

Sem vložte zadání Vaší práce.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



Bakalářská práce

## **Technologie tryskání metacími jednotkami**

*Alexandr Kedra*

Vedoucí práce: doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.

18. června 2015

---

## Poděkování

Rád bych poděkoval mému vedoucímu bakalářské práce **doc. Ing. Viktoru Kreibichovi, CSc.** a konzultantovi **Ing. Petru Drašnarovi**, kteří mi pomohli s vytvořením této bakalářské práce a společnosti **DISA Industries s.r.o.**, od které jsem si vypůjčil některou literaturu.

---

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona, ve znění pozdějších předpisů. V souladu s ust. § 46 odst. 6 tohoto zákona tímto uděluji nevýhradní oprávnění (licenci) k užití této mojí práce, a to včetně všech počítačových programů, jež jsou její součástí či přílohou a veškeré jejich dokumentace (dále souhrnně jen „Dílo“), a to všem osobám, které si přejí Dílo užít. Tyto osoby jsou oprávněny Dílo užít jakýmkoli způsobem, který nesnižuje hodnotu Díla a za jakýmkoli účelem (včetně užití k výdělečným účelům). Toto oprávnění je časově, teritoriálně i množstevně neomezené. Každá osoba, která využije výše uvedenou licenci, se však zavazuje udělit ke každému dílu, které vznikne (byť jen zčásti) na základě Díla, úpravou Díla, spojením Díla s jiným dílem, zařazením Díla do díla souborného či spracováním Díla (včetně překladu), licenci alespoň ve výše uvedeném rozsahu a zároveň zpřístupnit zdrojový kód takového díla alespoň srovnatelným způsobem a ve srovnatelném rozsahu, jako je zpřístupněn zdrojový kód Díla.

V Praze dne 18. června 2015

.....

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta strojní

© 2015 Alexandr Kedra. Všechna práva vyhrazena.

*Tato práce vznikla jako školní dílo na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě strojní. Práce je chráněna právními předpisy a mezinárodními úmluvami o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským. K jejímu užití, s výjimkou bezúplatných zákonných licencí, je nezbytný souhlas autora.*

**na tuto práci** Kedra, Alexandr. *Technologie tryskání metacími jednotkami.*  
Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2015.

---

## Abstract

The thesis is focused on the abrasive blasting technology and blasting units optimization. Variety of blasting methods and its differences, influence of kinetic energy, diverse ways how to achieve required parameters of blasted material, abrasive materials as well as abrasive blasting applications are described in this thesis followed by the design of blasting system and blasting parameters.

**Keywords** Blasting, wheel blast machines, mechanical blasting, Almen strip, abrasive

---

## Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na popis technologie tryskání a optimalizaci technologie tryskání metacích jednotek. Je zde popsáno samotné tryskání, vliv kinetické energie, jednotlivé typy tryskání, vyhodnocení dosahovaných parametrů otryskaného materiálu, tryskací prostředky, jednotlivé aplikace, návrh tryskacího stroje a parametrů tryskání.

**Klíčová slova** Tryskání, metací kolo, mechanické tryskání, Almen test, tryskací prostředek

---

# Obsah

Úvod	10
<b>1 Tryskání</b>	<b>11</b>
1.1 Kinetická energie . . . . .	11
1.2 Rozdělení tryskání . . . . .	14
1.3 Pneumatické tryskání . . . . .	14
1.3.1 Tlakový . . . . .	15
1.3.2 Injektorový . . . . .	15
1.3.3 Parametry pneumatického tryskání . . . . .	16
1.4 Mechanické tryskání (metacími koly) . . . . .	17
1.5 Typy metacích strojů . . . . .	18
1.6 Lopatky pro mechanické tryskání . . . . .	19
1.7 Rychlost tryskacího prostředku u metacích kol . . . . .	19
<b>2 Hodnocení otryskaného povrchu</b>	<b>22</b>
2.1 Drsnost povrchu . . . . .	22
2.2 Stupeň čistoty (Sa) . . . . .	23
2.3 Měření intenzity tryskání (Almen-test) . . . . .	24
2.4 Soli na povrchu . . . . .	26
2.5 Mastnota povrchu . . . . .	27
<b>3 Tryskací prostředek (abrazivo)</b>	<b>29</b>
3.1 Volba tryskacího prostředku . . . . .	29
3.2 Rozdělení tryskacího prostředku . . . . .	30
3.2.1 Dělení dle tvaru . . . . .	30
3.2.2 Dělení dle materiálu . . . . .	30
3.3 Rozbor tryskacího prostředku . . . . .	30
3.3.1 Ocelová drť . . . . .	30
3.3.1.1 Značení ocelové drtě . . . . .	31
3.3.2 Ocelový granulát . . . . .	31

3.3.2.1	Značení ocelového granulátu . . . . .	31
3.3.3	Balotina . . . . .	32
3.3.3.1	Značení balotiny . . . . .	32
3.4	Příklady použití tryskacích prostředků . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Optimalizace technologie tryskání metacích jednotek</b>	<b>34</b>
4.1	Části které lze upravovat . . . . .	34
4.2	Metací kolo . . . . .	35
4.2.1	Přívodní hrdlo . . . . .	36
4.2.1.1	Osa hrdla . . . . .	36
4.2.1.2	Rozměry hrdla . . . . .	37
4.2.2	Rozváděcí kolo . . . . .	37
4.2.2.1	Regulační hrdlo . . . . .	37
4.2.2.2	Tvar dávky v kanále rozváděcího kola . . . . .	38
4.2.3	Oběžné kolo . . . . .	38
4.2.3.1	Optimální úhel natočení lopatek . . . . .	38
4.2.3.2	Počet lopatek . . . . .	39
4.2.3.3	Životnost lopatek . . . . .	39
4.2.4	Výkon metacího kola . . . . .	40
4.2.5	Účinnost metacího kola . . . . .	41
4.3	Aplikace tryskání . . . . .	41
4.3.1	Porovnání parametrů dvou tryskacích prostředků pro předúpravu povrchu . . . . .	42
4.3.2	Mechanické zpevnění povrchu kuličkováním . . . . .	43
4.4	Příklad výpočtu elektromotoru pro metací kolo . . . . .	44
	<b>Závěr</b>	<b>47</b>
	<b>Literatura</b>	<b>48</b>
	<b>A Seznam použitých zkratk</b>	<b>51</b>
	<b>B Obsah příloženého CD</b>	<b>54</b>



---

## Seznam obrázků

1.1	Rozklad kinetické energie [22] . . . . .	12
1.2	Grafické znázornění závislosti velikosti kinetické energie na hmotnosti a rychlosti [23] . . . . .	13
1.3	Rozdělení metod tryskání [7] . . . . .	14
1.4	Princip tlakového tryskání [6] . . . . .	15
1.5	Princip injektorového tryskání [6] . . . . .	16
1.6	Tryskání metacími koly [23] . . . . .	18
1.7	Radiální lopatka [11] . . . . .	19
1.8	Zakřivená lopatka [11] . . . . .	19
1.9	Výstupní rychlost u mechanického tryskání . . . . .	20
2.1	Základní profil drsnosti povrchu [22] . . . . .	23
2.2	Povrch před tryskáním [2] . . . . .	24
2.3	Stupeň čistoty Sa 1 [2] . . . . .	24
2.4	Stupeň čistoty Sa 2 [2] . . . . .	24
2.5	Stupeň čistoty Sa 3 [2] . . . . .	24
2.6	Měření průhybu Almen pásku [9] . . . . .	25
2.7	Saturační křivka almen testu [5] . . . . .	26
2.8	Postup vyhodnocení solí na povrchu [4] . . . . .	27
2.9	Přístroj pro měření obsahu solí Hedon SSM [4] . . . . .	27
2.10	Aplikace přístroje Hedon SSM [4] . . . . .	27
2.11	Postup vyhodnocení mastnoty na povrchu přístrojem Recognoil [10] . . . . .	28
4.1	Metací kolo - části [18] . . . . .	35
4.2	Celá metací jednotka [18] . . . . .	36
4.3	Osa hrdla (cykloida mezi body A a B)[24] . . . . .	36
4.4	Nová lopatka[11] . . . . .	40
4.5	Opotřebovaná lopatka - nutná výměna[11] . . . . .	40
4.6	Ocelový granulát [13] . . . . .	42
4.7	Stainium [17] . . . . .	42

4.8	Otryskaný povrch před a po aplikaci S 330 [19]	43
4.9	Otryskaný povrch před a po aplikaci SM 140 [19]	43
4.10	Princip kuličkování [21]	44

---

## Seznam tabulek

1.1	Výstupní rychlost tryskacího prostředku u běžného metacího kola[16]	13
1.2	Hodnoty hmotnosti abraziv [14]	14
1.3	Pravděpodobná spotřeba tlakového vzduchu při injektorovém způsobu tryskání [20]	16
1.4	Spotřeba tlakového vzduchu při tlakovzdušném způsobu [20]	17
1.5	Přibližná životnost trysek podle materiálu trysky a použitého abraziva [20]	17
2.1	Typy almen pásků [3]	26
3.1	Volba abraziva dle aplikace [16]	33
4.1	Materiál metacího kola [18]	35
4.2	Drsnost povrchu po tryskání[19]	42
4.3	Navýšení životnosti součásti díky kuličkování [5]	44

---

# Úvod

Tryskání je technologický postup opracování povrchu materiálu proudem jemných částic. Využívá se k vytvoření mikrogeometrie povrchu. Cílem této práce je popis tryskání a návrh optimalizace technologie tryskání metacích jednotek.

Mezi parametry, které se sledují při tryskání patří jeho intenzita, drsnost, čistota povrchu, stupeň zamaštění a přítomnost solí na povrchu opracovaného materiálu.

Tryskání povrchu lze provádět dvěma způsoby. Buď pneumatický nebo mechanický způsob. Existují dvě metody pneumatického tryskání: tlaková a injektorová. Při mechanickém tryskání se používají metací kola. Jelikož v metacím kole dochází k velkým erozivním opotřebením, vyrábí se jeho části z velmi kvalitních materiálů. Například lopatky se vyrábí z vysokolegované bílé chromové litiny. V praxi je mechanické tryskání využíváno častěji než pneumatické a to díky své výkonnosti, která je několikanásobně vyšší. Mezi výhody mechanického tryskání patří nízká energetická náročnost a vysoká produktivita procesu. K nevýhodám patří vysoké pořizovací náklady a nutná pravidelná výměna opotřebených dílů.

Je proto nutné proces a způsob tryskání volit obezřetně s cílem optimalizace této technologie. Při optimalizaci metacích kol se řídíme dvěma základními parametry: výstupní rychlostí tryskacího prostředku a množstvím abraziva, které potřebujeme vytryskat. Metací stroje se konstruují v několika variantách, které se od sebe liší. Jde o rozdíly v umístění metacích kol, dopravou součástí, způsobem tryskání atd.

V první kapitole mé práce je popsáno samotné tryskání, vliv kinetické energie na jeho účinnost a jednotlivé typy tryskání. Kapitola dvě je zaměřena na hodnocení otryskaného povrchu. Ve třetí kapitole rozebírám tryskací prostředky. Poslední část mé práce je věnována návrhu tryskacího stroje a parametrům tryskání.

# Tryskání

Technologie tryskání je jedna z nejpoužívanějších metod předúpravy povrchu. Žádná jiná metoda nepřináší možnost kontroly a opakovatelnosti výsledku požadované úpravy povrchu. Tryskání je metoda používaná k čištění, zpevňování nebo renovaci kovů. Tato úprava může být velmi jemná a naopak povrch může být tryskáním velice zdrsňen. Při úpravě povrchu se využívá kinetické (pohybové) energie tryskacího prostředku. [6]

Definice tryskání dle normy ČSN 8501-01: „Tryskání je úprava povrchu tryskacími prostředky, který je vrhán na upravenou plochu. Tryskací prostředek je nástroj, který má charakter pevné látky nebo kapaliny, případně jejich směsí. Při dopadu tryskacího prostředku na otryskávaný povrch dochází k odstranění nečistot základního materiálu a dále k plastické deformaci v povrchové vrstvě.“ [23]

## Příklady použití tryskání

- odstraňování korozních produktů
- odstraňování starých povlaků, okují, otřepů
- čištění povrchu před a po pájení a svařování
- příprava povrchu před povlakováním (nátěrové hmoty, plasty)
- zpevňování (kuličkování)

## 1.1 Kinetická energie

Účinek tryskání se dá specifikovat pomocí kinetické (pohybové) energie. Výsledná kinetická energie je nejvíce ovlivněna hmotností, rychlostí a úhlem dopadu abraziva. Úhel dopadu rozděluje kinetickou energii na normálovou ( $Ek_N$ )

a tečnou ( $Ek_T$ ) složku viz obrázek 1.1. Velikost kinetické energie je dána výrazem viz vztah (1.1). [22]

$$Ek = \sqrt{Ek_N^2 + Ek_T^2} \quad (1.1)$$

$$Ek_N = \frac{1}{2}m_z v^2 \sin^2 \alpha \quad (1.2) \quad Ek_T = \frac{1}{2}m_z v^2 \cos^2 \alpha \quad (1.3)$$

$Ek$  = kinetická energie [ $J$ ]

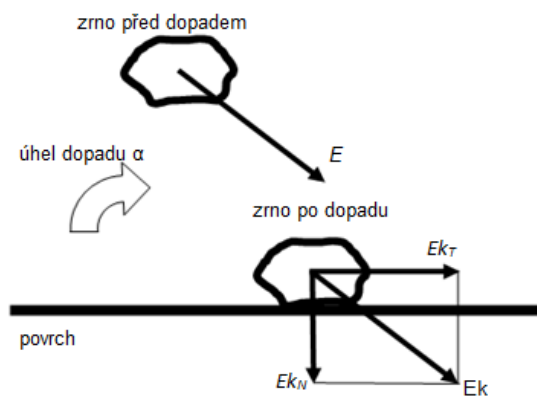
$Ek_T$  = tečná kinetická energie [ $J$ ]

$Ek_N$  = normálová kinetická energie [ $J$ ]

$m_z$  = hmotnost tryskacího prostředku [ $kg$ ]

$v$  = výstupní rychlost tryskacího prostředku [ $ms^{-1}$ ]

$\alpha$  = úhel dopadu tryskacího prostředku [ $^\circ$ ]



Obrázek 1.1: Rozklad kinetické energie [22]

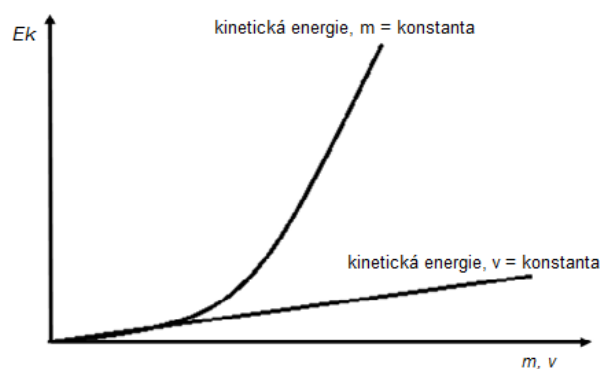
Ze vzorců (1.1) a (1.2) je patrné, že nejvíce ovlivňuje kinetickou energii rychlost tryskacího prostředku, má exponenciální nárůst viz obrázek 1.2. U pneumatického tryskání je rychlost tryskacího prostředku závislá na parametrech vzduchu (množství a tlaku). Při mechanickém tryskání je rychlost závislá na odstředivé a obvodové rychlosti tryskacího prostředku.

Hodnota hmotnosti též ovlivňuje kinetickou energii lineárně viz obrázek 1.2. Dodávané množství tryskacího prostředku u pneumatického tryskání je

regulováno parametry stlačeného vzduchu a směšovací ventile. U mechanického způsobu se regulace provádí pomocí regulačního otvoru. Podle natočení regulačního otvoru vůči kanálům rozváděcího kola, regulujeme množství (hmotnost) tryskacího prostředku, která projde metacím kolem.

Úhel, pod kterým tryskací prostředek dopadá, nemá na výslednou velikost kinetické energie žádný vliv. Úhel se volí podle způsobu aplikace. Při malém úhlu dopadu se projevuje rýhovací účinek zrn, naopak při větších úhlech dochází ke zpevnění povrchu (kovací účinek).

Při použití pneumatické metody může rychlost tryskacího prostředku dosahovat až  $43ms^{-1}$  a u mechanické metody až  $110ms^{-1}$ . Z toho je patrné, že mechanické tryskání je několika násobně výkonnější. [22]



Obrázek 1.2: Grafické znázornění závislosti velikosti kinetické energie na hmotnosti a rychlosti [23]

Tabulka 1.1: Výstupní rychlost tryskacího prostředku u běžného metacího kola[16]

Průměr kola	Výstupní rychlost [ $ms^{-1}$ ]
360	72
400	78
410	83
440	88
460	93

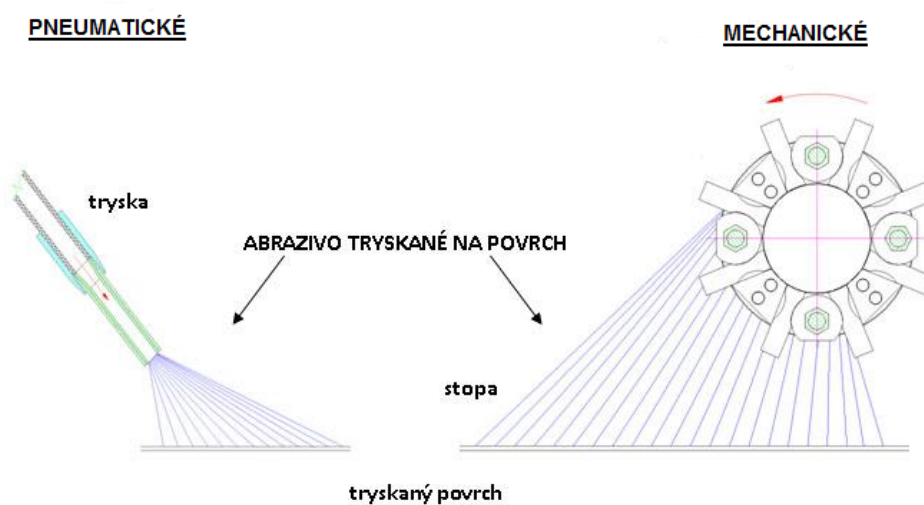
Tabulka 1.2: Hodnoty hmotnosti abraziv [14]

Abrazivo	Měrná hmotnost [ $kg/m^3$ ]
ocelový granulát, dř	7800
korund	4000
sklo	2460
plast	1500

## 1.2 Rozdělení tryskání

Podle konstrukce a použití jednotlivých dílů se dá tryskání rozdělit na dva způsoby. Na obrázku 1.3 je znázorněn základní rozdíl mezi oběma metodami.

- Pneumatické (tlakovzdušné)
- Mechanické (metacími koly)



Obrázek 1.3: Rozdělení metod tryskání [7]

## 1.3 Pneumatické tryskání

Pneumatická tryskačí zařízení se vyznačují vysokou variabilitou, neboť se mohou přizpůsobit nejrůznějším požadavkům při praktických aplikacích. Jejich velká výhoda spočívá zejména ve schopnosti tryskat i těžko dostupná místa,

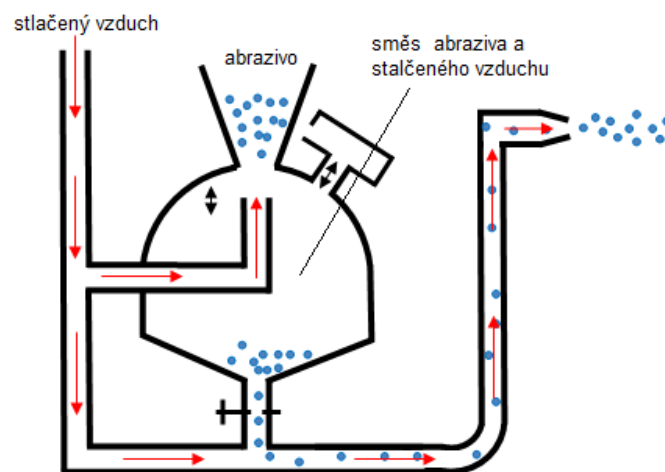


předměty velkých rozměrů nebo konstrukce umístěné v terénu. Tyto stroje se vyskytují v různých provedeních od jednoduchých tryskacích pistolí až po speciální tryskací komory s automatickým naváděním trysek. Pneumatické zařízení se dělí podle způsobu konstrukce.

- Tlakový
- Injektorový

### 1.3.1 Tlakový

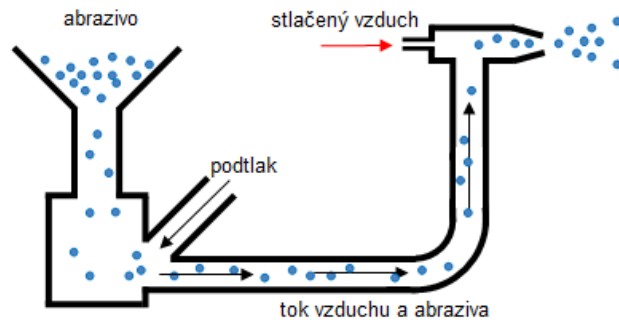
U tlakového způsobu tryskání se tryskací prostředek směšuje se stlačeným vzduchem a podtlakem přes regulační ventil je tryskací prostředek vháněn do hadice, která je ukončená tryskou viz obrázek 1.4. Vše zajišťuje pneumatický systém s ovládáním z místa tryskání. Při tlakové metodě se dají použít hmotnostně těžší druhy tryskacího prostředku jako je ocelová a litinová drť. Jednou z nevýhod je nutnost přerušit tryskání z důvodu doplnění tryskacího prostředku a konstrukční náročnost celého zařízení. [6]



Obrázek 1.4: Princip tlakového tryskání [6]

### 1.3.2 Injektorový

Zařízení pracuje tak, že do směšovací komory je přiváděn stlačený vzduch, který je urychlován skrze vnitřní vzduchovou trysku, směrem k výstupní trysce. Urychlením vyvolává podtlak, který nasává z druhého přívodu tryskací prostředek do proudu vzduchu viz obrázek 1.5. Velikostí trysky a tlakem vzduchu lze nastavit intenzitu tryskání. Pro tento způsob tryskání jsou vhodnější lehká abraziva jako je balotina či korund. [6]



Obrázek 1.5: Princip injektorového tryskání [6]

### 1.3.3 Parametry pneumatického tryskání

Pro správný chod pneumatického tryskání je důležité, aby měl stálý (konstantní) přísun stlačeného vzduchu. Podle typu, velikosti trysky a požadovaných tryskacích parametrů se tlak vzduchu pohybuje od 0,4 až 0,8 MPa. K porovnání je v tabulce 1.3 a 1.4 spotřeba tlakového vzduchu pro různé průměry trysek.

Velmi náchylné na opotřebení (potenciální výměnu) jsou trysky. Opotřebení trysek závisí na tvrdosti použitého tryskacího prostředku. Pro životnost trysky se nedoporučuje, abychom ji zatěžovali na 100%. Jinak dochází k rychlejšímu opotřebení (zvětšení průměru). [20] V tabulce 1.5 je přibližná životnost trysek.

Tabulka 1.3: Pravděpodobná spotřeba tlakového vzduchu při injektorovém způsobu tryskání [20]

$\phi$ trysky (mm)	Spotřeba vzduchu ( $m^3/hod.$ )		
	0,6 MPa	0,7 MPa	0,8 MPa
6,5	140	160	180
8	240	260	280
9,5	350	370	390
11	450	470	490
13	540	560	580

## 1.4. Mechanické tryskání (metacími koly)

Tabulka 1.4: Spotřeba tlakového vzduchu při tlakovzdušném způsobu [20]

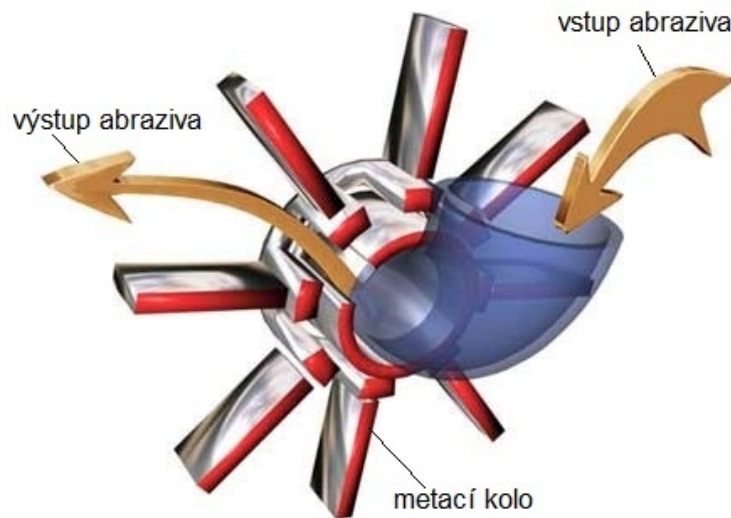
$\phi$ trysky (mm)	Spotřeba vzduchu ( $m^3/hod.$ )				
	0,45 MPa	0,52 MPa	0,6 MPa	0,68 MPa	0,75 MPa
5	51	56	65	70	77
6,5	92	104	116	126	138
8	152	172	193	215	234
9,5	215	244	275	295	334
11	290	331	370	409	433
12,5	382	430	477	527	576

Tabulka 1.5: Přibližná životnost trysek podle materiálu trysky a použitého abraziva [20]

Přibližné hodnoty životnosti trysek v hod.			
materiál trysky	ocelové abrazivo	spotřební abrazivo	korund
karbid wolframu	500-800	300-400	20-40
karbid křemíku	600-1000	400-600	50-100
karbid boru	1500-2500	750-1500	200-1000
keramický mat.	20-40	10-30	1-4

## 1.4 Mechanické tryskání (metacími koly)

Při metodě tryskání metacími koly se využívá přeměny elektrické energie na kinetickou energii tryskacího prostředku za pomoci elektromotoru. Díky jeho vysokým otáčkám dosahuje tryskací prostředek vysoké rychlosti až  $110 \text{ m s}^{-1}$ . Konstrukce umožňuje daleko větší průtok tryskacího prostředku metacím kolem než u pneumatického tryskání. Při použití metacího kola se spotřeba pohybuje od 2900 do 10 000 Kg/hod naproti tomu pneumatické tryskání od 800 do 1500 Kg/hod. Z těchto důvodů je jeho využití výhodné při objemovém tryskání jako je například očištění odlitků, pásů, plechů atd. [23]



Obrázek 1.6: Tryskání metacími koly [23]

Jelikož je metací kolo poháněno elektromotorem, nedochází ke ztrátám při převodu energie jako u pneumatického tryskání (tlakový vzduch). Jelikož neztrácí energii při pohánění tryskacího prostředku je ekonomičtější než pneumatické tryskání. Princip metody je založen na přivedení tryskacího prostředku pomocí přívodního hrdla, přes rozváděcí kolo, které je usazené v metacím kole, až na lopatky metacího kola viz obrázek 1.6.

## 1.5 Typy metacích strojů

Strojů, kde se používají metací kola, je mnoho druhů. Tryskací stroje se od sebe velice liší. Od malých ručně ovládaných až po obrovské s plně automatizovanou obsluhou. Stroje se dají rozdělit podle způsobu dopravy tryskaných předmětů. Podle toho je dělíme na průběžné a dávkové.

### Tryskací zařízení

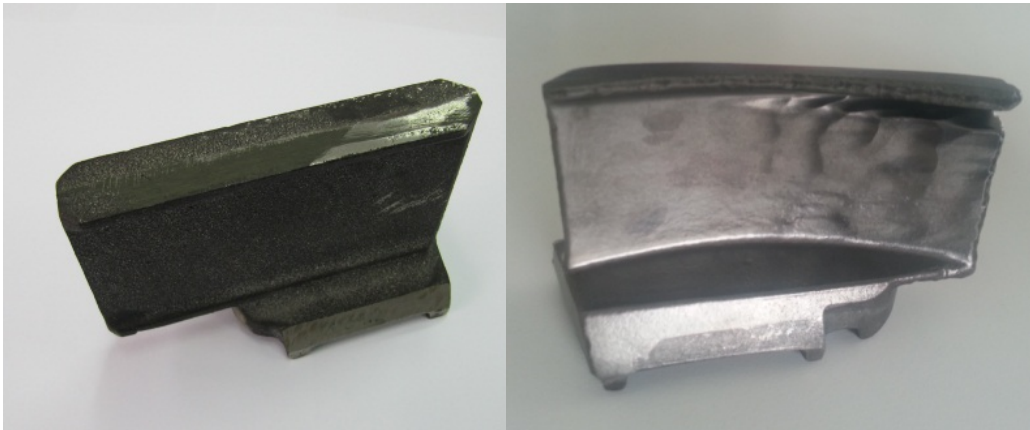
- bubnová
- závěsná
- pásová
- stolová
- s válečkovou tratí

## 1.6 Lopatky pro mechanické tryskání

Lopatky jsou nejnamáhanější (otěrem) součástí metacího kola. Jsou nejčastěji měněnou součástí. V běžných provozech se životnost lopatky pohybuje okolo 300 provozních hodin. Ve velmi prašných prostředích se může životnost lopatky snížit i na 80 hodin.

Lopatky se vyrábějí z materiálů s velkým obsahem chromu jako je bílá chromová litina nebo manganová ocel (Hadfieldova ocel). Běžně dosahovaná tvrdost lopatek je 800-1000 HV. Jelikož tyto materiály je velmi náročné obrábět, vyrábějí se lopatky přesným odléváním za pomoci vytavitelného modelu.

Nejvíce používané jsou dva tvary lopatek. Radiální (rovná) lopatka viz obrázek 1.7 nebo zakřivená viz obrázek 1.8. Při stejných parametrech ( průměru a otáčkách) metacího kola je zakřivená lopatka výhodnější, protože je její výstupní rychlost vyšší při teoreticky stejném opotřebení. [11]

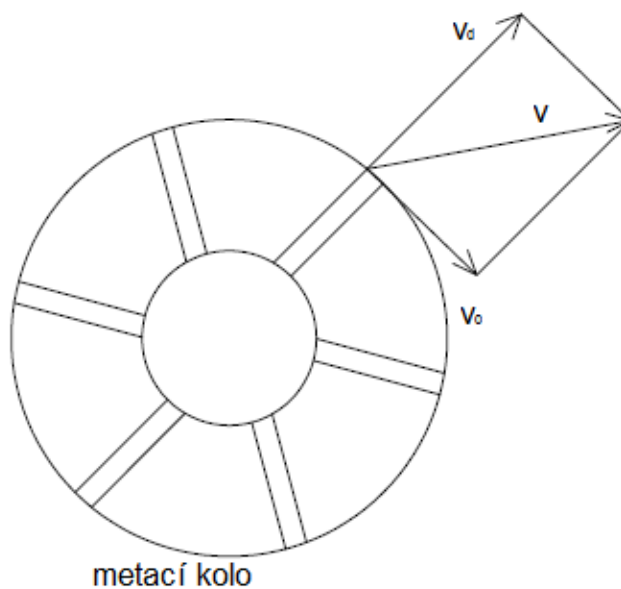


Obrázek 1.7: Radiální lopatka [11]

Obrázek 1.8: Zakřivená lopatka [11]

## 1.7 Rychlost tryskacího prostředí u metacích kol

U metody tryskání metacími koly se výsledná rychlost skládá z obvodové rychlosti a odstředivé viz obrázek 1.9. Obvodová rychlost je dána úhlovou rychlostí a velikostí oběžného kola. Velikost odstředivé rychlosti je velice ovlivněna druhem lopatky. U excentrické lopatky je odstředivá rychlost zhruba o 20% vyšší než u radiální lopatky. Potřebné výpočty jsem čerpal z literatury[24].



Obrázek 1.9: Výstupní rychlost u mechanického tryskání

$$v = \sqrt{v_d^2 + v_o^2} \quad (1.4)$$

$$v_d = e^{-f_1 \omega t_3} \left( v_r \omega_1 t_3 + \frac{\rho_2 \omega^2 - f_1 \omega v_r}{\omega_1} \omega_1 t_3 \right) \quad (1.5)$$

$$v_o = r\omega \quad (1.6)$$

$$\omega = 2\pi n \quad (1.7) \quad \omega_1 = \omega \sqrt{1 + f_1} \quad (1.8)$$

$v$  = výstupní rychlost tryskacího prostředí [ $ms^{-1}$ ]

$v_d$  = odstředivá rychlost tryskacího prostředí [ $ms^{-1}$ ]

$v_o$  = obvodová rychlost tryskacího prostředí [ $ms^{-1}$ ]

## 1.7. Rychlost tryskacího prostředí u metacích kol

---

$v_r$  = rychlost tryskacího prostředí před dopadem na lopatku [ $ms^{-1}$ ]

$r$  = poloměr metacího kola [ $m$ ]

$\omega$  = úhlová rychlost [ $s^{-1}$ ]

$\omega_1$  = pomocná úhlová rychlost [ $s^{-1}$ ]

$n$  = otáčky metacího kola [ $s^{-1}$ ]

$f_1$  = koeficient smykového tření tryskacího prostředí a metacího kola [ ]

$\rho_2$  = polární souřadnice popisující místo středu částice s lopatkou [ $m$ ]

$t_3$  = čas pohybu tryskacího prostředí po lopatce [ $s$ ]

# Hodnocení otryskaného povrchu

## 2.1 Drsnost povrchu

Hlavním účelem technologie tryskání je zdrsňit povrch součásti a vytvořit mikrogeometrii povrchu. Vytvoření mikrogeometrie povrchu má velmi důležitou funkci v ochranném systému. Některé povlaky mají se základním materiálem jen mechanickou vazbu. Při jeho aplikaci na hladký (jen očištěný) povrch není zaručena dostatečná přilnavost a může dojít k odloupení povlaku. Tryskáním lze vytvořit vhodnou drsnost.

Definice drsnosti podle normy ČSN EN ISO 4287: „Geometrické požadavky na výrobu (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu.“ [22]

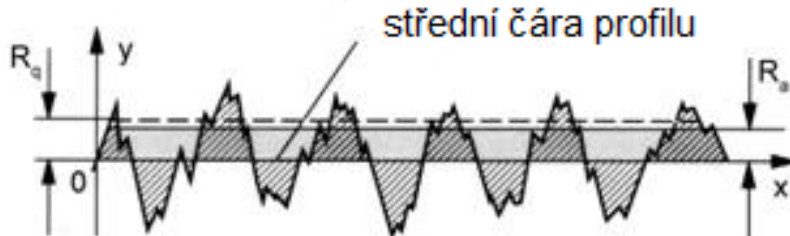
Měření drsnosti se provádí pomocí různých přístrojů a metod. Nejpoužívanější je dotyková metoda, která snímá profil povrchu. Využívá snímacího systému s diamantovým hrotem, který se pohybuje konstantní rychlostí přes měřený povrch a zaznamenává parametry drsnosti. [15]

### Význam parametrů drsnosti

- $R_a$  - střední aritmetická úchylka profilu (je to aritmetický průměr absolutních hodnot profilu v rozsahu základní délky)
- $R_v$  - největší hloubka prohlubně profilu
- $R_p$  - největší výška výstupku profilu
- $R_c$  - průměrná výška nerovností profilu (je to aritmetický průměr jednotlivých největších výšek profilu)
- $R_z$  - největší výška nerovnostního profilu



- $R_q$  - střední kvadratická úchylka profilu (je to střední hodnota kvadratických odchylek od střední čáry profilu)



Obrázek 2.1: Základní profil drsnosti povrchu [22]

## 2.2 Stupeň čistoty (Sa)

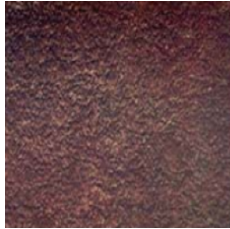
Hodnocení čistoty povrchu se provádí vizuálním porovnáním upraveného povrchu vůči standardizované fotografii. Stupně očištění se rozdělují do 4 stupňů. [1]

Hodnocení stupně čistoty dle ČSN EN ISO 8501-1: „Příprava ocelových povrchů před nanesením nátěrových hmot a obdobných výrobků. Vizuální vyhodnocení čistoty povrchu.“ [23]

### Stupně čistoty Sa

- Sa 1 - **lehké otryskání:** „při prohlídce se na povrchu nezjistí přítomnost olejů, mastnot, nečistot stejně jako nepřilnavé okuje, rez, nátěry a cizí látky. Všechny zbytky nečistot musí být pevně přilnavé“. [1]
- Sa 2 - **důkladné otryskání:** „při prohlídce se na povrchu nezjistí přítomnost olejů, mastnot, nečistot a téměř žádné okuje, rez, nátěry a cizí látky. Všechny zbytky nečistot musí být pevně přilnavé“. [1]
- Sa 2,5 - **velmi důkladné otryskání:** „při prohlídce bez zvětšení se na povrchu důkladné otryskání nezjistí přítomnost olejů, mastnot, nečistot, okuje, rez, zbytky nátěrů a cizích látek. Všechny zbylé stopy nečistot musí být pouze ve formě skvrn nebo pásů“. [1]
- Sa 3 - **vizuálně čistý povrch:** „při prohlídce se na povrchu nezjistí přítomnost olejů, mastnot, nečistot, okuje, rez, zbytky nátěrů a cizích látek. Povrch musí vykazovat jednotný kovový vzhled“. [1]

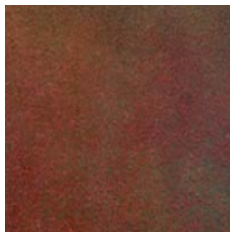
### Obrázky jednotlivých stupňů čistoty



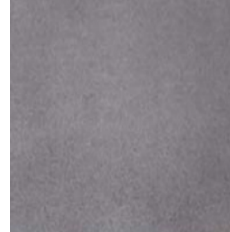
Obrázek 2.2: Povrch před tryskáním [2]



Obrázek 2.4: Stupeň čistoty Sa 2 [2]



Obrázek 2.3: Stupeň čistoty Sa 1 [2]

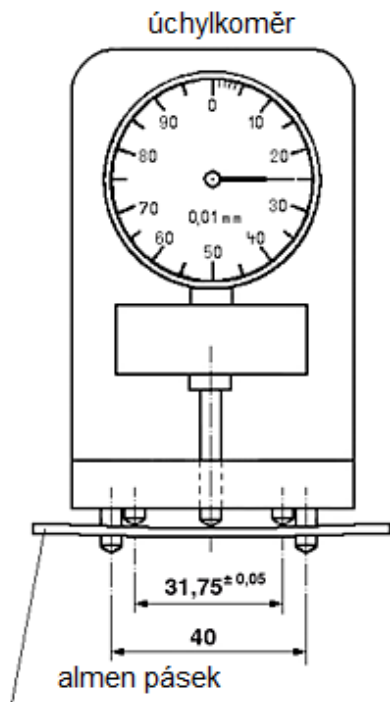


Obrázek 2.5: Stupeň čistoty Sa 3 [2]

## 2.3 Měření intenzity tryskání (Almen-test)

Intenzita tryskání se nedá zachytit přímou cestou. Jedním z nepřímých způsobů měření je metoda podle J. O. Almena.

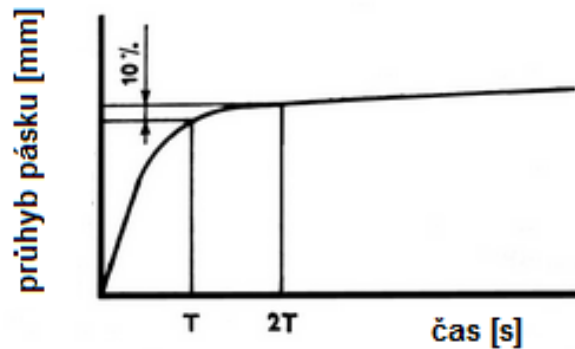
Postup spočívá v použití normalizovaných měřících pásek, které se upnou do rovněž normalizovaného přípravku a takto se vystaví účinku dopadajících částic tryskacího prostředku. Po otryskání se povolí upínací šrouby přípravku a zkušební destička se vyjme. Z důvodu vzniku vnitřního pnutí v materiálu se destička po uvolnění prohne. Průhyb slouží jako měřítko intenzity tryskání. Měří se jednoduchým indikátorovým přístrojem viz obrázek.[5]



Obrázek 2.6: Měření průhybu Almen pásku [9]

Almen-test se využívá pro určení optimalizace času tryskání. Tryská se do dosažení saturačního bodu. To je bod, ve kterém se výška oblouku nezvyšuje o více než 10% po zdvojnásobení doby tryskání. V tomto bodě takto naměřená hodnota průhybu odpovídá optimální intenzitě tryskání viz obrázek 2.7.

Další možnost použití Almen-testu je zjištění konstantních podmínek tryskání. Další srovnávací hodnocení vychází z předpokladu, že se tryskání provádí stejnou rychlostí a pod stejným úhlem dopadu a používané abrazivo má stejnou velikost, hmotnost, tvar a tvrdost. Jestliže nemůže být dosaženo předepsané intenzity tryskání ve stanoveném čase, znamená to, že rychlost tryskačského prostředku je příliš nízká, nebo jeho velikost je proti původním parametřům malá.[8]



Obrázek 2.7: Saturační křivka almen testu [5]

Pro Almen-test se používají normalizované **almen pásky**, které mají daný rozměr a materiál, z kterého jsou vyrobeny. Almen pásek se vyrábí z pružinové válcované oceli za studena, která je kalena a popouštěna na tvrdost HRC 44-50. Existují tři druhy almen pásků. Vyrábějí se o rozměrech 24 x 74mm a třech tloušťkách. Každá tloušťka má své písmenné označení viz tabulka 2.1. [3]

Tabulka 2.1: Typy almen pásků [3]

Typ pásku	tloušťka [mm]
N	0,8
A	1,3
C	2,4

## 2.4 Soli na povrchu

Přítomnost solí na povrchu je nežádoucí. Pro určení hodnoty solí se využívá Breslova metoda. „Čistotu povrchu lze změřit odebráním a analýzou povrchových látek. Při Breslově metodě, popsané v normě ČSN EN ISO 8502-6, je na testovaný povrch přiložena odnímatelná cela a propíchnuta injekční jehlou naplněnou deionizovanou vodou viz obrázek 2.8. V tomto roztoku se povrch soli rozpustí, celý obsah je poté odebrán a je v něm změřena vodivost. Výsledek tohoto měření v  $\mu\text{S}/\text{cm}$  odpovídá koncentraci iontů rozpuštěných v roztoku.“ [4]



Obrázek 2.8: Postup vyhodnocení solí na povrchu [4]

Tato metoda je velmi zdlouhavá a může být i nepřesná. Proto se vyvinul přístroj, který funguje také na principu Breslovy metody. Jeho měření je rychlejší a přesnější. Použití přístroje Hedon SSM je velmi jednoduché. Přiloží se na povrch kde chceme změřit obsah solí viz obrázek 2.10.



Obrázek 2.9: Přístroj pro měření obsahu solí Hedon SSM [4]



Obrázek 2.10: Aplikace přístroje Hedon SSM [4]

## 2.5 Mastnota povrchu

V dnešní době se k určování mastnoty používají kontinuální skenovací metody, které doplňují statické metody zjišťování mastnoty povrchu. Díky tomu je možné kontrolovat čistotu povrchu namátkově přímo v provozu a okamžitě zjistit stav zamaštění.

K vyhodnocení obsahu respektive množství mastnoty se využívá zařízení Recognoil, které funguje na principu luminiscence. Toto zařízení je schopné

vyhodnotit mastnotu povrchu buď obrazem nebo matematicky. Je to velmi rychlá bezdotyková metoda viz obrázek 2.11.



Obrázek 2.11: Postup vyhodnocení mastnoty na povrchu přístrojem Recognoil [10]

## Tryskací prostředek (abrazivo)

Tryskací prostředek (abrazivo) se vyrábí z mnoha materiálů, v různých tvarech a velikostech, s různou hmotností, tvrdostí a dalšími vlastnostmi, kterými se od sebe liší. Jsou to drobné částičky ve velikosti od desetin až po jednotky milimetrů. Pro přehlednost se písmeně označují a k písmenu se přidává číslo. Přidaná číslice udává velikost zrna tryskacího prostředku. Pro určení tvrdosti nekovového tryskacího prostředku se používá Mohsova stupnice tvrdosti. Tvrdost kovového abraziva se určuje podle Vickerse (HV) nebo podle Rockwella (HRC). [25]

### 3.1 Volba tryskacího prostředku

Správná volba tryskacího prostředku je velmi důležitá. Každý tryskací prostředek má své vlastnosti, které jsou při procesu tryskání důležité. Správná volba tryskacího prostředku má velký vliv na efektivitu tryskání.

Nejoptimálnější kombinací by bylo použití velmi tvrdého a ostrohranného tryskacího prostředku, který by se používal u tryskání s metačími koly. Při použití ostrohranného tryskacího prostředku by však došlo k velmi rychlému opotřebení lopatek a ještě hůř by dopadl tryskací prostor. V dnešní době se používá směs ostrohranného a kulatého tryskacího prostředku.

#### Základní parametry pro volbu tryskacího prostředku:

- požadovaná drsnost povrchu
- způsob tryskání
  - neinvazní tryskání (bez úběru)
  - dekorativní tryskání
  - čištění, matování a úběr materiálu
  - zpevňování povrchu (kuličkování)

- druh používaného tryskacího zařízení a jeho parametry

### 3.2 Rozdělení tryskacího prostředku

Každý tryskací prostředek se hodí na jiný způsob tryskání a má jiné tryskací vlastnosti. Jednotlivé druhy tryskacího prostředku mají svůj specifický tvar, abychom ho mohli použít jak pro neinvazivní tryskání tak i pro zbavování okují, čištění. Podstatný u abraziva je materiál, z kterého je vyroben. [12] [14]

#### 3.2.1 Dělení dle tvaru

- ostrohranný
- oblý

#### 3.2.2 Dělení dle materiálu

- kovový
  - ocelová drť
  - ocelový granulát
  - litinová drť
  - litinový granulát
  - sekaný drát
- sklo, keramika
  - balotina
  - zirblast
- přírodní
  - křemičité písky
- syntetický
  - korund
  - karbid
  - granát
- speciální
  - skořápky vlašských ořechů
  - kukuřičný granulát
  - suchý led
  - drcené pecky
- plastový
  - organické i anorganické

### 3.3 Rozbor tryskacího prostředku

#### 3.3.1 Ocelová drť

Označuje se písmenky G. Vyrábí se drcením speciálně tepelně upravených zrn granulátu o větším průměru. Je to ostrohranné abrazivo, šedé barvy, různé hrubosti s dlouhodobou životností. Používá se pro odstraňování okují, koroze a barvy, jako příprava před galvanizací, lakováním, smaltováním a další technologií povrchové úpravy.



Hlavní použití je při tlakovém tryskání. U tryskání metacími koly se používá jen vyjímečně z důvodů vysokého opotřebení metacích částí. [13]

#### 3.3.1.1 Značení ocelové drtě

K písemnému označení se přidává číslice od 14 do 80. Toto číslo udává velikost zrn, která je od 0,3mm až po 2mm.

Příklad označení: G25 (ocelová drť s velikostní zrn 0,85-1,18mm)

#### Chemické složení ocelové drti

- C 0,75 - 1,20
- Mn 0,60 - 1,10
- Si 0,60 - 1,10
- S max 0,04
- P max 0,04

#### 3.3.2 Ocelový granulát

Označuje se písmenem S. Je to oblý (kulatý) druh abraziva vyrobený z nadeutektoidní speciálně tepelně upravené oceli. Má pouze homogenní strukturu temperovaného martenzitu. Díky tomu vykazuje odrazovou pružnost a odolnost proti únavě materiálu. Velkou výhodou materiálu je jeho životnost, odolnost proti nárazům a čistící účinek při přijatelných nákladech. Je vhodný na odstraňování okují a otřepů, pro tryskání velkých ploch, vyhlazování a také pro zpevnění povrchu (kuličkování).

Díky svému tvaru není tak agresivní jako ocelová drť, proto je vhodný především pro tryskání metacími koly, kde nezpůsobuje tak razantní úbytek materiálu. [13]

##### 3.3.2.1 Značení ocelového granulátu

K písemnému označení se přidává číslice od 170 do 1320. Toto číslo udává velikost zrn, která je od 0,5mm až po 4,75mm.

Příklad označení: G550 (ocelový granulát s velikostní zrn 1,70-2,36mm)

### Chemické složení ocelového granulátu

- C 0,75 - 1,20
- Mn 0,60 - 1,10
- Si 0,60 - 1,10
- S max 0,04
- P max 0,04

### 3.3.3 Balotina

Označuje se písmenem B. Balotina, neboli skleněné mikrokuličky, je inertní a chemicky neměnný materiál. Její hlavní využití je pro jemné tryskání, tryskání nerezových dílů, kuličkování. [13]

#### 3.3.3.1 Značení balotiny

K písemnému označení se přidává číslice od 6 do 159. Toto číslo udává velikost zrn, která je od 0,07mm až po 0,7mm.

Příklad označení: B10 (balotina s velikostní zrn 0,2-0,3mm)

### Chemické složení balotiny

- SiO<sub>2</sub> min. 65,0
- Na<sub>2</sub>O min. 14,0
- CaO min. 8,0
- MgO min. 2,5
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> min. 0,5 - 2,0
- Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> max. 0,15

## 3.4 Příklady použití tryskacích prostředků

Tabulka 3.1: Volba abraziva dle aplikace [16]

Aplikace	ocelová drť	korund	ocelové kuličky	balotina	plast	keramické kuličky
Odstranění lepidel					•	
Příprava před eloxováním		•		•		•
Matování povrchu				•		•
Renovace artefaktů					•	
Příprava před lepením	•	•				
Odstranění karbonů					•	
Čištění odlitků	•		•			
Příprava před gumováním	•	•				
Čištění kompozitů					•	
Odstranění betonu	•					
Odstranění koroze	•	•	•	•		•
Estetické úpravy		•	•	•		•
Odstranění otřepů		•		•		•
Odstranění výronků					•	
Běžné čištění	•	•	•			
Dekorace skla		•				•
Odstranění skořepin		•				
Odstranění lehké koroze				•	•	
Čištění forem pro tlakové lití				•	•	•
Odstranění barev	•	•			•	
Předúprava před nátěry	•	•	•			
Kuličkování			•	•		•
Strojní údržba	•	•	•	•		•
Předúprava před metalizací	•	•				
Předúprava před galv. pokovení				•		•
Čištění před a po svařování	•	•		•		•
Odstranění okují	•	•	•	•		•
Povrchové tvarování	•	•	•	•		•
Čištění povrchu dřeva		•				

---

# Optimalizace technologie tryskání metacích jednotek

Optimalizace tryskání spočívá v ideálním řešení (návrhu) tryskacího stroje a parametrů tryskání. Hlavním důvodem, proč se optimalizuje, je ekonomický prospěch. Optimalizuje se podle požadavků zákazníka. Nejvíce ovlivňující bývá dosažená kvalita povrchu.

## Parametry ovlivňující optimalizaci:

- provozní náklady
- konečná kvalita povrchu
- čas tryskání
- tvar a velikost předmětů
- počet tryskaných předmětů za jeden cyklus
- způsob dopravy a uložení tryskaného předmětu

## 4.1 Části které lze upravovat

Mezi části, které se dají přizpůsobovat, určitě patří samotné tryskání jako je tryskací prostředek, tryskací kola atd. Také je velmi důležitá konstrukce, tím se míní velikost stroje. U velkých typů strojů i potřebný příkon k rozběhnutí stroje může hrát svůj vliv. V neposlední řadě je automatizace a bezpečnost.

- metací kolo
- tryskací prostor
- čištění abraziva

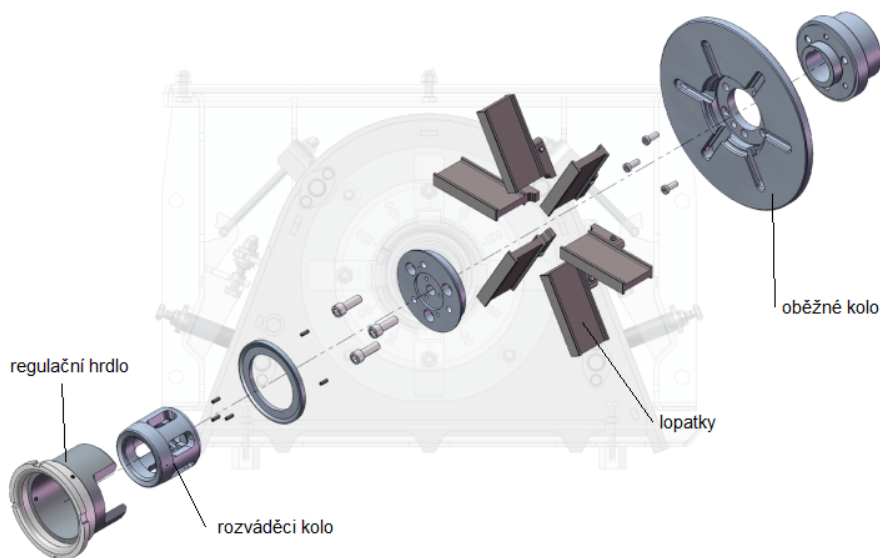
- automatizace
- velikost stroje

## 4.2 Metací kolo

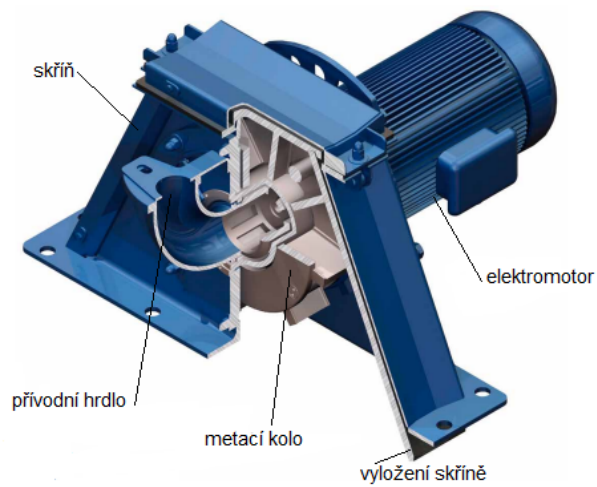
Jedná se o jednu z nejnámáhanějších částí z hlediska otěru. Používají se velice kvalitní a otěruvzdorné materiály. Materiály jednotlivých částí viz tabulka 4.1. Při špatném návrhu se může stát, že po pár minutách budou jeho části zničeny a musel by se vyměnit. Metací kolo se skládá z několika dílů, které se vloží do sebe viz obrázek 4.1. Pak jako celek jsou vloženy do skříně. Z jedné strany skříně je k němu přivedeno hrdlo, kterým přichází tryskací prostředek. Z druhé strany je připojen k elektromotoru, který ho pohání viz obrázek 4.2.

Tabulka 4.1: Materiál metacího kola [18]

Součást	Materiál
Skříň	Manganová ocel
Vyložení skříně	Manganová ocel, vysoko legovaná bílá chromová litina
Rozváděcí kolo	vysoko legovaná bílá chromová litina
Přívodní hrdlo	Ocelolitina
Lopatka	Vysoko legovaná bílá chromová litina, manganová ocel



Obrázek 4.1: Metací kolo - části [18]



Obrázek 4.2: Celá metací jednotka [18]

## 4.2.1 Přívodní hrdlo

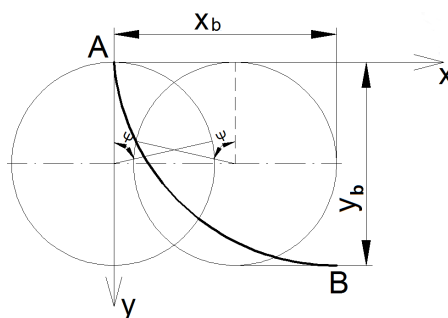
### 4.2.1.1 Osa hrdla

Přívodním hrdlem je do metacího kola přiváděn tryskací prostředek. Pro správné použití musí splňovat dvě základní podmínky. Podmínka 1) zaručuje co největší možné dodávané množství tryskacího prostředku. Podmínka 2) zabraňuje ucpání hrdla.

1) Tvar osy kolena mezi dvěma hmotnými body A, B musí být navržen tak, aby hmotný bod dorazil z bodu A do bodu B za působení tíhy v co nejkratším čase.

2) Nejmenší skol osy kolena (na výstupu) musí umožňovat sklouznutí tryskacího prostředku z klidové polohy.

Nejvhodnější tvar osy splňuje cykloida viz obrázek 4.3 .



Obrázek 4.3: Osa hrdla (cykloida mezi body A a B)[24]

### 4.2.1.2 Rozměry hrdla

Velikost hrdla se skládá z 3 parametrů  $x_b$ ,  $y_b$  a  $\phi$  hrdla. Pro výpočet průměru hrdla je nutné určit výstupní rychlost částice (tryskacího prostředku). Při výpočtu průměru hrdla se předběžně určí potřebná plocha hrdla, z které se následně určí průměr. Jakmile víme potřebný průměr, můžeme spočítat velikosti  $x_b$ ,  $y_b$  viz obr 4.3.

$$d_h = \sqrt{\frac{4S_h}{\pi}} \quad (4.1)$$

$$S_h = \frac{m}{60v_h K} \quad (4.2)$$

$$x_b = r_h \psi - r_h \sin \psi \quad (4.3)$$

$$y_b = r_h (1 - \cos \psi) \quad (4.4)$$

$d_h$  = průměr přívodního hrdla [ $m$ ]

$r_h$  = poloměr přívodního hrdla [ $m$ ]

$S_h$  = předběžná plocha přívodního hrdla [ $m^2$ ]

$v_p$  = rychlost tryskacího prostředku na výstupu z přívodního hrdla [ $ms^{-1}$ ]

$m$  = hmotnost vytryskaného tryskacího prostředku [ $kg/min$ ]

$K$  = součinitel zaplnění [ ]

$x_b$  = x-ová souřadnice velikosti přívodního hrdla [ $m$ ]

$y_b$  = y-ová souřadnice velikosti přívodního hrdla [ $m$ ]

$\psi$  = úhel posunutí tryskacího prostředku [ $rad$ ]

### 4.2.2 Rozváděcí kolo

Rozváděcí kolo je součást, která reguluje množství dodávaného tryskacího prostředku. Rozváděcí kolo se skládá z kanálků, kterými prochází tryskací prostředek. Celé je usazeno do regulačního hrdla.

#### 4.2.2.1 Regulační hrdlo

Regulační hrdlo musí být o něco větší než je průměr rozváděcího kola, aby umožnil volný průchod tryskací prostředek na lopatku. V regulačním hrdle je otvor, kterým vychází abraziv na lopatku. Vzájemným pootočením regulačního otvoru a kanálů rozváděcího kola lze měnit velikost a umístění stopy tryskacího prostředku.

$$d_r = d_h + 2\Delta \quad (4.5)$$

$d_r$  = průměr regulačního hrdla [m]

$d_h$  = průměr přívodního hrdla [m]

$\Delta$  = vůle mezi rozváděcím kolem a regulačním hrdlem [m]

#### 4.2.2.2 Tvar dávky v kanále rozváděcího kola

Plocha dávky je stejná jako je plocha přívodního hrdla. Jedna z možností, jak spočítat jeho plochu je již výše, ale také se dá spočítat jinou cestou. Tato plocha se používá k výpočtu času zaplnění kanálku.

$$S_h = \frac{V}{bin} \quad (4.6) \quad t = \frac{V}{S_h v_h} \quad (4.7)$$

$S_h$  = předběžná plocha přívodního hrdla [m<sup>2</sup>]

$v_h$  = rychlost tryskacího prostředku na výstupu z regulačního hrdla [ms<sup>-1</sup>]

V = měrný objem dopraveného tryskacího prostředku [m<sup>3</sup>/min]

b = délka kanálku [m]

i = počet kanálu v rozváděcím kole [ ]

n = otáčky metacího kola [min<sup>-1</sup>]

#### 4.2.3 Oběžné kolo

Oběžné kolo se skládá z lopatek. Pro maximální využití lopatek k urychlení tryskacího prostředku a zároveň co nejmenšímu opotřebení je potřeba docílit, aby tryskací prostředek dopadalo co nejbližší středu otáčení a pod malým úhlem.

##### 4.2.3.1 Optimální úhel natočení lopatek

$$\varphi = \sqrt{\left(\frac{\rho_2}{r_2}\right)^2 - 1} - \arctg \sqrt{\left(\frac{\rho_2}{r_2}\right)^2 - 1} + \frac{s}{2\rho_2} \quad (4.8)$$

$\varphi$  = úhel, který svírá osa lopatky s pracovní plochou kanálku [°]

$\rho_2$  = polární souřadnice popisující místo středu částice s lopatkou [m]



$r_2$  = vnější poloměr rozváděcího kola [m]

$s$  = tloušťka lopatky [m]

#### 4.2.3.2 Počet lopatek

Při návrhu optimálního počtu lopatek v oběžném kole jsou 2 koncepce. U koncepce 1. je rozvod uspořádán tak, aby kanálky rozváděcího kola byly umístěny mezi lopatkami oběžného kola. Při použití koncepce 2. jsou kanálky umístěny pod lopatkami. Po přibližném výpočtu počtu lopatek se vždy zvolí nejbližší nižší celočíselné sudé číslo (6, 8, 10, 12). Sudý počet lopatek zajišťuje lepší vyvážení oběžného kola.

$$i_1 = \frac{2\pi}{\psi_0 + 2\varphi} \quad (4.9) \quad i_2 = \frac{4\pi}{\psi_0 + 2\varphi} \quad (4.10)$$

$i_1$  = ideální počet lopatek koncepce 1. [ ]

$i_2$  = ideální počet lopatek koncepce 2. [ ]

$\psi_0$  = úhel mezi rovinou stěny kanálku a průvodičem [°]

$\varphi$  = úhel, který svírá osa lopatky s pracovní plochou kanálku [°]

#### 4.2.3.3 Životnost lopatek

Životnost lopatky je dána maximálním přípustným erozivním opotřebením lopatek na obvodě oběžného kola. Pokud víme, maximální dovolenou tloušťku opotřebením můžeme určit dobu provozu lopatky. V některých případech musíme lopatky vyměnit dříve než dojde k úplnému erozivnímu opotřebením. Je to v případě opotřebením některé lopatky více než druhé a pak není oběžné kolo vyváženo a vznikají velké vibrace, proto se musí lopatky vyměnit dříve. Když se mění lopatky, tak vždy všechny najednou. Jednotlivá hmotnost nových lopatek se od sebe nesmí lišit více jak o 2g své váhy. Běžně dosahovaná životnost lopatek je přibližně 300-800 hodin.

$$S_v = kP_{tmax}t_p \quad (4.11)$$

$$t_p = \frac{S_{max}}{kP_{tmax}} \quad (4.12)$$

$S_v$  = tloušťka opotřebením [m]

$S_{max}$  = maximální tloušťka opotřebením [m]

$t_p$  = doba provozu lopatky [s]

$k$  = rázový součinitel [ ]

$P_{tmax}$  = maximální výkon třecí síly na obvodě lopatky [W]



Obrázek 4.4: Nová lopatka[11]

Obrázek 4.5: Opotřebovaná lopatka -  
nutná výměna[11]

#### 4.2.4 Výkon metacího kola

Pro určení celkového výkonu metacího kola se využívá několik dílčích výkonů, které se následně sečtou. Výkony  $P_v$  a  $P_m$  se nedají určit výpočtem, ale musí se odhadnout podle zkušeností. Při použití běžných (radiálních) lopatek je účinnost oběžného kola mezi 70-75 % a u zakřivených lopatek dosahuje až 85%.

$$P = \frac{P_{už}}{\eta_o} + P_t + P_v + P_m \quad (4.13)$$

$$\eta_o = \frac{A_{už} - A_t - A_n}{A_{už}} \quad (4.14)$$

$$P_{už} = \frac{1}{2} \frac{m}{60} v^2 \quad (4.15)$$

$$P_t = 6M_1\omega \quad (4.16)$$

$P$  = celkový výkon metacího kola [W]

$P_{už}$  = užitkový výkon [W]

$P_t$  = výkon na překonání tření tryskacího prostředku mezi rozváděcím kolem a regulačním otvorem [ $W$ ]

$P_v$  = výkon na krytí ventilačních ztrát [ $W$ ]

$P_m$  = výkon na krytí mechanických ztrát v ložiscích [ $W$ ]

$\eta_o$  = účinnost oběžného kola [ ]

$m$  = hmotnost vytryskaného tryskacího prostředku [ $kg/min$ ]

$M_1$  = potřebný moment na překonání třecích sil na jednu dávku [ $Nm$ ]

$\omega$  = úhlová rychlost [ $s^{-1}$ ]

$A_{už}$  = užitková práce pro urychlení jedné dávky v oběžném kole [ $J$ ]

$A_n$  = ztracená energie při nárazu jedné dávky na lopatku [ $J$ ]

$A_t$  = práce potřebná pro překonání třecích sil jedné dávky [ $J$ ]

$v$  = výstupní rychlost tryskacího prostředku [ $ms^{-1}$ ]

#### 4.2.5 Účinnost metacího kola

Celková účinnost metacího stroje je dána užitkovým výkonem k celkovému výkonu (výkon elektromotoru). Běžná účinnost je okolo 50%, u radiálních lopatek a u zakřivených lopatek se účinnost pohybuje nad 60%.

$$\eta_c = \frac{P_{už}}{P} \quad (4.17)$$

$\eta_c$  = celková účinnost metacího kola [ ]

$P_{už}$  = užitkový výkon [ $W$ ]

$P$  = celkový výkon metacího kola [ $W$ ]

### 4.3 Aplikace tryskání

Tryskání se využívá pro předúpravu povrchu, kde potřebujeme dosáhnout čistoty povrchu a požadované drsnosti. Také se využívá pro kuličkování.

### 4.3.1 Porovnání parametrů dvou tryskacích prostředků pro předúpravu povrchu

Při tryskání se volbou tryskacího prostředku dají měnit konečné dosahované parametry. Zde je porovnání dvou tryskacích prostředků S 330 (ocelový granulát) viz obrázek 4.6, SM 140 (stainium: směs ocelových broků a zrn) viz obrázek 4.7 při použití stejných parametrů tryskání. [17]

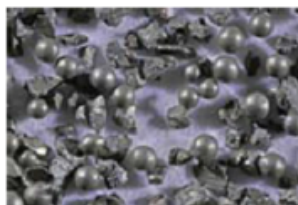
Původní stav byl dle ČSN ISO 8501-1 ohodnocen písmenem A (povrch oceli je téměř úplně pokryt pevně ulpívající vrstvou okují, ale v podstatě bez viditelných stop rzi). Po tryskání se bude kontrolovat dosažená drsnost a vzhled povrchu. Na otryskaném povrchu se provedou tři měření a vypočte se z nich průměrná hodnota viz tabulka 4.2. [19]

#### Parametry tryskání

- Otáčky metacího kola  $2400 \text{ min}^{-1}$
- Rychlost tryskacího prostředku  $77 \text{ m.s}^{-1}$
- Spotřeba tryskacího prostředku  $215 \text{ kg/min}$



Obrázek 4.6: Ocelový granulát [13]



Obrázek 4.7: Stainium [17]

Tabulka 4.2: Drsnost povrchu po tryskání[19]

Drsnost povrchu	S 330				SM 140			
	1	2	3	$\phi$	1	2	3	$\phi$
Ra	7,94	9,62	9,165	8,9	7,03	5,66	5,37	6,0
Rz	48,6	48,6	53,86	50,35	32,1	33,8	32,88	32,9
Rmax	61,1	58,5	61,58	60,47	39,8	40,4	41,74	40,6



Obrázek 4.8: Otryskaný povrch před a po aplikaci S 330 [19]



Obrázek 4.9: Otryskaný povrch před a po aplikaci SM 140 [19]

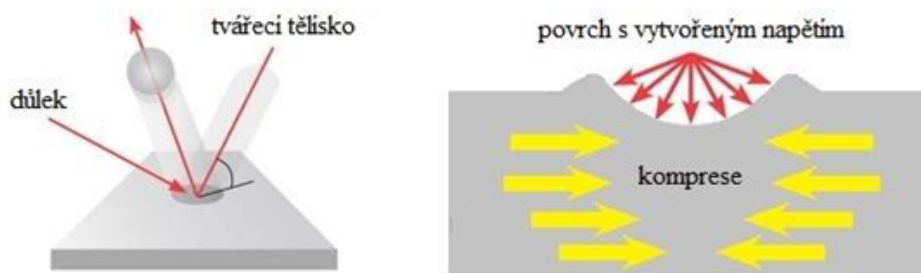
Po tryskání stanniia má povrch lepší výsledky než při použití ocelového granulátu. Při použití stanniia je možné zrychlit průchod pásu z 3 m/min až na 8m/min. [19]

#### 4.3.2 Mechanické zpevnění povrchu kuličkováním

Kuličkování je proces, při kterém dochází k plastické deformaci povrchové vrstvy kovu, jejíž důsledkem je zpevnění povrchu (zvýšení hodnoty pevnosti a tvrdosti) a vzniku tlakových (příznivých) zbytkových napětí viz obrázek 4.10 [21] Tato zbytková napětí jsou v případě kuličkování velmi vysoká. Proto dochází u takto zpracované součásti k předcházení vzniku a šíření trhlin, čili k maximálnímu zvýšení její únavové životnosti viz tabulka 4.3. Kuličkování navíc eliminuje vliv koncentrátorů napětí, jako jsou různé vruby a zaoblení. [5]

Tabulka 4.3: Navýšení životnosti součásti díky kuličkování [5]

Součásti	Zvýšení životnosti [%]
šroubové pružiny	1000
ozubená kola	1000
torzní tyče	600
svary	200
ojnice	100



Obrázek 4.10: Princip kuličkování [21]

#### 4.4 Příklad výpočtu elektromotoru pro metací kolo

Pro pohánění metacího kola se používají elektromotory s výkonem od 10 do 100 kW, což jsou celkem velké výkony. Potřebný výkon se počítá podle základních kritérií těmi jsou maximální výstupní rychlost tryskacího prostředku, množství tryskacího prostředku, které projde metacím kolem za minutu a otáčky metacího kola. Otáčky metacího kola se volí podle otáček elektromotoru. [26]

##### Zadání

- hmotnost vytryskaného tryskacího prostředku  $500 \text{ kg/min}$
- výstupní rychlost tryskacího prostředku  $75 \text{ ms}^{-1}$
- otáčky metacího kola (elektromotoru)  $2250 \text{ min}^{-1}$

Potřebný výkon se skládá z několika výkonů, které se následně sečtou viz vztah (4.18).

$$P = \frac{P_{u\check{z}}}{\eta_o} + P_t + P_v + P_m \quad (4.18)$$

#### 4.4. Příklad výpočtu elektromotoru pro metací kolo

Výkon na pokrytí ventilačních ztrát  $P_v$  a mechanických ztrát  $P_m$  se při otáčkách  $2250 \text{ min}^{-1}$  odhaduje na 5kW.

Dále je potřeba spočítat výkon na překonání tření mezi dávkou a kanálky v rozváděcím kole výpočet viz vztah (4.19).

$$P_t = 6M_1\omega = 6fF_1l_k\omega = 6f1000m_1l_k2\pi n = 6f1000\frac{m}{in}l_k2\pi n \quad (4.19)$$
$$P_t = 6 \cdot 1 \cdot 1000 \cdot \frac{500}{60} \cdot \frac{8 \cdot 2250}{60} \cdot 0,05 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{2250}{60} = 1963,5W \doteq 2kW$$

$P_t$  = výkon na překonání tření tryskacího prostředku mezi rozváděcím kolem a regulačním otvorem [W]

$M_1$  = potřebný moment na překonání třecích sil na jednu dávku [Nm]

$\omega$  = úhlová rychlost [ $s^{-1}$ ]

$m$  = hmotnost vytryskaného tryskacího prostředku [kg/min]

$m_1$  = hmotnost jedné dávky [kg]

$f$  = vnitřní tření mezi broky [ ]

$l_k$  = délka kanálku rozváděcího kola [m]

$i$  = počet kanálků rozváděcího kola [ ]

$n$  = otáčky metacího kola [ $\text{min}^{-1}$ ]

Dále je potřeba spočítat užitečný výkon. To je výkon díky, kterému se otáčí metací kolo a tryskací prostředek dosahuje požadované rychlosti.

$$P_{u\check{z}} = \frac{1}{2} \frac{m}{60} v^2 \quad (4.20)$$
$$P_{u\check{z}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{500}{60} \cdot 75^2 = 23437,5W \doteq 23,5kW$$

$P_{u\check{z}}$  = užitečný výkon [W]

$v$  = výstupní rychlost tryskacího prostředku [ $\text{ms}^{-1}$ ]

Při výpočtu celkového výkonu je potřeba užitečný výkon podělit účinností metacího kola, v tomto případě jsem použil metací kolo s radiálními lopatkami s účinností 73 %. Poté všechny potřebné výkony sečteme.

#### 4.4. Příklad výpočtu elektromotoru pro metací kolo

---

$$P = \frac{P_{u\check{z}}}{\eta_o} + P_t + P_v + P_m$$
$$P = \frac{23,5}{0,73} + 2 + 5 = 39,2$$

Celkový potřebný výkon pro metací kolo s průtokem tryskacího prostředku  $500\text{kg}/\text{min}$ , výstupní rychlostí  $75\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  a otáčkách motoru  $2250\text{min}^{-1}$  je  $39,2\text{kW}$ . Použité vztahy ve 4. kapitole jsem získal z literatury [24].



---

## Závěr

Tryskání metacími koly je ekonomicky výhodnější než pneumatické tryskání. Je výrazně intenzivnější a proto se používá v hromadné a velkosériové výrobě. Nevýhodou této metody je nemožnost jejího využití v terénu.

U vyhodnocování metody tryskání se dá kontrolovat mnoho parametrů např. dosahovaná drsnost materiálu, čistota povrchu, která se hodnotí pouze vizuálně dle normalizované fotografie, intenzita tryskání pomocí Almen-testu, přítomnost solí na povrchu, mastnota povrchu.

Při volbě abraziva je potřeba zvážit všechna pro a proti. Nelze určit zda je dané abrazivo vhodnější jen na základě kvality otryskaného povrchu. Musíme dbát i na opotřebení stroje, spotřebu tryskacího prostředku.

Metací kolo se navrhuje, optimalizuje, podle potřebné výstupní rychlosti tryskacího prostředku a vytryskaného množství tryskacího prostředku. Výstupní rychlost je dána velikostí odstředivé a obvodové rychlosti. Obě tyto rychlosti jsou závislé na otáčkách a velikosti metacího kola. Otáčky se nedoporučují volit vyšší než 3000 ot/min z konstrukčních důvodů a také klesá účinnost metacího kola. Výstupní rychlost lze zvýšit vhodným tvarem zakřivení lopatky nebo zvětšením průměru metacího kola. U metacích kol může rychlost tryskacího prostředku dosahovat až  $110\text{ms}^{-1}$ . Zvýšením průtokové rychlosti v přívodním hrdle lze zvýšit objem vytryskaného tryskacího prostředku. Jednou z možností je vytvoření hladšího vnitřního povrchu hrdla nebo sklonění osy rotace metacího kola.

---

## Literatura

- [1] **Dr. Petr Nevěčný**; Stupně přípravy ocelového podkladu dle ČSN ISO 8501-1 a podobných norem. Únor 2002.  
Dostupné z [http : //www.povrchoveupravy.cz/PDF/NevecnyPU2.pdf](http://www.povrchoveupravy.cz/PDF/NevecnyPU2.pdf)
- [2] **Jan Hauzr**; Stupně čistoty povrchu. 2010  
Dostupné z [http : //www.janhauzr.eu/stupne – čistoty](http://www.janhauzr.eu/stupne – čistoty)
- [3] **Vladislav Vosáhlo** Technologie kuličkování (Shot peening). Povrcháři, Červenec 2009 7č. 8s.
- [4] **Gamin**; Technický list - Přístroj pro měření obsahu solí Hedon SSM. Leden 2009.
- [5] **Ing.Vladimír Marek**; Technologie tryskání jako konečná úprava povrchu (kuličkování). TechPark, Září 2014.
- [6] **Reno - Tech.cz s.r.o.**; Co je pískování? čím se pískuje?  
Dostupné z: [http : //www.piskovacka.cz/info – 82 – co – je – pískovani – cim – se – pískuje](http://www.piskovacka.cz/info – 82 – co – je – pískovani – cim – se – pískuje) dne[ 16.4.2015]
- [7] **spolmont.cz**; Technologie tryskání.  
Dostupné z: [http : //www.spolmont.cz/technologie/technologie – tryskani.cz.html](http://www.spolmont.cz/technologie/technologie – tryskani.cz.html) dne[ 11.5.2015]
- [8] **Ing. Karel Kaleta**; Zbytková napětí v povlacích žárových nástříků. MM Průmyslové Spektrum, Leden 2001 68s.
- [9] **osk-kiefer.de/**; Determining the Shot Peening Intensity and the Coverage of Shot Peening.  
Dostupné z: [http : //osk – kiefer.de/en/quality – assurance/shot – peening – intensity – and – coverage](http://osk – kiefer.de/en/quality – assurance/shot – peening – intensity – and – coverage) dne[ 13.5.2015]
- [10] **Ing. Alexander Sedláček, Ph.D., Petr Chábera** ; Životnost a vady lopatek pro Metací jednotky SAF 35, 52-4210A ). Červen 2013 .

- 
- [11] **Ing. Alexander Sedláček, Ph.D.** ; Nové možnosti vyhodnocování mastnoty povrchu ). Povrcháři, Prosinec 2012 7č. 3-6s.
- [12] **spolmont.cz**; Abrazivní materiály pro úpravu povrchů.  
Dostupné z: [http : //www.spolmont.cz/sortiment/abraziva – na – tryskani.cz.htm](http://www.spolmont.cz/sortiment/abraziva-na-tryskani.cz.htm) dne[ 13.4.2015]
- [13] **wista.cz**; Abraziva.  
Dostupné z: [http : //www.wista.cz/produkty/tryskani/abraziva/](http://www.wista.cz/produkty/tryskani/abraziva/) dne[ 13.4.2015]
- [14] **abraziva.cz**; Inertní tryskací materiály / abraziva.  
Dostupné z: [http : //www.abraziva.cz/info/](http://www.abraziva.cz/info/) dne[ 15.4.2015]
- [15] **VTE,s.r.o. Galanta**; Mechanické úpravy povrchu tryskaním.  
TechPark, Květen 2008.
- [16] **abraziva.cz**; Aplikace abraziv na povrchy.  
Dostupné z: [http : //www.abraziva.cz/info/](http://www.abraziva.cz/info/) dne[ 17.4.2015]
- [17] **wabrasives.com**; Stainium.  
Dostupné z: [https : //www.wabrasives.com/cs/reseni – produkty – premiove – stainium.html](https://www.wabrasives.com/cs/reseni-produkty-premiowe-stainium.html) dne[ 21.4.2015]
- [18] **AgtoS**; Výkonné turbíny AGTOS.  
Dostupné z: [http : //www.agtos.de/pdf\\_files/turbinen/pb\\_turbinen\\_cz\\_rz.pdf](http://www.agtos.de/pdf_files/turbinen/pb_turbinen_cz_rz.pdf) dne[ 24.4.2015]
- [19] **Vacuumschmelze GmbH**; Technický list - Volba abraziva,  
Prosinec 2009.
- [20] **Scpmoto**; Tlakovzdušné tryskání  
Dostupné z: [http : //www.scpmoto.cz/tlakovzdune – tryskani](http://www.scpmoto.cz/tlakovzdune-tryskani) dne[ 8.5.2015]
- [21] **Ondřej Lipka**; Bakalářská práce - Dokončovací technologie využívající plastickou deformaci povrchu, VUT 2013.
- [22] **Michal Skalák**; Bakalářská práce - Vliv lehkého tryskání na přílnavost povlaků z nátěrových hmot, ČVUT 2009.
- [23] **Bc.Jaroslav Rykr**; Diplomová práce - Materiály pro tryskací zařízení, ČVUT 2011.
- [24] **Doc. Ing Vladimír Zeman, CSc, Zdeněk Hlaváč**; Výzkumná práce - Teoretické posouzení konstrukčních alternativ metacích jednotek, Plzeň 1976.

- [25] **Ing. Alexander Sedláček** Nekovové tryskací prostředky. Povrcháři, Prosinec 2010 10č. 9-12s.
- [26] **Wheelabrator** Tryskací zařízení s metacími koly od společnosti Wheelabrator.  
Dostupné z: [http://www.wheelabratorgroup.com/cz/equipment/wheelblast\\_techology.aspx](http://www.wheelabratorgroup.com/cz/equipment/wheelblast_techology.aspx)  
dne[ 8.5.2015]

## Seznam použitých zkratk

$A_{u\check{z}}$  = užitková práce pro urychlení jedné dávky v oběžném kole [ $J$ ]

$A_n$  = ztracená energie při nárazu jedné dávky na lopatku [ $J$ ]

$A_t$  = práce potřebná pro překonání třecích sil jedné dávky [ $J$ ]

$b$  = délka kanálku [ $m$ ]

$d_r$  = průměr regulačního hrdla [ $m$ ]

$d_h$  = průměr přívodního hrdla [ $m$ ]

$Ek$  = kinetická energie [ $J$ ]

$Ek_T$  = tečná kinetická energie [ $J$ ]

$Ek_N$  = normálová kinetická energie [ $J$ ]

$f$  = vnitřní tření mezi broky [ ]

$f_1$  = koeficient smykového tření tryskacího prostředku a metacího kola [ ]

$i$  = počet kanálků v rozváděcím kole [ ]

$i_1$  = ideální počet lopatek koncepce 1. [ ]

$i_2$  = ideální počet lopatek koncepce 2. [ ]

$K$  = součinitel zaplnění [ ]

$k$  = rázový součinitel [ ]

$l_k$  = délka kanálku rozváděcího kola [ $m$ ]

$M_1$  = potřebný moment na překonání třecích sil na jednu dávku [ $Nm$ ]

$m$  = hmotnost vytryskaného tryskacího prostředku [ $kg/min$ ]

---

$m_1$  = hmotnost jedné dávky [kg]  
 $m_z$  = hmotnost tryskacího prostředku [kg]  
 $n$  = otáčky metacího kola [ $s^{-1}$ ]  
 $P$  = celkový výkon metacího kola [W]  
 $P_m$  = výkon na krytí mechanických ztrát v ložiscích [W]  
 $P_t$  = výkon na překonání tření tryskacího prostředku mezi rozváděcím kolem a regulačním otvorem [W]  
 $P_{tmax}$  = maximální výkon třecí síly na obvodě lopatky [W]  
 $P_{už}$  = užitečný výkon [W]  
 $P_v$  = výkon na krytí ventilačních ztrát [W]  
 $r$  = poloměr metacího kola [m]  
 $r_2$  = vnější poloměr rozváděcího kola [m]  
 $r_h$  = poloměr přívodního hrdla [m]  
 $S_h$  = předběžná plocha přívodního hrdla [ $m^2$ ]  
 $S_{max}$  = maximální tloušťka opotřebení [m]  
 $S_v$  = tloušťka opotřebení [m]  
 $s$  = tloušťka lopatky [m]  
 $t_p$  = doba provozu lopatky [s]  
 $t_3$  = čas pohybu tryskacího prostředku po lopatce [s]  
 $V$  = měrný objem dopraveného tryskacího prostředku [ $m^3/min$ ]  
 $v$  = výstupní rychlost tryskacího prostředku [ $ms^{-1}$ ]  
 $v_d$  = odstředivá rychlost tryskacího prostředku [ $ms^{-1}$ ]  
 $v_h$  = rychlost tryskacího prostředku na výstupu z regulačního hrdla [ $ms^{-1}$ ]  
 $v_o$  = obvodová rychlost tryskacího prostředku [ $ms^{-1}$ ]  
 $v_p$  = rychlost tryskacího prostředku na výstupu z přívodního hrdla [ $ms^{-1}$ ]  
 $v_r$  = rychlost tryskacího prostředku před dopadem na lopatku [ $ms^{-1}$ ]  
 $x_b$  = x-ová souřadnice velikosti přívodního hrdla [m]

---

$y_b$  = y-ová souřadnice velikosti přívodního hrdla [ $m$ ]

$\alpha$  = úhel dopadu tryskacího prostředku [ $^\circ$ ]

$\Delta$  = vůle mezi rozváděcím kolem a regulačním hrdlem [ $m$ ]

$\rho_2$  = polární souřadnice popisující místo středu částice s lopatkou [ $m$ ]

$\eta_o$  = účinnost oběžného kola [ ]

$\eta_c$  = celková účinnost metacího kola [ ]

$\varphi$  = úhel, který svírá osa lopatky s pracovní plochou kanálku [ $^\circ$ ]

$\psi$  = úhel posunutí tryskacího prostředku [ $rad$ ]

$\psi_0$  = úhel mezi rovinou stěny kanálku a průvodičem [ $^\circ$ ]

$\omega$  = úhlová rychlost [ $s^{-1}$ ]

$\omega_1$  = pomocná úhlová rychlost [ $s^{-1}$ ]

## Obsah přiloženého CD

readme.txt.....	stručný popis obsahu CD
src	
thesis .....	zdrojová forma práce ve formátu L <sup>A</sup> T <sub>E</sub> X
text .....	text práce
thesis.pdf .....	text práce ve formátu PDF