průmyslových robotů – část 1: Roboty. Tato část poskytuje návod na zvýšení bezpečnosti při konstrukci a montáži robotů. Specifikuje požadavky a pokyny pro informace o základní bezpečnosti konstrukce, ochranných opatřeních a používání průmyslových robotů, popisuje základní nebezpečí spojená s roboty a specifikuje požadavky na odstranění nebo přiměřené snížení rizik spojených s těmito nebezpečími. Tato část ISO 10218 neplatí pro jiné typy robotů než průmyslové, ačkoliv bezpečnostní principy uvedené v ISO 10218 mohou být použity také pro tyto jiné roboty. Nebezpečí spojená s roboty jsou dobře rozpoznatelná, ale zdroje nebezpečí jsou často odlišné pro jednotlivý systém robota. Počet a typ (typy) nebezpečí se přímo vztahují k povaze automatizačního procesu a komplexnosti instalace. Rizika spojená s těmito nebezpečími se mohou lišit podle typu použitého robota a způsobu jeho instalace, programování, provozu a údržby.

### **ČSN EN ISO 10218-2**

ČSN EN ISO 10218-2: Roboty a robotická zařízení – Požadavky na bezpečnost průmyslových robotů – Část 2: Systémy robotů a integrace. Tato norma byla vytvořena na základě poznání, že průmyslové roboty a průmyslové systémy robotů představují závažná nebezpečí. Poskytuje návod na bezpečnou ochranu obsluhy při instalaci, programování, funkčních zkouškách, údržbě, běžném provozu a opravách robotů. Charakterizuje základní nebezpečí a nebezpečné situace identifikované těmito systémy a specifikuje požadavky na snížení nebo přiměřené omezení rizik spojených s těmito nebezpečími. Specifikuje požadavky na robotická zařízení nebo jejich součásti.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 CÍL PRÁCE

Cílem diplomové práce je navrhnout intenzifikaci výrobního procesu lakování pružin v nejmenované firmě. Diplomová práce se skládá z bodů, které jsou popsány níže. První bod je obsažen v teoretické části diplomové práce a zbylé tři body v praktické části.

1. Vypracování literární studie na dané téma.
2. Popis současného stavu výrobního pracoviště.
3. Návrh intenzifikace výrobního pracoviště.
4. Zhodnocení výsledků řešení.

## 5 POPIS SOUČASNÉHO STAVU

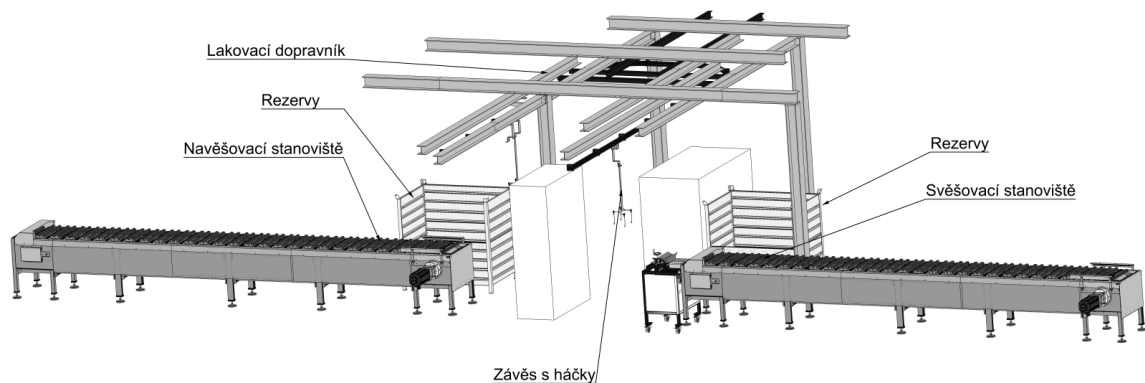
Společnost a její prostějovský závod patří k největším producentům vinutých pružin ve střední Evropě. Ročně se zde vyrobí 16 milionů pružin a cílem je zvýšit produkci až na 18 milionů pružin ročně. Jelikož váha pružin je v řádech několika kilogramů, a díky elektrifikaci automobilů se stále zvyšuje, je potřeba mít i dostatečné množství materiálu. K těmto účelům slouží vedlejší hala, kde si společnost vyrábí svůj vlastní polotovár.

Společnost odebírá kvalitní ocel z německých závodů v podobě drátu o jednotném průměru. Tato ocel je měkká, nezakalená, a proto musí být před samotným vinutím upravena. Dráty jsou protahovány na potřebné průměry podle aktuálních vyráběných druhů pružin a poté jsou indukčně kaleny, aby měly požadovanou pevnost. Následně jsou dráty namotány na cívky zhruba o váze 2800 kilogramů. Takto namotané zakalené cívky drátu musí odpočívat nejméně 24 hodin při pokojové teplotě do té doby, než jsou použity ve výrobě.

Dalším krokem je vinutí pružin za pomoci strojů a následné popouštění. Popouštěcí pec má kapacitu 160 pružin a na konci odebírá pružiny robotické rameno ke kontrole stlačením za tepla a následně na tryskání. Tryskání se provádí na dvakrát, poprvé jsou pružiny tryskány za tepla ocelovým zrnem do průměru 1 mm za účelem obroušení povrchu a odstranění nečistot. Následuje ochlazení, druhé tryskání pro povrchovou úpravu a opět kontrola stlačením, tentokrát za studena.

Dalším krokem je navěšování pružin na lakovací dopravník, který vede přes fosfátovací tunel, práškové lakování a pec, která lak sjednotí a vytvrdí. Navěšování je důležitý proces, který je prováděn za pomoci lidské síly. Na čtvrté výrobní lince je navěšování již automatizované a závisí na něm celková produktivita výroby. Před navěšením musí být pružiny pootočený do správného úhlu, aby je mohlo robotické rameno správně navěsit. Pružiny zavěšené na lakovacím dopravníku podstoupí jako první fosfátování, následně jsou elektrostaticky lakovány a poté je prášek v peci vytvrzen. Následně pružiny na dopravníku míří k pracovišti svěšení a za cesty chladnou. Důležité je, aby lakovací dopravník byl stále v pohybu. Pokud by se zastavil, pružiny nacházející se v peci, by byly zničeny. Po svěšení jsou pružiny opět testovány stlačením. Jakmile pružiny projdou kontrolou, jsou etiketovány a paletizovány.





Obr. 26: Současný stav pracovišť navěšení a svěšení pružin.

Za současného stavu jsou pružiny svěšovány z lakovacího dopravníku pomocí člověka. Jelikož pružiny musí být uzemněny, aby na nich prášková barva držela, musí být v kontaktu s háčkem. Toto nezalakované místo je vyžadováno automobilkami zalakovat. K zalakování používá zaměstnanec dolakovací stůl, na kterém je toto místo zalakování pomocí válečků a barvy.

## 5.1 Druhy vinutých pružin

Přesto že výstupem této práce bude návrh automatizovaného pracoviště pro čtvrtou linku, kde se převážně vyrábí těžší pružiny, automatizované pracoviště by mělo být flexibilní a v případě potřeby zde vyrábět pružiny lehčí nebo s menším průměrem drátu. Společnost vyrábí několik druhů pružin pro většinu automobilových značek. Pružiny se liší jak průměrem drátu, tak i množstvím nanesené barvy a tvarem. Z tohoto důvodu bude při návrhu automatizovaného svěšovacího pracoviště důležité brát ohled na variabilitu.

Pružiny zde vyráběné mají průměr drátu od 9 do 22 mm. Tloušťka laku na pružině bývá 30 až 1500  $\mu\text{m}$  (dvojitě lakování) v závislosti na druhu automobilu a značce. Průměrná hmotnost laku na jedné pružině je  $\sim 100$  g. Některé druhy pružin bývají i dvojitě lakovány.

## 5.2 Navěšení pružin

Výrobní hala se skládá ze 4 výrobních linií, kde probíhá pásová výroba. Příčně přes všechny linky vede dopravník lakovny, přičemž součástí každé linky je navěšovací a svěšovací stanoviště, kde pracují operátoři. Na čtvrté lince je navěšování pružin již automatizované a robotické rameno zde navěšuje těžké pružiny, které by nebylo možné navěsit ručně.

Při navěšování se musí dbát na správný postup. Kvůli absenci operátora navěšování u čtvrté linky musí mít pracoviště řadu senzorů. Tyto senzory – senzor pozice lakovacího závěsu a

kontrolní kamera, kontrolující háček vůči podsvětlenému pozadí, se starají o bezchybné a přesné zavěšení. Nejdůležitějšími body správného postupu jsou:

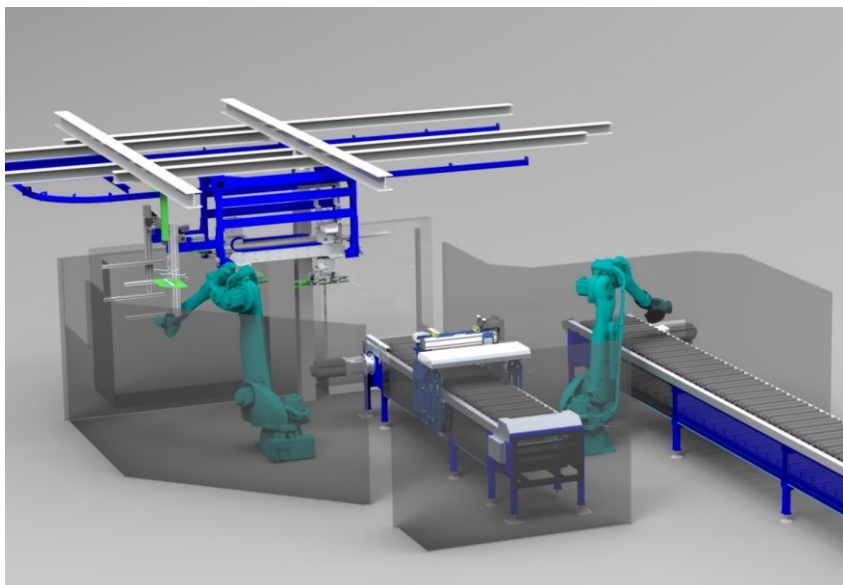
- Pružiny jsou navěšovány na háčky, přičemž je nutné dbát na to, aby byly umístěny ve správné poloze, kterou určí obsluha tvářecí (blokovací) linky. Provádí se vizuální kontrola stavu opálení háčků ze zařízení pro odstranění laku z háčku v místě navěšení.
- Po skončení navěšování jednoho druhu pružiny musí operátor zapsat do kontrolní karty číslo závěsu, na kterém byly pružiny zavěšeny. Do této karty také píše čas navěšení, označení dílu, stranu navěšení a šarži. Tento zápis také provádí, když dojde ke změně šarže.

Na obrázku níže je vizualizace pracoviště navěšování pružin. Pružiny jedou z výroby po dopravníku, který je vpravo. První robotické rameno přesune pružiny z pravého dopravníku na druhý dopravník, kde jsou pružiny naskenovány a pootočeny do správné pozice tak, aby je druhé rameno bezchybně vzalo a zavěsilo na háčky.

Bezchybné navěšení je zde prováděno pomocí kamery a dvou senzorů. První laserový senzor sleduje, jestli jsou na závěsu háčky. Druhý ultrazvukový senzor dává informaci, jestli je na háčku přítomna pružina či nikoli. Kamera ISRA fotí háček proti podsvícenému pozadí. Pomocí vyfotografovaných fotek je počítačem zjištěno, v jaké vzdálenosti je háček od kamery a zároveň je určen úhel, který svírá zobáček háčku. Úhel zakončení háčku bývá  $53^\circ$ , je zde však nastavena odchylka úhlu, jelikož čistící kartáče háčků mohou zobáček ohnout a tento úhel změnit. Pomocí informací získaných z těchto senzorů vyhodnotí počítač navěšení pružin.

Při navěšování pružin jsou háčky uchopeny stabilizačním zařízením a robotické rameno na ně následně navěsí pružiny. Pokud úhel zobáčku jednoho háčku nevyhovuje toleranci, robotické rameno na tento háček pružinu nenavěsí a jsou navěšeny pouze 2 pružiny uhlopříčně na závěs. Pokud se do úhlové tolerance nevyhovuje více háčků, robotické rameno na závěs nenavěsí žádnou pružinu.

Při změně typu pružiny nebo doplnění polotovaru nutno počítat s dorovnávacími rezervami. Výměna polotovaru trvá 5–6 minut, proto je u pracovišť navěšování i svěšování počítáno s rezervami, které jsou schopny toto časové okno vyplnit a zaručit tak plynulost výroby. Rezervy z tohoto důvodu musí obsahovat alespoň 96 kusů.



Obr. 27: Automatizované navěšování pružin.

Automatizace navěšování čtvrté výrobní linky stála firmu 290 000 € (2018). Jednotlivé položky jsou rozepsány v tabulce níže. Do kolonky robotizovaného pracoviště s dopravníkem patří roboti, dopravník, nástroje, kamerový systém a stabilizační systém. Realizace pracoviště byla provedena v roce 2018, přesto se odhad ceny svěšovacího pracoviště bude odvíjet z výdajů na navěšovací pracoviště.

Tab. 1: Cena automatizace navěšování pružin.

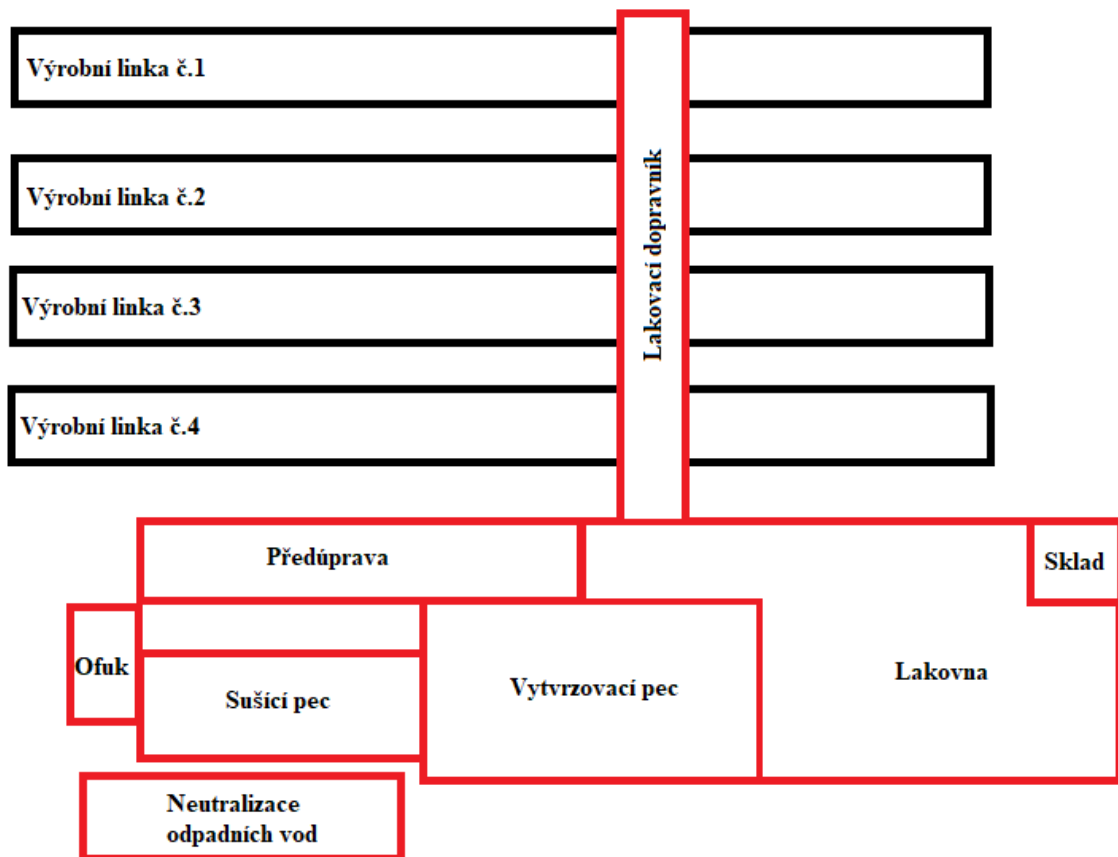
Pozice	Položka	Počet kusů	Cena za kus bez DPH [€]	Suma bez DPH [€]
<b>1</b>	<b>Komponenty</b>			<b>230 888 €</b>
1.1	Robotizované pracoviště s dopravníkem	1		183 028 €
1.2	Zaslání	1	2 000 €	2 000 €
1.3	Oplocení	1	18 650 €	18 650 €
1.4	Kabeláž 10 m	1	17 365 €	17 365 €
1.5	Dokumentace + CE	1	9 845 €	9 845 €
<b>2</b>	<b>Cestovní náklady</b>			<b>18 969 €</b>
2.1	Mechanici	40 h		
2.2	Elektrikáři	40 h		
2.3	Kontrolor	30 h		
2.4	Programátor	30 h		
<b>3</b>	<b>Uvedení do provozu</b>			<b>40 375 €</b>
3.1	2 x Mechanik	100 h		
3.2	2 x Elektrikář	100 h		
3.3	1 x Kontrolor	90 h		
3.4	1 x Programátor	90 h		
<b>Celková suma</b>				<b>290 232 €</b>

### 5.3 Lakovací linka

Úlohou lakovací linky je bezchybně pokrýt celý povrch pružiny práškovým lakem a následně správné vytvrzení prášku tak, aby nedocházelo k vadám laku a také proto, aby byla pružina tímto lakem chráněna před korozi. Jak bylo uvedeno výše, lakovací linkou projíždí dopravník s pružinami, které mají fosfátovou povrchovou úpravu a jsou zavěšeny na háčku. A jelikož práškové lakování je elektrostatický proces, musí pružiny být uzemněny tak, aby prášek držel na jejich povrchu a došlo tak k celopovrchovému zalakování.

#### 5.3.1 Schéma lakovny

Při lakování jsou pružiny umístěny na závěsech, které jsou spojeny s dopravníkem, který vede celou linkou a tvoří uzavřený okruh. Závěsy jsou označeny čísly, které udávají pozici závěsu na dopravníku. Mezi částmi linky, přes které vede okruh patří předúprava, osoušecí kabina, sušící pec, práškovací kabina a vypalovací pec, popřípadě předehřívací pec. K lince patří také neutralizační stanice odpadních vod (NSOV), sklad prášku a kancelář.



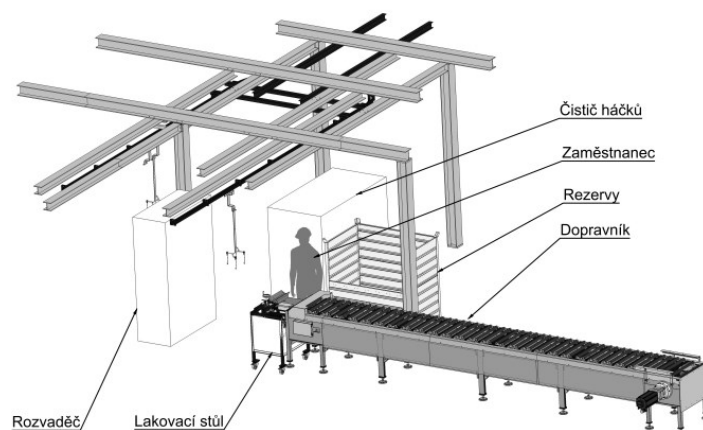
Obr. 28: Schéma výrobní haly.

Skład prášku funguje na principu FIFO (first in first out). Nádoby s práškem se musí skladovat v uzavřeném, suchém a dobře větraném místě. Otevřené obaly musí být pečlivě uzavřeny a ponechány ve svislé poloze, aby nedošlo k úniku.

## 5.4 Svěšení pružin

Svěšení pružin z dopravníku je téma, na kterém je tato práce založena. Svěšování je prováděno pomocí lidské síly a platí zde stejné nevýhody, které jsou popsány u navěšování. Díky tomu je snaha toto pracoviště automatizovat.

Při svěšování dochází k odloupení pružiny od háčku a místo, kde je pružina v kontaktu s háčkem, je ve výsledku nezalakováno. I když se jedná pouze o malé místo, zhruba 2x5 mm z obou stran, představuje toto nezalakované místo potenciální riziko oxidace povrchu a následného prasknutí pružiny. Proto musí být pružiny instalovány na nápravu tak, aby toto místo bylo na horním konci pružiny.



Obr. 29: Současné pracoviště.

Pro správný postup musí operátor:

- Při svěšování provést vizuální kontrolu nalakovaných kusů.
- Operátor svěšování musí zatřít místa dotyku pružiny s háčkem. Poté uloží kusy do skladovacích přepravek nebo přímo postupují k dalším operacím.
- Závěsy musí být podle potřeby vyměňovány za opálené. Také háčky se po několika lakovacích cyklech musí být měněny za nové. Barva z háčků v místě kontaktu s pružinou musí být odstraněna.

Při svěšování, stejně jako u navěšování, musí být počítáno s rezervami na 5-6 minut, kdy je měněn polotovar, to znamená minimálně 96 kusů.



Obr. 30: Nezalakované místo pružiny.

## 5.5 Požadavky na kvalitu

Lakýrník provádí kontroly předúpravy, tloušťky a jakosti laku. Při zpozorování poruchy laku nebo vychýlení hodnot provedených zkoušek z přístupných mezí je povinen neprodleně informovat nadřízeného. Lakýrník je povinen veškeré výsledky měření zapsat do příslušné kontrolní karty.

### 5.5.1 Kontrola předúpravy

Veškeré informace o předúpravě se nachází v provozním řádu předúpravy, který se nachází v lakovně. Tento dokument obsahuje:

- Parametry lázní.
- Postup pro korekci lázní.
- Postup kontroly lázně.
- Interval výměny lázně.
- Parametry, které se mají kontrolovat.
- Četnost kontrol.
- Kontrolní karty pro zápis výsledků měření.
- Kalibrace pH metru.
- Informace o použití ochranných pomůcek.
- Postup při vzniku poruch na lince chemické předúpravy.

Následující parametry jsou kontrolovány lakýrníkem na laboratorním stole dle interního pracovního postupu:

- CA (celková alkalita) – zóny odmaštění.
- Bodovitost ZN – zóny aktivace.
- Celková kyselost – zóny fosfátování.
- Plynový bod – zóny fosfátování.
- Koncentrace zinku – zóny fosfátování.

Změřené hodnoty jsou zapisovány do kontrolních karet, které se nachází přímo na laboratorním stole. Jsou-li naměřené hodnoty mimo dané rozmezí, musí být provedena korekce lázně.

### 5.5.2 Kontrola tloušťky laku

U dvojité i běžně nalakovaných pružin musí být provedena kontrola tloušťky laku. Kontrola je prováděna podle interního postupu. V tomto dokumentu, který se nachází v kanceláři lakovny, jsou také dána rozmezí hodnot minimální a maximální tloušťky laku pro každý díl. Kontrolu tloušťky laku je také nutné provést u dvojího lakování vždy na jedné pružině z výrobní várky, která projde pouze první kabinou, kde je nanášen zinek. Tato pružina je sundána z dopravníku, nechá se vychladnout a poté je provedeno měření. Postup tohoto měření je totožný jako u nalakovaných pružin.

### 5.5.3 Kontrola kvality laku

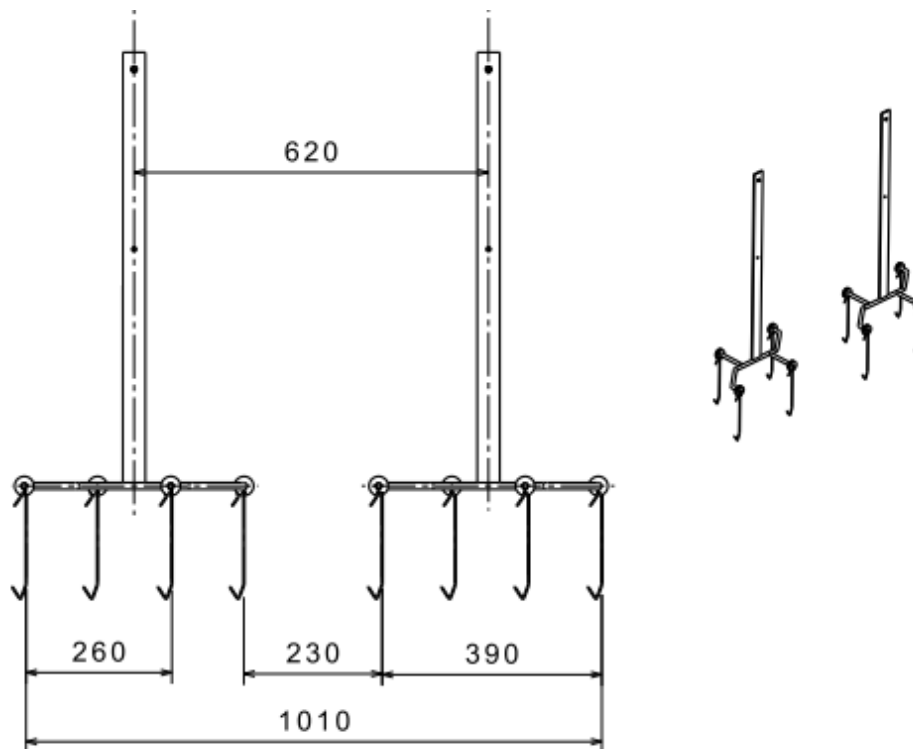
Tato kontrola se skládá z mřížkového testu, testu seškrábnutí a MEK testu a pro dvojité lakované kusy je prováděn ještě křížový řez. Kontrola je prováděna obsluhou lakovny podle interních předpisů.



Obr. 31: Příklady vad laku.

## 6 INTENZIFIKACE LAKOVÁNÍ

Současná výrobní linka se pohybuje rychlostí 2,5 m/min, to znamená, že každou minutu je vyrobeno 16 pružin. Cílem společnosti je výroba 18 pružin za minutu. Při těchto rychlostech musí robot dokázat pružiny odtrhnout od háčků, vyhledat nezalakované místo, nalakovat, zkontrolovat a položit pružiny na dopravník.



Obr. 32: Závěs s háčky.

Vzdálenost mezi jednotlivými závěsy dopravníku je 62 cm a vzdálenost háčků mezi sebou z jedné strany 26 cm. Pokud tedy bude z každé strany dopravníku manipulátor odebírat jednu pružinu postupně, bude mít při rychlosti výrobní linky 2,5 m/s neboli 4,16 cm/s čas na provedení této série úkolů pouze 7,45 s. Pokud však budou manipulátory odebírat každý 2 pružiny současně, čas na provedení úkolů se zvýší na 14,9 s.

### 6.1 Finanční náklady

Aby byla automatizace pracoviště pro společnost výhodnou investicí, měla by být zaplacená do dvou let od spuštění. Při současném stavu svěšování se kvůli bezpečnosti práce na pracovišti musí každou směnu střídat člověk. Při čtyřsměnném provozu se tedy za den na pracovišti vystřídají čtyři lidé. Pokud by se bralo v úvahu, že roční náklady na obsluhu pracoviště jsou 600 000 Kč (vypočteno podle průměrné roční mzdy podle ČSÚ v roce 2022) [37], roční náklady na pracovní sílu pracoviště svěšování pružin jsou tedy dohromady



2 400 000 Kč. Pokud firma počítá se splacením pracoviště do dvou let, rozpočet na realizaci robotizovaného pracoviště by byl necelých 5 000 000 Kč.

## 6.2 Volba robota

Mezi nejznámější výrobce robotických ramen patří společnosti jako například ABB, Fanuc, Yaskawa, Kuka, Epson. Nicméně z důvodu integrity bylo vybráno rameno společnosti Yaskawa řady GP, jelikož společnost již vlastní několik desítek robotů od stejné firmy. Yaskawa Electric je jedním z předních světových výrobců v oblasti pohonové techniky, průmyslové automatizace a robotiky se sídlem v japonském Kitakyushu a také servisním střediskem v České republice.

Roboty řady GP jsou kompaktní vysokorychlostní univerzální zařízení. Jsou vyráběny s nosnostmi od 4 do 600 kg. Jsou jednoduše instalovány a integrovány a díky své neobyčejné spolehlivosti a životnosti se hodí pro nepřehlednou škálu aplikací a prostředí. Jsou vyráběny také v provedení do čistých prostor a potravinářství.

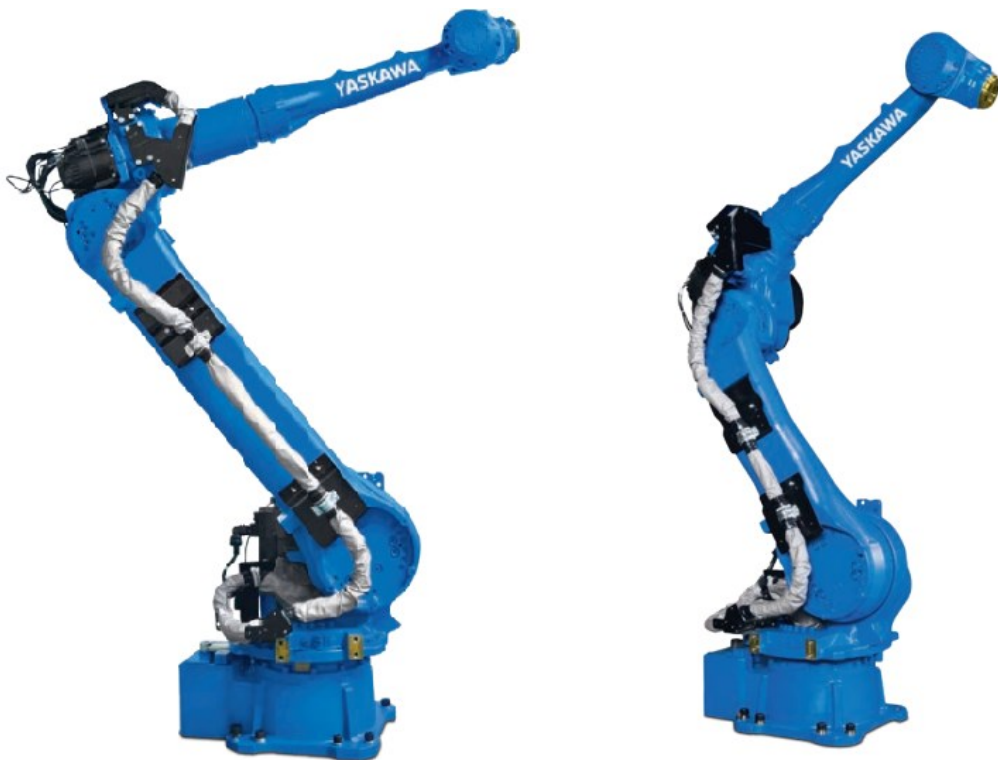
Volba manipulátoru je omezena prostorem mezi lakovacím dopravníkem. Zároveň je limitován i nosností. Současně nejtěžší vyráběné pružiny váží 7 kg a s příchodem elektromobility tato váha stále roste. Proto bylo uvažováno o maximální hmotnosti pružiny 10 kg. Zároveň je nutno počítat s hmotností chapadla. Z důvodu nepřetěžování a šetření motorů bylo počítáno s hmotnostní rezervou – nejmenší možná nosnost manipulátoru by tedy byla 35 kg (uchopovač + pružina). Bylo také počítáno se zavěšením robota vzhůru nohama, a proto musí být zvolený manipulátor pro toto zavěšení schválen výrobcem.

### 6.2.1 Yaskawa GP35L

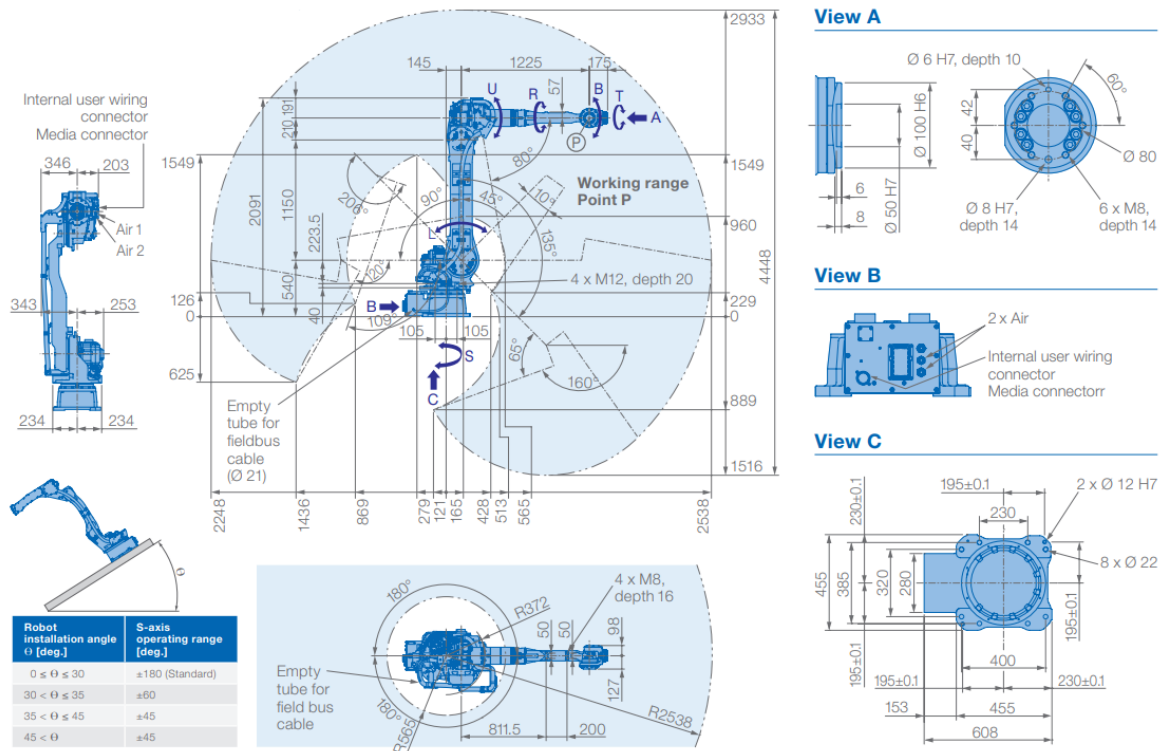
MOTOMAN GP35L je vysoce univerzální šestiosý průmyslový robot s užitečným zatížením 35 kg, prodlouženým dosahem (2 538 mm) a vynikající opakovatelností +/- 0,07 mm. Robot GP35L nabízí dokonale vyladěnou kombinaci užitečného zatížení, rychlosti a přípustného momentu zápěstí, která zajišťuje působivou rychlost a zrychlení. Malá plocha a štíhlá konstrukce ramene umožňují minimální instalační prostor a minimalizují rušení periferních zařízení. K dispozici je verze s vysokým krytím IP65/67 (ochrana proti prachu a kapalinám) pro provoz v náročných podmínkách. GP35L je ideální pro širokou škálu aplikací, skvěle se hodí pro obsluhu strojů, manipulaci s materiálem, odebírání materiálu, montáž, aditivní výrobu nebo dávkování.

Tab. 2: Specifikace robotického ramena GP35L.

Specifikace GP35L						
Osy	Maximální rozsah pohybu [°]	Maximální rychlost [°/sek.]	Dovolený moment [Nm]	Dovolený moment setrvačnosti [kg*m2]	Počet os	6
					Max. nosnost	35 kg
S	±180	180	-	-	Opakovatelnost	±0,07 mm
L	+135/-90	140	-	-	Max. pracovní vzdál. R	2538 mm
U	+206/-80	178	-	-	Teplota	0/+45 °C
R	±360	250	147	10	Vlhkost	20-80 %
B	±125	250	147	10	Hmotnost	600 kg
T	±360	360	78	4	Zdroj napětí	4 kVA



Obr. 33: Yaskawa GP35L (vlevo) a GP50 (vpravo).



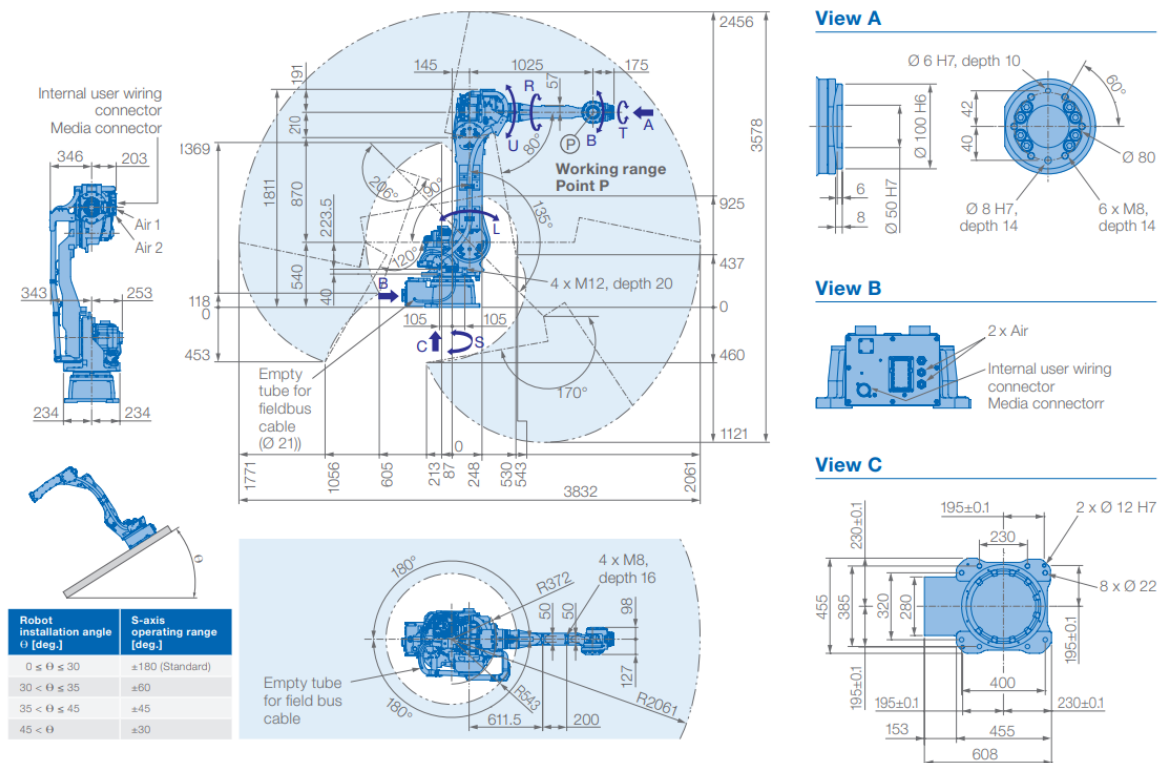
Obr. 34: Rozměry a pracovní prostor robota GP35L.

### 6.2.2 Yaskawa GP50

Manipulátory GP50 a GP35L jsou velmi podobné stroje a liší se především v nosnosti a délce dosahu. Univerzální MOTOMAN GP50 nabízí nosnost 50 kg (oproti 35 kg u GP35L) a maximální dosah 2 061 mm (GP35L má prodloužený dosah 2538 mm). Robot je k dispozici též se stupněm krytí IP65/67 pro práci v náročném prostředí.

Tab. 3: Specifikace robotického ramene GP50.

Specifikace GP50						
Osy	Maximální rozsah pohybu [°]	Maximální rychlost [°/sek.]	Dovolený moment [Nm]	Dovolený moment setrvačnosti [kg*m2]	Počet os	6
					Max. nosnost	50 kg
S	$\pm 180$	180	-	-	Opakovatelnost	$\pm 0,03$ mm
L	135/-90	178	-	-	Max. pracovní vzdál. R	2061 mm
U	206/-80	178	-	-	Teplota	0/+45 °C
R	$\pm 360$	250	216	28	Vlhkost	20-80 %
B	$\pm 125$	250	216	8	Hmotnost	570 kg
T	$\pm 360$	360	147	11	Zdroj napětí	4 kVA



Obr. 35: Rozměry a pracovní prostor robota GP50.

### 6.3 Uchopovače

Při svěšování je důležité, aby uchopovače bezchybně odtrhly pružiny z háčků. Jelikož při svěšování jsou pružiny již zalakovány, musí se použít uchopovač, který pružiny nepoškrábe a nezneškodí tak výrobek. Jako optimální byly vybrány uchopovače elektromagnetické.

#### 6.3.1 Pneumatické

Pneumatické uchopovače jsou již společností ve výrobě využívány. Tento typ uchopovačů se objevuje na robotech ve výrobě pouze po stanoviště navěšení pružin. Důvodem je to, že při navěšování není ještě pružina chráněna ochrannými vrstvami a nehrozí riziko zničení. Při použití mechanických uchopovačů by muselo být použito měkké vrstvy po celé délce uchopovače, aby nedošlo k poškrábání zalakované pružiny.

#### 6.3.2 Tříprsté

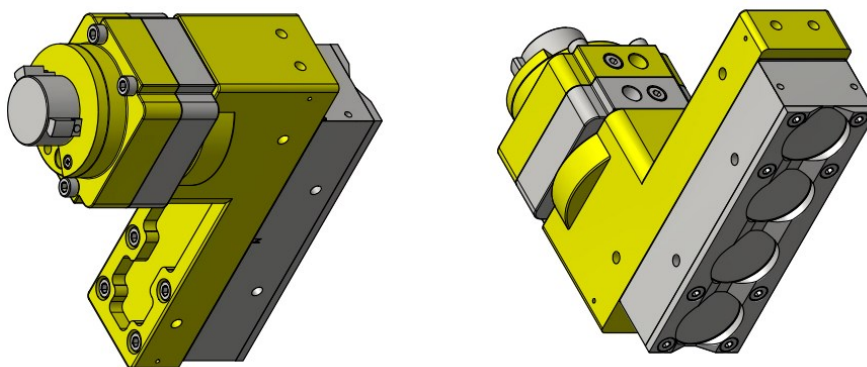
V úvahu připadají také tříprsté uchopovače, které mohou pružinu chytit pouze za spodní část pružiny, a tím pádem nepřekáží kamerám při kontrole a zalakování. Tříprsté uchopovače byly vyzkoušeny firmou v německém závodě, ale použití těchto uchopovačů nebylo výhodné a složité na seřizování.



Obr. 36: Tríprsté chapadlo [38].

### 6.3.3 Elektromagnetické

Tyto elektromagnetické uchopovače byly již společností použity ve výrobě v Německu. Aby byl lak chráněn před poškrábáním, musí být mezi uchopovačem a pružinou minimálně 2 až maximálně 4 milimetrová vrstva tlumícího materiálu, v závislosti na deformaci tlumící hmoty a útlumu magnetického pole dle zbývající tloušťky tlumící hmoty – molitanu, mirelonu nebo měkké pryže. Nosnost uchopovače je závislá na vzdálenosti mezi magnety a pružinou. Je nutné zde počítat jak s tlumící měkkou vrstvou materiálu, taky i s tloušťkou laku. Specifikace uchopovačů jsou rozepsány níže v tabulce.



Obr. 37: Elektromagnetické uchopovače.

Důležité je, aby se uchopená pružina z uchopovače nesmekla. Uchopovač musí pružinu uchopit alespoň za 2 závity pružiny. Nevýhodou tohoto typu uchopovače je, že při přichycení pružiny k uchopovači pomocí magnetů se zmagnetizuje i pružina. Zmagnetizovaná pružina je problém, při kterém by se na jejím konce mohly i přes vrstvu laku přichytávat železné částičky. Částičky by následně mohly poškodit lak, a tím pádem i pružinu. Z tohoto důvodu musí být pružina po manipulaci s elektromagnetickým uchopovačem odmagnetizována.

Tab. 4: Specifikace elektromagnetického uchopovače.

Elektromagnetický uchopovač	
Obvod	Pneumatický
Jmenovité pracovní zatížení	3400 N
Max. trhací síla	10150 N
Rozměr zvedací plochy	223x70 mm
Výška	254 mm
Šířka	98 mm
Hloubka	264 mm
Hmotnost	9,6 kg
Pracovní tlak	0,3-1 MPa
Bezpečnost	EN13155

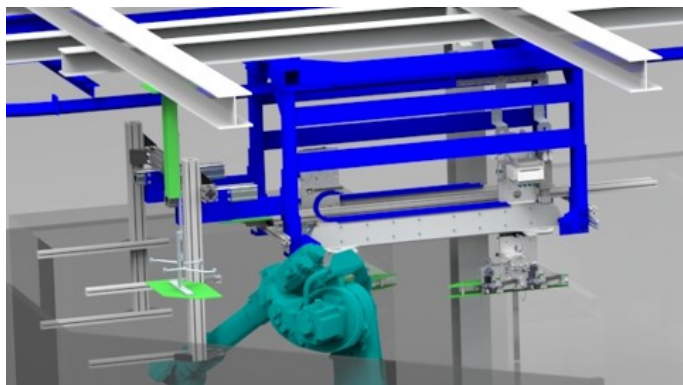
Jmenovité pracovní zatížení znamená, že uchopovač je schopen unést až 3400 N (340 kg), pokud je materiál bezprostředně na ploše uchopovače a magnetická síla není ovlivněna tlumící vrstvou. Maximální trhací síla je síla, která je potřeba pro odtrhnutí materiálu od uchopovače.

## 6.4 Senzory

Aby byla zaručena správná automatizace robotického pracoviště, musí být použito několik senzorů a kamer, které manipulátoru nahrazují smysly.

### 6.4.1 Stabilizátor háčků

Stejně jako u navěšování pružin na lakovací dopravník, tak i u svěšování by bylo nutné použít stabilizátor háčků a lakovacího závěsu. Stabilizační zařízení, které je již vyvinuto, je přístroj, ve kterém se pohybují uchopovače stejnou rychlostí jako výrobní linka. Uchopovače přichytí háčky včetně lakovacího závěsu a stabilizují je. Stabilizace háčků je kritickým krokem pro správné navěšení i budoucí svěšení robotem, jelikož svěšené pružiny musí být od háčků odtrhnuty a háčky musí zůstat na lakovacím dopravníku ve stejné poloze.

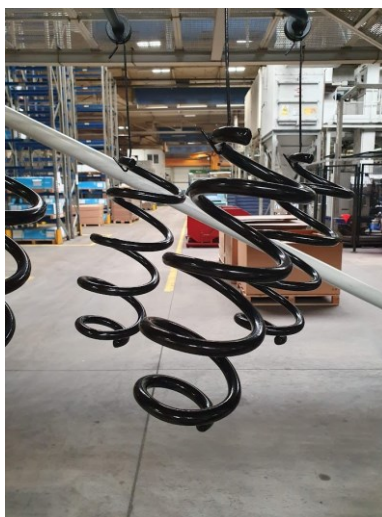


*Obr. 38: Stabilizační zařízení háčků.*

#### **6.4.2 Svěšovací kamery**

Pro správné uchopení pružiny uchopovačem je nutné znát přesnou polohu háčku a pružiny. Toho lze docílit použitím kamer a senzorů. Tento způsob je již použit na automatizovaném pracovišti navěšování pružin na lakovací dopravník. Při použití stejného zařízení musí robot u svěšení znát výšku pružiny, její vzdálenost od manipulátoru nebo vzdálenost háčku a sklon zavěšení. Při nesprávném nastavení by mohlo dojít k poničení výrobku a háčku. Tyto informace by následně převzal robot a k pružině by najel pod daným úhlem a v dané vzdálenosti.

Vzdálenost vnějšího obvodu pružiny od háčku je určena průměrem pružiny. Sklon zavěšení pružiny se může lišit podle tvaru pružiny a váhy – těžiště.



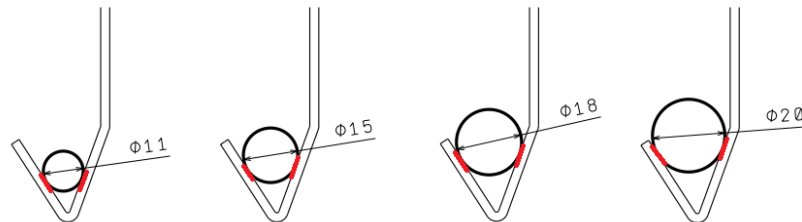
*Obr. 39: Zavěšení pružiny na lakovacím dopravníku.*

#### **6.4.3 Kontrola nezalakovaného místa**

Aby bylo pracoviště plně automatizováno, je důležité, aby nezalakované místo na pružině bylo rozpoznáno a zalakováno. Detekci tohoto místa lze provést způsoby:

1. Pomocí souřadnic.
2. Kamerou.
3. Termokamerou.

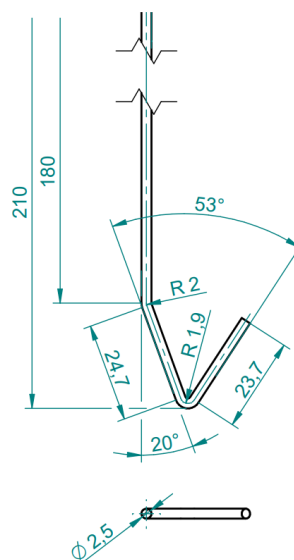
Pokud bude počítáno s jedním robotem a uchopovačem na jednu pružinu, pak čas na odtrhnutí, detekci nezalakovaného místa a nalakování bude 3,75 s při rychlosti linky 16 ks/min. To je doba, než ke stanovišti dojde další závěs s pružinami. Cílem společnosti je dosažení výrobní rychlosti linky 18 ks/min., takže v tomto případě zbývá ramenu pouze 3,33 s na provedení těchto úkolů. Tento čas je však na provedení všech úkolů nedostatečný, a proto bude počítáno se dvěma roboty na každé straně lakovacího dopravníku.



Obr. 40: Příklady doteku pružiny a háčku při různých průměrech drátu.

### Detekce pomocí souřadnic

Háček má specifický tvar, který svírá úhel 53°. Pokud jsou však úhly a rozměry háčku známy, může být vypočítáno místo, které je při daném průměru drátu pružiny v kontaktu s háčkem.



Obr. 41: Výkres háčku s jeho rozměry.



Jelikož háček svírá úhel  $53^\circ$  ( $33^\circ$  z jedné a  $20^\circ$  z druhé strany), bude nezalakované místo vždy pod úhlem  $33^\circ$  a  $20^\circ$  k horizontální ose (viz. obr. 42). Výseč mezi nezalakovanými body bude tedy vždy mít úhel  $127^\circ$ . Pokud chceme zjistit pozici nezalakovaných míst od středu kružnice, využijeme goniometrických rovnic cosinus a sinus.

- Pozice bodu 1 na ose x:

$$x = \cos(\varphi) * r \quad \text{Rov. 1}$$

Kde:

$\varphi$  = úhel od vertikální osy kružnice

r = poloměr kružnice

$$x = \cos(33^\circ) * 10 = 8,39 \text{ mm}$$

- Pozice bodu 1 na ose y:

$$x = \sin(\varphi) * r \quad \text{Rov. 2}$$

$$x = \sin(33^\circ) * 10 = 5,45 \text{ mm}$$

- Pozice bodu 2 na ose x:

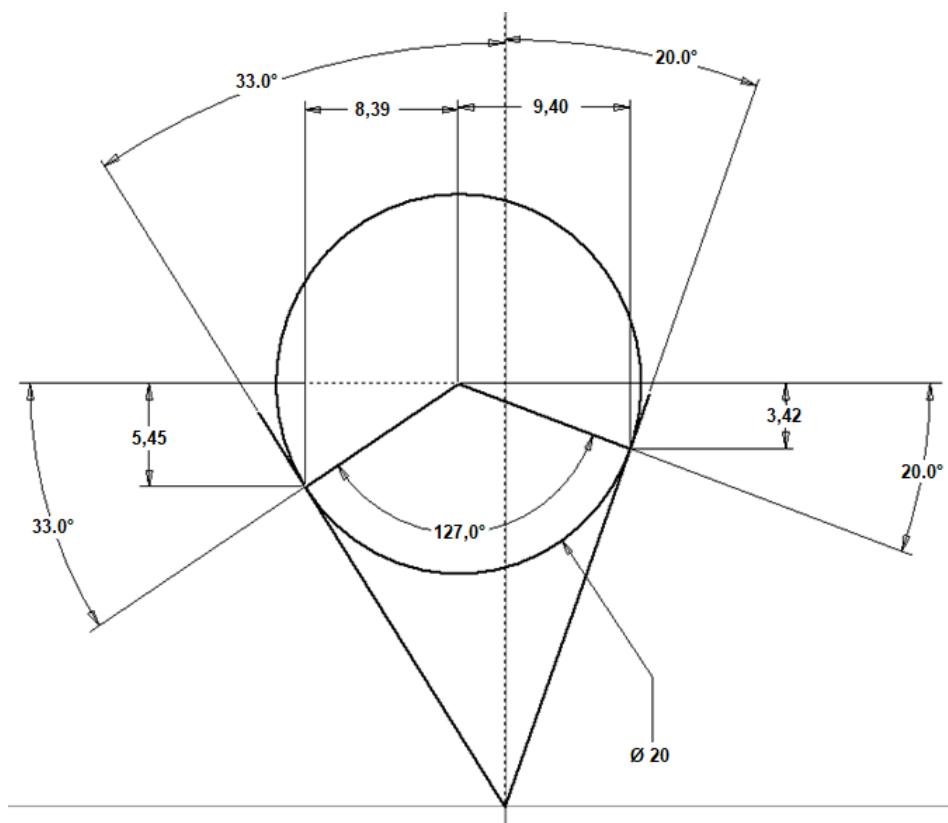
$$x = \cos(20^\circ) * 10 = 9,40 \text{ mm}$$

- Pozice bodu 2 na ose y:

$$x = \sin(20^\circ) * 10 = 3,42 \text{ mm}$$

Tab. 5: Pozice nezalakovaného místa pro různé velikosti poloměru drátu.

Poloměr [mm]	Pozice 1		Pozice 2	
	X [mm]	Y [mm]	X [mm]	Y [mm]
4,5	3,77	2,45	4,23	1,54
5	4,19	2,72	4,70	1,71
5,5	4,61	3,00	5,17	1,88
6	5,03	3,27	5,64	2,05
6,5	5,45	3,54	6,11	2,22
7	5,87	3,81	6,58	2,39
7,5	6,29	4,08	7,05	2,57
8	6,71	4,36	7,52	2,74
8,5	7,13	4,63	7,99	2,91
9	7,55	4,90	8,46	3,08
9,5	7,97	5,17	8,93	3,25
10	8,39	5,45	9,40	3,42
10,5	8,81	5,72	9,87	3,59
11	9,23	5,99	10,34	3,76



Obr. 42: Zjištění pozic nezalakovaného místa.

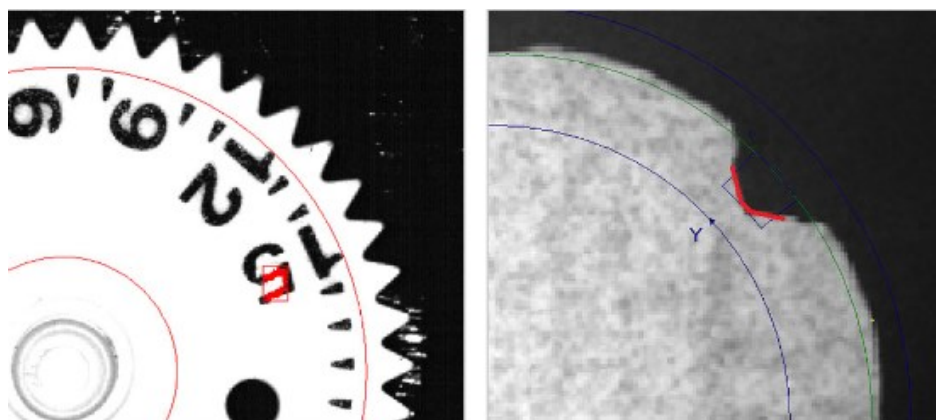
Při výpočtu souřadnic nezalakovaného místa bude muset lakovací stroj znát poloměr vyráběné pružiny. Z poloměru následně vypočítá, nebo využije hodnot předem vypočítaných, k přesnému najetí nezalakovaného místa k tryskám a následnému správnému zalakování.

### Detekce pomocí kamery COGNEX Edgeinspection

Pro detekci lze použít kamery, které místo na pružině najdou díky vadě laku. Problémem je zde však samotná velikost místa (2x5 mm) a černý lesklý lak. Při nasvícení laku pružiny může docházet k odleskům, které může následně kamera vyhodnotit špatně.

Firma COGNEX vyrábí kamery InspectEdge a Flexible Flaw Detection, které lokalizují hrany a vady výrobku. Tyto kamery jsou schopné vyhledávat mezery, vady podél hran a další plošné a povrchové vady. Kamery zároveň měří minimální a maximální odchylky, vyhledávají vady na hranách a plochách výrobku, a současně odhalí i vady tisku. Kamery lze snadno konfigurovat pro rovné, kruhové nebo nestejněměrné hrany a klasifikují vady podle celkové plochy, délky nebo hloubky. Tyto kamery nabízejí vysokou flexibilitu při

hledání mezer podél dráhy čar a kontrole na vady hran, proto by právě kamera InspectEdge mohla být ideální volbou pro hledání nezalakovaného místa.

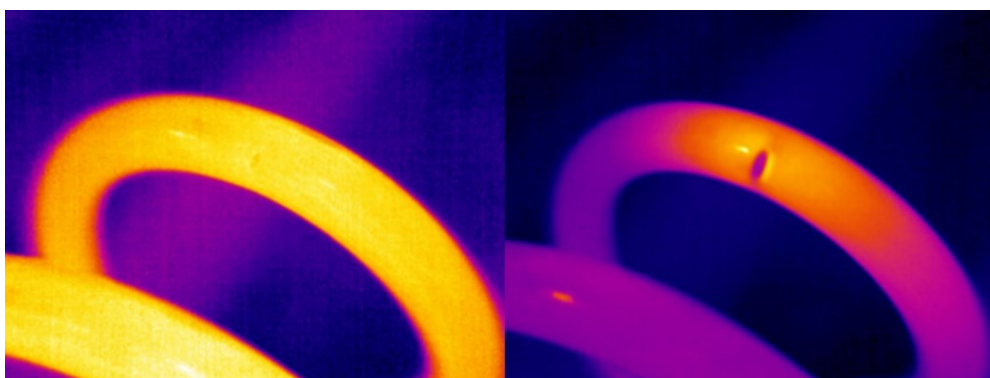


Obr. 43: Ukázka kamerového vidění kamery COGNEX InspectEdge a Flexible Flaw Detection. [39]

### Detekce pomocí termokamery

Jelikož emisivita barvy laku a samotného kovu pružiny jsou odlišné, bylo experimentálně vyzkoušeno hledání nezalakovaného místa pomocí termokamery. Při prvním pokusu (obrázek níže vlevo) toto místo viditelné nebylo. Fotka tohoto místa termokamerou probíhala pár vteřin po odebrání z lakovacího dopravníku a pružina i lak už měly pokojovou teplotu.

Z tohoto důvodu bylo nezalakované místo ohřáto pomocí horkovzdušné pistole. Jak je vidět na obrázku níže vpravo, lze nezalakované místo při lokálním ohřevu dobře vidět. Důležité je zmínit, že nezalakované místo vyniklo i při minimálním ohřevu (ohřev o 10 °C). Z tohoto důvodu by teoreticky bylo možné hledat nezalakované místo pomocí termokamery s lokálním ohřevem bez negativních vlivů na samotnou pružinu nebo lak. Takové stanoviště by proto muselo mít určitý zdroj tepla (zářivka) nebo infračerveného záření.



Obr. 44: Termofotografie pružiny bez lokálního ohřevu (vlevo) a s lokálním ohřevem (vpravo).

I přesto, že je nezalakované místo při ohřevu na fotografii pěkně vidět, neznamená to, že lokalizace tohoto místa bude bezproblémová. Výhodou tohoto typu lokalizace je však eliminace odlesků způsobená lesklou černou barvou laku.

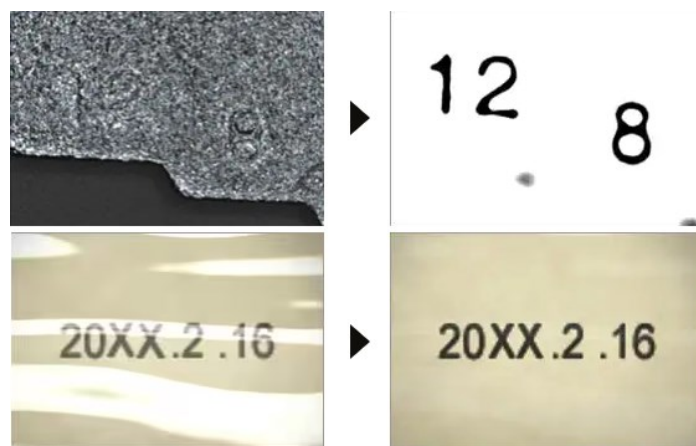
Společnost Workswell nabízí radiometrickou kameru SMARTIS, která by byla schopna nezalakované místo najít a zároveň určit souřadnice tohoto místa. Nevýhodou je však výrazně vyšší cena než u předchozí uvedené kameře od značky COGNEX.

#### 6.4.4 Zalakování

Místo zalakování válečkem, jak tomu bylo doposud, bude nanášena barva na nezalakované místo pomocí trysek. Společnost spolupracuje s firmou Reajet, která toto zařízení vyvíjí. Lakovací zařízení se stacionárními tryskami bylo již v minulosti firmou použito, ale z důvodu zasychání a ucpávání trysek přestalo být používáno. Přístroj musí být schopen zároveň barvu v zásobníku míchat a ředit. Dnes se pracuje na způsobu, jak tryskat barvu na nezalakované místo co nejefektivněji a bez komplikací. Výhodou tohoto zařízením je, že je plně automatizováno a zalakování trvá pouze jednu vteřinu.

#### 6.4.5 Kontrola zalakovaného místa

Pro kontrolu zalakování by mohla být použita kamera LumiTrax od značky Keyence. Tato kamera pomocí vysokorychlostní synchronizace snímače CMOS a směru osvětlení vytváří zobrazovací metodu fotografie tvaru (nepravidelností) a textury analýzou vícenásobných snímků osvětlených v různých směrech. Kamera je proto vhodná pro vizualizaci nerovných povrchů – kontrola značení na povrchu kovových dílů (ryté části jsou zvýrazněny na obrázku níže) a pro kontrolu textu na filmu – odstraňuje odlesky, které mohou negativně ovlivnit kontrolu.



Obr. 45: Funkce kamery Keyence LumiTrax. [40]

## 7 NAVRŽENÍ PRACOVIŠTĚ

K virtuálnímu návržení robotického pracoviště byl použit program od společnosti Yaskawa MotoVRC. MotoVRC je kompletní softwarová sada pro virtualizaci robotických systémů založených na NX100, DX100 a FS100. Software umožňuje grafickou virtualizaci robotické buňky i robotického systému, 3D simulace a offline programování bez nutnosti instalace robota. Software umožňuje také optimalizaci chodu pracoviště, výpočet a nastavení akcelerace a decelerace v kritických pohybech a nastavení reálné hmotnosti nástroje. Virtualizovaný ovladač také umožňuje, aby simulační software pracoval a zobrazoval rozhraní programovacího ovladače, které je totožné se skutečným ovladačem. Díky této funkci lze software použít pro:

- Optimalizaci umístění robotů a zařízení.
- Přesné výpočty cyklů.
- Virtuální ovládání robota a konfiguraci systému.
- Grafickou simulaci a detekci kolizí.
- Offline programování.
- Analýzu rozsahu a přístupnosti.
- Konfiguraci jednotky funkční bezpečnosti.
- Vzdálený přístup ke skutečné řídicí jednotce robota.



Obr. 46: Virtualizovaný programovací ovladač-Pendant.

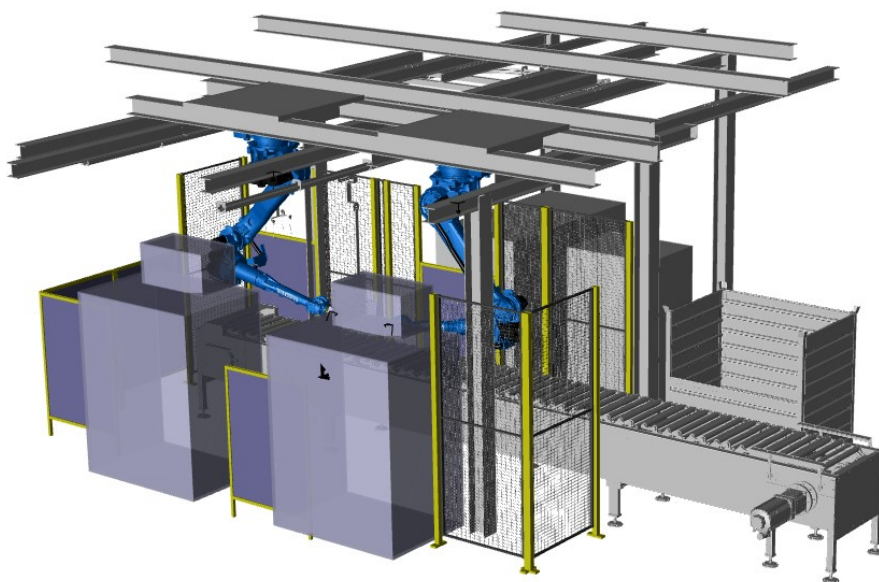
## 7.1 Varianta 1

Jak již bylo zmíněno, při svěšování jedním robotem a uchopovačem pro jednu pružinu by čas na provedení všech úkolů nesměl být delší než 3,75 s. Tento čas je pro provedení všech potřebných úkolů prakticky nereálný, proto v první verzi návrhu pracoviště bylo počítáno se dvěma manipulátory YASKAWA GP35L. Díky jejich nosnosti 35 kilogramů musí každý manipulátor odebírat z lakovacího dopravníku pouze jednu pružinu. Manipulátory budou umístěny nad dopravníkem obráceně z každé strany lakovacího dopravníku.

### 7.1.1 Layout pracoviště

Na obrázku níže je vidět návrh pracoviště. Oproti současnému stavu by byl rozvaděč, který byl dříve mezi lakovacím dopravníkem, přesunut na místo vedle stroje na čištění háčků. V této části by také byly umístěny řídicí jednotky robotů.

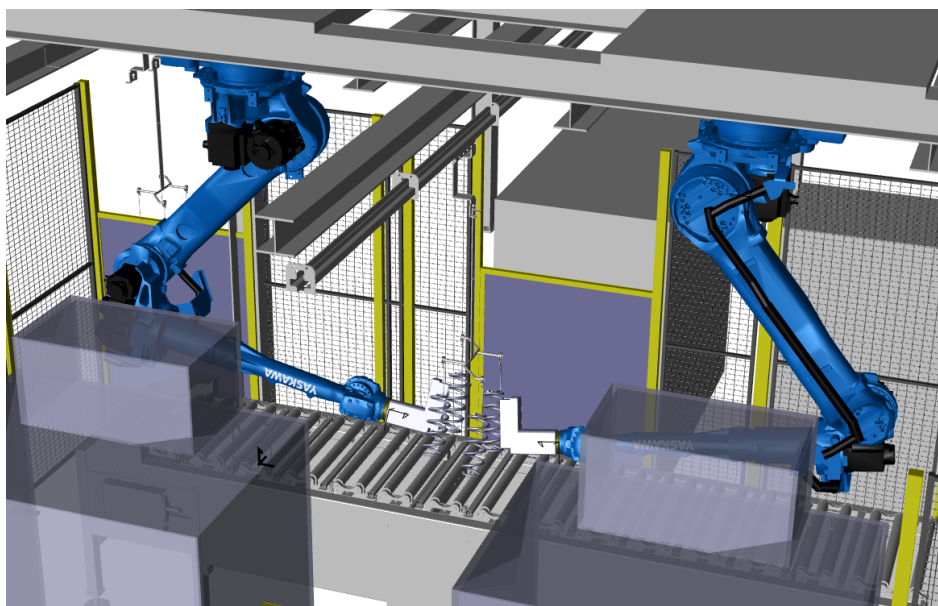
Další upravenou položkou je dopravník. Ten by byl prodloužen tak, aby měly roboty dostatečný prostor pro efektivní položení pružin na dopravník, který vede ke kontrolnímu stanovišti a etiketování.



*Obr. 47: Navržení pracoviště var. 1.*

Buňky naproti robotům by obsahovaly kamerový systém a lakovací stroj. V horní buňce by byly umístěny jednak kamery, které by hledaly nezalakované místo a jednak kamery, které

by následně zalakované místo kontrolovaly. Spodní buňka reprezentuje lakovací zařízení. Buňky by byly umístěny 0,8 m od dopravníku.



Obr. 48: Detail manipulátorů var. 1.

### 7.1.2 Rychlost cyklu

Na následujícím obrázku je zaznamenán cyklus manipulátoru. Jednotlivé body značí operace, které musí být manipulátorem provedeny. Čas potřebný k provedení jednotlivých kroků byl zvolen a bylo s ním počítáno i v případě simulace, kdy jednotlivé kroky a časy byly zaznamenány do softwaru MotoVRC. Softwarem byla následně vypočítána dráha manipulátoru, čas cyklu a provedena simulace. Rychlost manipulátoru byla nastavena na 100 % a software následně spočítal čas potřebný k dobrzdění motorů tak, aby byl manipulátor schopen zastavit bez chyby na předem daném místě.



Obr. 49: Úkoly manipulátoru a jejich čas ke splnění.

Jak již bylo zmíněno, rychlost odebrání pružin z jednoho závěsu lakovacího dopravníku dvěma manipulátory musí být do 14,9 s. Pokud by byl cyklus delší, roboty by nestihly odebrat pružiny ze závěsu a celý lakovací dopravník by musel být zastaven, a tím by došlo ke zničení pružin v lakovací peci.

Následující tabulka značí hodnoty času vypočítané softwarem pro jednotlivé pohyby manipulátoru, kdy poslední hodnota značí celkový čas cyklu svěšení.

Tab. 6: Kroky manipulátorů a čas provedení ve var. 1.

Kroky	Číslo	Čas [s]	Kroky	Číslo	Čas [s]
Uchopení 1. pružiny	1	0.4	Uchopení 2. pružiny	15	9.5
Održení	2	0.4	Održení	16	9.6
Odjetí od háčku	3	0.6	Příjezd ke skenu	17	10.1
Příjezd ke skenu	4	1.4	Sken 1. místa	18	10.7
Sken 1. místa	5	2.3	Sken 2. místa	19	11.4
Sken 2. místa	6	2.9	Odjezd od skenu	20	11.6
Odjezd od skenu	7	3.1	Lakování	21	13.4
Lakování	8	4.9	Příjezd ke kontrole	22	13.6
Příjezd ke kontrole	9	5.1	Kontrola 1. místa	23	14.3
Kontrola 1. místa	10	6.0	Kontrola 2. místa	24	14.9
Kontrola 2. místa	11	6.5	Odjezd od skenu	25	15.2
Odjezd	12	6.7	Položení pružiny na dopravník	26	16.4
Položení pružiny na dopravník	13	8.2	Odjezd od dopravníku	27	16.5
Odjezd od dopravníku	14	8.3	Příjezd k další pružině	28	17.5

Z tabulky je zřejmé, že cyklus odebrání dvou pružin ze závěsu jedním robotem trvá 17,5 s. Tento čas je neakceptovatelný, protože celkový čas musí být nižší nebo stejný jako čas, který ujede dopravník za 62 cm, to znamená 14,9 s.

### 7.1.3 Výpočet ceny pracoviště

Při návrhu pracoviště je nutné počítat s různými výdaji, které by byly pro realizaci potřeba. Nejdůležitější položkou budou roboty. Kromě ceny samotných robotů je nutno počítat i s nástroji, které se budou používány, zapojením a kabeláží.

Dalším důležitým faktorem je konstrukce, na které budou roboty zavěšeny. Z tohoto důvodu by bylo nutné posouzení statikem, který určí, zda konstrukce váhu robotů unese, popřípadě navrhne vyztužení konstrukce. Dále by bylo nutné přestavení současného pracoviště, aby robotu v cestě nic nepřekáželo a nedošlo tak k poničení pracoviště (přesunutí rozvaděče, prodloužení dopravníku).



Velmi důležitou položkou na seznamu by byl kamerový systém. Ke správnému svěšení pružin z dopravníku by byly potřeba dvě svěšovací kamery, které by byly umístěny u stabilizátoru háčků. Následně další dvě kamery by byly nutné na určení polohy nezalakovaného místa a dvě kamery na kontrolu zalakovaného místa.

Tab. 7: Kvantifikovaný odhad cen komponent pracoviště – var 1.

Pozice	Položka	Počet kusů	Cena za kus bez DPH [€]	Suma bez DPH [€]
<b>1.</b>	<b>Komponenty</b>			<b>524 791 €</b>
1.1	Robotizované pracoviště s dopravníkem	1		151 881 €
<b>1.2</b>	<b>Kamerový systém</b>			<b>72 906 €</b>
1.2.1	Svěšovací kamery	2	13 353 €	26 706 €
1.2.2	COGNEX EdgeInspection	2	12 250 €	24 500 €
1.2.3	Keyence LumiTrax	2	10 850 €	21 700 €
1.3	Lakovací stůl	2	38 790 €	77 580 €
1.4	Technologie Reajet	2	39 499 €	78 998 €
1.5	Úprava konstrukce	1	18 745 €	18 745 €
1.6	Zaslání	1	2 000 €	2 000 €
1.7	Oplocení	1	20 330 €	20 330 €
1.8	Kabeláž 10 m	1	19 600 €	19 600 €
1.9	Dokumentace + CE	1	9 845 €	9 845 €
<b>2.</b>	<b>Cestovní náklady</b>			<b>18 969 €</b>
2.1	Mechanici	40 h		
2.2	Elektrikáři	40 h		
2.3	Kontrolor	30 h		
2.4	Programátor	30 h		
<b>3.</b>	<b>Uvedení do provozu</b>			<b>46 375 €</b>
3.1	2 x Mechanik	120 h		
3.2	2 x Elektrikář	120 h		
3.3	1 x Kontrolor	100 h		
3.4	1 x Programátor	100 h		
<b>Celková suma</b>				<b>590 135 €</b>

Kvantifikovaný odhad cen jednotlivých komponent pracoviště byl stanoven na 524 791 €, cestovní náklady techniků 18 969 €, uvedení linky do provozu 46 375 €. Celková investice do automatizovaného pracoviště návrhu varianty 1 byla stanovena na 590 135 €, při dnešním (20.4.2023) kurzu 23,5 Kč/€ to znamená 13 868 173 Kč. Vypočítané sumy jsou orientační a celková cena se může lišit podle aktuální ekonomické situace.

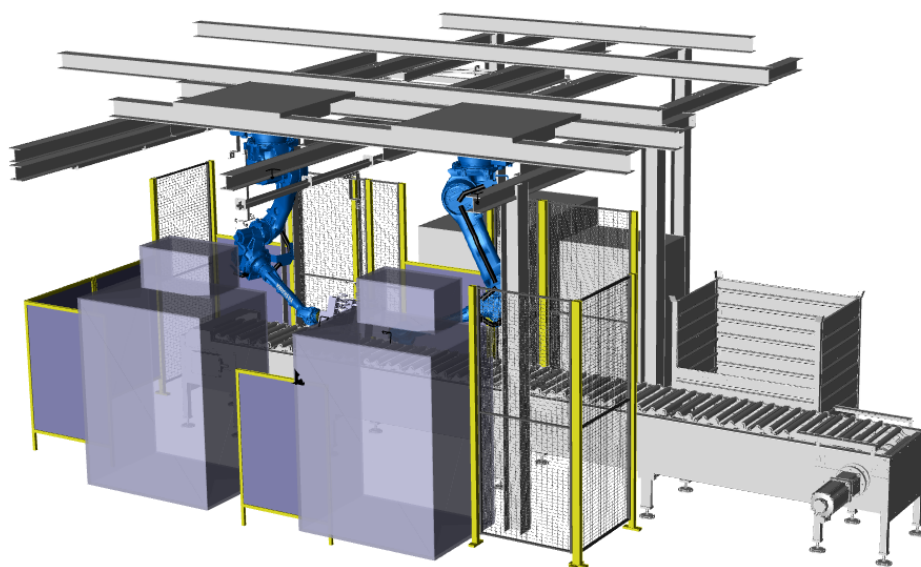
## 7.2 Varianta 2

Druhá varianta byla stanovena s použitím dvou robotů YASKAWA GP50 s dvojitým elektromagnetickým uchopovačem. Oproti první verzi by zde manipulátory pracovaly se dvěma pružinami zároveň. Tímto způsobem by se značně zrychlil cyklus provedení zadaných úkolů, jelikož roboty by vzaly čtyři pružiny z jednoho závěsu současně. Dále je počítáno s kamerou pro dohledání nezalakovaného místa a kamerou pro kontrolu zalakování pro každou pružinu. To znamená, že by se počet kamer zdvojnásobil. Dále by zde musel být použit lakovací stroj, který dokáže obě pružiny zalakovat současně, to znamená, že musí mít 4 trysky (na každou pružinu 2).

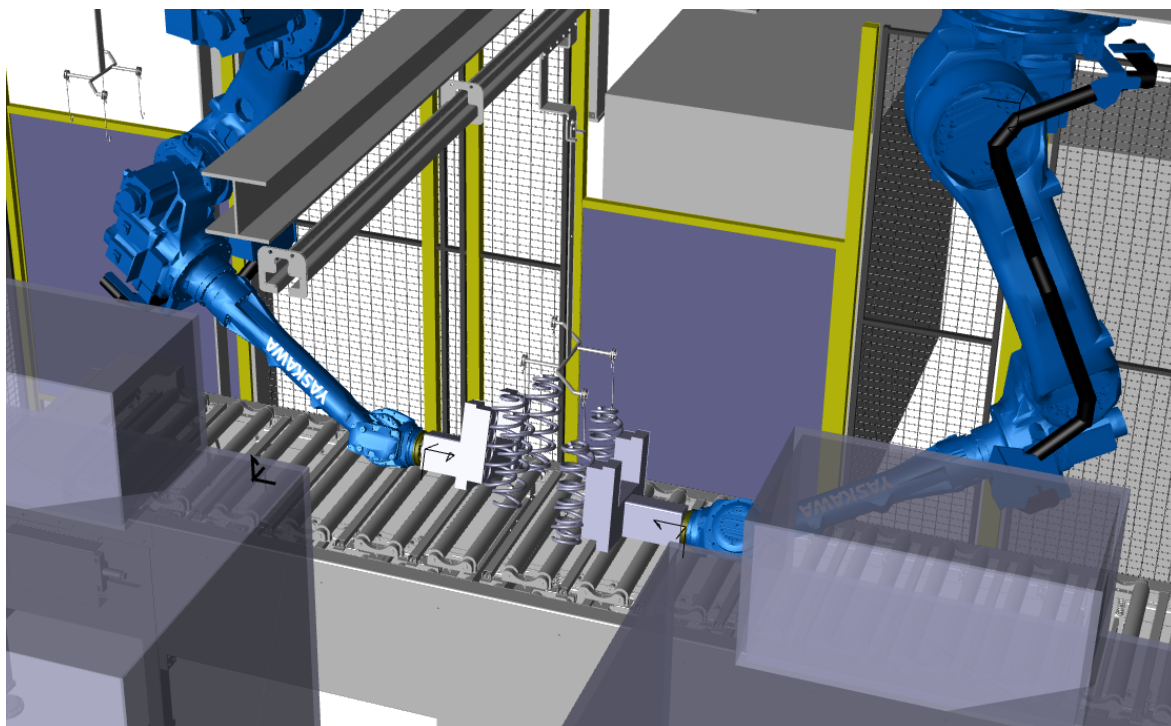
### 7.2.1 Layout pracoviště

Rozložení pracoviště bylo zachováno jako v první variantě, s tím rozdílem, že počet kamer v buňkách je zdvojnásoben tak, aby pro každou pružinu byla jedna kamera. Zároveň bylo uvažováno, že v každém lakovacím zařízení by byly 4 trysky, aby zalakování všech čtyř pružin probíhalo současně.

Pohyb robotů by představoval odtrhnutí pružiny z lakovacího dopravníku, lokalizaci nezalakovaného místa, přesun k lakovacím tryskám a zalakování, následný přesun do kamerového boxu nad lakovacím strojem, kontrolu zalakování a položení pružin na dopravník pod robotem.



Obr. 50: Layout navrženého pracoviště var.2.



Obr. 51: Detail manipulátorů.

### 7.2.2 Rychlost cyklu

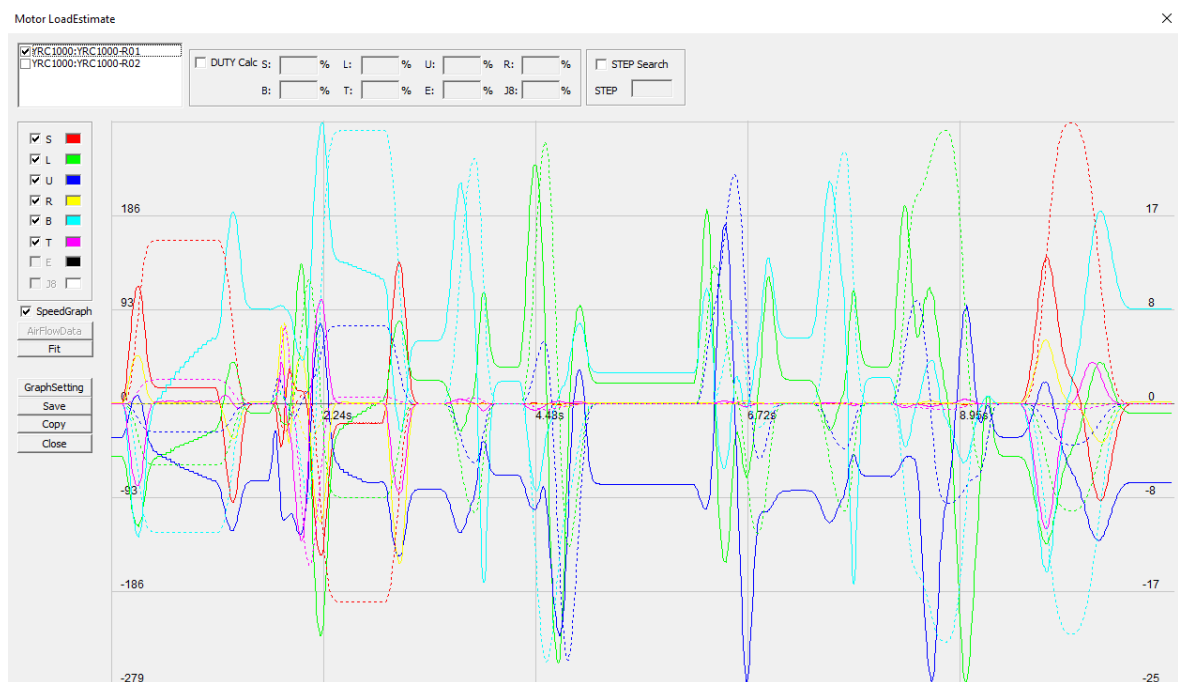
Celkový čas cyklu vypočtený pomocí softwaru MotoVRC je 10,3 s. Podle tohoto času manipulátory cyklus stíhají. Z časového úseku 14,9 s, kdy lakovací dopravník ujede vzdálenost 62 cm, mají manipulátory ještě 4,5 s rezervu. Manipulátory by byly s těmito časy schopny stíhat takt výrobní linky až 3,6 m/min, to znamená 20 pružin/min.

Tab. 8: Kroky manipulátorů a čas provedení ve var. 2.

Krok	Číslo	Čas [s]
Uchopení	1	0.8
Odrhnutí	2	0.9
Odjezd od háčku	3	1.1
Příjezd ke skenu	5	1.9
Sken 1. místa	6	2.7
Sken 2. místa	7	3.6
Odjezd od skenu	8	3.9
Lakování	9	5.7
Příjezd ke kontrole	11	6.2
Kontrola 1. místa	12	7.0
Kontrola 2. místa	13	7.9
Odjezd	14	8.0
Položení pružiny na dopravník	15	8.4
Odjezd od dopravníku	16	9.2
Příjezd k dalšímu závěsu	17	10.3

### 7.2.3 Životnost manipulátorů

Software MotoVRC dokáže z nasimulovaných pohybů manipulátoru určit i jejich životnost. Na obrázku níže je graf, v kterém jsou zaznamenány odhadované točivé momenty a rychlosti každé osy robota. Plné čáry značí točivé momenty a přerušované čáry značí rychlosti každé z os. Životnost os manipulátoru je dnes zjišťována analýzou oleje a maziv na kovové částice. Hodnoty životnosti ze softwaru jsou schopny se přiblížit reálným hodnotám, jsou však pouze orientační.



Obr. 52: Zatížení motorů manipulátoru č. 1 var.2.

Za pomoci využití dat točivých momentů a rychlostí jednotlivých os, je software schopný spočítat životnost jednotlivých os v hodinách. Na tabulce níže můžeme vidět hodnoty průměrné rychlosti, minimální a maximální rychlost a točivé momenty jednotlivých os společně s hodnotou životnosti v hodinách.

	S	L	U	R	B	T	E
Average speed(OUT)[rpm]	371.86	654.36	541.50	11.01	445.80	31.92	0.00
Average speed(IN)[rpm]	2.99	4.64	3.09	0.16	6.63	0.78	0.00
Maximum speed[rpm]	25.73	24.98	23.48	7.52	25.00	14.80	0.00
Average torque[Nm]	621.03	2,198.78	1,126.89	222.43	325.15	153.28	0.00
Maximum torque[Nm]	1,396.00	5,692.05	2,895.84	533.93	645.18	259.94	0.00
Speed Reducer Life[Hr]	36000 ove	36000 ove	36000 ove	36000 ove	20,690	36000 ove	36000 ove

Obr. 53: Předpověď životnosti manipulátoru č.1 var.2.



Obr. 54: Zatížení motorů manipulátoru č.2 var.2.

	S	L	U	R	B	T	E
Average speed(OUT)[rpm]	275.49	801.70	556.05	147.04	468.45	113.90	0.00
Average speed(IN)[rpm]	2.22	5.69	3.17	2.15	6.97	2.77	0.00
Maximum speed[rpm]	22.43	21.57	21.84	18.44	25.00	20.25	0.00
Average torque[Nm]	641.22	1,821.88	950.21	101.02	322.81	80.29	0.00
Maximum torque[Nm]	1,350.46	4,330.24	2,168.94	244.43	605.00	239.60	0.00
Speed Reducer Life[Hr]	36000 ove	36000 ove	36000 ove	36000 ove	20,170	36000 ove	36000 ove

Obr. 55: Předpověď životnosti manipulátoru č.2 var.2.

Hodnoty životnosti os u obou manipulátorů jsou větší než maximální hodnota nastavená na 36 000 h. U jediné osy B u obou manipulátorů je hodnota nižší a to 20 690 h u manipulátoru 1 a 20 170 u manipulátoru dva. I přesto je však tato hodnota vysoká a představuje životnost 2,3 let.

### 7.2.4 Výpočet ceny pracoviště

Výpočet ceny druhé varianty pracoviště je podobný jako u varianty první, s tím rozdílem, že je zde více kamer. V případě, že bude manipulátor odebírat dvě pružiny z lakovacího dopravníku současně, musí být na každou z nich použity 2 kamery – jedna na detekci nezalakovaného místa a druhá pro kontrolu zalakování. Zároveň u lakování by byly na jednu pružinu použity dvě trysky.

Tab. 9: Hrubý výpočet ceny pracoviště - var. 2.

Pozice	Položka	Počet kusů	Cena za kus bez DPH [€]	Suma bez DPH [€]
<b>1.</b>	<b>Komponenty</b>			<b>714 341 €</b>
1.1	Robotizované pracoviště s dopravníkem	1		170 033 €
<b>1.2</b>	<b>Kamerový systém</b>			<b>119 106 €</b>
1.2.1	Svěšovací kamery	2	13 353 €	26 706 €
1.2.2	COGNEX EdgeInspection	4	12 250 €	49 000 €
1.2.3	Keyence LumiTrax	4	10 850 €	43 400 €
1.3	Lakovací stůl	2	38 790 €	77 580 €
1.4	Technologie Reajet	4	39 499 €	157 996 €
1.5	Úprava konstrukce	1	18 745 €	18 745 €
1.6	Zaslání	1	2 000 €	2 000 €
1.7	Oplocení	1	20 330 €	20 330 €
1.8	Kabeláž 10 m	1	19 600 €	19 600 €
1.9	Dokumentace + CE	1	9 845 €	9 845 €
<b>2</b>	<b>Cestovní náklady</b>			<b>18 969 €</b>
2.1	Mechanici	40 h		
2.2	Elektrikáři	40 h		
2.3	Kontrolor	30 h		
2.4	Programátor	30 h		
<b>3</b>	<b>Uvedení do provozu</b>			<b>46 375 €</b>
3.1	2 x Mechanik	120 h		
3.2	2 x Elektrikář	120 h		
3.3	1 x Kontrolor	100 h		
3.4	1 x Programátor	100 h		
<b>Celková suma</b>				<b>779 685 €</b>

Částka za komponenty je u druhé varianty 714 341 €, z toho pouze kamerový systém 119 106 €. Celková cena návrhu je 779 685 €, při dnešním (20.4.2023) kurzu 23,5 Kč/€ tedy 18 322 598 Kč. Stejně jako u varianty 1 jsou ceny pouze orientační.

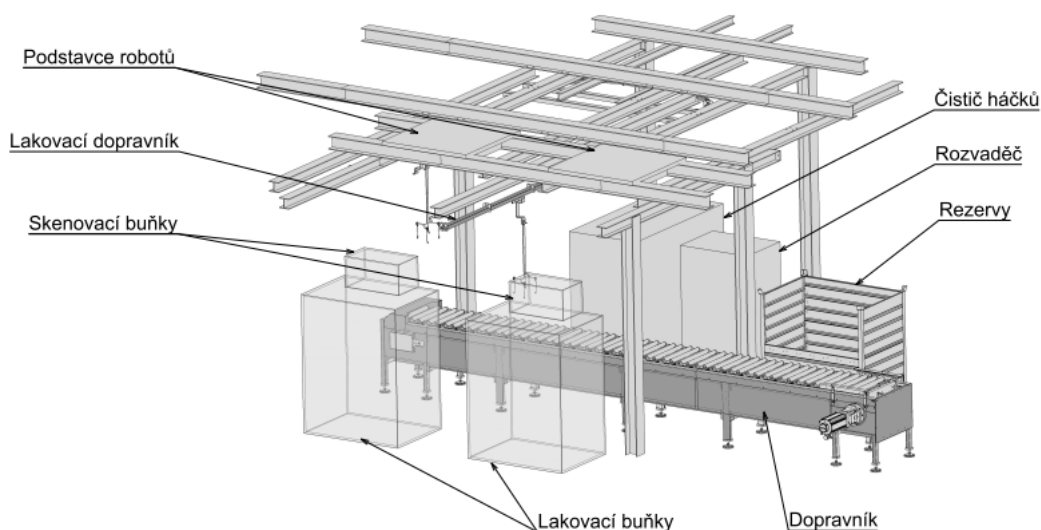
### 7.2.5 Doporučení

V případě, že by společnost v budoucnu chtěla pracoviště automatizovat, musela by počítat s částkou větší než 5 000 000 Kč. Současný stav pracoviště není pro automatizaci vyhovující a muselo by dojít k nákladným úpravám.

Nejdůležitější by bylo samotné rozmístění pracoviště. Rozvaděč, který je dnes mezi lakovacím dopravníkem by musel být přesunut, aby zde mohl být nainstalován robot. Další úpravou by bylo posunutí dopravníku, na který jsou pokládány pružiny. Konstrukce, na kterou by byly roboty zavěšeny, musí být schválena statikem a výrobcem lakovacího dopravníku. Místo mezi lakovacím dopravníkem, kde by byl umístěn jeden z robotů, má na

šířku pouze 2,4 metru. Proto by lakovací dopravník v místě svěšování musel být rozšířen, aby měl robot více místa. Pouze náklady na přestavbu současného pracoviště na automatizované by mohly dosáhnout až 75 000 €, tedy 1 760 000 Kč.

Dále by musela společnost vyřešit odkladové/vyrovnávací zásoby. Pokud by se pracoviště následující za svěšovacím pracovištěm zastavilo, musel by robot pokračovat ve svěšování a pružiny odkládat na předem dané bezpečné místo. Jelikož lakovací dopravník musí být stále v pohybu, muselo by být u svěšovacího stanoviště odkládací místo pro svěšené pružiny, například páternoster. Druhou možností by bylo zajistit bezpečný přístup na pracoviště a svěšování by bylo prováděno ručně s roboty v bezpečné a zajištěné poloze.



Obr 56: Layout navrženého pracoviště.

Počáteční investice do automatizovaného pracoviště by byla nákladná, nicméně z dlouhodobého hlediska by mohla být výhodná, budoucí cíl společnosti je do několika let navýšit výrobu na 20 ks/min.

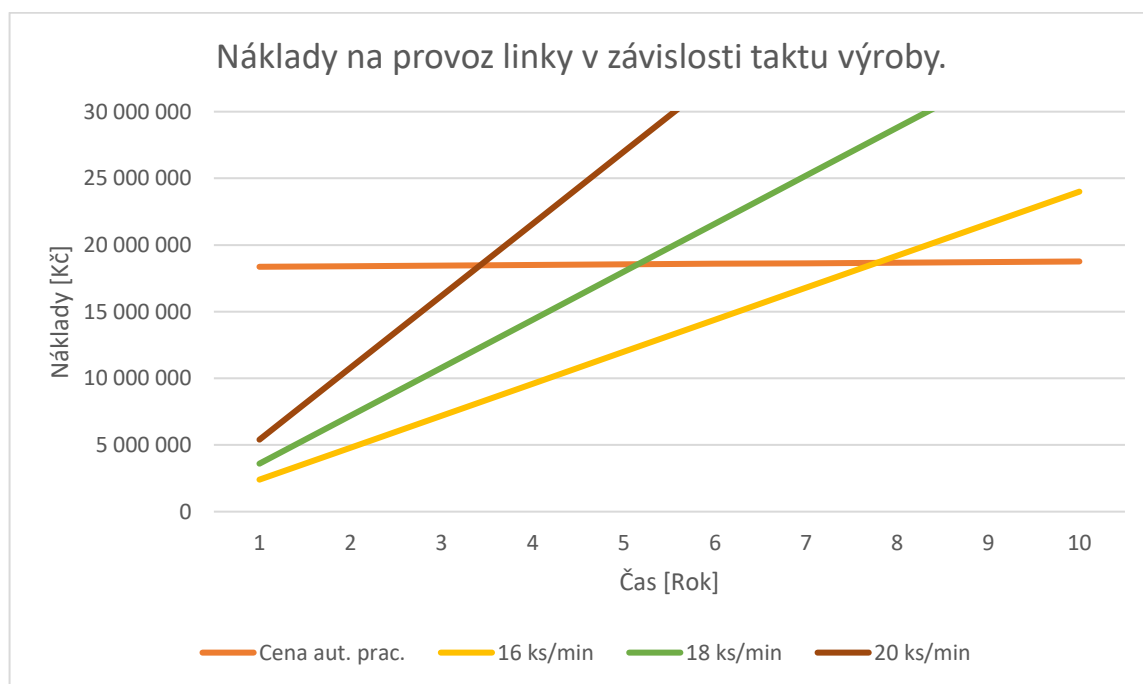
Na grafu 1 je graficky znázorněna nákladnost současného a automatizovaného pracoviště. Výdaje na současné pracoviště jsou v podobě platu čtyř zaměstnanců, kteří pružiny svěšují a lakují. Jak je již zmíněno, roční výdaje na současné pracoviště jsou 2 400 000 Kč/rok.

Nákladnost automatizovaného pracoviště se skládá z počátečních výdajů na zařízení pracoviště, ke kterým musí být připočítány náklady za roční provoz – servis a elektřina. Roční servis jednoho robota, kontrola a výměna oleje a maziv, se pohybuje okolo 620 €, tedy 14 570 Kč. Dále musí být započtena i cena spotřebované energie za pracoviště (15 000 Kč).

Při navýšení produkce se však zvýší i fyzické zatížení pracovníků. Vzhledem k bezpečnosti práce, kumulativní hmotnost ručně manipulovaných břemen nesmí u mužů překročit 10 000 kg za osmihodinovou pracovní dobu, u žen 6 500 kg.

Při současném provozu obsluha svěsí 850 pružin/h včetně přestávek. U automatizovaného pracoviště s rychlostí 18 pružin/min by obsluha i s přestávkami svěsila 970 pružin/h. Za osmihodinovou směnu při váze pružiny do 7 kg je zátěž pracovníka 54 320 kg. V tomto případě by se za jeden den na pracovišti muselo vystřídat 6 zaměstnanců. Roční náklady na obsluhu pracoviště by tedy z 2 400 000 Kč stouply na 3 600 000 Kč. Za 2 roky tedy 7 200 000 Kč.

Pokud by se počítalo s maximální možnou rychlostí svěšovacího pracoviště 20 pružin/min, obsluha by svěsila 1090 pružin/h. To znamená zátěž obsluhy 61 040 kg za osmihodinovou směnu. V tomto případě by se na pracovišti muselo vystřídat za den 9 pracovníků. Roční náklady by tedy činily 5 400 000, za dva roky tedy 10 800 000 Kč.



*Graf 1: Roční nákladnost současného a automatizovaného pracoviště.*

Splatnost automatizovaného pracoviště závisí na taktu výroby. Při současném taktu 16 pružin/min. by byla splatnost 7,5 let. Pokud by se takt navýšil na 18 pružin/min., splatnost linky by byla necelých 5 let. Při taktu 20 pružin/min. by byla splatnost pouhé 3,5 let.

Výhodou automatizovaného pracoviště by byla i nižší zmetkovitost, jelikož případné chyby zalakování by bylo možné snadno dohledat. Zároveň by došlo ke snížení nákladů na možné reklamace. Současné reklamace jsou způsobeny hlavně špatným zalakováním místa nebo



špatným navěšením pružiny na lakovací dopravník, což vede k přesunu kritického místa (místo styku pružiny s háčkem) na spodní části pružiny a větší náchylností na korozi. Další výhodou automatizovaného pracoviště by byla i vyšší výrobní rychlost.

## 8 POROVNÁNÍ SOUČASNÉHO A AUTOMATIZOVANÉHO PRACOVNÍŠTĚ

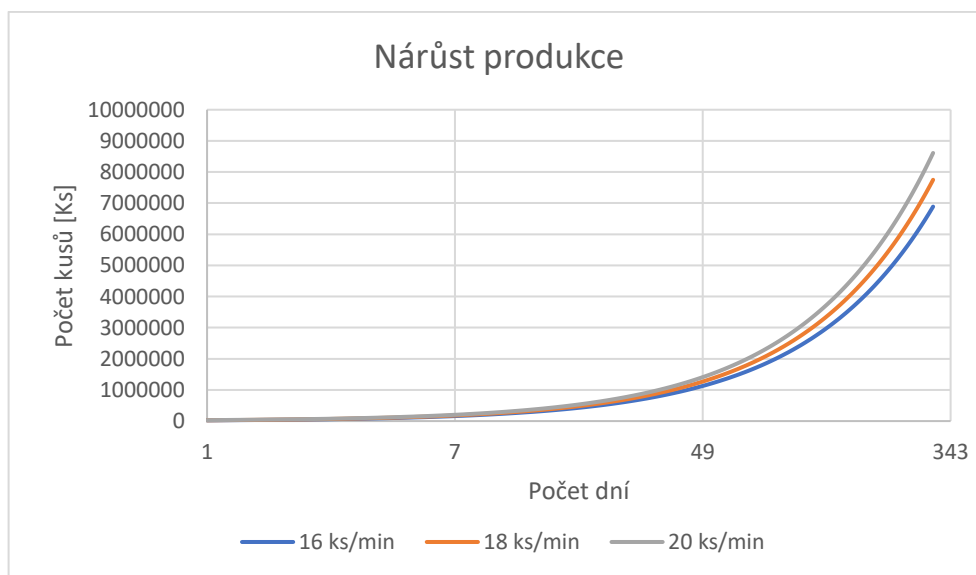
### 8.1 Spotřeba materiálu

Při zvýšení kapacity výroby se musí počítat i s větší spotřebou materiálu. Při zvýšení výroby na 18 ks/min by se za jednu hodinu spotřebovalo o 12,5 % více materiálu než při současném taktu výroby. Při 20 ks/min by vzrostla spotřeba o 25 % oproti současnému stavu.

S větší produktivitou musí společnost také počítat s odkládacími zásobami pro robota. Pokud nebude mít robot kam bezpečně uložit pružiny, celá výrobní linka by se musela zastavit. Nejvhodnějším místem pro odklad by mohl být páternoster. Při současné rychlosti linky a času 6 minut na výměnu polotovaru, musí rezervy obsahovat alespoň 96 pružin. Při zvýšení rychlosti výroby na 18 ks/min. by musel být počet kusů 108, při rychlosti 20 ks/min. až 120 kusů.

### 8.2 Efektivita výroby

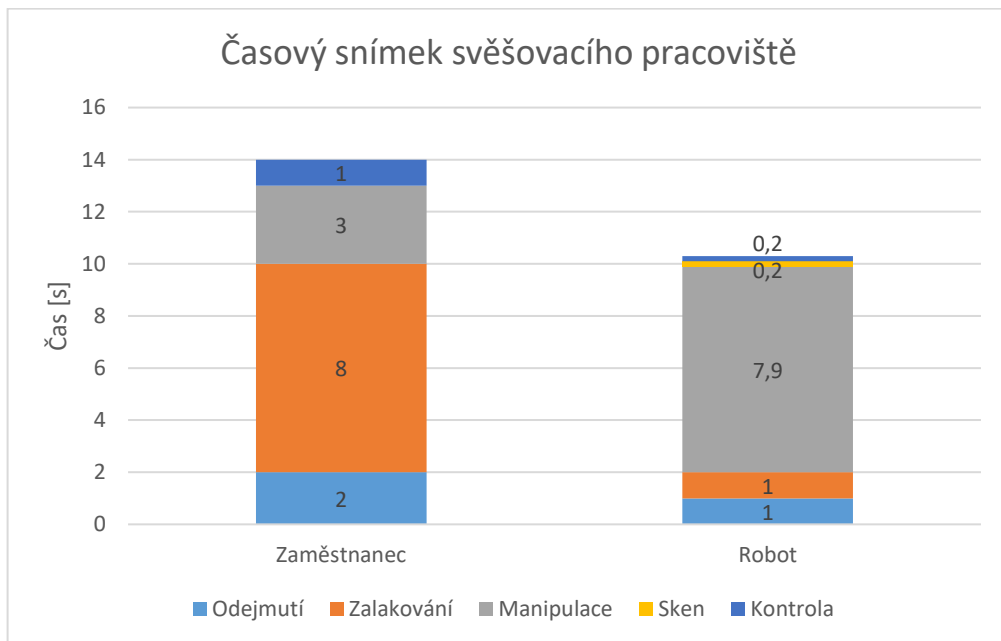
Současná výrobní linka je schopna vyprodukovat 960 kusů pružin za hodinu – za celý den při nepřetržité výrobě je to 23 040 ks. Navržené automatizované pracoviště při rychlosti výroby 18 ks/min by mělo hodinovou výrobu 1 080 kusů – za celý den by bylo možné vyprodukovat 25 920 kusů pružin neboli produktivita stoupne o 12,5 %. Při rychlosti 20 ks/min by byla linka schopna vyprodukovat 28 800 kusů za den. To je 25% nárůst oproti současnému taktu výroby.



Graf 2: Počet vyrobených pružin za den.

### 8.3 Časový snímek pracoviště

Časový snímek zobrazuje rozdíl mezi časovou náročností práce zaměstnance a robota při svěšování pružin. Při rychlosti výrobní linky 2,5 m/min si dokáže zaměstnanec čas rozvrhnout tak, aby svěšení a zalakování pružin z jednoho závěsu stíhal do doby, než dojde závěs další. Zatímco zaměstnanec stráví nejvíce času na samotném zalakování pružin, jelikož lakuje pružiny postupně, robot stráví většinu času manipulací. Čas manipulace u robota dosahuje téměř 8 sekund, protože dělá více pohybů, než zaměstnanec.



Graf 3: Časový snímek pracoviště svěšení.

## ZÁVĚR

V této diplomové práci byla navržena dvě automatizovaná pracoviště pro nejmenovanou firmu vyrábějící pružiny. Společně s rozložením pracoviště, zvoleným typem robotů a kamerového systému byla vypočítána i orientační cena pro realizaci.

Ve variantě 1, která počítá s použitím dvou manipulátorů, které budou pružiny odebrat jednu po jedné z lakovacího dopravníku je zřejmé, že manipulátory nejsou schopny takt linky stíhat. Simulace v softwaru MotoVRC ukazuje, že cyklus odebrání jedné pružiny jedním manipulátorem trvá 8,7 s. Na závěsu jsou však pro každého robota 2 pružiny, celkový cyklus trvá tedy 17,5 s. Časy a rychlosti zde použité jsou nastaveny na co nejrychlejší hodnotu, není zde možnost k vylepšení a tuto verzi nelze použít, protože lakovací dopravník za dobu 17,5 s ujede 72,9 cm místo 62 cm.

V druhé navržené verzi se opět počítá se dvěma manipulátory, ale v tomto případě mají chapadla pro odebrání dvou pružin ze závěsu současně. Zároveň zde bylo počítáno s kamerovou kontrolou a zalakováním pro každou pružinu zvlášť, to znamená navýšení nákladů, ale i rychlejší proces cyklu. V této verzi jsou manipulátory schopny stíhat podle simulace takt výrobní linky a mají ještě 4,5 s navíc, to znamená, že původní plán společnosti vyrábět 18 pružin za minutu je reálný. Maximální produktivita takto navrženého pracoviště je až 20 pružin/min.

Investice do automatizace za použití navrhovaného pracoviště varianty 2 představuje 18 322 597 Kč. Navržené pracoviště je schopno stíhat cílový takt firmy 18 ks/min, to znamená 12,5% nárůst produktivity výroby. Zároveň je toto pracoviště schopno teoreticky stíhat i takt linky 20 ks/min, což je nárůst o 25 % oproti původnímu stavu. Splatnost takového pracoviště závisí na výrobním taktu a hmotnosti vyráběných pružin. Za současného stavu by se pracoviště splatilo za 7,5 let. Pokud se však výroba navýší na 20 ks/min, splatnost pracoviště bude pouze 3,5 let. Zároveň automatizované pracoviště bude mít nižší zmetkovitost, popřípadě snazší dohledání.

I přesto však při realizaci pracoviště bude muset u svěšení asistovat alespoň jeden člověk. V případě, že dojde k zastavení výrobního procesu, nejsou manipulátory schopny bezpečně odkládat pružiny na určité místo. Tato situace se týká následujícího pracoviště, kde probíhá svěšování. Zároveň v časovém rozmezí 5–6 minut – při výměně polotovaru – musí člověk, kvůli produktivitě výroby navěšovat pružiny ze zásob. Z těchto důvodů by bylo nejvhodnější

použit k odkládání vyrovnávacích a rezervních zásob páternoster (regálový skladový systém).

Lidský faktor je sice doposud ve výrobě nutný a důležitý, ale neustálým zdokonalováním technologických postupů bude dosaženo vyšší intenzifikace a finanční úspory celého výrobního procesu, což je cílem každého úspěšného výrobce.

## 9 LITERATURA

- [1] JIREGNA, Iyasu a Goftila SIRATA. A REVIEW OF THE VEHICLE SUSPENSION SYSTEM. *Journal of Mechanical and Energy Engineering* [online]. (42), 109-114 [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: doi:10.30464/jmee.2020.4.2.109
- [2] LAVANYA, N., P. SAMPATH RAO a M. PRAMOD REDDY. Design and Analysis of A Suspension Coil Spring For Automotive Vehicle. *Int. Journal of Engineering Research and Applications* [online]. (49), 151-157 [cit. 2022-11-17]. ISSN 2248-9622.
- [3] PRAWOTO, Yunan. *Design and failure modes of automotive suspension springs: Engineering Failure Analysis* [online]. (158), 1155-1174 [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: doi:10.1016/j.engfailanal.2007.11.003
- [4] MANABA, Brighton a Vuyo HASHE. A review of composite leaf springs for automotive vehicles. *MATEC Web of Conferences* [online]. [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/202134700031
- [5] MAHOBIYA, Pradeep a Ruchika SAINI. A Review on Design, Analysis, and Optimization of Composite Leaf Springs for Different Materials Using ANSYS Software. *Journal of emerging technologies and innovative research* [online]. 2021, (812) [cit. 2022-11-17]. ISSN 2349-5162.
- [6] K čemu slouží a jak fungují pružiny pérování?. In: *Pietro autodily* [online]. [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: [https://www.pietro-eshop.cz/clanky-navody/\\_zobraz=k-cemu-slouzi-a-jak-funguji-pruziny-perovani](https://www.pietro-eshop.cz/clanky-navody/_zobraz=k-cemu-slouzi-a-jak-funguji-pruziny-perovani)
- [7] Vinuté pružiny. In: *Strojářská bible* [online]. [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://www.strojarskabible.cz/odpruzeni-vozidel/vinute-pruziny/>
- [8] KOBELEV, Vladimir. *Durability of Springs* [online]. Wien: Springer International Publishing, 2018 [cit. 2022-12-09]. ISBN 978-3-030-59253-0. Dostupné z: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-59253-0>
- [9] ANANTO, Rifqi Ryandi Dwi. Coil spring type analysis using the finite element method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. IOP Publishing, 2021, (10341) [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/1034/1/012016
- [10] REBEYRAT, S. Phosphating of bulk a-iron and its oxidation resistance at 400 °C. *Applied Surface Science* [online]. 2002, (1991-4), 11-21 [cit. 2022-12-09]. Dostupné z: doi:10.1016/S0169-4332(02)00152-6
- [11] BANCZEK, E.P., P.R.P. RODRIGUES a I. COSTA. Investigation on the effect of benzotriazole on the phosphating of carbon steel. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2006, (2016), 3701-3708 [cit. 2022-12-09]. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2006.09.003
- [12] SHENG, Minqi. The effects of nano-SiO<sub>2</sub> additive on the zinc phosphating of carbon steel. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2011, (20511), 3455-3460 [cit. 2022-12-09]. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2010.12.011
- [13] POKORNÝ, Petr, Vladimír MEJTA a Petr SZELAG. *Povrchová úprava: PŘÍSPĚVEK KTEORETICKÝM ZÁKLADŮM TVORBY FOSFÁTOVÉHO POVLAKU* [online]. In: . [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: [www.povrchovauprava.cz](http://www.povrchovauprava.cz)
- [14] *Pragochema: Přípravky pro fosfátování* [online]. [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: <https://www.pragochema.cz/index.php/produkty/pripravky-pro-fosfatovani>

- [15] SANKARA NARAYANAN, T.S.N. SURFACE PRETREATMENT BY PHOSPHATE CONVERSION COATINGS A REVIEW. *Reviews in Advanced Materials science* [online]. 2005, (9), 130-177 [cit. 2023-01-02].
- [16] *Manganese Phosphate Coating* [online]. In: . [cit. 2023-01-06]. Dostupné z: <http://www.phosphating.net/manganese-phosphating.html>
- [17] DU, Zhongyan. The Review of Powder Coatings. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering* [online]. 2016, (43), 54-59 [cit. 2023-01-04]. Dostupné z: doi:10.4236/msce.2016.43007
- [18] BAILEY, Adrian G. The science and technology of electrostatic powder spraying, transport and coating. *Journal of Electrostatics* [online]. 1998, (452), 85-120 [cit. 2022-12-09]. Dostupné z: doi:10.1016/S0304-3886(98)00049-7
- [19] YANG, Qingliang. An update on electrostatic powder coating for pharmaceuticals. *Particuology* [online]. 2017, (31), 1-7 [cit. 2023-01-04]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.partic.2016.10.001>
- [20] PRASAD, Leena, James MCGINITY a Robert WILLIAMS III. Electrostatic powder coating: Principles and pharmaceutical applications. *International Journal of Pharmaceutics* [online]. 2016, (5051-2), 289-302 [cit. 2023-01-04]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2016.04.016>
- [21] ANANTHI, K., S. PRIYADHARSINI a G. BRUNDHAVANI. Design and fabrication of Automated mechanism for chemical pre-treatment process in Powder coating. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. IOP Publishing, 2021, (1059012009) [cit. 2023-01-06]. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/1059/1/012009
- [22] SAUER, Dorothea, Matteo CEREIA, James DINUNZIO a James MCGINITY. Dry powder coating of pharmaceuticals: A review. *International Journal of Pharmaceutics* [online]. 2013, (4572), 488-502 [cit. 2023-01-05]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2013.02.032>
- [23] BAGHERI, S. a M. GUAGLIANO. *Review of shot peening processes to obtain nanocrystalline surfaces in metal alloys* [online]. [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: doi:10.1179/026708408X334087
- [24] LASI, Heiner. Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering* [online]. 2014, (64), 239-242 [cit. 2022-12-09]. Dostupné z: doi:10.1007/s12599-014-0334-4
- [25] GHOBAKHLOO, Morteza. Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2020, (252) [cit. 2022-12-09]. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2019.119869
- [26] MORECKI, Adam a Józef KNAPCZYK. *Basics of Robotics: Theory and Components of Manipulators and Robots* [online]. Springer, 2014 [cit. 2022-12-27]. ISBN 978-3-7091-2532-8.
- [27] SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory*. První. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava: Ediční středisko VŠB – TUO, 2007. ISBN 978-80-248-1522-0.
- [28] DWIVEDY, Santosha a Peter EBERHARD. *Dynamic analysis of flexible manipulators, a literature review: Mechanism and Machine Theory* [online]. (417), 749-777 [cit. 2023-02-07]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2006.01.014>
- [29] SAMADIKHOSHKHO, Zahra, Kourosh ZAREINIA a Farrokh JANABI-SHARIF. *A Brief Review on Robotic Grippers Classifications: 2019 IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE)* [online]. IEEE [cit. 2023-02-07].

- [30] ZHANG, Baohua, Yuanxin XIE a Jun ZHOU. State-of-the-art robotic grippers, grasping and control strategies, as well as their applications in agricultural robots: A review. *Computers and Electronics in Agriculture* [online]. 2020, (177), 20 [cit. 2023-02-07]. Dostupné z: doi:105694
- [31] *Actuation Technologies for Soft Robot Grippers and Manipulators: A Review* [online]. [cit. 2023-02-07].
- [32] ZHU, Mingzhu, Zhongkui WANG, Shinichi HIRAI a Sadao KAWAMURA. Design and fabrication of a soft-bodied gripper with integrated curvature sensors. *2017 24th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP)* [online]. IEEE, 2017, 1-6 [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: doi:10.1109/M2VIP.2017.8211521
- [33] SCHUNK, Henrik, Ralf STEINMANN a Andreas WOLF. *Grippers in Motion: The Fascination of Automated Handling Tasks* [online]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005 [cit. 2023-02-15]. ISBN 978-3-540-27718-7.
- [34] MURASHOV, Vladimir, Frank HEARL a John HOWARD. Working safely with robot workers: Recommendations for the new workplace. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* [online]. (133), 61-71 [cit. 2023-02-02]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1080/15459624.2015.1116700>
- [35] MICHALOS, George. Design Considerations for Safe Human-robot Collaborative Workplaces. *Procedia CIRP* [online]. (37), 248-253 [cit. 2023-01-26]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.014>
- [36] Bezpečnost kolaborativních robotů: Průmyslové a servisní roboty. *Automa* [online]. 2017, (8-9), 74-76 [cit. 2023-01-26]. Dostupné z: [https://automa.cz/cz/casopis-clanky/bezpecnost-kolaborativnich-robotu-2017\\_08\\_0\\_11040/](https://automa.cz/cz/casopis-clanky/bezpecnost-kolaborativnich-robotu-2017_08_0_11040/)
- [37] *Český statistický úřad: Mzdy a náklady práce* [online]. [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: [https://www.czso.cz/csu/czso/prace\\_a\\_mzdy\\_prace](https://www.czso.cz/csu/czso/prace_a_mzdy_prace)
- [38] *Strojirenstvi.cz: Tříprstý uchopovač pro roboty nabízí lepší manipulaci s válcovými objekty* [online]. 2020 [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://www.strojirenstvi.cz/triprsty-uchopovac-pro-roboty-nabizi-lepsi-manipulaci-s-valcovymi-objekty>
- [39] *COGNEX: EDGE INSPECTION TOOLS* [online]. [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: <https://www.cognex.com/products/machine-vision/vision-tools/rule-based-tools/edge-inspection>
- [40] *KEYENCE: LumiTrax™ lighting* [online]. [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: <https://www.keyence.com/ss/products/vision/vj/lumitrax.jsp>



**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

HCl	Kyselina chlorovodíková
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Kyselina sírová
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Kyselina fosforečná
PTFE	Polytetrafluorethylen
T <sub>g</sub>	Teplota skelného přechodu
SMA	Slitina s tvarovou pamětí (Shape Memory Alloy)
NSOV	Neutralizační stanice odpadních vod
FIFO	Metoda řízení toku materiálu a zásob (First In First Out)
MEK	Methylethylketon
CMOS	Druh snímacího čipu (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor)

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Diagram listové pružiny. [5]</i> .....	12
<i>Obr. 2: Tvary vinutých pružin</i> .....	13
<i>Obr. 3: Materiály pro vinuté pružiny. [3]</i> .....	14
<i>Obr. 4: Mikroskopický snímek hurealitického povlaku. [14]</i> .....	16
<i>Obr. 5: Mikroskopický snímek amorfního povlaku vytvořený technologií železnatého fosfátování. [14]</i> .....	17
<i>Obr. 6: Mikroskopický snímek krystalového povlaku vzniklého technologií zinečnatého fosfátování. [14]</i> .....	18
<i>Obr. 7: Mikroskopický snímek krystalového povlaku vzniklého technologií zinečnatovápenatého fosfátování. [14]</i> .....	18
<i>Obr. 8: Technologický postup fosfátování. [15]</i> .....	19
<i>Obr. 9: Obrobky s povlakem fosforečnanu manganu a bez něj. [16]</i> .....	21
<i>Obr. 10: Proces elektrostatického práškového lakování. [19]</i> .....	22
<i>Obr. 11: Schéma triboelektrické pistole. [20]</i> .....	25
<i>Obr. 12: Schéma korónové pistole. [20]</i> .....	26
<i>Obr. 13: Proces vypalování. [22]</i> .....	27
<i>Obr. 14: Schéma kuličkování. [23]</i> .....	28
<i>Obr. 15: Průmysloví roboti</i> .....	31
<i>Obr. 16: Rozdělení úchopných efektorů. [30]</i> .....	32
<i>Obr. 17: Pružné chapadlo. [29]</i> .....	33
<i>Obr. 18: Měkký uchopovač. [32]</i> .....	34
<i>Obr. 19: Schéma vakuového pohonu. [31]</i> .....	36
<i>Obr. 20: Schéma kabelového pohonu. [31]</i> .....	37
<i>Obr. 21: Schéma pohonu slitiny s tvarovou pamětí. [31]</i> .....	37
<i>Obr. 22: Schéma pohonu na bázi elektroaktivního polymeru. [31]</i> .....	38
<i>Obr. 23: Příklady senzorů. [33]</i> .....	39
<i>Obr. 24: Schéma robotického ramene. [33]</i> .....	41
<i>Obr. 25: Přehled norem uplatňovaných při posuzování bezpečnosti pracovišť s roboty. [36]</i> .....	43
<i>Obr. 26: Současný stav pracovišť navěšení a svěšení pružin</i> .....	49
<i>Obr. 27: Automatizované navěšování pružin</i> .....	51
<i>Obr. 28: Schéma výrobní haly</i> .....	52
<i>Obr. 29: Současné pracoviště</i> .....	53
<i>Obr. 30: Nezalakované místo pružiny</i> .....	54
<i>Obr. 31: Příklady vad laku</i> .....	55

<i>Obr. 32: Závěs s háčky.</i> .....	56
<i>Obr. 33: Yaskawa GP35L (vlevo) a GP50 (vpravo).</i> .....	58
<i>Obr. 34: Rozměry a pracovní prostor robota GP35L.</i> .....	59
<i>Obr. 35: Rozměry a pracovní prostor robota GP50.</i> .....	60
<i>Obr. 36: Tříprsté chapadlo [38].</i> .....	61
<i>Obr. 37: Elektromagnetické uchopovače.</i> .....	61
<i>Obr. 38: Stabilizační zařízení háčků.</i> .....	63
<i>Obr. 39: Zavěšení pružiny na lakovacím dopravníku.</i> .....	63
<i>Obr. 40: Příklady doteku pružiny a háčku při různých průměrech drátu.</i> .....	64
<i>Obr. 41: Výkres háčku s jeho rozměry.</i> .....	64
<i>Obr. 42: Zjištění pozic nezalakovaného místa.</i> .....	66
<i>Obr. 43: Ukázka kamerového vidění kamery COGNEX InspectEdge a Flexible Flaw Detection. [39]</i> .....	67
<i>Obr. 44: Termofotografie pružiny bez lokálního ohřevu (vlevo) a s lokálním ohřevem (vpravo).</i> .....	67
<i>Obr. 45: Funkce kamery Keyence LumiTrax. [40]</i> .....	68
<i>Obr. 46: Virtualizovaný programovací ovladač-Pendant.</i> .....	69
<i>Obr. 47: Navržení pracoviště var. 1.</i> .....	70
<i>Obr. 48: Detail manipulátorů var. 1.</i> .....	71
<i>Obr. 49: Úkoly manipulátoru a jejich čas ke splnění.</i> .....	71
<i>Obr. 50: Layout navrženého pracoviště var.2.</i> .....	74
<i>Obr. 51: Detail manipulátorů.</i> .....	75
<i>Obr. 52: Zatížení motorů manipulátoru č. 1 var.2.</i> .....	76
<i>Obr. 53: Předpověď životnosti manipulátoru č.1 var.2.</i> .....	76
<i>Obr. 54: Zatížení motorů manipulátoru č.2 var.2.</i> .....	77
<i>Obr. 55: Předpověď životnosti manipulátoru č.2 var.2.</i> .....	77
<i>Obr. 56: Layout navrženého pracoviště.</i> .....	79

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1: Cena automatizace navěšování pružin. ....</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 2: Specifikace robotického ramena GP35L. ....</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 3: Specifikace robotického ramene GP50. ....</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 4: Specifikace elektromagnetického uchopovače. ....</i>	<i>62</i>
<i>Tab. 5: Pozice nezalakovaného místa pro různé velikosti poloměru drátu. ....</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 6: Kroky manipulátorů a čas provedení ve var. 1. ....</i>	<i>72</i>
<i>Tab. 7: Kvantifikovaný odhad cen pracoviště – var 1. ....</i>	<i>73</i>
<i>Tab. 8: Kroky manipulátorů a čas provedení ve var. 2. ....</i>	<i>75</i>
<i>Tab. 9: Hrubý výpočet ceny pracoviště - var. 2. ....</i>	<i>78</i>

**SEZNAM ROVNIC**

$x = \cos\varphi * r$	Rov. 1 .....	65
$x = \sin\varphi * r$	Rov. 2 .....	65

**SEZNAM GRAFŮ**

<i>Graf 1: Roční nákladnost současného a automatizovaného pracoviště. ....</i>	80
<i>Graf 2: Počet vyrobených pružin za den. ....</i>	82
<i>Graf 3: Časový snímek pracoviště svěšení. ....</i>	83

