

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**INTERNÍ SYSTÉMY ŘÍZENÍ  
KVALITY KONTAMINACÍ  
PODLE POŽADAVKŮ  
AUTOMOBILOVÉHO  
PRŮMYSLU**

**2022**

**ANNA  
BÍLKOVÁ**



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bílková** Jméno: **Anna** Osobní číslo: **473668**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Výrobní inženýrství**  
Specializace: **Bez specializace**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Interní systémy řízení kvality kontaminací podle požadavků automobilového průmyslu**

Název diplomové práce anglicky:

**Internal contamination quality management systems according to the requirements of the automotive industry**

Pokyny pro vypracování:

1. Požadavky norem pro řízení úrovně kontaminace v automobilovém průmyslu.
2. Analýza typů kontaminací.
3. Místa vzniku kontaminací v KMCZ.
4. Aktualizace mapy kontaminací KMCZ.
5. Návrh na zlepšení mapy kontaminací v KMCZ.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. BcA. Jan Podaný, Ph.D. ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

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

Datum zadání diplomové práce: **15.03.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **29.07.2022**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Ing. BcA. Jan Podaný, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studentky

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracovala samostatně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne: .....

.....

Podpis

## Poděkování

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu práce Ing. BcA. Janu Podanému, Ph.D., za odborné vedení, cenné podněty a v neposlední řadě i vstřícnost a ochotu při řešení této práce. Dále bych ráda poděkovala zaměstnancům firmy KYB Manufacturing Czech s.r.o., kteří mi umožnili realizovat praktickou část diplomové práce, zejména pak konzultantům panu Ing. Lukáši Slávkovi a panu Tsuyoshi Kiriyamovi a paní překladatelce Haně Dušákové za jejich ochotu a pomoc při řešení praktické části diplomové práce.

## Anotace

Cílem této práce je vypracovat návrh zlepšení interních systémů řízení kvality firmy KYB Manufacturing Czech, s.r.o. (dále v textu KMCZ) v oblasti částicových kontaminací. Firma se zabývá výrobou automobilových tlumičů a v rámci řízení kvality se musí zabývat částicovými kontaminacemi, které představují riziko pro funkčnost a životnost vyráběných dílů. V prvním kroku je provedena rešerše normativních přístupů v oblasti řízení kontaminací a následně jejich porovnání s interními systémy řízení kvality kontaminací ve firmě KMCZ. V dalším kroku je vypracována analýza výrobních procesů souvisejících s tvorbou a transportem kontaminací a jsou navržena vhodná preventivní opatření s cílem snížit jejich vznik a transport. Dále je proveden návrh aktualizace a zlepšení interně užívané mapy kontaminací (interní nástroj sloužící k alokaci nalezených kontaminací k jejich pravděpodobnému zdroji). Pro aktualizaci a návrh zlepšení mapy kontaminací je nutné provést sběr vzorků a stanovit metody jejich analýzy. Pro analýzu kontaminací bude využita vizuální analýza světelným mikroskopem a chemická analýza ručním spektrometrem. Na základě teoreticky a experimentálně získaných informací budou doporučena zlepšení analyzačních procesů kontaminací ve firmě KMCZ.

### **Klíčová slova:**

Řízení kontaminací, částicové kontaminace, řízení kvality, kontaminace v automobilovém průmyslu

## Abstract

The goal of this thesis is to create a recommendation for improvement of internal quality management systems in KYB Manufacturing Czech, s.r.o. (KMCZ) in the field of particulate contaminations. The company's main area of production are car bumpers and therefore the company needs to deal with particulate contamination as a part of quality management as they present a risk to the functionality and life expectancy of the produced parts. In the first part theoretical research around norms focusing on contamination control is carried out and a comparison is made with the internal quality management systems for contamination control in KMCZ. In the next step an analysis of the production processes influencing the creation and transport of contamination is done and appropriate preventive measures aiming to reduce the creation and transport of contaminations are proposed accordingly. Then a proposal for an update and improvement of the internally used contamination map (an internal tool used for allocation of the found contamination to their possible source) is made. For the proposal for an update improvement collection of specimens must be done and a choice of appropriate analysis method must be made. For the contamination analysis a visual analysis by light microscope and chemical analysis by hand spectrometer is used. According to the theoretically and experimentally gained information a proposal for appropriate improvement in the contamination control processes in KMCZ will be suggested.

### **Key words:**

Contamination control, particulate contamination, quality management, contamination in the car industry

## Použité zkratky

LIBS	Spektroskopie laserem buzeného plazmatu
SEM/EDS	Skenovací elektronová mikroskopie (SEM) ve spojení s elektronově disperzním spektrometrem (EDS)
RTA	Analýza stromu kořenových příčin
PDPC	Rozhodovací diagram (Process Decision Diagram Chart)
FMEA	Analýza možného výskytu a vlivu vad (Failure Mode and Effects Analysis)
RPN	Rizikové číslo (Risk Priority Number)
KMCZ	KYB Manufacturing Czech
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci (International Organization for Standardization)

# Obsah

Úvod .....	9
1 Částicové kontaminace a její zdroje .....	11
1.1 Zdroje kontaminací .....	11
1.1.1 Prostředí .....	11
1.1.2 Pracovní povrchy a nástroje .....	11
1.1.3 Přímé materiály .....	11
1.1.4 Nepřímé materiály .....	12
1.1.5 Lidé .....	12
1.2 Inventář kontaminací .....	13
2 Řízení kontaminací .....	15
2.1 Specifikace čistoty a její dosažení .....	15
2.1.1 Definování systému a vlivu kontaminací .....	17
2.1.2 Stanovení priority kontaminačních kroků .....	18
2.1.3 Zlepšování aktuálního stavu .....	18
3 Kontaminace a jejich měření v automobilovém průmyslu [3] .....	21
3.1 Extrakce .....	23
3.1.1 Hodnocení efektivity extrakčních metod .....	24
3.1.2 Příprava před extrakcí .....	25
3.1.3 Následné ošetření .....	26
3.2 Typy extrakce .....	26
3.2.1 Extrakce kapalinou .....	27
3.2.2 Extrakce vzduchem .....	31
3.2.3 Jiné metody extrakce .....	32
3.3 Filtrace .....	34
3.4 Analýza .....	34
3.4.1 Sledované parametry .....	34
3.4.2 Standardní metody .....	38
3.4.3 Rozšířené metody .....	39
3.4.4 Zkrácené metody .....	46
3.4.5 Porovnání analyzačních metod .....	46



3.4.6	Dokumentace .....	48
4	Lidé ve výrobě .....	51
5	Analýza současného stavu .....	55
6	Analýza kontaminací v KMCZ .....	62
6.1	Stanovení kritických míst a odběr vzorků .....	64
6.2	Optická analýza .....	68
6.3	Chemická analýza .....	69
6.4	Materiály využívané pro obrábění .....	76
6.5	Mapa kontaminací .....	78
7	Návrh zlepšení řízení kontaminací v KMCZ .....	85
7.1	Analýza diagramem příčiny a následku (Ishikawa) .....	85
7.2	Analýza 5 Proč .....	87
7.3	Analýza stromem kořenových příčin .....	88
7.4	Analýza diagramem PDPC .....	91
7.5	Návrh zlepšení výrobního procesu .....	96
8	Návrh zlepšení kontroly kvality ve firmě KMCZ .....	98
8.1	Extrakce .....	98
8.2	Měření rozměrů .....	98
8.3	Dokumentace kontroly kvality .....	98
8.3.1	Inspekční specifikace .....	99
8.3.2	Výsledky inspekce .....	101
	Závěr .....	102
	Citovaná literatura .....	103
	Seznam obrázků .....	108
	Seznam tabulek .....	111
	Seznam použitého softwaru .....	111

# Úvod

Přítomnost částicových kontaminací v dílech a systémech silničních vozidel představuje velkou hrozbu pro jejich správnou funkci, protože i malé množství kriticky velkých částic může způsobit významné snížení jejich životnosti či celkové selhání. Jelikož spolehlivost a bezpečnost jsou hlavními rysy moderních silničních vozidel, dostává se v automobilovém průmyslu v rámci řízení kvality zvýšené pozornosti oblasti řízení a kontroly kontaminací. Vhodná aplikace základních mechanismů řízení kontaminací umožňuje zajišťovat časově stálé vlastnosti vyráběných dílů a systémů, což je nezbytné pro splnění stanovených požadavků

Přítomnost částicových kontaminací je nebezpečná pro většinu funkčních systémů, obzvláště kritická je ale ve funkčních systémech s tekutinami, kde může zapříčinit povrchovou degradaci běžným mechanickým opotřebením (abraze, eroze a povrchová únava). Toto opotřebení problém s přítomnými kontaminacemi často cyklicky navyšuje, protože může vést ke vzniku většího množství kontaminací a tím i celkové opotřebení kontinuálně narůstá. Pokud není tento proces řetězové reakce opotřebení řízen – snižováním množství kontaminací – dochází k předčasnému selhání systému. Vlivem opotřebení vznikají mezery, kde dochází k úniku tekutin, s jehož postupem se mezery zvětšují a účinnost provozu se snižuje (např. pumpy, válce) až do úplného selhání. V systémech s tekutinami je mechanické opotřebení tím závažnější, čím je vyšší pracovní tlak systémů. Z toho vyplývá, že čím vyšší je operační tlak systému, tím nižšího obsahu kontaminací v hydraulické tekutině je třeba docílit.

Kromě snížené spolehlivosti vozidel a potenciálně nižší zákaznické základny představují poruchy dílů a systémů další problém – náklady spojené s reklamací. Dle statistik *Warranty Week* tvořily celkové roční náklady na řešení reklamací napříč automobilovým průmyslem v roce 2019 až 43,86 miliard dolarů a v roce 2020 o 5 miliard méně. Z hlediska celkových obrátů vybraných 20 automobilových společností<sup>1</sup> se jednalo v průměru o 2,6 % celkového ročního obrátu společností v roce 2019 a 2,7 % v roce 2020. [1]

Ztráty způsobené reklamacemi ale i závadami objevenými ještě v rámci výrobních procesů jsou v objemech výroby automobilového průmyslu významné i v případě relativně nízkého podílu závad. Stejně tak náklady na řízení kontaminací nejsou zanedbatelné. Pro efektivní splnění požadavků na vyráběné produkty za dodržení minimálních nákladů je třeba vždy uvažovat všechny nákladové položky související s kvalitou (náklady na ocenění, náklady na prevenci, náklady spojené s interními a externími poruchami).

Řízení kontaminací řeší i firma KYB Manufacturing Czech, s.r.o. (KMCZ), zabývající se primárně výrobou tlumičů do osobních automobilů. V rámci této práce bude provedena rešerše normativních přístupů v oblasti řízení kontaminací a analýza současného přístupu k řízení kontaminací ve firmě KMCZ. Na základě porovnání výsledků rešerše a analýzy aktuálního stavu má práce za cíl vypracovat doporučení zlepšení výrobních procesů s cílem snížit vznik a transport

---

<sup>1</sup> Pro statistiku byly použity údaje společností Volkswagen, Ford, Stellantis, Tata Motors, Kia, Daimler, Volvo, BMW, GM, Hyundai, Honda, Nissan, Toyota, Renault, Tesla, GAC, BAIC, Changan, BYD a Dongfeng. [1]

kontaminací. Dále bude vypracováno doporučení pro zlepšení metodik v oblasti řízení kontaminací. Cílem práce je také vypracovat návrh aktualizace a zlepšení interně užívaného inventáře zdrojů kontaminací (tzv. kontaminační mapy).

# 1 Částicové kontaminace a její zdroje

Při řešení kontaminací je možné narazit na celou řadu jejich typů – mezi hlavní se např. řadí částicové kontaminace, tenké filmy, molekulární kontaminace či mikrobiální kontaminace. Skupina kontaminací, případně množství skupin, kterými je nutné se v konkrétních případech zabývat, závisí na specifikovaných požadavcích výrobních odvětvích. Z oblastí, které se musí zabývat přítomností kontaminací, je možné zmínit farmaceutický průmysl, potravinářský průmysl, zpracovávání kovů, jaderný průmysl nebo např. výroba polovodičových součástí. Dalším významným odvětvím, ve kterém řízení kontaminací hraje velkou roli, je také automobilový průmysl, kde minimální přítomnost kontaminací ve funkčních dílech a systémech je klíčová pro splnění obvykle vysokých požadavků zákazníků i koncových spotřebitelů. [2] [3]

## 1.1 Zdroje kontaminací

Pro cílenou a účinnou prevenci vzniku a šíření kontaminací do výrobků je třeba znát potenciální zdroje vzniku, kterých je pro částicové kontaminace celá řada. Nejvýznamnější zdroje kontaminací je možné třídit na prostředí, nástroje a pracovní plochy, přímé a nepřímé materiály a v neposlední řadě i lidský faktor. Aby bylo možné blíže pochopit komplexnost zdrojů kontaminací, které je třeba při řízení kontaminací uvažovat, budou výše zmíněné kategorie dále krátce rozvedeny. [4] [5]

### 1.1.1 Prostředí

Kontaminace klasifikované svým původem do *prostředí* mohou pocházet z různých povrchů využívaných prostor (stěny, strop, okna či dveře) a dalších položek jako je např. elektronika (mobilní telefon). Jedná se o důležitou kategorii, která může významně přispívat ke vzniku kontaminací ve výrobních prostorech. [4] [5]

### 1.1.2 Pracovní povrchy a nástroje

U používaných nástrojů může docházet k oděru či dokonce korozi, což vede k uvolňování částic, a tedy i vzniku kontaminací. Kontaminace této kategorie budou obvykle stejného materiálu a povrchové úpravy jako nástroj, což může následně pomoci při definování původu kontaminace – jejich materiálové složení často bývá unikátní pro konkrétní užívané nástroje. [4] [5] [6]

### 1.1.3 Přímé materiály

Mezi kontaminace z přímých materiálů se řadí částice pocházející přímo ze součástí, z čistících procesů a vybavení a z výrobního či montážního procesu. Součásti používané při montážních operacích v průmyslových odvětvích jsou často považovány za kontaminační zdroj a mohou kontaminovat konečný produkt, pokud není zajištěno dostatečné čištění dodavatelem či interním čištěním. Kontaminace z této kategorie mohou kromě montáže vznikat při výrobních procesech. Složení kontaminace bude identické se složením součástí nebo pokud kontaminace vzniká vlivem opotřebení nástrojem, pak může obsahovat materiál součástí i nástroje. [4]

#### 1.1.4 Nepřímé materiály

Nepřímé materiály mohou být zdrojem velkého množství částic a je jim proto třeba věnovat pozornost. Do této kategorie se řadí např. rukavice, obalové materiály, lepicí pásky, štítky či zbytky z čištění a údržby. Např. velké množství lepicích pásek má kartonové jádro, které může mít tendenci k uvolňování kontaminací. Vhodnější je proto užívání pásek s plastovým jádrem. Obalový materiál může být dalším významným zdrojem zanášených kontaminací, kdy kontaminace jsou obvykle uvnitř samotného balení. Pro zvýšení ochrany uvolňování kontaminací je proto vhodné využívat dvojité balení výrobků a výrobky by měly být vyjmuty z první vrstvy obalu ještě před zanesením produktu do oblasti kritické na přítomnost kontaminací (např. clean room). Ukázkou kontaminace z této kategorie v podobě hliníkové částice z víčka nádoby (obalového materiálu) je možné vidět na Obr. 1. [4] [6] [7]



Obr. 1 Hliníková částicová kontaminace z víčka nádoby [8]

#### 1.1.5 Lidé

Jedním z významných ale často opomíjených zdrojů kontaminací jsou lidé. V případě výroby v čistých místnostech (clean rooms) dochází k šíření kontaminací z oblečení zaměstnanců. Používání nevhodného oblečení, nedodržování protokolů oblékání nebo příliš dlouhá doba mezi převlékáním obleků či plášťů může navyšovat množství uvolňovaných částic. Kontaminace tohoto zdroje mají ještě vyšší zastoupení v prostorách, kde oblečení zaměstnanců není přísně regulováno. Kromě oblečení množství generovaných částic závisí také na disciplíně pracovníků. Kromě vláken z textilií a prachu se do této kategorie řadí např. vlasy, částice jídla, kosmetiky a další. Dle [4] panuje v oblasti řízení kontaminací názor, že jsou lidé nejvýznamnějším přispěvatelem kontaminací na dílech či systémech. Tuto generalizaci je třeba brát s rezervou, protože se poměr zdrojů kontaminací bude lišit v závislosti na konkrétních výrobních procesech. Například ve výrobním procesu, ve kterém lidé manipulují s veškerým materiálem a figurují v každé fázi výrobního procesu, může většina vzniklých kontaminací skutečně pocházet od lidí. Naopak na plně automatizovaný výrobní proces nebude mít tato kategorie zdrojů významný vliv. Obecně platí, že pro prevenci kontaminací tohoto zdroje je důležité školení zaměstnanců a v neposlední řadě schopnosti a kvalifikace personálu, který se v okolí výroby pohybuje. [4] [5] [7]

## 1.2 Inventář kontaminací

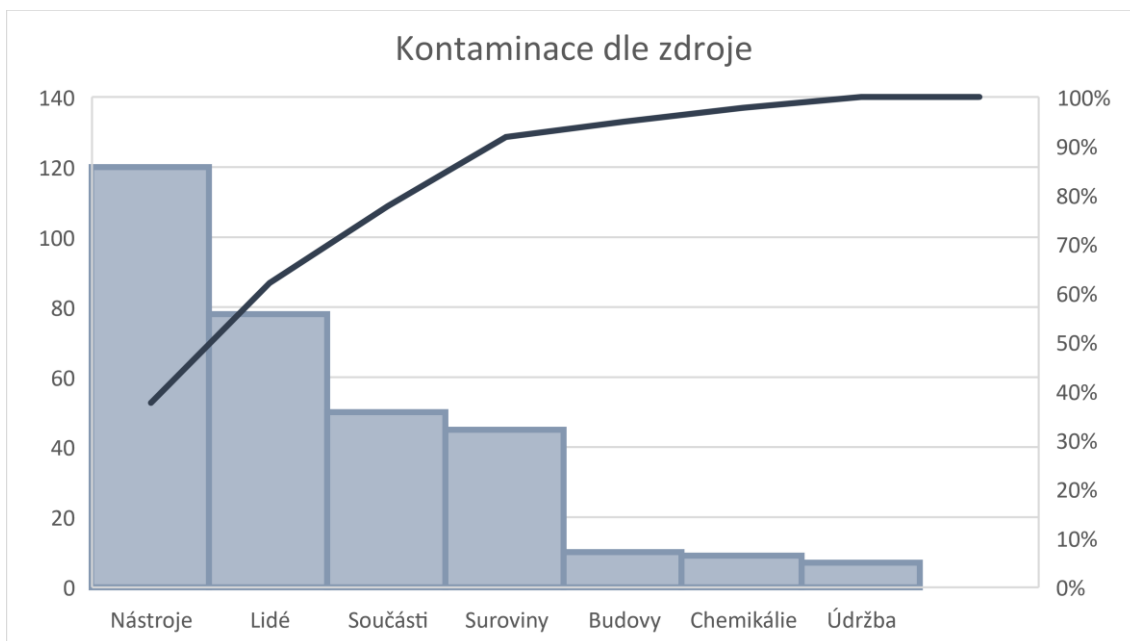
Na základě znalostí základních kategorií kontaminací a komplexních znalostí všech částí výrobního procesu, ve kterém jsou kontaminace sledovány, je možné sestavit inventář (nebo také mapu) potenciálních zdrojů kontaminací. Inventář kontaminací umožňuje seřazení velkého množství zdrojů s cílem usnadnit přiřazení nacházených kontaminací k jejich zdroji s pomocí dostupných informací uvedených v inventáři. Kontaminace lze klasifikovat na základě různých parametrů, mezi které se řadí způsob uvolnění kontaminace, zdroj, chemické složení aj. Správné přiřazení nalezené kontaminace k jejímu zdroji může napovědět, ve kterých oblastech je třeba provést hlubší studium a případná nápravná opatření. V prostředí s omezenými zdroji je vhodné vymezit klíčové oblasti, kterými je třeba se zabývat přednostně. [4] [9]

Dokument je často sestavován pro přehledné seřazení velkého množství zdrojů generujících kontaminace, které se následně dostávají do vodních ploch. Význam inventáře není znatelný pouze v tomto odvětví, ale může představovat velký přínos v podstatě v kterémkoliv odvětví, pro které je řízení kontaminací a s ním spojená identifikace kontaminačních zdrojů důležitá. Způsob sestavování inventáře se bude lišit dle potřeb, které má dokument splnit, rozpočtu či časových limitů. Obvykle je dokument sestaven ve třech základních krocích. Nejprve jsou získány sledované kontaminace. Následně jsou tyto kontaminace podrobeny analýze a v závěrečném kroku je na základě výsledků analýzy stanoven pravděpodobný zdroj každé zkoumané kontaminace. [4] [9]

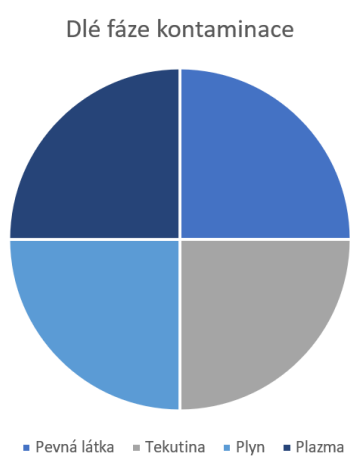
Výsledný inventář kontaminací je možné využít pro výpočet relativního významu daných kategorií zdrojů. Výpočet by byl proveden přiřazením bodů kategoriím zdrojů za každou přiřazenou kontaminaci. Za kontaminaci, kterou lze jednoznačně přiřadit jen do jedné kategorie je přiřazen dané kategorii jeden bod. Pokud zdroj kontaminace nelze jednoznačně určit a může pocházet se stejnou pravděpodobností např. z 3 různých kategorií, pak je každé kategorii přiřazena 1/3 bodu. Jistota správnosti přiřazení a jak detailní přiřazení může být, záleží na konkrétních kontaminacích – např. částice z modré džínoviny mohou ve zvoleném prostředí pocházet pouze z oblečení pracovníků, a tedy je kontaminace přímo zařazena do kategorie „lidé“. Naopak kovové částice mohou pocházet z více zdrojů – pro materiál kontaminace mohou existovat tři různá místa s podobným materiálem (opracovávaný díl, nástroj, zařízení). [4]

Kolik částic je třeba analyzovat pro získání odpovídajícího inventáře kontaminací, záleží na tom, jak rychle inventář ukazuje na zdroj. Pokud je např. většina částic spojována pouze s jedním zdrojem, pak postačí analyzovat pouze malé množství částic. Naopak, pokud vzniká několik podobně velkých zdrojových skupin, může být nutné v rámci jedné analýzy vyhodnotit významně vyšší množství částic. [4]

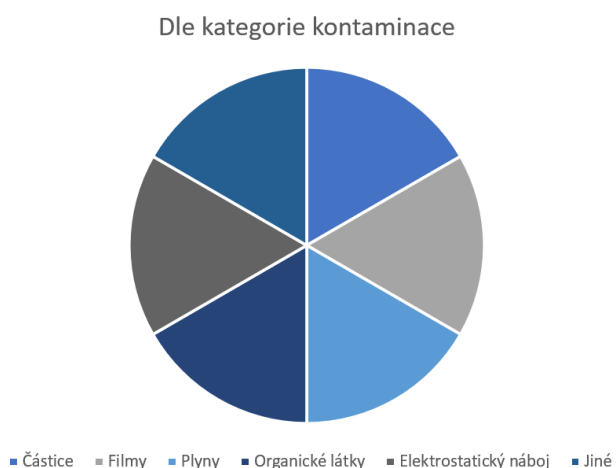
Existuje několik užitečných nástrojů vhodných pro vizualizaci relativních významů vybraných zdrojových kategorií, z hlavních lze zmínit Paretovy a koláčové diagramy. Jedná se o rychlý a efektivní způsob vizualizace zdroje problémů. Příklad vizuálního vyjádření rozložení zdrojů kontaminací v hypotetické situaci je vidět na Obr. 2. Příklad vizuálního zobrazení druhů kontaminací za pomoci koláčových diagram lze vidět na Obr. 3 a Obr. 4. [4]



Obr. 2: Paretův diagram – zdroje kontaminací, přepracováno dle [4]



Obr. 3: Koláčový diagram – rozdělení kontaminací dle fáze, upraveno dle [4]



Obr. 4: koláčový diagram – rozdělení kontaminací dle fáze, upraveno dle [4]

## 2 Řízení kontaminací

V moderních průmyslových odvětvích se vynakládá značné úsilí na snížení negativních účinků, které kontaminace mají na výrobní procesy a funkčnost vyráběných produktů. Tato snaha se obvykle označuje jako *řízení kontaminací*. Jedná se o kolektivní snahu zajistit v produktu či systému tak malé množství kontaminací, které nemá negativní vliv na jejich funkčnost. Aby bylo možné najít řešení, které je v souladu se všemi dílčími aspekty, je pro efektivní řízení kontaminací nutné uvažovat v jádru problému celý systém. Výrobek, proces, případně výrobní nástroj jsou dohromady vnímány jako jeden celek, který je při řešení kontaminačního problému nutné uvažovat. Všechna potenciálně navrhovaná řešení je proto nutné kontrolovat ve vazbě jak na požadavky produktu, tak procesu i výrobního vybavení. Řešení pouze dílčí oblasti bez uvažování celého systému by mohlo přinést zlepšení v jedné konkrétní oblasti, které by bylo na úkor zhoršení situace v jiných částech systému a v konečném důsledku by požadované cíle nebyly splněny. [10]

Proces řízení kontaminací lze rozdělit na tři základní oblasti, kterými jsou: *prevence, náprava a monitorování*. Volba oblasti, která je řešena prioritně závisí na vyspělosti procesu a na tom, jak moc se liší úroveň nacházených kontaminací oproti předepsaným požadavkům. Řízení kontaminací se obvykle řeší v oblasti již existujících procesů a produktů. Stejně principy je nicméně možné využít i v raných fázích návrhu nového vybavení či produktů. V takovém případě je využití metodiky nejúčinnější, zejména pokud se jedná o vývoj komplexních systémů, kde kontaminace pravděpodobně omezí funkčnost nebo kvalitu produktu. Čím dříve jsou rizika spojená s přítomností kontaminací zohledněna během vývoje, tím lépe jim lze čelit. [5] [10]

### 2.1 Specifikace čistoty a její dosažení

Technickou čistotu lze definovat třemi způsoby:

- dočasný stav čistoty dílu (přítomnost různých kontaminací na interních nebo externích plochách)
- proces zajišťování čistoty dílu v rámci všech dílčích procesů (od výroby, přes balení až k dodání cílovému zákazníkovi)
- proces čištění dílu s cílem stanovit množství přítomných kontaminací (kontrolní proces).

Požadavky na technickou čistotu (nebo také specifikace čistoty) jsou často stanoveny v dodavatelsko-odběratelských vztazích, kdy v tomto kontextu je technickou čistotou obvykle označován dočasný stav dílu. Tyto podmínky jsou stanovovány s cílem zajistit, že bude v dílu pouze taková úroveň kontaminací, která nenaruší funkčnost dílu či celého systému. Obecně platí, že limitní hodnoty čistoty systému fungují jako kontrolní, nikoliv toleranční limity. Pokud je tento limit překročen, defekt systému nemusí nastat, pouze dochází k navýšení rizika jeho vzniku. [3] [11]

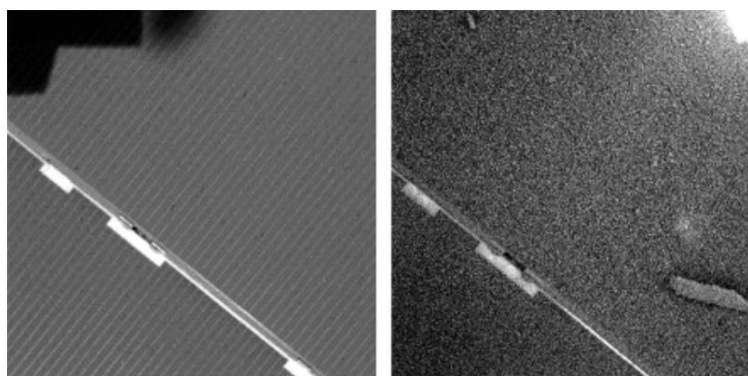
Při stanovování limitů je vhodné, aby bylo určeno, za jakých podmínek specifikace platí, např. stanovením obecně platných dodacích podmínek nebo individuální definicí pro každý jednotlivý případ (např. specifikace čistoty dílu po čištění, při dodání na montážní linku apod.). Jakákoliv další výrobní opatření je třeba kontrolovat, aby bylo zajištěno, že nejsou v rozporu



s dohodnutými specifikacemi čistoty. Může se jednat např. o vhodný typ obalu, místo a dobu skladování nebo vhodnost použitých montážních postupů s ohledem na čistotu. [3] [11]

Zda je možné požadované úrovně čistoty komponentu či systému dosáhnout závisí primárně na návrhu samotného dílu. Jedním ze způsobů vedoucích ke snížení množství kontaminací, které může být i nákladově úsporné, je snížení vznikajících částic ve výrobním procesu. Toho je možné docílit uvažováním aspektů čistoty již při návrhu dílu a následně vhodnou volbou materiálů a povrchových úprav. Uvažování geometrie dílu a jednotlivých výrobních procesů ve vazbě na řízení kontaminací již ve fázi návrhu může být klíčové pro dosažení potřebných výsledků. Návrh dílu bez uvažování kontaminací může vést ke vzniku geometrií, ze kterých kontaminace nelze odstranit nebo u kterých je čištění prováděno velmi obtížně. Další proměnou, kterou lze ovlivnit ještě ve fázi návrhu je povrch dílu, který má velký vliv na depozici částic. [3] [12] [13]

Z výše rozvedených pojmů vyplývá, že pro efektivní řízení kontaminací je nutné analyzovat systém, ve kterém je téma kontaminací řešeno a na základě výsledků analýzy stanovit specifikace čistoty, které je třeba dodržovat. Specifikace čistoty není záležitostí pouze výrobních procesů. V některých případech je nutné limity na přítomnost kontaminací stanovit pro dlouhodobě stálý a bezpečný provoz výrobků. Příkladem mohou být solární panely na Mars Exploration Rover (Obr. 5). Po 4 letech provozu se úroveň kontaminací na solárních panelech navýšila natolik, že pouze jedna třetina slunečního záření dokázala proniknout skrz vrstvu prachu a přeměnit se na elektrickou energii. Následkem tohoto jevu nebyl zdroj energie vozítka dostatečně silný, aby bylo možné přenášet všechna data na Zem. [10] [12]



Obr. 5: Snímek solárních panelů na Mars Exploration před začátkem operace (vlevo) a po 4 letech v provozu (vpravo) [10]

Luise Moren uvádí ve své studii *Low mass dust wiper technology for MSL rover* řešení v podobě mechanického kartáče, který by čistil povrchy senzorů. Ačkoliv výsledky studie ukazují, že vzhledem k čistícímu efektu kartáče čítajícímu 93 % by chyba funkčnosti UV senzoru byla do 7 %, není ten výstup zcela dostačující pro objektivní vyhodnocení funkčnosti solárních panelů. V rámci studie není stanovena maximální povolená chybovost, a není tedy možné odvodit ani specifikaci čistoty, kterou je třeba dodržet. Bez těchto údajů nelze s jistotou říct, zda fungování solárních panelů se 7 % chybovostí je dostačující. [10] [14]

Čištění je zároveň pouze jedním z možných přístupů, jak zajistit, aby byly splněny specifikace čistoty. Mezi další možnosti se řadí např. změna geometrie dílu, která by zajistila, že nebude

docházet k ulpívání kontaminací na daném místě či nepřilnavý povrch. Blíže budou tyto skupiny možných řešení rozvedeny v sekci 2.1.3. [5] [10]

Jak bylo zmíněno výše, při řízení kontaminací je třeba uvažovat celý systém. Jedním z přístupů vedoucích k porozumění komplexních návazností daného systému je provedení systémové analýzy a následně analýzy možného výskytu a vlivu vad (dále v textu FMEA). V prvním kroku při vypracovávání systémové analýzy jsou popsány všechny citlivé části systému a jsou uvedeny i všechny systémové požadavky, na základě kterých lze stanovit povolené úrovně daných typů kontaminací. V druhém kroku je provedena analýza FMEA, která slouží jako analytický nástroj k identifikaci potenciálních problémů a jejich dopadů na výkonnost procesu za pomoci tří základních prvků analýzy – *výskyt, závažnost a detekce*. Jedná se o užitečný nástroj, který lze aplikovat na celou řadu problémů, které se mohou objevit v jakémkoliv systému či procesu. Velmi přínosným výsledkem této analýzy může být nalezení řešení pro poruchový režim s nejvyšším skórem, a tedy oblasti, kde nápravné řešení může být nejpřínosnější. S použitím analýzy možného výskytu a vlivu vad (FMEA) a zlepšováním oblastí s nejvyšší prioritou lze docílit kontinuálního zlepšování výkonu, což je cíl většiny firem, které chtějí být konkurenceschopné. [10] [15]

Analýzu systému a následné stanovení možných řešení je možné provést s pomocí systémové analýzy a FMEA analýzy v rámci 3 základních kroků: definováním systému a vlivu kontaminací, stanovením priority pro kontaminační kroky a snížením RPN čísel. [10]

### 2.1.1 Definování systému a vlivu kontaminací

Přítomnost kontaminací může ovlivňovat funkční charakteristiky dílčích částí systému a při systémové analýze je třeba uvažovat každou charakteristiku, která přítomností kontaminací může být ovlivněna. Čím komplexnější řešený proces je, tím vyšší počet klíčových faktorů je třeba uvažovat. V rámci systémové analýzy jsou proto identifikovány všechny komponenty, které mohou být kontaminacemi ovlivněny. Výsledkem analýzy je stanovení požadavků na úroveň kontaminací a parametry procesu (specifikace čistoty). Definování systému a vlivu kontaminací je možné provést v několika krocích, které budou popsány blíže v následujících odstavcích. [10] [16]

#### ▪ Popis systému

Aby bylo možné identifikovat kritické oblasti systému, které jsou citlivé na přítomnost kontaminací, je třeba detailně popsat všechny procesy a sub procesy vedoucí ke vzniku finálního výrobku. Kromě samotných procesů je třeba popsat veškeré vybavení, které je v rámci procesů využíváno a specifikovat všechny parametry a funkční vlastnosti všech dílčích procesů a produktů. [10] [17]

#### ▪ Definování požadavků

Každý produkt nebo výrobní jednotka má klíčové charakteristiky, které jsou nezbytné pro dobrý a spolehlivý výkon. Tyto charakteristiky se mohou pohybovat v daném rozsahu bez narušení celkové funkčnosti. Na základě jejich znalosti je možné stanovit požadavky udávající, v jakém rozsahu se tyto vlastnosti mohou lišit a v konečném důsledku tedy i definovat požadavky

na systém. Pokud během kteréhokoliv výrobního kroku nastane situace vymykající se stanoveným požadavkům, dochází ke ztrátě výnosu nebo kvality. Znalost požadavků je proto tedy klíčová pro odhad dopadu kontaminace a následné nalezení možností zlepšení systému. Příklady takových požadavků jsou: dodržení provozní teploty v rozmezí 64–67 °C, stanovení procesní doby apod. [10]

- **Popis vlivu kontaminací na funkční vlastnosti**

Přítomnost kontaminace může funkční vlastnosti dílu či systému negativně ovlivňovat. Aby bylo možné v dalším kroku odvodit specifikace pro úrovně kontaminací, je nejprve nutné prozkoumat a popsat míru změn funkčních vlastností vlivem přítomnosti kontaminací. [10] [16]

- **Odvození specifikací pro úrovně kontaminací**

Na základě definovaných požadavků a popsaném vlivu kontaminací na funkční vlastnosti je možné stanovit specifikace pro úrovně kontaminací. Procesy vedoucí k příliš vysokým úrovním čistoty mohou přinášet zbytečně vysoké náklady a snižovat celkovou ziskovost výroby. Na druhou stranu nezajištění dostatečné úrovně čistoty vede k negativním dopadům na funkční vlastnosti výrobků. Přesné a relevantní stanovení specifikací čistoty je proto klíčové pro zajištění stabilního výrobního procesu vedoucímu ke vzniku kvalitních a výnosných výrobků. Splnění těchto specifikací může být stanoveným cílem procesu řízení kontaminací. [10] [16]

- **Identifikace možných zdrojů**

Většinu potenciálních zdrojů kontaminací lze identifikovat díky předcházející hluboké analýze procesu a dobré znalosti jejího uspořádání. Díky znalosti kontaminačních zdrojů je možné identifikovat konkrétní problémy a následně je vyřešit. V ideálním případě je řešení implementováno ještě ve fázi návrhu procesu. Znalost zdrojů kontaminací je zásadní i v případě již zavedených procesů, nápravná opatření bývají v takových případech nicméně náročnější a nákladnější. [4] [10]

### 2.1.2 Stanovení priority kontaminačních kroků

Výrobní procesy, na které je řízení kontaminací aplikované jsou obvykle rozsáhlé a obsahují více než jeden kontaminační krok. Pro zajištění efektivity aplikovaných opatření je proto vhodné přistupovat k prioritizaci daných klíčových oblastí. Vhodným nástrojem je dříve uvedená analýza FMEA. V rámci FMEA je proces rozdělen na dílčí procesy a pro každý podproces je definován chybový mód. Pro každý chybový mód je následně stanoveno skóre tří parametrů – výskyt, závažnost a detekce, pomocí kterých je vypočtena hodnota priority rizika RPN (Risk Priority Number). [10] [15]

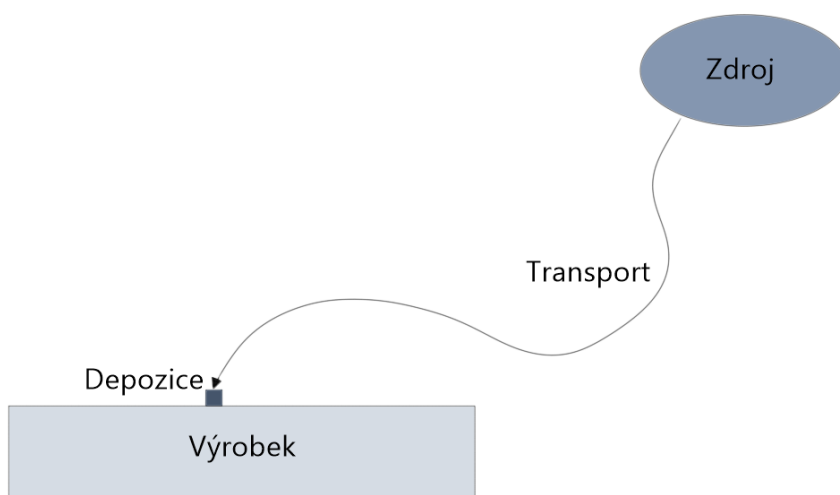
### 2.1.3 Zlepšování aktuálního stavu

Na základě výsledků FMEA analýzy je možné přistoupit ke krokům vedoucím ke zlepšení aktuálního stavu. Po stanovení RPN hodnot obvykle následuje Paretova analýza, která pomáhá rozhodnout, která potenciální chybové módy řešit prioritně. Pro snížení RPN hodnot lze obecně

využít jednoho ze tří kroků – prevence, nápravy a monitorování, které budou blíže popsány dále. [10] [15]

#### ▪ **Prevence**

Prevence je nejúčinnější způsob řízení kontaminací, a proto je vhodné, pokud se proces řízení kontaminací zaměřuje na snahu zabránit vstupu kontaminace do kritických míst procesu či výrobku. Z praktických důvodů obvykle není možné vyřešit řízení kontaminací pouze řešením prevence, přesto by se mělo jednat o cíl neustálého zlepšování každé výroby, která se řízením kontaminací zabývá. Účinné prevence vstupu kontaminací do kritických míst je obvykle možné dosáhnout zablokováním řetězce kontaminačního procesu. Na Obr. 6 je vidět posloupnost kroků vedoucích ke kontaminaci na dílu. Kontaminace je uvolněna ze zdroje, odkud je dále transportována k blízkosti dílu. Dále dochází k depozici kontaminace a přilnutí kontaminace na daný povrch. Pro úspěšnou prevenci teoreticky stačí zabránit pouze jednomu z uvedených kroků. [5] [10]



Obr. 6: Schéma řetězce kroků vedoucích ke kontaminaci na dílu, přepracováno dle [10]

Obvykle, pokud je množství kontaminací generovaných zdrojem vysoké, dochází ke kontaktu kontaminace s dílem často. V případě vzniku kontaminací vlivem mechanického opatření lze zablokování kontaminačního řetězce v této fázi dosáhnout např. volbou materiálu, který je méně náchylný na opotřebení či změnou nastavení s cílem snížit tření. Pokud je množství kontaminací vznikající z daného zdroje malé, a přesto se kontaminace dostávají na finální výrobky, může být původ problému v transportu – např. pokud je díl v těsné blízkosti zdroje kontaminací. Řešením nevyhovující míry transportu částic může být zavedení bariéry chránící citlivé plochy výrobku od zdroje kontaminací. Poslední oblastí řetězce, jejíž blokáce může pomoci prevenci kontaminací, je adheze kontaminace k povrchu dílu. Kontaminace je držena na povrchu dílu vlivem adhezních sil. Pokud je adhezní energie malá, pak může být kontaminace oddělena od povrchu a přenesena pryč. Užitím vhodných materiálů či povlaků, které mají malou interakci s dalšími materiály, je možné snížit adhezní sílu. Příkladem takového materiálu je teflon. [10]

- **Náprava**

Náprava je reakce na přítomnost kontaminací způsobenou nedostatečnou prevencí. Mezi nápravné kroky patří vyhodnocení zdroje kontaminací a realizace konkrétních kroků s cílem zajistit takový stav výrobků, který splňuje stanovené specifikace. Nejčastějším dekontaminačním krokem je čištění. Zvolená technologie závisí na druhu kontaminace, kterou je třeba odstranit. Kromě efektivity metody je třeba brát v potaz riziko poškození dílu. Obvykle platí, že s rostoucí účinností mycího procesu narůstá i riziko poškození. Mezi další faktory patří cena technologie, čas mytí, náročnost obsluhy aj. [5] [10]

- **Monitorování a neustálé zlepšování**

Parametry, důležité pro řízení kvality je třeba sledovat a na základě získaných dat vyhodnocovat účinnost preventivních i nápravných opatření. Monitorování klíčových parametrů je pro zajištění požadované úrovně kontaminací a pro zlepšování procesů stejně důležité, jako preventivní a nápravné kroky. Obecně platí, že čím později je porucha objevena, tím nákladnější je. Pokud dochází k závadě na počátku výroby, díl prochází zbytkem výrobních procesů a dochází ke spotřebě zdrojů, ačkoliv výrobek v konečném kroku je zařazen mezi zmetky. Monitorování procesu umožňuje včasné odhalení vad a zavedení případných nápravných opatření. [5] [10]

### 3 Kontaminace a jejich měření v automobilovém průmyslu [3]

Řešení kontaminací mělo v minulosti zásadní roli zejména v oblastech, kde by potenciálně přítomnost jediné kontaminace extrémně malých rozměrů mohla mít rozhodující vliv na celkové selhání systému (např. kosmický průmysl či výroba polovodičových součástek). V těchto odvětvích je nutné řešit významně menší rozměry částic než při běžných potřebách automobilového průmyslu. Dále je třeba řešit větší rozsah typů kontaminací (kromě částicových kontaminací je v těchto odvětvích nutné řešit např. kontaminace ve formě tekutin, tenkých filmů apod.). Přísná kritéria na čistotu souvisí s celou řadou specifických analyzačních metod přítomných kontaminací, které pro běžné potřeby automobilového průmyslu nejsou relevantní. V této kapitole budou dále rozvedeny příklady možných přístupů a analyzačních metod normativně doporučených pro využití přímo v automobilovém průmyslu. Vhodnost užití konkrétních metod se bude lišit zejména konkrétní oblastí této průmyslové sekce, kterou je třeba řešit.

Základním krokem pro zajištění nízkého a stabilního množství částicových kontaminací je jejich měření, které se provádí ze dvou hlavních důvodů – pro potvrzení, že díly a systémy splňují stanovené limity na přítomnost kontaminací a pro stanovení zdroje kontaminace a následující aplikaci nápravného řešení.

Široká škála možných zdrojů částicových kontaminací v automobilovém průmyslu vede k nutnosti využití komplexních zkušebních metod pro kvantifikaci a identifikaci nacházených částic. Vzhledem k široké škále zkušebních metod nastává problém s porovnatelností kontaminačních úrovní produktů různých dodavatelů, ale v některých případech i s porovnatelností kontaminačních úrovní jedné výrobní firmy s daty v delším časovém období. [4]

Snaha sjednotit přístup k řízení kontaminací v automobilovém průmyslu s cílem získávat dobře reprodukovatelné a porovnatelné výsledky probíhá již řadu let, z normativního hlediska konkrétně od roku 2005 za pomoci německé normy VDA 19.1 (Inspekce technické čistoty – částicové kontaminace ve funkčně relevantních automobilových dílech) a mezinárodního standardu ISO 16232:2007, část 1 až 10 (Silniční vozidla – čistota okruhů s obsahem tekutin). Obě normy se rychle staly součástí řízení kvality v automobilovém průmyslu. Kritika normy ISO 16232:2007 k nedostatku informací ke konkrétním analyzačním přístupům oproti německé normě VDA 19 vedla k vytvoření aktualizované normy ISO 16232:2018. Tato norma má za cíl sjednotit všechny předchozí normy v tematické částicových kontaminací v automobilovém průmyslu a doplnit je o potřebné informace, aby bylo možné měřit a vykazovat úroveň čistoty komponentů a systémů určených pro silniční provoz s vyhovující přesností. Výhodou normy ISO 16232:2018 je tedy kromě její aktuálnosti i její komplexnost a univerzálnost. [18]

Hlavním cílem snahy o sjednocení přístupů je maximální porovnatelnost výsledků analýz. Zájmem zákazníků i výrobců je možnost objektivního porovnání technické čistoty dílů vyrobených různými výrobci v různých lokacích. Předpokladem pro možnost takového porovnání je doplnění stanovených limitů čistoty o konkrétní specifikace testovací metody. Norma ISO 16232:2018 uvádí možnosti analýzy všech částicových kontaminací za pomoci schválených metod. Pro získání porovnatelných výsledků měření je třeba dodržet stejnou

metodu extrakce, stejnou testovací tekutinu a stejné parametry nastavení nástrojů užitých pro analýzu. [18]

Inspekce čistoty se provádí z mnoha důvodů, mezi hlavní se řadí vstupní hodnocení, inspekce vstupních a výstupních dílů a kontrola kvality a monitorování výrobních procesů souvisejících s čistotou (např. čištění, povrchová úprava či montážní procesy). Norma má za cíl zvýšit informační hodnotu a porovnatelnost získaných výsledků. Naopak se nezabývá detekcí filmových kontaminací (tuky, olej apod.), aplikací nekvantifikovatelných detekčních metod analýzy částicových kontaminací (např. vizuální hodnocení, test čistoty dílu za pomoci otření dílu čistou látkou apod.) či charakterizací operačních tekutin (palivo, oleje, chladicí kapaliny, brzdové kapaliny apod.).

Limity byly v minulosti definovány zejména zákazníky určením limitů množství kontaminací, velikostí částic nebo rozložením velikostí částic spolu s předepsanou konkrétní inspekční metodou. Ačkoliv tento přístup je principiálně správný, často jsou inspekční procedury stanovené zákazníky příliš obecné a nemusí umožňovat dostatečně přesnou analýzu. Různé tvary a velikosti dílů vyžadují individuální inspekční přístup. Příkladem může být požadavek zákazníka čistit komponent ultrazvukovým čištěním po dobu 10 minut. Účinnost tohoto čištění u dílů odlišných tvarů i velikostí je nejasná. Oproti tomu norma ISO 16232:2018 doporučuje zvolení takové čistící metody, u které bude potvrzena účinnost čistící procedury alespoň 90 % procent. [19]

Norma nestanovuje přesné limity čistoty pro specifické díly nebo systémy, protože stupeň čistoty potřebný pro konkrétní díly či systémy je závislý na řadě individuálních faktorů. Specifikace čistoty by měla být stanovena pouze specialisty s dostatečnými znalostmi nejen o samotném komponentu a systému, do kterého je začleněn, ale také o podmínkách užívání výrobku a potenciálních dopadech na výrobní procesy a dodavatelský řetězec.

Pro získání požadovaných výsledků a pro poskytnutí případné garance čistoty nestačí pouze využití vybraných metod normy. Norma nestanovuje limity konkrétních metod (např. druh kapaliny při extrakci částic oplachem apod.). Každou užívanou metodu je proto třeba ověřit s cílem zajistit požadovanou účinnost.

Cílem inspekce čistoty je detekovat částicové kontaminace, které se nacházejí na povrchu hodnoceného komponentu. V porovnání s jinými typy inspekcí, které obvykle mohou být provedeny přímo na dílu, inspekce technické čistoty je nepřímá testovací metoda – vyžaduje navíc extrakční krok. V automobilovém průmyslu jsou sledované povrchy funkčně kritických dílů mnohdy uvnitř trubek, nádrží, čerpadel, ventilů či podobných dílů. Uvnitř těchto dílů často proudí tekutiny, které jsou schopné zanést kontaminace do citlivých částí systému. Na vnitřních plochách těchto dílů není obvykle možné provádět vizuální kontrolu. Kromě obtížné dostupnosti funkčních povrchů, mnoho povrchů není vhodných pro tento způsob kontroly kvůli svému materiálovému složení, drsnosti nebo nedostatečnému kontrastu s částicovými kontaminacemi.

Aby bylo možné stanovit technickou čistotu dílu, je kvůli často složité geometrii obráběných dílů třeba částicové kontaminace nejprve oddělit od připraveného testovaného dílu (extrahovat). Během extrakce jsou částice odděleny od povrchu dílu a přemístěny do tekutého média (testovací tekutiny). Testovací tekutina je následně přefiltrována za pomoci analyzačního filtru,

na kterém jsou částice následně umístěny. Částice usazené na filtru jsou podrobeny měření a je provedena závěrečná dokumentace procesu. Aby byla zajištěna požadovaná porovnatelnost výsledků měření, je třeba po zkoušce uvést informace o parametrech ověřovacího procesu čištění a o technologii měření částice. Tento přístup také vyžaduje ověření a optimalizování parametrů čistícího procesu, aby bylo zajištěno, že jsou všechny částice odstraněny bez narušení základního materiálu dílu. Jelikož testovacím procesem dochází ke změně úrovně čistoty dílu, je možné touto metodou testovat každý díl vždy jen jednou. [18]

Při analýze čistoty je možné vybírat z celé řady přístupů v oblasti extrakce kontaminací, filtrace částic a analýzy kontaminací, jejichž vhodnost se odlišuje zejména typem kontaminací, testovaným dílem a cíli měření. Vybrané konkrétní přístupy z každé kategorie budou blíže popsány dále.

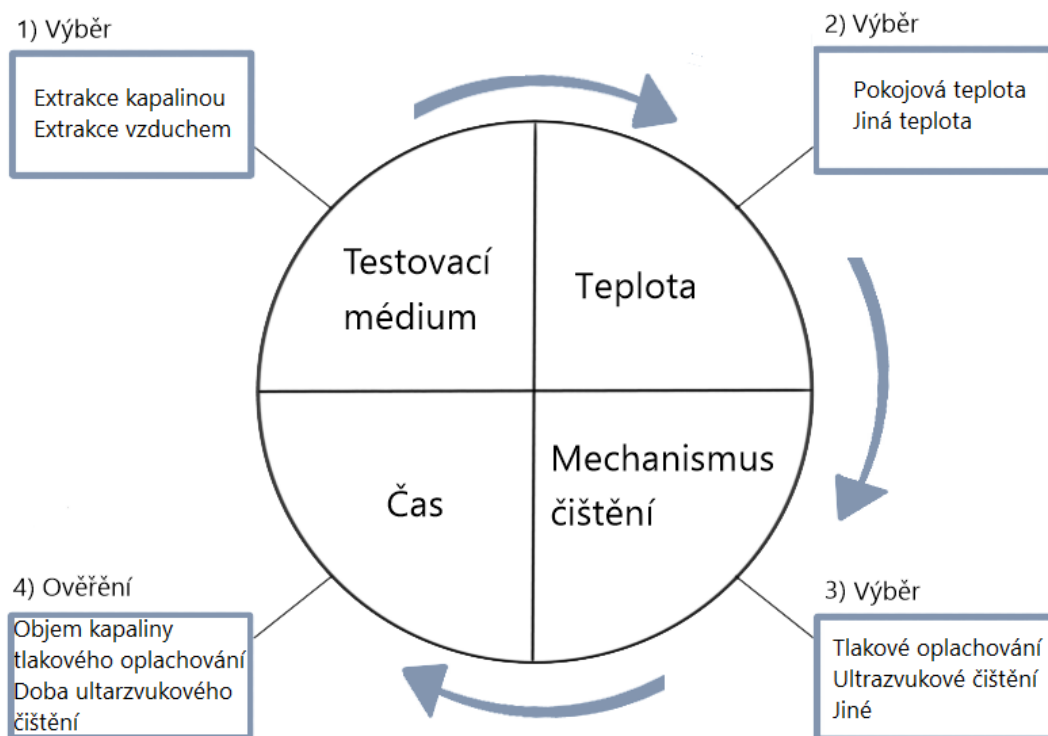
### 3.1 Extrakce

Vzorky částicových kontaminací je možné získat ze vzduchu, stlačených plynů, kapalin a povrchů. Dle média, ze kterého je částice extrahována, je třeba dodržovat konkrétní metodiky, aby byly výsledky analýzy relevantní. Např. při odběru vzorků z kapalin je třeba dodržet správné rozptýlení částic, aby se dosáhlo vypovídající distribuce velikosti částic. Při odebrání částic z povrchu je na druhou stranu třeba brát v úvahu adhezni síly, které spojují částice s povrchem, protože tyto síly silně ovlivňují volbu extrakční metody – je třeba zajistit, že se částice oddělí od povrchu a zároveň daný proces minimálně ovlivní stav samotné částice. [4]

V automobilovém průmyslu extrakce kontaminací spočívá nejčastěji v oddělení částic od dílu za pomoci testovací tekutiny a konkrétní metoda extrakce je určena na základě vlastností testovaného dílu. Účinná extrakce částic je klíčová pro získání vypovídajících výsledků, jelikož i jediná částice může mít potenciálně velký vliv na funkčnost celého systému. Účinnost extrakce nelze vyhodnotit za pomoci referenční úrovně, protože taková hodnota není stanovena. Účinnost procesu se proto hodnotí na základě testů, a to kvalifikace extrakčního procesu (kvalifikačního testu) a prázdné hodnoty, tzv. *blank level*. V rámci kvalifikace extrakčního procesu se zjišťuje, zda bylo odstraněno dostatečně velké množství kontaminací. Pomocí metody prázdné hodnoty se zjistí, zda samotná analyzační metoda nezanášá kontaminace na díl a nevytváří tak riziko zkreslení výsledků. Toto ověření je zejména významné pro díly, které obsahují jen malé množství kontaminací, a zanesení vnějších nečistot by způsobilo znehodnocení měření.

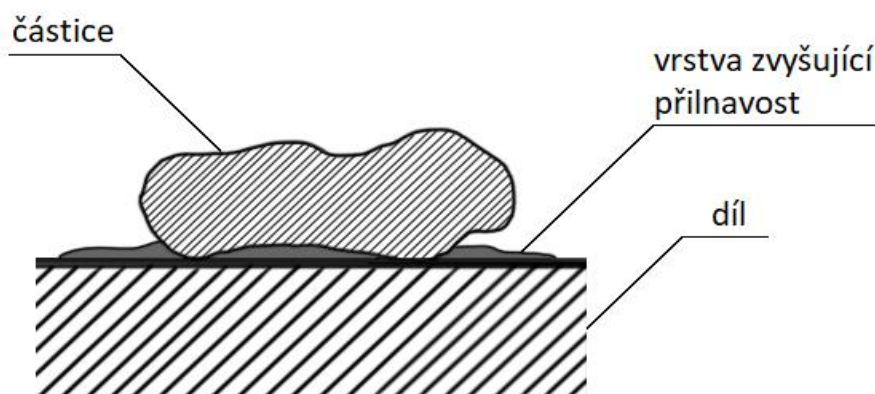
Vhodný výběr extrakční metody je klíčový pro zajištění optimalizovaného čistícího procesu. Diagram, uvedený na Obr. 7 ukazuje, že je třeba zvážit vzájemný vliv několika parametrů: testovacího média, teploty, metody čištění i času (doby, po kterou je kontrolovaný povrch vystaven čistícímu procesu).





Obr. 7 Proces výběru extrakční metody, tzv. Sinnerův kruh, přepracováno dle [3]

Ukázka částicové kontaminace, kterou je třeba analyzovat a v první řadě tedy oddělit od povrchu dílu je na Obr. 8. Spojení částice s povrchem může být realizováno celou řadou sil, např. pomocí Van der Waalsových sil nebo kapilárních sil vzniklých díky vzdušné vlhkosti či procesnímu mediu (chladio, lubrikanty, antikoroziiva). Cílem extrakční metody je překonat tyto síly a oddělit částici od povrchu. Pro úspěšné oddělení jsou tedy klíčové všechny složky systému, přihlíží se zejména k velikosti a tvaru materiálu, umístění částic na testovaném dílu a typu adheze, kterou je třeba přerušit na testovaném dílu.



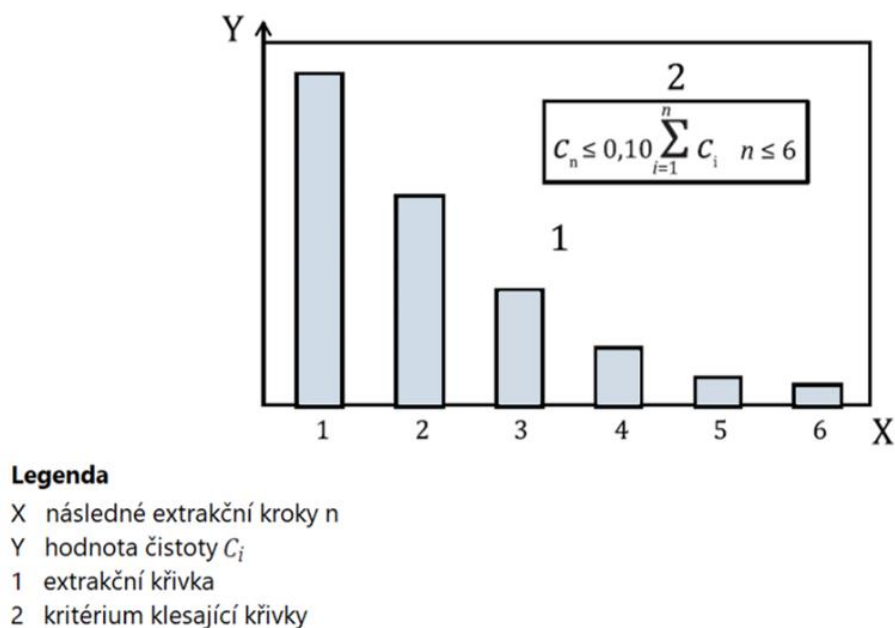
Obr. 8 Schéma částicové kontaminace, přepracováno dle [3]

### 3.1.1 Hodnocení efektivity extrakčních metod

Kvalifikační test se provádí s cílem definovat vhodné extrakční metody a řadí se do čtvrtého kroku na diagramu zobrazeném na Obr. 7. Před provedením samotné analýzy je třeba ověřit, že

extrakcí bude zajištěno odstranění maximálního množství částic z povrchu testovaného dílu. Vzhledem k složitým tvarům automobilových dílů není stanovena univerzální metoda, která by určila přesné množství skutečně přítomných částic na dílu. Pro hodnocení účinnosti extrakční metody se proto provádí tzv. klesající zkoušky (*declining test*) viz Obr. 9. Proces čištění s cílem extrahovat částice se v rámci ověření účinnosti metody provádí opakovaně. Po každém kroku se hodnotí množství extrahovaných částic a sleduje se, zda toto množství s časem klesá, a tedy zda je zvolená metoda vhodná.

Zda dochází k efektivnímu oddělení částic od povrchu, stanovuje klesající kritérium, které vychází z bodu křivky, ve kterém je hodnota extrahovaných kontaminací nižší než 10 % celkově extrahovaných částic ve všech předchozích bodech křivky, včetně aktuálního. Toto měření také umožňuje určit, zda při extrakčním kroku nedochází k oddělení nežádoucích částic, jako jsou části povrchu dílu či materiál ze samotného testovaného komponentu.



Obr. 9: Ukázka klesající zkoušky [3]

### 3.1.2 Příprava před extrakcí

Pokud kontrolované povrchy nejsou všechny povrchy dílu, případně pokud pro různé povrchy mohou být stanoveny odlišné limity pro přítomnost kontaminací, může být zapotřebí tyto plochy od sebe oddělit. Cílem tohoto oddělení je zajistit, že tekutina nemůže při extrakci dojít do kontaktu s povrchem, který není pro kontrolu relevantní a mohl by potenciálně zanechat kontaminace, které by ovlivnily výsledek testu. Oblasti, které kontrolu nevyžadují, by měly být izolovány např. zacpáním otvorů, povlakem, utěsněním apod. Tyto kroky je potřeba provést tak, aby nedošlo k ovlivnění výsledků inspekce čistoty (např. zanesením nečistot při aplikaci izolace). Toho je možné docílit užitím materiálů, které splňují stanovené parametry čistoty. V rámci samotného procesu extrakce může dojít k zanešení kontaminací na díl. Z toho důvodu je doporučeno nabarvit využívané přípravky, pokud by se v analýze objevily kontaminace výrazné barvy, bude možné rozlišit, že pochází z extrakčního procesu a neovlivňují skutečnou čistotu dílu.

- **Demontáž**

V některých případech může být zapotřebí díl před kontrolou čistoty částečně či kompletně demontovat, aby bylo možné získat přístup k funkčním povrchům, ze kterých je třeba částice extrahovat. Při demontáži vzniká významné riziko, že dojde ke vzniku částic, které budou následně uvolňovány na funkční povrchy. Aby se předešlo vzniku nových kontaminací, demontážní kroky by měly být pečlivě naplánovány vhodným čistým způsobem. Částice, které se při demontáži uvolní, by měly být odstraněny (otřením či tlakovým čištěním – vysátím) v okamžiku, kdy vznikají/jsou uvolněny nebo ihned poté. Všechny nástroje a pomocné vybavení by mělo být udržováno v čistotě a navrženo z materiálů s malou mírou abraze.

Dalším rizikem může být zanesení nerelevantních částic do relevantních ploch. Např. cílem analýzy může být vyhodnotit stav kontaminací na vnitřních plochách dílů, nicméně při demontáži může dojít k zanesení částic do těchto míst z vnějších ploch. Takové situaci lze předejít např. očištěním vnějších ploch před přistoupením k samotné demontáži. Vzhledem k velkému riziku vzniku kontaminací při demontáži, je třeba demontážní proces pečlivě dokumentovat, případně sestavit detailní postup demontáže, který má být dodržován.

- **Demagnetizace**

Magnetismus způsobuje silnější adhezi magnetických částic k testovanému dílu. Proto je vhodné provést feromagnetický test komponentů pro určení zbytkového magnetismu a v případě potřeby díl ještě před zahájením extrakce demagnetizovat. Je třeba mít na paměti, že demagnetizací může dojít k narušení funkčních vlastností dílu.

### 3.1.3 Následné ošetření

Je třeba specifikovat, zda má být díl po kontrole vrácen zpět do výroby, či vyhozen. Pokud dochází k návratu dílu do výroby, je třeba stanovit kroky, které je třeba po testu provést (zbavení zbytku extrakční kapaliny apod.).

## 3.2 Typy extrakce

Volba druhu extrakce je klíčová pro efektivní získání vzorků. Druh extrakce silně závisí na médiu, ve kterém se částice nachází. Částice se obecně mohou nacházet ve vzduchu, stlačeném plynu, kapalinách a na površích. [4]

Pro většinu sledovaných částic v automobilovém průmyslu je třeba řešit částice usazené na povrchu dílů. Další text se proto bude zabývat metodami, týkajícími se možností extrakce částic z povrchů. Cílem takové extrakce je zajistit co nejúčinnější metodu oddělení částic od povrchu dílu, kdy všechny získané částice jsou relevantní (na dílu se vyskytují ještě před zahájením analýzy), v ideálním případě dochází k oddělení všech částic na sledovaném povrchu a zároveň nedochází k degradaci dílu ani kontaminací. [4]

### 3.2.1 Extrakce kapalinou

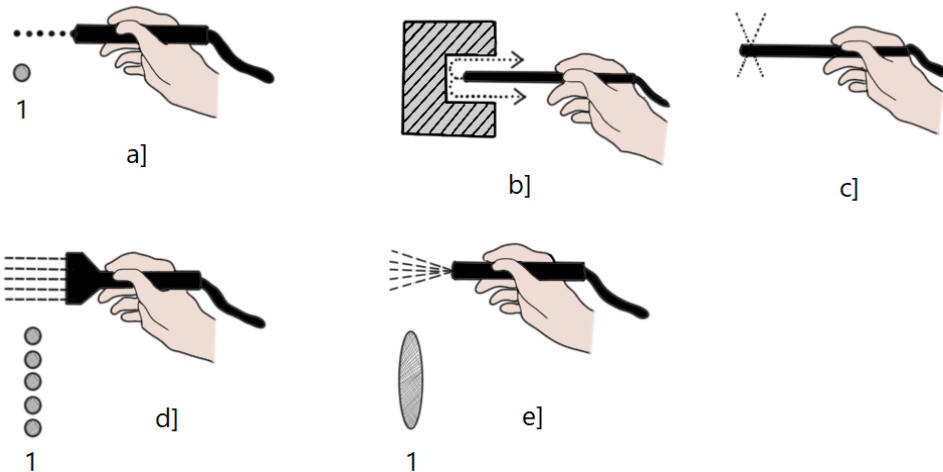
Metodu extrakce kapalinou lze využít pro většinu testovaných dílů. Na volbu testovací kapaliny má vliv zejména materiál testovaného dílu a vlastnosti předpokládaných kontaminací. Dále záleží na výrobních procesech, kterými díl prochází (testovaný díl může obsahovat např. tuky a maziva z předchozích výrobních fází).

- **Tlakové oplachování**

Tlakové oplachování spočívá v lokalizovaném působení kapaliny na díl za pomoci trysky. Čistící efekt je dosažen především hybností přenášenou proudem kapaliny při dopadu na součást a pohybem kapaliny po dílu. Metoda je vhodná pro přímo dostupné povrchy o velké ploše, které mohou být očištěny paralelními tryskami. V případě využití košů či kádinek je možné extrakční metodu využít i pro velké množství menších dílů jednoduchých tvarů. Vnitřní povrchy či vnější povrchy, které jsou obtížně dostupné, mohou být touto metodou čištěny pouze do určité míry.

Pro většinu aplikací se pro lokalizovanou extrakci využívá kulatá plná tryska a pro extrakci částic z velkých ploch paralelní tryska. V závislosti na potřebách konkrétní extrakce mohou být užitečné trysky i dalších geometrií. Ukázka možných geometrií trysek je vidět na Obr. 10. Na Obr. 11 je možné vidět ukázkou dílů a testovaných ploch, u kterých může být vhodné tlakové oplachování aplikovat. Trysky pro tlakové oplachování lze využít i pro čištění vnitřních povrchů dílů. Je třeba dát pozor, aby celý vnitřní povrch byl namočen testovací kapalinou. Extrakční efekt v tomto případě již není tlakový, ale jedná se o vnitřní oplachování.

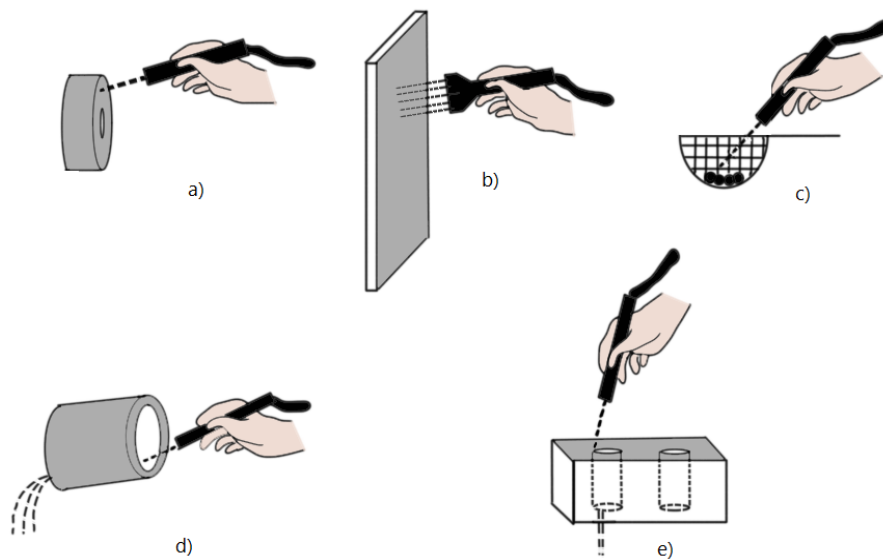
Nejvýznamnější parametry, které mají vliv na efektivitu tlakového oplachování, jsou vlastnosti testovací kapaliny, rychlost toku v kombinaci s průřezem trysky, geometrie trysky a nástavců, vzdálenost od dílu a úhel trysky, doba působení na kapalinu na povrch či míra opakování extrakce na kontrolovaném povrchu.



#### Legenda

- a) tryska kruhového průřezu pro lokalizovanou extrakci
- b) tlakové oplachování pro extrakci kontaminací ze slepých děr
- c) špičatá tryska pro extrakci kontaminací z vnitřních částí dílu
- d) paralelní tryska pro extrakci kontaminací z větších ploch
- e) plochá tryska pro extrakci větších povrchů
- 1 tvar trysky

Obr. 10: Ukázka trysek pro tlakové oplachování, přepracováno dle [3]



#### Legenda

- a) extrakce z jednotlivých komponentů
- b) extrakce z velkých ploch
- c) extrakce z malých komponentů (velké množství malých součástí)
- d) extrakce z přístupných vnitřních ploch součástí
- e) extrakce z přístupných vnitřních ploch součástí

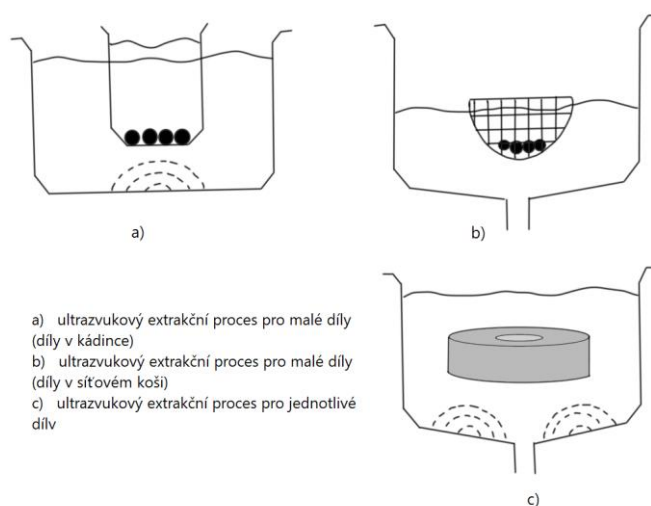
Obr. 11: Ukázka využití tlakového oplachování dle vybrané plochy, přepracováno dle [3]

#### ▪ Ultrazvukové vibrace

Částice je možné extrahovat za pomoci ultrazvukových vibrací v rozsahu 20 kHz až 400 kHz přenesených na plochy testovaného dílu s použitím kapaliny. Čistící proces je prováděn ponořením dílu do ultrazvukové vany.

Schopnost ultrazvukových vibrací oddělit kontaminace je zejména zajištěna frekvencí vibrací a změnou ultrazvukových tlaků. Platí pravidlo, že čím vyšší ultrasonický výstup a nižší ultrazvuková frekvence, tím větší síly fyzického čištění vznikají. Při špatném zvolení parametrů může docházet k oddělení příliš velkého množství částic. Riziko takové situace nastává zejména u litiny, kdy může docházet k uvolňování grafitu. Zvýšená pozornost je nutná i u extrakce kontaminací z hliníkových odlitků a povlakovaných či natřených dílů, u kterých ultrasonické vibrace mohou způsobit poškození materiálu a v konečném důsledku i vznik nerelevantních kontaminací.

Ultrazvukové vany jsou vhodné pro analýzu vnějších i vnitřních geometrií za předpokladu, že zvukové vlny mohou proniknout otvory dílu s dostatečnou intenzitou. Metoda je obzvláště vhodná pro extrakci kontaminací z velkého množství malých dílů, jejichž individuální inspekce by byla náročná a časově neefektivní. Ultrazvukové vany lze využít i pro zlepšení extrakčního procesu v kombinaci s vnitřními oplachovacími metodami. V takovém případě je vnitřek testovaného komponentu nejprve podroben extrakci průtokem testovací kapaliny a následně ponořen do ultrazvukové vany. Ukázku různých uspořádání extrakčního procesu a příklad dílů vhodných pro tento druh extrakce je možné vidět na Obr. 12



Obr. 12: Schéma variant uspořádání ultrazvukového extrakčního procesu, přepracováno dle [3]

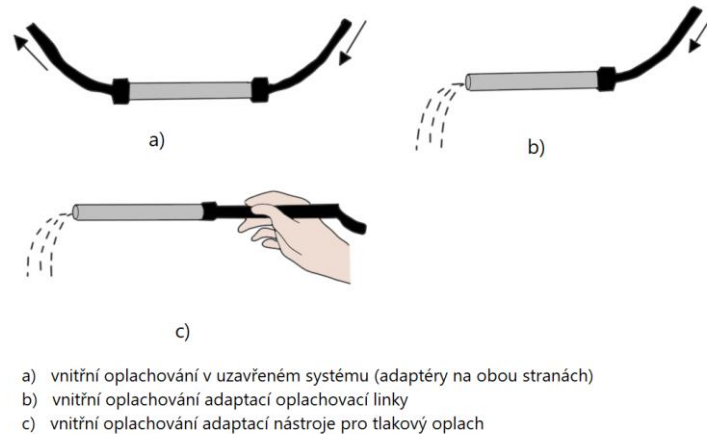
#### ▪ Vnitřní oplachování

Vnitřní oplachování spočívá v extrakci kontaminací proudem kapaliny, která protéká kolem vnitřních povrchů součásti. Během tohoto procesu je celá součást (nebo téměř celá součást) kompletně naplněna tekutinou. Aby bylo zajištěno účinné oddělení částic od ploch, proudění kapaliny by mělo být turbulentní a nikoliv laminární. Vnitřní oplachování je vhodnou metodou pro komponenty, které budou obsahovat tekutiny při pozdějším užívání. Příkladem mohou být pasivní komponenty – trubky, filtry a výměníky tepla. Může se jednat i o aktivní komponenty, které musí být aktivovány proudem tekutiny (ventily, vstřikovače) nebo dokonce musí být poháněny (pumpy).

Při vnitřním oplachování je alespoň jedna část komponentu hermeticky připojena k části, která zadržuje testovací kapalinu. Jakmile kapalina prošla testovaným dílem, kapalina může odtékat

do uzavřeného oplachovacího systému, nebo může samovolně odkapat do extrakčního umyvadla bez působení externího tlaku (Obr. 13).

Výhoda vnitřního oplachování spočívá v namočení pouze vnitřních ploch, nevzniká tedy riziko kontaktu kapaliny s vnějšími plochami a zanesení kontaminací z nerelevantních ploch. U dílů, u kterých je třeba napojit zdroj kapaliny na velký průměr, dochází obvykle ke střetu s limity této metody. V případě velkého napojovacího průřezu je vyžadováno velké úsilí pro sestavení oplachovací sestavy s dostatečnými objemy a rychlostmi proudění kapaliny. V takových případech může být vhodnější zvolit jako extrakční metodu agitaci nebo tlakové oplachování.

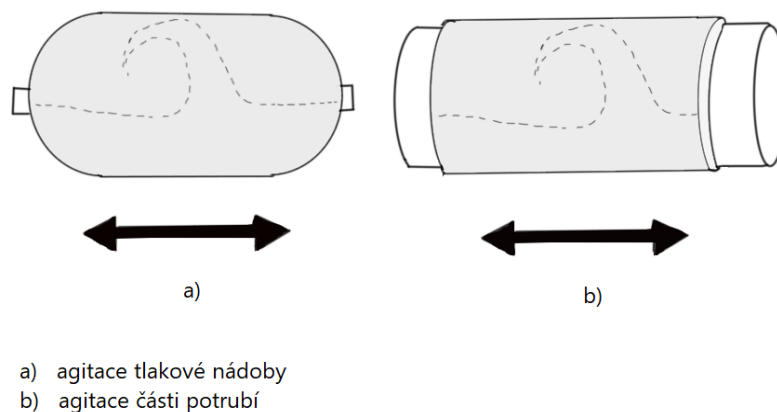


Obr. 13: Ukázka vnitřního oplachování, přepracováno dle [3]

### ▪ Agitace

Testovaný díl je při agitaci částečně naplněn kapalinou a všechny otvory jsou uzavřené. Agitací této kapaliny dojde k oddělení částic ulpívajících na vnitřních kontrolovaných površích a následně dochází k jejich přemístění do kapaliny. Agitační proces umožňuje kapalině působit silou na částice v různých směrech a zároveň pronikat do těžko dostupných míst.

Tato metoda je vhodná pro předměty s dutinami, které jsou přístupné alespoň za pomoci jednoho otvoru. Metoda naopak není vhodná pro inspekci úzkých vnitřních geometrií, jako jsou trubky nebo kapiláry, protože impulz vytvořený agitací je příliš malý pro dosažení potřebné účinnosti. Ukázka využití agitace při kontrole kontaminací je vidět na Obr. 14.



Obr. 14: Ukázka využití agitačního extrakčního procesu, přepracováno dle [3]

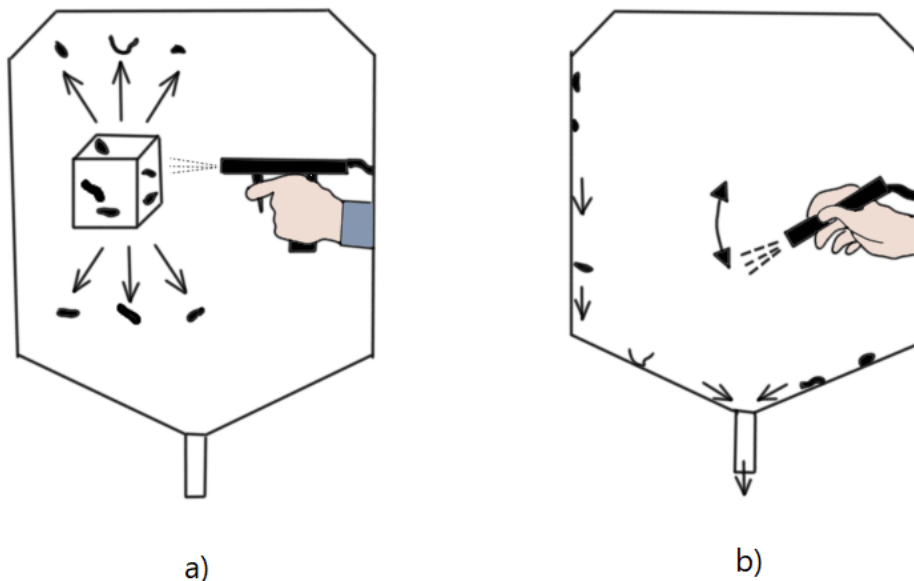
### 3.2.2 Extrakce vzduchem

Extrakci vzduchem je možné provést dvěma způsoby – extrakcí proudem vzduchu (podobné tlakovému oplachování z kapalných extrakčních metod) nebo extrakcí průtokem vzduchu, což je metoda podobná vnitřnímu oplachování kapalinou.

#### ▪ Extrakce proudem vzduchu za pomoci trysky

Při této extrakci jsou kontaminace odděleny od dílu za pomoci proudu čistého, stlačeného vzduchu. Metoda může být využita pro oddělení kontaminací např. z elektronických součástí, dílčích součástí sacího traktu motoru, který není možné vyčistit použitím kapalné extrakce nebo také pro odstranění kontaminací z logistických balení (blistry, malé přepravní boxy či karton).

Pro tento druh extrakce je zapotřebí zcela uzavřené zařízení s možností manuálního zásahu (tzv. rukavicový box). Zařízení musí obsahovat připojení na stlačený vzduch. Extrakce vzduchem je provedena ve dvou krocích. V první fázi jsou částice odděleny od testovaného dílu tryskou se stlačeným vzduchem a následně ulpívají ke stěnám zařízení, které jsou navlhčené. Testovaný komponent je následně ze zařízení vyjmut. V druhé fázi jsou částice opláchnuty od stěn a přesunuty na analýzu pomocí procesů podobných konečnému oplachovacímu kroku po extrakci tlakovým oplachem (Obr. 15).



- a) Krok 1: extrakce částic z testovaného dílu za pomoci proudu stlačeného vzduchu
- b) Krok 2: vyjmutí testovaného dílu a provedení závěrečného oplachovacího kroku za pomoci kapaliny

Obr. 15: Schéma dvou základních kroků při extrakci kontaminací za pomoci proudu vzduchu, přepracováno dle [3]



#### ▪ **Extrakce prouděním vzduchu**

Metoda je principem podobná extrakci vnitřním oplachem a je nejčastěji vhodná pro kontrolu vnitřních povrchů dílů, které vedou vzduch. Při této extrakci procházejí otvory malých průřezů (kolem několika cm) velké objemy vzduchu. Extrakce se sestává ze dvou fází. V prvním kroku je provedeno upnutí dílu, uvolněné částice proudem čistého vzduchu ulpívají na velkých plochách – kovovém filtru s jemnou sítí, který je umístěn v primární filtrační jednotce. Tento filtr je po prvním kroku vyjmut a přesunut k druhému kroku, kdy je provedena extrakce kapalinou metodou tlakového oplachu. Cílem je vyjmout částice z primárního analyzačního filtru a přemístit je na druhý filtr, který je vhodný pro mikroskopii nebo gravimetrii.

#### 3.2.3 Jiné metody extrakce

Kromě extrakčních metod zmiňovaných normou ISO 16232:2018 je v praxi využívána celá řada dalších metod. Blíže budou popsány dvě z nich – extrakce lepicí páskou a extrakce za pomoci witness plate. [4]

#### ▪ **Extrakce lepicí páskou (tape lift metoda)**

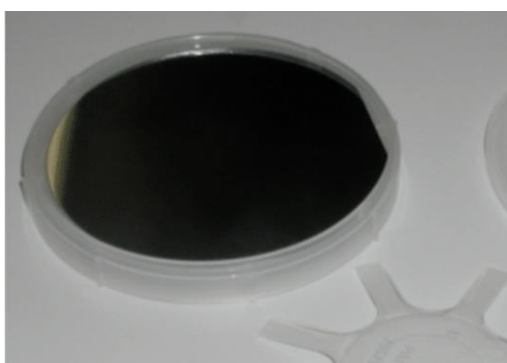
Mezi nejjednodušší metody extrakce částic přímo z povrchu dílu patří metoda lepicí pásky (tape lift), kdy dochází ke sběru částicových kontaminací použitím potažené lepidlo částí transparentní pásky. Páska může být upevněna na povrchu podložního sklíčka pro snadnou následnou manipulaci v případě pozorování částic v mikroskopu. Pro extrakci částic lze využít i matné pásky, která je následně připevněna ke sklíčku tak, že dochází k pozorování vzorků v mikroskopu skrz podložní sklíčko. [4]

Přes jednoduchost metody se jedná o široce využívaný přístup i v odvětvích vyžadujících přísnou kontrolu čistoty povrchu, např. u hardware komponentů či v kosmickém průmyslu. Již v průběhu vývoje komplexních součástí, které jsou náchylné na přítomnost kontaminací, je nutné přítomnost nečistot sledovat a vyhodnocovat. Metoda lepicí pásky je díky své jednoduchosti aplikovatelná prakticky v kterékoliv fázi vývoje součástí. Vzhledem k širokému využití metody je třeba ověřovat její účinnost. Příkladem takového ověření může být studie, porovnávající metodu lepicí pásky s dalšími alternativami. Jednou z těchto alternativ je oplach dílu daným rozpouštědlem a až následně provedení sejmutí částic páskou. Možným rozpouštědlem může být destilovaná směs 50procentního n-heptanu a isopropyl alkoholu. Z průzkumů vychází, že extrakce lepicí páskou po předchozím oplachu je méně účinná než extrakce samotnou páskou. Tento výsledek souvisí s kapilárními silami aplikované kapaliny, které při kontaktu s testovaným povrchem mohou navýšit přilnavost částic k podkladu a tím zkomplikovat jejich následnou extrakci lepicí páskou. Metodu extrakce lepicí páskou lze tedy vyhodnotit jako efektivní a jednoduchou metodu manuální extrakce částic. Metoda je zejména výhodná v místech, kde demontáž či vyjmutí dílu není žádoucí nebo vůbec možná nebo při kontinuální kontrole čistoty vyvíjených prototypů. [20]

## ▪ Witness Plate

Witness Plate jsou materiály, které se obecně využívají ke sběru částic gravitační sedimentací. Takto získané částice je možné na desce později spočítat a identifikovat. V případě využití několika witness plate v průběhu času je možné identifikovat druh a množství znečištění v různých časech. Využívání této metody bylo zpočátku nejhojnější při výrobních procesech polovodičů, kde byly využívány křemíkové pláty (Obr. 16). V dnešní době existuje celá řada zařízení umožňujících automatizovanou analýzu těchto křemíkových desek. Zmiňované skenery využívají laserový paprsek, který pláty skenuje. Skenery mohou poskytovat informace o distribuci velikostí částic, informace o škrábancích či jiných nečasticových kontaminacích. Zařízení také umožňuje vytvoření digitální mapy umístění částic. Tuto mapu je možné následně vložit do automatizovaných mikroskopů, které získají informaci o lokaci částice a mohou provést podrobnější analýzu. [4] [21]

Ačkoliv název metody napovídá, že se jedná výhradně o předmět ve tvaru desky, witness plate může mít celou řadu tvarů a název souvisí pouze s prvotním využíváním metody ve formě výše zmíněných holých silikonových desek bez vzoru. Příkladem může být Preseverances Rover, který přistál na Marsu v roce 2021. Protože řízení kontaminací v kosmickém průmyslu je klíčové, byl Rover vybaven tzv. witness tubes, které obsahují různé materiály, u kterých je riziko usazení kontaminací. Schéma těchto witness tube pro sběr kontaminací spolu s nádobami na sběr vzorků hornin na Marsu je možné vidět na Obr. 17. Ačkoliv se jedná o odlišný tvar vzorkovacího předmětu, princip metody zůstává stejný. Podobně ve výrobě se jako witness plate často využívají součásti používané přímo v montážním procesu. Pokud je v dané výrobě využíván kvantitativní způsob sběru a analýzy kontaminací ze součástí, částice přidané na díl vlivem vystavením dílu pracovišti, přepravním kontejnerům, přepravě, balení či skladování mohou být změřeny za pomoci witness plate. [4] [22]



Obr. 16: Využití křemíkového plátu jako Witness Plate [23]



Obr. 17: Schéma nádobek na extrakci vzorků a witness tubes, které jsou součástí Preseverances Rover, přepracováno dle [24]

### 3.3 Filtrace

Po dokončení extrakce jsou částice již odděleny od testovaného dílu, ale jsou smíchány s extrakční kapalinou. Částice je třeba od kapaliny oddělit filtrací. V rámci tohoto procesu dojde k oddělení extrahovaných částic a následně k jejich umístění na povrch analyzačního filtru, na kterém mohou být dále hodnoceny. Pro úspěšné oddělení částic od kapaliny i jejich umístění na analyzační filtr je třeba zvolit odpovídající metodu filtrace a vhodný typ analyzačního filtru.

Nejčastěji užívaným typem filtrace je vakuová filtrace. Druh zvoleného analyzačního filtru závisí zejména na velikosti a množství částic, které jsou hodnoceny. Mezi základní vlastnosti analyzačních filtrů, které je třeba vzít při volbě v úvahu, patří odolnost vůči chemikáliím, schopnost nepropustit částice či optické vlastnosti filtru. Pokud je inspekce čistoty prováděna v rozsahu standardních analyzačních procedur (detekují se částice rozměrů nad 50 mikrometru gravimetrickou či světelnou analýzou), je doporučeno užít filtru s jemností sítě 5 mikrometrů.

### 3.4 Analýza

Analýza kontaminací se dělí dle účelu na dva základní typy – analýza velikosti částice a analýza s cílem identifikace částice. Velikost částice není u většiny případů dostatečně vypovídající informace, protože vychází ze snahy popsat částici za pomoci jediné hodnoty. Vztah této hodnoty k reálné částici není možné vyhodnotit jako absolutně správný. [25]

Identifikace částic je nejčastěji provedena na základě atomového/molekulárního složení částic. Takovou analýzu nelze provádět hromadně, ale je třeba identifikovat každou částici zvlášť. Identifikace částic je často zapotřebí pro kontrolu čistoty v čisté místnosti, pro průmyslovou kontrolu kvality nebo pro analýzu selhání. [25]

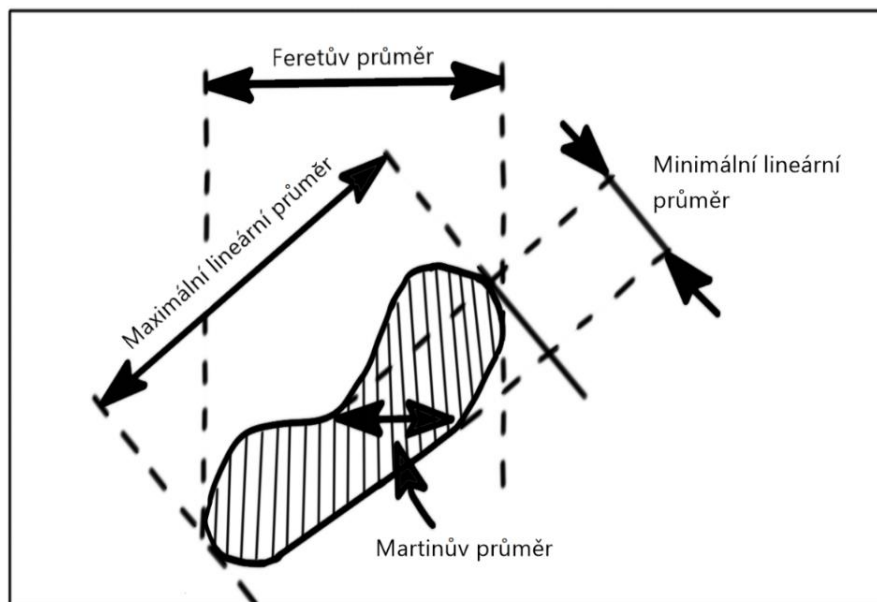
Možnosti metod získání informací o rozměrech a chemickém složení jsou rozsáhlé. Rozměry částic mohou být měřeny od několika nanometrů po stovky mikrometrů. Mezi metody měření se řadí např. světelná mikroskopie, elektronová mikroskopie a s ní spojené analýzy chemického složení (SEM/EDS), optická počítadla částic a další. Aplikovatelnost se liší dle cílů analýzy a parametrů hodnocených částic (např. velikost hodnocených částic, jejich množství, materiálové složení apod.). Dále bude podrobněji probrán výběr metod relevantní pro běžnou analýzu kontaminací v automobilové výrobě. [25]

Metody analýzy se dělí na standardní a rozšířené. Mezi standardní metody patří gravimetrická metoda a optická (světelná) analýza. Rozšířených metod analýzy je velké množství a zaměřují se na získávání podrobnějších informací o kontaminacích.

#### 3.4.1 Sledované parametry

Mezi základní sledované parametry se řadí rozměry částice. Ty mohou být zapotřebí pro popis jedné konkrétní částice, či při počítání a měření většího množství částic. Při měření nepravidelně tvarovaných částic (většina částicových kontaminací) může docházet k získání celé řady odlišných výsledků. Pro zajištění určité míry standardizace je možné využít jedné z definic pro popis velikosti částice: Feretův průměr, minimální lineární průměr, maximální lineární průměr a Martinův průměr (viz Obr. 18). [25]

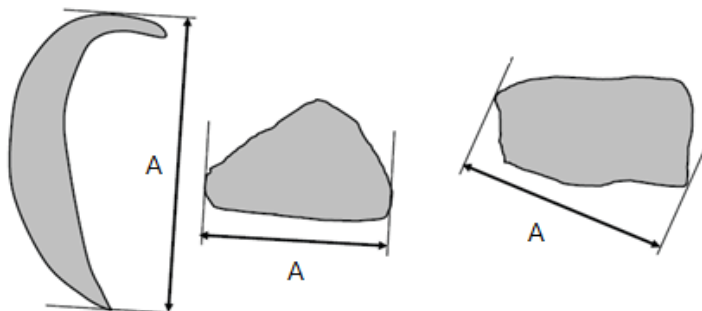
- *Minimální lineární průměr* (také minimální Feretův průměr) je definován jako nejkratší vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými přímkami tečnými ke kolmému průmětu částice v měřící rovině. [25]
- *Maximální lineární průměr* (Také maximální Feretův průměr) je definován jako největší vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými přímkami tečnými ke kolmému průmětu částice do měřící roviny. [25]
- *Feretův průměr* je definován jako kolmý průmět do pevného směru vzdálenosti mezi dvěma rovnoběžnými přímkami, rovnoběžnými s pevným směrem a tečnými ke kolmému průmětu částice do měřící roviny. Feretův průměr rozšiřuje klasický koncept průměru. Je definován jako vzdálenost mezi dvěma tečnými body rovnoběžných přímek měřených v daném směru. V praxi se určení Feretova průměru provádí za pomoci tečen dotýkajících se obvodu částice. [25] [26]
- *Martinův průměr* je definován jako délka úsečky rovnoběžné s pevným směrem, který rozdělí kolmý průmět částice do měřící roviny na shodně velké oblasti. [25]



Obr. 18: Definice pro měření rozměrů částice za pomoci světelného mikroskopu, přepracováno dle [6]

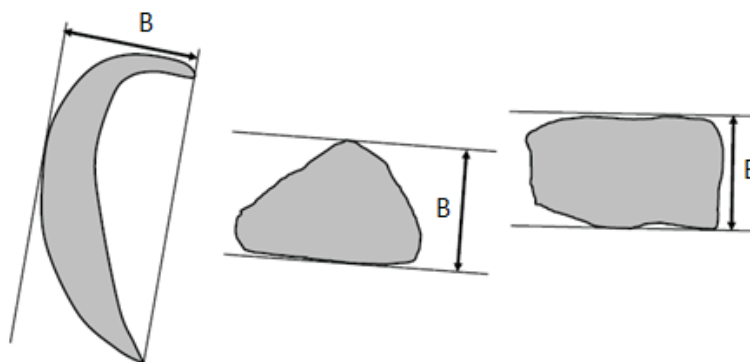
Pro hodnocení částicových kontaminací je často doporučeno využití Feretova průměru. V případě, že je třeba provést měření a spočítání většího počtu částic na jednom filtru, bývá doporučeno využití Feretova průměru. V takovém případě dochází ke změření rozměrů všech částic ve stejném pevném směru. Tato metodika pracuje s předpokladem, že orientace všech částic je náhodná. Měření velikosti částice v pevném směru pak vede k získání smysluplné průměrné velikosti částice. Tento předpoklad je nicméně narušen, pokud je koncentrace částic na filtru příliš malá. V případě malé koncentrace částic, případně v situaci, kdy jsou předmětem zkoumání přesné rozměry (např. z důvodu rizikového potenciálu konkrétní částice) částice, je vhodné vyhodnotit maximální Feretův průměr a minimální Feretův průměr. [25]

Maximální Feretův průměr (viz Obr. 19) souvisí s tzv. největším rizikovým potenciálem částice (určuje největší možnou citlivou mezeru, kterou částice může v automobilovém systému přemostit - např. vzdálenost mezi dvěma elektronickými elementy).



Obr. 19: Maximální Feretův průměr (rozměr A), přepracováno dle [3]

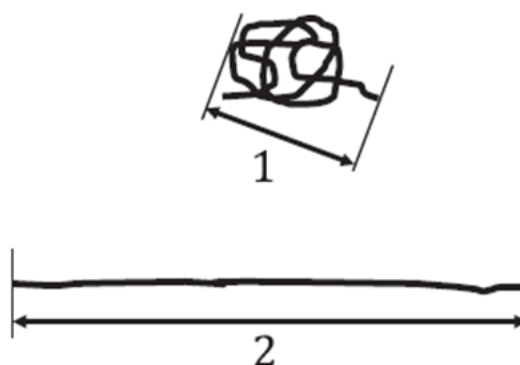
Šířku částice lze vyhodnotit za pomoci minimálního Feretova průměru (Obr. 20). Jedná se o nejmenší možnou vzdálenost dvou tečen dotýkajících se obvodu částice. Destruktivní potenciál definovaný tímto parametrem souvisí s hraniční šířkou kanálů, kterým by částice mohla projít. [26]



Obr. 20: Minimální Feretův průměr (rozměr B), přepracováno dle [3]

Při světelné analýze je možné charakterizovat a měřit vlákna, která do dílů a systémů mohou snadno vstoupit téměř v jakémkoliv výrobním prostředí. Vlákna se oddělují od textilních materiálů a při analýze čistoty se často objevují. Obvykle mají velkou délku, ale malý vliv na funkci dílů, a proto je vhodné je oddělit od kompaktních a potenciálně nebezpečných částic. Ve výjimečných případech některé tvrdé nečistoty vláknité struktury mohou být nebezpečné pro funkčnost dílů. V takovém případě je třeba vlákna netextilního původu brát v potaz jako kritické částice a tuto informaci jasně specifikovat v dokumentaci.

Délka vláken může být změřena dvěma způsoby (viz Obr. 21). V první řadě může být rozměr definován jako u jiných částic pomocí maximálního Feretova průměru. Vzhledem k tomu, že vlákna oproti částicím nemají stálý tvar, není tato metoda příliš vhodná. Druhá varianta je vyjádření vláken pomocí prodloužené délky. Tato délka souvisí s nezamotaným, prodlouženým vláknem, která může být spočítána pomocí výpočetních metod softwarů určených ke zpracování snímků.



1 Délka =  $Feret_{max}$

2 Délka = prodloužená délka

Obr. 21: Schéma charakterizace vláken, přepracováno dle [3]

#### ▪ Charakterizace lesklých kovových částic

Kovové částice jsou klíčové kontaminace v automobilovém průmyslu, které je třeba přesně a spolehlivě charakterizovat. Kovové materiály vstupují do procesu výroby většiny funkčně relevantních systémů a v důsledku toho tvoří i většinu kontaminací nalezených na dílech pocházejících z výrobních a montážních fází. V rámci procesu hodnocení technické čistoty je proto zásadní kovové částice přesně a spolehlivě charakterizovat. Kovové částice jsou zároveň hodnoceny jako potenciálně rizikové pro funkčnost dílů a systémů kvůli svým materiálovým vlastnostem (např. tvrdost či elektrická vodivost).

Standardní světelná (optická) analýza neumožňuje univerzálně a spolehlivě charakterizovat kovové částice. Charakterizaci kovových částic lze provést s jistotou pouze pomocí rozšířených analyzačních metod. To je způsobeno zejména jejich odlišným optickým vzhledem, který závisí na konkrétním kovu a na způsobu zpracování. V důsledku se vlastností jakými jsou barva, jas, povrchová struktura, tvar a homogenita částice stejného materiálu mohou zásadně lišit.

Společná vlastnost, kterou lze při charakterizaci kovových částic využít, je lesklý vzhled. Většina kovových částic se jeví leskle, pokud povrch částice není matný, pokrytý prachem či jinými kontaminacemi.

Za vlastnost kovového lesku jsou zodpovědné volně se pohybující elektrony v kovových materiálech. Aby bylo možné takové částice identifikovat, musí být získány a porovnány dva různé snímky. První snímek je pořízen na mikroskopu za pomoci zkřížených polarizátorů (pole image) s cílem zaznamenat všechny přítomné částice. Druhý snímek je proveden za užití paralelních polarizátorů nebo bez polarizátoru (bright image). Pokud se na světlém snímku objeví světlé skvrny (podobné nebo stejné jako bílé hodnoty na histogramu) ve stejných oblastech, které pole image přiřadil k částicím, a pokud jsou tyto skvrny na pole image tmavé, pak je možné sledovanou částici vyhodnotit jako kovově lesklou. Pokud se vybraná tmavá hodnota blíží k černé hodnotě na histogramu, je možné jasně odlišit částice s kovovým leskem a částice s jiným druhem lesku.

Pro skenery a mikroskopy bez polarizační jednotky nemůže být tato analyzační technika aplikována. Přesto přítomnost světlých odlesků může být využita pro před charakterizaci kovově lesklých částic s přijetím rizika, že i částice s jiným druhem lesku mohou být klasifikovány jako kovově lesklé. Celá řada parametrů rozhoduje, zda je částice charakterizována jako metalicky lesklá v rámci automatizované analýzy. V tento okamžik není možné standardizovat typ zobrazovacích čoček, stupeň zvětšení, typ a přesnou geometrii osvětlení, proces charakterizace kovového lesku a přesné parametry nastavení, individuální vlastnosti kovových částic a individuální orientace částic. Z výše uvedených důvodů výsledky automatizované charakterizace kovových částic je možné kompletně porovnávat pouze, pokud jsou užity identické systémy, jsou nastaveny identické parametry a pokud i pozorované částice jsou identické.

### 3.4.2 Standardní metody

Standardní metody se užívají zejména pro ověření, že jsou specifikace čistoty stanovené v rámci dodavatelsko-odběratelského řetězce splněny.

- **Gravimetrie**

Gravimetrie je proces, kdy je zjišťována celková hmotnost všech částic extrahovaných z testovaného dílu. Provádí se změřením hmotnosti celého analyzačního filtru, a to před a po přefiltrování extrakční tekutiny. Výsledkem analýzy je rozdíl změřených dvou hmotností. Velikost této hmotnosti závisí na množství, velikosti a materiálu kontaminací. Pokud jsou prováděny další formy analýzy (např. optická), gravimetrie se vždy provádí první, aby nedošlo ke změně hmotnosti vlivem vzdušné vlhkosti. Tato metoda neposkytuje informace o množství či vlastnostech analyzovaných částic, a získává proto pouze velmi málo informací o riziku, které částicové kontaminace pro díl představují.

- **Optická (světelná) analýza**

Optická (světelná) analýza se řadí mezi standardní metody analýzy částic. Částice je možné touto metodou změřit, spočítat a také blíže charakterizovat. Jelikož již jen jedna či několik málo částic může mít velký vliv na funkčnost dílů a systémů, je třeba tyto částice charakterizovat spolehlivě. Pro spolehlivé hodnocení je třeba analyzovat celou plochu analyzačního filtru. Optické systémy se mohou používat nejen pro ověření parametrů stanovených v dodavatelsko-odběratelském vztahu, ale v případě nastavení vhodných parametrů i pro rozšířenou analýzu.

Optická analýza se provádí pomocí světelných mikroskopů, které lze rozdělit na mikroskopy s malým a velkým výkonem. V obou případech je analyzační filtr s částicemi ozářen vhodným zdrojem a následně reprodukován pomocí optických čoček (obvykle ve formě pixelů na kamerovém senzoru). Získané snímky se dále zpracovávají s cílem detekovat částice a stanovit jejich rozměry. Objekty mohou být zobrazeny pouze za předpokladu, že se jeví opticky rozdílně od pozadí. Např. bílé částice nemohou být detekovány na pozadí bílého filtru, velmi bledé částice mohou být detekovány jen částečně.

Které částice bude možné detailně rozpoznat a jakým způsobem budou měřeny, závisí na mnoha individuálních faktorech. Z hlavních faktorů lze zmínit zobrazovací čočky (jejich možnosti

zvětšení a rozlišení), druh osvětlení, prahovou hodnotu, která umožňuje softwarovému vybavení rozlišit mezi částicemi a pozadím filtru (tzv. binarizační práh), materiálové složení a optické vlastnosti dané částice (barva, kontrast jasu, homogenita, povrchová topografie, drsnost apod.)

Světelné mikroskopy s malým výkonem mikroskopie se řadí mezi nejjednodušší a nejlevnější metody rutinní analýzy částic. Takové mikroskopy obvykle poskytují méně než 50násobné zvětšení. Touto metodou je možné získat detailnější informace než dříve zmiňovanou gravimetrií bez velkých přídatných časových či finančních nákladů. Při snaze o identifikaci částic je kontrola částice za pomoci světelné mikroskopie často prvním krokem. Tato analýza umožňuje základní popis částice jako je tvar, zda částice odráží světlo (zda je lesklá), zda je jednotvárná či zda má povrch částic specifickou strukturu. Analýza světelným mikroskopem také často pomůže určit, jaký další typ analýzy pro přesné určení chemického složení je vhodný. V neposlední řadě je vybavení pro analýzu světelným mikroskopem relativně snadno přenosné, a umožňuje proto analýzu přímo v místě řešení problému. Zkušený uživatel zařízení dokáže identifikovat částice do velikost 50  $\mu\text{m}$  s relevantní přesností. [25]

Světelné mikroskopy s velkým výkonem mají typicky až 1000násobné zvětšení. Obecně mikroskopy s více jak 100násobným zvětšením jsou považovány za vysokovýkonné. S tímto zvětšením lze pozorovat objekty až do 1-2  $\mu\text{m}$ . Kromě identifikace tvaru, velikosti a barvy částice vysokovýkonné světelné mikroskopy umožňují často hlubší analýzu pomocí speciálního osvětlení. Dodatečné informace mohou být užitečné při analýze částic. Při pozorování objektů ve světelném poli je celá pozorovaná oblast osvětlena a kontrast mezi částicemi a jeho podkladem (filtr, mikroskopické sklíčko apod.) je nízký. Kvalita pozorování může být zlepšena pozorováním ve tmavém poli, protože relativně tmavé pozadí umožňuje pozorování částice ve větším kontrastu. [25]

### 3.4.3 Rozšířené metody

S rozšířenými metodami analýzy je možné získat více informací o tvaru částice (třetí rozměr) nebo o jejím složení. Rozšířené analyzační metody se často využívají v případě potřeby optimalizace procesů a v rámci průzkumu příčin s cílem získat dodatečné informace o původu částic. Rozšířená analýza může být provedena pro lepší vyhodnocení destruktivního potenciálu částice, a tedy určit nejvhodnější kroky, které by měly být provedeny, pokud by došlo k překročení limitních hodnot. Tyto kroky je možné provést díky širšímu spektru informací, které tyto analyzační metody poskytují.

V některých případech může být žádoucí využít rozšířené analyzační metody i pro ověření specifikací čistoty stanovených v rámci zákaznicko-dodavatelského řetězce. Tento přístup nicméně znamená výrazně vyšší náklady v porovnání se standardními analyzačními metodami.

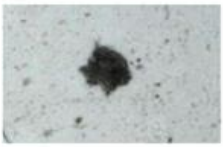





Informace o fyzických vlastnostech částic jako je tvrdost, abrazivnost či jiné materiálové vlastnosti je možné získat pouze za užití rozšířených analyzačních metod. V tomto případě je kovový lesk (informace získaná pomocí standardních analyzačních metod) dobrým vodítkem, že se jedná o kovový, a tedy i vodivý materiál. Nicméně pokud je kovový původ částice nutné určit s jistotou, je třeba využít možností rozšířených analyzačních metod.



## ▪ Rozšířená světelná (optická) analýza

Cílem rozšířené světelné optické analýzy (nebo také analýzy s upraveným nastavením) může být přesnější změření částic. Mezi upravované nastavení patří např. osvětlovací režimy či korekce pozadí. Pro hodnocení velikosti částic je možné využít jiné nastavení, než doporučené pro standardní analýzu (jiné pixelové rozlišení, či jiné definice délky a šířky částice). Volba osvětlovacího režimu může výrazně změnit vizualizaci pozorovaného vzorku. Ukázka tohoto vlivu na tmavé a kovově lesklé částice je zobrazena na Obr. 22.

Úprava snímků může být užitečný nástroj např. pro zvýšení kontrastu, ostrosti, oddělení sousedících částic, zaplnění děr apod. Mezi možné užitečné nástroje pro úpravu snímků patří uzavření (*closing*), otevření (*opening*) a vyplnění (*filling*). Při procesu otevření dochází k vyplňování mezer, vyhlazování obrysů a spojení blízkých objektů (dilatace následovaná erozí s užitím matrice stejné pixelové velikosti pro obě operace). Při uzavření (eroze následovaná dilatací s užitím matrice stejné pixelové velikosti pro obě operace) dochází k odstranění malých artefaktů s vyhlazením obrysů. Vyplnění se skládá z vyplnění děr bez ohledu na jejich velikost při zachování obrysů částic. Všemi úpravami dochází k úpravě původních informací na snímcích a je třeba dbát zvýšené opatrnosti.

Osvětlovací režim	Typy částic	
	Tmavé částice	Kovově lesklé částice
Dopadající světlo Tmavé pole		
Dopadající světlo Světlé pole		
Procházející světlo Světlé pole		

Obr. 22: Ukázka vlivu osvětlovacího režimu mikroskopu na vizualizaci částice, přepracováno dle [3]

## ▪ SEM/EDS

SEM/EDS analýza je kombinací analyzačních technik, kdy dochází k počítání a měření částic za pomoci skenovacího elektronového mikroskopu (SEM) a stanovení materiálového složení těchto částic metodami energeticky disperzní rentgenové spektroskopie (EDS). Schéma zařízení je možné vidět na Obr. 23.

Při analýze pomocí skenovacího elektronového mikroskopu dochází ke skenování povrchu vzorku fokusovaným svazkem elektronů. Elektrony, které jsou rozptýlené nebo zpětně odražené z povrchu vzorku jsou sbírány v detektoru. Povrch vzorku lze zobrazit na katodové trubici

synchronizací polohy elektronového paprsku v katodové trubici s polohou elektronového paprsku na vzorku. SEM metoda dokáže vytvořit snímky s větší hloubkou ostrosti v porovnání s běžnými světelnými mikroskopy. [25]

Dopadající paprsek elektronů je rozptýlen zpět do detektoru. Primární odražené elektrony budou mít kontrast jasů indikující materiály s vysokým atomovým číslem (jasnější) oproti materiálům s nižším atomovým číslem (tmavší). Sekundárně odražené elektrony neposkytují kontrast atomového čísla. Augerovy elektrony jsou emitovány atomy velmi blízko povrchu, typicky kolem 2 nm, a jejich energie jsou charakteristické pro prvek, od kterého pochází. Rentgenové paprsky mají energie, které jsou charakteristické pro prvek, ze kterého jsou emitovány. Rentgenové paprsky vznikající z objemu vzorku do obvyklé hloubky 1 až 5 mikrometrů. [25]

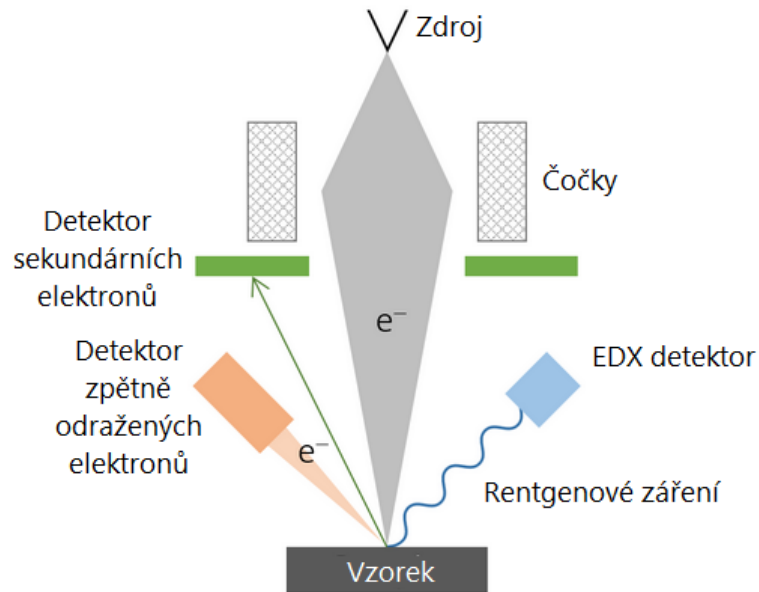
Skenovací elektronový mikroskop poskytuje informace o topografii vzorku (tvar, velikosti a textura) a zároveň i informace o prvkovém složení vzorku. [25]

Energeticky dispersní rentgenová analýza je metoda, kterou lze spojit s dalšími aplikacemi, včetně SEM. V kombinaci s elektronovým mikroskopem může metoda poskytnout informace o prvkovém složení v oblastech nanometrových rozměrů. Pomocí metody lze zjistit prvkové složení jednotlivých bodů nebo zmapovat rozložení prvků ve vzorku s užitím skenovací schopnosti elektronového mikroskopu. Komplikací metody může být velká intenzita paprsku, která může zapříčinit, že dojde k analýze i části podkladu, na kterém vzorek leží. Tuto nepřesnost lze částečně kompenzovat analýzou podkladového materiálu a porovnáním s výsledky analýzy pro samotný vzorek. Nelze ovšem docílit zcela přesného výsledku, jelikož vzorek může obsahovat prvky materiálu shodné s materiálem podkladu. [25]

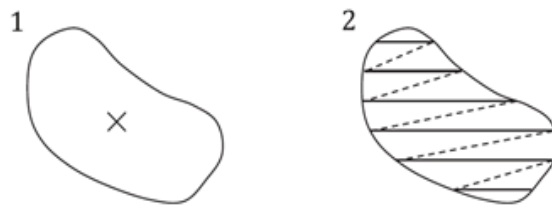
SEM/EDS analýza může být provedena ručně na jednotlivých částicích nebo na částicích předem vybraných ve světelném mikroskopu, pokud jsou souřadnice částic přeneseny do SEM/EDS systému. Přiřazením částic ke specifickým materiálovým třídám (odvozeným od jejich elementárního složení) mohou být získány přídavné informace o jejich rizikovém potenciálu (riziku destrukce) či původu.

Podobně jako v případě světelné (optické) analýzy, aby bylo zajištěno, že kritické částice budou detekovány, musí být prozkoumána celá plocha analyzačního filtru. Analyzační filtr musí být pečlivě připraven a částice se nesmí překrývat. Předpokladem pro efektivní detekci a vizualizaci částic je dobrý materiálový kontrast, který je získán díky rozdílu intenzity elektronů, které se odrazí zpět z různých chemických prvků.

V bodech na snímcích, které byly přiřazeny částicím je zaznamenáno spektrum energeticky disperzní rentgenové spektroskopie. Energetická poloha čar v rentgenovém spektru je charakteristická pro prvek, který ji tvoří. Analýza čarového spektra umožňuje kvantifikovat odpovídající prvky. Z výsledků lze vyvodit závěry o chemickém složení detekovaných částic. Aby bylo možné správně charakterizovat částici jako celek, nesmí se elektronový paprsek EDS analýzy zastavit na žádném místě částice, ale skenovat celý povrch částice (viz Obr. 24).



Obr. 23 Schéma SEM/EDS analyzačního zařízení, přepracováno dle [27]



- 1 NOK: stálá pozice elektronového svazku není vhodná pro částicovou analýzu
- 2 OK: Elektronový svazek prochází celým povrchem částice

Obr. 24: Vhodné provedení SEM/EDS analýzy, přepracováno dle [3]

Metoda má svá omezení. Částicím je přiřazena konkrétní třída materiálu pouze na základě jejich elementárních prvků. Vzhledem k omezenému energetickému rozlišení EDS detektorů mohou některé výsledky být nejednoznačné. Nedostatek materiálového kontrastu na pozadí organických analyzačních filtrů ztěžuje detekci organických částic. V důsledku toho jsou organické látky detekovatelné, ale jejich uhlíkový obsah brání jejich podrobnější specifikaci. Výjimku tvoří plasty, které obsahují nejen uhlík, dusík a kyslík, ale také další prvky jako jsou halogenové plasty (chlór v PVC, fluor v PTFE).

Pokud se vzorky připraví na kovových membránách, je možné změřit a spočítat i organické částice, plasty, nitrid bóru a karbon bóru.

#### ▪ Spektroskopie laserem buzeného plazmatu (LIBS)

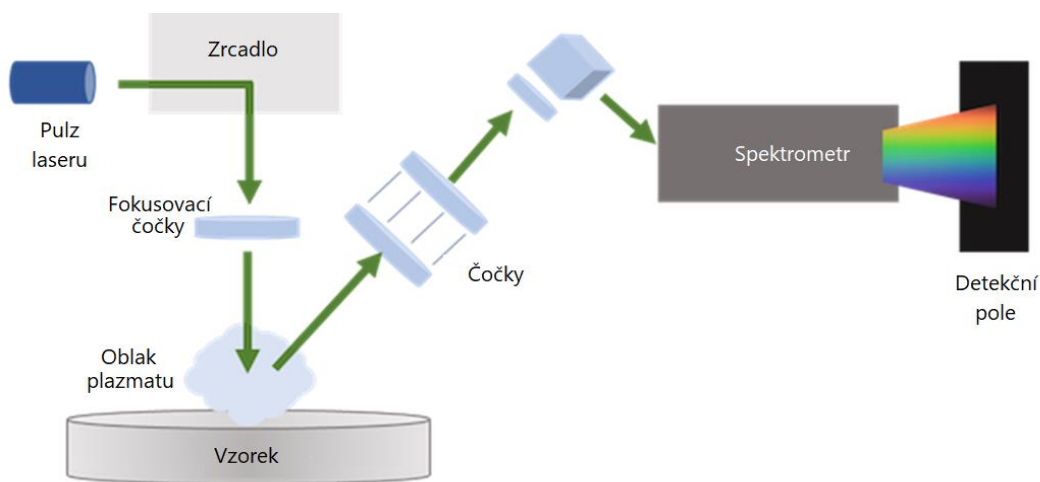
Spektroskopie laserem buzeného plazmatu (anglicky zkráceně LIBS) je druh emisní spektroskopie, která umožňuje stanovit elementární složení částic. V rámci analýzy je na vzorek zaměřený krátký laserový pulz, který vzorek zahřeje a následně odpaří, čímž je generován oblak plazmy. Vzniklé plazma obsahuje směs atomů, iontů a volných elektronů, které se nacházejí v analyzovaném materiálu. Při ochlazování plazmy ztrácejí atomy, ionty a elektrony energii

a emitují světlo ve spektrech charakteristických pro prvky v analyzovaném materiálu, čímž je možné stanovit chemické složení vzorku (Obr. 25 a Obr. 26). [28] [29]

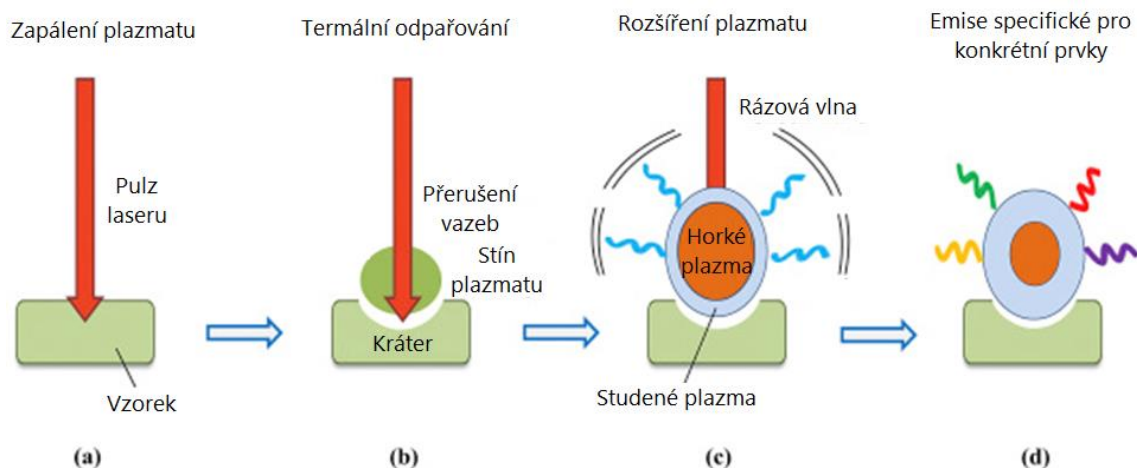
Čisté kovy obvykle emitují silný signál. Síla signálu je dána především bodem odpařování daného materiálu. Čím vyšší množství odpařeného materiálu pomocí laserového pulzu, tím silnější vzniklý signál. Protože každý prvek má své specifické spektrum, kovy a anorganické materiály mohou být jasně identifikovány použitím spektrálních databank. Polymery a elastomery mohou být identifikovány pouze, pokud jsou spojeny s anorganickými materiály. Pokud je užit silnější laserový pulz, je možné zobrazit fragmenty organických molekul, což umožňuje určení polymerů.

Moderní systémy jsou schopné analyzovat částice od velikosti přibližně 15  $\mu\text{m}$ . Kvalita signálu se liší dle numerické apertury čoček a světelné propustnosti spektrometru. Velikost fokálního bodu laseru je také určena numerickou aperturou čoček a kvalitou laserového paprsku. Na každé částici se analyzuje impaktní kráter o průměru 20  $\mu\text{m}$  a hloubce přibližně 10  $\mu\text{m}$ . Čas analýzy je kratší než 10 sekund. Metoda je kvantitativní a může být užita k identifikaci a klasifikaci slitin. V závislosti na rozlišení spektra mohou jednotlivé složky slitiny překrývat jiné materiály ve spektru a zhoršovat tím jejich identifikaci.

LIBS analýza probíhá tak, že operátor nejprve umístí testovací filtr na analyzační zařízení a spustí automatickou analýzu. Částice určené k analýze se vybírají na základě jejich velikosti nebo dalších tvarových parametrů. Operátor následně vloží vhodnou databanku, která umožní automatizované vyhodnocení získaného spektra. Některé analyzační systémy také umožňují ruční překontrolování po dokončení automatické analýzy. Operátor následně vybere přídatné měřicí body nebo jiné body zaostření nebo se rozhodne ostřelovat stejný bod opakovaně, aby se dosáhlo vyšší míry penetrace a bylo možné analyzovat hlubší vrstvy.



Obr. 25: Schéma zařízení pro LIBS analýzu, přepracováno dle [28]



Obr. 26: Schéma procesu LIBS metody, přepracováno dle [29]

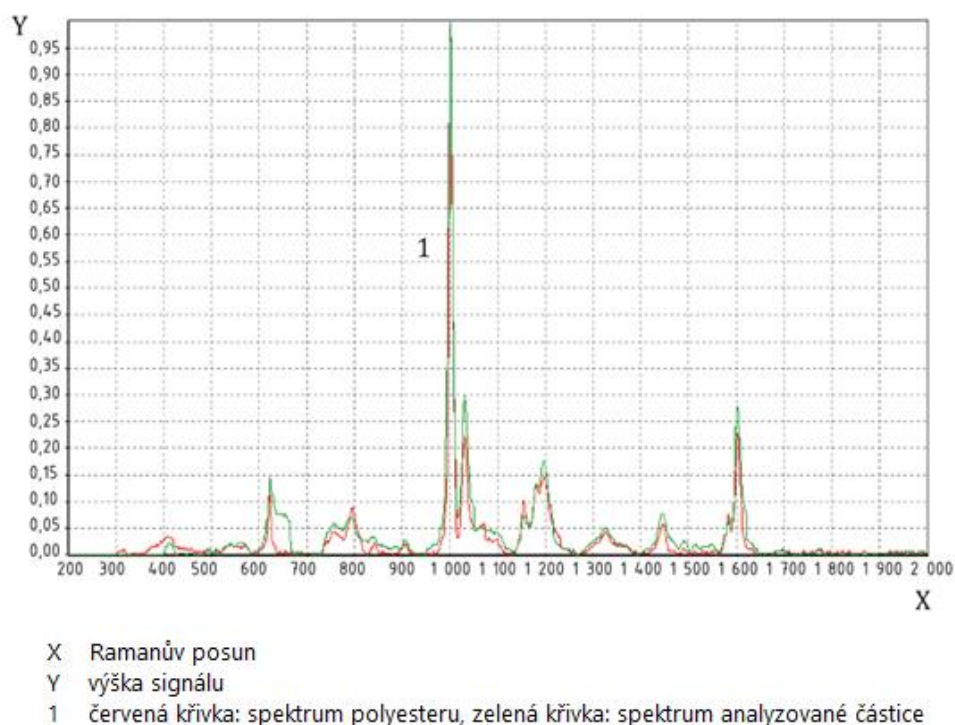
### ▪ Ramanova spektrometrie

Ramanova spektroskopie je forma oscilační spektroskopie (umožňuje určit chemickou strukturu vzorku a identifikovat přítomné sloučeniny měřením molekulárních vibrací). Stanovení složení Ramanovou spektrometrií je možné díky atomům v molekule a jejich vzájemnému uspořádání, které je vždy specifické pro konkrétní materiál. [25]

Analýza je provedena pomocí laserového paprsku, který je zaostřen na částici pomocí čoček. Interakcí laserového paprsku s materiálem dochází ke vzniku signálu, který je zaznamenán. Tento signál je označován jako spektrum a je přiřazen ke konkrétním sloučeninám na základě přiložené databanky. Možnost velmi přesného zaměření laseru umožňuje analyzovat velmi malé částice (lze identifikovat částice již od cca 1 až 2  $\mu\text{m}$ ). Schopnost analýzy částic menších rozměrů patří mezi hlavní výhody oproti metodě FTIR. [25]

Ramanova spektrometrie je nejčastěji využívána k identifikaci částic tvořených organickými molekulami, polymery, biomolekulami nebo anorganickými sloučeninami. Metoda je také velmi vhodná pro identifikaci přítomnosti různých forem uhlíku (diamant, grafit, amorfni uhlík, uhlíkové nanotrubičky apod.) a jejich množství. Systém je schopný analyzovat pouze molekuly (čisté kovy negenerují Ramanův signál). [25]

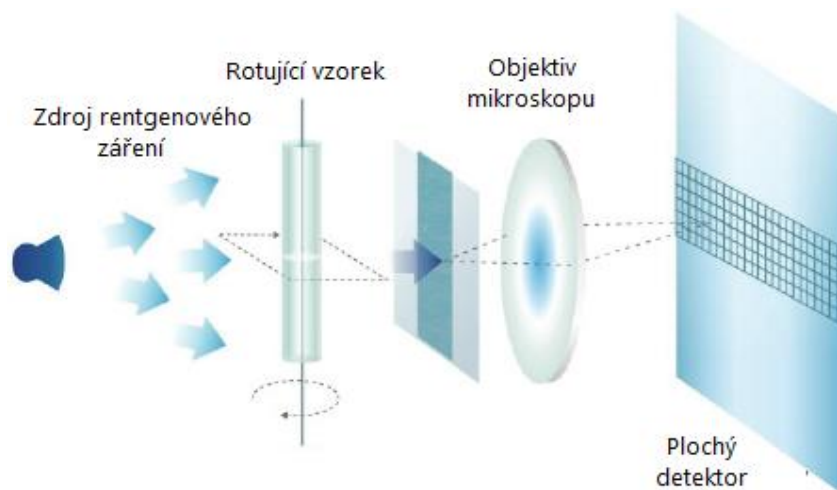
Typický čas analýzy se pohybuje v rozsahu 30 až 60 sekund. V některých případech může vlivem excitace laserovým paprskem docházet ke fluorescenci. Ta by mohla překrýt Ramanův signál a znemožnit klasifikaci. Klasifikace a vyhodnocení se provádí porovnáním křivek Ramanova signálu měřené částice a Ramanových křivek dostupných z referenční databanky (Obr. 27).



Obr. 27: Ukázka porovnání Ramanova spektra z databanky se spektrem měřené částice, zpracováno dle [3]

#### ▪ Rentgenová mikrotomografie

Rentgenová mikrotomografie je metoda, která byla původně vyvinuta pro lékařské odvětví, ale rychle se adaptovala i pro ostatní vědecké disciplíny. Jedná se o trojrozměrnou zobrazovací technologii, která využívá rentgenových snímků pro rekonstrukci mapy vzorku, který absorboval rentgenové záření. Analyzační zařízení se obvykle skládá ze zdroje rentgenového záření, otočné podložky vzorku, plochého světelného detektoru a počítače, který řídí proces analýzy (viz Obr. 28). Pro provedení analýzy je třeba využívat jemně zaostřený rentgenový paprsek, který zajišťuje promítnutí obrazu testovaného dílu. Snímky jsou následně pomocí softwaru skládány do 3D. Kromě výsledného 3D snímku umožňuje metoda vyvodit závěry o hustotě částice a v důsledku toho je rozlišit na lehké a těžké materiály. Rozdělení materiálů vzorků na lehké a těžké poskytuje částečnou identifikaci původu částice, metoda neposkytuje analýzu materiálu s jemným rozlišením, jako tomu je u jiných analyzačních metod (EDS, Infračervená spektrometrie, či Ramanova spektrometrie). [30] [31]



Obr. 28: Schéma rentgenové mikrotomografie, přepracováno dle [30]

#### 3.4.4 Zkrácené metody

V rámci kontroly kontaminací může být v některých případech klíčový krátký čas analýzy a jednoduchost užívané metody. Pro tyto účely je možné využít jedné ze dvou doporučených metod – *sečtení částic v kapalině* nebo *filtrová blokáce*.

Automatické počítače částic lze využít pro klasifikaci částic dle rozměrů a počtu částic v kapalině. Metoda není určena pro detekci jednotlivých relativně velkých částic. Naopak se jedná o analýzu s cílem určit četnost částic. Jednoduchost metody díky sečtení částic přímo v kapalině umožňuje i snadnou automatizaci metody.

Druhou zkrácenou metodou je *filtrová blokáce*. Částice jsou v tomto případě z proudu kapaliny umístěny přímo na analyzační filtr, který je situován v zorném poli kamery. Jemnost analyzačního filtru je volena tak, aby docházelo k usazení pouze relevantních částic (částice menších rozměrů filtrem prochází). Měřicí jednotka je umístěna v oblasti extrakční jednotky a je vybavena zdrojem osvětlení, které poskytuje vysoký kontrast mezi částicemi na filtru a pozadí filtru.

#### 3.4.5 Porovnání analyzačních metod

V rámci analyzačních metod je možné vybírat z celé škály přístupů. V kapitole 3.4 je zmíněn pouze výběr metod často užívaných pro řízení kontaminací v automobilovém průmyslu, tím ovšem možnosti nejsou omezené. Pro shrnutí limitů jednotlivých metod je možné nahlédnout do Tab. 1, kde jsou analyzační metody rozděleny pomocí základních cílů analýzy. V Tab. 1 jsou stručně uvedeny hlavní informace, které dané analyzační metody mohou poskytnout.

Tab. 1: Porovnání vhodnosti analyzačních metod dle cílů analýzy [4]

Analyzační metoda		Cíl analýzy			Možné získané info.	Limity metody	
		Ověření specifikace čistoty	Výzkum příčiny pro zlepšení procesu	Monitor. procesu			
Standard. analýza	Gravimetrie	++	--	+	Hmotnost částic,	Neurčuje jednotlivé částice	
	Světelná mikroskopie	2D ≥ 50µm	++	+	+	Délka, šířka, materiál, kovový lesk	Nutný větší počet čoček
		3-D	- <sup>a</sup>	++	--		
	Počítačová tomografie	- <sup>a</sup>	++	--	Délka, šířka, kovový lesk	Delší čas analýzy	
	SEM/EDS	o <sup>a</sup>	++	-	Délka, šířka, materiál	Nerozliší organické/anorganické částice	
	Spektrometrie laserem buzeného plazmatu LIBS	o <sup>a</sup>	++	-	Délka, šířka, materiál	Nerozliší organické/anorganické částice	
	Ramanova spektrometrie	- <sup>a</sup>	++	--	Délka, šířka, materiál	Nelze detekovat kovy	
Zkrácená analýza	Sečtení částic v kapalině	o <sup>a</sup>	--	++	Délka	Riziko zkreslení přítomností bublin	
	Filtrová blokace	o <sup>a</sup>	o	++	Délka, šířka	Riziko zkreslení nečistotami na čočkách	
<sup>a</sup> Lze aplikovat, pokud je stanoveno v dodavatelsko-odběratelském vztahu za předpokladu, že jsou parametry analýzy specifikovány ++ Velmi vhodné							

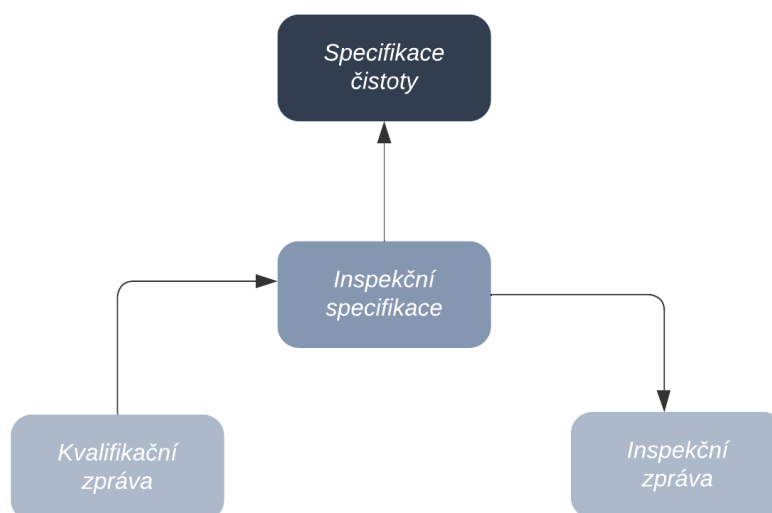


<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Vhodné</li> <li>o Principem vhodné</li> <li>– Méně vhodné, není možná automatizovaná analýza nebo příliš drahá metoda pro daný účel (za předpokladu, že je nutno pořídit nové zařízení)</li> <li>– – Nevhodné, není možná automatizovaná analýza, příliš drahé pro daný účel (za předpokladu, že je nutno pořídit nové zařízení)</li> </ul>		
--	--	--

### 3.4.6 Dokumentace

Pro efektivní dlouhodobé řízení kontaminací ve výrobě je klíčové nastavit jasný a jednotný způsob dokumentace informací. Zejména pokud je cílem neustálé zlepšování procesů, systematická dokumentace je jedním z nástrojů, které mohou toto směřování podpořit. Norma ISO 16232:2018 stanovuje konkrétní doporučení v oblasti řešení dokumentace při řízení kontaminací v automobilovém průmyslu. Ze základních dokumentů, které je vhodné sepsovat pro dokumentaci inspekce čistoty, vyjmenovává *kvalifikační zprávu, inspekční zprávu a inspekční specifikaci* (viz Obr. 29). Nejedná se o jediný přístup, který je možné v automobilovém průmyslu aplikovat – vhodnost se může lišit od potřeb konkrétních výrobních závodů na základě interně stanovené dokumentace apod. Výše zmíněné dokumenty nicméně přehledně reprezentují základní přístup k dokumentaci při řízení kontaminací a budou proto krátce rozvedeny dále. Norma ISO 16232:2018 specifikuje pouze obsah dokumentovaných informací, nikoliv jejich formát.

Kvalifikační zpráva uvádí informace o podmínkách testu, extrakčních parametrech a výsledcích kvalifikačních testů. Jedná se o první sestavovaný dokument, který je vstupem pro specifikaci inspekce. Specifikace inspekce uvádí informace o extrakčních a analyzačních parametrech spolu s jednoduchým popisem inspekčního procesu. Dokument vychází z informací uvedených v kvalifikační zprávě a je vstupním dokumentem pro inspekční zprávu a specifikaci čistoty. Inspekční zpráva uvádí extrakční parametry a podmínky testování v rámci rutinní inspekce a jsou v ní uvedeny pouze informace vztahující se k provedené inspekci.



Obr. 29: Schéma vzájemných návazností vybraných dokumentů inspekce čistoty, přepracováno dle [4]

#### ▪ **Kvalifikační zpráva**

První sestavovaný dokument je kvalifikační zpráva. V rámci kvalifikační zprávy jsou uvedeny informace o kvalifikačních testech testovacích podmínek a inspekčních parametřů. Bez těchto informací nelze sestavit inspekční specifikaci, ani kvalifikační zprávu. Dokument musí obsahovat následující informace:

- Obecné informace
- Informace o testovaném dílu
- Přípravné kroky
- Informace o extrakci
- Informace o filtraci
- Informace o analýze
- Výsledky klesajícího testu
- Ověření blank level
- Informace o podmínkách rutinní inspekce a inspekčních parametrech

Kvalifikační zpráva také obsahuje graf klesajícího testu a odvozené podmínky a parametry rutinní inspekce.

#### ▪ **Inspekční specifikace**

Inspekční specifikace je hlavní dokument inspekce čistoty. Dokument je vyhotoven po sepsání kvalifikačních testů a po odvození parametrů pro rutinní inspekci. Inspekční specifikace obsahuje jednoduchý a srozumitelný popis testovacího procesu. Fotografie a ilustrace jsou vhodným doplněním zprávy pro ujasnění procesu. Obecně, čím složitějším se testovací proces stává, tím detailnější by jeho popis měl být. V případě jednoduchých testovacích procesů je bodový popis pracovního postupu dostačující. Inspekční specifikace by měla zajistit, že inspekce čistoty může

být provedena nezávisle na čase, místě a zaměstnancích provádějících inspekci. Dokument obsahuje následující informace:

- Obecné informace
- Informace o testovaném dílu
- Přípravné kroky
- Informace o extrakci
- Informace o filtraci
- Informace o analýze

V rámci inspekční specifikace se neudávají informace o výsledcích inspekce, kromě výsledků kvalifikačních testů, pokud není sestavena kvalifikační zpráva.

#### ▪ **Inspekční zpráva**

Inspekční zpráva je dokument, který je sepisován na závěr. Rutinní inspekce může být provedena až poté, co jsou kvalifikovány podmínky a parametry testování. Veškerá nastavení a výsledky jsou zdokumentovány stručně a jasně v tomto dokumentu. Inspekční zpráva obsahuje následující informace:

- Obecné informace
- Informace o testovaném dílu
- Přípravné kroky
- Informace o extrakci
- Informace o filtraci
- Informace o analýze
- Výsledky rutinní inspekce

Nejdůležitější část inspekční zprávy jsou výsledky. S opakujícími se rutinními inspekcemi jsou výsledky jediné informace, které se mění a všechny ostatní části dokumentace zůstávají totožné. Aby bylo zajištěno, že procesy sloužící pro stanovení podmínek a parametrů testování jsou jasné, je nutné se v inspekční zprávě odkazovat na inspekční specifikaci a kvalifikační zprávu. Pokud jsou tyto dvě zprávy archivovány, není nutné je k inspekční zprávě přikládat.

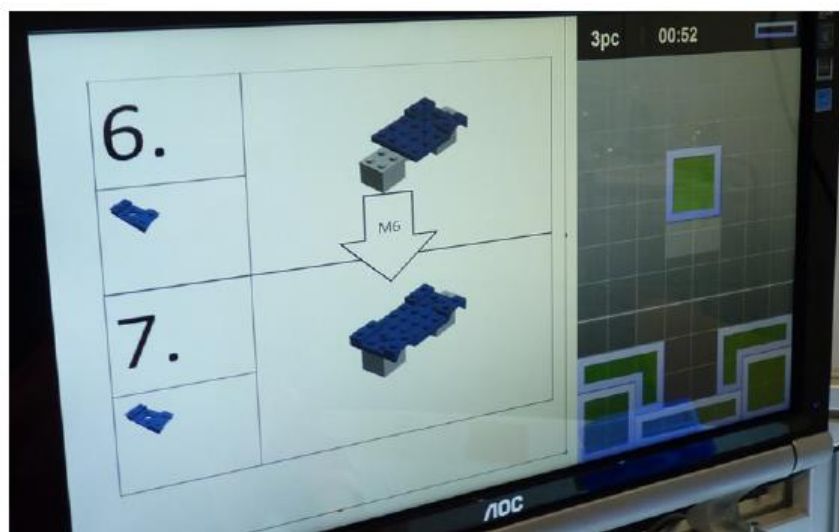
## 4 Lidé ve výrobě

Lidský faktor je klíčový ve výrobních podnicích z celé řady pohledů. Velké množství výrobních firem spoléhá na operátory v oblasti vizuální kontroly, opatrného a pečlivého nakládání s výrobními díly a současného plnění všech stanovených povinností v rámci časově přísně stanovených rozmezí. Dlouhé pracovní směny a repetitivní činnost mohou mít dopad na pozornost, únavu či motivaci zaměstnance. S klesající pozorností může docházet k neplnění předepsaných úkolů či k plnění těchto úkolů ve snížené míře. Z výše uvedených důvodů je třeba se vlivem zaměstnanců na kvalitu výroby zabývat stejně intenzivně, jako jakoukoliv jinou oblastí výroby. [32]

Jedním z možných přístupů ve zvyšování efektivity pracovníků a zajišťování časově stálého plnění pracovních povinností může být zavádění her do pracovního prostředí, tzv. gamifikace. Gamifikace je populární metoda s cílem zvyšovat motivaci a zlepšovat user experience v reálném prostředí. Ačkoliv je gamifikace novější pojem, oblast, kterou reprezentuje, se datuje již do 50. let 20. století, kdy pracovníci uvolňovali stres vytvářením motivace do práce formou her. Pojem gamifikace je široký a zahrnuje procesy i mimo obrazovku – např. pohybové senzory, které generují automatizovanou okamžitou zpětnou vazbu. [33] [34]

Monotónní práce ve výrobě často postrádá základní aspekty, které by mohly vést ke zvyšování výkonu zaměstnanců, popsané v Hackmanově & Oldhamově modelu pracovních charakteristik Hackman – rozmanitost dovedností, identita úkolu, význam úkolu, autonomie a zpětná vazba. Gamifikace může přinést některé z těchto aspektů do pracovního prostředí a v konečném důsledku zajistit pro zaměstnance přívětivější prostředí, zaměstnanci jsou následně motivovanější a vedeni k lepšímu výkonu. [32]

Gamifikace se obecně snaží vyvolat určité psychologické účinky. Jedná se o zážitky, které jsou běžnými hrami obvykle navozovány, jako je pocit mistrovství, smysl pro komunitu či kreativita. Důležité je, že při gamifikaci by uživatel systému neměl být nucen jednat podle daných vlastností systému, místo toho přijetí hry spíše umožňuje určité akce, v případě, že je uživatel vnímá a rozhodne se na jejich základě jednat. [34]



Obr. 30: Gamifikace ve výrobě [33]

První koncept gamifikace ve výrobě se datuje k roku 2012, kdy byl zaveden pohybem kontrovaný gamifikační komponent s vizuálním výstupem připomínající hru Tetris. Tento koncept byl zaveden pro podporu efektivního montážního procesu a princip může být i dále využíván pro budoucí implementace. Ačkoliv bylo prvotní zavedení přístupu do výroby úspěšné, obsahovalo řadu nedostatků – zejména přílišnou vizuální komplexnost nevhodnou pro užití v mnoha oblastech výrobního prostředí. Z tohoto důvodu se musí budoucí přístupy zaměřit na zajištění nízkých kognitivních požadavků. Požadavky na implementaci gamifikace ve výrobě budou zmíněny dále. [33]

Oproti hrám nebo kancelářské práci s počítačem není pozornost pracovníka ve výrobě zaměřena na software, ale na fyzický produkt, stroje a nástroje. Tento rozdíl přináší problém – gamifikační elementy mohou zaměstnance rozptylovat od hlavní náplně práce. Pro předejití tomuto problému je třeba vytvořit co nejjednodušší vizualizaci a vyhnout se explicitní interakci s gamifikačními elementy. V prvním případě by neměly být využívány složité grafické struktury či animace. Dále by neměly být využívány činnosti, které vyžadují plnou pozornost zaměstnance (např. vybrat položku na klávesnici apod.). [33]

V průmyslovém odvětví je vhodné využívat schopnosti rozlišení pohybu, protože se jedná o přístup, který umožňuje minimalizaci nedoporučené manipulace s ovládáním (klávesnice, myš apod.). Dřívější gamifikační implementace využívaly jako zobrazovací prvek monitor. Pro omezení odvádění pozornosti zaměstnance je vhodnější využití projekčních zařízení, která umožňují větší flexibilitu místa projekce. [33]

Ukázku implementované gamifikace je možné vidět na Obr. 31 Obrázek ukazuje dvě varianty implementace, v obou případech je obraz umístěn tak, že nedochází ke změně rozvržení pracovního prostoru. V obou případech bylo pro zobrazení postupu v čase využito barevné odlišení. Proces začínal v zelené barvě, s ubíhajícím časem se měnil na žlutou, oranžovou a v konečné fázi na červenou. Čas změny barvy byl dovozen na základě několika kalibračních kol a byl tedy specifický pro konkrétní uživatele. [33]



Obr. 31: optimalizovaná gamifikace ve výrobě [33]

V současnosti se většina aplikací gamifikace spoléhá na herní motivační mechanismy s body, odznaky a žebříčky. Nicméně při využití kontextu her v neherním pracovním prostředí je možné vybírat z mnohem širší škály možností, jak přetvořit tovární činnost na hru. Například herní metafora nebo výzvy, které jsou vyvíjeny herním průmyslem, jsou často využívány pro vylepšení pracovních zkušeností zaměstnanců. [33]

Ačkoliv je velké množství her individuálního a kompetitivního charakteru, existuje i celá řada her obsahující elementy, které mohou podpořit spolupráci skupin. Jedná se o hry, které spoléhají na týmovou spolupráci – např. velká část sportovních her je postavena na soutěživosti mezi týmy a v rámci her určených pro více hráčů dochází často k samovolnému vytváření týmů uživateli, aby snáze překonali překážky a porazili virtuální oponenty. Aspekty, které motivují hráče investovat energii a snahu na dosažení cílů, jako je poražení oponentů nebo dokončení náročných výzev mohou být aplikovatelné i u týmů ve výrobě. Stanovení cílů herního charakteru ve výrobě je jednou z možností, jak zlepšit soudržnost zaměstnanců a zajistit efektivní výrobu. [33]

Příkladem může být zavedení gamifikace v pásové galvanovně *Wuppermann Steel Netherlands*. Do této továrny vstupují nezpracované svitky ocelového plechu a vycházejí lesklé, potažené a nařezané ocelové plechy. Výrobní proces je z velké části automatizovaný a optimalizovaný. Operátoři během směn sedí především za obrazovkami, sledují a udržují výrobní linku, a proto může snadno dojít ke ztrátě pozornosti. Kvůli rozdělení operátorů do různých oblastí výrobní haly je mezi zaměstnanci na oddělení navíc slabý pocit týmové spolupráce. [33]

Gamifikace ve firmě byla implementována ve spolupráce se společností zabývající se herním designem. Do jídelny tovární haly byly umístěny dotykové obrazovky (Obr. 32) zobrazující řídicí panel s herní infografikou. Obrazovky zobrazovaly v reálném čase klíčové ukazatele výkonu operačního týmu a stránky s podrobnými informacemi o konkrétních ukazatelích výkonu. V rámci gamifikace bylo za cíl kromě navýšení motivace i zlepšení týmové spolupráci na jednotlivých odděleních. Na základě tohoto požadavku byli zaměstnanci rozdělení do dvou skupin – galvanizace a řezání. [33]



Obr. 32: dotyková obrazovka s infografikou [32]

Oba týmy měly stanovené hodnotící charakteristiky v závislosti na přiřazených procesech. Příkladem mohou být charakteristiky stanovené pro galvanizační tým: produkce, first-time right (bezchybná výroba bez materiálových či časových ztrát), prodlevy (linka se zastaví) a dny bez úrazů. [33]

V případě jakékoliv implementace gamifikace do výroby je třeba mít na paměti, že výsledky obecně – účinnost a možné dopady jsou silně závislé na kontextu, ve kterém je gamifikace využita. V některých případech je možné setkání s kritikou, která spočívá v riziku oddělení vnitřní motivace operátorů a metoda může být dokonce považována za vykořisťující. Tyto hrozby je třeba brát v potaz při jakékoliv implementaci, aby byl skutečně zajištěn stabilní a dlouhodobý přínos metody ve výrobě. Gamifikace je v oblasti výrobních procesů pouze na začátku, mohla by být nicméně účinnou metodou vedoucí k větší samostatnosti jednotlivých zaměstnanců, pocitu zodpovědnosti za odváděnou činnost, zlepšeným pracovním výkonům i zvýšené zaměstnanecké spokojenosti. [33]

# Praktická část

## 5 Analýza současného stavu

V pardubickém závodě KMCZ (Obr. 33) se provádí kompletní výroba tlumičů do osobních automobilů. Závod KMCZ je součástí skupiny KYB, jejíž celkový roční obrat 3,8 miliard dolarů je z 60 % tvořen prodejem automobilových tlumičů. Výroba v pardubickém závodě začala v roce 2006 a mezi hlavní zákazníky podniku se řadí např. Škoda Auto, Volkswagen, Toyota, Suzuki, Nissan, Renault či Daimler. [35] [36]

Portfolio vyráběných tlumičů je široké a jejich parametry se liší na základě dané výrobní řady. Kromě standardních řad tlumičů dochází k výrobě tlumičů na zakázku dle konkrétních požadavků zákazníků. Příkladem vyráběných tlumičů je dvouplášťový olejem plněný tlumič KYB Premium, který je možné vidět na Obr. 34.



Obr. 33: Výrobní závod firmy KMCZ v Pardubicích [35]

Výroba tlumičů se v závodě KMCZ provádí od počátečních obráběcích procesů trubek, přes montáž, povrchovou úpravu až po výstupní kontrolu. S vysokou poptávkou po produktech, krátkými dodacími časy spolu s potřebou vysoké výrobní efektivity 3směnného provozu jsou kladeny vysoké požadavky na kvalitu výroby i výsledných výrobků, jejichž nedodržení by mohlo vést k velkým ekonomickým ztrátám a potenciální ztrátě reputace firmy. Vzhledem k typu klíčových produktů (hydraulické systémy) je pro dodržení požadavků kvality nutné zajistit minimální přítomnost kontaminací v systému vyráběných tlumičů. Komplexnost výrobního procesu vede i k velkému množství kritických míst, kde ke vzniku těchto kontaminací může docházet. Kontaminace mohou být buď interního původu (kontaminace vzniká při výrobních procesech) nebo dodavatelského původu (kontaminace se do výroby dostává spolu s externě dodanými díly). Třetí kategorií mohou být zaměstnanci zanesené nečistoty (kontaminace přenesené z rukavic operátorů strojních zařízení apod.).





Obr. 34: Tlumič Premium [37]

Pokud je částicová kontaminace zanesena v průběhu výroby do vybraného tlumiče a nedojde k jejímu odstranění před dokončením výrobního procesu (naplněním tlumiče kapalinou a uzavřením) vzniká velké riziko nesplnění kontrolních zkoušek, případně významného zkrácení životnosti dílu. Tento vliv kontaminací na systém tlumiče je způsobený kombinací velikosti, materiálu a umístění kontaminace v těle tlumiče. Kontaminace jsou často objeveny interně při kontrole vadných dílů. Velká část z těchto kontaminací se nachází na podložkách ve vnitřní části tlumiče, které tvoří jeho tlumící charakteristiky. Částice přítomná na podložce může tyto tlumící charakteristiky ovlivňovat a v konečném důsledku způsobovat změny v tlumících silách. Pokud je tlumič s kontaminací v dané poloze uveden do provozu, pak vzniká riziko, že se umístění kontaminace bude v průběhu života výrobku měnit. Kontaminace může být přesunuta do tlumící kapaliny, která jí může transportovat do kritických míst systému. Mobilitou částice může vznikat nestálost tlumících sil, rychlejší opotřebování součástí ale i celkové narušení funkčnosti dílu. Kontaminace, zejména kovového původu může být při provozu dílu zanesena tlumící kapalinou až ke gumovému těsnění, jehož celistvost může narušit a tím způsobit celkové selhání tlumiče (tlumič netěsní a tlumící kapalina uniká z dílu ven).

Kontaminace nepředstavují hrozbu pouze při výstupní kontrole dílů a u zákazníků, ale ovlivňují také dílčí výrobní procesy, zejména chromovací lázně, kterou díly při výrobě procházejí. Chromovací lázeň má přísně specifikované limity na přítomnost nečistot (např. množství železa v lázni) a při překročení limitů je nutné výrobní proces zastavit a lázeň vyčistit. Pokud je stav lázně natolik kritický, že není možné dosáhnout požadovaných parametrů čištěním (např. částečným přefiltrováním) je nutné přistoupit k celkové výměně lázně. Vysoké náklady na výměnu lázně vedou i k vysokým nárokům na minimální přítomnost kontaminací na dílech v okamžiku vstupu do lázně.

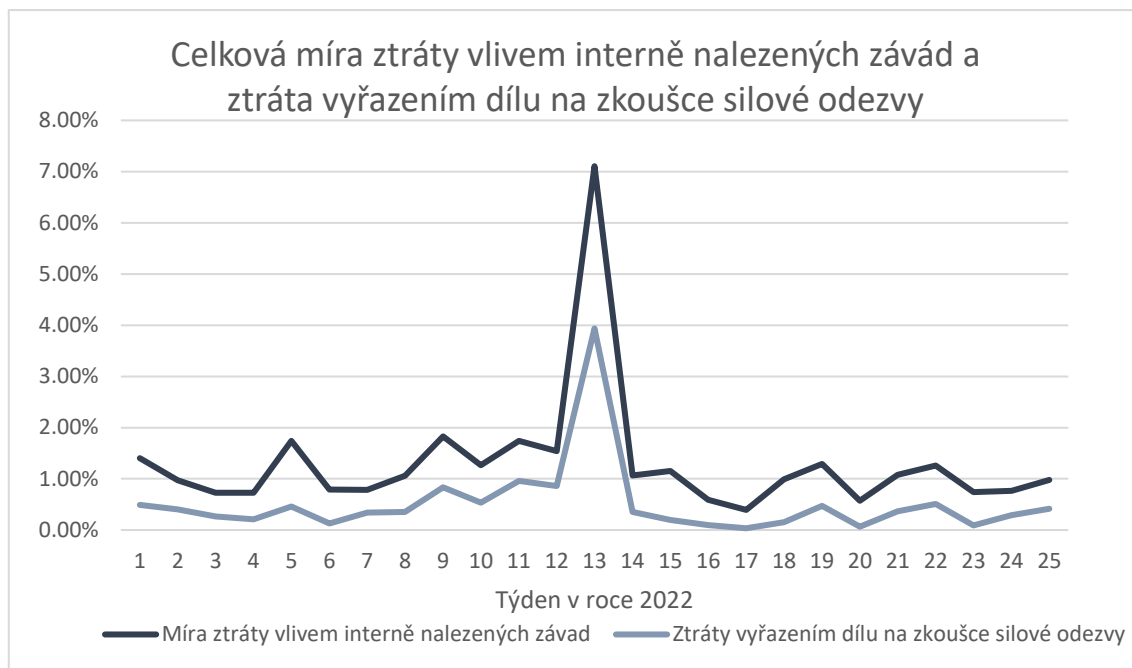
Význam kontaminací na celkové ztráty ve firmě z pohledu hotových výrobků pro 1. až 25. týden roku 2022 je možné vidět v Tab. 2, kde je uveden podíl ztrát vlivem interně nalezených závad (k odhalení závady dochází před expedicí dílu zákazníkovi) na celkových ztrátách. Sledovanými parametry jsou: podíl interně nalezených závad na celkových ztrátách, podíl dílů vyřazených na zkoušce silové odezvy na celkových ztrátách a míra dílů vyřazených na zkoušce silové odezvy vlivem přítomností kontaminací. Míra ztrát způsobená závadami, které jsou interně objeveny se v daném sledovaném časovém horizontu pohybuje v přibližném rozsahu od 0,4 % do 7 %. Ztráty

způsobené vyřazením dílu na zkoušce silové odezvy se pohybují od cca 0,1 % do 4 %. Pro míru ztráty vlivem kontaminací jsou uvažovány pouze díly, které jsou vyřazeny na zkoušce silové odezvy.

Tab. 2: Podíl ztrát vlivem interně nalezených závad na celkových ztrátách 1. – 25. týden 2022 [38]

	Interně nalezené závady	Díly vyřazené na zkoušce silové odezvy	Díly vyřazené na zkoušce silové odezvy s kontaminacemi
1. týden	1,40 %	0,49 %	0,10 %
2. týden	0,97 %	0,40 %	0,08 %
3. týden	0,73 %	0,27 %	0,06 %
4. týden	0,73 %	0,21 %	0,04 %
5. týden	1,74 %	0,46 %	0,10 %
6. týden	0,79 %	0,13 %	0,03 %
7. týden	0,78 %	0,78 %	0,07 %
8. týden	1,06 %	0,36 %	0,08 %
9. týden	1,83 %	0,84 %	0,18 %
10. týden	1,26 %	0,53 %	0,11 %
11. týden	1,74 %	0,96 %	0,20 %
12. týden	1,54 %	0,86 %	0,18 %
13. týden	7,11 %	3,94 %	0,83 %
14. týden	1,06 %	0,35 %	0,07 %
15. týden	1,15 %	0,19 %	0,04 %
16. týden	0,59 %	0,09 %	0,02 %
17. týden	0,39 %	0,03 %	0,01 %
18. týden	0,99 %	0,15 %	0,03 %
19. týden	1,29 %	0,47 %	0,10 %
20. týden	0,57 %	0,07 %	0,01 %
21. týden	1,08 %	0,37 %	0,08 %
22. týden	1,26 %	0,51 %	0,11 %
23. týden	0,74 %	0,09 %	0,02 %
24. týden	0,77 %	0,29 %	0,06 %
25. týden	0,98 %	0,41 %	0,09 %

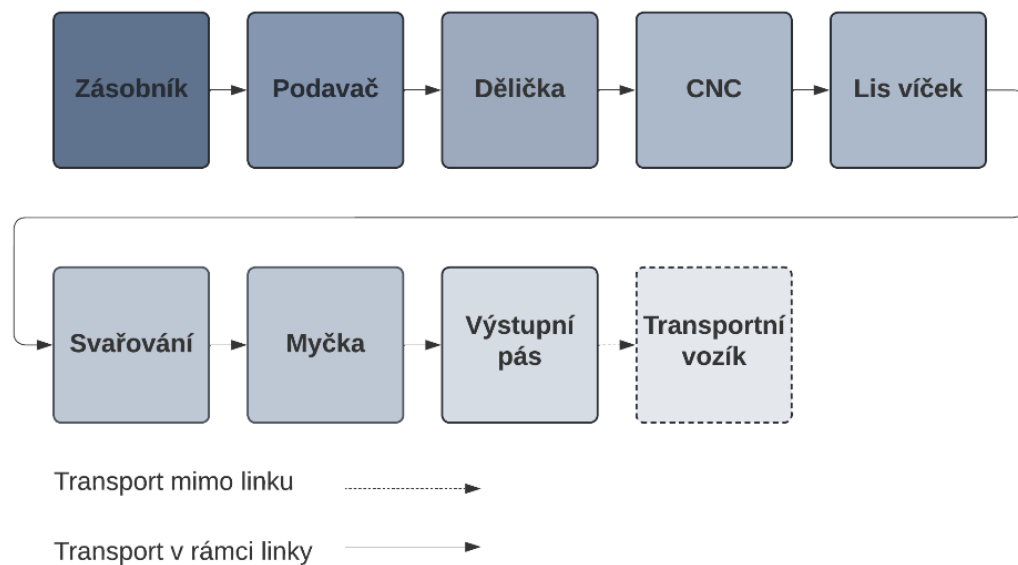
Přehledné grafické znázornění výše uvedených dat je možné vidět na Obr. 45. Na obrázku jsou celkové ztráty způsobené interně nalezenými závadami a podíl závad, které byly objeveny na zkoušce silové odezvy. Z průběhu grafu vyplývá, že k prudkému nárůstu ztrát dochází ve 13. týdnu roku 2022, kdy podíl ztrát vlivem vad dosahuje 7,11 %. Hodnoty v průběhu ostatních týdnů se pohybují v rozmezí od 0,39 % do 1,83 %.



Obr. 35: Míra ztráty vlivem závad v závislosti na čase [38]

Na základě analýzy blíže rozvedené v kapitole 6.1 bylo stanoveno, že velké množství kontaminací má interní původ a nejčastěji vzniká při obrábění v rámci výrobních procesů. Pro eliminaci ulpění kovových třísek na dílech dochází k mytí dílů v několika fázích. Příkladem může být obrábění a svařování ocelových trubek. Ocelové trubky prochází obvykle nejprve obráběcím a následně svařovacím procesem, který je zakončen mytím dílu v myčce.

Schéma procesů u jedné z využívaných poloautomatizovaných linek, zajišťující obráběcí, svařovací i mycí proces je na Obr. 36. Většina kroků je automatizovaná – trubky jsou vloženy do zásobníků zaměstnanci a trubka je automatizovaným podavačem přemístěna k dělicímu procesu. Dělení trubek je prováděno buď pomocí obráběcího nože (třískové dělení) nebo pomocí dvou kotoučů (beztřískové dělení). Následuje CNC obrábění trubky, nalisování víčka a spojení víčka s trubicí švovým svarem. Dále je díl přesunut do myčky s cílem eliminovat přítomnost kontaminací, vzniklých v předchozích výrobních krocích. Závěrečným automatizovaným krokem je přesunutí dílu na výstupní pás. Z výstupního pásu je polotvar již operátorem manuálně přemístěn do transportního vozíku. Operátor při nakládání dílů zároveň provádí vizuální kontrolu dílů.



Obr. 36: Zjednodušené schéma jedné z polo automatizovaných trubkových linek ve firmě KMCZ

Montážní procesy firmy KYB jsou méně významným zdrojem kontaminací než obráběcí procesy, přesto však nejsou zanedbatelné. Kontaminace jsou nejčastěji zaneseny z transportních beden, ve kterých jsou dílčí součásti dočasně umístěny. Pro eliminaci přenosu kontaminací z beden na uskladňované polotovary jsou transportní bedny podrobovány pravidelnému mytí. Dalším způsobem, kterým mohou být kontaminace transportovány do sestav, jsou pracovní rukavice operátorů.

Část podsestav tvořících tlumiče je montována v čisté místnosti (tzv. *clean room*). V této místnosti dochází především k montáži pístů. Velké množství součástí tvořící finální píst pochází od dodavatele. V tomto montážním procesu se největší množství kontaminací do procesu dostává přímo od dodavatele (dodavatel provede nedostatečné očištění dílů, díly obsahují neoddělené třísky, které se oddělí při transportu apod.). Velká část součástí se proto po přijetí opětovně myje, případně jsou hotové podsestavy ofukovány vzduchovou tryskou, pro odstranění volných povrchových kontaminací.

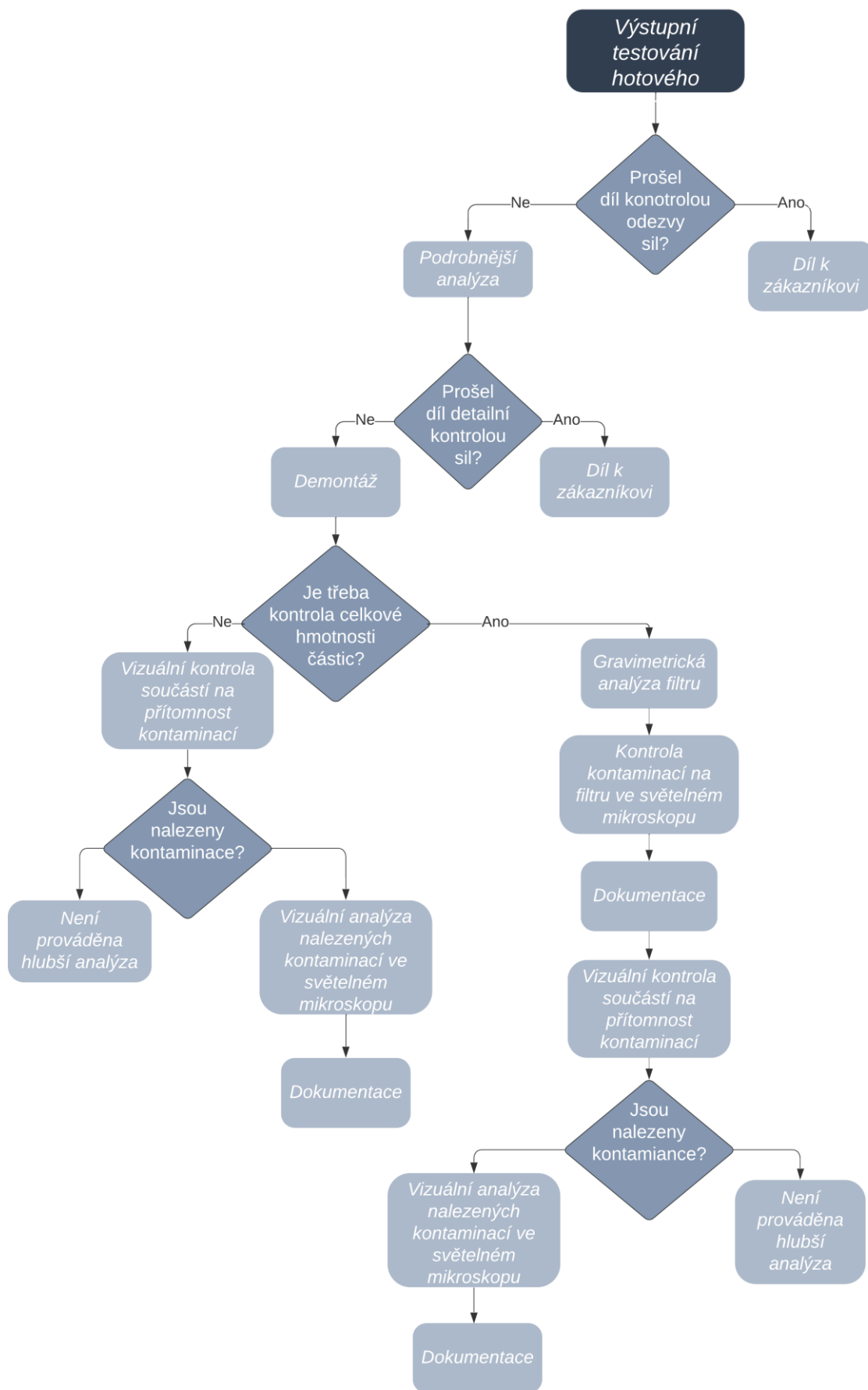
V rámci analýzy aktuálního přístupu ke kontrole kontaminací v tlumičích ve firmě KMCZ byl sestaven diagram, který je na Obr. 37. Na počátku procesu je testovaný díl (tlumič), který na výstupu výrobního procesu neprošel kontrolou reakce sil. Hotový tlumič má předem stanovené limity reakčních sil, které musí splňovat. Pokud limit díl splní, pak je vyhodnocen jako vyhovující a pokračuje do skladu, odkud je dále dopravován zákazníkovi. Pokud tento limit nesplní, je podrobněji opakovaně přeměřen na individuálním měřicím zařízení v laboratoři. V případě, že díl opětovně nesplní požadované limity, je následně demontován. Při demontáži nevyhovujícího dílu je nutné rozhodnout, zda bude daný díl využit pro gravimetrickou analýzu. Pokud ano, je nejprve přefiltrována tlumící kapalina z demontovaného tlumiče. Pro efektivní odstranění kontaminací z vnitřku válce tlumiče je užita stlačovací láhev s vodou. Oddělení částic od povrchu tlumiče je zajištěno proudem vody. Následně je provedeno měření hmotnosti všech kontaminací ulpělých na filtru a překontrolování, že hmotnost nepřekračuje odběratelem stanovené limity. Filtr s částicemi je následně umístěn do světelného mikroskopu, kde je

proveden snímek kontaminací nesplňujících limity, případně největší přítomné kontaminace.<sup>2</sup> Dále je proces stejný jako v případě, kdy není prováděna gravimetrická analýza.

Pokud gravimetrická analýza není prováděna, postupuje se rovnou k vizuální kontrole dílčích demontovaných součástí s cílem určit, zda se na součástech nacházejí kontaminace. Pokud na některé z dílčích součástí ulpívá kontaminace, je provedeno zkoumání kontaminace ve světelném mikroskopu. V případě kontaminací na drobných dílech, jako jsou např. podložky, je do mikroskopu umístěn celý díl. Není tedy provedena přímá extrakce kontaminace a mikroskopický snímek sledované kontaminace je pořízen přímo na podkladu součásti. Při analýze ve světelném mikroskopu je provedeno měření velikosti kontaminace za pomoci softwarového rozhraní mikroskopu. Kontaminace je následně přiřazena zdroji na základě dostupné kontaminační mapy. Aktuální kontaminační mapa obsahuje informace o druzích kontaminací, výrobních fázích, ve kterých kontaminace vznikají a dále obsahuje i samotné snímky kontaminací s informací o rozměrech částic. Fotografie kontaminací spolu se základními údaji (délka, kód součástí, na které byla kontaminace nalezena, předpokládaný zdroj kontaminace) jsou následně dokumentovány.

---

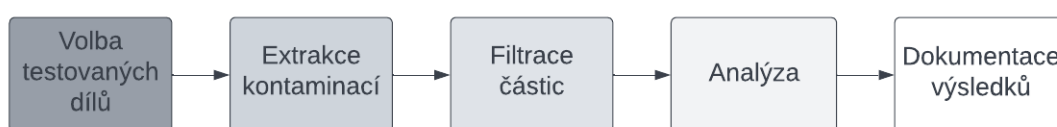
<sup>2</sup> Zákazník definuje maximální přípustné množství kontaminací v tlumící kapalině tlumiče. Pro splnění těchto požadavků je třeba gravimetrickou analýzu provádět pravidelně i v případě, kdy by k vyřazení tlumiče nedošlo.



Obr. 37: Diagram interně nastaveného procesu kontroly kontaminací ve firmě KMCZ

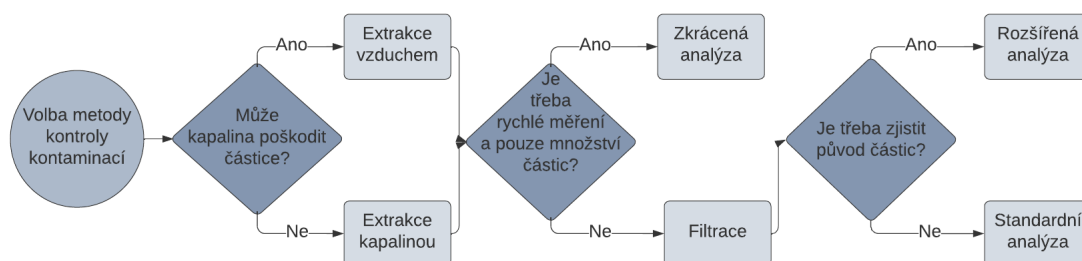
## 6 Analýza kontaminací v KMCZ

Pro nalezení alternativy aktuálně užívané kontaminační mapy bylo provedeno porovnání aktuálního přístupu kontroly kontaminací ve firmě s přístupem normy ISO 16232:2018. Kontrola kontaminací v normě se dělí do 4 základních kroků (viz Obr. 38): extrakce (a ověření účinnosti extrakce – kvalifikačních testů), filtrace, analýzy kontaminace a dokumentace. V prvním kroku je třeba oddělit částice od testovaného dílu – provést jejich extrakci. Pro získání relevantních výsledků je třeba mít jistotu, že je extrakční proces dostatečně efektivní. Je proto doporučeno provést validaci extrakčního procesu. Po extrakčním procesu jsou částice obvykle v extrakční kapalině, a je proto provedena jejich filtrace, po které jsou umístěny na filtr, se kterým je možné dále manipulovat a provádět samotnou analýzu částic. V posledním kroku je provedena dokumentace průběhu a výsledků inspekce.



Obr. 38: Schéma základních kroků při kontrole kontaminací

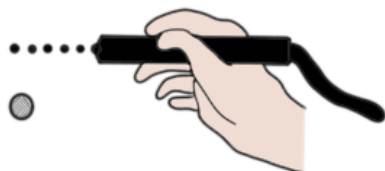
Při analýze kontaminací je třeba provést několik základních rozhodnutí týkajících se druhu extrakce a typu analýzy (viz Obr. 39). Norma uvádí několik možností extrakce kontaminace, které se dělí na kapalně extrakční metody a extrakci vzduchem. Druhá skupina je především vhodná v aplikacích, kdy by kapalina mohla mít destrukční vliv na díl či kontaminace.



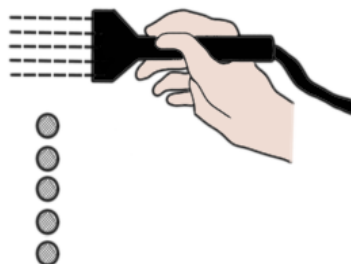
Obr. 39 Rozhodovací diagram pro postup kontroly kontaminací

U kontroly dílů ve firmě KYB dochází nejčastěji ke kontrole kovových dílů (vyjma polymerních částic – např. těsnění) a většina dosud detekovaných částicových kontaminací je kovového složení (vyjma lepidla a plastových částic z úložných krabic). Vzhledem k materiálům kontrolovaných součástí i kontaminací není třeba využívat extrakce vzduchem a lze výběr extrakční metody zúžit na kapalně extrakční metody. Sestava tlumiče obsahuje řadu malých součástí i pístnici a trubky větších rozměrů. Rozměr testovaného dílu je parametr, který je třeba při volbě metody brát v potaz. Dále je třeba uvažovat složitost dílu. Většina dílčích součástí sestavy je jednoduchého tvaru. V případě trubek je třeba hodnotit jak vnější, tak vnitřní povrch. V případě ostatních součástí je třeba hodnotit pouze vnější povrch, případně je vnitřní povrch velmi dobře přístupný pro proud kapaliny (např. těsnící kroužek). Vzhledem k rozdílným velikostem dílčích součástí se jako nejvhodnější jeví extrakce tlakovým oplachem, kterou lze využít pro extrakci částic z velkých i malých dílů. Metoda je vhodná pro kontrolu vnějších povrchů. Pro kontrolu

vnitřních povrchů trubek je vhodné využít metody vnitřního oplachování. Výhodou extrakce tlakovým oplachem je univerzálnost vybavení, které je v některých aplikacích možné využít i pro vnitřní oplachování. V rámci extrakce tlakovým oplachem existuje opět široká škála možných trysek, které je možné využít a jejichž vhodnost se liší dle konkrétní aplikace. Pro většinu součástí tvořící tlumič by mohla být vyhovující tryska kruhového průřezu s přímým proudem (Obr. 40). V případě řešení větších ploch dílů či v případě potřeby snížení časové náročnosti extrakčního procesu může být přistoupeno k využití paralelních trysek (Obr. 41).



Obr. 40: Plná tryska kruhového průřezu pro lokalizovanou extrakci, přepracováno dle [3]



Obr. 41: Paralelní tryska pro extrahování částic z velkých ploch přepracováno dle [3]

Součástí extrakčního procesu je i předúprava dílu. Při obráběcích procesech může docházet k magnetizaci dílu, která následně komplikuje oddělení kovových kontaminací od testovaného dílu. Proto může být vhodné provést demagnetizaci dílu před samotným zahájením extrakce kontaminací.

Aktuální analýza částic spočívá v analýze filtru ve světelném mikroskopu po měření celkové hmotnosti nalezených kontaminací či konkrétní nalezené částice (v případě částice na malé součásti dochází k analýze částice bez extrakce od původního dílu). Nalezené částice jsou změřeny (v případě optické analýzy po gravimetrii při nepřekročení limitů dochází k měření pouze největší kontaminace) a přiřazeny ke zdroji dle dostupné kontaminační mapy. Přiřazení je prováděno na základě rozměrů, tvaru a barvy.

Dle normy ISO 16232:2018 není možné přiřazení částicových kontaminací provést pouze na základě optické analýzy, která se řadí mezi standardní metody analýzy, ale je třeba provést tzv. rozšířenou analýzu. Rozšířená analýza je nejčastěji doplněna o jednu z možných metod určení chemického složení kontaminace. V případě, že jsou k dispozici informace o materiálech užívaných v rámci výrobního procesu (vstupní suroviny, součásti vstupující do systému, nástrojové materiály) je možné na základě rozšířené analýzy určit původ kontaminace s větší přesností. Protože největším zdrojem kontaminací jsou opracovávané materiály v rámci obráběcích procesů, je klíčové mít k dispozici seznam všech zdrojových materiálů (tyče a trubky). Podobně jako v případě extrakce i v případě metod rozšířené analýzy existuje celá řada přístupů. Vzhledem k tomu, že nejvýznamnější kontaminace v řešené situaci jsou kovového původu, je třeba zvolit analyzační metodu, která umožňuje analýzu kovových materiálů. Technologií umožňující analýzu kovových materiálů je celá řada, vzhledem k množství nacházených kontaminací, a tedy i častému provádění analýz je vhodné využít metody, která by umožňovala krátké realizační časy, splnila požadavky analýzy a současně neznamena pro firmu příliš vysoké náklady (na pořízení, na zaškolení obsluhy atd.)



Samotná norma nezmiňuje užití kontaminační mapy jako doporučenou metodiku, tím nicméně není snížena její užitečnost v praktickém využití, což je potvrzeno praktickým využíváním inventářů kontaminací napříč odvětvími. Norma ISO 16232:2018 jako taková nemá za cíl specifikovat konkrétní formát dokumentace, pouze zmiňuje seznam informací, které by na jakémkoliv dokumentu týkajícím se dané problematiky měly být zmíněny. Pro upravení přístupu dle normy by proto mohlo být vhodné doplnit kontaminační mapu o další informace – konkrétně se jedná o metodu extrakce (případně parametry nastavení extrakční metody), způsob ověření efektivity extrakční metody a výsledky spektrometrické zkoušky (informace o materiálovém složení kontaminace).

Přítomnost kontaminací v tlumičích je ve firmě dlouhotrvající problém, který je vzhledem k velké citlivosti dílů i na velmi malé kontaminace obtížně řešitelný. V rámci řízení kvality je ve firmě zájem o získávání statistických dat o potenciálním původu kontaminací pro možnost cíleného řešení nápravných opatření. Pro tento účel byla ve firmě sestavena tzv. kontaminační mapa – návod pro přiřazení nalezených kontaminací k pravděpodobnému místu vzniku. Na základě zkušenosti zaměstnanců bylo zjištěno, že tento nástroj nefunguje s dostatečnou spolehlivostí – ve firmě dochází k interním neshodám při přiřazování kontaminací k daným zdrojům a aktuální informace v mapě nefungují jako dostatečně spolehlivý zdroj informací pro obhájení alokace konkrétních kontaminací k daným zdrojům. Cílem firmy je proto tento nástroj aktualizovat a případně navrhnout jeho možné zlepšení.

## 6.1 Stanovení kritických míst a odběr vzorků

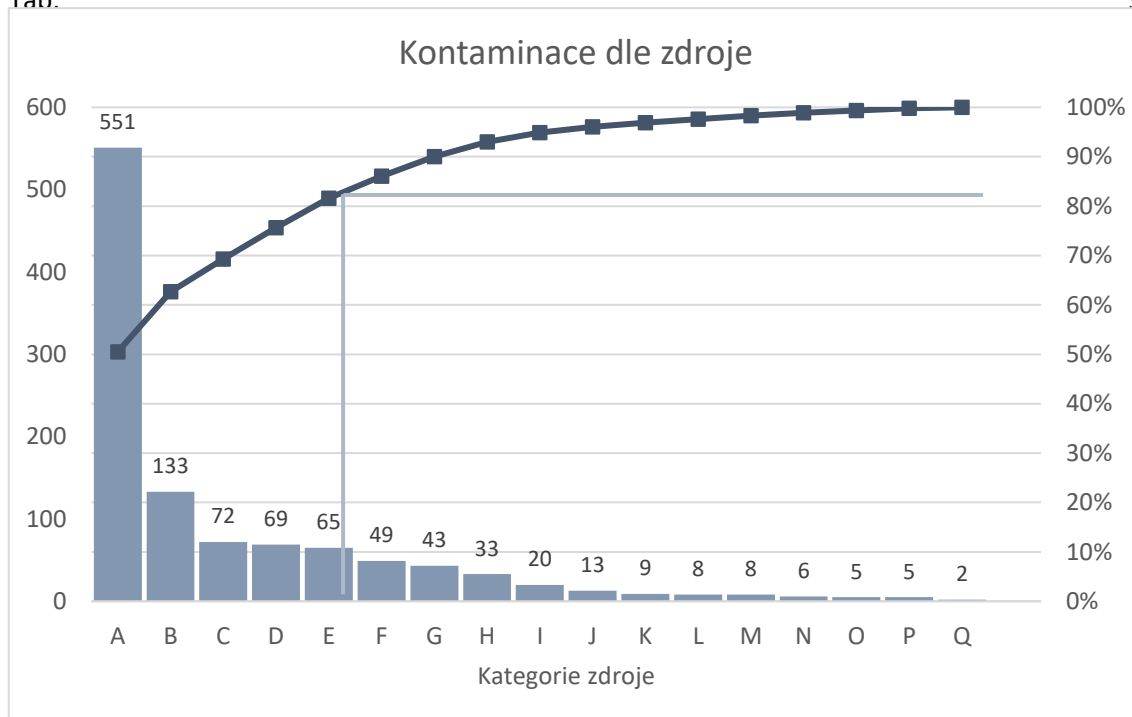
Vzhledem ke komplexnosti výrobních procesů a velkému množství potenciálních lokací vzniku kontaminací je třeba stanovit klíčové oblasti, kde zpřesnění stanovování vzniku kontaminací a případná optimalizace procesů přinese největší přínos. K tomuto stanovení byla provedena analýza interních dat firmy, které jsou v Tab. 3. Data pocházejí z průběžných kontrol nevyhovujících dílů z období únor 2022–červenec 2022, kdy byla provedena analýza kontaminací ve světelném mikroskopu a na základě aktuálně využívané kontaminační mapy bylo provedeno přiřazení kontaminace k jejímu možnému zdroji.

Tab. 3: Nalezené kontaminace a jejich přiřazení ke zdroji v rámci interních procesů KMCZ

Zn.	Typ kontaminace	Přiřazený zdroj kontaminace	Počet přiřazených kontaminací
A	Kovová	Kovová špona vznikající obráběním vnitřních průměrů (pro víčko nebo vodítko)	551
B	Kovová	Kovová špona vznikající obráběním pístních tyčí	133
C	Kovová	Kontaminace z rolování – úlomky a šupinky z rolování uvolněné z hran vnější trubky	72
D	Nekovová	Lepidlo	69
E	Nekovová	Nekovová kontaminace – černošedá barva	65

F	Kovová	Kovová špona z obrábění čela trubky	49
G	Nekovová	Nekovová cizí neidentifikovatelná částice	43
H	Kovová	Kovová cizí neidentifikovatelná částice	33
I	Nekovová	Modré bedny – různé velikosti a tvary plastových špon a třísek modré barvy	20
J	Kovová	Dlouhá kovová špona vznikající válcováním závitů pístní tyče	13
K	Kovová	Návarky ze sváření (kuličky vzniklé rozstříkem při svařování)	9
L	Nekovová	Průhledný plast z plata na písty	8
M	Kovová	Otřepy z čelistí (D/F) - mosazná tříška ze závitových čelistí z měření D/F	8
N	Kovová	Otřep na těle ventilu po lisování do IT	6
O	Kovová/nekovová	Omílací kamínky v balení dodávaných komponent	5
P	Nekovová	Struska po sváření – materiál černého zabarvení s ostrými hranami a lesklým povrchem	5
Q	Kovová	Brusky – maz a obroušený kovový prach/šupinky z pístních tyčí)	2

Pro stanovení kritických míst byl vytvořen Paretův diagram, který je na Obr. 42. Pro vyhodnocení diagramu bylo využito pravidla 80:20, a tedy že 80 % problémů je způsobeno 20 % příčin. V diagramu je možné vidět, že mezi tyto příčiny patří kategorie A–D: Kovové špony vznikající obráběním vnitřních průměrů (pro víčko nebo vodičko), kovová špona vznikající obráběním pístních tyčí, kontaminace z rolování – úlomky a šupinky z rolování z hran vnější trubky a lepidlo. Dvě nejvýznamnější kategorie tedy tvoří trubkové a tyčové linky. Třetí významná kategorie zdrojů tvoří proces lepení. Protože lepidlo objevené v tlumičích má na funkčnost systému výrazně nižší negativní vliv než kovové kontaminace, bude následná analýza zaměřena pouze na první dvě kategorie.



Obr. 42: Paretův diagram – zdroje kontaminací




Pro analýzu kontaminací je třeba zvolit lokace jejich sběru. Na základě výstupu z Paretova diagramu je pro účinné zlepšení současného stavu vhodné se zaměřit na trubkové a tyčové linky. Každá linka má velké množství oblastí, kde ke vzniku a šíření kontaminací může docházet, pro důkladnou analýzu je proto vhodné zvolit jednu z těchto oblastí, což bude provedeno na základě statistických dat. Kontaminací přiřazených k obrábění trubek je 551 a k rolování trubek 72. Kontaminací přiřazených k obrábění tyčí je 133. Vzhledem k výrazně vyššímu množství kontaminací přiřazených k trubkovým linkám budou pro sběr vzorků stanoveny lokace v rámci trubkových linek a jejich bezprostředního okolí.

V Tab. 4 je uveden seznam 11 lokací, které byly stanoveny pro sběr kontaminací, které budou následně podrobeny podrobnější analýze. V případě trubkové linky SA IT 6 se jednalo o bednu s třískami (Obr. 43), oblast linky přímo u obráběcího procesu (Obr. 44), zásobník na hotové polotovary (Obr. 45) a vibrační buben (Obr. 46). Vzorky byly sbírány metodou lepicí pásky a následně podrobeny optické a chemické analýze.

Tab. 4: Seznam lokací zvolených pro sběr kontaminací

<p>Lokace 1</p>	<p>Lokace 2</p>
 <p>Obr. 43: Bedna třísek, součást vnitřní trubkové linky SA IT 6</p>	 <p>Obr. 44: Obráběcí proces u trubkové linky SA IT 6</p>
<p>Lokace 3</p>	<p>Lokace 4</p>
 <p>Obr. 45: Zásobník pro výstupní polotovary z linky SA IT 6</p>	 <p>Obr. 46: Vibrační buben transport pístu linka SA IT 6</p>
<p>Lokace 5</p>	<p>Lokace 6</p>
 <p>Obr. 47: Bedna po beztržiskovém dělení, součást linky SA OT 5</p>	 <p>Obr. 48: Kotouče svařovací linka SA OT 5</p>



Lokace 7	Lokace 8
 <p data-bbox="277 636 798 689"><i>Obr. 49: Zásobník pro výstupní polotovary z linky SA 3 OUT</i></p>	 <p data-bbox="865 636 1394 689"><i>Obr. 50: Zásobník pro výstupní polotovary z linky ST 1 OUT</i></p>
Lokace 9	Lokace 10
 <p data-bbox="277 1146 798 1200"><i>Obr. 51: Zásobník pro výstupní polotovary z linky ST 0 OUT</i></p>	 <p data-bbox="865 1146 1295 1173"><i>Obr. 52: ST 0 OUT bedna třísek po obrábění</i></p>
Lokace 11	
 <p data-bbox="277 1677 545 1704"><i>Obr. 53: Transportní bedny</i></p>	

## 6.2 Optická analýza

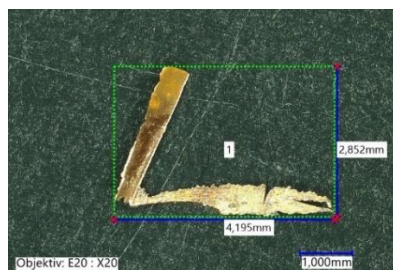
Optická analýza kontaminací je prováděna pomocí světelného mikroskopu Keyence. V rámci interně nastavených procesů jsou kontaminace pozorovány pro hodnocení vzhledu (barvy, struktury, tvaru) a stanovení rozměrů. Rozměry kontaminace jsou prováděny pomocí softwarového rozhraní optického mikroskopu, které umožňuje zjednodušené měření určením dvou bodů (viz Obr. 54). Tento přístup umožňuje snadné a rychlé měření nicméně poskytuje

menší stabilitu výsledků. V rámci analýzy kontaminací pro účely této práce byl zvolen odlišný přístup měření kontaminací, který vychází z doporučení normy ISO 16232:2018. Z možných variant měření průměrů byla zvolena metoda Feretova průměru, maximálního Feretova průměru a minimálního Feretova průměru. Metoda Feretova průměru byla využita při pozorování kontaminací nalezených ve výrobní hale, které jsou obvykle členitého tvaru (viz. Obr. 55) V případě menších kontaminací nalezených ve vadných tlumičích bylo provedeno měření maximálního a minimálního Feretova průměru (viz Obr. 56).

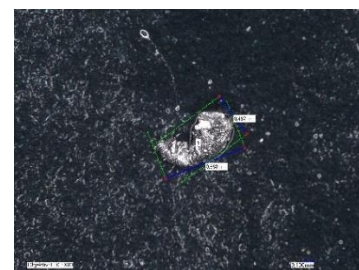
Pro získání přesných hodnot analýzy by bylo vhodné nastavit jednotný a opakovatelný systém měření. Na základě normy ISO 16232:2018 se jedná o maximální a minimální Feretův průměr. Určování rozměrů částic pomocí těchto průměrů je možné získávat interpretovatelná data a měření daných částic je možné opakovat se získáním stejných výsledků. V případě statistického sběru dat je možné následně přesněji vyhodnocovat kritické rozměry částic, které se v tlumičích nacházejí.



*Obr. 54: Měření rozměrů kontaminace pomocí ručního výběru 2 bodů*



*Obr. 55: Měření kontaminace s využitím Feretova průměru*



*Obr. 56: Měření kontaminace s využitím maximálního a minimálního Feretova průměru*

Kromě nepřesných informací o rozměrech částice neposkytuje aktuální formát kontaminační mapy dostatek informací pro přesné stanovení původu částic – částice jsou podobného vzhledu, rozměrů i tvaru. Na základě doporučení normy ISO 16232:2018 bude proto provedena spektrometrická analýza s cílem stanovit chemické složení částic.

### 6.3 Chemická analýza

Celkem bylo analyzováno 30 vzorků. 16 vzorků (vzorky 1 A až 11 B) pocházelo z výrobní haly a 14 vzorků (vzorky 15 A až 22 B) pocházelo z demontovaných vadných tlumičů s cílem prozkoumat možnost přiřazení kontaminací z konkrétních částí výroby s kontaminacemi z tlumičů na základě shodného chemického složení. První číslo v označení vzorků v případě vzorků z výrobní haly udává informaci o lokaci, ze které pochází (viz Tab. 4). U vzorků z rozebraných tlumičů shodné první číslo v případě více vzorků udává, že kontaminace byla nalezená na stejné součásti (např. konkrétní podložce). V případě vzorku 15B se jedná o kontaminaci, která byla v rámci interního procesu KMCZ vyhodnocena jako jedna kompaktní kontaminace. Při bližším zkoumání bylo kontaminaci nicméně možné rozdělit do 3 dílčích kontaminací (15B1 až 15B3).

Pro chemickou analýzu bylo využito ručního fluorescenčního spektrometru značky ED-XRF VANTA (Obr. 57). Metoda bylo zvolena jako vhodná pro daný účel měření vzhledem k nižším pořizovacím nákladům v porovnání s jinými spektrometrickými metodami, kratším časům

analýzy a jednoduchosti obsluhy. Tyto parametry jsou klíčové v případě zavádění chemické analýzy do běžné praxe každodenní analýzy kontaminací ve výrobním závodě. Analýza byla provedena u všech získaných vzorků kromě vzorku 21A, který se vzhledem k malým rozměrům nepodařilo spektrometrem analyzovat. Zvolená metoda umožňuje stanovit chemické složení kovových prvků v kontaminacích.

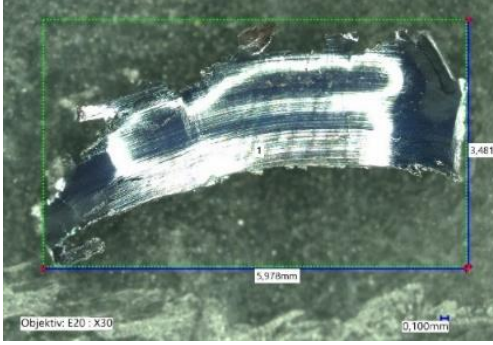
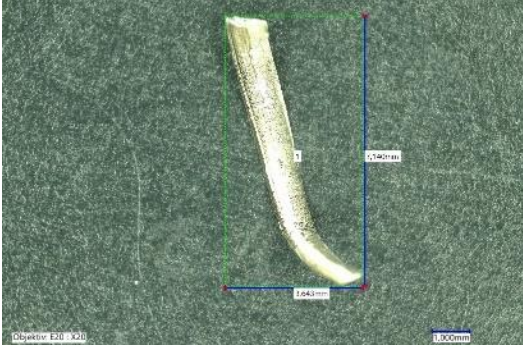
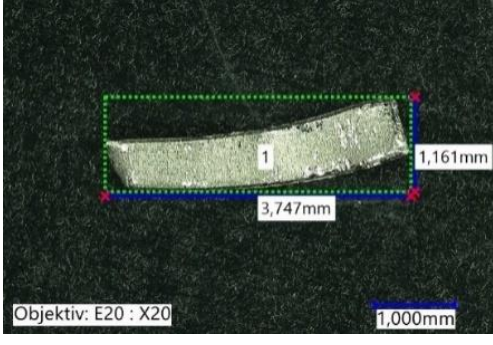

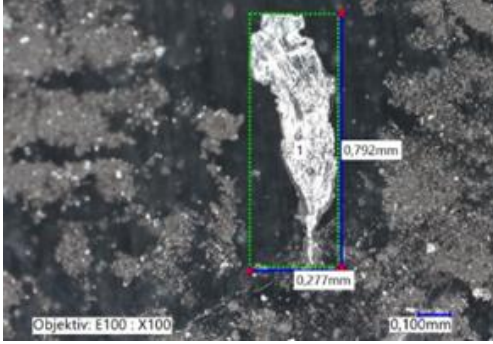
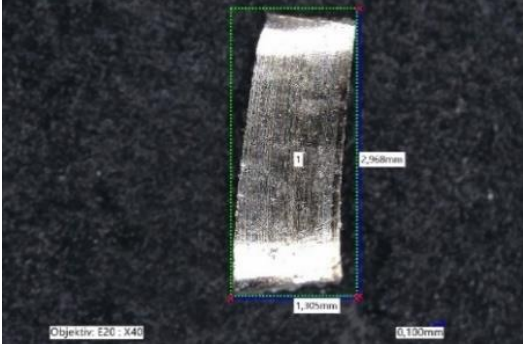


*Obr. 57: Schéma spektrometru ED.XRF Vanta [39]*

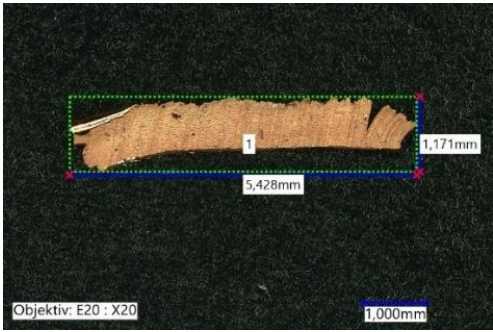

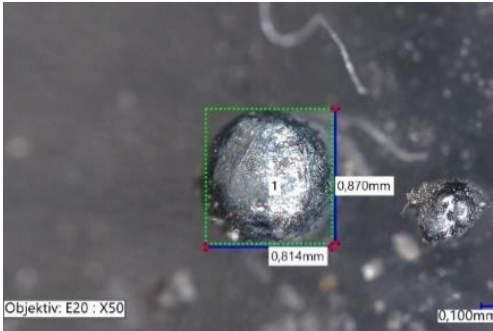

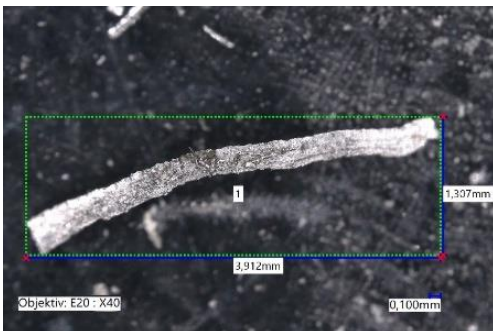

Získané výsledky chemické analýzy spolu se snímky z optické analýzy ve světelném mikroskopu jsou shrnuty v Tab. 5.

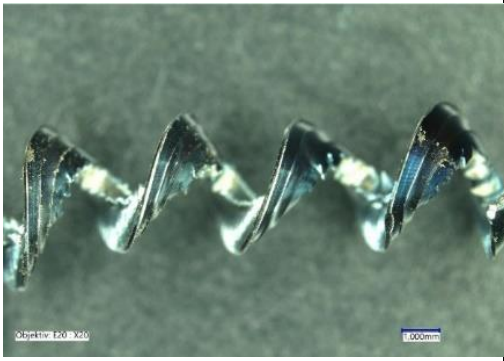
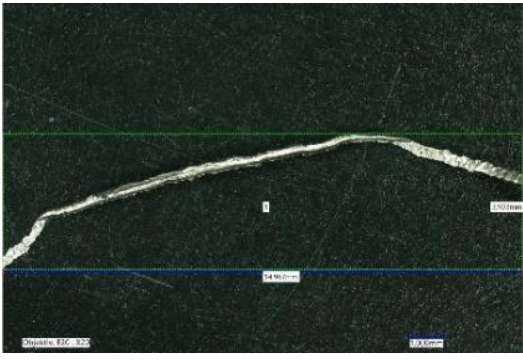
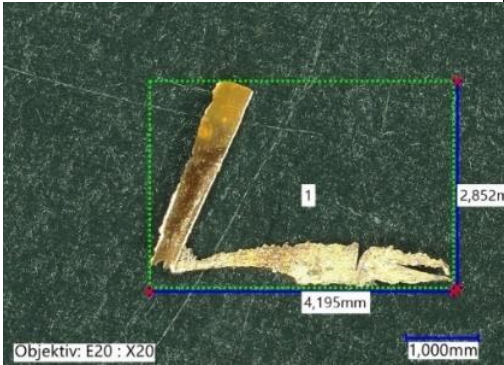
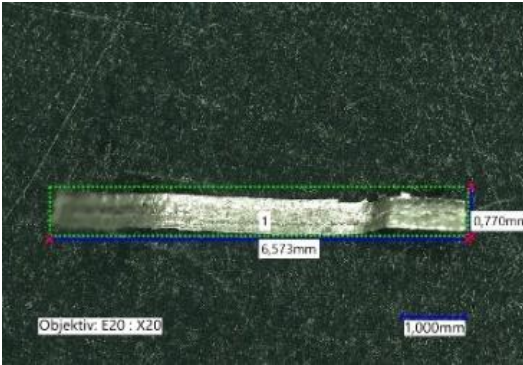
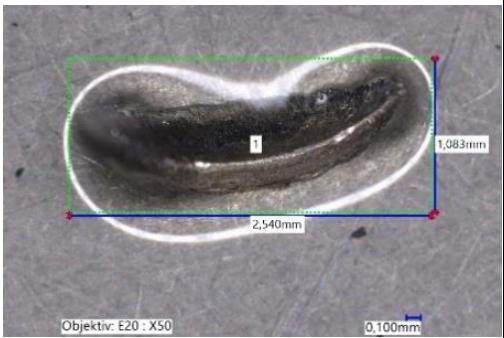
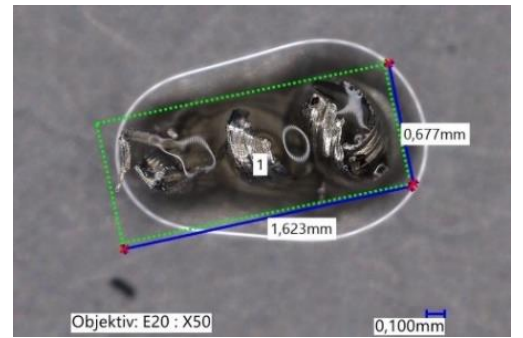


Tab. 5: Snímky analyzovaných vzorků spolu s chemickým složením stanoveným chemickou analýzou

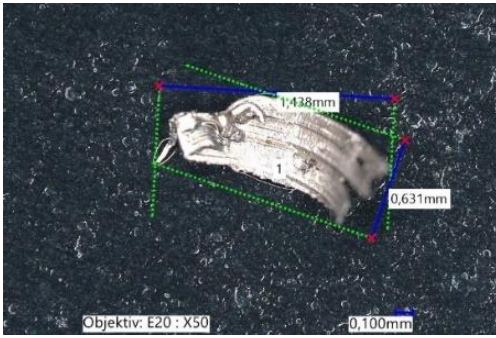
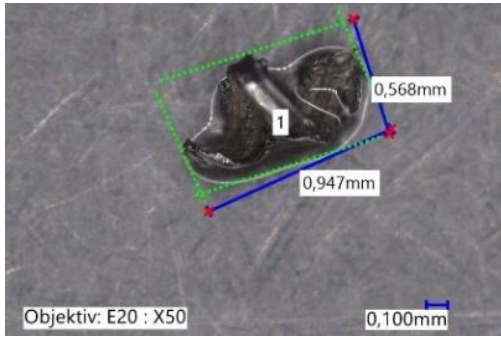
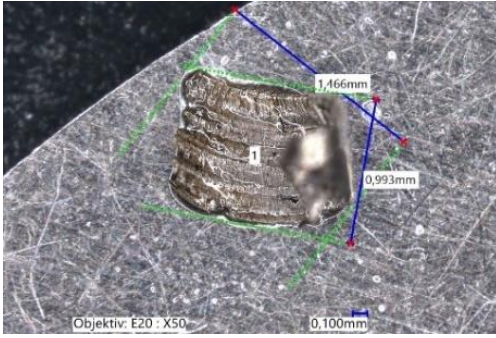
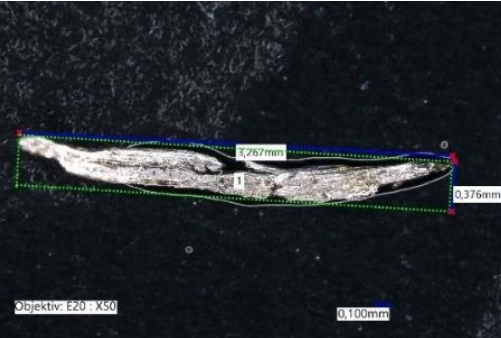
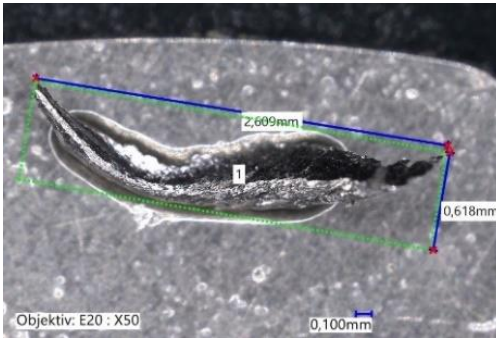
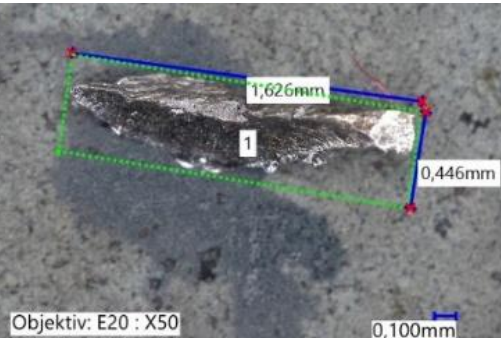
Vzorek	 <p>Obr. 58: Vzorek A</p>	 <p>Obr. 59: Vzorek 1B</p>
Chem. sl.	Si: 0,304%, Mn: 0,382%, Fe: 98,998%, Mo: 0,008%, Sn: 0,063%, Sb: 0,065%	Mn: 0,363%, Fe: 99,180%, Ni: 0,118%, Sn: 0,160%, Sb: 0,180%
Vzorek	 <p>Obr. 60: Vzorek 2A</p>	 <p>Obr. 61: Vzorek 3A</p>
Chem. sl.	Si: 0,432%, Mn: 0,391%, Fe: 98,640%, Sn: 0,055%, Sb: 0,070 %	Mn: 0,673%, Fe: 59,838%, Zn: 39,488%
Vzorek	 <p>Obr. 62: Vzorek 4A</p>	 <p>Obr. 63: Vzorek 5A</p>
Chem. sl.	Fe: 100,000%	Si: 0,303%, Cr: 0,037%, Mn: 0,397%, Fe: 98,836%, Cu: 0,049%, Mo: 0,005%, Sn: 0,041%, Sb: 0,061%

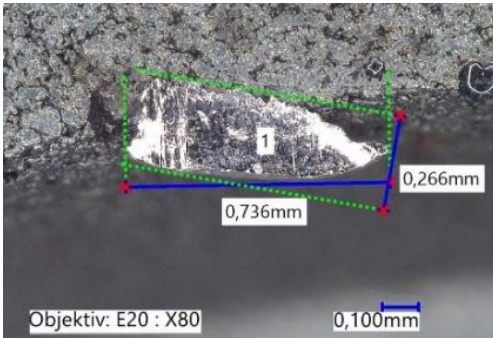
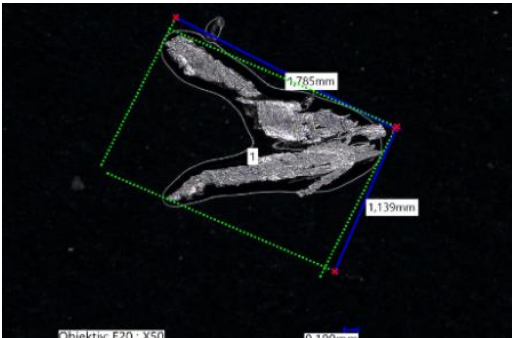


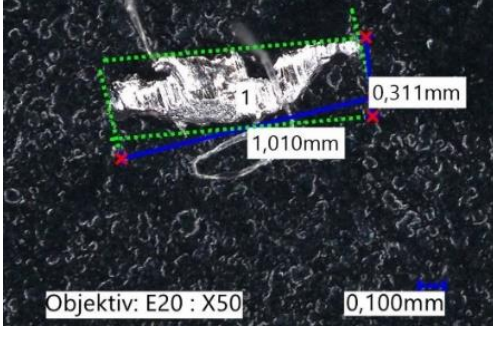



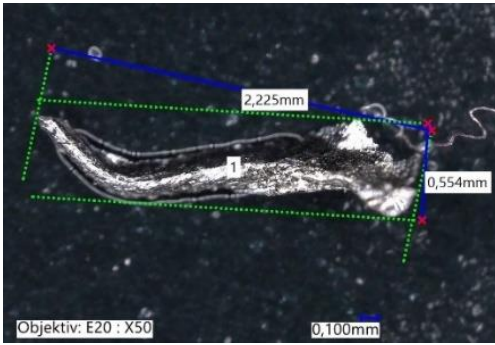
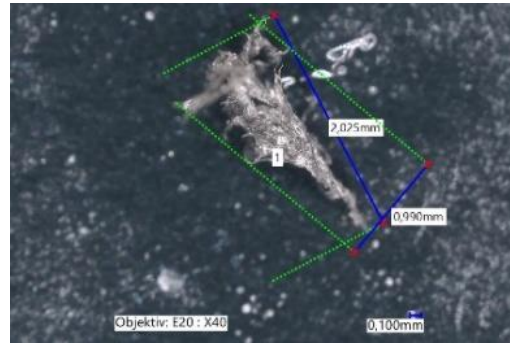
Vzorek	 <p>Obr. 64: Vzorek 6A</p>	 <p>Obr. 65: Vzorek 7A</p>
Chem.sl.	Cr: 0,763%, Fe: 0,120%, Ni: 0,030%, Cu: 98,641%, Zr: 0,054%, Mo: 0,013%, Cd: 0,124%, Sn:0,090%, Sb: 0,166 %	Cr: 0,664%, Fe: 0,417%, Cu: 98,405%, Zr: 0,050%, Cd: 0,199%, Sb: 0,266 %
Vzorek	 <p>Obr. 66: Vzorek 7B</p>	 <p>Obr. 67: Vzorek 8A</p>
Chem.sl.	Cr: 0,150 %, Mn: 2,155%, Fe: 96.115%, Cu: 0,282%, Sn: 0,550%, Sb: 0,748 %	Mn: 1,563%, Fe: 98,437%
Vzorek	 <p>Obr. 68: Vzorek 8B</p>	 <p>Obr. 69: Vzorek 9A</p>
Chem.sl.	Ti: 0,472 %, Mn: 1,218%, Fe: 97,584 %, Zn: 0,727 %	Mn: 1,390%, Fe: 97,684%, Sn: 0,423%, Sb: 0,504 %

Vzorek	 <p>Obr. 70: Vzorek 10A</p>	 <p>Obr. 71: Vzorek 11A</p>
Chem.sl.	Si: 0,455%, Ti: 0,040%, Cr: 0,028%, Mn: 1,333%, Fe: 97,534%, Cu: 0,027 %, Nb: 0,022%, Sn: 0,047%, Sb: 0,049%	Mn: 1,032 %, Fe: 98,344 %, Cu: 0,100 %, Sn: 0,247 %, Sb: 0,276 %
Vzorek	 <p>Obr. 72: Vzorek 11B</p>	 <p>Obr. 73: Vzorek 11c</p>
Chem.sl.	Cr: 0.842 %, Fe: 0,363 %, Ni: 0.072 %, Cu:98.070 %, Cd: 0,233 %, Sn: 0,164 %, Sb: 0,257 %	Cr: 0,102 %, Mn: 1,059%, Fe: 97,856%, Cu: 0,255%, Mo: 0,043%, Sn: 0,281%, Sb: 0,404%
Vzorek	 <p>Obr. 74: Vzorek 15A</p>	 <p>Obr. 75: Vzorek 15B</p>
Chem.sl.	Cr: 0,079 %, Mn: 0,967 %, Fe: 98,108%, Mo: 0,038%, Sn: 0,360%, Sb: 0,450%	-



Vzorek	 <p>Obr. 76: Vzorek 15B1</p>	 <p>Obr. 77: Vzorek 15B2</p>
Chem.sl.	Cr: 0,205%, Mn: 0,964%, Fe: 98,831%	Cr: 0,298%, Mn: 0,687%, Fe: 99,015%
Vzorek	 <p>Obr. 78: Vzorek 15B3</p>	 <p>Obr. 79: Vzorek 17A</p>
Chem.sl.	Cr: 0,153%, Mn: 0,975%, Fe: 98,873%	Mn: 1,179%, Fe: 98,821%
Vzorek	 <p>Obr. 80: Vzorek 18A</p>	 <p>Obr. 81: Vzorek 19A</p>
Chem.sl.	Cr: 0,200%, Mn: 0,640%, Fe: 99,160%	Ti: 1,301%, Cr: 0,285%, Mn: 0,864%, Fe: 97,550%

Vzorek	 <p>Obr. 82: Vzorek 19B</p>	 <p>Obr. 83: Vzorek 20A</p>
Chem.sl.	Fe:100,00%	Mn: 0,335%, Fe: 99,665%
Vzorek	 <p>Obr. 84: Vzorek 20B</p>	 <p>Obr. 85: Vzorek 20C</p>
Chem.sl.	Fe:100,00%	Mn: 1,098%, Fe: 98,902%
Vzorek	 <p>Obr. 86: Vzorek 21A</p>	 <p>Obr. 87: Vzorek 22A</p>
Chem.sl.	-	Cr: 0,233%, Mn: 0,869%, Fe: 98,898%

Vzorek	 <p style="text-align: center;">Obr. 88: Vzorek 23A</p>	 <p style="text-align: center;">Obr. 89: Vzorek 23B</p>
Chem.sl.	Cr: 0,168%, Mn: 0,888%, Fe: 98,453%, Cu: 0,491%	Fe:100,00%

## 6.4 Materiály využívané pro obrábění

V rámci obráběcích procesů v KMCZ se využívá celé řady vstupních tyčí a trubek rozdílného chemického složení. Seznam materiálů využívaných napříč touto sekčí ve firmě je uveden v Tab. 6 až v

Tab. 8.

Tab. 6: Seznam vstupních trubek obráběných v KMCZ a orientační chemické složení materiálů (část 1)

Trubky					
Firemní značení	E235+C [40]	St 44-2 [41]	E235+CR1 [42]	E195+CR1 [42]	E275+CR1 [42]
$C_{\max}$	0,1	0,21-0,22	0.17	0,15	0.21
$Si_{\max}$	0,05	-	0.35	0,35	0,35
$Mn_{\max}$	0,7	1,5	1.2	0.7	1.4
$P_{\max}$	0,025	0.035	0.025	0,025	0,025
$S_{\max}$	0,025	0.035	0.025	0,025	0,025
$N_{\max}$	-	0,012	-	-	-
$Al_{\min}$	0,025	0,55	0,015	0,015	0,015

Tab. 7: Seznam vstupních trubek obráběných v KMCZ a orientační chemické složení materiálů (část 2)

Trubky					
Firemní značení	Rst 34-2 BKM [42]	E460 [42]	S460MC [43]	E275+C [42]	ST 52,3 MODIF [44]
<b>C<sub>max</sub></b>	0,15	0,16	0,12	0,21	0,22-0,26
<b>Si<sub>max</sub></b>	0,35	0,55	0,5	0,35	0,1
<b>Mn<sub>max</sub></b>	0,7	1,7	1,6	1,4	1,2-1,6
<b>P<sub>max</sub></b>	0,025	0,025	0,025	0,025	0,02
<b>S<sub>max</sub></b>	0,025	0,025	0,015	0,025	0,02
<b>N<sub>max</sub></b>	-	0,025		-	-
<b>Al<sub>min</sub></b>	0,015	0,02	0,015	-	0,02-0,07
<b>Ti</b>	-	-	Max 0,15	0,015	-
<b>Nb</b>	--	-	Max 0,09	-	-
<b>V</b>	--	-	Max 0,2	-	-
<b>Cr</b>	--	-		-	Max 0,2

Tab. 8: Seznam vstupních tyčí obráběných v KMCZ a orientační chemické složení materiálů

Tyče			
Firemní značení	C35E+C [45]	CR40R+N+C [46]	C40R+N+C+SH [47]
<b>C<sub>max</sub></b>	0,34	0,43	0,43
<b>Si<sub>max</sub></b>	0,23	0,22	0,23
<b>Mn<sub>max</sub></b>	0,55	0,69	0,70
<b>P<sub>max</sub></b>	0,019	0,017	0,019
<b>S<sub>max</sub></b>	0,024	0,021	0,023
<b>Cr</b>	0,08	0,23	0,23
<b>Ni</b>	0,03	0,05	0,04
<b>Mo</b>	0,011	0,016	0,011
<b>Cu</b>	0,05	0,05	0,05

Měřené kontaminace se ukázaly být příliš malého rozměru pro získání dostatečně přesných hodnot dílčích prvků pro jednoznačné přiřazení kontaminací z výrobní haly ke kontaminacím nacházeným v demontovaných tlumičích při použití zvolené analyzační metody. Zdrojové materiály využívané v podniku v oblasti obráběcích procesů jsou podobného chemického složení



a výsledky chemické analýzy ukazují pouze minoritní rozdíly v chemickém složení částic. Výjimkou jsou mosazné kontaminace a kontaminace s vyšším podílem zinku. Tyto výsledky nicméně neznamenají, že jsou veškeré kontaminace stejného zdroje. Malá diverzita v chemickém složení užívaných obráběných materiálů, v kombinaci s malým rozměrem nacházených kontaminací, neumožňuje získání dostatečně přesných výsledků pro vyvození spolehlivých závěrů zvolenou měřicí metodou. Pro získání přesnějších a spolehlivějších výsledků by mohlo být vhodné využití alternativních spektrometrických metod. Alternativní metody by nicméně znamenaly delší analyzační časy a vyšší nároky na zkušenost obsluhy a jejich využití v praxi by tedy bylo spojené s nutností časově náročného školení obsluhy. Delší časy analýzy znamenají další přídatné náklady při provozu analyzačního zařízení jako součást běžných analýz kontaminací. Vzhledem ke kombinaci malých rozměrů částic a velké podobnosti zdrojových materiálů by navíc alternativní měřicí metody negarantovaly výrazné zpřesnění kontaminační mapy. Přínos informací o původu složení by nicméně pravděpodobně nepřesáhl náklady potřebné pro pořízení a provoz analyzačního vybavení. Kontaminační mapa je nástroj pro sběr statistických dat o původu kontaminací, který má umožnit cílené řešení problematických oblastí výroby. Nástroj sám o sobě nicméně snížení vzniku kontaminací nezajišťuje. Významná investice do analyzačního zařízení by proto pravděpodobně neměla stejný přínos jako využití dané investice do optimalizace výrobního procesu. Provádění chemické analýzy v případě výrobních procesů ve firmě KMCZ není doporučeno pro průběžné zpřesňování kontaminační mapy.

Výsledky měření chemické analýzy pomocí ručního fluorescenčního spektrometru jsou z výše uvedených důvodů pouze orientační a nejsou postačující k jednoznačnému přiřazení kontaminací ke zdrojovému materiálu či k vzájemného přiřazení kontaminací z výrobní haly ke kontaminacím nalezeným ve vadných tlumičích.

## 6.5 Mapa kontaminací

Aktuálně firmou využívaná mapa kontaminací obsahuje 8 kategorií, dle kterých jsou řazeny kontaminace vznikající při obráběcích procesech. Rozdělení je prováděno na základě výrobního kroku, ve kterém kontaminace vzniká. Kategorie jsou následující: trubkové linky, písní tyče, boxy, svařovny, podsestavy, montáž a lakovna. Většina kategorií využívá navíc detailnějšího rozdělení – např. trubkové linky jsou rozděleny dle konkrétních linek na další 4 podkategorie, stejně tak písní tyče jsou rozděleny do 4 podkategorií. Část aktuálně firmou využívané kontaminační mapy je na Obr. 90. Protože aktualizace kontaminační mapy je prováděna zejména v oblasti kovových třísek, pro detailnější analýzu budou zvoleny kategorie písních tyčí a trubkových linek.

Ačkoliv je v aktuální kontaminační mapě 8 podkategorií v oblasti obrábění trubek a písních tyčí, vzhled kontaminací je v 7 z 8 těchto podkategorií velmi podobný. Výrazně odlišný vzhled mají pouze kovové kontaminace, které jsou tvořeny zbytky leštících kotoučů. Zbylé kategorie kontaminací jsou tvořeny na základě nalezených kovových kontaminací větších rozměrů. Kontaminace objevené ve vadných tlumičích jsou často menších rozměrů, tvar může být zdeformován oddělením od původní delší třísky a samotný vzhled tedy není dostatečným indikátorem pro exaktní přiřazení kontaminace do dané konkrétní kategorie. Z těchto důvodů by bylo vhodné aktuální kontaminační mapu v oblasti obráběcích procesů zjednodušit

maximálně na dvě kategorie (trubkové linky a obrábění pístních tyčí). V případě zkušeného personálu by bylo možné rozlišovat kontaminace z obrábění pístních tyčí a obrábění trubek. Pro exaktní přiřazení je vhodnější stanovit pouze jednu kategorii, do které se kontaminace z obráběcích procesů mohou řadit. Pokud dochází k přiřazování kontaminací do velkého množství kategorií jen s velmi malou jistotou, dochází ke vzniku velkého množství nerelevantních dat, což může vést k realizaci nápravných opatření v oblastech, které nejsou významnými zdroji kontaminací. Statistické údaje o nalezených kontaminacích a jejich původech by měly být co nejpřesnější a obsahovat pouze ověřitelné informace. Při využívání aktuálního velkého množství podkategorií, které se vzhledově jen velmi málo liší, není možné přesné přiřazení kontaminací k dané kategorii zajistit.



KYB For Precision. For Advantage		Postup (Procedure)			Číslo (Number):	P05.011.001	
Název (Title):	MAPA KONTAMINACÍ				Revize (Revise):	2	
					Datum (Date):	19/10/2021	
					Strana (Page):	1/2	
MÍSTO	PROCES	TYP	POPIS	FOTO			PROTIOPATŘENÍ
TRUBKOVÉ LINKY	obrábění ST0 OT ST1 OT	kovové špony	dlouhá kovová špona po obvodu trubky vznikající obráběním hrany/čela trubky				Kontrola každého kusu + pravidelné SS strojů
	obrábění SA3 OT SA5 OT SA7 OT	kovové špony	dlouhá kovová špona vznikající obráběním hrany/čela trubky, NOK nastavené CNC				Kontrola každého kusu
	obrábění SA4 IT SA6 IT	kovové špony	kovová špona vznikající obráběním hrany/čela trubky (u modelu VW MQB A0)				Pravidelné otáčení nožů na CNC a děličkách - bod č. 4 "Protiopatření TL"
	obrábění SA2 IT SA4 IT SA6 IT	kovové špony	dlouhá kovová špona vznikající obráběním hrany/čela trubky				Kontrola každého kusu + pravidelné SS strojů  Pravidelné otáčení nožů na CNC a děličkách - bod č. 4 "Protiopatření TL"
PISTNÍ TYČE	leštění (Buffing) ST1 PT ST2 PT	kovové kontaminace	maz (jedná se o zbytky z leštících kotoučů + kovový prach z pístních tyčí)				Při velkém zahřátí leštících kotoučů dochází i vlivem okolních teplot k "úkapu" kotoučů - větší mezery u PT - správné nastavení přítlačů + OK orovnění bod č. 2 "Protiopatření ST1, ST2 PR"
	obrábění SA PT	kovové špony	kovová špona (může být dlouhá nebo jako úlolek) vznikající obráběním pístních tyčí				
	obrábění ST PT	kovové špony	kovová špona (může být dlouhá nebo jako úlolek) vznikající obráběním pístních tyčí				
	závitování	kovové špony	dlouhá kovová špona vznikající válcováním závitu pístní tyče (pístní a montážní část)				Dodržovat kontrolu pt na výstupu z CNC bod č. 6 "Protiopatření SA PR" a "Protiopatření ST1, ST2 PR"

Obr. 90: Výřez aktuálně využívané kontaminační mapy (interní zdroj)

Bez možnosti přesné chemické analýzy vzorků je třeba při kategorizaci zdrojů kontaminací vycházet především z vizuální kontroly kontaminací v mikroskopu. Mikroskopická analýza poskytuje informace o vzhledu (barva, textura, tvar) a rozměrech. Potenciálního zpřesnění kontaminační mapy by bylo možné dosáhnout nasbíráním dostatečného množství statistických dat o rozměrech kontaminací. Sběr dat by měl být proveden systematicky ve všech potenciálních místech vzniku kontaminací. Výrobní procesy jsou nastaveny tak, aby byl vznik kontaminací co nejnižší, což je zajišťováno průběžným mytím dílů. V první řadě by tedy bylo vhodné získat data o kontaminacích nacházejících se na dílech po všech mycích procesech. Bylo by stanoveno fixní množství polotovarů, které by pracovník testoval na přítomnost kontaminací metodou lepicí

pásky. Tyto částice z jednoho stanoviště by byly následně analyzovány s cílem stanovit rozsah velikostí částic a jejich četnosti. Možným výsledkem by mohly být rozdílné velikosti kontaminací ulpívajících na dílech na různých stanovištích. Získané kontaminace by byly analyzovány také z hlediska tvaru a textury a bylo by sledováno, zda u kontaminací z jednotlivých stanovišť vzniká určitý faktor podobnosti.

Statistické údaje z takového měření by pravděpodobně stále nebyly zcela dostačující. Výrobní proces ve firmě KMCZ je komplexní a jeden díl prochází celou řadou procesů včetně transportu mezi procesy. Kontaminace určité velikosti vznikající v prvních fázích výroby může měnit tvar i velikost při následných výrobních fázích.



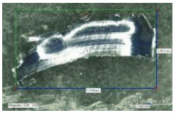
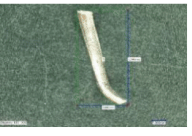
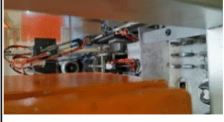
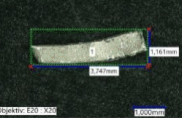
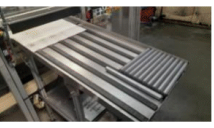


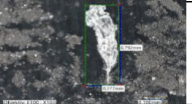

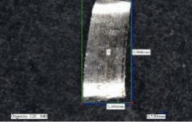

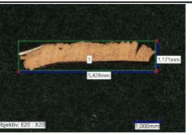
Na základě získaných vzorků a informací byla v rámci diplomové práce vytvořena aktualizace vybrané části kontaminační mapy, sloužící pro alokaci nalezených kontaminací s jejich pravděpodobným zdrojem ve firmě KMCZ. Původní kontaminační mapa využívaná ve firmě vycházela primárně z fotografií kontaminací nalezených ve výrobní hale. Tyto kontaminace byly obvykle výrazně větších rozměrů než kontaminace objevované ve vadných tlumičích, které bylo třeba následně k daným lokacím v kontaminační mapě přiřadit. Na základě metodiky doporučené v normě ISO 16232:2018 byla snaha doplnit tuto mapu o konkrétní kontaminace z vadných tlumičů na základě spektrometrické analýzy. Vzhledem k dříve diskutovaným limitům spektrometrické metody v kombinaci s malými rozměry kontrolovaných částic nebylo možné toto přiřazení vytvořit s dostatečnou jistotou a přesností. Sekce chemické složení je uvedena pouze informativně. Ve firmě aktuálně není k dispozici spektrometr a vzhledem k malé vypovídající hodnotně potenciálně získaných výsledků pravděpodobně chemická analýza nebude zařazena do rutinní kontroly kontaminací.

Na základě chemické analýzy je možné přibližně rozdělit kontaminace pocházející z trubkových linek, a to v případě, kdy kontaminace obsahuje větší množství manganu (cca nad 0,9 %). Vstupní materiály zpracovávané na linkách s pístitními tyčemi obsahují mangan pouze do 0,8 %. Na základě tohoto údaje by bylo možné přibližně rozlišit některé kontaminace pocházející z trubkových linek. Příkladem kontaminací, nalezených ve vyřazených dílech, které pravděpodobně pocházejí z trubkových linek, jsou vzorky 17A a 20C.

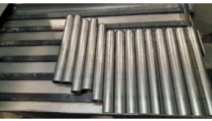
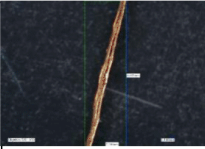
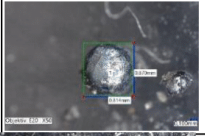

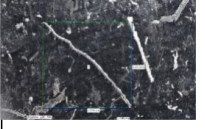
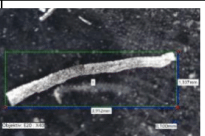

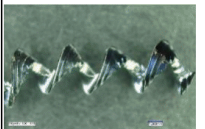



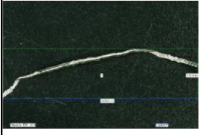

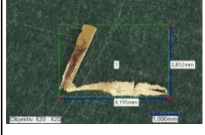
Kontaminační mapa je orientační nástroj, na základě kterého je možné přibližně zařazovat nalezené kontaminace k místům vzniku. Vzhledem k velké vizuální odlišnosti kontaminací ze stejného materiálu a stejného stanoviště není aktuálně možné využívat mapu jako přesnou metodu. Jedná se o nástroj umožňující orientační seskupení kontaminací podobných zdrojů. V rámci obráběcích procesů je doporučeno nezařazovat kontaminace dle konkrétních obráběcích linek kvůli velké podobnosti vstupních materiálů, a tedy i vzhledu potenciálních kontaminací. Kontaminace, která vzniká chybou na obráběcí lince (nedořezaná tříska), se může uvolňovat v následných fázích a na základě konkrétního místa, kdy dojde k jejímu oddělení a ulpění na dílu se může výrazně lišit její vzhled (tvar, velikost). Zdrojem (příčinou) kontaminace ovšem zůstává původní obráběcí linka, kterou pouze na základě vizuální inspekce nelze s dostatečnou jistotou stanovit.

Pro informaci jsou v rámci aktualizované části mapy uvedeny kontaminace, nacházející se v transportních boxech. Tyto kontaminace se nacházely na dně boxu, který nebyl dokonale


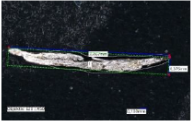
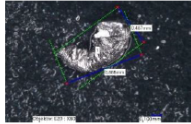
vyčištěn. Tyto částice mohou následně ulpět na dílech, které budou boxem transportovány do jiné části haly. Ačkoliv tyto kovové kontaminace přichází do kontaktu s díly právě v transportních boxech, nejedná se o jejich zdroj. Pro minimalizaci těchto kontaminací by bylo nutné kromě efektivnějšího mycího procesu boxu zajistit minimální vznik u zdroje (minimalizovat nedořezané třísky na polotovarech, od kterých se mohou v boxu oddělit a zajistit celkovou maximální čistotu výrobní haly – do boxů se nečistoty mohou dostávat z široké škály míst).

		<b>Postup (Procedure)</b>			Číslo (Number):	
Název (Title):	<b>MAPA KONTAMINACÍ</b>				Revize (Revise):	
					Datum (Date):	
					Strana (Page):	
Oblast výroby	Konkrétní lokace	Foto lokace	TYP	Kontaminací z výrobní haly		
				Vzorek	Popis	Chemické složení
Trubkové linky	Bedna třísek SA IT6		kovové špony		Úlolek ocelové špony nacházející se v bedně třísek	Si: 0,304% Mn: 0,382% Fe: 98,998% Mo: 0,008% Sn: 0,063% Sb: 0,065%
			kovové špony		Úlolek ocelové špony nacházející se v bedně třísek	Mn: 0,363% Fe: 99,180% Ni: 0,118% Sn: 0,160% Sb: 0,180%
	Obráběcí proces SA IT6		kovové špony		Ocelová špona nacházející se na obráběcí lince vznikající při obrábění dílu v daném místě	Si: 0,432% Mn: 0,391% Fe: 98,640% Sn: 0,055% Sb: 0,070 %
	Zásobník pro výstupní polotovary SA IT 6		kovové špony		Ocelová špona na podavači hotových polotovarů, pozůstatek nedokonalého mytí polotovaru nebo externě zanesená	Mn: 0,673% Fe: 59,838% Zn: 39,488%
	Vibrační bubem pro transport písku SA IT 6		kovové špony		Kovová kontaminace ve vibračním bubnu, nečistota zanesená neочиštěnými písky, externí zanesení operátorem	
	Bedna po beztřískovém dělení SA OT 5		kovové špony		Úlolek ocelové špony nacházející se v bedně s polotovary mezi jednotlivými operacemi linky	Si: 0,303% Cr: 0,037% Mn: 0,397% Fe: 98,836% Cu: 0,049% Mo: 0,005% Sn: 0,041% Sb: 0,061%
	Svařovací kotouče SA OT 5		kovové špony		Kovová kontaminace pocházející ze svařovacích kotoučů, kontaminace se nachází na lince	Cr: 0,763% Fe: 0,120% Ni: 0,030% Cu: 98,641% Zr: 0,054% Mo: 0,013% Cd: 0,124% Sn: 0,090% Sb: 0,166 %

Obr. 91: Návrh alternativní kontaminační mapy (část 1)

Trubkové linky	Zásobník pro výstupní polotovary SA 3 OUT		kovové špony		Kovová kontaminace nacházející se na zásobníku polotovarů na výstupu linky	Cr: 0,664% Fe: 0,417% Cu: 98,405% Zr: 0,050% Cd: 0,199% Sb: 0,266%
			kovové špony		Kovová kontaminace nacházející se na zásobníku polotovarů na výstupu linky	Cr: 0,150 % Mn: 2,155% Fe: 96,115% Cu: 0,282% Sn: 0,550% Sb: 0,748 %
	Zásobník pro výstupní polotovary ST 1 OUT		kovové špony		Kovová kontaminace nacházející se na zásobníku polotovarů na výstupu linky	Mn: 1,563% Fe: 98,437 %
			kovové špony		Kovová kontaminace nacházející se na zásobníku polotovarů na výstupu linky	Ti: 0,472 % Mn: 1,218% Fe: 97,584 % Zn: 0,727 %
	bedna třísek po obrábění ST 0 OUT		kovové špony		Kovová kontaminace z podlahy v okolí výrobní linky vedle bedny na třísky	Si: 0,455% Ti: 0,040% Cr: 0,028% Mn: 1,333% Fe: 97,534% Cu: 0,027 % Nb: 0,022% Sn: 0,047% Sb: 0,049%
	Zásobník pro výstupní polotovary ST 0 OUT		kovové špony		Kovová kontaminace nacházející se na zásobníku polotovarů na výstupu linky	Mn: 1,3895% Fe: 97,684% Sn: 0,423% Sb: 0,504 %
Boxy	transportní bedny		kovové špony		Kovová kontaminace nacházející se na dně transportní bedny	Mn: 1,032 % Fe: 98,344 % Cu: 0,100 % Sn: 0,247 % Sb: 0,276 %
			kovové špony		Kovová kontaminace nacházející se na dně transportní bedny	Cr: 0,842 % Fe: 0,363 % Ni: 0,072 % Cu: 98,070 % Cd: 0,233 % Sn: 0,164 % Sb: 0,257 %
			kovové špony		Kovová kontaminace nacházející se na dně transportní bedny	Cr: 0,102 % Mn: 1,059% Fe: 97,856% Cu: 0,255% Mo: 0,043% Sn: 0,281% Sb: 0,404%

Obr. 92: Návrh alternativní kontaminační mapy (část 2)

		<b>Postup (Procedure)</b>				Číslo (Number):
Název (Title):		<b>MAPA KONTAMINACÍ</b>				Revize (Revise):
						Datum (Date):
						Strana (Page):
Oblast výroby	TYP	Kontaminace z dílů				
		Vzorek	Popis	Chemické složení	Důvod přiřazení	
Trubkové linky	kovové špony		Kovová kontaminace nalezená na podložce po demontáži vadného tlumiče	Mn: 1,179% Fe: 98,821%	Přiřazeno k trubkovým linkám na základě vyššího obsahu Mn (nad 0.9 %)	
Trubkové linky	kovové špony		Kovová kontaminace nalezená na podložce po demontáži vadného tlumiče	Mn: 1,098% Fe: 98,902%	Přiřazeno k trubkovým linkám na základě vyššího obsahu Mn (nad 0.9 %)	

Obr. 93: Návrh části alternativní kontaminační mapy dle kontaminací z vadných dílů



## 7 Návrh zlepšení řízení kontaminací v KMCZ

Aby bylo možné realizovat relevantní kroky vedoucí ke zlepšení aktuálního postupu řízení kontaminací, je nutné provést komplexní analýzu současné situace. Pro stanovení kořenových příčin a potenciálně preventivních opatření vedoucích k minimalizaci vzniku a šíření kontaminací bude provedena analýza Ishikawova diagramu. Metoda 5 Whys, analýza stromu kořenových příčin a analýza metodou PDPC (Process Decision Program Chart).

### 7.1 Analýza diagramem příčiny a následku (Ishikawa)

V rámci optimalizace vzniku a šíření kontaminací ve výrobě je třeba provést podrobnější analýzu výrobního procesu. Pro prvotní analýzu byl zvolen Ishikawův diagram (Obr. 49). Ishikawův diagram je vhodný zejména v případech, kdy existuje jeden problém, a možné příčiny mají hierarchickou strukturu. Efekt (problém) je považován za hlavu *rybí kosti*, potenciální příčiny a pod příčiny problému tvoří *tělo* diagramu. Diagram jasně ilustruje možné vztahy mezi identifikovanými příčinami a následky. [15]

V případě diagramu příčiny a následku 5M jsou hlavními kategoriemi (kostmi diagramu) následující skupiny: lidé, stroje, metody, materiál a údržba (ang. Machinery, manpower, method, materiál, maintenance a proto zkratka 5M). Často týmy vynechávají kategorii údržba a využívají pouze tzv. 4M diagramu nebo je naopak zahrnut vliv životního prostředí (mother nature) a využívá se 6M diagram-. Tento druh diagramu je vhodný zejména pro týmy s menším množstvím zkušeností v sestavování diagramu příčiny a následku a zároveň je vhodným výchozím bodem v případě nejasného problému. Podobně jako u jakéhokoliv jiného diagramu příčiny a následku – formát diagramu není zásadní v porovnání se samotným procesem vymýšlení protipatření a shody na hlavních zdrojích problému. Ishikawův diagram, jehož hlavní kategorie příčin jsou vytvářeny čistě na základě zkušenosti a znalosti zkoumaného procesu se nazývá procesní Ishikawův diagram. [15]

Vzhledem k vytváření diagramu na základě znalostí výrobních procesů a konzultace problematiky s pracovníky v této oblasti nebylo vhodné využít přímo obecný 5M diagram, ale bylo využito procesního diagramu příčiny a následku, který z 5M diagramu částečně vychází vzhledem k relevantnosti vybraných kategorií. Dohromady bylo stanoveno 6 kategorií: *stroje a nástroje, procesy, prostředí, lidé, výroba a metody*. Ishikawův diagram se zaměřuje na kontaminace vznikající uvnitř výrobní haly, případně zanesené externě zaměstnanci. Diagram nezohledňuje kontaminace od dodavatele součástí.

Příčiny kontaminací v hotovém dílu z oblasti strojů a nástrojů se zejména týkají geometrie a materiálu nástroje, opotřebovaného nástroje, které mohou způsobit, že dochází k nedořezání třísky, nebo dokonce ulpění částice nástroje na polotovaru. Důležitou příčinou je také neefektivní či nefunkční myčka, která má za cíl odstranit kontaminace zanesené na díl při obráběcím procesu nebo vliv nečistot v okolí výrobní linky.

Mezi příčiny z oblasti procesů se řadí kalibrace a informovanost operátorů, která může vést k nedodržování stanovených předpisů.

Do kategorie prostředí bylo zařazeno velké množství potenciálních příčin, protože nečistoty v okolí výrobních linek mohou mít významný vliv na celkovou čistotu výrobního procesu. Mezi hlavní příčiny se řadí nečistoty na zásobnicích polotovarů, znečištěné transportní bedny či zanesená výrobní linka. Všechny tyto příčiny mohou způsobit, že dojde k ulpění částice na polotovaru, která na dílu již zůstane po zbytek výrobních procesů. V kategorii prostředí může mít nicméně velký vliv i nevhodné osvětlení, které ovlivňuje únavu zaměstnanců a kvalitu vizuální kontroly.

Příčiny kontaminací z kategorie lidé mají velkou variabilitu. Zaměstnanec může přehlédnout kontaminaci při vizuální kontrole z důvodu snížené pozornosti, která může být způsobena únavou i časovým tlakem, který může vést k nedostatečnému času věnovanému kontrole. Tyto faktory mohou také ovlivnit náplň povinností z hlediska dodržování stanovených předpisů (pravidelné čištění magnetů myčky, čištění pracovní linky apod.). V neposlední řadě může mít vliv strach zaměstnanců z potrestání v případě, že by přiznali chybu (opomenutí v delším časovém úseku údržby myčky, neprovedení vizuální kontroly apod.). Včasné upozornění na chybu by mohlo umožnit včasné nápravné řešení, případně na základě této zpětné vazby s větší přesností nastavit preventivní opatření. Jedním ze 14 bodů Demingovy filozofie managementu je odstranění strachu. Zaměstnanec, který se obává potrestání (ztráta finančních odměn apod.) pravděpodobně nebude ochoten dobrovolně přiznat pochybení. [48]

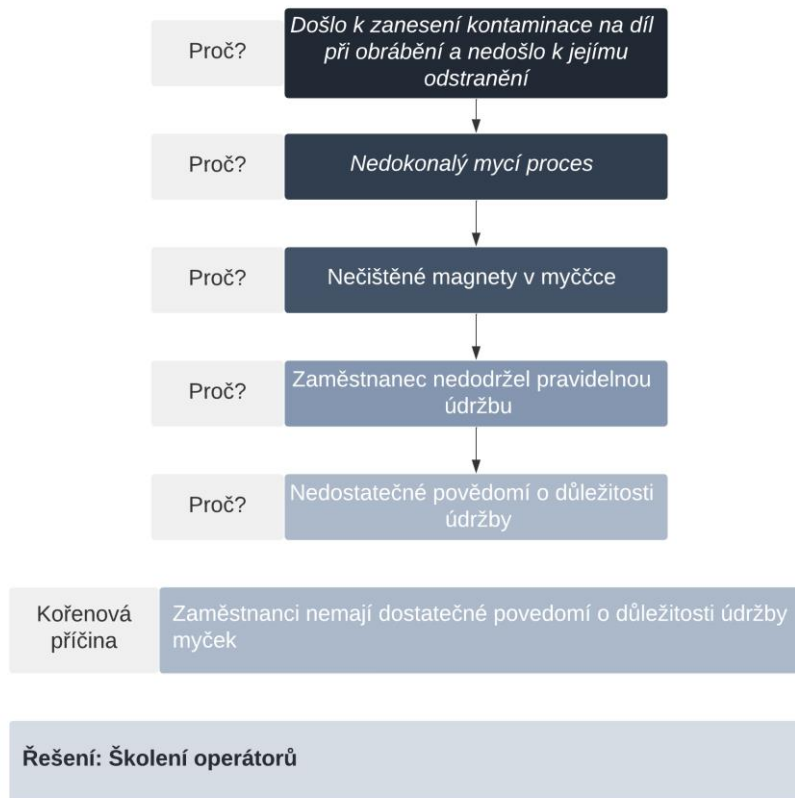
V rámci výrobní kategorie se objevují zejména příčiny související přímo s nastavením daných výrobních procesů a logistikou. V případě konkrétních procesů se jedná o užívání příliš velkého množství lepidla či laku. Z pohledu logistiky může být potenciální příčinou častý převoz polotovarů z jedné části haly do druhé či delší doba umístění polotovarů v transportních bednách. V obou těchto případech může docházet k riziku zanesení kontaminace obzvlášť v případě, kdy výrobní prostředí (haly, transportní vozíky) nejsou dostatečně čisté.

Poslední skupinu příčin tvoří metody. Jedná se zejména o neefektivní vizuální inspekci, které klesá účinnost s časem pracovní směny a narůstající únavou operátorů. Dále se jedná o nedodržování stanovených nařízeních jako je výměna rukavic či čištění myčky.





**Problem: Část kovové třísky ve finálním výrobku**



Obr. 95: Využití metody 5 WHY pro nalezení kořenové příčiny jednoho z dílčích vlivů na přítomnost kontaminace v hotovém výrobku

### 7.3 Analýza stromem kořenových příčin

Pro hlubší pochopení vzájemných vztahů mezi dílčími příčinami vedoucími ke kořenové příčině byl využit strom poruchových stavů. Pro nalezení klíčových příčin bylo využito principu 5 Proč. Jako závada byl stanoven stav, kdy se kovové kontaminace (části obráběcí třísky) nacházejí ve finálním výrobku. Z analýzy je možné vidět, že aby nastal stav, kdy je daná kontaminace v hotovém dílu, vstoupila nečistota na polotovar buď před mycím procesem, nebo po mycím procesu.

Pokud je kontaminace zanesená po mycím procesu, pak pravděpodobně došlo buď k jejímu zanesení operátorem (např. při přemísťování hotového polotovaru z výstupního pásu do transportního boxu) nebo ke kontaminaci došlo kontaktem polotovaru se znečištěným výstupním pásem. Transport operátorem může být pravděpodobně způsoben nevyměněnými rukavicemi nebo vlivem nečistot v okolí výrobní linky – pokud zaměstnanec dodržuje pravidelnou výměnu rukavic, stále může docházet k transportu kontaminací, které se nacházejí ve znečištěném okolí. Operátoři mají za úkol udržovat výstupní pás čistý. Pokud je znečištěný, vlivem čehož dochází k transportu kontaminací na polotovar, základní příčinou je v tomto případě nedodržování předpisů zaměstnancem.

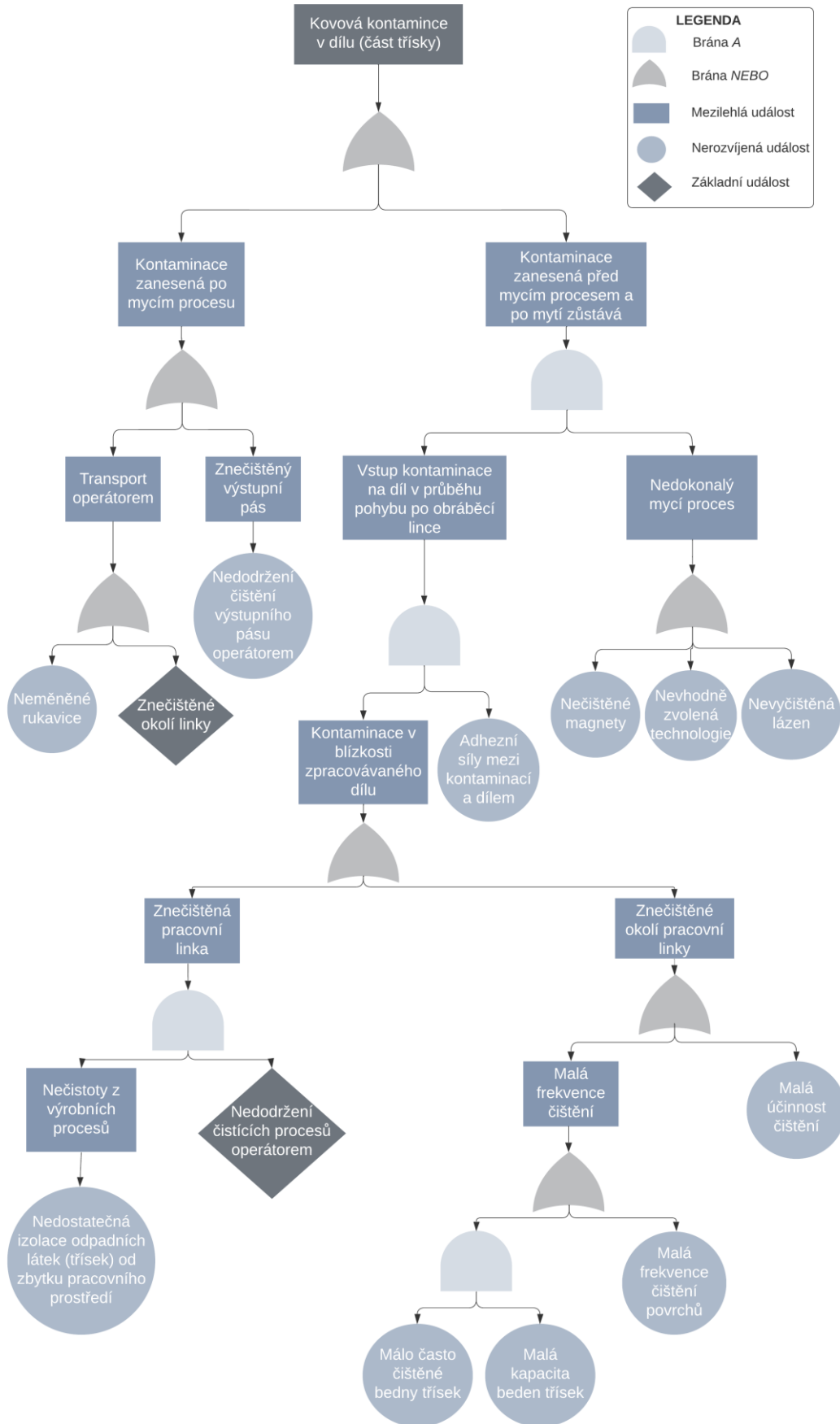
Cesta ke kořenové příčině při zanesení kontaminací před mycím procesem, kterou mytí neodstraní, je komplexnější. Pokud na dílu ulpívá kontaminace, kterou myčka neodstranila, pak musely nastat souběžně dvě chybové události – došlo ke kontaktu kontaminace s dílem při pohybu na obráběcí lince a současně byl mycí proces dílu neefektivní.

Pro nedokonalý mycí proces byly stanoveny tři základní události – magnety v myčce nebyly vyčištěné, byla zvolena nevhodná technologie mycího procesu nebo samotná mycí lázeň nebyla vyčištěná. Tyto události se mohou vzájemně kombinovat a zvyšovat i riziko neodstranění přítomných kontaminací. Pokud kontaminace vstoupila na díl při pohybu po obráběcí lince, pak musely nastat dvě události současně – v blízkosti zpracovávaného dílu se nacházela kontaminace a vznikly adhezivní síly mezi kontaminací a dílem, které způsobily, že se kontaminace k dílu přichytila.

Kontaminace se objeví v blízkosti dílu, který prochází výrobní linkou v případě, že je znečištěná samotná výrobní linka nebo její bezprostřední okolí. Linka zůstane znečištěná, pokud z výrobních procesů vznikají nečistoty a zároveň nejsou dodrženy potřebné čistící procesy. Z okolí výrobních linek lze jmenovat zejména plochy a bedny s třískami. Potřebné čistící procesy nejsou dodrženy, pokud je frekvence čištění nevyhovující anebo pokud jsou využívány bedny s malou kapacitou a současně nejsou dostatečně často vynášeny. V takovém případě dochází k nahromadění nečistot i v jejich okolí odkud může docházet k jejich dalšímu transportu.

Strom poruchových stavů lze analyzovat kvalitativně i kvantitativně. Cílem kvalitativní analýzy je stanovení všech potenciálních kombinací faktorů, které by mohly vést ke vzniku vrcholové události (zpravidla kritická chyba systému). Pokud jsou známy parametry základních stavů, pak je možné provést kvantitativní analýzu. Cílem této analýzy je určení řady ukazatelů charakterizujících vrcholovou událost. Mezi ukazatele, které touto analýzou mohou být určovány, se např. řadí pravděpodobnost, že vrcholová událost nastane v zadaném intervalu provozu systému či střední doba do prvního nastoupení vrcholové události. [49]

V současné situaci nejsou pravděpodobnosti základních událostí známy. Výsledky kvantitativní analýzy by nicméně poskytly přesnější informace o aktuálním stavu kontaminačního problému ve firmě, případně by mohla umožnit sestavení cílů přípustných kontaminačních rizik. Pro další zkoumání situace je proto doporučeno provést stanovení pravděpodobností základních stavů a následně provést výpočet pravděpodobnosti vzniku poruchové události či doby do prvního nastoupení poruchové události.



Obr. 96: Analýza kořenové příčiny

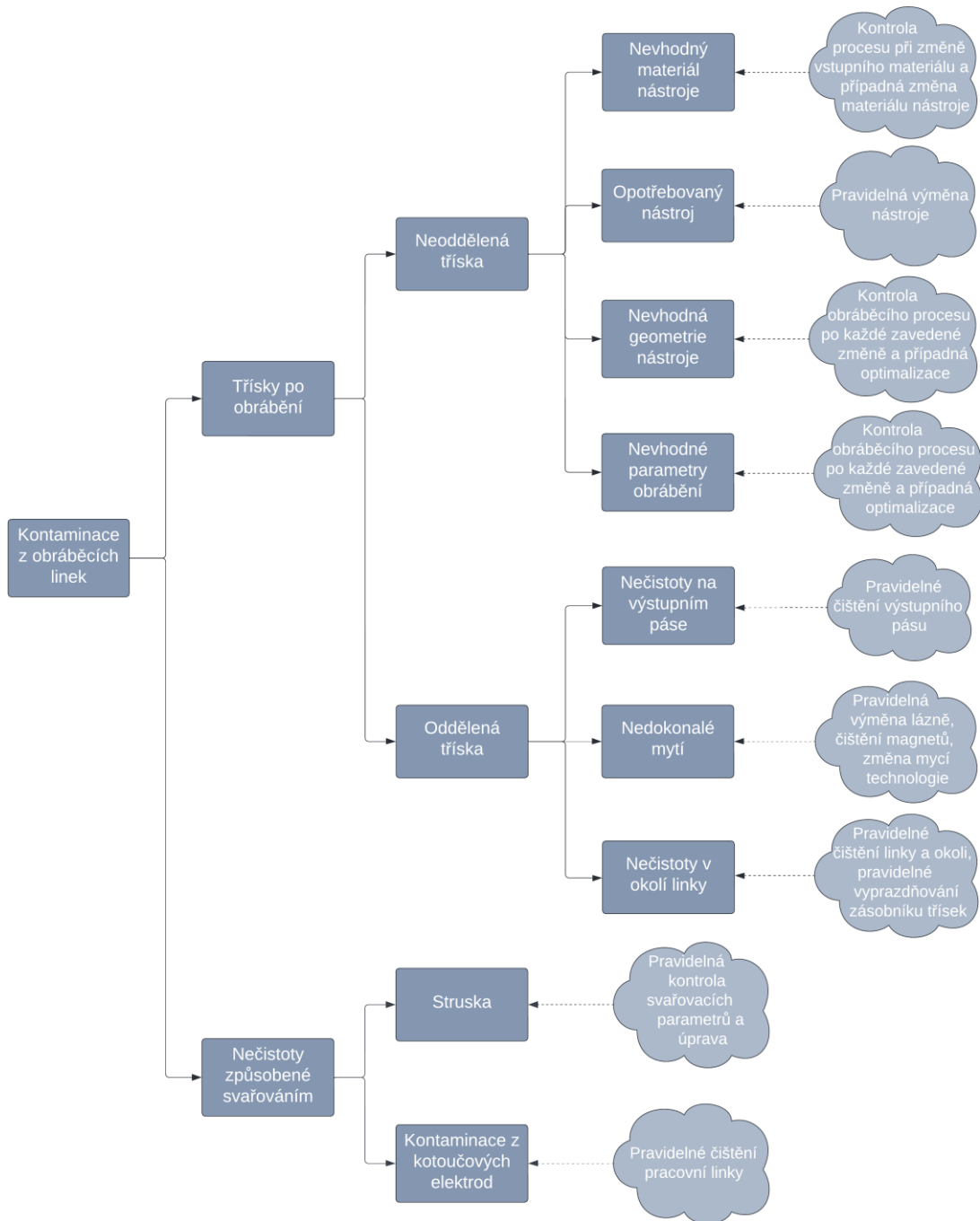
## 7.4 Analýza diagramem PDPC

Na základě kroků definovaných ve stromu kořenových příčin a základních výstupů vycházejících z vytvořeného Ishikawova diagramu byla provedena analýza PDPC s cílem stanovit vhodná a účinná preventivní opatření pro minimalizaci vzniku a transportu kontaminací. Pro analýzu PDPC byly stanoveny tři kategorie zdrojů kontaminací, které budou blíže prozkoumány samostatně. Jedná se o kontaminace z obráběcích linek, kontaminace z transportních dílů a kontaminace pocházející od dodavatele.

První vytvořený diagram PDPC (kontaminace z obráběcích linek viz Obr. 97) bere v potaz všechny kontaminace, které mohou vzniknout a ulpět na polotovarech v době přítomnosti dílu na poloautomatizované obráběcí lince. Kontaminace vznikající na obráběcích linkách mohou vznikat vlivem obráběcích třísek či nečistotami souvisejícími se svařovacím procesem. Z hlediska dosud nasbíraných dat lze v rámci obráběcích procesů rozlišovat dva způsoby vzniku kontaminací: oddělené třísky a nedokonale oddělené třísky.

V případě první skupiny se jedná o kontaminace nacházející se ve finálním dílu vlivem nedokonalého mytí – třísky jsou při obráběcím procesu odděleny od základního materiálu. Na dílu mohou ulpět po obráběcím procesu a následný mycí proces není účinný. Dále může dojít k ulpění oddělené třísky v rámci mycího procesu, kdy je myčka již zanesena a dochází k opětovnému ulpívání kontaminací, které byly odděleny od jiných dílů. V některých případech může docházet k transportu třísek operátory, zejména v případech, kdy pracovní prostor a jeho okolí není dokonale uklizeno (přeplněné bedny s třískami, třísky se nachází na linkách, kterým díly prochází apod.).

V případě kontaminací pocházejících od neoddělených třísek je pravděpodobným zdrojem problému nevhodné seřízení obráběcího stroje. Pokud dojde k neúplnému oddělení třísky, je možné, že tříska není při vizuální kontrole objevena a k jejich oddělení od dílu dochází až při transportu či dalších výrobních fázích, kdy mohou uniknout do kritických částí výrobního dílu.



Obr. 97: PDPC diagram – kontaminace z obráběcích linek

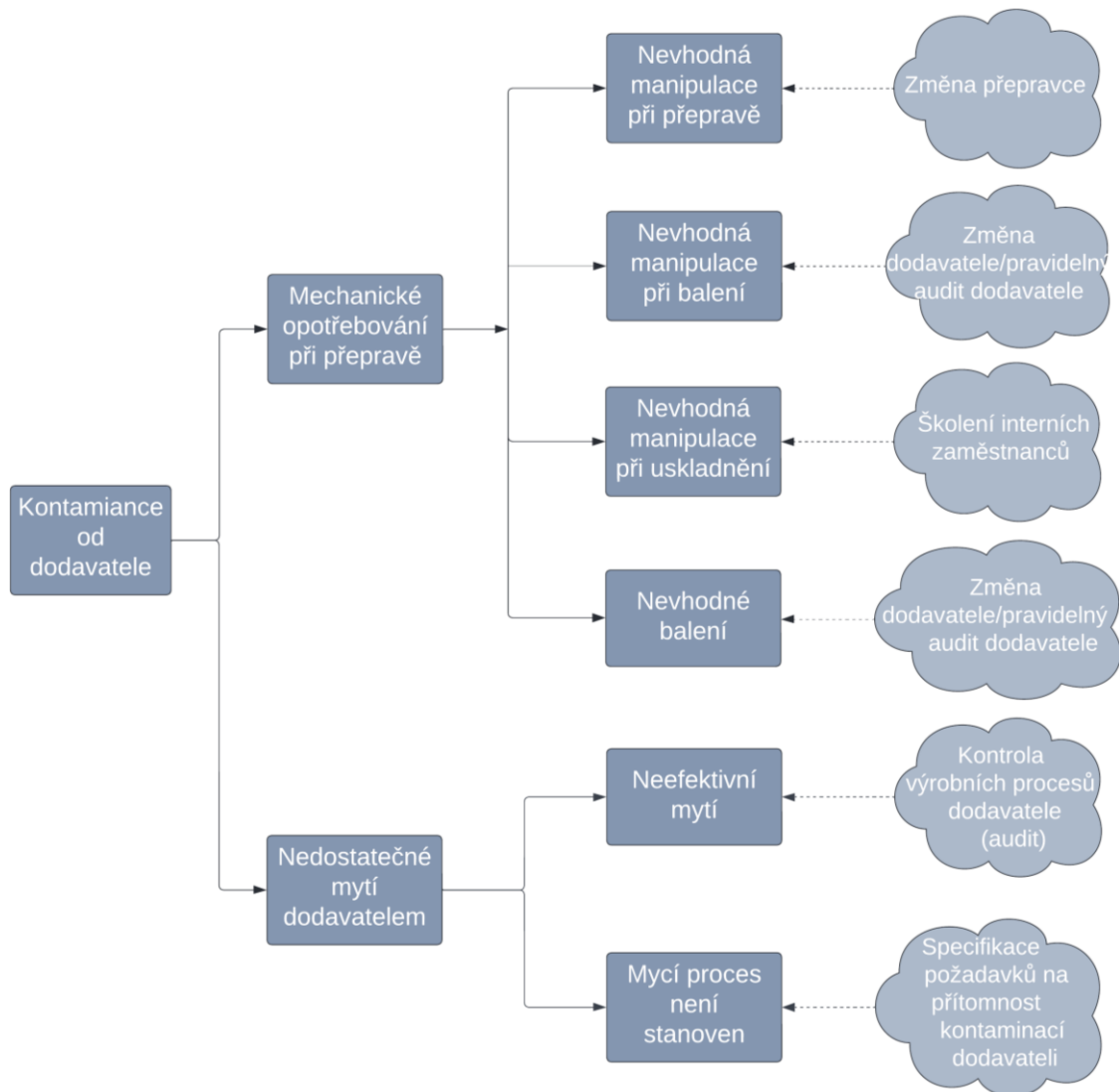
Druhý vytvořený diagram se zabývá kontaminacemi, které přicházejí od dodavatele součástí (Obr. 98). Určité množství kontaminací, které vstupují do vyráběných tlumičů jsou externího původu. Vybrané menší součásti jsou odebírány od dodavatelů, kteří v některých případech součásti dodávají již znečištěné, případně jsou kontaminace součástí balení. Vybrané dodávané součásti jsou ve firmě podrobeny mycímu procesu, aby byl negativní vliv potenciální přítomnosti kontaminací na součástích eliminován. Tento proces znamená přídavný čas a náklady a není dokonalý. Principiálně se jedná o nápravné řešení vzniklého problému (dodavatel dodává

znečištěné výrobky) a efektivnějším řešením by bylo nalezení preventivních kroků. Pro identifikaci vhodných preventivních kroků byla provedena tato analýza.

V rámci analýzy byly kontaminace tohoto původu rozděleny na dvě kategorie – kontaminace vzniklé mechanickým opotřebením součástí při přepravě a kontaminace vzniklé před přepravou, které nebyly odstraněny vlivem nedokonalého mycího procesu.

Mechanické opotřebenění součástí při přepravě může být způsobeno nevhodnou manipulací, v takovém případě by mohlo být vhodné změnit přepravce. Dalšími důvody může být nevhodná manipulace při balení či nevhodná volba balení pro daný typ výrobku. Pro obě tyto kategorie bylo jako protipatření navrženo provádění auditu dodavatele s cílem zajistit, že procesy při balení produktů splňují požadavky firmy KMCZ. V případě nevyhovujících výsledků auditů, případně pokud by řešení auditů nebylo z časových či ekonomických důvodů vhodné, pak je alternativním řešením změna dodavatele. Poslední podkategorií je nevhodná manipulace při uskladnění. Tento zdroj vzniku kontaminací je v dané analýze jediný interní zdroj, protože je způsoben interními zaměstnanci. Vhodným řešením je školení zaměstnanců v oblasti manipulace s dodanými součástmi.

Kontaminace mohou být součástí balení dodávaných součástí vlivem nedokonalého mycího procesu na straně dodavatele. K nedokonalému odstranění nečistot může docházet vlivem neefektivního mytí nebo dokonce vlivem absence mycího procesu. Pokud mycí proces není zařazen do výrobního procesu dodavatele a dochází k dodávání součástí obsahující kontaminace, pak je vhodné dodavateli stanovit požadavky na přítomnost kontaminací v dodávaných výrobcích. Dodavatel by měl za povinnost doložit postupy, kterými dané požadavky zajišťuje. Pokud mycí proces je u dodavatele zařazen do výrobního procesu, a přesto dochází k dodávání součástí obsahující kontaminace, pak vhodným krokem je zařazení auditu dodavatele.



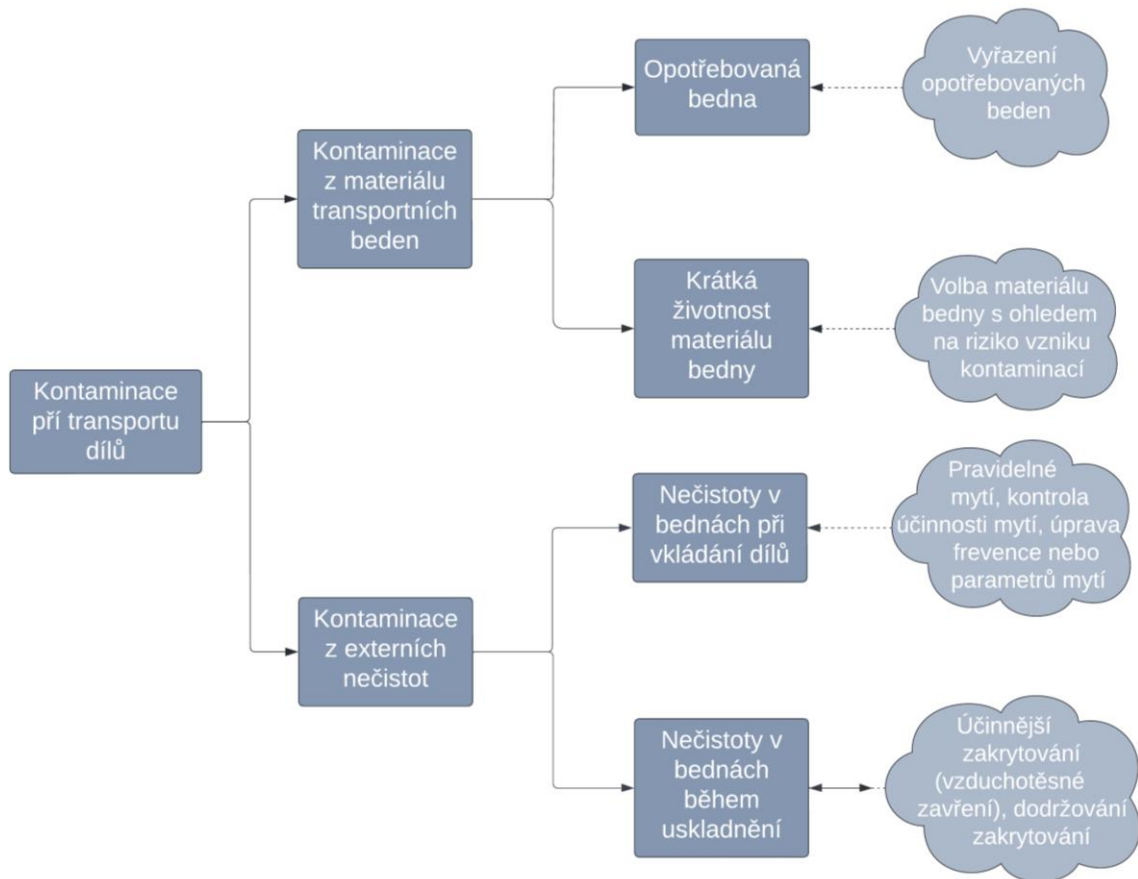
Obr. 98: PDPC diagram – kontaminace od dodavatele součástí

Třetí analýza zabývající se kontaminacemi souvisejícími s transportem dílů uvnitř výrobní haly je na Obr. 99. Kontaminace mohou pocházet z materiálu transportních beden, ve kterých jsou polotovary přepravovány po výrobní hale, nebo se může jednat o externě zanesené nečistoty, které se nachází v transportních bednách.

Kontaminace z materiálu transportních beden mohou vzniknout vlivem užívání beden po příliš dlouhou dobu, vlivem čehož jsou opotřebované a dochází k uvolňování částí jejich materiálu. Tyto částice se mohou následně dostat až do vnitřní části tlumičů. Pro předejití tomuto stavu je vhodné opotřebované bedny pravidelně vyřazovat z provozu, případně stanovit maximální čas, po který je možné bedny v provozu využívat, než bude nutná jejich výměna. Další možností je krátká životnost materiálu bedny, kdy by k uvolňování částí materiálu bedny docházelo i po krátké době jejich provozu. V takovém případě je vhodné změnit materiál užívaných beden.

Kontaminace z externích nečistot mohou být přítomné v bednách již v okamžiku nakládání dílů. Pro takový případ bylo stanoveno hned několik preventivních kroků: dodržovat pravidelné mytí beden s kontrolou účinnosti mycího procesu, dle potřeby je vhodné upravovat frekvenci mytí či parametry mycího procesu. Kontaminace mohou do transportních beden vstoupit

i za předpokladu, že v okamžiku nakládání beden byly dodrženy požadavky na čistotu. Pro předejití zanesené nečistot do beden s díly je vhodné zvolit efektivnější zakrytování beden. Aktuálně je využíván jen jednoduchý způsob kartonového zakrytí plastových beden. Pro účinnější zabránění vstupu nečistot na díly by bylo vhodné využití vzduchotěsného zakrytí. Dále je nutné zajistit dodržování zavírání transportních beden zaměstnanci.



Obr. 99: PDPC – Kontaminace při transportu dílů

Na základě tří analýz vzniku kontaminací byla sestavena řada doporučení pro realizaci preventivních opatření s cílem snížit vznik a transport částicových kontaminací. Některá z uvedených opatření jsou již ve firmě zavedená (např. pravidelné mytí přepravních beden), ke zvýšení efektivity tohoto kroku by navíc mohla přispět pravidelná kontrola účinnosti mycího procesu a následné úprava technologie, parametrů či frekvence. Velká část navržených preventivních opatření aktuálně ve firmě realizována není (např. vzduchotěsné zakrytí transportních beden či kontrola výrobních procesů dodavatele s cílem minimalizovat množství kontaminací od dodavatele). Některé z aktuálně využívaných preventivních kroků nejsou zcela dodržovány (např. pravidelná výměna magnetů operátory). Důsledné dodržování preventivních kroků by mohlo vést k celkovému snížení vzniku a transportu kontaminací, a tedy i k celkovému snížení vyřazovaných vadných tlumičů. Analýzy PDPC byly vytvořeny z pohledu různých zdrojů kontaminací a souvisejícím transportem.



## 7.5 Návrh zlepšení výrobního procesu

Výsledky analýzy ukázaly, že transportní bedny obsahují velkou variabilitu kontaminací. Samotné bedny mohou být přímým zdrojem kontaminací (úločky beden, které ulpí na dílu), velmi často slouží také jako transport médium kontaminací jiného původu. Ačkoliv se tyto kontaminace uchycují na dílech až v transportní bedně, je třeba optimalizovat již samotné místo vzniku těchto kontaminací. Obráběcí procesy ve firmě KYB jsou doprovázeny vznikem kovových třísek. Pro snížení výskytu kontaminací na vyráběných dílech je prováděno mytí dílů v několika fázích. Toto mytí může být méně efektivní, pokud nejsou splněny všechny podmínky (např. magnety uvnitř myčky nejsou dostatečně často čištěny). Množství vyrobených a následně mytých dílů může souviset se zanášením magnetů v myčce. Při bližším prozkoumání této potenciální korelace by mohlo být možné stanovit, jak často za směnu je třeba magnety z myčky vyjmout a očistit. V rámci aktuální situace dochází v některých případech k provozu myček se zanešenými magnety, kdy maximální efektivita mycího procesu není zajištěna. Pro zlepšení tohoto procesu je třeba proškolení personál ohledně nutnosti údržby magnetů, které souvisí s výskytem kontaminací v hotových dílech.

Kontaminace z obráběcích procesů jsou v některých případech transportovány do jiných částí výroby. V některých případech je nositelem samotný nedokonale umytý díl. Transport může mít mnoho dalších podob (např. obuv, rukavice a pracovní kombinéza zaměstnanců, transportní bedny, kola transportních vozíků aj.). Pro optimalizaci výskytu kontaminací je proto vhodné udržovat všechny části výroby s co největší čistotou. Mezi tyto oblasti se mohou řadit:

- **Bedny s třískami po obrábění**

Bedny s třískami po obrábění by měly být pravidelně vyprazdňovány, aby nedocházelo k vysypávání třísek mimo kontejner z důvodu naplnění jeho kapacity. Bedny by měly být umístěny tak, aby docházelo k maximálnímu zachycování třísek vznikajících při obráběcím procesu. V případě, že toto není možné zcela zaručit, je nutné provádět pravidelné čištění okolí beden. Toto čištění by mělo být stanoveno pravidelně dle kapacity beden, množství vznikajících třísek a jejich parametrů. Zaměstnanci by měli být proškolení o významu všech čistících procesů, aby byli k procesům sami motivováni.

- **Výrobní linka u obráběcích procesů**

Výrobní linka by měla být pravidelně čištěna od uplívajících třísek. Je třeba stanovit přípustné množství třísek nacházejících se na výrobní lince, kdy je linku možné provozovat. Druhou alternativou je stanovení pravidelného čištění linek do určitých časových úseků při směně. Čistící kroky rozplánované během pracovní směny mohou představovat přerušení rutinní činnosti a zvýšení pozornosti operátorů, kteří následně mohou fungovat jako efektivnější vizuální kontrola. V případě snahy o zefektivnění vizuální kontroly by mohlo být vhodné oddělit roli operátora výroby a kontroly.

### ▪ **Mycí procesy**

Efektivita mycího procesu závisí především na čistotě mycí lázně (kapalina uvnitř myčky se musí pravidelně čistit) a na výkonu magnetů, zachytávajících kovové nečistoty. Magnety jsou umístěny uvnitř myčky a jsou obaleny kovovými nečistotami, které se do lázně uvolňují v průběhu mycího procesu. Magnety mají za cíl eliminovat volný pohyb kovových částic v čistící lázni, který by mohl vést k opětovnému ulpění kontaminací na čištěném dílu. V případě zanesení magnetů dochází k výraznému poklesu jejich účinnosti, a tedy i celé čistící lázně. Čištění magnetů není automatizovaný proces a vyžaduje zásah operátora linky.

### ▪ **Oblečení**

Pro minimalizaci transportu by mohlo být vhodné využívání antistatických obleků. Dále je třeba dodržovat pravidelné měnění rukavic. Interní směrnice firmy stanovují, jak často musí pracovníci rukavice měnit, aby riziko kontaminace dílů bylo minimální, nicméně k přenosu kontaminací rukavicemi stále dochází. Je třeba provést analýzu, zda je stanovený interval výměny rukavic dostatečný či zda nařízení ohledně výměny rukavic je zaměstnanci dodržováno.

### ▪ **Lidé**

Firma KMCZ aktuálně využívá již celou řadu přínosných přístupů z oblasti řízení kvality. K neuspokojivým výsledkům dochází zejména v situacích, kdy nastavené postupy a procesy nejsou zaměstnanci dodržovány či jsou dodržovány ve snížené míře. K takové situaci nejčastěji dochází kvůli únavě, s ní související sníženou pozorností či nedbalostí související s nedostatečnou informovaností o významu daného kroku či procesu (např. význam pravidelného čištění magnetů v myčkách u obráběcích linek). Velká část procesů má v rámci řízení kvality zavedenou vizuální kontrolu na výstupu pásů. Obvykle zaměstnanec obstarávající danou poloautomatizovanou linku má za úkol vizuálně zkontrolovat díly, které manuálně skládá z výstupu pásu do transportních beden. Vzhledem k monotónnosti činnosti klesá účinnost této výstupní kontroly s postupujícím časem zaměstnance na směně. Zároveň dochází k nedostatečné údržbě výrobních linek (nečistoty na lince či v jejím okolí v průběhu výroby, neudržované myčky apod.). Ve výrobním procesu, ve kterém se pohybují lidé, má obvykle lidský faktor velký vliv na výslednou kvalitu produkce.

Jednou z možných cest k navýšení efektivity zaměstnanci prováděných úkonů může být zavedení některého z prvků moderních výrobních podniků, např. gamefikace krátce rozvedené v kapitole 4.

Jak již bylo rozvedeno dříve, dle Demingovy filozofie zaměstnanec pracující ve strachu nebude ochoten přiznat pochybení. Zároveň včasné upozornění na chybu by mohlo umožnit včasné nápravné řešení. Jako motivační prvek by proto neměla být částečná ztráta ohodnocení (např. ztráta bonusů apod). Pro zajištění efektivního průběhu kroků, které ovlivňují operátoři je kromě pozitivní motivace nutné zajistit, aby zaměstnanec rozuměl významu a přínosu prováděného kroku. Ve výrobě, ve které zaměstnanec provádí opakovaně jeden dílčí krok, může snadno dojít k oddělení významu činnosti od celku. Proto je vhodné zařadit mezi standardní školení zaměstnanců i školení informující zaměstnance o významu kroků, které vedou k minimalizaci

kontaminací v dílech, které umožňují vznik bezpečných a spolehlivých tlumičům a v konečném důsledku možnost bezpečného transportu lidí.

## 8 Návrh zlepšení kontroly kvality ve firmě KMCZ

### 8.1 Extrakce

Na základě rešerše normy ISO 16232:2018 je doporučeno změnit způsob extrakce kontaminací na tlakové oplachování. Touto extrakcí bude možné zajistit objektivní výsledky kontroly přítomnosti kontaminací, které budou výrazně méně zatíženy chybami souvisejícími s nepozorností, případně výsledky extrakce nebudou závislé na laboratorní obsluze. V současnosti k extrakci obvykle nedochází a vizuální analýza kontaminace probíhá pouze u kontaminací, které byly okem laboranta objeveny. Jediná forma extrakce, která probíhá, je s využitím tlakové lahve při inspekci kontaminací v kapalině tlumiče. Množství nalezených částic v případě, kdy nedochází k systematické extrakci, mohou být nicméně silně závislé na konkrétním laborantovi, který vyhodnocování součástí provádí, a také na pořadí dílu, který je analyzován – schopnost rozlišit přítomnost kontaminace může s počtem provedených analýz v čase klesat spolu s klesající pozorností a narůstající únavou laboranta.

### 8.2 Měření rozměrů

Aktuální měření rozměrů kontaminací je prováděno pomocí softwarového rozhraní světelného mikroskopu. Laboranti provádí měření největšího rozměru částice pomocí manuálního stanovení dvou bodů na pozorované částici. Tímto způsobem měření nevznikají porovnatelné výsledky. Vhodnější způsob je užití maximálního a minimálního Feretova průměru pro stanovení délky a šířky částice. Oba rozměry jsou v případě rizikového faktoru kontaminace relevantní. Světelný mikroskop Keyence, který je ve firmě k dispozici ve svém softwarovém rozhraní umožňuje automatické provedení změření částice pomocí maximálního i minimálního Feretova průměru, případně i pomocí Feretova průměru, pokud by tento druh měření byl v určitých případech relevantní.


### 8.3 Dokumentace kontroly kvality

Pro systematické dlouhodobé sledování a zlepšování kvality v oblasti kontaminací ve výrobě je vhodné stanovit jednotnou dokumentaci pro provádění inspekce. Inspekce je ve firmě KMCZ aktuálně nejčastěji prováděna v případě vyřazených dílů. Metodiku je nicméně možné využít i pro potřeby preventivní kontroly náhodným výběrem dílů, které při kontrole odezvy sil vyšly jako vyhovující. Dokumentace může být využívána v tištěné podobě, anebo může být vhodnější využívání elektronické podoby, kde zaměstnanec jednoduše zadá nastavené parametry a výsledky analýzy budou ihned k dispozici na firemním serveru. Dokumentovat je třeba především postup prováděné inspekce a výsledky inspekce. Seznam konkrétních informací, které je do jednotné dokumentace vhodné uvádět spolu s návrhem těchto dokumentů, je uvedeno v kapitolách 8.3.1a 8.3.2.

### 8.3.1 Inspekční specifikace

Informace o postupu a parametrech prováděné inspekce je možné vyplňovat do inspekční specifikace, kterou je možné vidět v Tab. 9.

Tab. 9: Inspekční specifikace – návrh dokumentu pro kontrolu kontaminací v KMCZ

		Datum analýzy		
		Zpráva č.		
<b>Obecné informace</b>				
Test prováděn v rámci: <input type="checkbox"/> Rutinní inspekce <input type="checkbox"/> Kvalifikační test <input type="checkbox"/> Opakovaná inspekce				
Důvod testu: <input type="checkbox"/> Vstupní hodnocení <input type="checkbox"/> Kontrola procesu <input type="checkbox"/> Modifikace <input type="checkbox"/> .....				
<b>Informace o testovaném dílu</b>				
Popis	.....	Stav dílu na začátku inspekce	.....	Foto dílu
Číslo dílu	.....	Velikost testovací dávky	.....	
Výrobní dávka	.....	Kontrolované povrchy:	.....	
Datum vyjmutí dílu pro analýzu	.....	Plocha	.....	
		Objem	.....	
<b>Informace o přípravných krocích</b>				
<input type="checkbox"/> Žádné <input type="checkbox"/> Izolace kontrolovaných povrchů (např. zavření otvorů) <input type="checkbox"/> Demontáž <input type="checkbox"/> Předčištění kontaminovaných povrchů, které nejsou relevantní pro inspekci <input type="checkbox"/> Demagnetizace <input type="checkbox"/> .....				
<b>Extrakce</b>				
Testovací prostředí: <input type="checkbox"/> Nedefinováno <input type="checkbox"/> Třída čistoty (norma/třída): .....				
Extrakční metoda: <input type="checkbox"/> Tlakové oplachování <input type="checkbox"/> Vnitřní oplachování <input type="checkbox"/> Prouděním vzduchu				
<input type="checkbox"/> Proudem vzduchu pomocí trysky <input type="checkbox"/> Agitace <input type="checkbox"/> Ultrazvukové				


Tlakové oplachování	
Kontrolovaný povrch č. 1	Kontrolovaný povrch č. 2
Extrakční zařízení: výrobce .....	Extrakční zařízení: výrobce .....
Extrakční zařízení: model .....	Extrakční zařízení: model .....
Trysky: výrobce .....	Trysky: výrobce .....
Druh trysky: <input type="checkbox"/> s kruhovým průřezem <input type="checkbox"/> paralelní tryska <input type="checkbox"/> plochá tryska	Druh trysky: <input type="checkbox"/> s kruhovým průřezem <input type="checkbox"/> paralelní tryska <input type="checkbox"/> plochá tryska
Rozměry trysky .....	Rozměry trysky .....
Testovací kapalina <input type="checkbox"/> rozpouštědlo <input type="checkbox"/> neutrální čistič <input type="checkbox"/> jiné .....	Testovací kapalina <input type="checkbox"/> rozpouštědlo <input type="checkbox"/> neutr. čistič <input type="checkbox"/> jiné .....
Průtokový objem ..... l/min	Průtokový objem.....l/min
Objem kapaliny ..... l	Objem kapaliny ..... l
Čas extrakce ..... min	Čas extrakce ..... min
Úhel (díl:tryska) .....°	Úhel (díl:tryska) .....°
Vzdálenost (díl:tryska) ..... mm	Vzdálenost (díl:tryska) ..... mm
Rychlost pohybu trysky ..... mm/s	Rychlost pohybu trysky ..... mm/s
Filtrace	
Filtr	Sušení
Výrobce .....	Zařízení .....
Typ .....	Teplota .....
Materiál filtru .....	Čas .....
Průměr .....	
Světelná optická analýza	
Výrobce .....	
Model .....	
Měřítka/zvětšení .....	
Jas .....	

### 8.3.2 Výsledky inspekce

Způsob dokumentace výsledků závisí na cílech měření. Možným cílem měření může být získání statistických údajů o velikosti částic na kontrolovaných površích. Množství částic je možné vztahovat ke konkrétnímu kontrolovanému povrchu nebo např. k počtu součástí, které byly současně kontrolovány a ze kterých nalezené kontaminace pocházejí.

Alternativou by mohlo být rozdělení částic dle základních materiálových skupin, které je možné ve firmě rozlišit pouze na základě vizuální analýzy (mosaz, plast, lepidlo, jiné kovy). Kategorie, které v Tab. 10 reprezentují velikostní třídy, by pak reprezentovaly konkrétní materiálové skupiny.

Tab. 10: Výsledky inspekce

		Datum inspekce								
		Zpráva č.								
Výsledky inspekce										
Distribuce velikosti částic dle kategorií										
Délka, Feret <sub>max</sub> [μm]		Počet částic na 1000 cm <sup>2</sup>								
		B	C	D	E	F	G	H		
		25	50	100	150	200	400	600		
		≤ X ≤	≤ X ≤	≤ X ≤	≤ X ≤	≤ X ≤	≤ X ≤	≤ X ≤		
		50	100	150	200	400	600	1000		
Kategorie	Všechny částice kromě vláken									
	Kovově lesklé částice									
	Vlákna									
Obrázky										
Největší částice			Největší kovově lesklá částice			Nejdelší vlákno		Foto celého filtru		

## Závěr

Kontaminace ve vyráběných tlumičích tvoří významnou skupinu příčin, které vedou ke vzniku nevyhovujících dílů, jež jsou následně buď vyřazeny na výstupní kontrole a tvoří ztráty vlivem interní zmetkovitosti nebo jsou dodány zákazníkovi, kdy nesplní požadovanou životnost či výkon. Cílem práce bylo provést rešerši norem v oblasti řízení kontaminací v automobilovém průmyslu a na základě jejich výstupů analyzovat místa vzniku kontaminací ve firmě KMCZ a navrhnout zlepšení v oblasti interních systémů řízení kontaminací včetně interního nástroje mapy kontaminací.

Firma provádí přiřazování nalezených kontaminací k pravděpodobnému zdroji na základě vizuální analýzy. Na základě interních statistických údajů o přiřazení kontaminací k daným potenciálním zdrojům bylo vyhodnoceno, že nejvýznamnější oblastí jsou trubkové obráběcí linky. V této oblasti výroby bylo stanoveno 13 stanovišť, kde byly odebrány vzorky kontaminací. Dále bylo získáno 15 vzorků kontaminací z vyřazených nevyhovujících tlumičů. Všechny vzorky byly analyzovány ve světelném mikroskopu a na základě doporučení normy bylo přistoupeno k jejich chemické analýze pomocí ručního fluorescenčního mikroskopu.

Výsledky analýzy ukázaly, že vlivem kombinace firmou využívaných materiálů a velikostí nacházených kontaminací není vhodné zařazovat chemickou analýzu do pravidelné kontroly kontaminací zejména pro nedostatečnou vypovídající hodnotu výsledků v porovnání s vysokými náklady na analýzu. Za využití analýzy vzorků byla provedena aktualizace interně využívaného nástroje – kontaminační mapy v oblasti trubkových linek a bylo provedeno doporučení na její zlepšení změnou způsobu měření kontaminací při vizuální analýze.

Na základě interně získaných informací byla provedena analýza kontaminační problematiky ve firmě za pomoci Ishikawova diagramu, metody 5 Proč, PDPC diagramu a stromu poruchových stavů. Výsledky analýzy vedly k doporučení provést změny v oblasti mycích procesů, zajišťování čistoty na výrobních linkách a v jejím okolí a oblečení zaměstnanců. Dále bylo doporučeno v návaznosti na normu ISO 16232:2018 změnit metodiku extrakce kontaminací na kapalnou extrakci tryskou, která umožní přesnější a lepší porovnatelnost získávaných výsledků. Dále bylo doporučeno zavedení dokumentace parametrů analýzy kontaminací a jejich výsledků, které spolu se změnou extrakce mohou vést k dlouhodobě porovnatelným výsledkům analýz.

Cíle práce byly splněny.

## Citovaná literatura

- [1] Worldwide Auto Warranty Expenses. *Waranty Week* [online]. 2021 [cit. 2022-04-17]. ISSN 1550-9214. Dostupné z: <https://www.warrantyweek.com/archive/ww20210902.html>
- [2] LEE, Jin W. Chapter 1 - Supersonic Nano-Particle beam Technique for Removing nano-Sized Contaminant Particles from Surface. In: KOHLI, Rajiv a MITTAL, Kashmiri, ed. *Developments in Surface Contamination and Cleaning: Methods of Cleaning and Cleanliness Verification*. 1st Edition. USA: Elsevier, 2013, s. 2-4. ISBN 9781437778793.
- [3] *ISO 16232:2018: Road vehicles - Cleanliness of components and systems*. First Edition. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2018.
- [4] WELKER, Roger W. Chapter 1 - Basics and Sampling of Particles for Size Analysis and Identification. In: KOHLI, Rajiv a MITTAL, Kashmiri, ed. *Developments in Surface Contamination and Cleaning Developments - Vol 4: Detection, Characterization, and Analysis of Contaminants* [online]. Oxford: William Andrew Publishing, 2012, s. 1-80 [cit. 2022-03-14]. ISBN 9781437778830. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781437778830000018>
- [5] CHAKRABORTY, Subrata a BASEMAN, Hal. Contamination Control Strategies: A Path for Quality & Safety. In: *Parental Drug Association: Connecting People, Science and Regulation* [online]. [cit. 2022-08-16]. Dostupné z: <https://www.pda.org/pda-letter-portal/home/full-article/contamination-control-strategies-a-path-for-quality-safety>
- [6] Particulate Contamination Analysis: Particulate contamination analysis by microscopy and spectroscopy techniques to identify and mitigate contamination in chemical, industry or consumer products or processes. In: *Intertek* [online]. [cit. 2022-08-14]. Dostupné z: <https://www.intertek.com/chemicals/contamination/particulate-analysis/>
- [7] Five hidden sources of contamination in the cleanroom. In: *Cleanroom Technology* [online]. London: HPCi Media Limited, 2022 [cit. 2022-08-14]. Dostupné z: [https://www.cleanroomtechnology.com/news/article\\_page/Five\\_hidden\\_sources\\_of\\_contamination\\_in\\_the\\_cleanroom/201272](https://www.cleanroomtechnology.com/news/article_page/Five_hidden_sources_of_contamination_in_the_cleanroom/201272)
- [8] DEROSE, James, SCHEFFLER, Kay , KARTASCHEW, Konstantin a BARBERO, David R. Keeping Particulate Contamination Under Control in Pharmaceutical Products: Fast Visual and Chemical Analysis of Particles with Laser Spectroscopy. In: *Leica Microsystems* [online]. 2022 [cit. 2022-08-16]. Dostupné z: <https://www.leica-microsystems.com/keeping-particulate-contamination-under-control-in-pharmaceutical-products>
- [9] ZAPOROZEC, Alexander, CONRAD, Julian E. a HIRATA, Ricardo. *Groundwater contamination inventory: a methodological guide*. UNESCO, 2002. Dostupné také z:



[https://unesdoc.unesco.org/in/documentViewer.xhtml?v=2.1.196&id=p::usmarcdef\\_0000132503&file=/in/rest/annotationSVC/DownloadWatermarkedAttachment/attach\\_import\\_e782973e-3e5e-4496-ab07-2c8e44871ba7%3F\\_%3D132503eng.pdf&locale=en&multi=true&ark=/ark:/48223/pf0000132503/PDF/132503eng.pdf#%5B%7B%22num%22%3A409%2C%22gen%22%3A0%7D%2C%7B%22name%22%3A%22XYZ%22%7D%2C60%2C591%2C0%5D](https://unesdoc.unesco.org/in/documentViewer.xhtml?v=2.1.196&id=p::usmarcdef_0000132503&file=/in/rest/annotationSVC/DownloadWatermarkedAttachment/attach_import_e782973e-3e5e-4496-ab07-2c8e44871ba7%3F_%3D132503eng.pdf&locale=en&multi=true&ark=/ark:/48223/pf0000132503/PDF/132503eng.pdf#%5B%7B%22num%22%3A409%2C%22gen%22%3A0%7D%2C%7B%22name%22%3A%22XYZ%22%7D%2C60%2C591%2C0%5D)

- [10] VAN DER DONCK, Jacques C.J. Chapter 2 - Contamination Control: A Systems Approach. In: KOHLI, Rajiv a MITTAL, Kashmiri, ed. *Developments in Surface Contamination and Cleaning Developments - Vol 2: Particle Deposition, Control and Removal* [online]. 1st edition. Oxford: William Andrew Publishing, 2001, s. 57-80 [cit. 2022-03-16]. ISBN 9781437778304. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/B9781437778304100027>
- [11] Understanding technical cleanliness: importance, assessment, maintenance. *Combustion Engines: Polish Scientific Society of Combustion Engines* [online]. 2021, **186**(3), 41-50 [cit. 2022-08-16]. ISSN 2300-9896. Dostupné z: doi:10.19206/CE-140531
- [12] LIU, De-Ling. Particle Deposition onto Enclosure Surfaces. In: KOHLI, Rajiv a Kashmir MITTAL. *Developments in Surface Contamination and Cleaning: Particle Deposition, Control and Removal*. USA: William Andrew Publication, 2010, s. 1-56. ISBN 9781437778304.
- [13] SCHULTZ, Doris. VDA 19 AND ITS IMPACT on European Manufacturing and Cleaning. *Products Finishing* [online]. 2013, **78**(1), 74-77 [cit. 2022-08-16]. Dostupné z: <https://www-proquest-com.ezproxy.techlib.cz/docview/1466280408?pq-origsite=summon>
- [14] MORENO, Luis, CABÁS, Ramiro a FERNÁNDEZ, Diego. Low mass dust wiper technology for MSL rover. *Proc. 9th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation* [online]. Noordwijk, Netherlands: ESTEC, 2006 [cit. 2022-06-26]. Dostupné z: <http://robotics.estec.esa.int/ASTRA/Astra2006/Papers/ASTRA2006-1.3.2.02.pdf>
- [15] DALE, Barrie G., ed. *Managing Quality*. 4th ed. Blackwell Publishing Ltd, 2003. ISBN 978-0-631-23614-6.
- [16] BERDINSKIKH, Tatiana, TKALEC, Heather a ZHANG, Frank (Yi). Keeping it clean: A cleanliness specification for single-mode connectors. *Connector Specifier* [online]. Tulsa, USA: International Electronics Manufacturing Initiative Inc, 2005, **21**(8), 8-10 [cit. 2022-08-17]. ISSN 10781528. Dostupné z: <http://ezproxy.techlib.cz/login?url=https://www-proquest-com.ezproxy.techlib.cz/magazines/keeping-clean-cleanliness-specification-single/docview/223769113/se-2?accountid=119841>
- [17] ZWOLIŃSKA, Bożena a KUBICA, Łukasz. Model of designating the critical damages: Part 1: Description and analysis of the production system. *Journal of KONBiN* [online]. 2017,

- 42(1), 329-352 [cit. 2022-08-17]. ISSN 2083-4608. Dostupné z: doi:10.1515/jok-2017-0032
- [18] SCHULZ, Doris. Measuring Technical Cleanliness According to VDA 19. *Production Machining* [online]. Cincinnati: Gardner Business Media, Inc., 2016, **16**(5), 52 [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: <https://www-proquest-com.ezproxy.techlib.cz/docview/1789363272/fulltextPDF/DDE941E4F70940F4PQ/1?accountid=119841>
- [19] LANG, Ben. Properly Following Cleaning Protocols. *Products Finishing* [online]. Cincinnati: Gardner Business Media Inc., 2017, **82**(2), 26-29 [cit. 2022-08-15]. ISSN 00329940. Dostupné z: <https://www.proquest.com/docview/1962086435?accountid=119841&parentSessionId=p9L65n3RJW5cwBLOrZW9WfKuLijGQIMeUzvMrRYb2t%3D&pq-origsite=summon&forcedol=true>
- [20] EGGES, Joanne, DEVAUD, Genevieve, ROCKWELL, Christina, MATHESON, Bruce STRAKA, Sharon, CAROSSO, Nancy a EGGES, Joanne. Comparison of particle sampling results from tape lifts and solvent rinses. *Optical System Contamination: Effects, Measurements, and Control 2012* [online]. San Diego, California, United States: SPIE Press, 2012, (8492), 130-141 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: doi:10.1117/12.932461
- [21] SUMMONS, R.E., SESSIONS, Alex., ALLWOOD, Abigail, BARTON, Hazel, et al. Planning Considerations Related to the Organic Contamination of Martian Samples and Implications for the Mars 2020 Rover. *Astrobiology* [online]. 2014, **14**(12), 969-1027 [cit. 2022-06-24]. ISSN 1531-1074. Dostupné z: doi:10.1089/ast.2014.1244
- [22] 'Witness' Tube in Perseverance Sample Caching System. In: *NASA Mars Exploration* [online]. [cit. 2022-06-24]. Dostupné z: <https://mars.nasa.gov/resources/26053/witness-tube-in-perseverance-sample-caching-system/>
- [23] AGRICOLA, Koos. *Determination of operational quality of cleanroom by particle deposition monitoring* [online]. Zurich: ICCCS Symposium, 2012 [cit. 2022-06-24]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/311499273\\_Determination\\_of\\_operational\\_quality\\_of\\_cleanroom\\_by\\_particle\\_deposition\\_monitoring](https://www.researchgate.net/publication/311499273_Determination_of_operational_quality_of_cleanroom_by_particle_deposition_monitoring)
- [24] WITZE, Alexandra. The \$2.4-Billion Plan to Steal a Rock from Mars. In: *Scientific American* [online]. Springer Nature, 2022 [cit. 2022-06-24]. Dostupné z: <https://www.scientificamerican.com/article/the-2-4-billion-plan-to-steal-a-rock-from-mars1/>
- [25] WELKER, Roger W. Chapter 4 - Size Analysis and Identification of Particles. In: KOHLI, Rajiv a MITTAL, Kashmiri, ed. *Developements in Surface Contamination and Cleaning: Detection, Characterization and Analysis of Contaminants*. First Edition. Waltham: William Andrew Publishing, 2012, s. 179-213. ISBN 9781437778830.

- [26] DRAŽIĆ, Slobodan, SLADOJE, Nataša a LINDBLAD, Joakim. Estimation of Feret's diameter from pixel coverage representation of a shape. *Pattern Recognition Letters* [online]. 2016, **80**, 37-45 [cit. 2022-03-03]. ISSN 01678655. Dostupné z: doi:10.1016/j.patrec.2016.04.021
- [27] SEM-EDX ANALYSIS: Simultaneous Microscopic Examination & Elemental Analysis. In: *RJL Micro & Analytic: Analysen & Instrumente aus einer Hand* [online]. c1998-2022 [cit. 2022-06-25]. Dostupné z: <https://www.rjl-microanalytic.de/en/analysenservice-mit-iso-17025-akkreditierung/sem-edx-analytik-von-strukturen-und-werkstoffen/>
- [28] Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS). In: *Teledyne Princeton Instruments* [online]. 2022 [cit. 2022-06-25]. Dostupné z: <https://www.princetoninstruments.com/learn/laser-induced-breakdown-spectroscopy>
- [29] MARKIEWICZ-KESZYCKA, Maria, CAMA-MONCUNILL, Xavier, CASADO-GAVALDA, Maria, DIXIT, et al. *Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) for food analysis: A review* [online]. 2017, **65**, 80-93 [cit. 2022-06-25]. ISSN 09242244. Dostupné z: doi:10.1016/j.tifs.2017.05.005
- [30] STEFANIUK, Damian, TANKIEWICZ, Matylda a STRÓŻYK, Joanna. X-Ray Microtomography ( $\mu$ CT) as a Useful Tool for Visualization and Interpretation of Shear Strength Test Results. *Studia Geotechnica et Mechanica* [online]. 2015, **36**(4), 47-55 [cit. 2022-06-25]. ISSN 2083-831X. Dostupné z: doi:10.2478/sgem-2014-0035
- [31] BENTLEY, Michael, ORTIZ, Maria, RITMAN, Erik, ROMERO, Carlos. The use of microcomputed tomography to study microvasculature in small rodents. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* [online]. 2002, **282**(5), 1267-1279 [cit. 2022-06-25]. ISSN 0363-6119. Dostupné z: doi:10.1152/ajpregu.00560.2001
- [32] VEGT, Niko, VISCH, Valentijn, VERMEEREN, Arnold a DE RIDDER, Huib. A Case Study on Gamified Interventions for Team Cohesion in Factory Work. *Human Technology* [online]. Centre of Sociological Research, Szczecin, Poland, 2018, **14**(2), 176-208 [cit. 2022-06-18]. ISSN 17956889. Dostupné z: doi:10.17011/ht/urn.201808103816
- [33] KORN, Oliver, FUNK, Markus a SCHMIDT, Albert. Design approaches for the gamification of production environments: a study focusing on acceptance. *PETRA: Pervasive Technologies Related to Assistive Environments* [online]. New York: Association for Computing Machinery, 2015, 1-7 [cit. 2022-06-18]. Dostupné z: <https://dl-acm-org.ezproxy.techlib.cz/doi/10.1145/2769493.2769549>
- [34] WARMELINK, Harald, KOIVISTO, Jonna, MAYER, Igor, et al. Gamification of production and logistics operations: Status quo and future directions. *Journal of Business Research* [online]. 2020, **106**, 331-340 [cit. 2022-06-18]. ISSN 01482963. Dostupné z: doi:10.1016/j.jbusres.2018.09.011

- [35] O nás. In: *KYB Manufacturing Czech s.r.o.* [online]. [cit. 2022-07-01]. Dostupné z: <https://www.kmcz.cz/o-nas.html>
- [36] Něco o KYB. In: *KYB Česká republika* [online]. 2022 [cit. 2022-08-12]. Dostupné z: <https://kyb-europe.com/ceska-republika/neco-o-kyb/>
- [37] Tlumiče pérování – Premium. In: *KYB Česká republika* [online]. 2022 [cit. 2022-08-12]. Dostupné z: <https://kyb-europe.com/ceska-republika/produkty/tlumice-perovani/premium/>
- [38] KYB MANUFACTURING, S.R.O. *Interní dokument: Podíl ztrát vlivem interně nalezených závad*. Pardubice, 2022.
- [39] Vanta Family X-Ray Fluorescence Analyzer. In: *Vanta Family X-Ray Fluorescence Analyzer* [online]. USA: Olympus Scientific Solutions Americas, 2021, s. 33 [cit. 2022-06-05]. Dostupné z: [https://www.olympus-ims.com/en/.downloads/download/?file=285216220&fl=en\\_US&inline](https://www.olympus-ims.com/en/.downloads/download/?file=285216220&fl=en_US&inline)
- [40] ČSN EN 10305-1 *Ocelové trubky pro přesné použití: technické dodací podmínky. Část 1: Bezešvé trubky tažené za studena = Steel tubes for precision applications - Technical delivery conditions - Part 1: Seamless cold drawn tubes*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [41] ČSN EN 10025-2 *Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí: Část 2: Technické dodací podmínky pro nelegované konstrukční oceli*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [42] ČSN EN 10305-3 *Ocelové trubky pro přesné použití - Technické dodací podmínky: Část 3: Svařované trubky kalibrované za studena*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [43] ČSN EN 10149-2 *Ploché výrobky válcované za tepla z ocelí s vyšší mezí kluzu pro tváření za studena: Část 2: Technické dodací podmínky pro termomechanicky válcované oceli*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [44] *Inspekční certifikát 3.1 EN 10204*. ArcelorMittal Tubular Products Zalain, S.L.U., 2022.
- [45] *Inspekční certifikát 3.1, EN 10204:2004: 2022/05/010788-STO*. Třinecké železářny, a.s., 2022.
- [46] *Inspekční certifikát 3.1, EN 10204:2004*. Třinecké železářny, a.s., 2022.
- [47] *Inspekční certifikát 3.1, EN 10204:2004: 2022/05/010790-STO*. Třinecké železářny, a.s., 2022.
- [48] KOLARIK, William J. *Creating Quality: Process Design for Results*. USA: WCB/McGraw-Hill, 1999. ISBN 0-07-036309-9.

[49] HOLUB, Rudolf a VINTR, Zdeněk. *Spolehlivost letadlové techniky* [online]. Brno, 2001 [cit. 2022-07-01]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/7152741-Spolehlivost-letadlove-techniky.html>

## Seznam obrázků

Obr. 1 Hliníková částicová kontaminace z víčka nádoby [8] .....	12
Obr. 2: Paretův diagram – zdroje kontaminací, přepracováno dle [4] .....	14
Obr. 3: Koláčový diagram – rozdělení kontaminací dle fáze, upraveno dle [4] .....	14
Obr. 4: koláčový diagram – rozdělení kontaminací dle fáze, upraveno dle [4].....	14
Obr. 5: Snímek solárních panelů na Mars Exploration před začátkem operace (vlevo) a po 4 letech v provozu (vpravo) [10].....	16
Obr. 6: Schéma řetězce kroků vedoucích ke kontaminaci na dílu, přepracováno dle [10].....	19
Obr. 7 Proces výběru extrakční metody, tzv. Sinnerův kruh, přepracováno dle [3] .....	24
Obr. 8 Schéma částicové kontaminace, přepracováno dle [3] .....	24
Obr. 9: Ukázka klesající zkoušky [3] .....	25
Obr. 10: Ukázka trysek pro tlakové oplachování, přepracováno dle [3] .....	28
Obr. 11: Ukázka využití tlakového oplachování dle vybrané plochy, přepracováno dle [3] .....	28
Obr. 12: Schéma variant uspořádání ultrazvukového extrakčního procesu, přepracováno dle [3].....	29
Obr. 13: Ukázka vnitřního oplachování, přepracováno dle [3] .....	30
Obr. 14: Ukázka využití agitačního extrakčního procesu, přepracováno dle [3].....	30
Obr. 15: Schéma dvou základních kroků při extrakci kontaminací za pomoci proudu vzduchu, přepracováno dle [3] .....	31
Obr. 16: Využití křemíkového plátu jako Witness Plate [23] .....	33
Obr. 17: Schéma nádobek na extrakci vzorků a witness tubes, které jsou součástí Preseverances Rover, přepracováno dle [24] .....	33
Obr. 18: Definice pro měření rozměrů částice za pomoci světelného mikroskopu, přepracováno dle [6] .....	35
Obr. 19: Maximální Feretův průměr (rozměr A), přepracováno dle [3] .....	36
Obr. 20: Minimální Feretův průměr (rozměr B), přepracováno dle [3] .....	36
Obr. 21: Schéma charakterizace vláken, přepracováno dle [3] .....	37
Obr. 22: Ukázka vlivu osvětlovacího režimu mikroskopu na vizualizaci částice, přepracováno dle [3] .....	40
Obr. 23 Schéma SEM/EDS analyzačního zařízení, přepracováno dle [27] .....	42
Obr. 24: Vhodné provedení SEM/EDS analýzy, přepracováno dle [3] .....	42
Obr. 25: Schéma zařízení pro LIBS analýzu, přepracováno dle [28].....	43

Obr. 26: Schéma procesu LIBS metody, přepracováno dle [29] .....	44
Obr. 27: Ukázka porovnání Ramanova spektra z databanky se spektrem měřené částice, přepracováno dle [3].....	45
Obr. 28: Schéma rentgenové mikrotomografie, přepracováno dle [30] .....	46
Obr. 29: Schéma vzájemných návazností vybraných dokumentů inspekce čistoty, přepracováno dle [4]	49
Obr. 30: Gamifikace ve výrobě [33] .....	51
Obr. 31: optimalizovaná gamifikace ve výrobě [33] .....	52
Obr. 32: dotyková obrazovka s infografikou [32] .....	53
Obr. 33: Výrobní závod firmy KMCZ v Pardubicích [35] .....	55
Obr. 34: Tlumič Premium [37] .....	56
Obr. 35: Míra ztráty vlivem závad v závislosti na čase [38] .....	58
Obr. 36: Zjednodušené schéma jedné z polo automatizovaných trubkových linek ve firmě KMCZ.....	59
Obr. 37: Diagram interně nastaveného procesu kontroly kontaminací ve firmě KMCZ.....	61
Obr. 38: Schéma základních kroků při kontrole kontaminací .....	62
Obr. 39: Rozhodovací diagram pro postup kontroly kontaminací .....	62
Obr. 40: Plná tryska kruhového průřezu pro lokalizovanou extrakci, přepracováno dle [3] .....	63
Obr. 41: Paralelní tryska pro extrahování částic z velkých ploch přepracováno dle [3] .....	63
Obr. 42: Paretův diagram – zdroje kontaminací.....	66
Obr. 43: Bedna třísek, součást vnitřní trubkové linky SA IT 6 .....	67
Obr. 44: Obráběcí proces u trubkové linky SA IT 6 .....	67
Obr. 45: Zásobník pro výstupní polotovary z linky SA IT 6.....	67
Obr. 46: Vibrační buben transport pístu linka SA IT 6.....	67
Obr. 47: Bedna po beztržiskovém dělení, součást linky SA OT 5.....	67
Obr. 48: Kotouče svařovací linka SA OT 5 .....	67
Obr. 49 Zásobník pro výstupní polotovary z linky SA 3 OUT.....	68
Obr. 50: Zásobník pro výstupní polotovary z linky ST 1 OUT .....	68
Obr. 51: Zásobník pro výstupní polotovary z linky ST 0 OUT .....	68
Obr. 52: ST 0 OUT bedna třísek po obrábění .....	68
Obr. 53: Transportní bedny.....	68
Obr. 54: Měření rozměrů kontaminace pomocí ručního výběru 2 bodů.....	69
Obr. 55: Měření kontaminace s využitím Feretova průměru .....	69
Obr. 56: Měření kontaminace s využitím maximálního a minimálního Feretova průměru.....	69
Obr. 57: Schéma spektrometru ED.XRF Vanta [39] .....	70
Obr. 58: Vzorek A.....	71

Obr. 59: Vzorek 1B .....	71
Obr. 60: Vzorek 2A .....	71
Obr. 61: Vzorek 3A .....	71
Obr. 62: Vzorek 4A .....	71
Obr. 63: Vzorek 5A .....	71
Obr. 64: Vzorek 6A .....	72
Obr. 65: Vzorek 7A .....	72
Obr. 66: Vzorek 7B .....	72
Obr. 67: Vzorek 8A .....	72
Obr. 68: Vzorek 8B .....	72
Obr. 69: Vzorek 9A .....	72
Obr. 70: Vzorek 10A .....	73
Obr. 71: Vzorek 11A .....	73
Obr. 72: Vzorek 11B .....	73
Obr. 73: Vzorek 11c .....	73
Obr. 74: Vzorek 15A .....	73
Obr. 75: Vzorek 15B .....	73
Obr. 76: Vzorek 15B1 .....	74
Obr. 77: Vzorek 15B2 .....	74
Obr. 78: Vzorek 15B3 .....	74
Obr. 79: Vzorek 17A .....	74
Obr. 80: Vzorek 18A .....	74
Obr. 81: Vzorek 19A .....	74
Obr. 82: Vzorek 19B .....	75
Obr. 83: Vzorek 20A .....	75
Obr. 84: Vzorek 20B .....	75
Obr. 85: Vzorek 20C .....	75
Obr. 86: Vzorek 21A .....	75
Obr. 87: Vzorek 22A .....	75
Obr. 88: Vzorek 23A .....	76
Obr. 89: Vzorek 23B .....	76
Obr. 90: Výřez aktuálně využívané kontaminační mapy (interní zdroj) .....	80
Obr. 91: Návrh alternativní kontaminační mapy (část 1) .....	82
Obr. 92: Návrh alternativní kontaminační mapy (část 2) .....	83

Obr. 93: Návrh části alternativní kontaminační mapy dle kontaminací z vadných dílů.....	84
Obr. 94: Ishikawův diagram pro analýzu příčin kontaminací v hotovém dílu.....	87
Obr. 95: Využití metody 5 WHY pro nalezení kořenové příčiny jednoho z dílčích vlivů na přítomnost kontaminace v hotovém výrobku .....	88
Obr. 96: Analýza kořenové příčiny .....	90
Obr. 97: PDPC diagram – kontaminace z obráběcích linek .....	92
Obr. 98: PDPC diagram – kontaminace od dodavatele součástí.....	94
Obr. 99: PDPC – Kontaminace při transportu dílů .....	95

## Seznam tabulek

Tab. 1: Porovnání vhodnosti analyzačních metod dle cílů analýzy [4] .....	47
Tab. 2: Podíl ztrát vlivem interně nalezených závad na celkových ztrátách 1. – 25. týden 2022 [38] .....	57
Tab. 3: Nalezené kontaminace a jejich přiřazení ke zdroji v rámci interních procesů KMCZ.....	64
Tab. 4: Seznam lokací zvolených pro sběr kontaminací.....	67
Tab. 5: Snímky analyzovaných vzorků spolu s chemickým složením stanoveným chemickou analýzou ...	71
Tab. 6: Seznam vstupních trubek obráběných v KMCZ a orientační chemické složení materiálů (část 1)	76
Tab. 7: Seznam vstupních trubek obráběných v KMCZ a orientační chemické složení materiálů (část 2)	77
Tab. 8: Seznam vstupních tyčí obráběných v KMCZ a orientační chemické složení materiálů .....	77
Tab. 9: Inspekční specifikace – návrh dokumentu pro kontrolu kontaminací v KMCZ .....	99
Tab. 10: Výsledky inspekce .....	101

## Seznam použitého softwaru

Microsoft Word

Microsoft Excel

Lucidchart

Sketchbook Pro