

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2022**

**VÍTEK  
HOSENSEIDL**



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

**Čištění povrchů z ekologického hlediska**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**AUTOR:** Vítek Hosenseidl

**VEDOUcí PRÁCE:** doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.

**STUDIJNÍ PROGRAM:** B 2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství

**STUDIJNÍ OBOR:** 2303R014 Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

**Praha 2022**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hosenseidl** Jméno: **Vítek** Osobní číslo: **482430**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**  
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Čištění povrchů z ekologického hlediska**

Název bakalářské práce anglicky:

**Surface cleaning from an ecological point of view**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rozbor dané problematiky na základě literární rešerše
- 2) Zhotovení a porovnání vzorků vyčištěných rozdílnými technologiemi
- 3) Vyhodnocení a diskuze výsledků
- 4) Technicko-ekonomické vyhodnocení

Seznam doporučené literatury:

- 1) KREIBICH, V., Teorie a technologie povrchových úprav, Praha, ČVUT, Praha, 1999.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

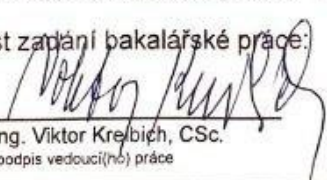
**doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc. ústav strojírenské technologie FS**

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

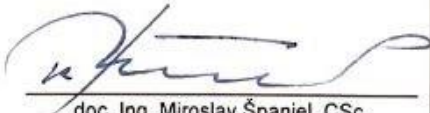
Datum zadání bakalářské práce: **21.04.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15.08.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2022**

  
doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

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


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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

10.9.2022

Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

## Prohlášení

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

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

V Praze dne: .....

.....

Podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji především panu doc. Ing. Viktoru Kreibichovi, CSc. za vedení bakalářské práce

Dále:

Panu Ing. Jiřímu Kuchařovi, Ph.D. za pomoc s vypracováním a další odborné konzultace,  
panu Zdeňku Jonákovi za možnost přístupu k UHPWJ stroji a další odborné konzultace,  
slečně Bc. Elišce Pazderkové za odbornou konzultaci vybraných chemických procesů.

## Anotace

Tato práce obsahuje přehled a rozbor problematiky různých druhů čištění povrchu s důrazem na jejich ekologii. V praktické části pak obsahuje porovnání technologií tryskání suchým ledem, vysokého tlaku vody, pyrolýzy a kartáčování z pohledu ekologie, energetické náročnosti, spotřebovaných zdrojů, drsnosti a čistoty povrchu.

<b>Název bakalářské práce:</b>	Čištění povrchů z ekologického hlediska
<b>Autor práce:</b>	Vítek Hosenseidl
<b>Vedoucí práce:</b>	doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.
<b>Konzultant:</b>	Zdenek Jonák
<b>Akademický rok:</b>	2021/22
<b>Vysoká škola:</b>	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
<b>Ústav:</b>	12133 – Ústav strojírenské technologie
<b>Vedoucí ústavu:</b>	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
<b>Rozsah práce:</b>	89 stránek, 15 tabulek, 41 obrázků
<b>Klíčová slova:</b>	ekologické čištění povrchu; tryskání vodou; tryskání suchým ledem; kartáčování; Recognoil; přehled čištění povrchu;

## Annotation

This thesis provides an overview and analysis of diverse types of surface cleaning with an emphasis on their ecology. In the practical part, it compares dry ice blasting, ultra-high-water pressure blasting and brushing technologies in terms of ecology, energy consumption, consumed resources, roughness, and surface cleanliness.

<b>Title of the final thesis:</b>	Surface cleaning from an ecological point of view
<b>Author:</b>	Vitek Hosenseidl
<b>Supervisor:</b>	doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.
<b>Consultant:</b>	Zdenek Jonák
<b>Academic year:</b>	2021/22
<b>University:</b>	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
<b>Department:</b>	12133 – Department of Manufacturing Technology
<b>Head of department:</b>	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
<b>Extent:</b>	89 pages, 15 tables, 41 pictures
<b>Keywords:</b>	environmentally friendly surface cleaning; water blasting; dry ice blasting; brushing; Reconoil; surface cleaning overview;

## Obsah

1. Úvod a cíl práce .....	14
2. Teoretická část .....	15
3. Mechanické čištění.....	16
3.1 Čistota povrchu po mechanickém čištění.....	17
3.2 Kartáčování, broušení a leštění.....	17
3.2.1 Kartáčování.....	17
3.2.2 Broušení.....	19
3.2.3 Mechanické Leštění .....	20
3.3 Tryskání.....	20
3.3.1 Mechanické tryskání.....	21
3.3.2 Pneumatické tryskání .....	22
3.3.3 Abrazivo .....	24
3.3.4 Speciální tryskací metody:.....	30
4. Chemické čištění.....	41
4.1 Odmašťování.....	41
4.2 Moření.....	42
4.3 Ekologie chemického čištění.....	42
5. Speciální metody odstraňování nečistot.....	43
5.1 Laser.....	43
5.2 Termické čištění .....	44
5.3 Čištění tlakovou vodou .....	44
5.4 Čištění vodní parou .....	45
5.5 Mikro a nano bublinky .....	45
5.6 Ultrazvuk:.....	45
6. Praktická část.....	47



6.1	Měřicí zařízení.....	47
6.1.1	Recognoil 2W.....	47
6.1.2	Drsnoměr Mitutoyo SJ 301 s detektorem 178-392.....	48
6.2	Strojní zařízení.....	49
6.2.1	Tryskací stroj na suchý led IB7/40 Advance .....	49
6.2.2	Stroj pro tryskání ultravysokotlakou vodou Ecomaster MK3.....	49
6.2.3	Rotační šroubovák PNS 300 A1. ....	49
6.2.4	Teoretický model pyrolýzní pece.....	50
6.3	První měření.....	51
6.3.1	Vzorek 1 .....	51
6.3.2	Vzorek 2 a 3 .....	52
6.4	Druhé měření.....	52
6.4.1	Vzorky 4, 5 a 6.....	52
6.5	Třetí měření .....	53
6.5.1	Vzorek 7 .....	54
6.5.2	Vzorek 8 .....	54
7.	Výsledky a diskuse.....	55
7.1	Výsledky prvního měření .....	55
7.1.1	Výsledky čištění 1. vzorku.....	55
7.1.2	Výsledky čištění 2. vzorku.....	58
7.1.3	Výsledky čištění 3. vzorku.....	61
7.2	Výsledky druhého měření.....	65
7.3	Výsledky třetího měření.....	69
7.3.1	Výsledky čištění 7. vzorku.....	69
7.3.2	Výsledky čištění 8. vzorku.....	70
8.	Závěr.....	72

Bibliografie.....	74
Seznam obrázků.....	85
Seznam tabulek .....	88
Seznam rovnic.....	89

## Seznam zkratek

°C	teplota v celsíích, jednotka
2D	dvoudimenzionální
3D	trojdimenzionální
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	oxid hlinitý
Ca(OH) <sub>2</sub>	hydroxid vápenatý
CaCl <sub>2</sub>	chlorid vápenatý
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý
ČR	Česká republika
DDP	pumpa s přímým pohonem
EHP	Evropský hospodářský prostor
EU	Evropská unie
F.U.	fluorescenční jednotka
GB	značení tvrdosti ocelového tryskacího média dle SAE J444
GH	značení tvrdosti ocelového tryskacího média dle SAE J445
GL	značení tvrdosti ocelového tryskacího média dle SAE J446
GP	značení tvrdosti ocelového tryskacího média dle SAE J447
H <sub>2</sub> O	voda
hod	hodina
HPWC	vysohtlaké čištění vodou
HPWJ	vysohtlaké tryskání vodou
HRC	zkouška tvrdosti podle Rockwella pomocí diamantového kužele při zatěžování silou 1471 N
IP	intenzifikační pumpa
Kč	koruna česká
kg	kilogram, jednotka
ks	kus
kW	kilowatt, jednotka
kWh	kilowatthodina, jednotka
l	litr, jednotka
laser	zesílení světla stimulovanou emisí záření
LPWC	nízkotlaké čištění vodou
m <sup>2</sup>	metr čtvereční, jednotka
m <sup>3</sup>	metr krychlový, jednotka
min	minuta, jednotka
Mm <sup>2</sup>	milimetr čtvereční, jednotka
MPa	megapascal, jednotka
NaCl	chlorid sodný
NaHCO	uhličitan sodný
NH <sub>4</sub>	amoniak
NH <sub>4</sub> Cl	chlorid amonný
PCB	deska s plošnými spoji
psi	libra síly na čtverečný palec, jednotka
psig	psi – aktuální atmosférický tlak, jednotka
R2W	přístroj Recognoil 2W pro měření znečištění

Ra	aritmetická střední odchylka obrysu povrchu
Rz	průměr z pěti nejnižších a pěti nejvyšších bodů měření drsnosti povrchu
TiO <sub>2</sub>	oxid titaničitý
UHPWJ	ultravysokotlaké tryskání vodou
USA	Spojené státy americké
UV	ultrafialové
WC	čištění vodou
WJ	tryskání vodou
ZrO <sub>2</sub>	oxid zirkoničitý

## Seznam použité symboliky

$\alpha$	[°]	úhel
$\lambda_c$	[mm]	vyhodnocovací délka
$A$	[W]	čistící práce
$E_k$	[J]	kinetická energie
$F$	[N]	síla nástroje
$m$	[kg]	hmotnost
$r$	[-]	elementárním posunutí
$S$	[m <sup>2</sup> ]	plocha
$v$	[m/s]	rychlost

# 1. Úvod a cíl práce

V této práci se věnuji různým metodám čištění povrchů a provádím hodnocení jejich vlivu na životní prostředí.

V úvodu této práce jsem provedl obsáhlou literární rešerši technologií povrchových úprav. Práce obsahuje detailní rozbor daných čistících technologií, které jsou rozděleny do tří hlavních kategorií: mechanické čištění, chemické čištění a speciální čistící metody. U daných technologií jsem hodnotil vhodnost využití a dopady na životní prostředí.

V praktické části jsem se zaměřil na čištění konkrétních vzorků rozdílných materiálů různými technologiemi, mezi které patřilo tryskání ultravysokotlakým paprskem vody, tryskání suchým ledem, kartáčování ocelovým kartáčovým kotoučem, tryskání sekaným ocelovým drátem a teoretický model pyrolýzy.

Naměřená data jsem zpracoval a následně provedl hodnocení efektivity jednotlivých čistících metod. Na závěr jsem provedl technicko-ekonomické vyhodnocení a rozbor testovaných čistících metod z pohledu ekologie.

## 2. Teoretická část

Čištění povrchů je proces, při kterém se z čištěného povrchu odstraňují nečistoty, nedokonalosti, škodliviny a vady. Cílem čištění povrchů je odstranění nečistot z povrchů výrobků, abychom mohli provádět další úpravy materiálu pro zlepšení jeho vlastností, životnosti a vzhledu. K povrchovému čištění může mít výrobce různé důvody, mezi nejčastější patří odstraňování mastnoty z výrobního materiálu, odstraňování nečistot z výrobních zařízení či odstraňování starých povrchových úprav z povrchu. Nečistoty můžeme u kovů rozdělit na dva základní druhy, a to nečistoty vlastní – především oxidické vrstvy, které vznikají reakcí kovů s daným prostředím (nejčastěji atmosféra) a cizí nečistoty, jako jsou třeba prachové částice, oleje a další látky, které na povrchu ulpívají, avšak s ním nereagují za vzniku oxidických vrstev. Odstranění nečistot je důležité pro celou řadu technologií. Materiál je často znečištěn již při jeho produkci, nečistoty pak mohou v dalších zpracovatelských procesech vadit. Při výrobě se většinou jedná o nečistoty z oleje nebo mikrokorozní vrstvy.

Povrchové čištění se dělí na několik kategorií podle typu základního fyzického principu, který je hlavním čistícím prvkem v daném procesu.

Typicky se tedy dělí na:

- mechanické
- chemické
- speciální

### 3. Mechanické čištění

Mechanické čištění je čištění, které využívá ve svůj prospěch mechaniky. Mechanika je věda zabývající se mimo jiné polohou, rychlostí, zrychlením, silou, energií a hybností těles v čase a v prostoru. Mechanické způsoby čištění většinou používají mechanicky vytvořené práce k čištění a odstranění nežádoucích látek. Práci můžeme dělit na plošnou a lokální. Plošná práce využívá jednoho nástroje k postupnému odstranění nečistot z celé čištěné plochy. Lokální práce probíhá pouze na malé oblasti. Lokální práci většinou konají sypké abrazivní směsi, ve kterých je nepočítatelně „nástrojů“, které povrch čistí lokálně. Nestane se tedy, že by jeden nástroj sám o sobě, očistil větší plochu, než je plocha jeho vlastní.

Obecně tedy pro čistící práci  $A$  (W) platí, že vyjadřuje účinek síly nástroje  $F$  (N) na plochu  $S$  (m<sup>2</sup>).

[1] Vzorec můžeme dále upravit pro oba druhy čištění.

Pro čištění lokální plochy bude platit že: „Elementární práce  $dA$  vykonaná silou  $\mathbf{F}$  při elementárním posunutí  $d\mathbf{r}$  jejího působiště je určena skalárním součinem vektorů síly  $\mathbf{F}$  a elementárního posunutí  $d\mathbf{r}$  působiště síly.

$$dA = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = F \cdot ds \cdot \cos \alpha$$

*Rovnice 1 – čistící práce*

kde  $ds = |d\mathbf{r}|$  je délka elementárního posunutí a  $\alpha$  je úhel, který svírají vektory  $\mathbf{F}$  a  $d\mathbf{r}$ .“ [1]

Pro interpretaci na konkrétní technologii vzorec musíme dále upravit podle sil, které na plochu působí, typů nástrojů, jejich záběru, kinematice a natočení vůči gravitačnímu poli.

Lokální práce je většinou tvořena dopadovou silou daného nástroje (většinou abraziva), kterou můžeme při zanedbání odporu vzduchu vypočítat stejně jako součin kinetické energie spolu s plochou nástroje. „Kinetická energie hmotného bodu  $E_k$  o hmotnosti  $m$ , který se pohybuje rychlostí o velikosti  $v$  je definována následujícím vztahem.

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad [1]$$

*Rovnice 2 – kinetická energie*

Jejich kinetická energie je v některých případech natolik velká, že způsobuje mimo odstranění povrchových vrstev a dle materiálu i k lokální tváření povrchu vedoucí k jeho vytvrzení či k případné mírné povrchové deformaci.

Problém silových účinků abraziva na plochu je, že jednotlivá zrna nemají stejnou hmotnost a velikost, současně může zrno do plochy narážet pod různými úhly. Z těchto důvodů nedochází ke stejnoměrnému čistícímu efektu.



Principem mechanického čištění tedy je narušení nečistot na povrchu a její odstranění pomocí síly, která na materiál působí. Při něm dochází i k hrubšímu narušení, ovlivnění nebo deformaci povrchu.

Mezi základní technologie mechanického odstraňování nečistot patří:

- kartáčování, broušení a leštění
- tryskání
- omílání

a další méně známé technologie. Níže uvedu jednotlivé nejznámější mechanické technologie

### **3.1 Čistota povrchu po mechanickém čištění**

Problémem u mechanického čištění je především nemožnost, případně složitost, odstraňování mastnoty. Oxidické vrstvy jsou mechanicky jednoduše odstranitelné. Po mechanickém čištění může být povrch materiálu znečištěn neviditelnými kontaminanty a začíná se na něm objevovat blesková koroze.

*Blesková koroze:* Je to lehká oxidace vyčištěného kovového povrchu, která se na něm běžně objevuje po tryskání i dalších operacích. Blesková koroze se na materiálu začíná objevovat v rámci minut po jeho čištění. Je převážně neškodná, ale pokud necháme očištěnou plochu bez dalších úprav po několik dní, může způsobit objevení se dalších, nebezpečnějších druhů koroze. Objevuje se rychleji po vlhkém tryskání či otryskávání vodou.

*Neviditelná kontaminace:* Neviditelná kontaminace je přítomnost organických látek po čištění. Časté jsou velmi tenké vrstvy oleje, maziva, chloridy, soli železa a sírany. Hlavním nebezpečím jsou u kovů hlavně chloridy, které při větších koncentracích výrazně snižují zatékavost barvy. Technologie používající během čištění pitné vody, jsou v odstraňování neviditelných kontaminantů, především solí a chloridů, výrazně účinnější než ostatní technologie. [2; 3]

### **3.2 Kartáčování, broušení a leštění**

Kartáčování, broušení a leštění patří mezi mechanické čištění povrchů. Pokud se k čištění používá stroj, tak musíme dbát na to, aby nebyla překročena maximální obvodová rychlost nástroje stanovena výrobcem pohybující se přibližně mezi 20 a 40 m/s. Na nástroji se pak uvádějí maximální dovolené otáčky stroje. Tyto technologie se dají dohromady kombinovat.

#### **3.2.1 Kartáčování**

Kartáčování je čištění povrchu za použití kartáče či kartáčového kotouče. Jedná se o ruční (za pomoci kartáčů) či automatizovaný (s kartáčovými kotouči) proces. V nástroji jsou uchyceny

vlákna či dráty (dále štětiny), které jsou jedním koncem uchyceny v nástroji a jejichž druhý konec slouží k čištění. Pomocí nedefinované trajektorie štětin po povrchu materiálu pak nástroj odstraňuje nečistoty. Kartáče většinou slouží k hrubému odstraňování nečistot či k zjemnění povrchu materiálu.

Kartáče můžeme dělit dle technologie výroby na zatloukané, zatahované, lištové a točené.

Nejčastější je zatloukání štětin kvůli nejnižší ceně výroby. Kartáče se vyrábějí pomocí vsazování svazků štětin do předvrtaných slepých děr, kde jsou následně skobou přidělají k materiálu kartáčového tělesa.

Zatahované kartáče jsou již vzácností, jelikož se jedná o nejstarší technologii výroby, kdy se k upevnění štětin používá dírkami proplétaný drát.

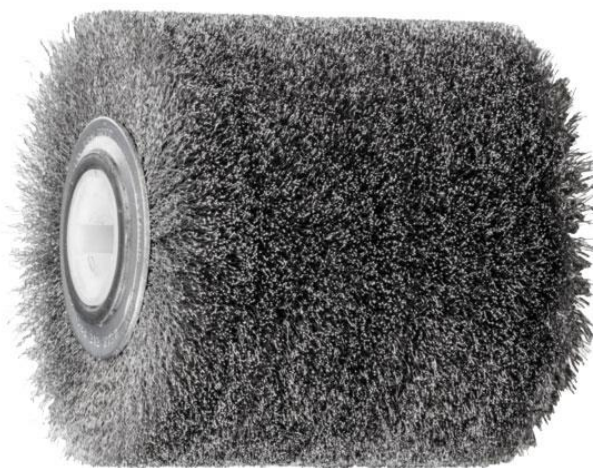
Lištové kartáče využívají k upevnění zalisování štětin do kovové U-pásky, z ní se následně dají tvarovat různá tvarová tělesa.

Točené kartáče k zachycení štětin zase využívají drátů, které jsou kroucené do spirály a mezi kterými jsou uchycené štětiny. [4]

Kartáčové kotouče se pak vyrábějí obdobnými technologiemi. Existuje několik typů kartáčových kotoučů dle jejich tvaru a materiálu štětin. Nejčastěji jsou štětiny u kartáčových kotoučů uchyceny zalisováním drátů do lišty nebo disku.



a,



b,

Obrázek 1 - Druhy kartáčových kotoučů: a, zalisovaný nylonový; b, ocelový válcový

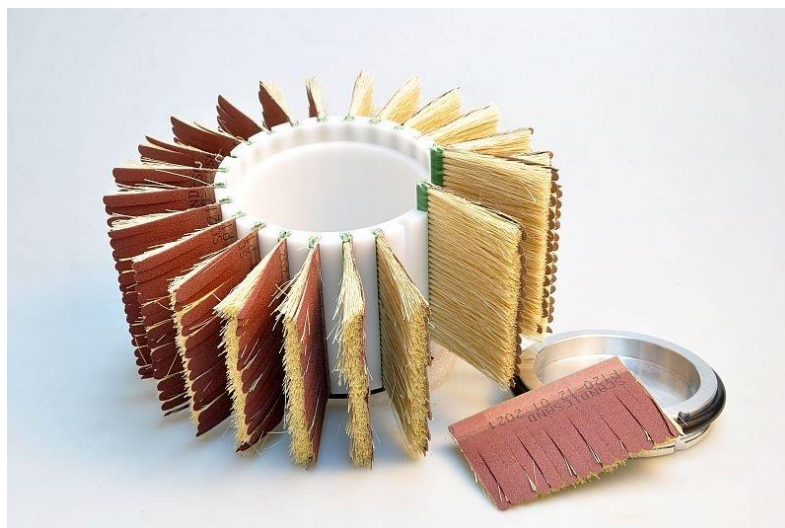
Všechny jsou po výrobě zkrácené na požadovanou délku štětin, aby jejich konce byly ve stejné rovině. Kartáče a kartáčové kotouče jsou vhodné pro odstraňování hrubých nečistot, koroze či nátěrových hmot. Při využití této technologie nám nesmí vadit případné vizuální porušení originálního povrchu. Vlákna štětin se mohou vyrábět z různých materiálů a je vhodné je volit

dle tvrdosti a požadovaného efektu na materiál, který budeme očišťovat. Nejčastěji se používá drát z oceli a polyamidové vlákno, dalšími běžnými materiály jsou pak mosazné dráty nebo různá plastová, živočišná, keramická a rostlinná vlákna.

### 3.2.2 Broušení

Broušení má mnoho variant od ručního až po strojní broušení. Technologie broušení je velmi všestranná a lze ji použít i na velmi tvrdé materiály. Hlavním nástrojem je brusivo, to může být volné v prášku nebo drženo adhezí na nějakém nástroji, například brusném kotouči či papíru. V terminologii pak brusivo na nástrojích označujeme jako ostřívo a látku, která brusivo váže v nějakém tvaru, jako pojivo. Ostřívo je geometricky nedefinovaný nástroj, který odstraňuje nečistoty z povrchu svými ostrými hranami. Ostřívo dělíme dle své zrnitosti a druhu materiálu, kterým je nejčastěji křemík či korund, k nimž se dle potřeby mohou přidávat další prvky.

U nástrojů obsahujících pojivo dochází při ztupění k vyloupnutí zrn z nástroje a jeho nahrazení okolními, doteď se s povrchem nestýkajícími, hranami okolních zrn – dochází k tzv. samoostření. Pojivo, které drží ostřívo pohromadě, může být keramické (většina), magnezitové, z vodního skla, pryžové apod. Pojiva můžeme dělit na organické a anorganické. Dalším faktorem ovlivňujícím vlastnosti nástroje je struktura, kterou určuje poměr hustoty ostřiva a pojiva.



Obrázek 2 - brusný kartáčový kotouč s vyměnitelnými lamelami

Brousící nástroje jsou normované dle normy ČSN ISO 525 (22 4503) a existuje relativně velké množství jejich různých variant. [5] Nejčastěji se v kódu uvádí na prvním místě druh a typ nástroje, který následují rozměry důležitých částí nástroje, druh brusiva, druh pojiva a velikost zrn, ukončuje se zpravidla maximální povolenou rychlostí. Broušení je vhodné především na velké rovinné plochy, kde je nejefektivnější. Pro plochy zakřivené potřebujeme manipulaci

nástroje ruční nebo strojní ve více osách, případně speciální nástroje vytvarované do tvaru broušené plochy.

### 3.2.3 Mechanické Leštění

Mechanické leštění je ubírání velmi malé povrchové vrstvy pomocí měkkých nástrojů a brusné pasty. U mechanického leštění se jedná především o dokončovací operaci čištění povrchů za pomoci tlaku působícího na povrch. Nástrojem je většinou leštící kotouč nebo leštící pás. Nástroje mohou být vyrobeny z celé řady materiálů, většinou velmi měkkých jako je filc, pěna, vlna, guma. Leštící pasty jsou barevně rozlišeny podle své agresivity vůči povrchu a drsnosti které je možné s nimi dosáhnout, jejich barevné kódování lze vidět na obrázku 3.

Ra	zrnitost	barevné označení
0,020	1/0	světle žlutá
0,025	2/1	žlutá
0,030	3/2	tmavě žlutá
0,040	5/3	světle zelená
0,050	7/5	zelená
0,063	10/7	tmavě zelená
0,080	14/10	světle modrá
0,100	20/14	modrá
0,125	28/20	tmavě modrá
0,160	40/28	červená
0,200	60/40	oranžová

Obrázek 3 - rozdělení leštících past

Mimo leštění mechanického existuje ještě leštění elektrochemické za využití elektrolytu a chemické za využití chemických látek. [6]

### 3.3 Tryskání

Tryskání, dalšími názvy otryskávání a abrazivní tryskání, je technologie spadající pod mechanické čištění povrchu. Je to technologie, při které posíláme urychlené abrazivní částice proti čištěnému povrchu. Díky síle jejich nárazu (u některých abraziv i dalším sekundárním účinkům) a předání kinetické energie do plochy čištěného materiálu se od povrchu oddělí nečistoty. Operace se však dá použít i ke zpevnění tryskaného povrchu pomocí silných nárazů, dochází totiž k vytvoření povrchové mikrotvrdoti. Pokud je tato mikrotvrdotí cílem, volíme pro tryskání co nejméně ostré tryskací médium – tedy kuličky. Tyto operace se označují jako

kuličkování. Jak mechanické, tak pneumatické tryskání mohou pro čištění využít, s několika výjimkami, stejná tryskácí média.

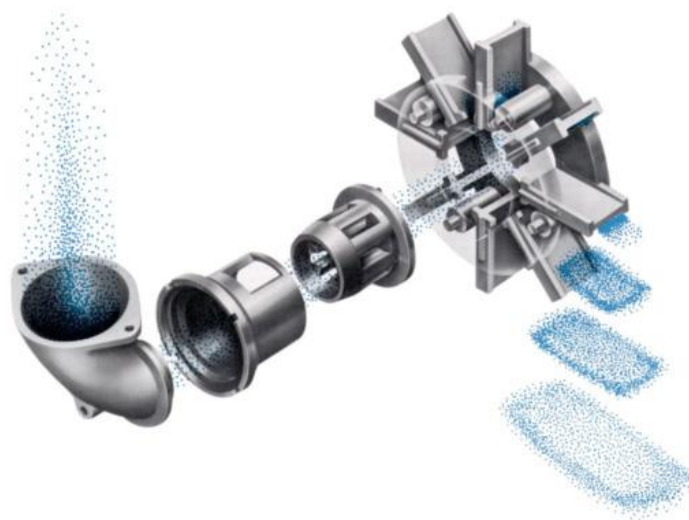
Hlavní výhodou tryskání je schopnost odstranit i hlubší oxidické vady, které se ostatními mechanickými technologiemi odstraňují obtížně. Nevýhodou je pak u nějakých abraziv poměrně velká prašnost technologie. Ta jde výrazně snížit navlhčováním abraziva, to je ovšem podmíněno jeho vhodností.

Tryskání v této práci dělím na mechanické, pneumatické a speciální metody.

Do speciálních metod jsem se rozhodl zařadit takové metody, které používají k odstraňování nečistot i další fyzikální principy.

### 3.3.1 Mechanické tryskání

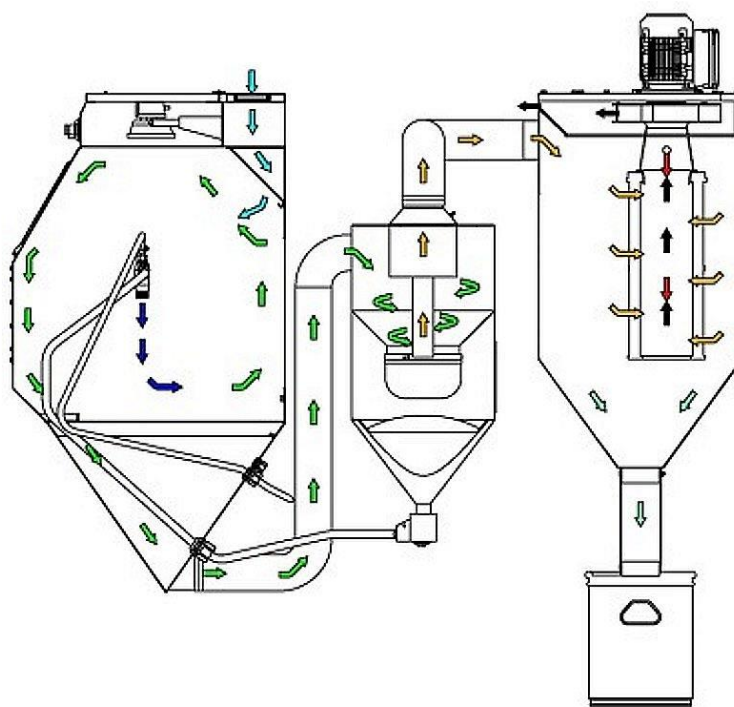
Mechanické tryskání je metodou, při které k urychlování částic dochází pomocí unášení částic mechanickým zařízením, takzvaným metacím kolem. Metací kolo urychluje tryskácí medium pomocí obvodové a odstředivé síly. Ve správné chvíli je abrazivo vypuštěno na lopatku metacího kola, po které se sklouzne, získá rychlost a poté dopadá na povrch tryskaného materiálu. Tryskání pomocí metacích kol je oproti pneumatickému relativně úsporné – v průmyslových aplikacích jedno metací kolo příkon kolem 12 kW na pohon elektromotoru a až 10 000 kilogramů abraziva na hodinu práce, v určité sestavě, ale může být i více kol. [7] Efektivita záleží na nastavení procesu a abrazivu.



Obrázek 4 - tryskání metacím kolem, schéma stroje

### 3.3.2 Pneumatické tryskání

Pneumatické tryskání pro své fungování potřebuje tlakový vzduch, který je většinou dodáván externím kompresorem. Dělí se dále dle principu unášení tryskacího média na tlakové a injektorové neboli sací. Výhodou oproti tryskání pomocí metacích kol je, že abrazivo a tlakový vzduch jsou k čištěnému místu přiváděny hubicí, která je výrazně mobilnější. Díky tomu se při čištění můžeme dostat i na hůře dostupné oblasti čištěného povrchu, do kterých se tryskání metacím kolem díky svým rozměrům nemůže dostat.

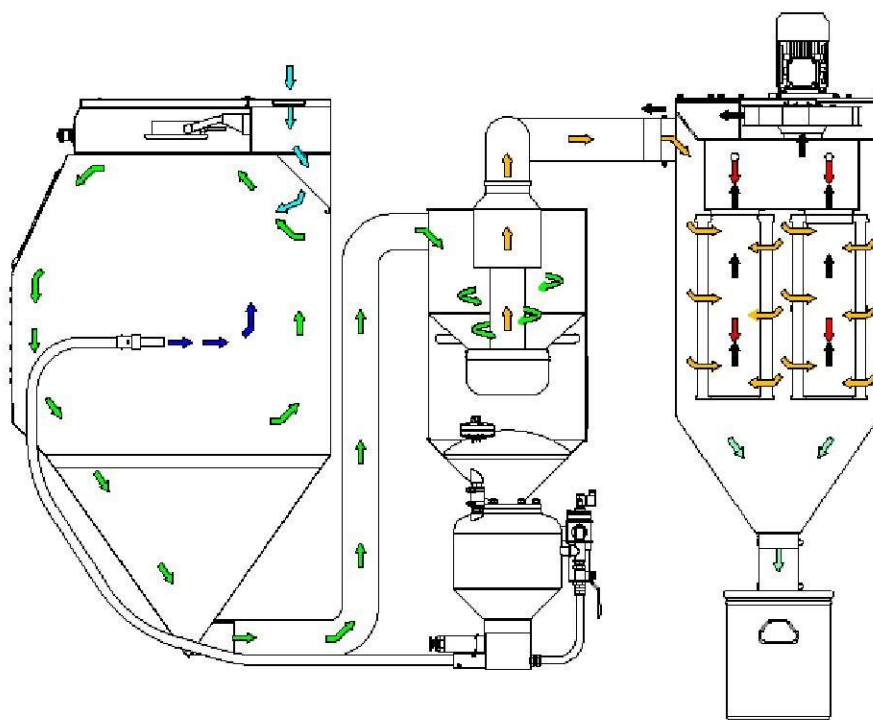


Obrázek 5 - schéma injektorové tryskací kabiny s cyklonovým odlučováním

Injektorové tryskání unáší zrna podtlakem do tryskacího nástroje, kde se smíchají s tlakovým vzduchem. Abrazivo je po použití tříděno a vraceno do zásobníku zpět.

U tlakového tryskání část, či celý tlakový vzduch, prochází tlakovým zásobníkem s abrazivem a unáší s sebou abrazivo ven ze zásobníku do trysky. Objem unášeného abraziva se dá nastavit škrtícím kohoutem na výstupu ze zásobníku. Nevýhodou je omezená velikost zásobníku, který se po vyčerpání objemu musí doplňovat. Doplňování je možno automatizovat.





Obrázek 6 - schéma tlakové tryskací kabiny s cyklonovým odlučováním a automatickým doplňováním abraziva

U trysek tryskacích strojů je potřeba při konstrukci dbát na důmyslnou volbu materiálů. Je potřeba, aby trysky dobře odolávaly abrazivnímu opotřebení. Mezi oblíbené materiály hubic patří například karbid bóru.

Pro pneumatické tryskání je potřeba kompresor. Kompresory pro průmyslové tryskání mají spotřebu od 300 do 13 000 litrů vzduchu za minutu a výkon od 3 do 75 kW. Samotné tryskací zařízení potřebuje výkon zhruba 0,6 kW. [8] Efektivita zařízení záleží na nastavení procesu a abrazivu. Existují různé stupně očištění povrchu pomocí tryskání, tyto stupně se řídí normou ČSN ISO 8501-1



a,



b,

Obrázek 7 - kompresory: a, halový bezolejný šroubový; b, mobilní naftový

### 3.3.3 Abrazivo

Abrazivo by vždy mělo být voleno dle povrchové tvrdosti otryskávaného materiálu a agresivity, se kterou chceme materiál otryskat. Obecně platí, že by abrazivo mělo být stejně, nebo více tvrdé, než je tryskaný materiál. S rostoucí tvrdostí abraziva roste také maximální dosažené tlakové pnutí. [9] Abrazivo se dělá z různých materiálů, obecně ho můžeme rozdělit do čtyř skupin, a to na abrazivo z železných kovů, neželezných kovů, organické a anorganické nekovové abrazivo. Nejčastějším médiem, které abrazivo unáší, je stlačený vzduch. V některých případech se používá vlhčené abrazivo kvůli nižší prašnosti, či voda jako nosná látka abraziva. Vlhké prostředí ovšem není vhodné pro veškeré typy tryskacích materiálů, protože díky přítomnosti vody může docházet k jejich oxidaci a znehodnocení. Abrazivo dělíme dle zrnitosti. Značení zrnitosti abraziv je řízeno normou FEPA 42 a FEPA 43. V průmyslu je nejpoužívanější zrnitostí F24 s velikostí zrn 850–710  $\mu\text{m}$ . Profesionálním pneumatickým strojům vyhovuje velikost zrn odvinutá od velikosti trysky, ideálně  $\frac{1}{8}$  velikosti průměru trysky. Pro rozdělení velikostí abraziv do jednotlivých velikostních kategorií se používají prosévací síta, pro velmi jemné částice je použita sedimentace.

#### 3.3.3.1 Ocelová a litinová abraziva

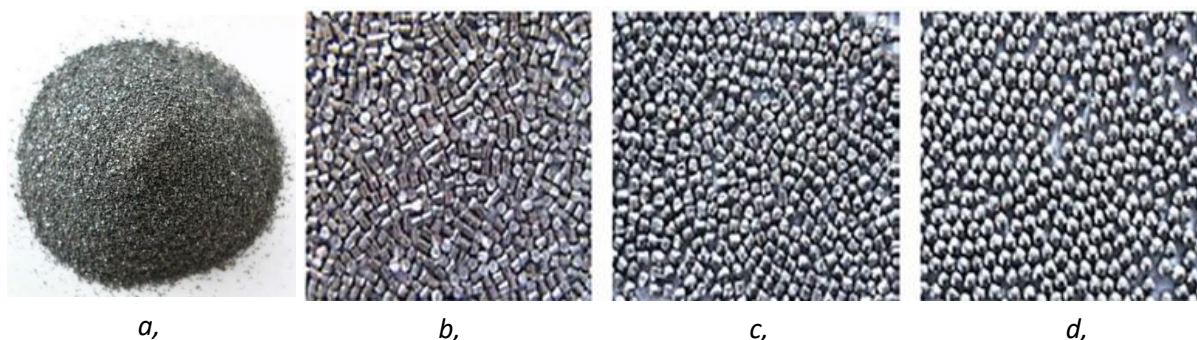
Tyto materiály jsou jedněmi z nejčastějších abraziv pro tryskání, neboť jsou tvrdostí nejbližší běžně tryskanému materiálu, slitinám železa. Můžeme zde najít nejpoužívanější ocelovou drť, ocelový granulát, sekaný ocelový drát, nebo litinovou drť.

Ocelová tryskací media jsou účinná a relativně levná. Granulát se vyrábí drcením z tepelně upravených broků pro větší tvrdost. Dle klesající tvrdosti, na kterou je drť vyžádána, ji značíme jako GH, GB, GP nebo GL (dle normy SAE J444). GH je nejtvrdší třída ocelového abraziva s tvrdostí více než 60 HRC a ostrým tvarem. Většinou se používá se stlačeným vzduchem, neboť při použití s metacím kolem ho nadměrně opotřebovává. [10] GP se při čištění rychle změnil do tvarů připomínajícím kuličky díky své elasticitě. GB a GL jsou si celkem podobné, časem se jejich tvar také zakulacuje. Vlastnostmi leží mezi drtí GP a GH.

Nevýhodou ocelového média je jeho tendence ve vlhku zreznout a pomocí rzi se slepovat do chuchvalců. Je tedy potřeba dbát na správné skladovací podmínky případně i na odvlhčení tlakového vzduchu, to se samozřejmě netýká nerezových abraziv. Výhodou je, že ocel se příliš netříští a díky tomu není tryskání prašné.



Ocelový drát má vysokou míru znovupoužitelnosti. V průběhu životního cyklu se jeho hrany otupují a postupně vzniká ocelový granulát, který je dále prodejný či použitelný. Dle zdrojů toto abrazivo vydrží až 10 000 cyklů. [11]



Obrázek 8 - ocelová abraziva; a, ocelová drť; b, sekaný drát nový; c, sekaný drát použitý; d, sekaný drát přeměněný do granulátu

### 3.3.3.2 Korundová abraziva

Korundové tryskací medium má několik modifikací, které se dělí dle jeho čistoty, uváděné v procentech, a dle jeho dolegování. Nejčastěji používaným korundovým abrazivem je korund hnědé barvy s čistotou 90–95 %. Další běžně dostupnou variantou je téměř čistý korund bílé barvy. Hlavní složkou korundových abraziv, kterou uvádíme v procentech, je  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (oxid hlinitý), sekundární složkou je pak  $\text{TiO}_2$  (oxid titaničitý). Korund je velmi tvrdý (nachází se na Mohsově stupnici na stupni 9) a díky tomu se otupuje ještě méně než ocelová abraziva a je vhodný pro tryskání tvrdších, například nerezových, povrchů. Korund se vyrábí natavením bauxitu v indukčních pecích při teplotách kolem  $1600\text{ }^\circ\text{C}$ , v případě potřeby je možno do tavby přidat legovací prvky. Nejčastěji se přidává kysličník chromu, který mírně zvyšuje tvrdost (zhruba o 0,1 – 0,2 stupně Mohsovy stupnice). Následuje ochlazení a rozdrčení na požadovanou velikost částic. [11] V porovnání s jinými abrazivy, která vznikla jako vedlejší produkty jiných primárních výrobních procesů, je výroba korundu neekologická. Nicméně z pohledu jeho tvrdosti je korund nenahraditelný.



Obrázek 9 - tryskáci media: a, korundové abrazivo, oxid hlinitý 95%; b, křemičitý písek

### 3.3.3.3 Písková abraziva

Pískové tryskáci medium je nejvíce dostupným abrazivem, a to cenou i dostupností. Problémem při použití této technologie je rychlé otupování a rozpadání křemičitého písku, které způsobuje vysokou prašnost. Tryskání suchým křemičitým pískem bylo v EHP zakázáno roku 1966 a už se nesmí na jeho území používat. Důvodem je, že křemičitý prach se dostává do vzduchu rozbíjením zrn písku o povrch. Prach se při vdechnutí dostává do plic, kde se usazuje a způsobuje nemoc zvanou silikóza. Od jeho suchého používání, především v průmyslu, se tedy upouští, ale velké popularitě se stále těší v rozvojových zemích. Z pohledu ekologie je písek vhodný pro ekologické tryskání.

Vzhledem k tomu, že písek je přirozeně se vyskytující surovinou, nemá jeho získávání a používání žádný zásadní negativní vliv na ekologii.

### 3.3.3.4 Plastová abraziva

Abrazivo z plastu je velmi šetrné k povrchu a nenarušuje nijak základní kovový materiál. Používá se hlavně k vytvrzení povrchu a pro čištění organických vrstev. Vhodné je díky neagresivnosti i pro tenké hliníkové plechy, které by více agresivní tryskáci media mohla zohýbat či poškodit.

Většinou se plastové abrazivo skládá z jednoho či více druhů recyklovaného plastu. Často se používá při odstraňování barev a laků před nanášením nového nátěru, při tryskání, k odhroťování PCB, k odstraňování vosků, lepidel a starých těsnicích materiálů. Tvrdost plastových abraziv je zhruba 3–4 podle Mohse. Plasty se značí dle jejich typů pomocí římských čísel. Číslo značí tvrdost plastu od I do IV – nejčastěji se používají materiály typu II (močovina), III (melamin) a V (Akryl). [12; 13] Z pohledu ekologie záleží na procesu výroby abraziva. Pokud

se jedná o zužitkování a znovupoužití odpadu, můžeme technologii prohlásit za ekologicky přívětivou.

	<b>Tvrđost MOHS</b>	<b>Tvrđost BARCOL</b>	<b>Měrná hmotnost (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Aplikace</b>
<b>TYPE I POLYESTER</b>	3	34–42	1.15 - 1.25	Elektronika, měkké kovy, sklolamináty
<b>TYP II MOČOVINA</b>	3.5	54–62	1.47 - 1.52	Nákladní a osobní automobily, letadla
<b>TYP III MELAMIN</b>	4	64–72	1.47 - 1.52	Turbíny, formy, tvrdé základní nátěry
<b>TYP VI CLEARCUT®</b>	3	-	1.24 - 1.32	Sklolamináty, kompozity, hliníkové materiály
<b>TYPE V AKRYL</b>	3.2–3.5	46–54	1.1–1.2	Automobily, letadla, lodě

Tabulka 1 - druhy plastových abraziv, přeloženo



a,



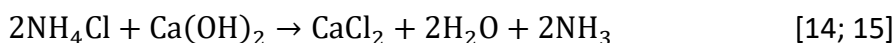
b,

Obrázek 10 - tryskáci media: a, plastové abrazivo typu V; b, jedlá soda

### 3.3.3.5 Tryskání hydrogen-uhličitánem sodným NaHCO<sub>3</sub>

Tryskání pomocí NaHCO<sub>3</sub>, lidově zvaného jedlá soda, je ekologické, neboť soda se může netoxicky v přírodě rozpustit. Má však vysokou prašnost, což je nevýhodou. Soda se při nárazu na povrch materiálu tříští a práší, je proto nutná ochrana dýchacích cest. Soda se nejčastěji vyrábí pomocí Solvayova procesu:

K reakci je tedy potřeba dodat chlorid sodný (sůl), oxid uhličitý, hydroxid vápenatý (hašené vápno) a vodu, což jsou v přírodě běžné materiály. Amoniak se při procesu recykluje a znovu používá při dalším cyklu výroby. Odpadním produktem je pouze chlorid vápenatý, který se dá použít jako efektivnější a ekologičtější alternativa posypové soli.



Rovnice 3 – Solvayův proces

Další nevýhodou je špatná viditelnost povrchu přes prachový mrak, který proces vytváří. Hydrogen uhličitán sodný má 2,5 bodů na Mohsově stupnici tvrdosti, a tudíž patří mezi jedny z nejměkčích tryskacích materiálů. Je vhodný na měkké materiály jako je například dřevo či hliník. Mimo jiné jedná soda reaguje s povrchem tryskaného materiálu a tvoří na něm dočasnou ochranou bariéru před bleskovou korozí a plísněmi. Ta ovšem nemusí být vždy chtěná a musíme s ní počítat při následných operacích. [16]

### 3.3.3.6 Tryskání uhličitánem vápenatým (vápenцем)

Uhličitán vápenatý má 2,9 - 3 bodů na Mohsově stupnici tvrdosti a používá se hlavně pro tryskání kamenných povrchů a pórovitých objektů v restaurátérství a na budovách, protože má nejlepší poměr účinnosti a invazivity k materiálu. Neobsahuje žádné soli a s řadou povrchů ve stavebnictví má podobné složení. Ekologicky je zcela nezávadný.



*a,*



*b,*

Obrázek 11 - tryskací media: a, uhličitán vápenatý; b, drcené skořápky

### 3.3.3.7 Abrazivo ze skořápek

Většinou se jedná o namleté skořápky plodů ořešáku černého, které jsou v porovnání s ostatními skořápkami nejtvrdší. Dají se ale použít i skořápky ostatních skořápkových plodů či případně namletá jádra některých peckovic. Tvrdost variuje mezi 2,5 a 3,5 body Mohsovy stupnice. Jedná se o jednoduše biologicky rozložitelné tryskací medium, které je v přírodě běžně přítomné. [17]

### 3.3.3.8 Keramické abrazivo

Keramické abrazivo, často nazývané Zirblast podle jeho výrobce, je vhodné na použití pro dokončovací operace. Název Zirblast vychází z výrobního materiálu, krystalů zirkonia  $ZrO_2$ , ten je zasazen do skleněné matrice. Tryskací medium je pak dostupné ve formě různě velkých kuliček. Název Zirblast je chráněn ochrannou známkou, existuje řada alternativ s podobnými



názvy. Oproti čistému sklu je tryskání keramikou méně prašnější. [18] Vzhledem k tomu, že se vyrábí při vysokých teplotách, je výroba tohoto abraziva ekologicky náročná.



a,

b,

Obrázek 12 - tryskací media: a, keramické kuličky; b, drcené sklo

### 3.3.3.9 Skleněné abrazivo

Skleněné abrazivo můžeme rozdělit na skleněnou drť a skleněné kuličky (tzv. balotina). Na rozdíl od křemičitého písku nezpůsobuje tryskání sklem silikózu. Balotina se stejně jako Zirblast nejčastěji používá k dokončovacím operacím, neboť je k čištěným povrchům šetrná. V některých zdrojích se označuje tryskání balotinou za leštění. Drcené sklo je jedno z nejlevnějších ekologických tryskacích medií na našem trhu. Vyrábí se z recyklovaného skla a oproti ostatním abrazivům má nižší hustotu, díky čemuž je jeho spotřeba při tryskání nižší. [19]

### 3.3.3.10 Tryskání struskou

Struska je hrubý odpadní materiál vznikající v hutních procesech, buď při výrobě kovů, nebo při spalování materiálů. K tryskání lze použít více druhů strusky, nejčastěji používanými jsou strusky uhelné nebo měděné. Struskové abrazivo je většinou označováno jako náhrada za tryskání křemičitým pískem. Jedná se většinou o nejlevnější dostupné abrazivo v Evropě. Strusky jsou ostrým tryskacím médiem s tvrdostí 6-8 na Mohsově stupnici. [20]

Měděná struska je odpadní materiál při tavení mědi. Po odstranění z procesu se prudce zchladí a zatuhne do krystalické formy, ve které se dále používá. [11]

Uhelná struska je odpad z procesu spalování uhlí v elektrárnách. Většinou se následně speciálně upravuje pro nižší prašnost při využití. Uhelná struska obsahuje jisté množství křemíku, oproti pískovým tryskacím médiím je však hrozba silikózy výrazně menší. [21]



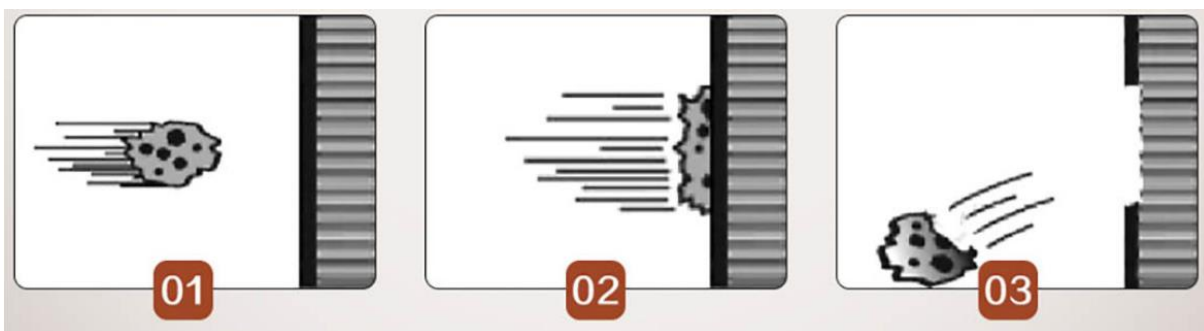
Obrázek 13 – měděná struska pro tryskání

### 3.3.4 Speciální tryskácké metody:

Do této kategorie jsem zařadil metody, které kombinují více fyzikálních čistících účinků při jejich použití v tryskání. Tyto metody se stále počítají do tryskání, ale často se v literatuře uvádějí již jako samostatné technologie. Tryskací stroj či pouze jeho část je modifikována tak, aby odpovídala dané speciální aplikaci. Jako příklady zde uvádím tryskání suchým ledem, vodou a technologií sponge-jet.

#### 3.3.4.1 Tryskání polyuretanovou pěnou s příměsí dalších abraziv (Sponge-jet)

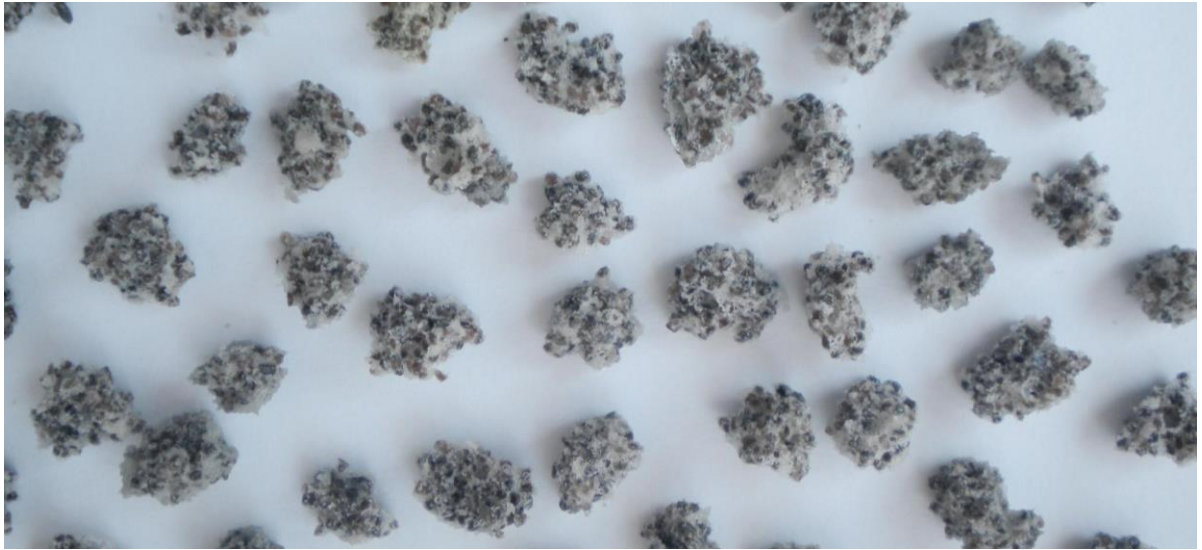
Jako abrazivo lze použít i polyuretanovou pěnu, která v sobě obsahuje částičky jiných, většinou kovových abraziv. Jedná se o jednu z novějších patentovaných amerických technologií, která v Čechách nemá ještě příliš mnoho zastoupení.



Obrázek 14 - princip odstraňování nečistot houbou

Při dopadu na povrch se pěna silou nárazu roztáhne po ploše čistěného materiálu a abrazivo v ní udeří do povrchu přes stěnu houby. Při vracení se do původního tvaru vytvoří vakuum, které vytrhne kontaminanty z povrchu a také ji usměrní, aby neprášila do všech směrů. Díky minimální tříštivosti tohoto abraziva je ho možno velmi dobře recyklovat a nevzniká téměř žádný prachový oblak. Dokáže také odstraňovat chloridy z povrchů oceli. Pěna slouží především jako unašeč abraziva. Hlavní čistící účinek mají abrazivní složky obsažené v pěně.

Tryskací medium se opět musí vyrábět, což způsobuje určitou ekologickou stopu. Abrazivo vydrží 8-15 cyklů. [22; 23]



Obrázek 15 - polyuretanovou pěnou s příměsí dalších abraziv

#### 3.3.4.2 Tryskání suchým ledem

Suchý led je jedním z modernějších abraziv, která ještě nemají zcela jasně stanovené hranice používání, stále se proto objevují nové aplikace, a občas se používá i v případech, kde není zcela vhodný. Suchý led je pevnou formou  $\text{CO}_2$  a sublimuje při atmosférických podmínkách při teplotě kolem  $-78^\circ\text{C}$ .



a,



b,

Obrázek 16 - a, suchý led; b, strojní zařízení pro tryskání suchým ledem

První experimentální používání suchého ledu pro tryskání se datuje do 40. let 20. st., kde s ním experimentovalo americké námořnictvo. Jako takové je tryskání suchým ledem považováno za ekologické. Suchý led se nejčastěji získává při výrobě čpavku, kde figuruje jako odpad daného procesu, plynné CO<sub>2</sub> je pak stlačováno a ochlazováno, než dojde k jeho zkapalnění, a následně je schraňováno v tlakových nádobách. Při 300°K má kapalina tlak přibližně 5–6 MPa. Zkapalněný CO<sub>2</sub> se následně pomocí expanze a prudkého snížení tlaku při výstupu z nádoby mění v sníh, přičemž jistá část uniká do atmosféry. Následně je s vyrobenou sněhovou hmotou možné dále pracovat. Nejčastěji se stlačuje do pelet, zrněk tvaru rýže. Proces výroby, od tlakových lahví po peletu, většinou probíhá v jednom stroji nazývaném peletizér, existují ovšem i tryskací stroje, které tryskají přímo sněhem vyrobeným z tlakové nádoby s CO<sub>2</sub>. Sypký sníh z CO<sub>2</sub> je ale méně účinný k čištění povrchu než pelety. [24; 25] Z pohledu ekologie se sice jedná o znovupoužití odpadu, ale nesmíme zapomenout na energii vynaloženou k stlačení CO<sub>2</sub> do kapalného stavu, výrobu sněhu, pelet a následné skladování vyrobených pelet, které se rozpouštějí při teplotách nad 78°C.

Princip této technologie je stejný jako u pneumatického tryskání – pelety jsou unášeny tlakovým vzduchem až po náraz na povrch. Mimo použití kinetické energie má však suchý led i následující vedlejší čistící účinky. Suchý led způsobí tepelný šok povrchovým nečistotám i kovu pod nimi, kov i nečistoty mají jinou rychlost a velikost smrštění. Dochází tak k popraskání vrstvy kontaminantů díky vytvoření smykového napětí rozdílem teplot. Popraskání podporuje navíc nízká teplota způsobující křehnutí nečistot. Dalším využitým vedlejším principem je následná okamžitá sublimace suchého ledu z povrchu do atmosféry. Při sublimaci suchý led výrazně zvětší svůj objem. Pokud se jeho část dostane do praskliny nebo mezery mezi čištěným materiálem a nečistotou, pomůže jeho výrazné zvětšení objemu při odloupení nečistot z povrchu. Následně stlačený vzduch, který unáší suchý led, odfoukne nečistotu pryč.

Je nutnost pelety suchého ledu uchovávat ve správných podmínkách, aby nedošlo k jejich natavování a slepování se před použitím a následnému snižování čistícího účinku.

Na zkapalnění 1 kilogramu CO<sub>2</sub> je potřeba přibližně 0,08 – 0,1 kWh, záleží na strojním zařízení a únicích tepla. [26; 27] Z 1 kilogramu zkapalněného CO<sub>2</sub> lze vyrobit zhruba 0,23 kilogramu suchého ledu. [28] To znamená že na výrobu kilogramu suchého ledu je spotřeba zhruba 0,38 kWh.

Další energie je pak potřeba na provoz tryskacího stroje, který pelety urychluje na nadzvukovou rychlost. Příkon tryskacího zařízení je zhruba 0,6 – 0,7 kW, spotřeba suchého



ledu pro nejvyšší řadu strojů může být až 100 kilogramů za hodinu a spotřeba vzduchu až 13 m<sup>3</sup> za minutu při tlaku 16 bar. [29; 30] Běžněji se však pohybujeme v objemech kolem 50 kilogramů za hodinu se spotřebou 3,5 m<sup>3</sup> vzduchu za minutu při 8 barech. Pokud chceme tryskání provozovat kontinuálně, pak potřebný kompresor pro nejvyšší řadu strojů má výkon 80-100 kW. Pro běžné průmyslové tryskací stroje stačí kompresory s výkonem kolem 25 až 40 kW. [31; 32] Dalším problémem je uchovávání suchého ledu, většinou se využívají polystyrenové izolační transportní boxy, ty však nejsou příliš vhodné pro dlouhodobější skladování, v nějakých případech je tedy potřeba dokoupit chladicí zařízení nebo lepší termoizolační boxy pro skladování.

Vytrénovaná obsluha údajně dokáže vyčistit až 45 m<sup>2</sup> za hodinu. , běžně jsou však rychlosti výrazně nižší. [33] Pokud chceme dosáhnout ještě nižších emisí CO<sub>2</sub>, tak ho můžeme nad čištěnou plochou zachytávat. Takový proces není příliš efektivní a vyžaduje další náklady na jeho následné zpracování.

### **3.3.4.3 Tryskání vodním paprskem**

Voda se v tryskání používá samostatně, jako náhrada abraziva, ale i jako unášecí medium abraziv. Samotné otryskání vodou, také nazývané hydroblasting, se dělí do několika kategorií podle tlaku vody a hubice, ze které vychází. Princip odstraňování nečistot z povrchu při otryskání vysokotlakou vodou je pomocí urychlené eroze a delaminace povrchových vrstev, v některých případech se přidávají i další principy, které záleží na použité technologii. [34] Aby mohla být voda považována za tryskací médium, je potřeba dosáhnout dostatečného tlaku, který ji urychlí natolik, že má abrazivní účinky na povrchu čištěného materiálu. Možností pro zvýšení efektivity otryskávání vodou je přidání abraziva do proudu vody. Je nutné volit správnou tryskací směs, aby nedocházelo k jeho nadměrné erozi.

#### **3.3.4.3.1 Druhy a vývoj**

Tryskání vodním paprskem (Water Jetting – WJ) je čištění za použití standardního vodního paprsku vypouštěného z trysky pod tlakem alespoň 70 MPa (10 000 psig) za účelem přípravy povrchu pro lakování nebo kontroly. Při tryskání vodním paprskem se používá proud vody pod tlakem, který má výstupní rychlost z trysky větší než 340 metrů za sekundu. [35]

Jeho první použití sahá někdy do poloviny 19. st., a to v důlních operacích pro urychlení eroze. Vývoj byl v tomto století celkem rychlý kvůli velkému využití tlakové páry v tehdejším průmyslu. V roce 1961 si pak Billie Schwacha v USA nechal patentovat stroj schopný řezat ocel ultravysokotlakým vodním paprskem. [36; 37]

Technologii lze dělit dle základních definicí v normě SSPC-SP 12/NACE No. 5 (2002) na následující:

- Čištění vysokotlakým vodním paprskem (high pressure water jet – HPWJ) - Čištění vodním paprskem prováděné při tlacích od 70 do 210 MPa (10 000 až 30 000 psig).
- Čištění ultravysokotlakým vodním paprskem (ultra high pressure water jet – UHP WJ) - Čištění vodním paprskem při tlacích vyšších než 210 MPa (nad 30 000 psig).

Jednotka psig (Pounds per square inch in gauge) je tlaková jednotka odvozená od jednotky tlaku psi odečtením aktuálního atmosférického tlaku.

Pro čištění je potřeba použít standartní tryskáci vodu – ta nesmí obsahovat nečistoty a usazeniny, aby čištěný povrch více neznečistila a aby nepoškodila strojní zařízení. Dostatečně čistou vodou pro otryskávání je voda pitná, ale samozřejmě lze použít i vodu z okolích zdrojů, kterou v případě potřeby musíme vhodně upravit (odsolení, filtrace a další). [35]



*Obrázek 17 - stroj pro tryskání pomocí ultravysokotlaké vody*

V moderní době je větší zájem o technologie otryskávání vysokým a ultravysokým tlakem vody kvůli její nižší prašnosti a schopnosti separovat povrchové vrstvy od základního materiálu rychle, efektivně a ekologicky. Oproti běžnému tryskání, kde jsou nečistoty spolu s abrazivem

rozprášeny do okolí, je většina nečistot unášena vodou, ze které lze nečistoty jednoduše odfiltrovat. Díky unášení nečistot a jejich možné filtraci se tato technologie zkouší používat na čištění toxicky či radioaktivně znečištěných povrchů. Technologie otryskání vodou také umí díky principu eroze jednoduše odstranit hlubší korozní produkty nerovnoměrné koroze jako je koroze důlková či bodová.

Většina hlavice pro ultravysokotlaké tryskání vodou je rotačních a osazených více tryskami, aby nedocházelo k velkému lokálnímu ovlivnění povrchu materiálu. Proto často při výpočtu celkové kinetické síly musíme počítat s kruhovou dráhou nástroje a s jejím překrýváním. Čím větší je překrytí drah jednotlivých trysek, tím lepší je roz distribuování síly po povrchu materiálu. [2]

Princip vodního tryskání je jednoduchý – pumpa vytvoří vysokotlakou vodu, která je dovedena do rozstříkové hlavice, v případě ruční aplikace do pistole. Ta má na své špičce přidělán nosič trysek, ve kterém jsou upevněné jednotlivé trysky. Ty mají za úkol převést tlak na rychlost, převést energii potenciální na energii kinetickou. Výstupní rychlost závisí na velikosti otvoru v trysce a platí, že čím vyšší je výstupní rychlost, tím větší sílu pak vodní paprsek má. Pokud je v trysce špatná kombinace rychlosti, která závisí na velikosti tlaku v kapalině, a průměru trysky, může dojít k nebezpečným silám působícím na povrch materiálu a jeho poškození.

#### 3.3.4.3.2 Stroj pro vysokotlaké tryskání

Stroje pro tryskání vodními paprsky lze rozdělit na následující části:

**Pohon**, vytváří výkon potřebný pro zvýšení tlaku vody. Dle zařízení mohou být pohony diesellové, které se používají pro mobilní stroje, a pohony elektrické, které se používají pro stroje stacionární. K provozu těchto strojů je potřeba motoru s výkonem v rozmezí od 80–200 kW, záleží hlavně na ztrátách v ostatních dílech sestavy. [2] Pohony běží na fixní rychlosti, která je v případě potřeby regulována převodovkou.

**Generátor tlaku** neboli pumpa, je přístroj, který využívá výkonu pohonu na zvýšení tlaku vody na potřebnou úroveň. Pump používaných pro vytvoření vysokotlaké vody je více druhů. Mezi nejběžnější patří intenzifikační pumpa (Intensifier pumps – IP) a pumpa s přímým pohonem (direct drive pump – DDP).

- intenzifikační pumpa využívá principu hydraulického pístu. Ten má na straně vody výrazně menší plochu než na straně tlačného media, nejčastěji oleje. Díky tomu je pak tlak zvýšen tolikrát, kolikrát je menší plocha pístu tlačící na vodu oproti ploše tlačené pracovním mediem, nejčastěji olejem. Tato čerpadla vykonají kolem 50–60 zdvihů za

minutu. Jejich efektivita se pohybuje zhruba kolem 60 % a častěji se používají pro vytvoření nejvyšších tlaků. [38; 39]

- Čerpadla s přímým pohonem jsou oproti intenzifikačním čerpadlům výrazně rychlejší, otáčky se pohybují zhruba kolem 1700 ot/min, konstrukčně jsou velmi podobné klasickému automobilovému motoru, místo pístu však používají plunžry (píst spojený s pístnicí bez pístních kroužků). [40] Motor zde otáčí klikovou hřídelí připojenou na písty, které tlakují vodu. Jsou rychlejší a účinnost se pohybuje kolem 85 %, nedosahují však tak vysokých tlaků jako intenzifikační pumpy. [38; 39]



a,



b,

Obrázek 18 – čerpadla: a, Intenzifikační pumpa Motojet X; b, přímo řízená pumpa Woma 150M

**Hadicové vedení vysokotlaké kapaliny**, u těchto strojů se dělá z ohýbaných ocelových trubek, spojují se kónickými šroubeními, které se pro jistotu ještě těsní, většinou lepidlem či teflonovou izolační páskou.

**Rozstříkové zařízení**, skládají se z těla, nosiče trysek a trysek. Kvůli vysokým tlakům pak musíme brát ohled i na silové působení rozstříkového zařízení.

Tělo může být mechanizováno či určeno pro ruční manipulaci. Evropské regulace zakazují manipulaci, pokud axiální složka reakční síly ručně drženého stroje přesahuje 250 N, a nařizuje použití alespoň dvou opěrných bodů pro nástroje se silou nad 150 N. Pro vyšší síly je už nutné použít vozíku či robotického ramena, které budou trysku držet. Mechanizované nástroje jsou pak často používané pro velkoplošné čištění jako jsou lodě a mosty, nebo pro čištění těžko dostupných míst, například čištění cisteren, trubek a nádob.



Obrázek 19 - rozstříkové zařízení: a, ruční pistole; b, podlahový manipulátor s odsáváním

- *Nosič trysek, také nazýván čistící hlava, je pro čistící operace nutností, určuje totiž úhel a směr proudu tlakové vody. Nosiče také využíváme pro rozdělování proudu do více trysek. Rozdělení proudu do více trysek je uskutečněno nejčastěji pomocí rotačních průchodek, které vodu distribuují do trysek a zároveň mění jejich polohu. Tyto průchodky mohou být poháněny odebráním části energie od tlakové vody, v takovém případě je nutné kontrolovat počet otáček. Takový způsob pohonu se často užívá v ručních aplikátorech pro svou jednoduchost. Další možností je průchodku pohánět externě, získá se tak ještě lepší kontrola nad procesem čištění.*



Pro lepší efektivitu tryskání lze pak každou trysku v nosiči nasměřovat pod mírně jiným úhlem na jinou dráhu, aby se dráhy všech trysek v nástroji, za předpokladu stacionárního čištění, nepřekrývaly.

Alternativou k nosičům je pak pulzující vodní paprsek, kde zařízení vytváří uvnitř trysky pulzy, ve kterých voda uniká z trysky.



Obrázek 20 - nosiče trysek: a, pro čištění nádrží; b, pro čištění potrubí

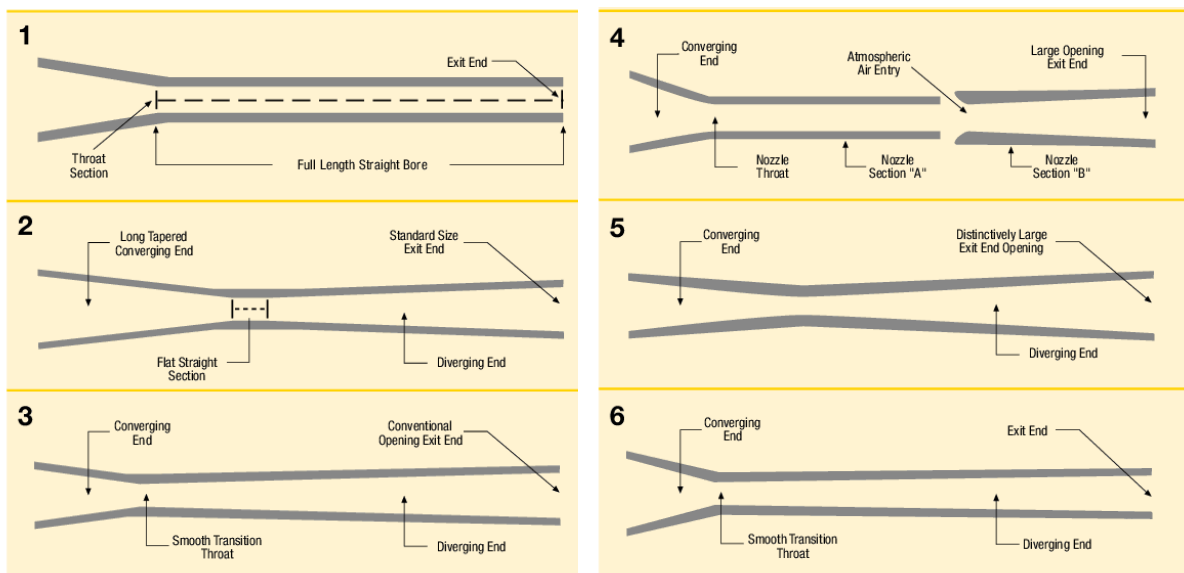


Obrázek 21 - nosič trysek pro pistole WOMA TD 3000-SCS s popisem; strojově přeloženo

- Trysky jsou hlavní součástí stroje. Určují tvar, rychlost a průtok proudu kapaliny. V tryskách se energie tlaková mění na energii kinetickou. Protože přes trysky prochází voda o vysokém tlaku, musí k tomu být přizpůsobeny. Trysky pro nižší tlaky se vyrábí z vysokolegované a vytvrzované oceli, která se případně povlakuje odolnými povlaky z teflonu, keramiky nebo dalších. [41] Pro vyšší tlaky se ale stále častěji místo povlaků vkládají do trysek vložky v jejich nejvíce namáhaných částech. Ty jsou vyrobené z tvrdších materiálů jako je safír, karbid wolframu či křemíku a další. [42; 3]

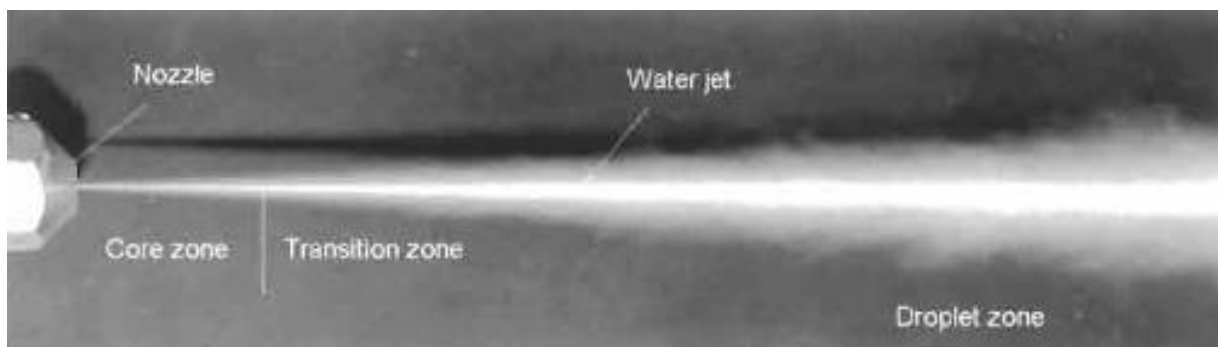
Typy trysek jsou většinou navrženy přímo pro konkrétní užití a tlak. Trysky lze dělit do následujících kategorií:

- trysky s plným paprskem (pin/round) používané spíše pro řezání. nejčastěji mají přímý tvar (straight bore), nebo tvar dvojité Venturiho trubice (double Venturi).
- trysky s plochým rozstřikem (fan) jsou používány spíše pro čištění povrchů při nižších tlacích.
- trysky s plným či prázdným kuželovým rozstřikem (cone) jsou ideální na čištění velkých ploch
- rozprašovací trysky (injection), které substanci rozprašují ve formě mlhy.
- trysky pevné (fixed) a rotační (spinning) používané pro čištění trubek a vnitřních prostor. Pevné trysky mají v tomto případě více ústí do všech směrů, aby pokryly celé své okolí, rotační jsou upevněny v rotačním nosiči trysek. [3; 43; 44; 45]



Obrázek 22 - druhy trysek: 1, přímá; 2, konvenční dlouhá Venturiho; 3, laminární Venturiho; 4, dvojitá Venturiho; 5, vysokotlaká; 6, vysokorychlostní

Paprsek vycházející z trysky má pak určitou strukturu podle stavu proudění.



Obrázek 23 - popis zón tryskané vody

V strojní sestavě je pak dále možné najít další zařízení, jako je nezbytné zabezpečovací zařízení, kontrolní senzory, ovládací panel zařízení a podobně. Dalšími možnými doplňky jsou mimo jiné filtrační zařízení nebo robotické manipulátory pro trysky.

Efektivitu tryskání vodou ovlivňuje řada faktorů. Mezi nejdůležitější se řadí typ a přilnavost nečistoty, zkušenosti operátora, přístupnost a tvar čištěné plochy. Ruční produktivita čištění tryskáním vodou se pohybuje přibližně kolem 4-15 m<sup>2</sup> za hodinu, u strojů a zkušenějších operátorů lze dosáhnout rychlostí vyšších. Stroje pak čistí rychlostí kolem 40 m<sup>2</sup> za hodinu.

Odpad z tryskání, především pokud čistíme starší nátěry, může obsahovat nebezpečné prvky, které se v minulosti přimíchávaly do barev. [3]

#### 3.3.4.3.3 Vlivy na okolí

Nejvýraznějším vlivem na okolí při tryskání vodním paprskem je hluchost. Ta se pohybuje kolem 100 dB a variuje dle tvaru konkrétního čištěného povrchu. Podle WHO (word health organisation) je zvuk nad 75 dB škodlivý pro lidi a nad 120 dB pak působí lidem bolest. Hodnoty stále trvajících zvuku by se pak, aby se nejednalo o zvukové znečištění, měly držet pod 65 dB. Při používání stroje by tedy ochrana sluchu měla být nutností a za zvážení stojí i odhlučnění pracoviště stacionárních strojů.

Dalšími emisemi je vodní pára. Při síle, kterou působí paprsek vody na povrch, dochází k výraznému zahřátí povrchu čištěného materiálu proměněním části kinetické energie na teplo. Toto teplo je částečně odvedeno odpařováním vody (přibližně 30%) a částečně pohlceno materiálem. Spolu s vodní párou také dochází k unášení mikročástic nečistot a jejich rozptýlu po blízkém okolí. Musíme však brát v potaz, že k rozptýlu dochází řádově méně než při tryskání suchými médii. [3]

#### 3.3.4.3.4 Ekologie

Z pohledu ekologie je tryskání vodou jedním z nejlepších způsobů vzhledem k poměru ceny a čistícího výkonu. Je vhodné především na velké členitější povrchy v místech s dostatkem vody. Pro pohon pumpy je potřeba motor s výkonem 80-500 kW, Spotřeba vody se pohybuje dle použití technologie od 500 – 30 000 litrů za hodinu.



## 4. Chemické čištění

Chemické čištění využívá k odstranění nečistot chemických procesů probíhajících na povrchu materiálu v důsledku reakce s přidanou chemikálií. Chemické odstraňování nečistot můžeme provádět ponorem, postřikem případně v parách dané chemikálie. Hlavní výhodou je dobré odstraňování mastnot.

Chemické čištění dělíme do těchto základních kategorií:

- Odmašťování
- Moření

### 4.1 Odmašťování

Odmašťování podle dělíme dle použitých chemikálií na:

- odmašťování v organických rozpouštědlech
- odmašťování v alkalických vodních rozpouštědlech
- odmašťování vodnými tenzidovými roztoky

Cílem odmaštění je především odstranění mastných nečistot pomocí jejich rozpuštění v chemikálii a zabránění sedimentace již rozpuštěné mastnoty na povrchu. Často se provádí těsně před povlakováním, neboť povrch materiálu zamašťujeme i dotykem.

Pomocí organických rozpouštědel jsme schopni očistit rychle a efektivně velké množství materiálu, organická rozpouštědla však nedokáží rozpustit většinu anorganických látek. Kvůli svým častým záporným vlastnostem jako je hořlavost, toxicita a další se hromadně rozšířily jen některé. EU navíc v rámci nových nařízení omezuje jejich používání se snahou jejich úplného vypuštění z výroby, v čištění jsou ale zatím stále nenahraditelné. Jejich účinnost lze zvednout přidáním organických emulgátorů, které při oplachu vytvoří vodnou emulzi z nečistot a emulgátorů, jejich filtrace je však komplikovaná. [46; 47; 48; 49]

Alkalické vodné roztoky jsou často používané pro odmašťování. Jedná se zpravidla o vodní lázeň, ve které jsou alkalické látky rozpuštěné a pro větší efektivitu je ohřívána na vyšší teplotu kolem 70–90 °C. Nejčastěji se k čištění používá roztok hydroxidu sodného (NaOH) nebo fosforečnanu draselného ( $K_3PO_4$ ) smíchaného s vodou. Lázeň je potřeba monitorovat, neboť v sobě emulguje tuky. V určité koncentraci se roztok nečistotami přesytí a již neváže další nečistoty do sebe efektivně. Pro další zvýšení efektivity lze využít elektrolýzy, musíme ale dávat pozor, abychom negativně neovlivnili vlastnosti materiálu vodíkovou křehkostí. [46; 48; 49]

Tenzidové prostředky: Tenzidy jako takové pouze snižují povrchové napětí na čištěném povrchu, hromadí se na fázovém rozhraní a usnadňují odstraňování nečistot. Čistící účinek mají další, do lázně přidávané látky. Dohromady s nimi se jedná o detergentní směs. Tenzidy se dělí na nejrozšířenější anionické, které mají záporný náboj, kationické s kladným nábojem, neutrální a amfoterní s oběma náboji. "Molekula tenzidů se skládá z polární hydrofilní a nepolární hydrofobní části. Tenzid se nepolárním koncem naváže na nepolární nečistotu, v důsledku toho jsou částice nečistot obklopeny tenzidem, odstraněny z povrchu materiálu a dispergovány v kapalině, obvykle ve vodném roztoku". [50] Tenzidové prostředky jsou dobře čistitelnými a potřebují nižší ohřev než alkalické roztoky, ekologicky se jedná o nejpříjemnější chemické čistící prostředky. [46; 50]

## **4.2 Moření**

Moření odstraňuje anorganické látky, rzi a okuje z povrchů kovů a slitin pomocí mořidla. Mořidlo je nejčastěji silná kyselina, případně různé směsi kyselin, nebo pro amfoterní materiály i hydroxidy, vždy však záleží na mořeném materiálu. Moří se ponořením do mořící lázně. Pro správné moření je pak potřeba zvolit správnou chemikálii a její koncentraci v lázni. Čas, který prvek stráví v lázni, je přímo úměrný úbytku materiálu z něho. Po operaci nám v lázni zůstanou nečistoty ve formě kalu, ten je považován kvůli obsahu kyselin a solí kovů za nebezpečný odpad. Je tedy potřeba ho neutralizovat nebo ukládat na speciální skládky. Výjimkou je kal z procesu moření kyselinou dusičnou, který se prodává zpracovatelům hnojiv. Odrezování a odkapování jsou pak speciálními případy moření. Odkapování odstraňuje tenké povrchové oxidické vrstvy a aktivuje povrch před následným galvanickým pokovením. Odrezování odstraňuje pouze zkorodované části kovu, oproti moření se může provádět i pouhým nanášením či postřikem. Některá mořidla není ani nutné po působení oplachovat. [46; 48; 49; 51]

## **4.3 Ekologie chemického čištění**

Tyto procesy často pracují se silnými či mírně toxickými látkami, což doprovází složité nakládání s odpady, drahá ochranná opatření a nutnou kontrolu procesů. Z pohledu ekologie jsou tedy méně preferovanými, nicméně velmi efektivními a v některých případech i nenahraditelnými procesy při výrobě, což je důvod jejich stálé existence a používání. Ze všech druhů čistících prostředků mají obzvláště velký dopad na životní prostředí ty s acetonem, trichlorethylenem a dalšími organickými látkami, především rozpouštědly.

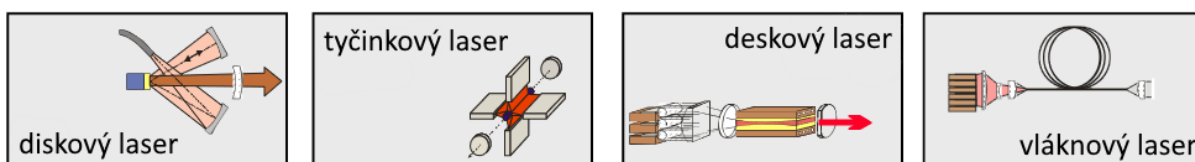
## 5. Speciální metody odstraňování nečistot

### 5.1 Laser

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, zkráceně laser je silný a koncentrovaný paprsek světla. Nejčastěji se lasery dělí dle typu aktivního prostředí (látky, která obsahuje oddělené kvantové energetické hladiny elektronů). Zdroj záření dodává do aktivního prostředí energii, aby mohly elektrony přeskočit na vyšší orbitální hladinu. Ty se pak přirozeně snaží vrátit na hladinu původní a při svém návratu vyzáří energii – foton. Tento foton pak prolétá aktivním prostředím a pomáhá dalším elektronům k návratu na jejich původní hladinu, tím vznikají další fotony. Tyto fotony se pak odrážejí mezi stěnami optického rezonátoru, které obklopují aktivní prostředí a pokračují v buzení dalších fotonů. Všechny tyto fotony pak můžou z aktivního prostředí projít v jednom bodě přes polopropustné zrcadlo jako silný paprsek světla.

Nejpoužívanějšími lasery v průmyslu jsou lasery s aktivním prostředím tvořeným pevnou látkou (Nd: YAG, Yb: YAG, Ti: safír) nebo plynem (He-Ne, Ar, Kr, CO<sub>2</sub>, KrO).

Pevnolátkové lasery se dále dělí dle tvaru aktivního krystalu na tyčinkové, deskové, diskové a vláknové. Jejich hlavní výhodou je možnost jednoduchého vedení paprsku z aktivního prostředí optickým kabelem, většinou bývají buzeny opticky (intenzivním světlem).



Obrázek 24 - typy pevnolátkových budičů laserů, volně přeloženo

Často se pro svou sílu používá i plyný CO<sub>2</sub> laser. Pro povrchovou úpravu musíme laser správně nastavit, aby nedošlo k poškození materiálu. Při velké síle laseru můžeme zahřívání materiálu snížit pulzací paprsku, aby měl materiál čas se mezi pulzy ochladit.

Pro čistící operace jsou jisté preferované vlnové délky, které přednostně narušují vazby mezi povrchem a nečistotou, tyto délky se nacházejí většinou v UV spektru.

Při jiných vlnových délkách odstraňování nečistot funguje na jiném, méně efektivním, principu. Laser ohřeje materiál pod nečistotami, ten se roztáhne, nečistota na povrchu popuká a zvýšená teplota na povrchu materiálu ji odpudí či spálí. Většina laserů potřebuje příkon od 3 do 150 kW, záleží hlavně na druhu laseru, který používáme. Rychlost čištění se odvíjí od šířky paprsku a jeho výkonu. Čištění laserem je velmi abrazivní, spaliny znečišťují životní prostředí a

dochází také k poškozování čištěného materiálu, pro opakované čištění tedy není vhodný. [52; 53; 54; 55]

## 5.2 Termické čištění

Termické čištění čistí organické nečistoty z dílů, většinou se jedná o odstranění nepovedených či nechtěných laků, silných vrstev nátěrů, tmelů apod. K tomu se většinou využívá procesů pyrolýzy a oxidace.

Pyrolýza je tepelný rozklad na jednodušší sloučeniny bez přístupu vzduchu a dalších oxidovadel. Dané nečistoty se rozloží na dále využitelné následující složky: pyrolýzní olej, pyrolýzní kapalina, pyrolýzní plyny a tuhý zbytek. Poměry těchto produktů záleží na složení nečistot, délce a teplotě procesu. Pyrolýzu můžeme dělit dle teploty na nízko, středně a vysokoteplotní – milníky jsou teploty 500 a 800°C. Pyrolýzní plyn i olej je možné dále využít jako palivo. Pro maximalizaci výtěžku využitelných látek, především kapalin, se používá pyrolýza blesková při atmosférickém tlaku a teplotách kolem 500 °C – páry se pak po svém vzniku chladí, aby došlo ke kondenzaci kapalin. Pomalejší proces, také zvaný karbonizace, probíhá při mírně vyšších teplotách než pyrolýza blesková. Proces má tlak nižší než atmosférický, a je zaměřen na maximální výtěžek plynu a pevného zbytku, například výroba dřevěného uhlí. Při těchto procesech se nejčastěji rozkládají nečistoty.

Proces je považován za ekologický, zbytky je možné následně využít a proces je při hromadném provádění rychlejší než abrazivní tryskání jednotlivých znečištěných součástí. Nevýhodou může být nechtěné nahličování materiálů. Oxidace probíhá po procesu.

Pokud operace oxidace a pyrolýzy probíhá najednou, jedná se o spalování či zplyňování. Technologie je obdobná pyrolýze jen je v procesu přítomný kyslík. Hlavním vedlejším produktem tohoto procesu je pak plyn.

Spotřeba procesu se mění dle použité teploty, pece a druhu použití. Spotřeba se přibližně pohybuje kolem 60 kWh na 200 kilogramů za hodinu pro kontinuální proces, kdy pouze udržujeme teplotu. Není započítána energie pro roztopení pece. [56] Nutno dodat, že vyrobené pyrolýzní plyny se často spalují přímo v procesu pro snížení energetické náročnosti procesu. [57; 58; 59]

## 5.3 Čištění tlakovou vodou

Oplach vodou pod tlakem je velmi podobný otryskávání vodou, rozdílem jsou jen nižší nároky na použitou technologii, tlaky vody, nástroje a provoz.

**Čištění vodou** (water cleaning – WC): Použití tlakové vody vypouštěné z trysky k odstranění nežádoucích nečistot z povrchu. WC se dále dělí na

- Čištění nízkotlakou vodou (low pressure water cleaning – LP WC), prováděné při tlaku nižším, než je 34 MPa (5 000 psig) se také nazývá "mytí silou" nebo "tlakové mytí". Spotřeba vody se u této technologie pohybuje mezi 10 až 300 litrů na hodinu
- Vysokotlaké čištění vodou (high pressure water cleaning – HP WC). K němu dochází při tlacích od 34 do 70 MPa (5 000 až 10 000 psig). [35]

## 5.4 Čištění vodní parou

Čištění vodní parou probíhá běžně o tlaku 10–12 MPa, výhodou je rychlejší schnutí a odstranění většího množství ve vodě rozpustných kontaminantů než při použití pouze vody. Nevýhodou je větší spotřeba energie způsobená nutností výroby vodní páry.

## 5.5 Mikro a nano bublinky

Čištění pomocí mikro a nano bublinek vzduchu probíhá jejich vypouštěním na čištěný díl. Objekt je ponořený v kapalně lázni a jsou na něj vypouštěny bublinky v obrovském množství, kolem 10 až 100 milionů bublinek vytvořených na litr kapaliny. Bublinky je jednoduché a levné vytvořit, operace proto nepotřebuje velké množství energie pro čištění. Bylo zjištěno, že bublinky dokážou na svůj povrch přichytit mastnotu a spolu s sebou ji vynést na povrch lázně. Pokud prasknou, tak okolní kapalina vytvoří náraz na povrch čištěného materiálu, a je tak schopna odstraňovat nečistoty. Efektivitu lze zvýšit použitím ultrazvuku při procesu čištění. Při lehké nadsázce lze tento proces považovat za opačný k použití kavitačních trysek při tryskání vodou. [60]

## 5.6 Ultrazvuk:

Ultrazvukové čištění využívá k čištění akustických vln šířených v určitém prostředí, většinou kapalném. Tato technologie vyžaduje složité technické zařízení, které může být v závislosti na čištěném materiálu poměrně ekonomicky náročné. Ultrazvukové vlny se budí pomocí generátoru, který je přichycen na nádrži s kapalinou, ve které je ponořen čištěný materiál. K buzení se používá piezoelektrického efektu, který tvoří pulzující napětí. Elektrickou energii pomocí piezokrystalu změním na mechanickou, potom ji zesílíme pomocí rezonátoru do takové síly, aby se vlnění předalo do kapaliny v dostatečné míře pro správný čistící účinek. Ultrazvuk dosahuje kvalitního a konzistentního vyčištění na celé ploše, i ve složitých záhybech. Tuto technologii lze kombinovat s celou řadou dalších technologií. Je velmi

ekologická, neboť stačí pouze malé množství energie na buzení vlnění a kapalina, která bude vlnění přenášet. [61; 62]

## 6. Praktická část

Cílem praktické části bylo porovnat vybrané technologie z hlediska jejich ekologické zátěže, nákladů na provoz, rychlosti a kvality čištění. Měření bylo prováděno na vzorcích dostupných na místě při předvádění strojů.

### 6.1 Měřicí zařízení

Pro měření jsem použil následující zařízení.

#### 6.1.1 Recognoil 2W

Přístroj Recognoil 2W (zkráceně R2W) je měřicí přístroj, který bezkontaktně a bez nutnosti příprav povrch dílu, vizualizuje a kvantifikuje výskyt nečistot na povrchu. Jedná se o mobilní pistolí, která měří fluorescenční vyzařování povrchů, toho se využívá hlavně při měření mastnot, které po osvětlení září nejvíce, ale i pro měření dalších, převážně organických nečistot. Fluorescence je založena na samovolném svícení vyvolaném elektromagnetickým zářením, tedy na fotoluminiscenci. Jedná se o fyzikální proces, při kterém je světlo vyzářeno poté, co bylo látkou absorbováno. Intenzita fluorescence udává, kolik světla (fotonů) je emitováno. Z toho i vychází měřená hodnota F.U. (fluorescence unit). Fluorescence vzniká absorpcí světla fluorofory (fluorescenčními molekulami). Absorbovaná energie vyzdvihuje elektrony na vyšší energetickou hladinu. Protože tento excitovaný stav je nestabilní, elektrony se vrací do základního stavu a vyzařují světlo. Menší část absorbovaných fotonů se přemění na pohyb a teplo. Kvůli ztrátám je vždy vyzářená energie menší než energie ozařování, vyzářené světlo má tedy delší vlnovou délku. Vzdálenost mezi maximy ozařování a záření se nazývá Stokesův posun. Pomocí velikosti Stokesova posunu je možné analyticky porovnávat látky mezi sebou, protože různé látky mají různé množství pohlceného záření. [63]

„Přístrojem měřená intenzita fluorescence s jednotkou F.U. - fluorescence unit je přímým přepočtem intenzity výstupu obrazového snímače při aktuálním expozičním času. Obrazový snímač měří každý pixel osmibitovou hloubkou s výstupními hodnotami 0 až 255. Přístroj Recognoil pak tyto hodnoty pro každý pixel přepočítává na ekvivalent konstantního expozičního času. Automatická expozice R2W se skládá ze tří různých expozičních časů. Finální výpočet F.U. pak podléhá ještě dalším výpočetním operacím, například převodní charakteristika dle aktuální teploty UV zářičů, kalibrační konstanty atd.“ (konzultace s Ing. Petrem Cháberou). [64]

Tento přístroj měří oblast o velikosti 19 x 13 mm, z ní následně vytvoří 2D a 3D bitmapu. U některých snímků naměřených přístrojem Reconoil 2W mohlo dojít ke zkreslení dat díky nedokonalému utěsnění senzoru vůči vniknutí okolního světla (měřený díl měl relativně složitý tvar pro přístroj) nebo zamaštěním během manipulace. Tuto chybu jsem minimalizoval měřením více hodnot a následnou selekcí dat. Selektce probíhala odstraněním snímků, které byly jednoznačně zkreslené během manipulace se zařízením.



Obrázek 25 - měřící přístroje: a, Reconoil 2W; b, Mitutoyo z řady SJ

### 6.1.2 Drsnoměr Mitutoyo SJ 301 s detektorem 178-392

Tento drsnoměr měří drsnost povrchu tažením diamantového hrotu po povrchu materiálu. Volné rameno je vtahováno do přístroje motorkem, a přitom jsou zaznamenávány výchylky od referenční roviny. Hrot má velikost pár mikronů a je nejčastěji z diamantu nebo jiné tvrdé substance. Čím je plocha špičky hrotu menší, tím přesnějšího měření je schopný. Přesnost nezávisí pouze na hrotu ale i na dalších součástkách stroje.

Přístroj následně sám táhne hrot po materiálu na předem nastavené vyhodnocované délce a hrot přenáší přes osu drsnost do snímače. Ten pohyb zpracuje do elektrických signálů. Existuje více typů převaděčů, nepoužívanějšími jsou cívkové, odporové piezoelektrické, laserové. Počet naměřených hodnot, ze kterých je sestavena křivka, záleží na rychlosti posunu ramínka a rychlosti měření. Přesnost výšky bodu křivky ovlivňuje druh kódování. Dvanáctibitové kódování má kolem 4 000 možných výšek, šestnáctibitové kolem 65 000. Aby bylo dosaženo normované přesnosti, je vždy maximální rozdíl výšek, které lze přístrojem změřit, pevně dán.

[65]



Přístrojem jsem vyhodnocoval hodnoty Ra a Rz. Ra je aritmetická střední odchylka obrysu ze všech hodnot, Rz je průměr z pěti nejnižších a pěti nejvyšších bodů měření. Vyhodnocovací délka u všech měření byla  $\lambda_c = 0,8$  mm.

## **6.2 Strojní zařízení**

### **6.2.1 Tryskací stroj na suchý led IB7/40 Advance**

Technologii tryskání pomocí suchého ledu zastupoval stroj IB7/40 Advance (obrázek 16) od firmy Kärcher. Jedná se o nejvyšší model z řady Kärcheru, který dle parametrů potřebuje k maximálnímu výkonu  $3,5 \text{ m}^3/\text{min}$  bezolejného suchého vzduchu při tlaku 10 bar. Při nejvyšším nastavení spotřebuje 50 kg/h suchého ledu. Stroj samotný potřebuje 0,6 kW pro provoz. Stroj potřebuje k provozu kompresor, který vyrábí tlakový vzduch a zajišťuje jeho kvalitu. Kompresor s potřebnými parametry pro provoz tohoto stroje společně s přístrojem pro tryskání suchým ledem potřebuje příkon kolem 30-40 kW.

Stroj pro tryskání suchého ledu byl ve všech experimentech nastaven na spotřebu ledu 50 kilogramů za hodinu při tlaku 0,73 MPa.

### **6.2.2 Stroj pro tryskání ultravysokotlakou vodou Ecomaster MK3**

Technologii tryskání ultravysokotlakou vodou zastupoval stroj od firmy Woma, Ecomaster MK3 (obrázek 17). Jedná se o mobilní stroj pro ruční i strojové tryskání vodou při tlaku až 3 000 bar, jeho výkon odpovídá maximálnímu výkonu, kterým je možno tryskat za pomoci manuálních rozstřikových zařízení. Stroj je zároveň mobilní a je možno ho připojit na tažné zařízení. Pro tlakování vody používá pumpu DDP WOMA 150M (obrázek 18 b) s příkonem až 120 kW. Pumpu pohání 150kW motor Volvo Penta D7C TA. S tímto strojem byl použit šestiproudý nosič trysek WOMA TD 3 000-SCS (obrázek 21). Trysky jsou v nosiči umístěny na dvou soustředných kružnicích po třech, a jsou nakloněny pod úhlem, který zajišťuje rotaci hlavy.

### **6.2.3 Rotační šroubovák PNS 300 A1.**

Stroj pro tryskání vodou byl nastaven na spotřebu vody 20 l/min při tlaku 2 500 bar

Technologii kartáčování zajišťoval nerezový drátěný okružní kartáč GRAPHITE 57H601 (obrázek 26 a) s maximální rotací 4 500 otáček za minutu, a s obvodem 50 mm. Poháněl ho rotační šroubovák PARKSIDE PNS 300 A1 (obrázek 26 b).

Vrtací šroubovák byl nastaven na 1600 otáček/min, točivý moment byl 40 Nm při příkonu 0,3 kW.



a,



b,

Obrázek 26 - a, nerezový drátěný okružní kartáč GRAPHITE 57H601; b, PARKSIDE PNS 300 A1

#### 6.2.4 Teoretický model pyrolýzní pece

Teoretická porovnávací pyrolytická pec má spotřebu 480 kWh na 35 roštů s plochou 70 m<sup>2</sup> s cyklem dlouhým 8 hodin. V energetické náročnosti není započítána energie na roztopení pece. Váha roštu je v rozpětí 35 – 45 kilogramů.

Nastavení strojů	Woma ecomaster MK3	Kärcher IB7/40 advance + kompresor ATMOS, PDP28 + D	PARKSIDE PNS 300 A1 + GRAPHITE 57H601	Teoretická pyrolytická pec vakuová
Výkon	102 kW na pumpě = 25,5 l/hod nafty	36 kW kompresor = 4,5 l/hod nafty 0,6 kW tryskací stroj	0,3 kW elektřiny	60 kW za hodinu [56]
Další	1 200 litrů vody za hodinu	50 kilogramů suchého ledu za hodinu -> 19 kW	Náhradní kartáčovací kotouče, 60 Kč za kus	Nejsou
Spotřeba	1 200 litrů vody + 25,5 litrů nafty za hodinu	4,5 litru nafty + odpadní CO <sub>2</sub> + 19,6 kW za hodinu	0,3 kW + 60 kč/opotřebení	480 kWh za 8 hodinový cyklus

Tabulka 2 – porovnání spotřeby použitých strojních zařízení

### 6.3 První měření

V prvním měření jsem porovnával technologie kartáčování a tryskání povrchu pomocí suchého ledu a ultravysokotlaké vody. Měření 1 probíhalo na nosnících ze slitiny železa pokrytých rzi se zbytky betonu. V měření 1 jsou porovnávány pouze technologie tryskání povrchu pomocí suchého ledu a ultravysokotlaké vody. Měření 2 a 3 probíhalo na plechu z hliníkové slitiny. U obou vzorků bohužel není známý konkrétní materiál. Vzorek 3 byl cíleně zamaštěn pomocí oleje WD-40.

Kvůli velkému záběru technologie tryskání ultravysokotlakou vodou a nerovnoměrnému znečištění vzorku 1 nebylo proveditelné porovnání technologií se stejným výchozím znečištěním. Počáteční hodnoty znečištění povrchu vzorku 1 byly rozdílné.

#### 6.3.1 Vzorek 1



Obrázek 27 - vzorek 1; a, ocelový nosník před čištěním; b, nosník po čištění pomocí ultravysokotlaké vody; c, nosník po tryskání suchým ledem

### 6.3.2 Vzorek 2 a 3



Obrázek 28 - znečištění vzorků 2 a 3

Druhým vzorkem byly hliníkové plíšky plochy 45×100 mm s tloušťkou 0,6 mm. Čištěné byly tryskáním ultravysokým tlakem vody, tryskáním suchým ledem a kartáčováním.

Vzorek tři byl vyhotoven ze stejného materiálu jako vzorek 2 s tím rozdílem, že plocha byla cíleně zamaštěna olejem WD40, aby byly možné zjistit účinky technologií při čištění mastnot.

## 6.4 Druhé měření

Druhé měření probíhalo ve firmě F. X. MEILLER ve Slaném. Firma se zabývá mimo jiné katarforézním lakováním. Cílem bylo porovnat technologie čištění roštů pyrolýzou s tryskáním ultravysokotlakou vodou.

Technologie byla porovnáována s pyrolýzou, která nebyla dostupná na místě, porovnání s pyrolýzou je tedy jen v teoretické rovině bez změřených hodnot čistoty.

### 6.4.1 Vzorky 4, 5 a 6

Jednalo se o různé vzorky z práškové lakovny s řadou vrstev barvy. Vzorky byly čištěny technologií tryskání ultravysokotlakým vodním paprskem a následně porovnány s pyrolýzním procesem čištění.

U vzorků 4, 5 a 6 nemělo smysl kvůli velikosti vrstev znečištění měřit drsnosti povrchu.

Jednalo se o kruhový díl, dále vzorek 4 (obrázek 29 a, b) a dva lakovací rošty, bíle znečištěný rošt, dále vzorek 5 (obrázek 30 a, b) a rošt znečištěný černým lakem, dále vzorek 6 (obrázek 30 a, c).





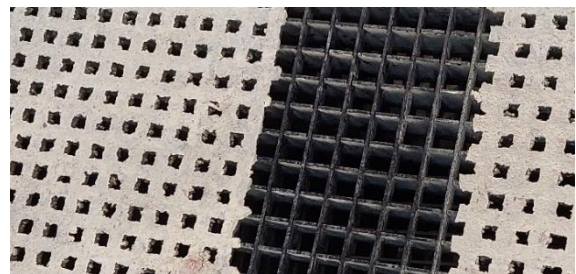
a,

b,

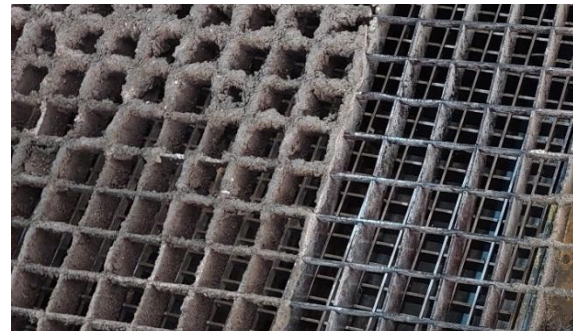
Obrázek 29 – vzorek 4: a, před čištěním; b, nánosy barvy po čištění



a,



b,



c,

Obrázek 30 – vzorky 5 a 6: a, před čištěním; b, vzorek 5 po čištění vodou; c, vzorek 6 po čištění vodou

## 6.5 Třetí měření

Ve třetím měření jsem zkoumal vzorky 7 a 8. Jednalo se o výrobky firmy, která dlouhodobě používá k tryskání svých produktů ocelový drát. Cílem bylo porovnat ovlivnění povrchové vrstvy materiálu EN AW 6082 vzorku 7 a 8.

U těchto dílů bylo problémové provádění měření drsnosti a čistoty povrchu kvůli jejich složitému tvaru. Proto bude na následujících snímcích označeno místo měření.

### 6.5.1 Vzorek 7



Obrázek 31 – vzorek 7: a, před čištěním; b, tryskán ocelovým drátem; c po tryskání ultravysokotlakou vodou

K porovnání s čištěním ultravysokotlakým tryskáním vodou jsem měl k dispozici již sekaným ocelovým drátem otryskaný díl. Kvůli složitému tvaru a malým rozměrům vzorku 7 bylo měření čistoty, drsnosti a jeho upnutí složité.

### 6.5.2 Vzorek 8

Vzorek osm byl výkovek ve tvaru podkovy, který byl po výrobě mořen. Porovnával jsem zdrsnění povrchu a změnu jeho čistoty po otryskání vodou.



Obrázek 32 - podkova: a, před tryskáním, mořena; b, po tryskání UHPWJ



## 7. Výsledky a diskuse

### 7.1 Výsledky prvního měření

#### 7.1.1 Výsledky čištění 1. vzorku

Vzorkem 1 byly železné slitiny se rzi a zbytky betonu

##### 7.1.1.1 Energetická náročnost a efektivita

Doba čištění zvolené oblasti jednoho nosníku se při použití tryskání vodou pohybovala okolo 20 s (obrázek 27 b), doba čištění pomocí technologie tryskání suchým ledem byla pouze 12 s (obrázek 27 c).

Pokud porovnáme plochy, které byly vyčištěny, dostaneme při tomto nastavení pro ultravysokotlaké vodní tryskání vyčištěnou plochu kolem 150×650 mm, což odpovídá  $4\,875\text{ mm}^2/\text{s} = 17,6\text{ m}^2/\text{h}$ .

Přepočteme-li zdroje na  $\text{m}^2$ , bylo pro čištění potřeba dodat 5,8 kWh energie pro pumpu na přečerpání 68 l vody, motor při dodávání energie spotřeboval přibližně 1,45 litrů nafty.

Technologií tryskání suchým ledem byla očištěna plocha velikosti 50×80 mm za 12 sekund, to odpovídá  $333\text{ mm}^2/\text{s} = 1,2\text{ m}^2/\text{h}$ .

Na  $\text{m}^2$  bylo spotřebováno odhadem 3,8 litrů nafty v kompresoru a 42 kilogramů suchého ledu.

Pro výrobu uvedeného množství suchého ledu je potřeba přibližně 16 kWh elektrické energie.

Zdroje na $\text{m}^2$	Energie (kWh)	čistící medium	Nafta (l)	Čas (min)
Woma ecomaster MK3	5,8	Voda – 68 l	1,5	3,4
Kärcher IB7/40 advance + kompresor ATMOS, PDP28 + D	30	Suchý led – 42 kg	3,8	50

Tabulka 3 – zdroje potřebné na  $\text{m}^2$  u vzorku 1

##### 7.1.1.2 Náklady:

Průměrná cena litru nafty v ČR za červenec je 47,73 Kč. To znamená že přibližná cena za naftu pro technologii tryskání vodou bude 72 Kč na  $\text{m}^2$ , k tomu musíme připočíst spotřebovanou vodu. Pitná kohoutková voda se aktuálně (10.8.2022) na burze pohybuje kolem  $87,6\text{ Kč}/\text{m}^3$ , na metr čtvereční je potřeba zhruba 68 litrů. Z toho vyplývá že pro  $1\text{ m}^2$  bude voda stát zhruba 6 Kč. Přibližná celková cena za  $1\text{ m}^2$  je přibližně 78 Kč. Pro technologii tryskání suchým ledem bude pak cena nafty 182 Kč a suchého ledu pak 40 korun na jeden kilogram. [69] Cena 42 kg

suchého ledu pak vychází na 1 680 Kč. Celkové náklady na 1 m<sup>2</sup> se pak pohybují kolem 1 862 Kč.

Náklady na m <sup>2</sup> v Kč (přibližné k 10.8.2022)	Naftový motor	Elektrický pohon
Technologie tryskání suchým ledem	1 862 Kč	1 988 Kč
Technologie tryskání ultravysokotlakou vodou	78 Kč	66 Kč

*Tabulka 4 - náklady na m<sup>2</sup> u vzorku 1*

V tabulce počítám s aktuální cenou elektřiny na burze ke dni 10.8.2022 (1 kWh = 10,25 Kč) a jedná se pouze o přepočítání spotřeby elektřiny z výkonu.

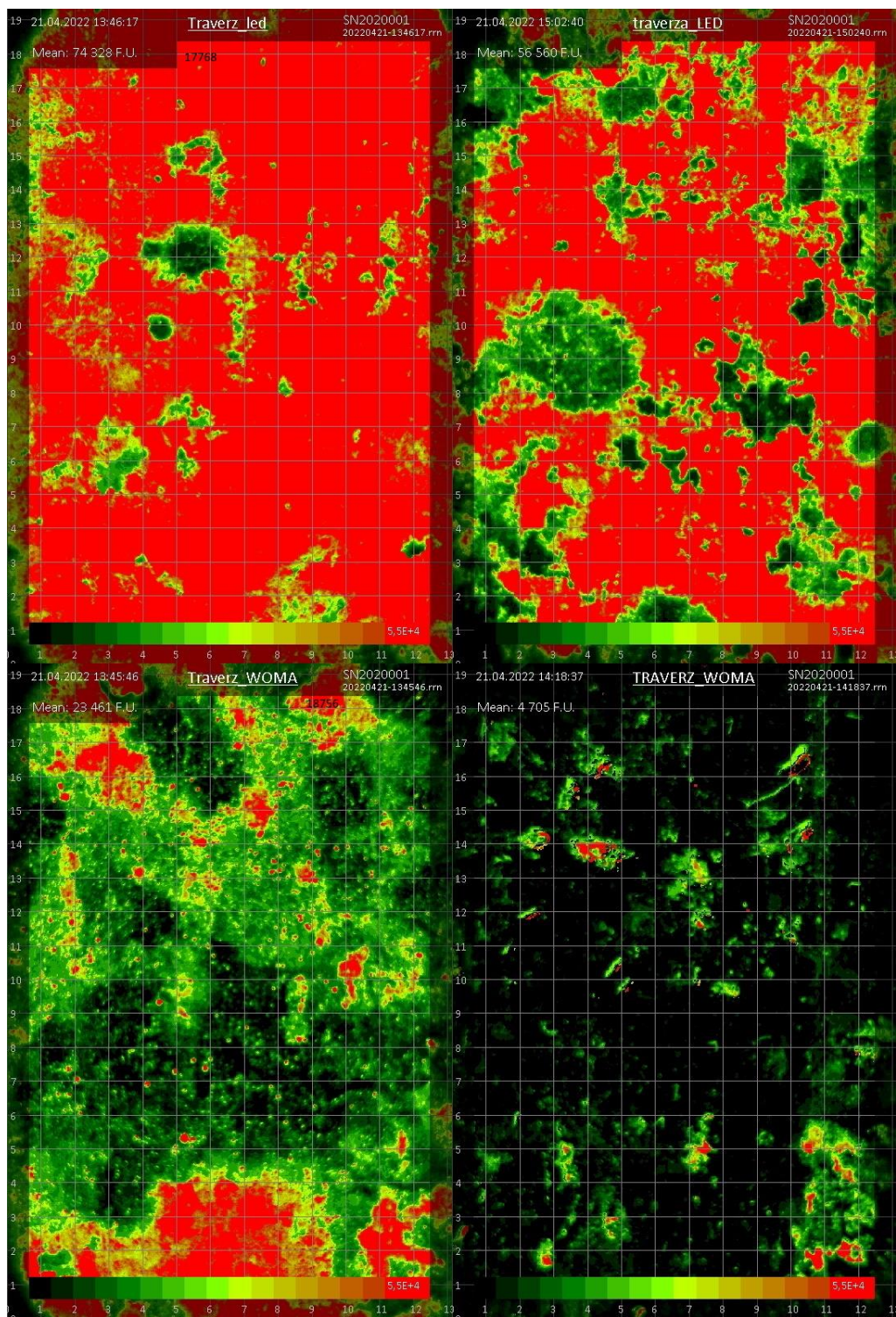
### **7.1.1.3 Čistota povrchu**

Kvalita čištění povrchu byla měřena přístrojem Recognoil 2W, jak jsem výše zmínil vzorek 1 neměl konzistentní znečištění po celé jeho ploše a z důvodu velkého záběru technologie ultravysokotlakého tryskání vodou nebylo možné měřit hodnoty znečištění povrchu ve vzájemné blízkosti. Proto můžeme na snímcích vidět rozdílné hodnoty počátečního znečištění povrchu. Na snímcích jsou jednotky F.U. barevně sjednocené, to znamená že stejná barva na všech snímcích značí stejné množství nečistot. Ze snímku můžeme vyčíst výrazně větší počáteční znečištění u vzorku tryskaného suchým ledem.

Zlepšení čistoty u technologie tryskání suchým ledem bylo 17 768 F.U. a u čištění ultravysokotlakým vodním paprskem bylo dosaženo zlepšení o 18 756 F.U.

Poznámky k měření 1: vzdálenosti a spotřeby energie jsou přibližné, jedná se pouze o orientační výpočet. Časy čištění byly určeny z pořízeného videozáznamu. Do časů a energií nejsou započítané časy a energie potřebné na zapnutí strojů a jejich uvedení do provozuschopného stavu. Kvůli nerovnoměrnému znečištění a míry oxidace nemělo smysl měřit drsnost povrchu u tohoto vzorku.





Obrázek 33 – porovnání čistoty, vlevo před čištěním, vpravo po čištění. Horní řada patří technologii tryskání suchým ledem, dolní řada patří technologii tryskání ultravysokotlakou vodou

## 7.1.2 Výsledky čištění 2. vzorku

Vzorek 2 byl hliníkový plech bez cíleného zamaštění.

### 7.1.2.1 Energetická náročnost a efektivita

Celková čištěná plocha u čištění technologiemi ultravysokotlakou vodou a suchým ledem byla přibližně 4 500 mm<sup>2</sup>, u kartáčování drátěným okružním kotoučem se dala bezpečně vyčistit pouze menší plocha 80×35 mm.

Čištění pomocí Ultravysokotlaké vody zabralo zhruba 4 sekundy, plech se totiž pod silou vodních paprsků ihned ohnul a z bezpečnostních důvodů byl proces čištění ukončen, další čištění jsme poté na vzorku již neprováděli. Proces čištění suchým ledem probíhal bez upnutí, vzorek byl pouze držen v ruce. Čas čištění byl zhruba 8 sekund. Kartáčovaný vzorek byl čištěn přibližně 20 sekund.

Pro tryskání vodou vychází rychlost čištění na 1 125 mm<sup>2</sup>/s = 4,05 m<sup>2</sup>/h.

Na m<sup>2</sup> by bylo potřeba při stejné rychlosti čištění 25,2 kWh energie odpovídajícím u tohoto stroje 6,3 l nafty a 297 l vody.

Pomocí suchého ledu byla otryskána plocha rychlostí 409 mm<sup>2</sup>/s = 1,47 m<sup>2</sup>/h.

Na m<sup>2</sup> by bylo spotřebováno 24,5 kWh energie v kompresoru odpovídající zhruba 3,1 litrů nafty při dodržení stejných rychlostí. Dále bylo na m<sup>2</sup> spotřebováno 34 kilogramů suchého ledu, což odpovídá zhruba práci 13 kWh při jeho výrobě.

Kartáčováním byla očištěna plocha 140 mm<sup>2</sup>/s = 0,5 m<sup>2</sup>/h.

Spotřeba na m<sup>2</sup> se tedy u kartáčování pohybuje kolem 0,6 kWh a nákladů na nové nástroje v čase opotřebení.

Zdroje na m <sup>2</sup>	Energie (kWh)	čistící medium	Nafta (l)	Čas (min)
Woma ecomaster MK3	25,2	Voda – 297 l	6,3	14,8
Kärcher IB7/40 advance + kompresor ATMOS, PDP28 + D	24,5	Suchý led – 34 kg	3,1	40,8
PARKSIDE PNS 300 A1 + GRAPHITE 57H601	0,6	Kotouč – 1 ks	-	120

Tabulka 5 - zdroje potřebné na m<sup>2</sup> u vzorku 2

### 7.1.2.1 Náklady:

Průměrná cena litru nafty v ČR za červenec je 47,73 Kč. To znamená že přibližná cena za naftu pro technologii ultravysokotlakého tryskání vodou bude 301 Kč na m<sup>2</sup>, k tomu musíme

připočíst spotřebovanou vodu. Pitná kohoutková voda se aktuálně (10.8.2022) na burze pohybuje kolem 87,6 Kč/m<sup>3</sup>, na metr čtvereční je potřeba zhruba 297 litrů. Z toho vyplývá že pro 1 m<sup>2</sup> bude voda stát zhruba 26 Kč. Přibližná celková cena za 1 m<sup>2</sup> je 327 Kč.

Pro technologii tryskání suchým ledem bude pak cena nafty 148 Kč a suchého ledu pak 40 korun na jeden kilogram. [69] Cena 34 kg suchého ledu pak vychází na 1 360 Kč. Celkové náklady na 1 m<sup>2</sup> se pak pohybují kolem 1 508 Kč.

Pro technologii kartáčování byly náklady na pořízení kotouče 60 Kč, energetické náklady pak při aktuální ceně elektrické energie na burze (aktuální cena ke dni 10.8.2022 kdy 1 kWh stála 10,25 Kč) 6,2 Kč. Pokud tedy budeme uvažovat měnění nerezového drátěného okružního kartáče při každém čtverečním metru, cena pak bude vycházet na 67 Kč

Náklady na m <sup>2</sup> v Kč (přibližné k 10.8.2022)	Naftový pohon	Elektrický pohon
Technologie tryskání suchým ledem	1 508 Kč	1 988 Kč
Technologie tryskání ultravysokotlakou vodou	327 Kč	285 Kč
Technologie kartáčování	-	67 Kč

Tabulka 6 - náklady na m<sup>2</sup> u vzorku 2

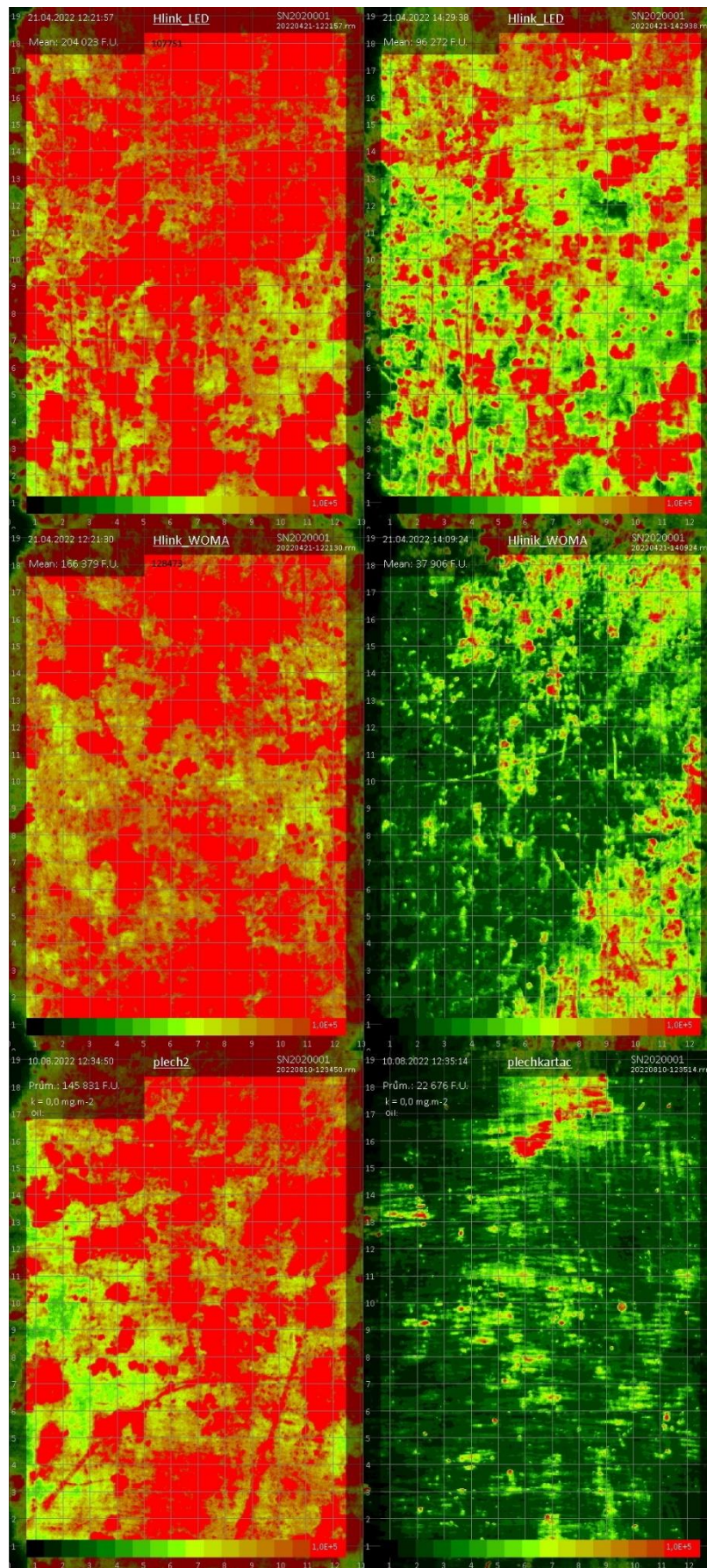
Poznámky k měření 2: Čísla mohou být zkreslená dalšími faktory, u technologie čištění suchým ledem mohlo vzniknout zkreslení efektivity a spotřebovaných zdrojů nevyčištěním celé plochy. U čištění ultravysokým tlakem vody došlo ke zkreslení efektivity, pro ni se jedná o příliš malý vzorek, který je menší než záběr trysky. Spotřeby energie jsou přibližné, jedná se pouze o orientační výpočet. Časy čištění byly určeny z pořízeného videozáznamu. Do časů a energií nejsou započítané časy a energie potřebné na zapnutí strojů a jejich uvedení do provozuschopného stavu. Drsnost vzorků po tryskání byly měřeny s větším časovým odstupem od měření, což mohlo způsobit mírné zkreslení hodnot.

#### 7.1.2.1 Čistota povrchu

Pomocí tryskání suchým ledem se dosáhlo zlepšení čistoty povrchu o 107 751 F.U., pomocí tryskání vodou se dosáhlo zlepšení čistoty o 128 473 F.U. a kartáčování zlepšilo čistotu povrchu o 123 155 F.U.

Na snímcích jsou opět jednotky F.U. barevně sjednocené, to znamená, že stejná barva na všech snímcích značí stejné množství nečistot.





Obrázek 34 – porovnání čistoty, vlevo před čištěním, vpravo po čištění. Horní řada patří technologii tryskání suchým ledem, střední řada patří ultravysokotlakému tryskáním vodou, dolní řada patří technologii kartáčování

### 7.1.2.1 Drsnost povrchu

Po očištění byl vzorek čištěný pomocí suchého ledu lokálně deformován, obsahoval řadu menších či větších důlků na svém povrchu, je možné, že tento jev byl zapříčiněn neupnutím vzorku při čištění. Vzorek po čištění vysokotlakou vodou byl ohnut v místě, kde končilo jeho podložení zhruba o 30° oproti jeho původní rovinné poloze, ale povrch mimo toto ohnutí nezaznamenal okem viditelné nerovnostní výkyvy. Na kartáčovaném vzorku byly okem zřejmé dráhy jednotlivých drátů ve směru rotace kotouče.

Drsnostní hodnoty byly průměrované z 11 měření, nejnižší a nejvyšší naměřené hodnoty byly ze souborů dat následně vyřazeny. Výsledné hodnoty Ra a Rz byly vytvořené průměrem z devíti měření. Průměrné drsnosti před čištěním byly  $1,01 \pm 0,34$  Ra a  $7,34 \pm 2,66$  Rz.

U vzorku tryskaného suchým ledem bylo výsledné  $0,78 \pm 0,22$  Ra a  $4,89 \pm 1$  Rz.

U vzorku tryskaného ultravysokotlakou vodou bylo výsledné  $0,67 \pm 0,08$  Ra a  $4,26 \pm 0,21$  Rz.

U kartáčovaného vzorku bylo výsledné  $0,68 \pm 0,15$  Ra a  $4,38 \pm 1,04$  Rz.

	Zlepšení čistoty (F.U.)	Drsnost povrchu (Ra)	Drsnost povrchu (Rz)
Suchý led	107 751	$0,78 \pm 0,22$	$4,89 \pm 1$
Ultravysokotlaká voda	128 473	$0,67 \pm 0,08$	$4,26 \pm 0,21$
Nerezový kartáčový kotouč	123 155	$0,68 \pm 0,15$	$4,38 \pm 1,04$

Tabulka 7 – porovnání výsledků měření vzorku 2

### 7.1.3 Výsledky čištění 3. vzorku

Vzorek 3 byl hliníkový plech bez cíleného zamaštění.

#### 7.1.3.1 Energetická náročnost a efektivita

Celková čištěná plocha technologiemi byla stejná, přibližně  $4\,500\text{ mm}^2$  u čištění vodou a suchým ledem, u kartáčování se drátěným okružním kotoučem dala bezpečně vyčistit pouze menší plocha  $80 \times 35\text{ mm}$ .

Čištění pomocí Ultravysokotlaké vody zabralo zhruba 6 sekund, tentokrát byl správně podložen a k prohnutí nedošlo. Proces čištění suchým ledem probíhal opět bez upnutí. Čas čištění byl zhruba 9 sekund. Kartáčovaný vzorek byl čištěn 28 sekund.

Pro tryskání vodou vychází rychlost čištění na  $750\text{ mm}^2/\text{s} = 2,7\text{ m}^2/\text{h}$ .

Na  $\text{m}^2$  by bylo potřeba při stejné rychlosti čištění 37,8 kWh energie odpovídajícím u tohoto stroje 9,5 litru nafty a 445 litrů vody.

Pomocí suchého ledu byla otryskána plocha rychlostí  $500 \text{ mm}^2/\text{s} = 1,8 \text{ m}^2/\text{h}$ .

Na  $\text{m}^2$  by bylo spotřebováno 20,3 kWh energie v kompresoru odpovídající zhruba 2,5 litrů nafty při dodržení stejných rychlostí. Dále bylo na  $\text{m}^2$  spotřebováno 28 kilogramů suchého ledu, což odpovídá zhruba práci 10,6 kWh při jeho výrobě.

Kartáčováním byla očištěna plocha  $100 \text{ mm}^2/\text{s} = 0,36 \text{ m}^2/\text{h}$ .

Spotřeba na  $\text{m}^2$  se tedy u kartáčování pohybuje kolem 0,84 kWh a nákladů na nové nástroje v čase opotřebení.

Zdroje na $\text{m}^2$	Energie (kWh)	čistící medium	Nafta (l)	Čas (min)
Woma ecomaster MK3	37,8	Voda – 445 l	9,5	22,2
Kärcher IB7/40 advance + kompresor ATMOS, PDP28 + D	20,3	Suchý led – 28 kg	2,5	33,3
PARKSIDE PNS 300 A1 + GRAPHITE 57H601	0,84	Kotouč – 1 ks	-	167

Tabulka 8 - zdroje potřebné na  $\text{m}^2$  u vzorku 3

### 7.1.3.2 Náklady:

Průměrná cena litru nafty v ČR za červenec je 47,73 Kč. To znamená že přibližná cena za naftu pro technologii ultravysokotlakého tryskání vodou bude 454 Kč na  $\text{m}^2$ , k tomu musíme připočíst spotřebovanou vodu. Pitná kohoutková voda se aktuálně (10.8.2022) na burze pohybuje kolem  $87,6 \text{ Kč}/\text{m}^3$ , na metr čtvereční je potřeba zhruba 445 litrů. Z toho vyplývá že pro  $1 \text{ m}^2$  bude voda stát zhruba 39 Kč. Přibližná celková cena za  $1 \text{ m}^2$  je 494 Kč.

Pro technologii tryskání suchým ledem bude pak cena nafty 120 Kč a suchého ledu pak 40 korun na jeden kilogram. [69] Cena 28 kg suchého ledu pak vychází na 1 120 Kč. Celkové náklady na  $1 \text{ m}^2$  se pak pohybují kolem 1 240 Kč.

Pro technologii kartáčování byly náklady na pořízení kotouče 60 Kč, energetické náklady pak při aktuální ceně elektrické energie na burze 8,6 Kč (aktuální cena ke dni 10.8.2022 kdy 1 kWh stála 10,25 Kč). Pokud tedy budeme uvažovat výměnu nerezového drátěného okružního kartáče při každém čtverečním metru, cena pak bude vycházet na 69 Kč

Náklady na $\text{m}^2$ v Kč (přibližné k 10.8.2022)	Naftový pohon	Elektrický pohon
Technologie tryskání suchým ledem	1 240 Kč	1328 Kč
Technologie tryskání ultravysokotlakou vodou	494 Kč	427 Kč
Technologie kartáčování	-	69 Kč

Tabulka 9 - náklady na  $\text{m}^2$  u vzorku 3

Poznámky k měření 3: Čísla mohou být zkreslená dalšími faktory, u technologie čištěním suchým ledem mohlo vzniknout zkreslení efektivity a spotřebovaných zdrojů nevyčištěním celé plochy. U čištění ultravysokým tlakem vody došlo ke zkreslení efektivity, pro ni se jedná o příliš malý vzorek, který je menší než záběr trysky. Spotřeby energie jsou přibližné, jedná se pouze o orientační výpočet. Časy čištění byly určeny z pořízeného videozáznamu. Do časů a energií nejsou započítané časy a energie potřebné na zapnutí strojů a jejich uvedení do provozuschopného stavu. Drsnost vzorků po tryskání byly měřeny s větším časovým odstupem od měření, což mohlo způsobit mírné zkreslení hodnot.

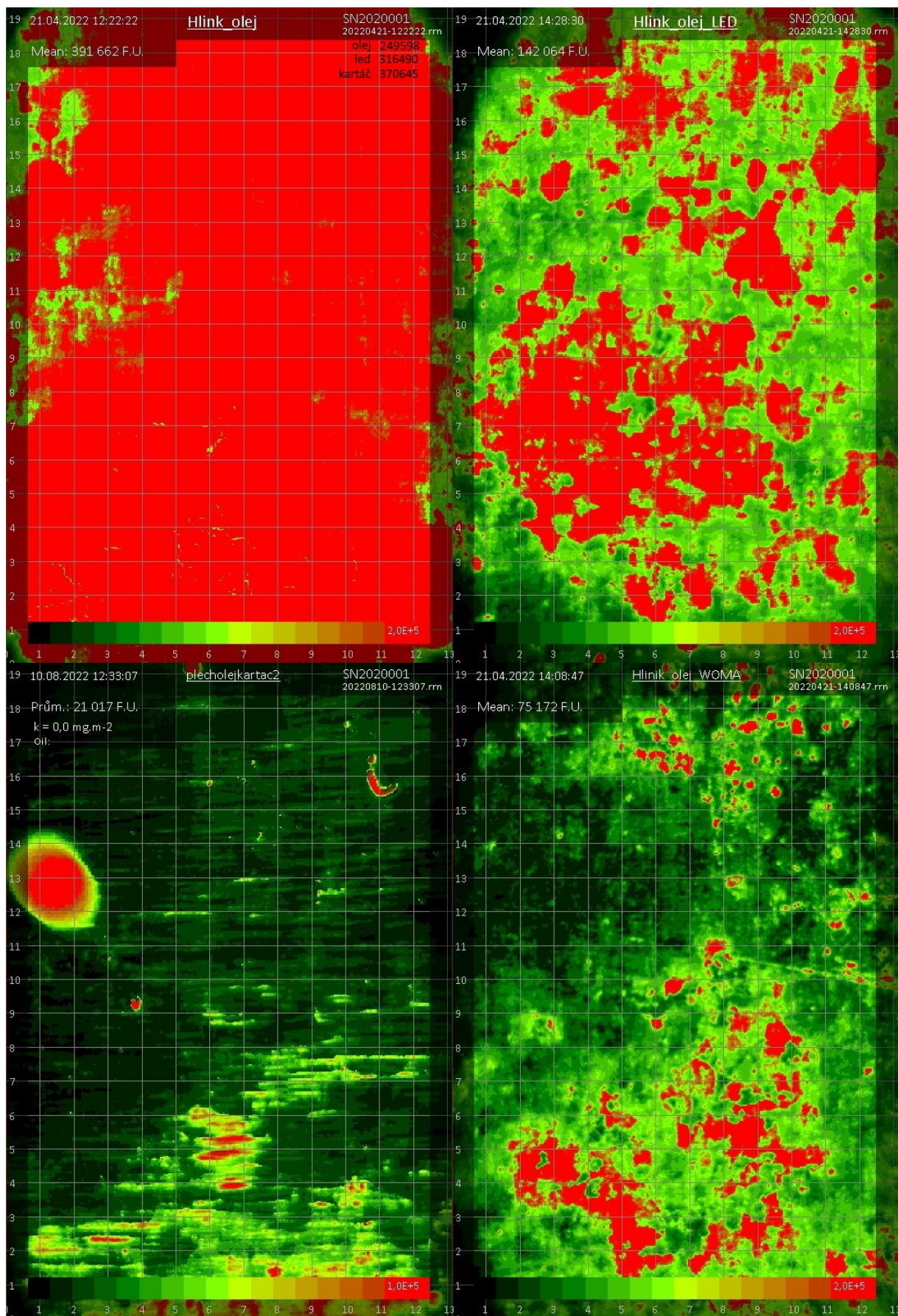
### **7.1.3.3 Čistota povrchu**

Protože při měření znečištění povrchu před čištěním se u některých snímků vyskytla chyba, budou následující vzorky porovnávány se snímkem před čištěním naměřeným v oblasti, kde následně probíhalo čištění suchým ledem. Hodnoty znečištění by se u ostatních vzorků neměli příliš lišit, neboť jejich cílené znečištění proběhlo stejným způsobem stejnou substancí.

Pomocí tryskání suchým ledem se dosáhlo zlepšení čistoty povrchu o 249 598 F.U., pomocí tryskání vodou se dosáhlo zlepšení čistoty o 316 490 F.U. a kartáčování zlepšilo čistotu povrchu o 370 645 F.U.

Na snímcích tentokrát nejsou jednotky F.U. barevně sjednocené, barevně sjednocené jsou pouze u snímků po vyčištění. Snímek před čištěním byl natolik znečištěn, že jeho stupnice je čtyřikrát zvětšena.





Obrázek 35 - porovnání čistoty, vlevo nahoře před čištěním, vpravo nahoře po tryskání suchým ledem, vlevo dole čištění kartáčováním, vpravo dole tryskání ultravysokotlakou vodou



#### 7.1.3.4 Drsnost povrchu

Po očištění byl vzorek 3 čištěný pomocí suchého ledu výrazně méně lokálně deformován než vzorek 2. Na kartáčovaném vzorku byly opět okem zřejmé stopy po čištění ve směru rotace kartáče.

Hodnoty drsnosti byly opět průměrované z 11 měření, nejnižší a nejvyšší naměřené hodnoty byly ze souborů dat následně vyřazeny. Výsledné hodnoty Ra a Rz byly vytvořené průměrem z devíti měření. Průměrné drsnosti před čištěním byly  $1,01 \pm 0,34$  Ra a  $7,34 \pm 2,66$  Rz.

U vzorku tryskaného suchým ledem bylo výsledné  $0,84 \pm 0,3$  Ra a  $5,92 \pm 1,89$  Rz.

U vzorku tryskaného ultravysokotlakou vodou bylo výsledné  $0,95 \pm 0,21$  Ra a  $5,7 \pm 1,73$  Rz.

U kartáčovaného vzorku bylo výsledné  $0,54 \pm 0,15$  Ra a  $3,35 \pm 0,74$  Rz.

Vzorky po tryskání ultravysokotlakou vodou a suchým ledem byly měřeny s větším časovým odstupem od měření, což mohlo způsobit mírné zkreslení hodnot.

	Zlepšení čistoty (F.U.)	Drsnost povrchu (Ra)	Drsnost povrchu (Rz)
Suchý led	249 598	$0,84 \pm 0,3$	$5,92 \pm 1,89$
Ultravysokotlaká voda	316 490	$0,95 \pm 0,21$	$5,7 \pm 1,73$
Nerezový kartáčový kotouč	370 645	$0,54 \pm 0,15$	$3,35 \pm 0,74$

Tabulka 10 – porovnání výsledků měření vzorku 3

## 7.2 Výsledky druhého měření

Jednalo se o kruhový díl, dále vzorek 4 (obrázek 36 a) a dva lakovací rošty, bíle znečištěný rošt, dále vzorek 5 (obrázek 36 b) a rošt znečištěný černým lakem, dále vzorek 6 (obrázek 36 c).

### 7.2.1.1 Energetická náročnost a efektivita

Pro vzorek 4 jsem bohužel nenaměřil čištěnou plochu, proto bude z kalkulačních kapitol vyřazen.

Pyrolýza ve vakuové peci trvá běžně 8–30 hodin. V peci je možné vyčistit při jednom cyklu více roštů, záleží na jejím objemu. Příkladově zde budu počítat s pyrolytickým čištěním v peci, která pojme 1 tunu materiálu na proces čištění trvajícím 8 hodin.

Rošt váží v závislosti na jeho materiálu a znečištění 30–45 kg při velikosti 1×2 m.

Při čištění roštů pyrolýzou můžeme předpokládat, že při vakuovém procesu budeme značně limitováni velikostí pece. Přibližně jsme schopni odbavit něco kolem 1 t za cyklus, to je zhruba 35 roštů za 8 h. Spotřebovaná elektrická energie v takovém případě je 480 kWh. Při přepočtu to znamená zhruba 6,9 kWh na m<sup>2</sup>. Příkladová pec čistí rychlostí zhruba 8,8 m<sup>2</sup> za hodinu.

Rozměry jedné čtvercové mezery u vzorku 5 byly 80×80 mm a u vzorku 6 100×100 mm. Očištění plochy 6×6 čtvercových mezer silně znečištěného vzorku 5 zabralo zhruba 45 sekund. očištěná plocha vzorku 5 měla velikost 230 400 mm<sup>2</sup>, čištění tedy probíhalo rychlostí zhruba 5120 mm<sup>2</sup>/s = 18,4 m<sup>2</sup> za hodinu. Spotřeba motoru čistícího stroje Woma ecomaster MK3 se na m<sup>2</sup> pohybovala zhruba kolem 5,6 kWh energie odpovídajícímu 1,39 l nafty, spotřeba vody byla 65,2 litrů na m<sup>2</sup>.

Vzorek 5 zdroje na m <sup>2</sup>	Energie (kWh)	čistící medium	Čas (min)
Woma ecomaster MK3	5,6	Voda – 65,2 litrů	3,3
Pyrolytická pec	6,9	-	6,8

Tabulka 11 - zdroje potřebné na m<sup>2</sup> u vzorku 5

Očištění plochy 5×6 čtvercových mezer zabralo středně znečištěného vzorku 6 zabralo zhruba 42 s, očištěná plocha měla velikost přibližně 300 000 mm<sup>2</sup>. Čištění tedy probíhalo rychlostí zhruba 7143 mm<sup>2</sup> za sekundu = 25,7 m<sup>2</sup> za hodinu.

Na m<sup>2</sup> bylo potřeba přibližně 4 kWh pro pumpu, čemuž odpovídá spotřeba 0,99 l nafty. Vody bylo na m<sup>2</sup> spotřebováno 46,7 litrů.

Vzorek 6 zdroje na m <sup>2</sup>	Energie (kWh)	čistící medium	Čas (min)
Woma ecomaster MK3	4	Voda – 46,7 litrů	3,3
Pyrolytická pec	6,9	-	6,8

Tabulka 12 - zdroje potřebné na m<sup>2</sup> u vzorku 6

#### 7.2.1.2 Náklady:

Průměrná cena litru nafty v ČR za červenec 2022 je 47,73 Kč, pitná kohoutková voda se aktuálně (10.8.2022) na burze pohybuje kolem 87,6 Kč/m<sup>3</sup>.

To znamená, že přibližná cena za m<sup>2</sup> při tryskání ultravysokotlakou vodou bude pro vzorek 5 bude 72 Kč a pro vzorek 6 jen 52 Kč.

Aktuální cena elektřiny na burze (10.8.2022) je 1 kWh za 0,41 eur = 10,25 Kč. Na 1 m<sup>2</sup> je tedy potřeba zhruba 72 Kč.

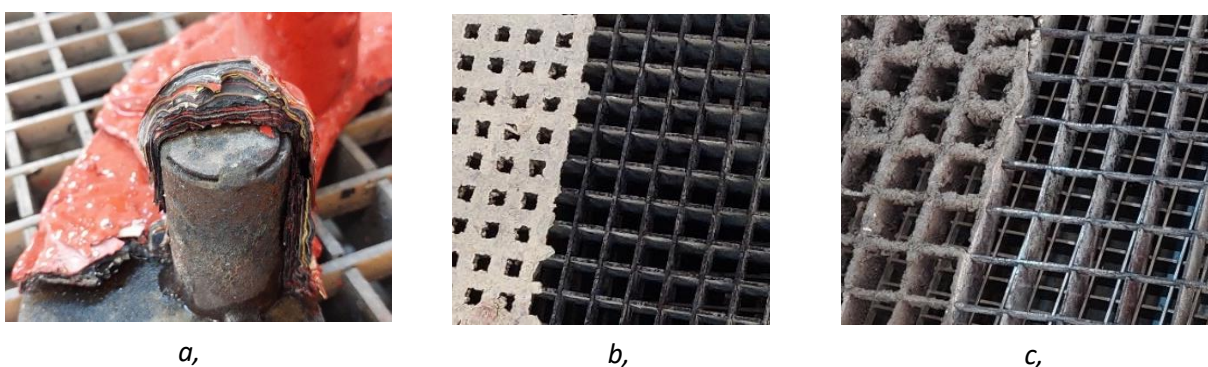
Náklady na m <sup>2</sup> v Kč (přibližné k 10.8.2022)	Naftový pohon	Elektrický pohon
Ultravysokotlaká voda vzorek 5	72 Kč	63 Kč
Ultravysokotlaká voda vzorek 6	52 Kč	45 Kč
Pyrolytické čištění	-	72 Kč

Tabulka 13 - náklady potřebné na m<sup>2</sup> u vzorků 5 a 6

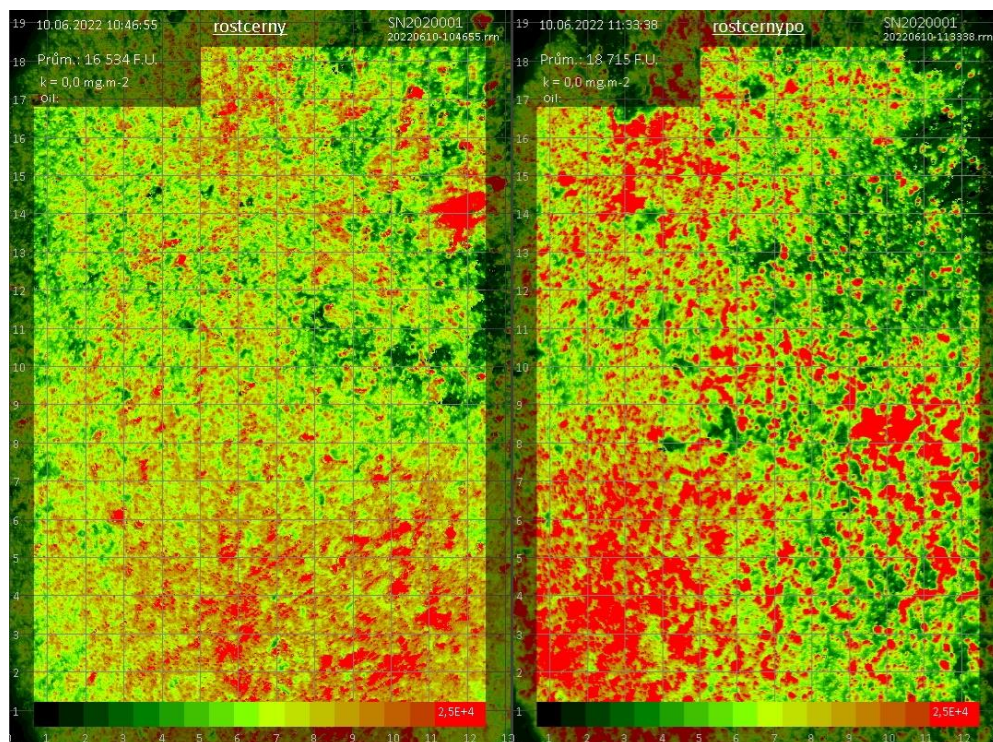
### 7.2.1.3 Čistota povrchu

Z vizuální kontroly po tryskání ultravysokotlakou vodou (obrázek 36) můžeme vidět, že byly odstraněny všechny vrstvy nečistot až na kov. Z pohledu čistoty povrchu došlo u vzorků 4 a 5 k výraznému zvýšení čistoty, u vzorku 6 došlo k odstranění vrstev barvy, ale podle měření pomocí zařízením Recognoil 2W vykazuje povrch vyšší znečištění než před začátkem čištění (obrázek 38).

U vzorků 5 a 6 byly hodnoty čistoty naměřeny na jejich bocích, u vzorku 4 na ploše s výstupky. Je možné, že u měření došlo ke zkreslení díky přítomným zbytkům vody na povrchu, které měřicí přístroj vyhodnocuje jako nečistotu.

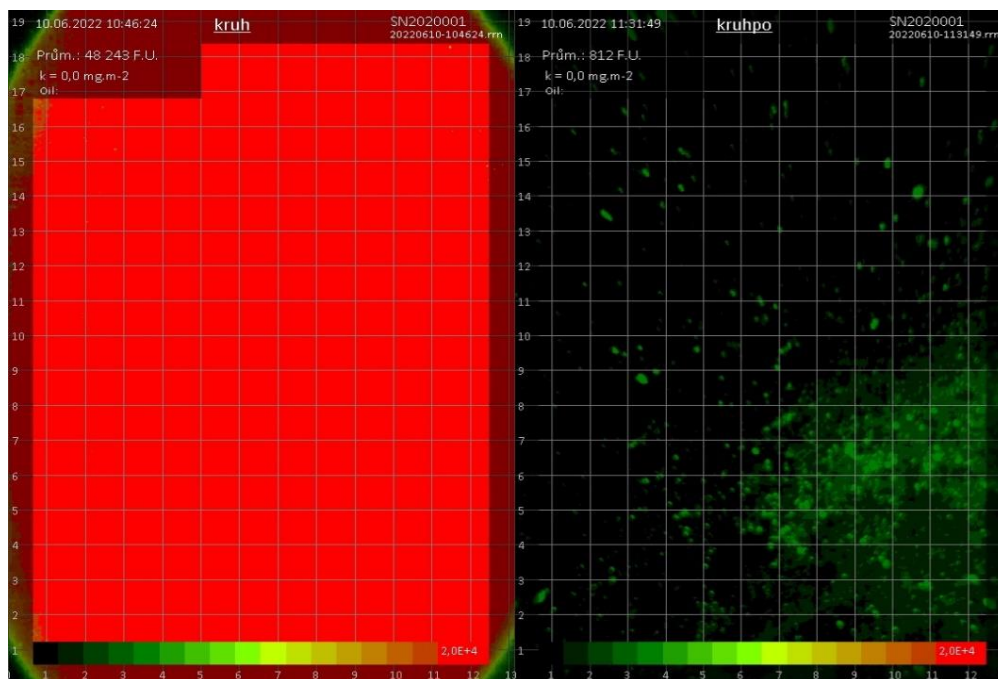


Obrázek 36 - vzorky po očištění; a vzorek 4; b, vzorek 5; c, vzorek 6

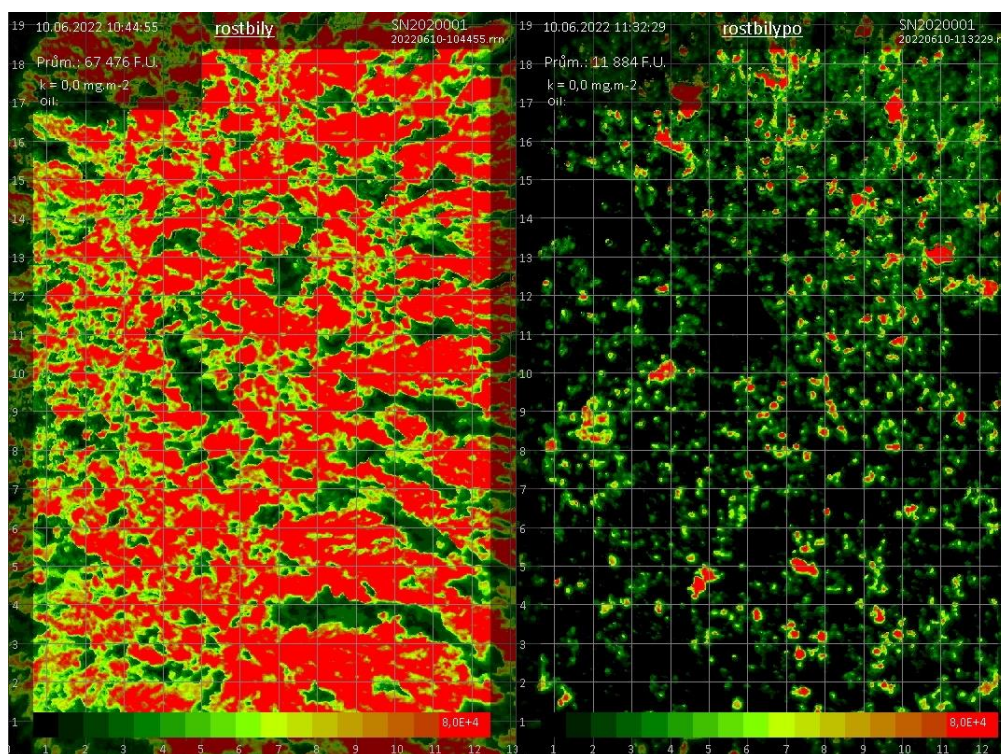


Obrázek 37 - porovnání čistoty povrchu vzorku 6: vlevo lak na povrchu; vpravo po otryskání ultravysokotlakou vodou





Obrázek 38 - porovnání čistoty povrchu vzorku 4: vlevo lak na povrchu; vpravo po otryskání ultravysokotlakou vodou



Obrázek 39 - porovnání čistoty povrchu vzorku 5: vlevo lak na povrchu; vpravo po otryskání ultravysokotlakou vodou

## 7.3 Výsledky třetího měření

### 7.3.1 Výsledky čištění 7. vzorku

K porovnání s čištěním technologií ultravysokotlakým tryskáním vody jsem měl k dispozici již sekaným ocelovým drátem otryskaný díl. Kvůli složitému tvaru a malým rozměrům bylo měření a jeho upnutí složité. Tryskání jedné strany zabralo přibližně 10 sekund, upnutí pak zhruba 50 sekund. Celková doba operace pro jeden díl při ručním oplachu i upnutí pak byla kolem tří minut, pokud nezapočítávám nutný čas pro přípravu stroje.

Na očištění jednoho dílu bylo spotřebováno přibližně 7l vody a 0,7 kWh energie odpovídající přibližně 142 ml nafty.

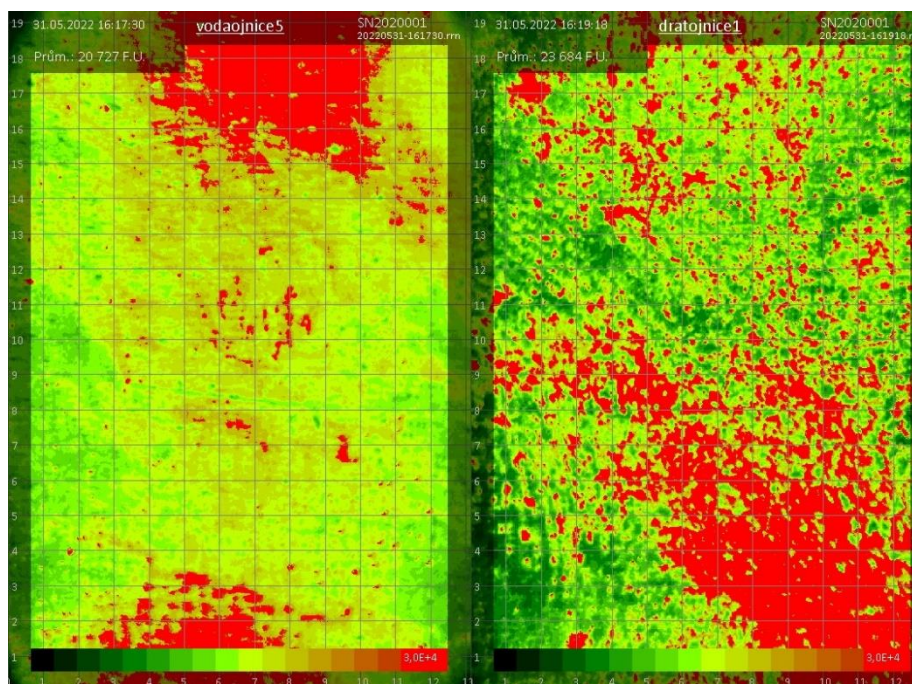
Proces je samozřejmě možné dále optimalizovat a zvýšit jeho produktivitu odhadem až dvojnásobně co se týče zdrojů a až pětinasobně co se týče upínacích časů

#### 7.3.1.1 Čistota povrchu

Měření čistoty povrchu probíhalo po tryskání ultravysokotlakou vodou.

Po otryskání ultravysokotlakou vodou byla naměřena hodnota 20 727 F.U. a u drátem otryskaného povrchu 23 684 F.U., což je o 2 957 bodů více než u vodou otryskaného povrchu. V případě čištění drátem je vidět, že je znečištění bodového charakteru, u otryskání ultravysokotlakou vodou byla dosaženo lepší stejnoměrnosti čištění.

Na snímcích jsou jednotky F.U. barevně sjednocené, to znamená že stejná barva na všech snímcích značí stejné množství nečistot.



Obrázek 40 – čistota po čištění: vlevo ultravysokotlakou vodou; vpravo tryskáním sekaným drátem



### 7.3.1.2 Drsnost povrchu

Změřil jsem drsnost na dostupném díle, který byl již otryskán ocelovým drátem, a na vzorku 7 před a po otryskání ultravysokotlakou vodou. Průměrná drsnost je vypočítána z deseti nezávislých měření.

Tryskací medium	Drsnost povrchu (Ra)	Drsnost povrchu (Rz)
Bez čištění	0,54 ± 0,17	3,18 ± 0,98
Ultravysokotlaká voda	0,8 ± 0,22	5,41 ± 1,8
Ocelový drát	4,58 ± 0,5	23,83 ± 2,3

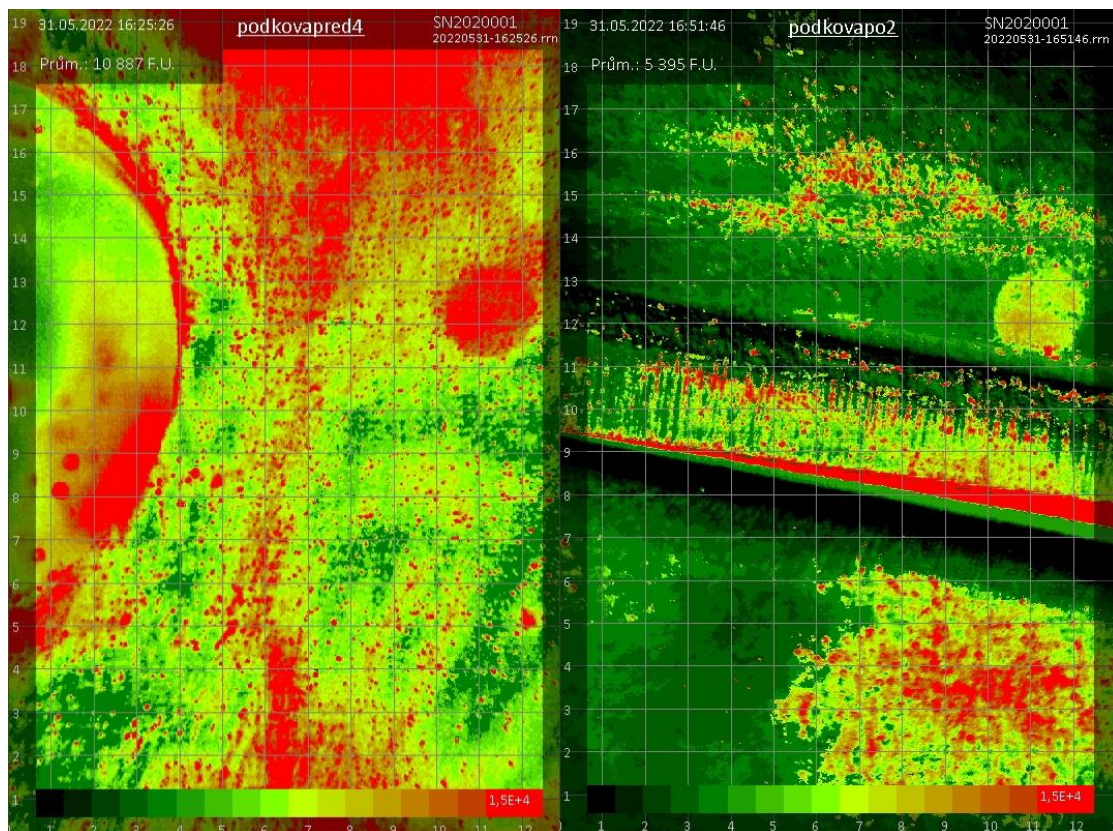
Tabulka 14 - naměřené drsnosti povrchu vzorku 7

### 7.3.2 Výsledky čištění 8. vzorku

Vzorek osm byl výkovek ve tvaru podkovy, který byl po výrobě ještě mořen. Porovnával jsem zdrsnění povrchu a změnu jeho čistoty po otryskání vodou.

#### 7.3.2.1 Čistota povrchu

Čistota povrchu byla kvůli tvaru vzorku 8 složitá na měření, na obrázku 32 a, 32 b jsou označena místa kde byla čistota povrchu měřena. Čistota se po tryskání vodou zvedla o 5 492 jednotek F.U.



Obrázek 41 – čistota povrchu: vlevo mořeno; vpravo mořeno a tryskáno ultravysokotlakou vodou

### 7.3.2.2 Drsnost povrchu

Změřil jsem drsnosti před a po otryskání ultravysokotlakou vodou. Bylo naměřeno deset hodnot, které jsem následně zprůměroval.

Prováděné operace	Drsnost povrchu (Ra)	Drsnost povrchu (Rz)
mořeno, po tváření	1,09 ± 0,3	7,89 ± 1,33
Mořeno, ultravysokotlaké tryskání vodou	1,22 ± 0,29	8,39 ± 1,65

*Tabulka 15 - naměřené drsnosti povrchu vzorku 8*

## 8. Závěr

V rešerši byly shrnuty technologie čištění povrchů a jejich vlivy na životní prostředí. V praktické části byly naměřeny čistoty vzorků pomocí tryskání ultravysokotlakým paprskem vody, tryskání suchým ledem, kartáčování ocelovým kartáčovým kotoučem a tryskání sekaným ocelovým drátem. Z naměřených dat byly provedené výpočty spotřeb zdrojů jednotlivých technologií z ekologického a ekonomického hlediska.

Následují závěry jednotlivých porovnání vzorků:

Závěrem čištění prvního vzorku je, že technologie tryskání vysokotlakou vodou je výrazně rychlejší, ekologičtější a levnější pro očišťování zrezlých, silně znečištěných velkých ploch. Technologie tryskání suchým ledem je pro tuto aplikaci nevhodná.

Pokud porovnáme výsledky čištění u vzorku č. 2, můžeme prohlásit, že pro menší plochy je vhodnější z pohledu ekologie zvolit čištění kartáčováním, jeho hlavní nevýhodou je pak velká časová náročnost a složitost čištění záhybů a nerovinných ploch. Navíc je kartáčování osmkrát pomalejší než tryskání ultravysokotlakou vodou. Z pohledu ekologie, hospodárnosti procesu, rychlosti a ovlivnění povrchu pak nejlépe vychází opět tryskání ultravysokotlakou vodou, i přes malou, pro tuto technologii nevhodnou, velikost vzorku. Tryskání suchým ledem se vzhledem k zátěži na životní prostředí nachází někde mezi těmito technologiemi, ale jeho cena je řádově vyšší kvůli nutným nákladům na pořízení suchého ledu.

Při experimentu se 3. vzorkem bylo zjištěno, že nejlepší účinnosti při odstraňování mastnot lze dosáhnout pomocí kartáčování, nejhorší účinnosti pak tryskáním suchým ledem. Je možné, že technologie kartáčování dosáhla takového výsledku díky nejdelšímu čistícímu času.

Při druhém pokusu prováděném na vzorcích 4, 5 a 6 bylo zjištěno, že z pohledu spotřeby energií je pro odstranění barev vhodnější tryskání ultravysokotlakou vodou. Technologie tryskáním vodou je v tomto případě levnější, rychlejší a výrazně šetrnější k roštům. Pyrolýza zase umožňuje kvalitnější rozklad nečistot z pohledu životnosti roštů a jejich degradace však výhodná není.

Z měření 7 vyplývá, že k ovlivnění povrchu materiálu při použití ultravysokotlaké vody došlo výrazně méně než při použití metody tryskání drátem.

Z naměřených drsností vzorku 8 můžeme vidět, že došlo po tryskání ultravysokotlakou vodou k mírnému nárůstu hodnot drsnosti povrchu. Po otryskání vodou se na čištěném vzorku navíc



objevili zřetelné stopy po vodním paprsku. Čistota daného dílu se oproti pouze mořenému dílu zlepšila zhruba o 50%.

Ze všech měření vyplývá že technologie čištění ultravysokotlakým vodním paprskem je nejlepší volbou pro čištění velkých nerovinných ploch, kde dokáže plně rozvinout svůj potenciál a má lepší čistící účinky než tryskání suchým ledem.

Technologie tryskání suchým ledem není z důvodu vysokých nákladů na nákup suchého ledu v současné době výhodná.

Ostatní technologie mají své místo na trhu pro konkrétní aplikace.

## Bibliografie

- [1] ČERNÝ, František, Ladislav SAMEK a Bruno SOPKO. *Fyzika I*. 5. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2018. ISBN 978-80-01-06358-3.
- [2] NACE INTERNATIONAL, a THE SOCIETY FOR PROTECTIVE COATING. *Joint Surface Preparation Standard: NACE No. 5/SSPC-SP 12 Surface Preparation and Cleaning of Metals by Waterjetting Prior to Recoating*. Revised July 2002. 1440 South Creek Drive Houston, TX 77084-490: NACE International, 1995. ISBN ISBN 1-57590-157.
- [3] MOMBER, Andreas W. *Hydroblasting And Coating Of Steel Structures*. Oxford, UK: Elsevier Science, 2003. ISBN 185617395X.
- [4] Technologie výroby kartáčů. In: *Kartáčovna koloveč: výroba průmyslových kartáčů* [online]. Koloveč: Kartáčovna Koloveč [cit. 2022-08-01]. Dostupné z: <https://www.kartacovnakolovec.cz/technologie>
- [5] ŘASA, Jaroslav a Josef ŠVERCL. *Strojnické tabulky 2: pro školu a praxi*. Praha: Scientia, 2007. ISBN 978-80-86960-20-3.
- [6] ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3*. Praha: Scientia, 2005. ISBN 80-718-3337-1.
- [7] Metací jednotky (kola) SAF. In: *SAF – Technologie pro tryskání, metalizaci a lakování* [online]. Praha: SAF Praha, 2019 [cit. 2022-08-02]. Dostupné z: <http://saf.cz/katalog/tryskani/metaci-kola-saf/>
- [8] Pneumatická tryskací zařízení – sací. In: *SAF – Technologie pro tryskání, metalizaci a lakování* [online]. Praha: SAF Praha, 2019 [cit. 2022-08-02]. Dostupné z: <http://saf.cz/katalog/tryskani/pneumaticka-tryskaci-zarizeni-saci/>
- [9] LÁNC, Kryštof. *Problematika tryskání povrchů*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně.
- [10] Steel Grit Selection. In: *Steel Shot China, Steel Shot & Steel Grit Manufacturers, Cast Steel Blasting Media China* [online]. china: Shanji Metal Abrasives Company, 2003 [cit. 2022-08-01]. Dostupné z: <http://www.sinoabrasives.com/steel-grit-application.html>

- [11] *Abrazivo - široký výběr materiálů na pískování* [online]. Korunní 2569/108, Vinohrady, 101 00 Praha 10: Pískovačka, 2022 [cit. 2022-08-01]. Dostupné z: <https://obchod.piskovacka.cz/abrazivo/>
- [12] KITCHEN, Haydn. Plastic Blast Media – Choice And Use. In: *Rosler blog* [online]. Battle Creek, Michigan: Rosler Metal Finishing USA, 2016 [cit. 2022-08-01]. Dostupné z: <https://roslerblog.com/2016/02/26/plastic-blast-media/>
- [13] Plastic Media Abrasives. In: *Composition Materials* [online]. Milford, Connecticut: Composition Materials, 2022 [cit. 2022-08-01]. Dostupné z: <https://compomat.com/plastic-abrasive-media/>
- [14] *Journal of Cleaner Production* [online]. 16. 2008 [cit. 2022-08-15]. ISSN 09596526. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652607001072>
- [15] *Chlorid vápenatý: BEZPEČNOSTNÍ LIST dle Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) 1907/2006(REACH) a Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) 1272/2008 (CLP) v platném znění*. Český Těšín: PCC MORAVA - CHEM, 2019.
- [16] Soda Blasting vs. Sand Blasting. In: *Abitl: powder coating redefined* [online]. Tulsa, Oklahoma: ABITL Finishing, 2022 [cit. 2022-08-01]. Dostupné z: <https://www.abitl.com/soda-blasting-vs-sand-blasting/>
- [17] Walnut Shell Sandblasting Abrasive Grades, English or Black 45 lbs. In: *Industrial Supply: an abrasive leader worldwide* [online]. Twin Falls, Idaho: Industrial Supply, c 2003-2022 [cit. 2022-08-01]. Dostupné z: <https://sandblastingabrasives.com/walnut-shell-sandblasting-abrasive-grade-415.html>
- [18] Zirblast® Ceramic Blasting Media. In: *Saint Gobain: zirpro* [online]. Sorgues, Francie: Saint-Gobain, 2021 [cit. 2022-08-01]. Dostupné z: <https://www.zirpro.com/zirconia-beads-powders/zirblast>
- [19] Crushed Glass Media. In: *Finishing systems* [online]. York, Pensylvánie: finishing systems, 2022 [cit. 2022-08-01]. Dostupné z: <https://www.finishingsystems.com/abrasives/crushed-glass/>
- [20] *Struska* [online]. ZWA Company, 2008 [cit. 2022-08-01]. Dostupné z: <http://www.strusky.cz/>
- [21] Coal Slag Blast Media. In: *Agasco* [online]. Libertyville, Illinois: AGSCO, c 2017-2022 [cit. 2022-08-01]. Dostupné z: <https://www.agsco.com/coal-slag/>

- [22] China Sponge media abrasives factory and manufacturers | TAA. In: *Steel Shot, Steel Grit, Stainless Steel Shot - TAA* [online]. Zibo, China: taa-abrasive, c 2010-2020 [cit. 2022-08-01]. Dostupné z: <https://www.taametal.com/sponge-media-abrasives-product/>
- [23] Benefits. In: *Envirasponge: low dust advanced surface treatment technology* [online]. Sheffield, UK: UK EnviraSponge Head Office [cit. 2022-08-01]. Dostupné z: <https://www.envirasponge.com/benefits/>
- [24] MÁŠA, Vítězslav, David HORŇÁK a Dalimil PETRILÁK. Industrial use of dry ice blasting in surface cleaning. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2021, 2021(329), 10 [cit. 2022-08-01]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129630>
- [25] Jak se vyrábí suchý led?. In: *Linde: making over world more productive* [online]. Praha 9: Linde plc, c 2011-2022 [cit. 2022-08-01]. Dostupné z: <https://www.linde-gas.cz/cs/sluzby/dry-ice/produkty.html>
- [26] ØI, Lars, Nils ELDRUP, Umesh ADHIKARI, Mathias BENTSEN, Jayalanka BADALGE a Songbo YANG. Simulation and Cost Comparison of CO<sub>2</sub> Liquefaction. *Energy Procedia* [online]. 2016, 86, 500-510 [cit. 2022-08-02]. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:[10.1016/j.egypro.2016.01.051](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.01.051)
- [27] BALDWIN, Peter a Joseph WILLIAMS. Capturing CO<sub>2</sub>: Gas Compression vs. Liquefaction. *Power* [online]. Bellevue, Washington, 2009, (1) [cit. 2022-08-02]. Dostupné z: <https://www.powermag.com/capturing-co2-gas-compression-vs-liquefaction/>
- [28] Is Dry Ice Toxic: Environmental Friend Or Foe?. In: *Mission Driven Food and Beverage Distributor | Buffalo Market* [online]. Visalia, Kalifornie: Buffalo Market, 2022 [cit. 2022-08-02]. Dostupné z: <https://www.buffalomarket.com/blogs/news/is-dry-ice-toxic-environmental-friend-or-foe>
- [29] *COMBI 7 Series Dry Ice Blasters*. Gent, Belgium. Dostupné také z: [https://www.cryonomic.com/Repository/PDFs/CRY-COMBI-EN-feb15\\_LR.pdf](https://www.cryonomic.com/Repository/PDFs/CRY-COMBI-EN-feb15_LR.pdf)
- [30] Dry ice blaster IB 15/120. In: *Cleaning equipment and pressure washers | Kärcher International* [online]. Winnenden, Germany: Alfred Kärcher, 2022 [cit. 2022-08-02]. Dostupné z: <https://www.kaercher.com/int/professional/dry-ice-cleaning/ib-15-120-15741040.html>

- [31] *Premium compressor design & industry leading warranty*. Milwaukee, Wisconsin, 2021. Dostupné také z: [https://www.veskom.cz/files/60129d6a90a45\\_esm-vs-55-75-en.pdf](https://www.veskom.cz/files/60129d6a90a45_esm-vs-55-75-en.pdf)
- [32] KATALOG PRODUKTŮ | Kompresory. In: *O NÁS /Kompresory* [online]. Litoměřice: Vlček kompresory, 2007 [cit. 2022-08-02]. Dostupné z: <http://www.kompresory.com/index.php?page=katalog&id=4&halaman=4>
- [33] Dry Ice Blasting vs Traditional Industrial Cleaning. In: *Industrial Cleaning in Southfield, MI | Home* [online]. Southfield, Michigan: Dry ice works, 2022 [cit. 2022-08-02]. Dostupné z: <https://www.dryiceworks.com/blog/2021/12/30/Dry-Ice-Blasting-vs-Traditional-Industrial-Cleaning/>
- [34] What is waterjet cleaning?. In: *Progressive surface* [online]. Grand Rapids, Michigan: Progressive Surface, c 2016-2022 [cit. 2022-08-02]. Dostupné z: <https://www.progressivesurface.com/waterjetcleaning/process.htm>
- [35] *NACE No. 5/SSPC-SP 12*. Revised July 2002. Houston, Texas: NACE International, 1995.
- [36] SCHWACHA, Billie G. *Liquid cutting of hard materials*. 1961. USA. US2985050A. Uděleno 1958. Zapsáno 1961.
- [37] HISTORY OF BLASTING TECHNIQUES. In: *Universitat de València* [online]. València, Španělsko: Universitat de València, 2022 [cit. 2022-08-02]. Dostupné z: [https://www.uv.es/~pardomv/pe/2004\\_1/chalk/blast.htm](https://www.uv.es/~pardomv/pe/2004_1/chalk/blast.htm)
- [38] Pumps: Waterjet University. In: *WARDJet* [online]. Tallmadge, Ohio: WARDJet, 2022 [cit. 2022-08-02]. Dostupné z: <https://my.wardjet.com/waterjet/university/pumps>
- [39] Direct Drive Efficiency: Doing More with Less. In: *Aqua jet: in association with omax* [online]. Buckshaw Village, Chorley, UK: Aqua jet, 2020 [cit. 2022-08-02]. Dostupné z: <https://www.aquajet.co.uk/direct-drive-efficiency-less/>
- [40] Pojem plunžr. In: *Knihy ABZ.CZ* [online]. Ostrava: ABZ knihy, c 2004-2020 [cit. 2022-08-02]. Dostupné z: <https://slovník-cizich-slov.abz.cz/web.php/slovo/plunzr>
- [41] MARTIN, Emily. What's In a Hydroblaster Nozzle?. In: *Thompson* [online]. 104 N. Main Street Sumter, SC 29150: Thompson Construction Group, 2022 [cit. 2022-08-02]. Dostupné z: <https://industrial.thompsonind.com/blog/whats-in-a-hydroblaster-nozzle>

- [42] JETSTREAM OF HOUSTON. *NOZZLES: UP to 15,000 PSI (1000 BAR)*. 2011. Dostupné také z: [http://www.waterblast.com/uploadedFiles/Site/Service\\_and\\_Support/Resources/15-K-E-Nozzles.pdf](http://www.waterblast.com/uploadedFiles/Site/Service_and_Support/Resources/15-K-E-Nozzles.pdf)
- [43] *Trysky* [online]. Českolipská 9 412 01 Litoměřice: HENNLICH, 2022 [cit. 2022-08-02]. Dostupné z: <https://www.hennlich.cz/produkty/trysky-88.html>
- [44] How to Choose the Right Blast Nozzle. In: *GRACO* [online]. Minneapolis, Minnesota: Graco [cit. 2022-08-02]. Dostupné z: <https://www.graco.com/us/en/contractor/solutions/articles/how-to-choose-the-right-blast-nozzle-for-wet-abrasive-blasting.html>
- [45] *GUIDE FOR MANAGING RISKS FROM HIGH PRESSURE WATER JETTING*. Canberra: Safe Work Australia, 2013. ISBN ISBN 978-1-74361-356-6.
- [46] KREIBICH, , BEDNÁŘ, ŠANOVEC a NOVOTNÝ. *Technologie I: (slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy)*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-010-2351-6.
- [47] *SMĚRNICE RADY 1999/13/ES: o omezování emisí těkavých organických sloučenin vznikajících při používání organických rozpouštědel při některých činnostech a v některých zařízeních*. In: . Brusel: EU, 1999, ročník 1999, L 85/1.
- [48] KOUDELKOVÁ, Lenka. *Vliv předúprav a čistoty povrchu na adhezi nátěrových hmot*. Praha 6, 2018. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze Fakulta strojní.
- [49] ČEPEK, David. *Chemické předúpravy povrchu pro zvýšení přilnavosti a korozní odolnosti organických povlaků*. Praha 6, 2020. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze Fakulta strojní.
- [50] *TENZIDY: (Detergenty)*. Ústí nad Labem. Dostupné také z: [https://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/15\\_Tenzidy\\_musi%20se%20doplnit.pdf](https://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/15_Tenzidy_musi%20se%20doplnit.pdf)
- [51] ASM INTERNATIONAL. *ASM handbook: Volume 5: Surface Engineering*. 10. Materials Park, Ohio: ASM International, 2020. ISBN 9780871703842
- [52] JEDELSKÝ, J., P. NĚMEC, D. VESELÝ a P. KALENDA. *Povrchová úprava materiálů pomocí laseru*. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2005, (4) [cit. 2022-08-02]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/povrchova-uprava-materialu-pomoci-laseru>

- [53] Laser. In: *WikiSkripta* [online]. Praha: 1. lékařská fakulta Univerzity Karlovy, 2022 [cit. 2022-08-02]. Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/w/Laser>
- [54] SANJEEVAN, P. a A. KLEMM. *A REVIEW OF LASER TECHNIQUE APPLICATION IN CLEANING PROCESS OF POROUS CONSTRUCTION MATERIALS*. Glasgow, UK. Dostupné také z: <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB10654.pdf>
- [55] POPRAWE, R., Pavel TOMÁNEK, Dagmar SENDERÁKOVÁ et al. *Disk, fiber, rod, slab: new laser concepts open new application perspectives* [online]. 713803- [cit. 2022-08-04]. Dostupné z: doi:10.1117/12.817967
- [56] KODERA, Yoichi, Tetsushi YAMAMOTO a Eiji ISHIKAWA. Energy- and economic-balance estimation of pyrolysis plant for fuel-gas production from plastic waste based on bench-scale plant operations. *Fuel Communications* [online]. 2021, 7 [cit. 2022-08-02]. ISSN 26660520. Dostupné z: doi:10.1016/j.jfueco.2021.100016
- [57] Co je zplyňování a pyrolýza. In: *CPGA* [online]. Praha 6: Česká asociace pro pyrolýzu a zplyňování [cit. 2022-08-02]. Dostupné z: <http://www.cpga.cz/#cojezplynovani>
- [58] Termické odlakování. In: *DIKRT* [online]. Svatava: DIKRT, 2022 [cit. 2022-08-02]. Dostupné z: <https://www.dikrt.cz/termicke-odlakovani>
- [59] MOLEK, Tomáš. Pyrolýza - princip, historie a současnost. In: *OEnergetice.cz* [online]. Třebíč: OM Solutions, 2017 [cit. 2022-08-02]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/plyn/pyrolyza-princip-historie-a-soucasnost>
- [60] JIN, Nuo, Fenghua ZHANG, Yan CUI, Le SUN, Haoxiang GAO, Ziang PU a Weimin YANG. Environment-friendly surface cleaning using micro-nano bubbles. *Particuology* [online]. 2022, 66, 1-9 [cit. 2022-08-02]. ISSN 16742001. Dostupné z: doi:10.1016/j.partic.2021.07.008
- [61] Ultrazvukové čištění. In: *Ultrazvukové čištění, čištění ultrazvukem | KRAINTEK CZECH* [online]. Hradec Králové: KRAINTEK CZECH [cit. 2022-08-02]. Dostupné z: <https://www.kraintek.cz/ultrazvukove-cisteni>
- [62] Čištění ultrazvukem je neobyčejně efektivní a šetrné! Kde ho ale nejlépe využít?. In: *Ultrazvukové čističky a zvlhčovače* [online]. Louny: ULTRAZVUK, 2020 [cit. 2022-08-02]. Dostupné z: <https://www.ultrazvuk.eu/clanek/cisteni-ultrazvukem-je-neobycejne-efektivni-a-setrne-kde-ho-ale-nejepe-vyuzit>

- [63] What is fluorescence intensity?. In: *BMG LABTECH - The Microplate Reader Company* [online]. Ortenberg, Německo: BMG LABTECH, 2022 [cit. 2022-08-02]. Dostupné z: <https://www.bmglabtech.com/en/fluorescence-intensity/>
- [64] *Recognoil® - effective on-site surface cleanliness measurement* [online]. Uhlirské Janovice: Techtest, 2021 [cit. 2022-08-04]. Dostupné z: <https://www.recognoil.com/>
- [65] BLATEYRON, François. Introduction to stylus profilometers. In: *Surface Metrology Guide - Digital Surf* [online]. Besançon, Francie: Digital Surf, c 2006-2022 [cit. 2022-08-04]. Dostupné z: <https://guide.digitalsurf.com/en/guide-stylus-profilometers.html>
- [66] *D7C\_TA\_dgs.pdf*. Moskva, Rusko. Dostupné také z: [https://dieselgass.ru/wp-content/uploads/2019/12/D7C\\_TA\\_dgs.pdf](https://dieselgass.ru/wp-content/uploads/2019/12/D7C_TA_dgs.pdf)
- [67] *WOMA High-pressure pump 190M - 9.918-335.0\_PI\_en\_WOM.pdf*. Duisburg, Německo, 2019. Dostupné také z: [https://s1.kaercher-media.com/documents/datasheets/machines/en\\_WOM/9.918-335.0\\_PI\\_en\\_WOM.pdf](https://s1.kaercher-media.com/documents/datasheets/machines/en_WOM/9.918-335.0_PI_en_WOM.pdf)
- [68] Mobilní, dieselový kompresor ATMOS, PDP28 + D. In: *Piskovacky.cz* [online]. Kaznějov: Reno – Tech.cz [cit. 2022-08-05]. Dostupné z: <https://piskovacky.cz/d-k-s-produkci-vzduchu-do-5500lmin/298-dieselovy-kompresor-atmos-cz-pdp28-d-ce-p-b-oj.html>
- [69] Suchý led. In: *Suchý led ✓ Skladem ✓ suchy-led.cz* [online]. Rajhradice u Brna: Suchy-led.cz, 2022 [cit. 2022-08-10]. Dostupné z: <https://www.suchy-led.cz/suchy-led/suchy-led-2/>
- [70] *\_thb\_21936.jpg*. In: *Prodejce nářadí pro dům, dílnu a zahradu - BRUFUS s.r.o.* [online]. Kokory: BRUFUS [cit. 2022-08-15]. Dostupné z: [https://www.brufus.cz/pic\\_zbozi\\_det/\\_thb\\_21936.jpg](https://www.brufus.cz/pic_zbozi_det/_thb_21936.jpg)
- [71] *Valec-100-inox.jpg*. In: *NaradiOnline: Profi i hobby ruční elektrické nářadí, příslušenství a nástroje* [online]. Blatná: BP SERVICE, c 2003-2021 [cit. 2022-08-15]. Dostupné z: <https://www.naradionline.cz/products/archiv/valec-100-inox.jpg>
- [72] *LiteSand3u.jpg*. In: *ABRASIV, a.s.: dodavatel brusiva a techniky pro průmysl a řemesla* [online]. Mladá Boleslav: ABRASIV, 2022 [cit. 2022-08-15]. Dostupné z: <https://www.abrasiv.cz/data/filecache/6e/LiteSand3u.jpg>



- [73] Lapovací a leštící pasty. In: *Diamantové nástroje, CBN kotouče, brusné nástroje a kotouče, diamantové vrtáky, DIAMA CZ* [online]. Rybník: DIAMA CZ, 2009 [cit. 2022-08-02]. Dostupné z: <http://www.diama.cz/www1/index-17.html>
- [74] Tryskání metacími koly. In: *Pomoc při výběru pískovačky a kompresoru* [online]. PELHŘIMOV: Trytech, 2022 [cit. 2022-08-03]. Dostupné z: <https://www.trytech.cz/o-tryskani/tryskani-metacimi-koly/>
- [75] Časté dotazy na tryskací kabiny a tryskání. In: *ABRASIV, a.s. | dodavatel brusiva a techniky pro průmysl a řemesla* [online]. Mladá Boleslav: ABRASIV, 2022 [cit. 2022-08-03]. Dostupné z: <https://www.abrasiv.cz/tryskaci-kabiny-aste-dotazy>
- [76] *Airmatic\_Products\_GA-01.jpg*. In: *Airmatic Compressor: Air Compressors and Vacuum Pumps* [online]. Carlstadt, New Jersey: Airmatic Compressor Systems, 2022 [cit. 2022-08-15]. Dostupné z: [https://airmaticcompressor.com/wp-content/uploads/Airmatic\\_Products\\_GA-01.jpg](https://airmaticcompressor.com/wp-content/uploads/Airmatic_Products_GA-01.jpg)
- [77] *20190721083859799.jpg*. In: *MANEK stavební stroje spol. s r.o. - Prodej stavebních strojů - Olomouc, Brno: MANEK* [online]. Olomouc: MANEK stavební stroje, 2022 [cit. 2022-08-15]. Dostupné z: <https://www.manek.cz/www/upload/categories/frontimages/medium/20190721083859799.jpg>
- [78] *Carbon-steel-cut-wire-shot2.jpg* (JPEG obrázek, 1080 × 213 bodů) - Měřítka (95 %). In: *Steel Shot, Steel Grit, Stainless Steel Shot - TAA* [online]. Zibo, China: taa-abrasive, c 2010-2020 [cit. 2022-08-03]. Dostupné z: <https://www.taametal.com/uploads/Carbon-steel-cut-wire-shot2.jpg>
- [79] *Steel-Grit2-300x300.jpg*. In: *Steel Shot, Steel Grit, Stainless Steel Shot - TAA* [online]. Zibo, China: taa-abrasive, c 2010-2020 [cit. 2022-08-03]. Dostupné z: <https://cdn.globalso.com/taametal/Steel-Grit2-300x300.jpg>
- [80] *Pd27164381-brown\_fused\_f54\_1950c\_aluminum\_oxide\_sandblasting.jpg* (WEBP obrázek, 140 × 140 bodů). In: *Quality Aluminium Oxide Abrasives & Brown Fused Aluminium Oxide factory from China* [online]. Zhengzhou City, China: aluminiumoxideabrasives.com, c 2020-2022 [cit. 2022-08-03]. Dostupné z: [http://www.aluminiumoxideabrasives.com/photo/pd27164381-brown\\_fused\\_f54\\_1950c\\_aluminum\\_oxide\\_sandblasting.jpg](http://www.aluminiumoxideabrasives.com/photo/pd27164381-brown_fused_f54_1950c_aluminum_oxide_sandblasting.jpg)

- [81] Silica-sand.jpg. In: *About Mechanics* [online]. Conjecture Corporation, c 2003-2022 [cit. 2022-08-03]. Dostupné z: <https://images.aboutmechanics.com/silica-sand.jpg>
- [82] LMPLASTUF1620\_l.jpg. In: *Prodej brusiva, kotoučů a vrtáků | eshop ABRASIV, a.s.* [online]. Mladá Boleslav: ABRASIV, 2022 [cit. 2022-08-03]. Dostupné z: [https://eshop.abrasiv.cz/editor/image/eshop\\_products\\_other\\_pictures/6630/LMPLASTUF1620\\_l.jpg](https://eshop.abrasiv.cz/editor/image/eshop_products_other_pictures/6630/LMPLASTUF1620_l.jpg)
- [83] Jedla-soda-na-tryskani.jpg. In: *Pískovačka.cz | Vše pro tryskání a pískování* [online]. Praha 10: Pískovačka.cz, 2022 [cit. 2022-08-03]. Dostupné z: <https://cdn.myshoptet.com/usr/obchod.piskovacka.cz/user/documents/upload/jedla-soda-na-tryskani.jpg>
- [84] Uhlicitan vapenaty.jpg (JPEG obrázek, 500 × 332 bodů) - Měřítka (61 %). In: *Pískovačka.cz | Vše pro tryskání a pískování* [online]. Praha: Pískovačka.cz, 2022 [cit. 2022-08-03]. Dostupné z: <https://cdn.myshoptet.com/usr/obchod.piskovacka.cz/user/documents/upload/abraziva/Uhlicitan%20vapenaty.jpg>
- [85] Walnut\_shell-1.jpg (JPEG obrázek, 1400 × 933 bodů). In: *N.T. Ruddock Company - Abrasives, Metals, and Equipment* [online]. Cleveland, Ohio: N.T. Ruddock Company, 2021 [cit. 2022-08-03]. Dostupné z: [https://www.ntruddock.com/wp-content/uploads/walnut\\_shell-1.jpg](https://www.ntruddock.com/wp-content/uploads/walnut_shell-1.jpg)
- [86] B30.jpg (JPEG obrázek, 300 × 300 bodů). In: *Промышленное оборудование |* [online]. Moskva: stetco, 2017 [cit. 2022-08-03]. Dostupné z: [stankiprofi.ru/wp-content/uploads/2019/09/b30.jpg](http://stankiprofi.ru/wp-content/uploads/2019/09/b30.jpg)
- [87] 495\_filename-717-l.jpg (JPEG obrázek, 1024 × 768 bodů). In: *RENOPRO - odrezovač, barvy, laky, tryskací materiály, brusivo, čističe, abrazivo* [online]. Teplice: renopro, 2022 [cit. 2022-08-03]. Dostupné z: [https://cdn.myshoptet.com/usr/www.renopro.cz/user/shop/big/495\\_filename-717-l.jpg?5f823ca0](https://cdn.myshoptet.com/usr/www.renopro.cz/user/shop/big/495_filename-717-l.jpg?5f823ca0)
- [88] Struska-1024x645.jpg. In: *Tryskání pískování - Renovace kvelbených sklepů | Tryskání sklepů* [online]. Podivín: Vladimír Veselý [cit. 2022-08-03]. Dostupné z: <https://www.tryskanisklepu.cz/wp-content/uploads/2017/02/Struska-1024x645.jpg>

- [89] H92dd9de56ad24a7faa57ecd3f6a49cc7k.jpg (WEBP obrázek, 2000 × 1500 bodů) - Měřítko (13 %). In: *Alibaba.com: Manufacturers, Suppliers, Exporters & Importers from the world's largest online B2B marketplace* [online]. Hangzhou, China: Alibaba Group, c 1999-2022 [cit. 2022-08-03]. Dostupné z: <https://s.alicdn.com/@sc01/kf/H92dd9de56ad24a7faa57ecd3f6a49cc7k/2397/H92dd9de56ad24a7faa57ecd3f6a49cc7k.jpg?quality=close>
- [90] D1.jpg. In: *Kärcher Česká republika - oficiální obchod: Karcher.cz* [online]. Modletice: Kärcher, 2022 [cit. 2022-08-15]. Dostupné z: <https://s1.kaercher-media.com/products/15740020/main/1/d1.jpg>
- [91] 40-1\_suchy-led-pelety-16-mm.jpg?5d83301a. In: *Suchý led ✓ Skladem ✓ suchy-led.cz* [online]. Rajhradice u Brna: Suchy-led.cz, 2022 [cit. 2022-08-03]. Dostupné z: [https://cdn.myshoptet.com/usr/www.suchy-led.cz/user/shop/big/40-1\\_suchy-led-pelety-16-mm.jpg?5d83301a](https://cdn.myshoptet.com/usr/www.suchy-led.cz/user/shop/big/40-1_suchy-led-pelety-16-mm.jpg?5d83301a)
- [92] Pr-motojet-x-intensifier.png. In: *Metalworking's leading information resource | Modern Machine Shop* [online]. Cincinnati, Ohio: Gardner Business Media, 2022 [cit. 2022-08-05]. Dostupné z: <https://d2n4wb9orp1vta.cloudfront.net/cms/brand/MMS/2022-MMS/pr-motojet-x-intensifier.png>
- [93] WOMA High-pressure pump 150M - 9.911-514.0\_PI\_en\_WOM.pdf. In: *Hochdruckpumpen, Geräte, Wasserstrahlwerkzeuge | WOMA GmbH* [online]. Duisburg, Německo: WOMA, 2022 [cit. 2022-08-05]. Dostupné z: [https://s1.kaercher-media.com/documents/datasheets/machines/en\\_WOM/9.911-514.0\\_PI\\_en\\_WOM.pdf](https://s1.kaercher-media.com/documents/datasheets/machines/en_WOM/9.911-514.0_PI_en_WOM.pdf)
- [94] D1.jpg. In: *Hochdruckpumpen, Geräte, Wasserstrahlwerkzeuge | WOMA GmbH* [online]. Duisburg, Německo: WOMA, 2022 [cit. 2022-08-03]. Dostupné z: <https://s1.kaercher-media.com/products/98712920/main/1/d1.jpg>
- [95] D1.jpg. In: *Hochdruckpumpen, Geräte, Wasserstrahlwerkzeuge | WOMA GmbH* [online]. Duisburg, Německo: WOMA, 2022 [cit. 2022-08-03]. Dostupné z: <https://s1.kaercher-media.com/products/99075620/main/1/d1.jpg>

- [96] D0.jpg. In: *Hochdruckpumpen, Geräte, Wasserstrahlwerkzeuge* | WOMA GmbH [online]. Duisburg, Německo: WOMA, 2022 [cit. 2022-08-04]. Dostupné z: <https://s1.kaercher-media.com/products/99145840/main/1/d0.jpg>
- [97] D0.jpg. In: *Hochdruckpumpen, Geräte, Wasserstrahlwerkzeuge* | WOMA GmbH [online]. Duisburg, Německo: WOMA, 2022 [cit. 2022-08-04]. Dostupné z: <https://s1.kaercher-media.com/products/99172360/main/1/d0.jpg>
- [98] WOMA Turbodüse TD 3000-SCS - 9.917-677.0\_PI\_de\_WOM.pdf. In: *Hochdruckpumpen, Geräte, Wasserstrahlwerkzeuge* | WOMA GmbH [online]. Duisburg, Německo: WOMA, 2022 [cit. 2022-08-04]. Dostupné z: [https://s1.kaercher-media.com/documents/datasheets/machines/de\\_WOM/9.917-677.0\\_PI\\_de\\_WOM.pdf](https://s1.kaercher-media.com/documents/datasheets/machines/de_WOM/9.917-677.0_PI_de_WOM.pdf)
- [99] Kennametal-Blast-Nozzles\_Brochure.pdf. In: *Straight Bore Tungsten Carbide* | Burwell [online]. Reversby, Austrálie: Burwell Technologies, 2022 [cit. 2022-08-04]. Dostupné z: [https://www.burwell.com.au/assets/volumes/downloads/Kennametal-Blast-Nozzles\\_Brochure.pdf](https://www.burwell.com.au/assets/volumes/downloads/Kennametal-Blast-Nozzles_Brochure.pdf)
- [100] J\_section 2010.indd - Sj-400-US-1001.pdf. In: *Mitutoyo America Corporation | Precision Metrology Solutions* [online]. Aurora, Illinois: Mitutoyo America, 2022 [cit. 2022-08-04]. Dostupné z: <https://www.mitutoyo.com/Images/003/308/Sj-400-US-1001.pdf>
- [101] 4f27ffd64862279ad7aac21be1c91588.jpg. In: *Ruční nářadí, elektrické nářadí, aku nářadí a zahradní technika: NAKO Pardubice* [online]. Pardubice: NAKO Pardubice, 2022 [cit. 2022-08-15]. Dostupné z: <https://storage.nako.cz/images/medium/4f27ffd64862279ad7aac21be1c91588.jpg>
- [102] 4b99aa20372bb33b64ccb1ea48655980.jpeg. In: *Lidl-shop.cz: Vždy.Více.Online.* [online]. Plzeň: Lidl E-Commerce Logistics [cit. 2022-08-15]. Dostupné z: <https://www.lidl.cz/assets/4b99aa20372bb33b64ccb1ea48655980.jpeg>

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Druhy kartáčových kotoučů: a, zalisovaný nylonový; b, ocelový válcový [70; 71] .....	18
Obrázek 2 - brusný kartáčový kotouč s vyměnitelnými lamelami [72] .....	19
Obrázek 3 - rozdělení leštících past [73] .....	20
Obrázek 4 - tryskání metacím kolem, schéma stroje [74].....	21
Obrázek 5 - schéma injektorové tryskací kabiny s cyklonovým odlučováním [75].....	22
Obrázek 6 - schéma tlakové tryskací kabiny s cyklonovým odlučováním a automatickým doplňováním abraziva [75] .....	23
Obrázek 7 - kompresory: a, halový bezolejný šroubový; b, mobilní naftový [76; 77].....	23
Obrázek 8 - ocelová abraziva; a, ocelová drť; b, sekaný drát nový; c, sekaný drát použitý; d, sekaný drát přeměněný do granulátu [78; 79].....	25
Obrázek 9 - tryskací media: a, korundové abrazivo, oxid hlinitý 95%; b, křemičitý písek [80; 81] .....	26
Obrázek 10 - tryskací media: a, plastové abrazivo typu V; b, jedlá soda [82; 83].....	27
Obrázek 11 - tryskací media: a, uhličitán vápenatý; b, drcené skořápky [84; 85] .....	28
Obrázek 12 - tryskací media: a, keramické kuličky; b, drcené sklo [86; 87].....	29
Obrázek 13 – měděná struska pro tryskání [88] .....	30
Obrázek 14 - princip odstraňování nečistot houbou [22] .....	30
Obrázek 15 - polyuretanovou pěnou s příměsí dalších abraziv [89].....	31
Obrázek 16 - a, suchý led; b, strojní zařízení pro tryskání suchým ledem [90; 91].....	31
Obrázek 17 - stroj pro tryskání pomocí ultravysokotlaké vody.....	34
Obrázek 18 – čerpadla: a, Intenzifikační pumpa Motojet X; b, přímo řízená pumpa Woma 150M [92; 93].....	36
Obrázek 19 - rozstřikové zařízení: a, ruční pistole; b, podlahový manipulátor s odsáváním [94; 95].....	37
Obrázek 20 - nosiče trysek: a, pro čištění nádrží; b, pro čištění potrubí [96; 97] .....	38
Obrázek 21 - nosič trysek pro pistole WOMA TD 3000-SCS s popisem; strojově přeloženo [98] .....	38
Obrázek 22 - druhy trysek: 1, přímá; 2, konvenční dlouhá Venturiho; 3, laminární Venturiho; 4, dvojitá Venturiho; 5, vysokotlaká; 6, vysokorychlostní [99] .....	39

Obrázek 23 - popis zón tryskané vody [3] .....	39
Obrázek 24 - typy pevnolátkových budičů laserů, volně přeloženo [55] .....	43
Obrázek 25 - měřicí přístroje: a, Recognoil 2W; b, Mitutoyo z řady SJ [64; 100].....	48
Obrázek 26 - a, nerezový drátěný okružní kartáč GRAPHITE 57H601; b, PARKSIDE PNS 300 A1 [101; 102].....	50
Obrázek 27 - vzorek 1; a, ocelový nosník před čištěním; b, nosník po čištění pomocí ultravysokotlaké vody; c, nosník po tryskání suchým ledem .....	51
Obrázek 28 - znečištění vzorků 2 a 3 .....	52
Obrázek 29 – vzorek 4: a, před čištěním; b, nánosy barvy po čištění .....	53
Obrázek 30 – vzorky 5 a 6: a, před čištěním; b, vzorek 5 po čištění vodou; c, vzorek 6 po čištění vodou .....	53
Obrázek 31 – vzorek 7: a, před čištěním; b, tryskán ocelovým drátem; c po tryskání ultravysokotlakou vodou .....	54
Obrázek 32 - podkova: a, před tryskáním, mořena; b, po tryskání UHPWJ .....	54
Obrázek 33 – porovnání čistoty, vlevo před čištěním, vpravo po čištění. Horní řada patří technologii tryskání suchým ledem, dolní řada patří technologii tryskání ultravysokotlakou vodou .....	57
Obrázek 34 – porovnání čistoty, vlevo před čištěním, vpravo po čištění. Horní řada patří technologii tryskání suchým ledem, střední řada patří ultravysokotlakému tryskáním vodou, dolní řada patří technologii kartáčování .....	60
Obrázek 35 - porovnání čistoty, vlevo nahoře před čištěním, vpravo nahoře po tryskání suchým ledem, vlevo dole čištění kartáčováním, vpravo dole tryskání ultravysokotlakou vodou .....	64
Obrázek 36 - vzorky po očištění; a vzorek 4; b, vzorek 5; c, vzorek 6 .....	67
Obrázek 37 - porovnání čistoty povrchu vzorku 6: vlevo lak na povrchu; vpravo po otryskání ultravysokotlakou vodou .....	67
Obrázek 38 - porovnání čistoty povrchu vzorku 4: vlevo lak na povrchu; vpravo po otryskáním ultravysokotlakou vodou .....	68
Obrázek 39 - porovnání čistoty povrchu vzorku 5: vlevo lak na povrchu; vpravo po otryskání ultravysokotlakou vodou .....	68
Obrázek 40 – čistota po čištění: vlevo ultravysokotlakou vodou; vpravo tryskáním sekaným drátem .....	69

Obrázek 41 – čistota povrchu: vlevo mořeno; vpravo mořeno a tryskáno ultravysokotlakou vodou .....70



## Seznam tabulek

Tabulka 1 - druhy plastových abraziv, přeloženo [13].....	27
Tabulka 2 – porovnání spotřeby použitých strojních zařízení.....	50
Tabulka 3 – zdroje potřebné na m <sup>2</sup> u vzorku 1 .....	55
Tabulka 4 - náklady na m <sup>2</sup> u vzorku 1 .....	56
Tabulka 5 - zdroje potřebné na m <sup>2</sup> u vzorku 2 .....	58
Tabulka 6 - náklady na m <sup>2</sup> u vzorku 2 .....	59
Tabulka 7 – porovnání výsledků měření vzorku 2 .....	61
Tabulka 8 - zdroje potřebné na m <sup>2</sup> u vzorku 3 .....	62
Tabulka 9 - náklady na m <sup>2</sup> u vzorku 3 .....	62
Tabulka 10 – porovnání výsledků měření vzorku 3 .....	65
Tabulka 11 - zdroje potřebné na m <sup>2</sup> u vzorku 5 .....	66
Tabulka 12 - zdroje potřebné na m <sup>2</sup> u vzorku 6 .....	66
Tabulka 13 - náklady potřebné na m <sup>2</sup> u vzorků 5 a 6 .....	66
Tabulka 14 - naměřené drsnosti povrchu vzorku 7 .....	70
Tabulka 15 - naměřené drsnosti povrchu vzorku 8 .....	71

## Seznam rovnic

Rovnice 1 – čistící práce [1] .....	16
Rovnice 2 – kinetická energie [1].....	16
Rovnice 3 – Solvayův proces [16; 17] .....	27