



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

VYUŽITÍ SUCHÉHO LEDU PŘI ČIŠTĚNÍ POVRCHŮ

DRY ICE BLASTING FOR SURFACE CLEANING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Horňák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Vítězslav Máša, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství
Student: **David Horňák**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Vítězslav Máša, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Využití suchého ledu při čištění povrchů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zaměřuje na moderní a vysoce efektivní způsob průmyslového čištění povrchů: tryskání suchým ledem. Teoretický základ tohoto tématu je spojen s vlastnostmi suchého ledu jako materiálu, s principy čištění a používanou technikou. Studovány budou konkrétní průmyslové aplikace, přičemž zvláštní pozornost bude věnována energetické náročnosti procesu tryskání a nakládání s odpady po tryskání. Výsledky práce najdou uplatnění v Laboratoři energeticky náročných procesů NETME Centre.

Cíle bakalářské práce:

1. Představení procesu tryskání suchým ledem
2. Rešerše aplikací tohoto procesu v průmyslové praxi
3. Posouzení energetické náročnosti procesu
4. Návrh možných úsporných opatření

Seznam doporučené literatury:

SPUR, G., E. UHLMANN a F. ELBING. Dry-ice blasting for cleaning: process, optimization and application. Wear [online]. 1999, 233-235, 402-411 [cit. 2019-09-19]. DOI: 10.1016/S0043-1648(99)00204-5. ISSN 00431648. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164899002045>

MÁŠA, V., P. KUBA. Efficient use of compressed air for dry ice blasting. Journal of Cleaner Production [online]. 2016, 111, 76-84 [cit. 2019-09-19]. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.07.053. ISSN 09596526.

Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652615009816>

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

.....
prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

.....
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D
děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá procesem tryskání suchým ledem, který se řadí mezi moderní a efektivní metody čištění povrchů. Z webových stránek výrobců je zřejmé, že je tato metoda hojně rozšířená v průmyslové praxi, ale výzkumných prací, které se touto metodou zabývají, je velice málo. Též chybí odborná literatura, ze které by bylo patrné, do jaké míry je tato metoda v daných průmyslových odvětvích využívána. Z tohoto důvodu je v práci na základě důkladné rešerše proveden systematický přehled aplikací této technologie v průmyslové praxi. Také je podrobně představena technologie tryskání suchým ledem včetně tryskacího stroje a jeho jednotlivých aparátů. V práci je také na charakteristické případové studii ukázána vysoká energetická a ekonomická náročnost procesu tryskání suchým ledem. Z této studie vychází, že 94 % nákladu na čištění je spojených se spotřebou suchého ledu. Z ekonomického pohledu je tedy nutné efektivně hospodařit se suchým ledem. Z těchto poznatků pak vycházejí navržená úsporná opatření, která jsou:

- automatizace procesu
- aplikace na míru
- optimalizace kompresoru
- nahrazení stlačeného vzduchu jinou formou energie

Zavedení těchto opatření může otevřít cestu k širšímu využití tryskání suchým ledem v průmyslové praxi.

Abstract

This Bachelor thesis deals with dry ice blasting, which belongs to modern and effective surface cleaning methods. The websites of various manufactures clearly state that this method is utilized in many industries, but there is a low number of research articles dealing with this cleaning method. The amount of literature that covers the usage of this method in certain industries is also insufficient. For this purpose, systematic overview of dry ice blasting applications in industry is presented based on thorough review of literature. The technology of dry ice blasting including dry ice blasting machine and its individual equipment is also closely introduced. The thesis also includes the characteristic case study of high energy and economic intensity of this process. This study states that 94 % of cleaning expenses is linked with consumption of dry ice. The effective dry ice management is necessary from the economic point of view. Suggested saving measures follow on from these facts. These measures are:

- process automation
- custom applications
- compressor optimization
- replacement of compressed air with different form of energy

Implementation of these saving measures can help greater extension of dry ice blasting in industrial practise.

Klíčová slova

tryskání, suchý led, čištění povrchů, energetická náročnost, průmyslové využití

Key words

blasting, dry ice, surface cleaning, energy intensity, industrial applications

Bibliografická citace

HORŇÁK, David. *Využití suchého ledu při čištění povrchů*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/123741>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Vítězslav Máša.

Prohlášení o původnosti

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Využití suchého ledu při čištění povrchů“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Vítězslava Máši, Ph.D. a v seznamu literatury jsem uvedl všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně 26. 6. 2020

.....
David Horňák

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Vítězslavu Mášovi, Ph.D. za věnovaný čas, cenné připomínky a rady, které mi poskytl během vypracovávání mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Dalimilu Petrilákovi ze společnosti Alkion service s. r. o. za odborné rady a zkušenosti z průmyslové praxe. V neposlední řadě také celé své rodině za podporu po celou dobu studia.

Obsah

Úvod.....	11
1 Suchý led.....	13
1.1 Vlastnosti suchého ledu.....	13
1.2 Výroba suchého ledu.....	14
2 Technologie tryskání suchým ledem	16
2.1 Mechanismus čištění	17
2.2 Tryskací stroj.....	18
2.2.1 Tryska	19
2.2.2 Hadice	20
2.2.3 Podavač.....	20
2.2.4 Rozdělení podle formy suchého ledu	20
2.2.5 Rozdělení podle způsobu dopravy suchého ledu do trysky.....	21
2.3 Další aparáty.....	22
2.3.1 Kompresor	22
2.3.2 Odtah vzduchu a nečistot.....	22
3 Využití tryskání suchým ledem v průmyslové praxi	23
3.1 Výroba plastových a gumových produktů	24
3.2 Slévárenství	25
3.3 Automobilový průmysl	26
3.4 Čištění elektrických zařízení	27
3.5 Výroba energie	28
3.6 Dekontaminace jaderných elektráren	29
3.7 Letecký průmysl.....	29
3.8 Pravidelná údržba zařízení a provozů	30
3.9 Čištění vzduchotechniky a průmyslových odtahů.....	31
3.10 Předúprava povrchů.....	31
3.11 Shrnutí průmyslových aplikací.....	32
4 Posouzení energetické náročnosti procesu	34
4.1 Zadání.....	34
4.2 Výpočet	34
4.2.1 Stanovení měsíčního pracovního fondu a nákladů na suchý led	34
4.2.2 Spotřeba elektrické energie tryskacího stroje	35
4.2.3 Spotřeba energie kompresoru	35

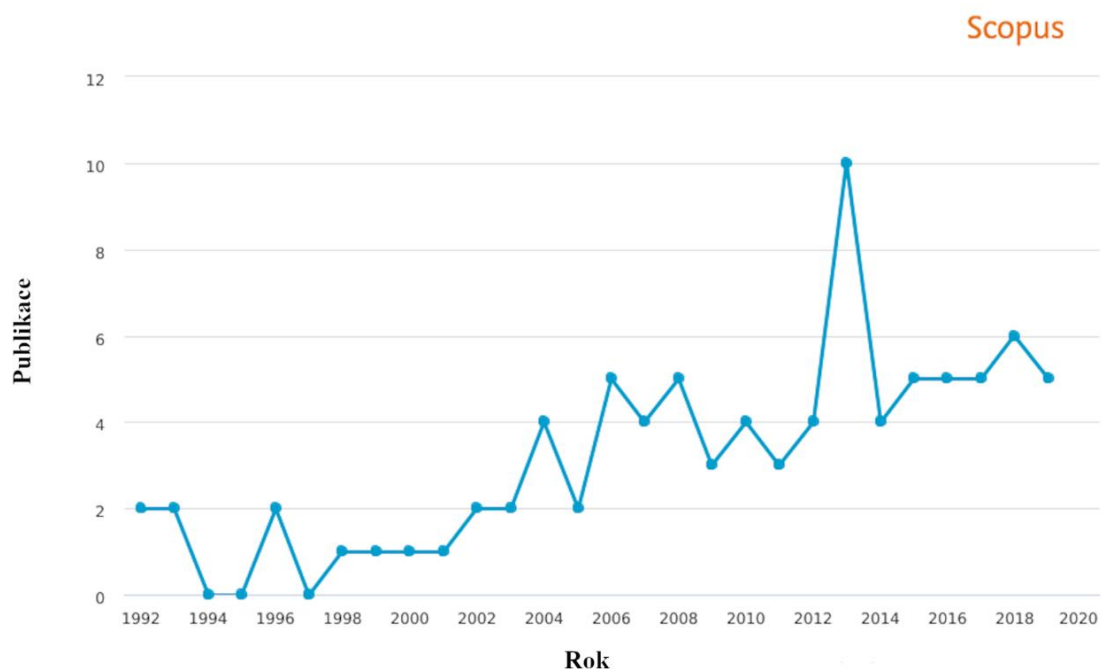
4.3	Diskuze	38
5	Návrh úsporných opatření	39
5.1	Automatizace procesu	39
5.2	Aplikace na míru	39
5.3	Optimalizace kompresoru	40
5.4	Nahrazení stlačeného vzduchu jinou formou energie	41
	Závěr	42
	Seznam literatury	43
	Seznam symbolů a zkratk	50
	Seznam obrázků	52
	Seznam tabulek	53

Úvod

Čištění povrchů je nezbytná součást průmyslové výroby. Nedostatečné čištění ovlivňuje kvalitu výrobků, snižuje životnost nástrojů a zvyšuje výrobní náklady. Proto je zásadní zvolit si tu nejvhodnější čisticí metodu pro danou aplikaci.

Čisticí metody mohou být rozděleny na mokré a suché. Mokré metody jsou velmi účinné a hojně využívané. Jejich největší nevýhody tkví v používání chemických látek škodlivých pro životní prostředí, velké spotřebě vody a nutnosti sušení po provedení čisticího procesu. Suché metody využívají k čištění především vysokotlakého proudu vzduchu. Pro lepší čisticí účinek se do proudu vzduchu přidávají pevné částice např. písek, skleněné kuličky, ocelové granuláty, balotina nebo keramické materiály. Avšak tato média nejsou vhodná pro citlivé a křehké povrchy a vytváří sekundární odpad při dopadu na čištěný povrch. Pokud použijeme tryskání suchým ledem, mnoho z těchto problémů může být vyřešeno. [1]

Tryskání suchým ledem je moderní a efektivní čisticí metoda již stabilizovaná v některých průmyslových odvětvích, která se díky řadě výhod (univerzálnost, nízká abrazivnost, vysoká rychlost čisticího procesu atd.) těší stále větší oblibě. To reflektuje i mírný nárůst počtu odborných článků v posledních letech, které se věnují této technologii. Jak dokládá statistika počtu publikací v daném roce z databáze Scopus (obr. 1) při zadání hledaného dotazu (“dry ice blasting” OR “solid carbon dioxide blasting”) AND (“cleaning” OR “surface”). Avšak celkový počet odborných publikací je nízký a část informací o této technologii je uvedena pouze na webových stránkách výrobců. Dosud se také žádný odborný článek nevěnoval tomu, do jaké míry je tato technologie v daných průmyslových odvětvích využívána. Proto se 3. kapitola zabývá systematickým přehledem využití této metody v průmyslové praxi. Tento přehled odráží míru využití v daném odvětví a je sestaven na základě důkladné rešerše literatury.



obr. 1 Počet publikací zabývající se tryskání suchým ledem v daném roce, upraveno z [2]

Rozšíření této metody do dalších odvětví zpomalují některé její nedostatky. Mezi ně patří vyšší energetická náročnost nebo rychlá degradace suchého ledu. Snížení spotřeby energie při tryskání se věnovali již Uhlmann et al. [3], kteří představili prototyp odstředivého akcelérátoru nebo Máša et al. [4], kteří uvedli přehled možných úsporných energetických opatření. Rychlostí

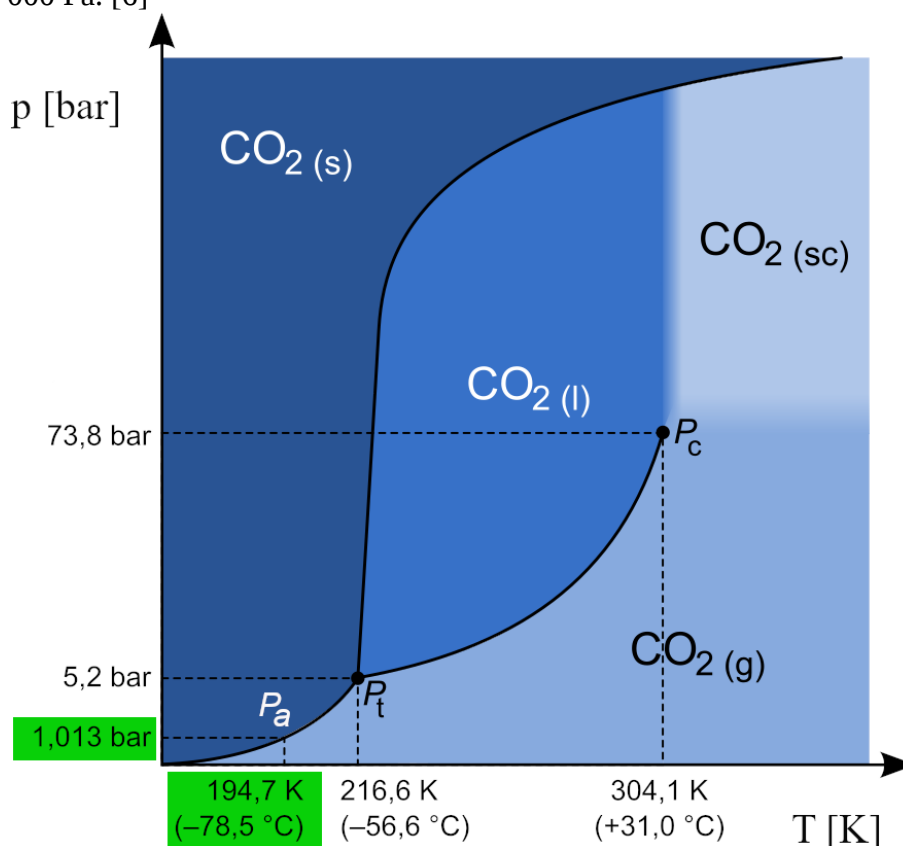
a mírou degradace suchého ledu se experimentálně zabývala bakalářská práce [5]. Pro další rozvoj této metody je nutné se těmito nedostatky zabývat a pokusit se o jejich minimalizaci. Z tohoto důvodu je ve 4. kapitole provedena charakteristická případová studie, která se zabývá energetickou a ekonomickou stránkou procesu tryskání suchým ledem. Z této studie vycházejí navržená úsporná opatření, která jsou popsána v následující kapitole. V prvních dvou kapitolách této práce je blíže představena technologie tryskání suchým ledem a samotný suchý led. Hlavní cíle této bakalářské práce jsou přinést přehled průmyslových aplikací této technologie s důrazem na čištění povrchů, zhodnotit energetickou a ekonomickou náročnost procesu a navrhnout případná úsporná opatření.

1 Suchý led

Suchý led se používá jako tryskací médium při čištění povrchů technologií tryskání suchým ledem. Tato kapitola si klade za cíl seznámit čtenáře se základními vlastnostmi suchého ledu (CO_2) a jeho výrobou.

1.1 Vlastnosti suchého ledu

Oxid uhličitý (CO_2) je za normálních podmínek bezbarvá, nehořlavá, chemicky inertní plynná látka, která je těžší než vzduch a má dobrou rozpustnost ve vodě. Kapalně skupenství se tvoří pod kritickou teplotou 304,15 K (31 °C) a nad trojným bodem s teplotou 216,75 K (−56,6 °C) a tlakem 518 000 Pa. [6]



obr. 2: Fázový diagram p – T oxidu uhličitého (není v měřítku), upraveno z [7]

Poznámka: (s) – pevná fáze (l) – kapalná fáze (g) – plynná fáze
(sc) – superkritická tekutina P_t – trojný bod P_c – kritický bod
 P_a – bod sublimace při atmosférickém tlaku

Pevné skupenství oxidu uhličitého se také nazývá suchý led. Jeho vlastnosti odpovídají bodu P_a na obr. 2 (zeleně zvýrazněno). Za atmosférického tlaku (101 325 Pa) vzniká pevná fáze při teplotě 194,65 K (−78,5 °C). V p – T diagramu oxidu uhličitého (obr. 2), se P_a nachází pod trojným bodem, z čehož plyne, že kapalná fáze je nestabilní a pevná látka se přímo mění na plynnou tzv. sublimuje. Při atmosférickém tlaku a teplotě 194,65 K (−78,5 °C) se tvrdost suchého ledu nachází mezi 2. a 3. stupněm Mohsovy stupnice tvrdosti. Jde o poměrně nízkou hodnotu, která odpovídá tvrdosti sádrovce, respektive vápence. Hustota se pohybuje v rozmezí 1000–1500 kg/m³. Suchý led se většinou vyrábí v podobě tzv. pelet (obr. 3). Ty mají válcový tvar obvykle s průměrem 3 mm a délkou 5–15 mm. [6, 8, 9]



obr. 3: Pelety suchého ledu ($\varnothing 3 \text{ mm}$) [10]

1.2 Výroba suchého ledu

Pelety suchého ledu se vyrábí z kapalného oxidu uhličitého (CO_2), který vzniká stlačením plynného oxidu uhličitého. Plynný oxid uhličitý je získáván jako vedlejší produkt různých chemických procesů např. výroby alkoholu, zpracování amoniaku, výroby vodíku, rafinace ropy a zemního plynu nebo také hromaděním a čištěním oxidu uhličitého z přírodních nalezišť zemního plynu. Malá část je také získávána z různých spalovacích procesů. Plynný oxid uhličitý je zkapalněn stlačením na tlak 1,35–2,01 MPa a ochlazením na teplotu 244–255 K (-29°C až -18°C). Zkapalněný CO_2 je skladován v tlakových nádobách při tlaku 2 MPa a teplotě 253 K (-20°C) nebo při vyšším tlaku 5,7 MPa a teplotě 293 K (20°C). Suchý led se vyrábí v takzvaném peletizéru, ve kterém zkapalněný oxid uhličitý expanduje přibližně na tlak 0,101 MPa a teplotu -79°C . Tím se vytvoří CO_2 sníh (pevná látka v podobě vloček) a studený plynný oxid uhličitý. Při tomto procesu vznikne z kapalného CO_2 zhruba 50 % sněhu a 50 % plynu. CO_2 sníh je dále hydraulicky stlačen do velkých bloků či plátů nebo protlačen skrz vytlačovací desky do podoby pelet či nuget různých průměrů. Oxid uhličitý, který se nepřemění na sníh, je zachycen a znovu použit na další výrobu suchého ledu. [8, 11]

Suchý led může být vyráběn v zařízeních, které zpracovávají oxid uhličitý a poté dopravován k místu jeho využití. Převážně je ve formě pelet v tepelně izolovaných boxech s kapacitou 200 až 400 kg. Boxy udrží pelety použitelné po dobu 5 až 7 dnů. Průměrný úbytek hmotnosti pelet se pohybuje od 1 % po 5 hodinách až po 14 % po 72 hodinách. Avšak než se pelety od výrobce dostanou k místu jejich využití, trvá to obvykle 24–72 hodin. Tím dojde k částečné degradaci pelet, které pak mají horší mechanické vlastnosti, jsou náchylnější k sublimaci a polámání již v hadici a snižují tak účinnost čisticího procesu. Alternativou může být výroba přímo v místě použití pomocí kompaktních peletizérů, které zajišťují dodávku čerstvých pelet k okamžitému použití. K přínosům tohoto přístupu patří snížení spotřeby suchého ledu, zkrácení doby čištění, snížení nákladů na dopravu pelet a celkové zlepšení efektivity procesu. Na druhé straně je třeba počítat s vyššími investičními náklady spojenými s pořízením peletizéru, tlakových nádob na zásoby kapalného oxidu uhličitého nebo na potřebné chladicí zařízení a tepelně izolované boxy pro skladování nevyužitých pelet. Tento způsob výroby je ekonomicky výhodný pro provoz, kde je potřeba každodenního čištění. [8]

Na trhu je mnoho komerčně dostupných peletizérů s výrobními kapacitami od 30 kg/h až po 1100 kg/h. Vytlačovací desky jsou dostupné pro různé průměry od 3 mm po 19 mm podle potřeby a jsou zaměnitelné. Existují i stroje na výrobu celých bloků či plátů suchého ledu, které je vyrábí přímo anebo slisováním pelet. Boxy na skladování pelet se vyrábí z expandovaného polypropylénu nebo z polyethylenu s dutinami vyplněnými pěnou. Objemové kapacity bývají od 50 l do 500 l. [12, 13]

2 Technologie tryskání suchým ledem

Tryskání suchým ledem (*obr. 4*) se používá převážně k čištění povrchů. Pelety suchého ledu jsou urychleny na vysokou rychlost pomocí stlačeného vzduchu a dopadají na povrch čištěné součásti, přičemž odstraňují nežádoucí vrstvy. Tato technologie je schopna odstranit širokou škálu znečištění (prach, rez, barevný nátěr, mastnota, oleje, kovové rozstříky) a nachází uplatnění v mnoha odvětvích (slévárnictví, výroba plastů, výroba automobilů a letadel), které budou blíže popsány v kapitole 3 *Využití tryskání suchým ledem v průmyslové praxi*. [14]

Tryskání suchým ledem je relativně nová technologie. Jako jedna z prvních firem se touto technologií zabývala společnost Lockheed Corporation na konci 70. a na počátku 80. let. První komerčně dostupné stroje na tryskání suchého ledu se objevily na trhu v roce 1987. V dnešní době mezi největší výrobce vybavení pro tryskání suchým ledem patří Cold Jet (USA), ASCO (Švýcarsko), ICEsonic (Chorvatsko) nebo ARTIMPEX N.V.–CRYONOMIC (Belgie). [14]



obr. 4: Proces tryskání suchým ledem [15]

Mezi největší výhody patří univerzálnost, vysoká rychlost celého čistícího procesu a jeho velmi nízká abrazivnost díky nízké tvrdosti suchého ledu. Podstatnou výhodou je také to, že po čistícím médiu nevznikají žádné další odpadní látky, které by musely být zpracovány (suchý led sublimuje ihned po dopadu na povrch). Na druhou stranu existují také omezení, která tuto technologii limitují. Mezi ně patří vysoká energetická náročnost, nadměrný hluk, rychlá degradace suchého ledu nebo složitost technologie (potřeba více aparátů). Z pohledu vývoje této technologie je důležité se těmito nedostatky zabývat a snažit se je minimalizovat. Energetické náročnosti procesu tryskání suchým ledem se věnují poslední dvě kapitoly této práce. [4, 8]

2.1 Mechanismus čištění

Mechanismus odstraňování nežádoucích částic z povrchu je založen na kombinaci tří základních faktorů. Jsou to:

- tepelný účinek zapříčiněný lokálním ochlazením, které způsobí ztrátu pružnosti povrchu a zkřehnutí nežádoucí vrstvy
- mechanický účinek, který je spojen s kinetickou energií pelet suchého ledu a proudů vzduchu při dopadu na povrch
- expanzní účinek způsobený sublimací pelet při dopadu na povrch [9]

Protože teplota pelet dopadajících na čištěný povrch se pohybuje kolem $-78,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, dochází k lokálnímu podchlazení (tepelnému šoku) povrchu s vrstvou nežádoucích částic. Toto podchlazení způsobí snížení pružnosti a přilnavosti materiálu povrchu a také zkřehnutí a smrštění vrstvy nečistot. Vzhledem k různým hodnotám koeficientů teplotní roztažnosti základního materiálu a nežádoucí vrstvy, vzniká na rozhraní těchto vrstev smykové napětí, které napomáhá snadnějšímu „odtržení“ nečistot. Při tomto procesu vznikají také v nežádoucí vrstvě trhlinky, které se shlukují, rostou a podporují odstraňovací proces. Tepelný šok je nejúčinnější při tryskání nekovového kontaminantu na kovovém povrchu. [8]

Druhým faktorem ovlivňujícím odstraňování nečistot je kinetická energie pelet suchého ledu vyvolaná proudem stlačeného vzduchu. Nežádoucí vrstva je odstraněna, pokud bude síla při dopadu vyšší než síla spojující nečistoty s podkladem. Spur et al. [9] zjistili, že při pracovním tlaku 12 bar a spotřebě stlačeného vzduchu $11\text{ mN}^3/\text{min}$, byla maximální dopadová síla 150 N. Ze základní rovnice pro kinetickou energii (2.1):

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (2.1)$$

kde jednotlivé veličiny mají následující význam:

E_k	kinetická energie částic suchého ledu	[J]
m	hmotnost částic suchého ledu	[kg]
v	výstupní rychlost částic suchého ledu	[m/s]

Je zřejmé, že parametry, kterými můžeme ovlivňovat rychlost odstraňování částic, jsou: hmotnostní tok (spotřeba) suchého ledu a výstupní rychlost pelet suchého ledu. S těmito parametry také úzce souvisí tlak stlačeného vzduchu na vstupu do trysky (pracovní tlak) a velikost pelet suchého ledu. [9]

Třetím faktorem ovlivňujícím čisticí proces má prudká sublimace ihned po nárazu pelet na čištěný povrch. Při tomto ději se zvětší objem až 800krát. Dojde k tzv. mikroexplozi, která vytvoří tlakový ráz. Plyn oxidu uhličitého začne protékat pod vrstvou nečistot, a napomáhá tak k jejímu odstranění. Mechanismus čištění je tvořen ze 60 % tepelným šokem a ze 40 % kinetickou energií. Vliv mikroexplozí na odstraňování nečistot je velice obtížně měřitelný a dosud se nepodařilo určit do jaké míry mikroexploze ovlivňují čisticí mechanismus. Delší tryskání stejného místa může způsobit snížení rychlosti odstraňování, jelikož může dojít k vymizení teplotního rozdílu mezi povrchem čištěného materiálu a vrstvou nečistot. [9]

2.2 Tryskací stroj

Tryskací stroj má poměrně jednoduché technologické uspořádání. V dnešní době existuje několik společností, které tuto technologii poskytují celosvětově (Cold Jet, ASCO, ICEsonic). Konstrukce většiny tryskacích strojů je velmi podobná (obr. 5) a využívá stejných základních myšlenek. Rozměry nepřesahují $1100 \times 650 \times 1200$ mm (d × š × v) a hmotnost 180 kg. Tyto maximální hodnoty jsou typické pro vysoce výkonné průmyslové stroje. Suchý led je stlačeným vzduchem dopraven k trysce, ve které může být urychlen až nad kritickou rychlost (rychlost zvuku). Z trysky je poté směs stlačeného vzduchu a suchého ledu „vystřelena“ směrem k znečištěnému povrchu. Ovládací panel na tryskacím stroji umožňuje měnit pracovní parametry (pracovní tlak, hmotnostní tok částic suchého ledu). Nejdůležitější prvky tryskacího stroje jsou tryska, hadice a podavač suchého ledu. Jednotlivé prvky technologie budou popsány dále v této kapitole. [4]

V praxi se využívá několik typů strojů, které můžeme rozdělit podle následujících kritérií:

- formy suchého ledu
- způsobu dopravy suchého ledu do trysky

Jednotlivé typy strojů budou rozebrány v podkapitolách 2.2.4 a 2.2.5.



obr. 5: Tryskací stroj společnosti Kärcher IB 7/40 Classic [16]

V tab. 1 jsou uvedeny nejdůležitější parametry tryskacího stroje dle výrobců. Hodnoty vychází z informací, které jsou dostupné na webových stránkách výrobců Cold Jet, ICEsonic, ASCO a ARTIMPEX N.V.–CRYONOMIC. [17–20]

tab. 1: Parametry od výrobců

Parametry	Rozsah hodnot
Rozměry (d × š × v) [mm]	do 1100 × 650 × 1200
Hmotnost [kg]	30–166
Pracovní tlak [bar]	1–20,7
Vstupní tlak [bar]	1–20,7
Spotřeba suchého ledu [kg/h]	0–192
Spotřeba stlačeného vzduchu při tlaku 5,5 bar [m ³ /h]	18–600
Kapacita zásobníku [kg]	6–45,5
Příkon [W]	250–1100

Pozn.: Pracovní tlak = tlak na vstupu do trysky

Vstupní tlak = tlak na výstupu z kompresoru

Spotřeba stlačeného vzduchu je závislá na pracovním tlaku a typu trysky.

2.2.1 Tryska

Tryska slouží k urychlení směsi stlačeného vzduchu a částic suchého ledu na vysokou výstupní rychlost. Nejběžněji používaným typem trysky je Lavalova dýza, která se skládá ze zužující se (konvergentní) a rozšiřující se (divergentní) části. Tato konfigurace umožňuje využít celý tlakový spád a rychlost proudu na výstupu z dýzy může být až nadzvuková, pokud se podaří docílit nižšího poměru tlaků za a před dýzou, než tzv. kritický tlakový poměr. V praxi se používají různé tvary a délky trysek (obr. 6), např. s kruhovým průřezem různých průměrů, s plochým obdélníkovým průřezem různé šířky, zahnuté nebo zakřivené trysky. Trysky mohou být od 55 mm až přes 1 m dlouhé. Jejich tvar a délka ovlivňuje především rychlost proudu pelet na výstupu z trysky, spotřebu vzduchu a velikost plochy dopadajícího čistícího paprsku. Trysky jsou zaměnitelné a připojují se k tryskací pistoli, která umožňuje jednoduchou manipulaci. Trysky se vyrábí z nerezové oceli, hliníkových slitin nebo plastových materiálů. [4, 8]



obr. 6: Různé typy trysek od společnosti Cold Jet [21]

2.2.2 Hadice

Hadice slouží k dopravě stlačeného vzduchu z kompresoru do tryskacího stroje a k dopravě suchého ledu se stlačeným vzduchem z tryskacího stroje k trysce. Jsou vyráběny z gumových a silikonových materiálů a často bývají obaleny vyměnitelnou polyuretanovou fólií, která hadice chrání před znečištěním a poškozením. Hadice jsou dostupné v různých délkách, nejběžněji od 2,5 do 25 m. Ke kompresoru, tryskacímu stroji a trysce se připojují pomocí spojovacích armatur. [22, 23]

2.2.3 Podavač

Podavač zajišťuje dávkování suchého ledu z násypky do proudu stlačeného vzduchu v hadici. Je nezbytné, aby podavač dobře těsnil i při nízkých teplotách, a tím nedocházelo k velkým tlakovým ztrátám v hadici. Podavače jsou navrhovány tak, aby dávkovaly suchý led co nejplynuleji do proudu stlačeného vzduchu. Používají se podavače různých konstrukcí např. diskový, radiální (obr. 7) nebo šnekový. Pohon podavačů bývá pneumatický, případně elektrický. [8]

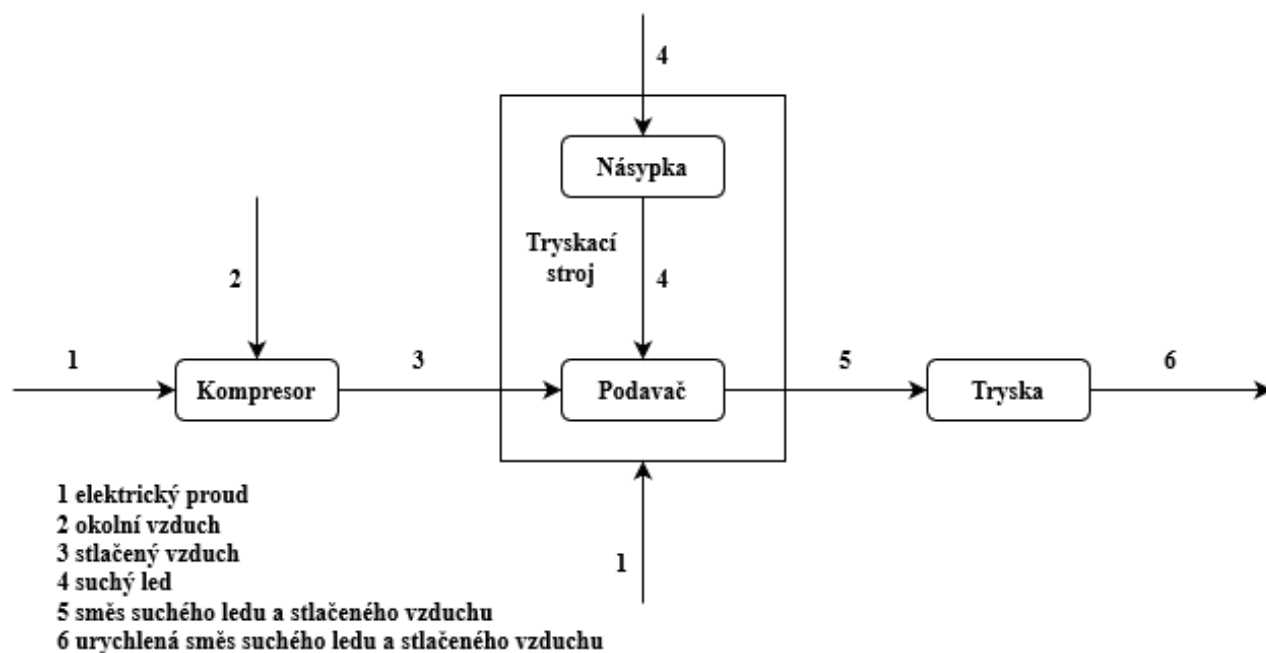


obr. 7: Radiální podavač od společnosti Cold Jet [24]

2.2.4 Rozdělení podle formy suchého ledu

V praxi se využívají 2 základní koncepty. První pracuje s bloky suchého ledu, které mohou mít rozměry až $250 \times 125 \times 125$ mm. Částice suchého ledu jsou odkrajovány z bloku pomocí nože upevněného k rotujícímu kolu. Kolo je poháněno pneumatickým motorem. Částice poté putují přes podavač do hadice, kde je stlačený vzduch dopraví k Lavalově dýze (trysce). V ní jsou urychleny a nasměrovány k povrchu. Blok suchého ledu sublimuje (degraduje) pomaleji oproti peletám, proto si dokáže udržet lepší mechanické vlastnosti po delší dobu. Další výhodou může být možnost měnit velikost částic suchého ledu během čištění. Toho můžeme dosáhnout různým nastavením otáček pneumatického motoru. [4]

Systém s peletami je o něco jednodušší (obr. 8). Pelety jsou uloženy v násypce, z které jsou podavačem přiváděny do hadice a z ní jsou proudem stlačeného vzduchu dopraveny k Lavalově dýze (trysce). Tento koncept neumožňuje během tryskání měnit velikost pelet, což může být při určitých aplikacích nevýhodné. Výhodou je jeho jednoduchost a menší spotřeba energie, jelikož není potřeba pohánět krájecí mechanismus. [4]



obr. 8: Blokové schéma peletového tryskacího stroje [vlastní zdroj]

2.2.5 Rozdělení podle způsobu dopravy suchého ledu do trysky

Pro transport suchého ledu k trysce se používají 2 možnosti. V současné době je v praxi častěji využívána tzv. jedno–hadicová technologie, která k dopravě směsi vzduchu a suchého ledu používá jedinou hadici. Suchý led je do proudu stlačeného vzduchu dávkován pomocí podavače. Nevýhoda tohoto systému je, že tlak stlačeného vzduchu již při přepravě pelet dosahuje maximálních hodnot. To může způsobit rozbíjení pelet v hadici, a snížit tak účinnost čištění (zvýšení spotřeby suchého ledu). Na druhou stranu umožňuje toto řešení použití delších hadic, jednodušší manipulaci pro operátory, a také je možné dosáhnout vyšších pracovních tlaků, což má pozitivní dopad na účinnost čisticího mechanismu. [4, 8]

Dvou–hadicový systém byl vyvinut dříve než jedno–hadicový systém. Proud stlačeného vzduchu je dodáván samostatnou hadicí (tzv. urychlovací hadice) a další hadicí (tzv. transportní hadice) je přiváděn suchý led. Obě hadice jsou spojené v trysce, kde se obě média smíchají. Proudění stlačeného vzduchu v urychlovací hadici vytvoří podtlak v transportní hadici, tím dojde k nasávání suchého ledu. Tomuto jevu se říká Venturiho efekt. Alternativní variantou je použití části stlačeného vzduchu z urychlovací hadice na dopravu pelet transportní hadicí k trysce. Vzhledem k tomu, že suchý led je vystaven největšímu tlaku až těsně před opuštěním trysky, nedochází k takovým ztrátám suchého ledu jako u jedno–hadicového systému. Tento způsob také umožňuje použití menších pelet, které se hodí na čištění citlivých povrchů, jelikož suchý led se pohybuje v hadici menší rychlostí a k smíchání suchého ledu s teplým vzduchem dochází až u trysky. [4, 8]

2.3 Další aparáty

Tato podkapitola se zabývá dalšími zařízeními, která jsou potřebná k procesu tryskání suchým ledem. Mezi ně patří kompresor, dmychadlo či ventilátor.

2.3.1 Kompresor

Kompresor je zdrojem stlačeného vzduchu. V praxi jsou nejvíce rozšířené elektrické pístové kompresory vzhledem k nízké finanční náročnosti a univerzálnosti. Jsou schopné dodávat stlačený vzduch pro všechny pracovní módy tryskacího stroje. Další používané typy kompresorů jsou šroubové nebo rotační křídlové kompresory. Ty mají ve srovnání s pístovými kompresory jednodušší konstrukci a tišší chod. Na druhou stranu jejich opravy jsou komplikovanější. Pro vysoce výkonné aplikace jsou většinou vyžadovány kompresory se spalovacím pohonem. Jako zdroj stlačeného vzduchu se využívají také centrální rozvody stlačeného vzduchu, které ovšem musí mít dostatečnou výkonnost. Při tryskání bývají typické hodnoty pracovního tlaku 6 bar a výkonnosti $300 \text{ mN}^3/\text{h}$. [4]

Stlačený vzduch z kompresoru je nutné ochladit a zbavit ho nežádoucích látek (voda, olej, pevné prachové částice) dříve, než půjde do tryskacího stroje. Horký a vlhký vzduch totiž výrazně snižuje kvalitu suchého ledu, a tím i účinnost čištění. Z tohoto důvodu se za kompresor instalují odlučovače, zmrazovací sušičky, filtry nebo tzv. after-cooler, který zajišťuje ochlazení stlačeného vzduchu a zároveň ho zbaví i přebytké vlhkosti díky zabudovanému vodnímu odlučovači. [8, 25]

2.3.2 Odtah vzduchu a nečistot

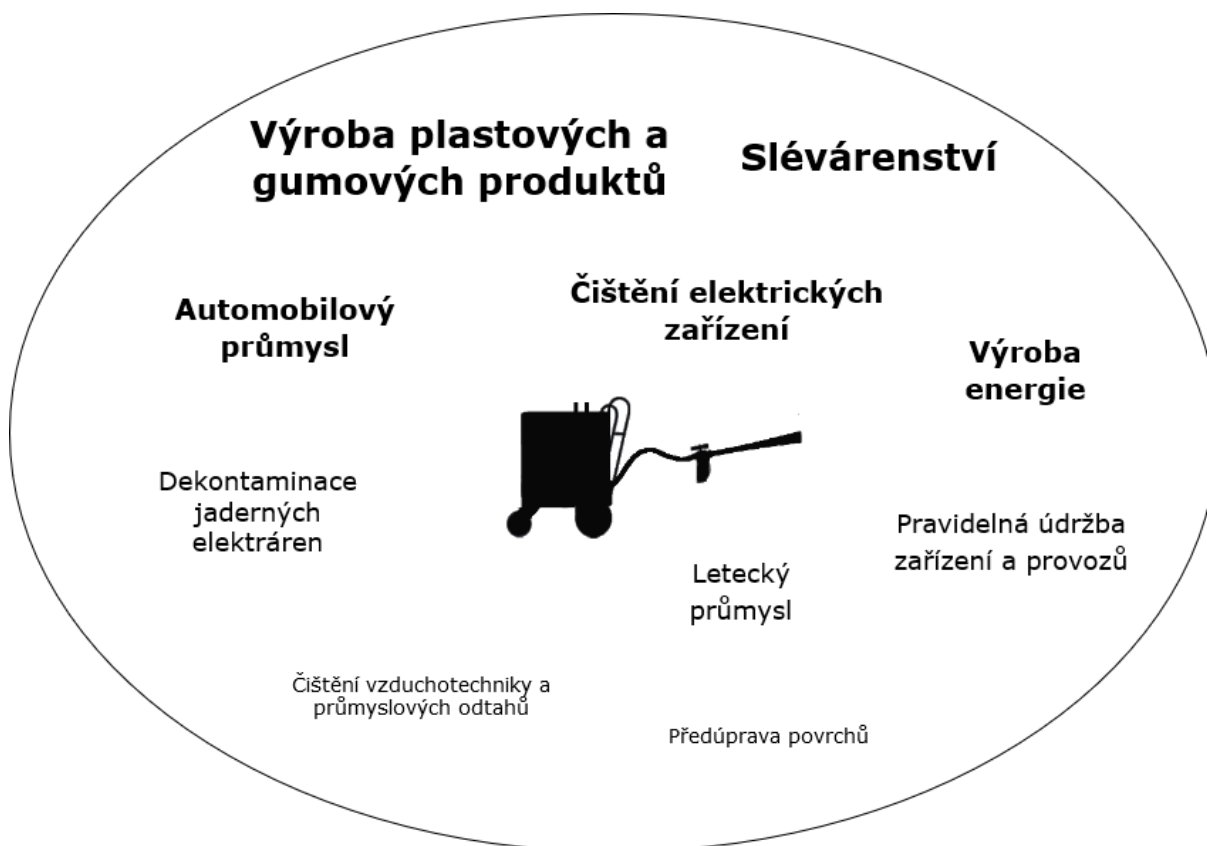
Při tryskání v uzavřených prostorech je nutné zajistit dostatečnou cirkulaci vzduchu, aby nedošlo ke zvýšení koncentrace oxidu uhličitého nad bezpečnou úroveň. K tomuto účelu většinou slouží centrální odtahy vzduchu. Dále je také nutné u některých aplikací odsávat nečistoty z místa čištění. K tomu jsou využívány dmychadla či vysokotlaké ventilátory. Pokud se čištěný objekt nachází v blízkosti dalších zařízení, může být při čištění použita přenosná komora, která zabrání kontaminaci ostatních zařízení. Dmychadla mohou být pak použita k jímání nečistot z těchto komor. [26, 27]

3 Využití tryskání suchým ledem v průmyslové praxi

Tato kapitola se věnuje různým aplikacím tryskání suchého ledu, které souvisí převážně s čištěním povrchů. Nezabývá se tedy aplikacemi, kde je suchý led používán pro své chladicí vlastnosti nebo kde není čištění povrchů primárním účelem využití (např. chlazení v potravinářském průmyslu nebo při zpracovávání a výrobě léků či kůže). Průmyslová odvětví jsou seřazena od těch již stabilně zavedených až po ta, kde se s využitím suchého ledu teprve experimentuje. Řazení je postaveno na literární rešerši, konkrétním počtu článků, které se danou aplikací zabývají a dále na konzultacích s odborníkem z praxe.

Literární rešerše zahrnovala 90 vědeckých článků z databáze Scopus, které byly vyhledány po zadání dotazu (“dry ice blasting” OR “solid carbon dioxide blasting”) AND (“cleaning” OR “surface”). Byly zvažovány i jiné formulace hledaného výrazu např. (“dry ice” OR “solid carbon dioxide”) AND (“cleaning” OR “surface”) nebo (“dry ice” OR “solid carbon dioxide”) AND (“cleaning”). Tyto hledané výrazy nebyly vhodné, jelikož zahrnovaly velké množství článků, které se zabývaly vlastnostmi suchého ledu, využití suchého ledu k chlazení nebo aplikacemi bez tryskání. Dále byly posuzovány abstrakty článků, které musely splňovat následující kritérium: článek se musí zabývat využitím tryskání suchým ledem v průmyslu k účelu čištění povrchů. Články, které nesplňovaly toto kritérium, byly z rešerše vyřazeny. Nevyřazené články byly přečteny, znovu zhodnoceny, zda splňují dané kritérium a případně přijaty. U přijatých článků byl projit seznam referencí, které byly zhodnoceny dle kritéria a případně přijaty k rešerši. Vzhledem k nízkému počtu vyhovujících článků, byla rešerše doplněna o patenty a další odborné publikace, které byly hledány převážně v databázi Google Scholar. Taktéž byly projity i webové stránky výrobců.

Výsledky literární rešerše jsou ilustrativně zobrazeny na *obr. 9*. První skupinu odvětví s nejvyšším výskytem procesu čištění suchým ledem tvoří výroba plastových a gumových produktů a slévárenství. Dále je tato metoda hojně využívána v automobilovém průmyslu, při čištění elektrických zařízení a při výrobě energie. Skupinu odvětví, kde je výskyt procesu čištění suchým ledem nižší, tvoří dekontaminace jaderných elektráren, letecký průmysl a pravidelná údržba zařízení a provozů. Nejméně rozšířené je použití této technologie k předúpravě povrchů a při čištění vzduchotechniky a průmyslových odtahů.



obr. 9: Diagram využití tryskání suchým ledem v průmyslu [vlastní zdroj]

Pozn.: Velikost písma u nápisů přibližně odpovídá zjištěné míře využití v daném odvětví

3.1 Výroba plastových a gumových produktů

Jeden z hlavních problémů při výrobě plastových a gumových produktů je nadměrné usazování pozůstatků z výrobního procesu na povrchu kovových forem. Tyto pozůstatky jsou primárně způsobeny chemickou reakcí uvolňovacího činidla nebo lepidel pro spojování gumových a ocelových částí se základním polymerním materiálem za současného působení tepla a tlaku. Další možný způsob vzniku pozůstatků je přichycení se zplyněného plastu na povrch formy a následného zkapalnění a ztuhnutí při vychladnutí formy. Pokud se nečistoty nahromadí v oblasti, kde se stýkají dvě části forem, tak tyto části při dalším použití přesně doléhají a na výrobku dochází ke vzniku otřepů, které pak musí být dodatečně odstraňovány. Nadměrné usazení nečistot v rozích, ostrých hranách, dutinách nebo složitých detailech forem může vést ke ztrátě správného tvaru příčného průřezu nebo detailů (loga, nápisy) hotového výrobku. Tyto výrobky pak musí být vyřazeny. Další problém může být způsoben ucpáváním otvorů pro odplynění formy, které může způsobovat nahromadění zplyněného plastu v dutině formy. Nedostatečné vyplnění formy roztaveným plastem pak vede ke vzniku defektů na vyráběné součásti. Při nedostatečném odplynění může dojít také k poškození samotné formy. [28, 29]

Pravidelné čištění forem je základní prevencí výše zmíněných problémů. Tradiční metody pro čištění forem, např. manuální čištění pomocí různých kartáčů, rozpouštědel a dalších chemických látek nebo abrazivní tryskání, mají několik zásadních nedostatků. Manuální čištění je pracné a časově náročné. Formy musí být rozebrány, vyčištěny a zase sestaveny. Navíc neopatrné čištění může vést k poškození formy. Použité chemikálie musí být ekologicky zlikvidovány. Při použití abrazivního tryskání může dojít k poškrábání povrchu a postupnému odstranění požadovaných tolerancí forem. To vede k rapidnímu snížení životnosti forem. Abrazivní tryskání musí být prováděno v uzavřených komorách, aby se zabránilo znečištění dalších zařízení a ovzduší a aby se mohlo zachytit a recyklovat tryskané médium. [28, 30]

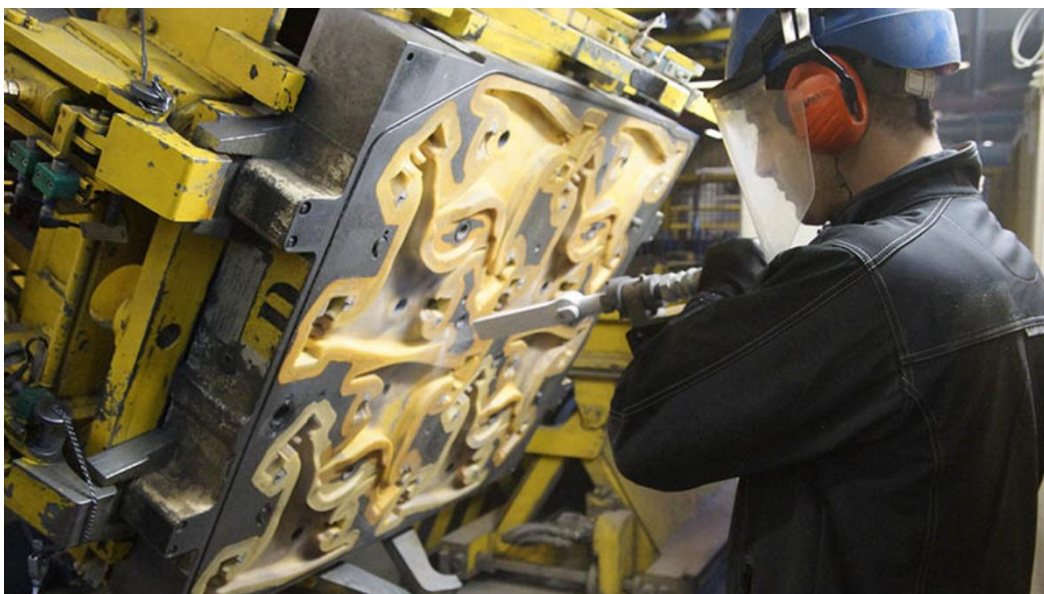
Uvedené nevýhody přispěly k velkému rozšíření tryskání suchým ledem v tomto průmyslovém odvětví. Při použití tryskání suchým ledem nedochází téměř k žádnému opotřebovávání čištěného povrchu, což je spojeno s jeho nízkou tvrdostí. Protože suchý led sublimuje ihned po dopadu na povrch, nevzniká při tryskání žádný sekundární odpad, který by musel být zpracováván. Na rozdíl od manuálního čištění odpadá také nutnost formy rozebírat. Dokonce mohou být čištěny i při pracovních teplotách. Operátoři tak nemusí čekat, až formy zchladnou a odpadá také nutnost, je znovu ohřívat na pracovní teplotu. Výrazně se tím snižuje celkový čas potřebný na čištění. Při použití jemnějších částic suchého ledu je tato technologie schopná vyčistit i ucpané otvory pro odplynění. Tryskání suchým ledem může být použito k čištění nejen různých typů forem (vstřikovací, dokončovací, tlakové, formy na pneumatiky viz *obr. 10* atd.), ale i k čištění dalších částí zařízení, která se používají při výrobě plastů a gumy, např. průtlačnice, šneky, lisy, zpětné uzávěry, vstřikovací trysky, Banbury mixéry atd. Touto metodou je také možné účinně odstraňovat otřepty z téměř všech druhů plastových výrobků. [28, 30, 31]



obr. 10: Čištění formy na výrobu pneumatiky [32]

3.2 Slévárenství

Z webových stránek výrobců a poskytovatelů technologie tryskání suchým ledem je patrné, že tato technologie nachází časté uplatnění i ve slévárenství. Avšak odborné články se této aplikaci příliš nevěnují. Podobně jako v podkapitole 3.1 *Výroba plastových a gumových produktů* se používá tato metoda k čištění forem, jaderníků (*obr. 11*) či kovacíh zápustek. Ve slévárenství jde především o čištění povrchů kovových forem po tlakovém a gravitačním lití. Tímto způsobem se odlévají převážně slitiny hliníku a hořčíku. Odlitky pak nacházejí uplatnění hlavně v automobilovém a leteckém průmyslu. [33, 34]

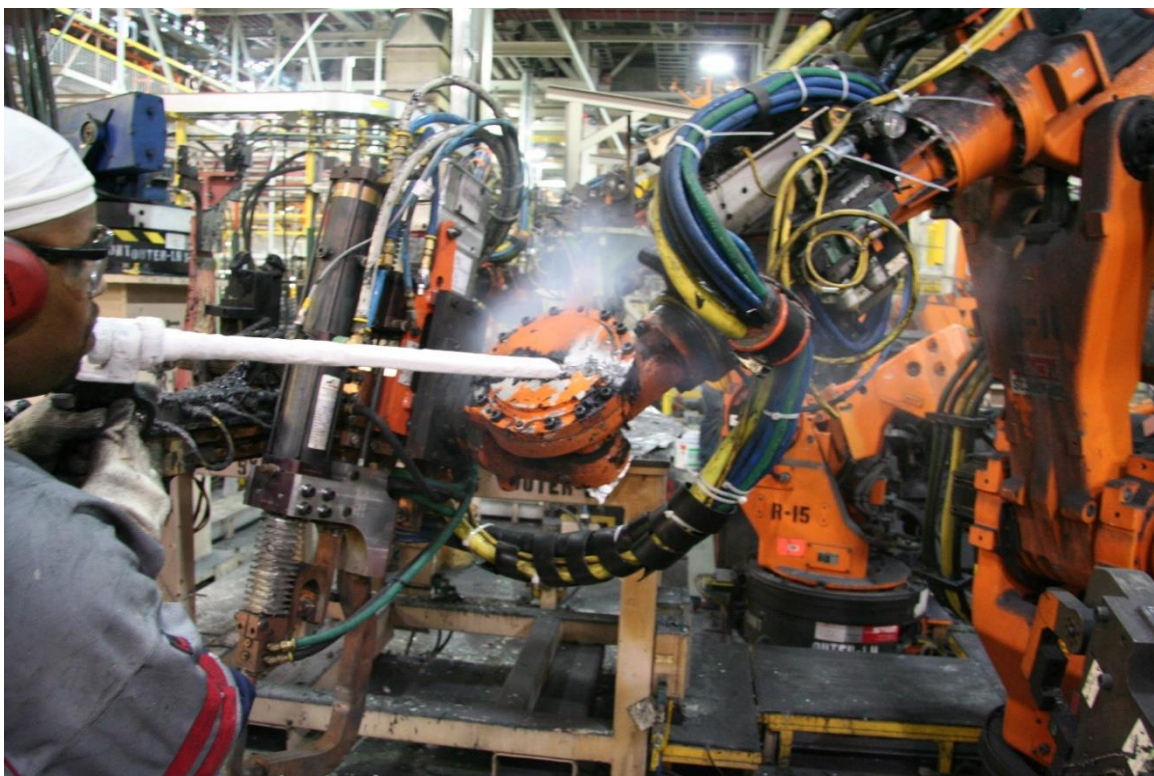


obr. 11: Čištění jaderníků [34]

3.3 Automobilový průmysl

V automobilovém průmyslu se tryskání suchým ledem používá k čištění svařovacích linek (obr. 12), které se využívají ke svařování automobilové karoserie. Dále je možné touto metodou čistit svařovací upínací přípravky, které mají často složitý tvar a jejich součástí jsou také čidla, která kontrolují přítomnost všech dílů. Předtím než jsou části karoserie svařeny, je na ně nanášeno epoxidové těsnicí lepidlo. Během svařování může dojít k rozstříku strusky a lepidla. Při nahromadění tohoto rozstříku na kloubech robotů a dalším vybavení robotů (senzory, bodové kleště atd.) může dojít k omezení pohyblivosti robotů a snížení kvality svarů. Během svařování dochází také k zanášení upínacích přípravků. Proto je důležitá pravidelná údržba těchto svařovacích linek. [35]

Konvekční metody čištění mohou poničit jemné snímače a elektrické prvky v oblasti kolem svařovacích robotů a manuální čištění je neefektivní a časově náročné. Naopak tryskání suchým ledem téměř neopotřebovává čištěný povrch a je tak možné čistit i citlivé povrchy různých senzorů. Další vlastnost, která umožňuje čistit elektrické části (vedení, spínače), je suchost procesu. Na rozdíl od tryskání vodou je díky této vlastnosti také menší pravděpodobnost vzniku koroze po čištění. Roboti mohou být čištěni přímo na pracovišti, tím odpadá drahé a časově náročné rozebírání jednotlivých částí robotů. Tato metoda čištění také snižuje náklady spojené se zpracováváním sekundárního odpadu a s nakládáním různých rozpouštědel a chemikálií, které by musely být zpracovány podle přísných norem. [35]



obr. 12: Čištění automatických svařovacích linek [36]

Spur et al. [9] posuzovali vhodnost tryskání suchým ledem k odstranění silikonového těsnění z hliníkově–hořčíkových slitin. Toto těsnění se hojně využívá v automobilovém průmyslu, kde se nachází mezi jednotlivými částmi motoru (písty, hlavy válců, klikové skříně). Ovšem při opravě a výměně motorů musí být toto těsnění odstraněno před tím, než je motor znovu sestaven. Tryskací metody s částicemi kovu, písku nebo skla poškozují povrch součástí. Ruční odřezávání je časově náročné a velmi nákladné. Odstraňování také ztěžuje komplikovaný tvar součástí a elastické vlastnosti silikonu. Při experimentu, kdy byla použita k odstranění těsnění metoda tryskání suchým ledem, bylo také pozorováno, jestli nedošlo k poškození povrchu slitiny. Bylo zjištěno, že nedošlo k žádným významným změnám ve struktuře ani v drsnosti povrchu. Tento výzkum potvrdil využitelnost této metody při odstraňování silikonového těsnění z hliníkově–hořčíkových slitin. V porovnání s ostatními metodami je možné dosáhnout značných finančních úspor. [9]

3.4 Čištění elektrických zařízení

Tryskání suchým ledem může být využito k čištění elektrických zařízení jako transformátory, izolátory, rozvaděče, vinutí generátorů nebo jističe (obr. 13), na kterých se postupně usazuje prach, mastnota a další znečištění z okolního prostředí. Silnější vrstva znečištění může způsobit poruchy těchto zařízení a výpadky elektrické sítě. Čištění elektrických zařízení může probíhat pod napětím nebo ve stavu, kdy jsou zařízení odpojena od sítě. Při vypnutém stavu se používá převážně ruční čištění. Pro čištění pod napětím se používají různé chemické a mechanické metody nebo metody využívající vodní páru. Čištění pod napětím má několik zásadních výhod, např. nedojde k odstávce zařízení, a tím nedojde k výpadku dané technologie nebo napájení elektrické soustavy, dojde k výraznému zkrácení doby prací a snížení nákladů na jejich provedení a provádění údržby bude plynulejší. Avšak operátoři musí dodržovat přísná bezpečnostní opatření, jako je používání bezpečnostních pomůcek (izolační rukavice, holínky, ochranné štíty atd.), dodržování bezpečných vzdáleností nebo při orosení nástrojů zastavit čištění a ihned je osušit. [37, 38]

Tryskání suchým ledem se řadí mezi metody, které mohou být vykonávány pod napětím. Pro čištění elektrických zařízení jsou největšími přednostmi této technologie bezvodý charakter procesu, velmi nízká abrazivnost a ohleduplnost k životnímu prostředí. Tato technologie je částečně omezena při čištění elektrických zařízení větších rozměrů tím, že obvykle po 10 minutách tryskání začíná na výstupu z trysky kondenzovat a/nebo přimrzávat vzdušná vlhkost. Může tak docházet ke zhoršení izolačních vlastností pod bezpečnou hranici a čištění musí být přerušeno. Toto přerušování pak výrazně zvyšuje délku celého procesu. Zatímco nízkonapěťová zařízení bývají relativně malých rozměrů a mohou být vyčištěna do 10 minut, vysokonapěťová zařízení jsou rozměrů větších, a tím déle trvá i jejich vyčištění. [39]

Při použití nižších pracovních tlaků je možné čistit citlivé povrchy elektronických součástí např. senzory nebo displeje. Při použití jemného suchého ledu (tzv. CO₂ sníh) je tato technologie dokonce využívána při výrobě polovodičových součástí (křemíkové wafery, integrované obvody). [40]



obr. 13: Vysokonapěťový jistič a) před b) po tryskání suchým ledem [41]

3.5 Výroba energie

Obecně je tryskání suchým ledem vhodná metoda k údržbě zařízení, která se používají v energetickém průmyslu a podléhají zanášení, např. plynové turbíny, vodní turbíny, různé kotle, ekonomizéry, přehříváky, kondenzátory nebo tepelné výměníky. Toto zanášení způsobují různé procesní látky, oleje, produkty spalování a jiné pozůstatky.

Výkon a spolehlivost plynové turbíny je významně ovlivněna především mírou znečištění kompresorové části. Vysoké znečištění napomáhá vzniku koroze a snižuje účinnost turbíny. V současné době se kompresorová část spalovacích turbín čistí vodou s čistícím prostředkem. Kompresor je roztočen na nízké otáčky a je do něj pod tlakem vstříknuta voda s čistícím prostředkem. Bohužel tento proces je schopen vyčistit jenom strany lopatek, které jsou odhalené (z pohledu sacího otvoru). Navíc zadní sekce kompresoru bývá často nedostatečně vyčištěna, protože voda v této oblasti již nemá potřebný tlak. Další způsob čištění může být pískování, které ovšem může poškodit povrch lopatek. [42]

Technologie tryskání suchým ledem díky své nízké abrazivitě dosahuje uspokojivých výsledků. Mírná nevýhoda je, že k čištění jedné turbíny je potřeba několik pracovníků. Je to operátor tryskacího stroje, obsluha endoskopu a jeden koordinátor. Na tento nedostatek se zaměřili Diaz a Hefner [42], kteří přišli s vynálezem, jež snižuje počet pracovníků potřebných

k čištění jedné plynové turbíny. Připevnili endoskop k výstupní trysce a monitor endoskopu připevnili k tryskací pistoli. Endoskop tak snímá místo dopadu proudu pelet a stlačeného vzduchu a umožňuje operátorovi trysky vidět místo čištění. Dále úpravou tryskací pistole umožnili natáčení trysky, tím je ulehčena manipulace ve stísněných prostorách kolem lopatek turbíny. Díky těmto vylepšením je schopen provádět efektivní čištění jenom jeden pracovník. Tento vynález je možné použít i k čištění dalších zařízení, jako jsou proudové motory nebo parní turbíny. [42]

3.6 Dekontaminace jaderných elektráren

V jaderných elektrárnách se používá k pohánění jaderných reaktorů jaderné palivo (např. ^{235}U). Vyhořelé jaderné palivo je vysoce radioaktivní a musí s ním být nakládáno podle přísných norem. Vyhořelé palivo může ozářením znečistit dříve neaktivní součásti, materiály a nástroje. To mohou být např. různá elektrická vybavení, manipulátory, údržbářské pomůcky, náhradní součástky použité při údržbě jaderné elektrárny, nebo různá potrubí, ventily, nádrže a ventilační odtahy, které mohou přijít do styku s kontaminovanou vodou nebo dalšími kontaminovanými médii. Při údržbě elektrárny a výměně jednotlivých částí se pak musí s těmito materiály zacházet jako s radioaktivním odpadem. [43, 44]

Radioaktivní látky se většinou usazují na povrchu těchto součástí. Při důkladném vyčištění povrchů a odstranění těchto radioaktivních látek mohou být tyto součásti (zařízení, pomůcky) znovu použity anebo při jejich likvidaci se s nimi nemusí zacházet jako s radioaktivním odpadem. Toto čištění (dekontaminace) probíhá ve speciálních izolovaných komorách, aby nedošlo k rozšíření odstraněných radioaktivních látek do okolí. K zachytávání těchto látek ze vzduchu se používají účinné HEPA filtry. HEPA je zkratkou z prvních písmen slov „high efficiency particulate arrestance“ („zachytávání mikročástic s vysokou účinností“). Konvekční metody čištění, jako abrazivní tryskání nebo použití různých rozpouštědel, vytváří sekundární odpad, se kterým musí být zacházeno jako s radioaktivním. To zvyšuje náklady při jeho likvidaci. Navíc abrazivní metody mohou poškodit povrch čištěné součásti, a dokonce vtisknout radioaktivní látky hlouběji do povrchu, takže už je nebude možné odstranit dalším čištěním. [43, 44]

Vhodnou metodou pro dekontaminaci vybavení a zařízení jaderné elektrárny je tryskání suchým ledem. Tato technologie nevytváří žádný sekundární odpad, protože suchý led sublimuje ihned při dopadu na čištěný povrch. Díky nízké tvrdosti suchého ledu nehrozí ani poškození povrchu součástí. Při použití této metody dochází také k výraznému zkrácení doby čisticích prací. Pracovníci jsou tak vystaveni radioaktivnímu záření po kratší dobu, což zvyšuje jejich bezpečnost. Tryskání suchým ledem může být použito i k údržbě zařízení, které nejsou vystaveny radioaktivním látkám např. parní turbíny nebo tepelné výměníky, jak bylo zmíněno v předchozí kapitole *Výroba energie*. [44, 45]

3.7 Letecký průmysl

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.5 *Výroba energie*, tryskání suchým ledem může být použito k čištění proudových motorů (obr. 14). Během provozu na povrchu lopatek v proudovém motoru ulpívají produkty spalování, nečistoty a špína z okolního vzduchu. Toto znečištění snižuje účinnost motoru a urychluje proces opotřebení jednotlivých částí motoru. Tato technologie může efektivně nahradit současný způsob čištění, kdy se používá kombinace vody a čisticích chemikálií. Současná metoda je časově náročná a chemikálie musí být likvidovány s ohledem na životní prostředí. [46, 47]



obr. 14: Čištění lopatek proudového motoru [47]

Tryskání suchým ledem může být také využito k přípravě povrchů (křídla, trup) před aplikací nátěru nebo laku. Povrch je po vyčištění ihned připraven k nátěru (lakování), protože tryskání suchým ledem nevytváří žádný sekundární odpad a je to suchý proces. Více se této aplikaci věnuje následující kapitola *Pravidelná údržba zařízení a provozů*.

3.8 Pravidelná údržba zařízení a provozů

Nahromaděný prach, mastnota, špína a další nečistoty zvyšují riziko nečekaných poruch a závad, které způsobují zpoždění a zastavení výrobních procesů. To může vést k výrazným ekonomickým ztrátám. Abychom se vyhnuli těmto nečekaným závadám a zvýšili celkovou spolehlivost procesu, je nutné provádět pravidelnou údržbu jednotlivých strojů a zařízení, tzn. provádět pravidelnou kontrolu, čištění, mazání, seřizování strojů a jeho částí, případně náhradu opotřebovaných součástí. Vhodná metoda pro pravidelné čištění je tryskání suchým ledem. Především díky tomu, že je to rychlá čistící metoda a je použitelná skoro ve všech průmyslových odvětvích. Dále pro představu budou uvedeny tři oblasti, kde se tato technologie k údržbě používá. [35]

První oblast je použití k přípravě povrchů před nátěrem, kdy se musí z povrchu odstranit všechny nečistoty, mastnoty, rez, případně starý odlupující se nátěr, tak aby nový nátěr dobře přilnul k povrchu. To se hodí k pravidelné údržbě dopravních nebo válečných lodí, kde je mnoho kovových povrchů, které jsou vystaveny agresivním vnějším podmínkám a jednou za čas musí být znovu natřeny. Tryskání suchým ledem je také možné využít k údržbě dalších zařízení, která se na lodi nachází jako plynové turbíny, různé nádrže, elektrické rozvaděče, různé dopravníky atd. [48]

Další oblast použití je při údržbě nástrojů používaných v ropném průmyslu např. táhlic nebo spojek mezi táhlicemi. Táhlíce jsou tyče, které přenášejí kývavý pohyb hlavy do vnitřní části hlubinného čerpadla, kde píst čerpadla nasává a vytlačuje ropu. Táhlíce jsou pravidelně čištěny od ropy, parafínu, asfalténů a dalších znečišťujících látek. Dále jsou kontrolovány, jestli

nedošlo k výraznému opotřebení, případně opraveny a poté vráceny zpět do provozu. Pravidelně čistěny bývají i další součásti jako potrubí, ventily, nádrže nebo úložné nádoby. [49–51]

Tryskání suchým ledem bývá využíváno při údržbě lihovarů. Během provozu se na povrchu zařízení a stěn budov usazuje vrstva ztvrdlého kukuřičného prachu a lihovarského sušeného mláta (vedlejší produkt destilace). Tato vrstva ovlivňuje tepelnou účinnost zařízení, která se podílí na výrobě páry např. ekonomizér, sací ventilátor, plynová turbína, kotelní potrubí atd. Jejich pravidelné čištění je proto nutné k zachování efektivního provozu. [8]

3.9 Čištění vzduchotechniky a průmyslových odtahů

Během provozu se ve ventilačních systémech a odtahových potrubích hromadí a usazuje prach, olejové sedimenty, různé pevné částice, rozkládající se organický materiál nebo i bakterie a viry. Nadměrná vrstva nečistot v potrubí zvyšuje riziko požáru a snižuje účinnost ventilačního systému. Také to může být nebezpečné pro lidi, co dýchají vzduch z těchto ventilací, což může vést ke vzniku alergií a jiných respiračních potíží. Tradičně se provádí čištění mechanicky pomocí různých kartáčů a chemikálií. Nevýhody této metody jsou časová náročnost, častá potřeba demontáže jednotlivých sekcí a taky to, že některé části potrubí nemusí být dostatečně očištěny např. rohy, prostor okolo hlav šroubů a nýtů. Další možností je použití vysokotlakých ventilátorů nebo dmychadel, která jsou schopna vytvořit silný podtlak. Alternativní metodou by mohlo být tryskání suchým ledem. Tato metoda se již částečně využívá, např. společnost Alkion service s. r. o. vyvinula dálkově ovládaného robota C–Rex, který využívá k čištění odtahů suchý led. Jeho nevýhodou je omezená použitelnost pro potrubí s vnitřním průměrem větším než 250 mm. [27, 52]

3.10 Předúprava povrchů

V této podkapitole bude představeno několik aplikací tryskání suchým ledem, které se používají k předúpravě povrchů. Většina těchto aplikací se ještě plně neuchytila v průmyslové praxi a jsou stále předmětem výzkumu a testování. Nicméně je tu velký potenciál k budoucímu prosazení v průmyslovém měřítku.

K zajištění optimální pevnosti lepených spojů je potřeba před lepením vyčistit povrch těchto součástí. V současné době se k tomu používají různé chemické čističe a rozpouštědla. Ty ovšem zatěžují životní prostředí, a proto musí být recyklovány nebo ekologicky likvidovány. Další možností je použít tryskání s pevným médiem. Nevýhoda této metody je usazování zbytků tryskacího média na povrchu součástí. Tyto zbytky musí být následně odstraněny odmašťováním. Pokud použijeme tryskání suchým ledem, s těmito nedostatky se nemusíme potýkat. Experimentální výzkum Elbinga et al. [53] a Uhlmanna a El Mernissiho [54] prokázal, že při použití tryskání suchým ledem, dojde ke zlepšení pevnosti lepených spojů u hliníkových slitin. To je zapříčiněno odstraněním nežádoucích maziv a vrstev oxidu hliníku a oxidu hořčíku. K výrazné změně struktury nebo drsnosti povrchu při tryskání nedojde. [53, 54]

Žárové nástřiky se používají ke zlepšení vlastností základního materiálu, např. zvýšení odolnosti vůči korozi, opotřebení, zvýšení žáruvzdornosti či žárupevnosti, zlepšení tribologických vlastností atd. Jednou z nejvšestrannějších metod pro nástřik kvalitních povlaků je atmosférické plazmové stříkání. Kvalitu plazmových nástřiků ovlivňuje chlazení základního materiálu během procesu a čistota povrchu základního materiálu. Tryskání suchým ledem zvládne oba tyto procesy a může být tak vhodnou náhradou současných metod (chlazení vzduchem, čištění abrazivním tryskáním). [55, 56]

Dong et al. [56] testovali použití tryskání suchým ledem k předúpravě základního materiálu a jeho chlazení během atmosférického plazmového stříkání. Jako povlakové materiály byly použity ocel, slitina CoNiCrAlY a oxid hliníkový (Al_2O_3) a základní materiál byla nerezová ocel. Z pozorování mikrostruktury povlaků je patrné, že u ocelového povlaku a povlaku ze slitiny

CoNiCrAlY došlo ke snížení obsahu oxidických vměstků, které mají negativní vliv na vlastnosti povlaků. Oxidické vměstky vznikají buď interakcí letící horké částice s kyslíkem z okolní atmosféry nebo na povrchu povlaku vlivem vysoké teploty. Snížení jejich obsahu v povlacích je zapříčiněno lepším chladicím efektem suchého ledu než při chlazení vzduchem, jelikož průměrná teplota základního materiálu byla při aplikaci tryskání suchým ledem snížena ze 160 °C na 80 °C. Všechny zkoumané povlaky vykazovaly také lepší přilnavost k základnímu materiálu než při použití konvekčních metod chlazení a předúpravy povrchu. A to o 5 % u povlaku ze slitiny CoNiCrAlY, o 14 % u ocelového povlaku a o 30 % u povlaku z Al₂O₃. [56, 57]

Technologie tryskání suchým ledem nachází uplatnění i při odstraňování různých ochranných povlaků např. TBC (Thermal–Barrier Coatings). Účel TBC povlaků je snižovat teplotu chráněných součástí a používá se třeba k povlakování lopatek plynových turbín. Tyto povlaky se skládají z vrchní keramické vrstvy, která poskytuje tepelnou izolaci, a spodní bond vrstvy, která chrání základní materiál před oxidací a zajišťuje vaznost vrchní vrstvy. Odstraňování povlaků neboli „odlupování“ (z anglického slova „stripping“) umožňuje opravit problémy s jejich kvalitou během výroby a také je to první krok při repasování součástí s těmito povlaky. Povlaky musí být odstraněny takovým způsobem, aby nedošlo k poškození povrchu základního materiálu. Scrivani et al. [58] představili metodu pro odstraňování vrchní keramické vrstvy u TBC povlaků. Součást je prvně přehřáta na vysokou teplotu a poté je použito tryskání suchým ledem. Tyto dva procesy se opakují, dokud není odstraněno potřebné množství povlaku. Největší výhoda tohoto řešení je, že k narušení povlaku před použitím tryskání suchým ledem není použito abrazivní tryskání, které zvyšuje riziko poškození základního materiálu. [58]

3.11 Shrnutí průmyslových aplikací

Shrnutí 3. kapitoly *Využití tryskání suchým ledem v průmyslové praxi* je provedeno formou tab. 2. U každé průmyslové oblasti je uveden typický předmět čištění a druh nečistoty, případně doplňující poznámka.

tab. 2 Přehled průmyslových aplikací

Průmyslová oblast	Předmět čištění	Druh nečistoty	Poznámka
Výroba plastových a gumových produktů	Formy	lepidla pro spojování gumových a ocelových částí se základním polymerním materiálem, kondenzát zplyněného plastu	Možnost odstraňovat ořepy z plastových výrobků
Slévárenství	Formy, jaderníky, zápusťky	Zbytky slitin (zejména hliníku a hořčíku)	Využíváno u tlakového a gravitačního lití
Automobilový průmysl	Svařovací linky, upínací přípravky, písty, hlavy válců, klikové skříňe	Struska svarového kovu, epoxidová těsnicí lepidla, silikonové těsnění	
Čištění elektrických zařízení	Transformátory, izolátory, jističe, vinutí generátorů, senzory, čipy	Prach, mastnota, olej, znečištění z okolního prostředí	Omezená rychlost čištění u větších vysokonapěťových zařízení

Výroba energie	Turbínové lopatky, kondenzátory, tepelné výměníky, kotle, přehříváky	Oleje, produkty spalování, procesní látky	
Dekontaminace jaderných elektráren	Parní turbíny, tepelné výměníky, manipulátory, nádrže, elektrické vybavení, údržbářské pomůcky	Kontaminované látky od radioaktivního záření	Čištění probíhá v izolovaných komorách
Letecký průmysl	Proudové motory, povrch letadel (křídla, trup)	Produkty spalování, starý nátěr, mastnota, oleje	
Pravidelná údržba zařízení a provozů	Plynové turbíny, táhlice, dopravníky, kovové povrchy všeho druhu, elektrické zařízení	Prach, mastnota, rez, starý nátěr, ropné látky, kukuřičný prach, procesní pozůstatky	Vhodné pro širokou škálu odvětví
Čištění vzduchotechniky a průmyslových odtahů	Ventilační a odtahové potrubí	Prach, olejové sedimenty, organický materiál, pevné částice	Použití omezeno na potrubí větší než 250 mm
Předúprava povrchů	Různé druhy kovových povrchů (lopatky, písty motoru, hřídele)	Prach, mastnota, ochranné povlaky	Využíváno před lepením, atmosférickým plazmovým stříkáním nebo při odstraňování ochranných povlaků

4 Posouzení energetické náročnosti procesu

V této kapitole bude provedena charakteristická případová studie energetické a ekonomické náročnosti procesu tryskání suchým ledem. Výše byly zmíněny aplikace tryskání suchým ledem z různých odvětví. Proto byla zvolena charakteristická případová studie, která je z oblasti plastů, tzn. odvětví, kde je tryskání suchým ledem nejvíce rozšířeno. V této případové studii se bude jednat o výrobní podnik, který vyrábí sedačky do aut. Část těchto sedaček se vyrábí z polyuretanové pěny a z forem na tyto pěny je potřeba pravidelně odstraňovat přebytečný separátor. Separátor je kapalina, která slouží k oddělení odlévané hmoty a separované části (formy) a zabraňuje tak přilnutí. V této studii se pracuje s hodnotami, které jsou v praxi běžně používány při tryskání forem. Tyto hodnoty byly pod podmínkou dodržení anonymity výrobního podniku poskytnuty odborníkem z firmy Alkion service s. r. o. [59]

4.1 Zadání

Výrobní linka produkující sedačky do aut zahrnuje celkem 30 forem. Jednou za 2 dny je z nich potřeba odstranit přebytečný separátor. Výroba probíhá 7 dní v týdnu. Čištění bude provedeno pomocí jedno–hadicového peletového tryskacího stroje. Pelety jsou dováženy (nejsou vyráběny přímo na místě). Čištění bude vykonávat jediný operátor s jedním typem trysky, kterou nebude během čištění měnit. V podniku je k jímání nečistot využíván stálý interní odtahový systém, proto nebude zahrnut do posouzení energetické náročnosti procesu. **Úkolem je zjistit celkovou spotřebovanou energii a náklady na čištění za 1 měsíc.** V tab. 3 jsou uvedené hodnoty, ze kterých tato studie vychází.

tab. 3: Vstupní parametry případové studie pro určení energetické náročnosti procesu

parametr	značka	hodnota	jednotky
Počet forem	Z_f	30	[–]
Průměrná spotřeba suchého ledu	$\dot{m}$	60	[kg/h]
Cena 1 kg suchého ledu bez DPH	c_L	17	[Kč/kg]
Spotřeba stlačeného vzduchu při tlaku 6 bar na 1 kg ledu	$\dot{Q}$	180	[m ³ /h]
Pracovní tlak	p_p	6	[bar]
Doba čištění jedné formy	T	10	[min]

4.2 Výpočet

Kapitola představuje nejprve stanovení nákladů na suchý led, následně spotřebu energie tryskacího stroje a na závěr spotřebu energie kompresoru.

4.2.1 Stanovení měsíčního pracovního fondu a nákladů na suchý led

Nejprve je potřeba stanovit *celkovou dobu čištění*. Z hodnot uvedených v tab. 3 je stanovena *celková doba čištění* podle vztahu (4.1) a (4.2). Počet čištění za měsíc Z v rovnici (4.2) je odvozen z předpokladu, že provoz je nepřetržitý a čištění probíhá každý druhý den. Vycházíme z toho, že průměrný počet dnů v měsíci je 30, a tedy počet čištění za měsíc $Z = 15$.

$$T_d = T \cdot Z_f \quad (4.1)$$

$$T_d = \frac{1}{6} \cdot 30 = 5 \text{ h}$$
$$T_c = T_d \cdot Z \quad (4.2)$$
$$T_c = 5 \cdot 15 = 75 \text{ h}$$

kde jednotlivé veličiny mají následující význam:

T_d	doba čištění za 1 den [h]
T_c	doba čištění za 1 měsíc [h]
T	doba čištění jedné formy [h]
Z_f	počet forem [-]
Z	počet čištění za měsíc [-]

Dále je nutné stanovit *celkové množství spotřebovaného suchého ledu* podle vztahu (4.3).

$$m_c = \dot{m} \cdot T_c \quad (4.3)$$

$$m_c = 60 \cdot 75 = 4\,500 \text{ kg}$$

kde jednotlivé veličiny mají následující význam:

m_c	hmotnost spotřebovaného suchého ledu [kg]
$\dot{m}$	průměrná spotřeba suchého ledu [kg/h]

A konečně stanovení *celkových nákladů na suchý led* za 1 měsíc pomocí vztahu (4.4).

$$N_c = m_c \cdot c_L \quad (4.4)$$

$$N_c = 4500 \cdot 17 = 76\,500 \text{ Kč}$$

kde jednotlivé veličiny mají následující význam:

N_c	náklady na suchý led za 1 měsíc [Kč]
c_L	cena 1 kg suchého ledu bez DPH [Kč/kg]

Celkové náklady na suchý led za 1 měsíc činí přibližně 76 500 Kč bez DPH.

4.2.2 Spotřeba elektrické energie tryskacího stroje

Spotřeba elektrické energie tryskacího stroje za 1 měsíc je vypočtena podle vztahu (4.5). Za T_c je dosazována hodnota vypočtená v předchozí podkapitole. Velikost příkonu stroje je brána z parametrů tryskacího stroje COB 71 od firmy Crynomic a je $P_s = 0,65 \text{ kW}$. Tento stroj byl vybrán tak, aby splňoval parametry uvedené v *tab. 3*. [60]

$$E_s = P_s \cdot T_c \quad (4.5)$$

$$E_s = 0,65 \cdot 75 = 48,8 \doteq 49 \text{ kWh}$$

kde jednotlivé veličiny mají následující význam:

E_s	spotřeba elektrické energie tryskacího stroje za 1 měsíc	[kWh]
P_s	příkon tryskacího stroje	[kW]
T_c	doba čištění za 1 měsíc [h]	

Cena elektřiny je v daném výrobním podniku 3 Kč/kWh a měsíční náklady na spotřebovanou elektrickou energii tryskacího stroje jsou tedy 147 Kč.

4.2.3 Spotřeba energie kompresoru

Nejprve je nutné zavést několik předpokladů, ze kterých se při výpočtech vycházelo:

- Při výpočtu teoretického příkonu kompresoru je předpokládána adiabatická komprese.
- Typ kompresoru je pístový jednostupňový.
- Kompresor je poháněn asynchronním elektromotorem.
- Převod mezi elektromotorem a kompresorem je zajištěn klínovým řemenem.
- Ve všech výpočtech je pracováno s objemovým průtokem (výkoností) vztaženým k tzv. normálním technickým podmínkám $T_N = 293,15 \text{ K}$ a $p_N = 100 \text{ kPa}$.

V této podkapitole je počítáno s hodnotami, které jsou uvedeny v *tab. 3* a *tab. 4*. Výkonost kompresoru je zvolena vyšší, než je spotřeba vzduchu tryskacího stroje tak, aby kompresor pokryl vzniklé ztráty v hadici, podavači atd. nebo byl schopen dodat v případě potřeby větší množství stlačeného vzduchu.

tab. 4: Parametry pro výpočet kompresoru

parametr	značka	hodnota	jednotky
Tlak na vstupu do kompresoru	p_1	100	[kPa]
Tlak na výstupu z kompresoru	p_2	600	[kPa]
Výkonnost	$\dot{V}$	240	[m ³ /h]
Poissonova konstanta	κ	1,41	[–]

Teoretický adiabatický příkon kompresoru je vypočten dle vztahu (4.7). [61]

$$P_{ad} = |a_t| \cdot \dot{m}_v \quad (4.6)$$

$$P_{ad} = \left| \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot p_1 \cdot \dot{V} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] \right| \quad (4.7)$$

$$P_{ad} = \left| \frac{1,41}{0,41} \cdot 100000 \cdot \frac{240}{3600} \cdot \left[1 - \left(\frac{600000}{100000} \right)^{\frac{0,41}{1,41}} \right] \right| = |-15675,6| = 15\,675,6\,W$$

kde jednotlivé veličiny mají následující význam:

P_{ad}	teoretický adiabatický příkon kompresoru [W]
a_t	měrná technická práce adiabatického děje [J/kg]
$\dot{m}_v$	hmotnostní tok plynu měřeného na výtlaku kompresoru [kg/s]
p_1	tlak na vstupu do kompresoru [Pa]
p_2	tlak na výstupu z kompresoru [Pa]
$\dot{V}$	výkonnost kompresoru [m ³ /s]
κ	Poissonova konstanta [–]

Pozn.: Podle znaménkové konvekce technické termodynamiky platí, že přivedená práce do stroje, která je nutná pro pracovní proces, má záporné znaménko. Při výpočtu příkonu je tedy počítáno s absolutní hodnotou technické kompresní práce.

Efektivní příkon neboli příkon, který musíme přivést na hřídel kompresoru, je určen z teoretického příkonu pomocí celkové adiabatické účinnosti η_{cad} dle vztahu (4.8). Hodnoty celkové adiabatické účinnosti se u kompresorů pohybují od 50 do 80 %, ve výpočtu je zvolena průměrná hodnota 65 % ($\eta_{cad} = 0,65$). [62, 63]

$$P_{ef} = \frac{P_{ad}}{\eta_{cad}} \quad (4.8)$$

$$P_{ef} = \frac{15675,6}{0,65} = 24\,116,3\,W$$

kde jednotlivé veličiny mají následující význam:

P_{ef}	efektivní příkon kompresoru [W]
P_{ad}	teoretický adiabatický příkon kompresoru [W]
η_{cad}	celková adiabatická účinnost [–]

Příkon elektromotoru, který pohání kompresor, je vypočten z efektivního příkonu pomocí účinnosti převodu mezi elektromotorem a kompresorem a účinnosti samotného elektromotoru dle vztahu (4.9). Převod klínovými řemeny probíhá s účinností v rozmezí od 90 % do 95 %. Pro výpočet je zvolena průměrná hodnota účinnosti 92,5 % ($\eta_p = 0,925$). Účinnost asynchronních elektromotorů je dána normou ČSN EN 60034-30-1, podle této normy by

minimální účinnost asynchronního motoru s frekvenčním měničem s výkonem do 40 kW neměla být nižší než zhruba 93 % ($\eta_{\text{mot}} = 0,93$). [62–64]

$$P_{\text{mot}} = \frac{P_{\text{ef}}}{\eta_p \cdot \eta_{\text{mot}}} \quad (4.9)$$

$$P_{\text{mot}} = \frac{26126}{0,925 \cdot 0,93} = 28\,034 \text{ W}$$

kde jednotlivé veličiny mají následující význam:

P_{mot}	příkon elektromotoru [W]
η_p	účinnost převodu [–]
η_{mot}	účinnost elektromotoru [–]

Dále je nutné určit *měrný příkon kompresoru* podle vztahu (4.10). Měrný příkon určuje, kolik kWh energie je potřeba na stlačení 1 m³ vzduchu. [4]

$$P_{\text{spec}} = \frac{P_{\text{mot}}}{\dot{V}} \quad (4.10)$$

$$P_{\text{spec}} = \frac{28,03}{240} = 0,117 \text{ kWh/m}_N^3$$

kde jednotlivé veličiny mají následující význam:

P_{spec}	měrný příkon [kWh/m _N ³]
P_{mot}	příkon elektromotoru [kW]
$\dot{V}$	výkonnost kompresoru [m _N ³ /h]

Dále je nutné určit *specifickou spotřebu energie procesu tryskání suchým ledem* E_B . Tato nová veličina byla poprvé uvedena v publikaci [4] a řídí se vztahem (4.11).

$$E_B = \frac{P_{\text{spec}} \cdot \dot{Q}}{\dot{m}} \quad (4.11)$$

$$E_B = \frac{0,117 \cdot 180}{60} = 0,351 \text{ kWh/kg}$$

kde jednotlivé veličiny mají následující význam:

E_B	specifická spotřeba energie procesu tryskání suchým ledem [kWh/kg]
P_{spec}	měrný příkon [kWh/m _N ³]
$\dot{Q}$	spotřeba stlačeného vzduchu [m _N ³ /h]
$\dot{m}$	spotřeba suchého ledu [kg/h]

Spotřeba energie kompresoru za 1 měsíc je určena dle vztahu (4.12).

$$E_{\text{kom}} = E_B \cdot m_c \quad (4.12)$$

$$E_{\text{kom}} = 0,382 \cdot 4500 = 1\,579,5 \doteq 1\,580 \text{ kWh}$$

kde jednotlivé veličiny mají následující význam:

E_{kom}	spotřeba energie kompresoru za 1 měsíc [kWh]
m_c	hmotnost spotřebovaného suchého ledu [kg]

Spotřeba energie kompresoru za 1 měsíce je 1 580 kWh. Při uvažované ceně elektřiny 3 Kč/kWh činí náklady na spotřebovanou elektrickou energii kompresorem za 1 měsíc 4 740 Kč

4.3 Diskuze

Výsledná hodnota spotřeby energie kompresoru je ovlivněna volbou jednotlivých účinností z obvyklého rozsahu uvedeného v literatuře [62], přičemž byly voleny průměrné hodnoty účinností. Pokud bychom předpokládali, že firma využívá moderní kompresor s vysokou účinností ($\eta_{\text{cad}} = 0,8$; $\eta_p = 0,95$), spotřeba energie za 1 měsíc by klesla na 1 247 kWh. Při předpokladu staršího opotřebovaného kompresoru ($\eta_{\text{cad}} = 0,5$; $\eta_p = 0,9$), by spotřeba energie za 1 měsíc mohla dosahovat až 2 107 kWh. V těchto případech by náklady na energii kompresoru za 1 měsíc byly 3 743 Kč, respektive 6 321 Kč. Pro nejpřesnější výsledek by bylo vhodné změřit výkonnost kompresoru a příkon elektromotoru přímo v konkrétním podniku. Nicméně pro představu o energetické náročnosti procesu tryskání suchým ledem je tento výpočet dostačující. Z tab. 5 je patrné, že tryskací stroj spotřebovává ve srovnání s kompresorem minimální množství elektrické energie.

tab. 5: Výsledky

	Spotřeba energie [kWh]	Náklady [Kč]
Tryskací stroj	49	147
Kompresor	1 580	4 740
Suchý led	–	76 500
Celkem	1 629	81 387

Z výsledků (tab. 5) dále plyne, že většina nákladů je spojena se samotným suchým ledem a pouze menší část s elektrickou energií spotřebovanou kompresorem. Konkrétně 94 % nákladů je spojeno se suchým ledem a 6 % s elektrickou energií spotřebovanou kompresorem (náklady na el. energii tryskacího stroje jsou zanedbatelné). Tento poměr nákladů se výrazně nezmění ani při předpokladu, že firma využívá opotřebovaný či moderní kompresor. Náklady byly počítány výhradně pro proces tryskání (náklady na energii, čisticí médium) a nebyly zohledněny náklady na mzdu operátora, který by čištění prováděl. Z tohoto důvodu byly také při výpočtu celkové doby čištění zanedbány případné přestávky během čištění. Dále byla také zanedbána DPH suchého ledu.

Z případové studie je zřejmé, že tryskání suchým ledem, respektive výroba stlačeného vzduchu jsou vysoce energeticky náročné procesy. Možným úsporným opatřením, která by pomohla snížit energetickou náročnost tohoto procesu, je věnována následující kapitola. Z pohledu finančních úspor je třeba akcentovat opatření, která zvýší efektivitu hospodaření se suchým ledem.

5 Návrh úsporných opatření

Jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole, z ekonomického pohledu je nejdůležitější efektivně hospodařit se suchým ledem. To je i hlavním cílem opatření, která jsou uvedena v podkapitole 5.1 *Automatizace procesu* a 5.2 *Aplikace na míru*.

Dále bylo zjištěno, že tryskání suchým ledem je vysoce energeticky náročný proces, jelikož primárním hnacím médiem je stlačený vzduch. Při výrobě stlačeného vzduchu 80–93 % dodané energie odchází ve formě ztrát. Největší ztráty vznikají při samotném stlačování v podobě tepla, které musí být odvedeno pryč. Většinu tohoto odpadního tepla je možné dále využít např. k vytápění vnitřních prostorů. Dále dochází ke vzniku mechanických ztrát, objemových ztrát vlivem netěsností v tlakovzdušných rozvodech a tlakových ztrát vlivem tření vzduchu o povrch potrubí a místním odporům proti proudění jako jsou kolena, armatury atd. Komprese vzduchu je tedy proces s velice nízkou účinností a stlačený vzduch patří mezi nejdražší formy energie. To potvrzuje i fakt, že 10 % vyrobené elektrické energie v Evropě je spotřebováno právě na provoz kompresorů. Snížení spotřeby stlačeného vzduchu při tryskání suchým ledem sníží energetickou náročnost a spolu se snížením spotřeby suchého ledu zvýší ekonomičnost tohoto procesu. Převážně úsporám energie se věnují podkapitoly 5.3 *Optimalizace kompresoru* a 5.4 *Nahrazení stlačeného vzduchu jinou formou energie*. [4, 65]

Úsporná opatření můžeme rozdělit na provozní a technická. Provozní opatření se zabývají především efektivním managementem práce. Do této kategorie můžeme zařadit např. nastavení plánu čištění, které umožní optimální využití pracovní síly operátora. Další možností je kombinace čistících technik, kdy je část povrchů čistěna jinou technologií (kartáč) nebo je využita předúprava povrchu (naleptání) k zefektivnění čistícího procesu. Tohoto typu opatření se dále dotkneme v oblasti automatizace procesu, ale podrobněji vzhledem k jeho komplexnosti představen nebude. Důraz je kladen na technická opatření, která zahrnují přímou technologickou úpravu linky pro tryskání suchým ledem.

5.1 Automatizace procesu

Při tryskání suchým ledem je důležité, aby jeden povrch nebyl čištěn opakovaně. Jelikož by mohlo dojít k znovu znečištění daného povrchu a také ke zbytečnému plýtvání suchým ledem a stlačeným vzduchem. Aby byl proces čištění co nejvíce efektivní, musí operátoři najít vhodnou vzdálenost trysky od čištěného povrchu, úhel náklonu trysky a také rychlost posuvu trysky. Před čištěním je také důležité zjistit míru znečištění povrchu a nastavit podle toho parametry tryskacího stroje (pracovní tlak, spotřebu suchého ledu atd.). Všechny výše uvedené skutečnosti ovlivňují účinnost čištění, a tím i spotřebu suchého ledu a energie. Je zjevné, že méně zkušený operátor může výrazně ovlivnit spotřebu suchého ledu a energie při čištění.

Pro aplikace, kde je nutné pravidelně čistit mnoho povrchů podobného tvaru a míry znečištění (např. formy při výrobě plastů a gumy), se nabízí tento proces zautomatizovat. Jedno z možných řešení je připevnění trysky k robotickému ramenu, které je řízeno počítačem. Robotické rameno pracuje přesněji a rychleji než lidský operátor. Tím pádem dojde ke zvýšení účinnosti čištění a zkrácení doby čištění, což povede ke snížení spotřeby stlačeného vzduchu a suchého ledu, a tím i ke snížení nákladů na čištění. Dále je možné snížit náklady na nákup a dopravu suchého ledu jeho výrobou přímo v místě čištění. Tato možnost je výhodná především pro firmy, které čistí touto technologií pravidelně.

5.2 Aplikace na míru

Další úspory suchého ledu a energie by mohlo být dosaženo vývojem a úpravou technologie „na míru“ dané aplikace. Vhodnou úpravou tryskacího stroje, trysek nebo přidáním dalšího vybavení lze dosáhnout snížení spotřeby stlačeného vzduchu při tryskání nebo ke zrychlení

procesu tryskání pro danou aplikaci. Příkladem této úpravy je robot C–Rex od firmy Alkion service s. r. o. zmiňovaný v podkapitole 3.9 *Čištění vzduchotechniky a průmyslových odtahů* nebo Jetty Robot od firmy JettyRobot s. r. o. viz obr. 15. Tito roboti se využívají v oblasti čištění průmyslových odtahů a ventilačních potrubí, kde bylo dříve použití tryskání suchým ledem obtížné. Jejich největší přínos je, že potrubí nemusí být rozebráno, protože jím robot ovládaný na dálku projíždí. Čištění je tak rychlejší a účinnější. K omezením této technologie patří investiční náklady a nemožnost čistit potrubí s vnitřním průměrem menším než 250 mm. Dalším příkladem mohou být specializované trysky pro konkrétní typy povrchů a znečištění. [27, 66]



obr. 15: Jetty Robot S od firmy JettyRobot s. r. o.[66]

5.3 Optimalizace kompresoru

Jedna z možností, jak snížit spotřebu stlačeného vzduchu, je optimalizace provozního tlaku. Pokud je do systému dodáván vyšší tlak, než je nezbytně nutné pro tryskání, dochází ke zvýšení energetické náročnosti procesu. Z tohoto důvodu je nutné výstupní tlak kompresoru regulovat. Toho dosáhneme regulací výkonnosti kompresoru. Běžným typem regulace je tzv. dvoupolohová regulace. Princip této regulace spočívá v tom, že se kompresor vypne při dosažení potřebné velikosti tlaku a opět se zapne, pokud tlak klesne pod určitou hladinu. Hospodárnější způsob regulace je plynulá regulace změnou otáček. Ta může být zajištěna u kompresorů poháněných elektromotorem pomocí frekvenčního měniče. Výkonost kompresoru je plynule regulována, tak aby nedocházelo k nepřipustnému kolísání tlaku. [4, 65]

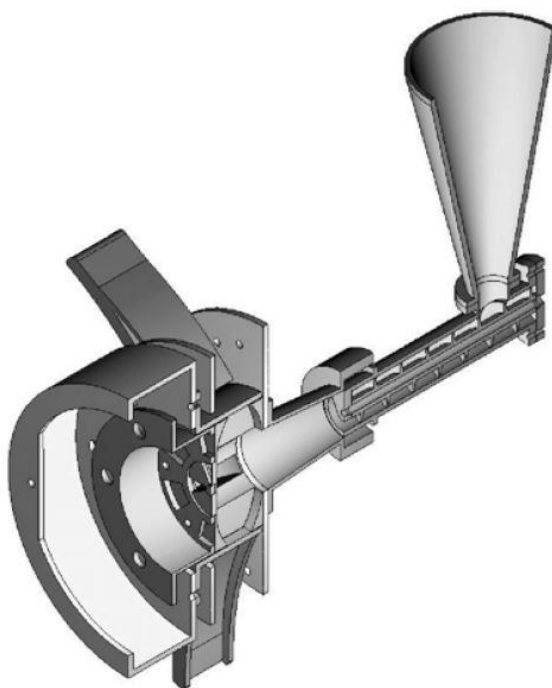
Množství spotřebované energie ovlivňuje také typ kompresoru a jeho stáří. Stěžejním parametrem, který slouží k porovnání jednotlivých kompresorů, je měrný příkon P_{spec} , s kterým je pracováno již v podkapitole 4.2.3 *Spotřeba energie kompresoru*. Podle [67] hodnota měrného výkonu by se měla pohybovat mezi $0,085\text{--}0,11 \text{ kWh/m}_N^3$ u moderních pístových kompresorů s pracovním tlakem 7 bar. Pokud má kompresor měrný příkon vyšší než $0,13 \text{ kWh/m}_N^3$, měl by být nahrazen nebo vylepšen. [65]

5.4 Nahrazení stlačeného vzduchu jinou formou energie

Krájecí mechanismus u tryskacího stroje, který pracuje s bloky suchého ledu, bývá často poháněn pneumatickým pohonem. Tento pneumatický pohon by mohl být nahrazen elektrickým motorem, který má v porovnání s pneumatickým pohonem výrazně nižší spotřebu energie. Podle [4] můžeme tímto opatřením snížit spotřebu vzduchu až o 12 %. Snížení spotřeby stlačeného vzduchu může přinést výhodu v podobě snížených nároků na výkonnost kompresoru. [4]

Dalším opatřením může být nahrazení trysky, která slouží k urychlení částic suchého ledu, tzv. odstředivým akcelerátorem. Jeho nejdůležitější část je oběžné kolo se zakřivenými lopatkami, které je elektromotorem přes hřídel roztáčeno na vysoké otáčky. Suchý led je dopravován axiálně ke středu oběžného kola, kde je pomocí odstředivé síly urychlen na potřebnou výstupní rychlost. Díky tomuto opatření je stlačený vzduch nutný pouze k dopravě pelet suchého ledu k akceleratoru, čímž dochází k výraznému snížení spotřeby stlačeného vzduchu. Podle [4] použitím akceleratoru můžeme snížit spotřebovanou energii až o 87 %. [4]

Několik prototypů akceleratoru již bylo testováno a patentováno např. [68], [69] nebo [3] (obr. 16). V praxi se však zatím neuplatnily. Hlavními důvody jsou omezené možnosti použití, větší rozměry akceleratoru oproti tryskám a požadavek vysokých otáček oběžného kola k dostatečnému urychlení částic suchého ledu. [4]



obr. 16: Prototyp akceleratoru [3]

Závěr

Tryskání suchým ledem je moderní způsob čištění povrchů, který se v průmyslové praxi těší stále větší oblibě. Mechanismus odstraňování nečistot z povrchu je založen na kombinaci tepelného šoku (teplota pelet suchého ledu je zhruba $-78,5\text{ }^{\circ}\text{C}$), mechanického účinku směsi proudu stlačeného vzduchu a pelet suchého ledu a expanzním účinku při sublimaci suchého ledu. Mezi největší přednosti této metody patří schopnost odstraňovat širokou škálu znečištění (prach, barevný nátěr, mastnota, kovové rozstříky), vysoká rychlost čisticího procesu, nízká abrazivnost a to, že po tryskání nevznikají žádné další odpadní látky (suchý led sublimuje).

Velký přínos pro vědu a výzkum má 3. kapitola, ve které byl představen první systematický souhrn aplikací tryskání suchým ledem v průmyslu s důrazem na čištění povrchů. Tento souhrn byl sestaven na základě důkladné rešerše odborných publikací a konzultací s odborníkem z praxe. Vyplývá z něj, že je tato technologie nejvíce rozšířena v odvětvích, která používají při výrobě různé permanentní formy (výroba plastových a gumových výrobků, tlakové a gravitační lití). Mimo jiné tomu přispívá i schopnost čistit formy při vysokých teplotách. Odpadá tak nutnost čekat, než formy vychladnou a celý proces čištění je tak výrazně urychlen. Tuto jedinečnou vlastnost nemá žádná jiná čisticí metoda. Dále je tryskání suchým ledem hojně využíváno v automobilovém průmyslu při čištění svařovacích linek nebo při čištění elektrických zařízení. Tato technologie se také začíná prosazovat v oblasti údržby různých zařízení a provozů.

Předmětem řady výzkumů je také použití tryskání suchým ledem k předúpravě povrchů. Jednou z těchto možných aplikací je použití této technologie při odstraňování ochranných povlaků, kdy je součást předehřáta na vysokou teplotu a poté je použito tryskání suchým ledem. Tyto dva procesy se opakují, dokud není odstraněno potřebné množství povlaku. Další využití je při lepení součástí z hliníkových slitin. Pokud je před lepením povrch otryskán, dojde ke zlepšení pevnosti lepených spojů.

Hlavní přínos této práce pro průmyslovou praxi je stanovení energetické a ekonomické náročnosti procesu tryskání suchým ledem a návrh případných úsporných opatření. Za tímto účelem byla analyzována případová studie čištění forem na polyuretanovou pěnu. Pracováno bylo s anonymizovanými parametry z výrobního podniku na autosedačky. Na základě výpočtů byla zjištěna měsíční spotřeba energie na čištění 1 580 kWh, přičemž téměř všechna energie je spotřebována kompresorem. Je tedy zjevné, že výroba stlačeného vzduchu je vysoce energeticky náročný proces. Dále se ukázalo, že 94 % nákladů na čištění je spojeno se suchým ledem. Z ekonomického pohledu je tedy nutné efektivně hospodařit se suchým ledem. Z těchto skutečností pak vycházejí navržená úsporná opatření, která se různými způsoby snaží snížit spotřebu suchého ledu a stlačeného vzduchu. Navržená opatření jsou:

- automatizace procesu
- aplikace na míru
- optimalizace kompresoru
- nahrazení stlačeného vzduchu jinou formou energie

Z těchto opatření je pro provozovatele nejslibnější automatizace procesu. Její zavedení výrazně zefektivní hospodaření se suchým ledem, a tím i sníží finanční náklady spojené s čištěním.

Tryskání suchým ledem je tedy univerzální metoda čištění, což potvrzuje i velký rozsah využití napříč průmyslovými odvětvími. V posledních letech roste zájem o tuto metodu čištění, jak ze strany vědecké komunity, tak i z průmyslové praxe. Pro zvýšení finančních úspor by bylo vhodné do analýzy zahrnout i proces výroby suchého ledu, jelikož úsporné nakládání se suchým ledem má svoje limity (snížení čisticí schopnosti). Předmětem budoucího výzkumu by tak mohlo být komplexní posouzení energetických a environmentálních nákladů spojených s výrobou a transportem suchého ledu.

Seznam literatury

- [1] LIU, Y.-H., D. HIRAMA a S. MATSUSAKA. Particle removal process during application of impinging dry ice jet. *Powder Technology* [online]. 2012, **217**, 607–613 [vid. 2020-02-16]. ISSN 00325910. Dostupné z: doi:10.1016/j.powtec.2011.11.032
- [2] Documents by year. In: *Scopus* [online]. Elsevier, c2020 [vid. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.scopus.com/term/analyzer.uri?sid=d1085636a1fe6538dddddadbccdb1c341&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28%28%22dry+ice+blasting%22+OR+%22solid+carbon+dioxide+blasting%22%29+AND+%28%22cleaning%22+OR+%22surface%22%29%29&sort=plf-f&sdt=b&sot=b&sl=100&count=90&analyzeResults=Analyze+results&txGid=5b050177557bc03e019698763b06980c>
- [3] UHLMANN, E., R. HOLLAN a A. EL MERNISSI. Dry ice blasting - Energy-efficiency and new fields of application. In: *Engineering Against Fracture - Proceedings of the 1st Conference* [online]. Patras, Greece: Springer Science+Business Media, 2009, s. 399–409 [vid. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84898880570&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=Dry+ice+blasting+-+Energy-efficiency+and+new+fields+of+application&st2=&sid=dbeb4d7de4f06ebbfef03de26956b291&sot=b&sdt=b&sl=81&s=TITLE-ABS-KEY%28Dry+ice+blasting+-+Energy-efficiency+and+new+fields+of+application%29&relpos=0&citeCnt=5&searchTerm=>
- [4] MÁŠA, Vítězslav a Pavel KUBA. Efficient use of compressed air for dry ice blasting. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2016, **111**, Special Volume: Process Integration for Cleaner Production, 76–84 [vid. 2020-02-16]. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2015.07.053
- [5] KONEČNÁ, E. *Tryskání suchým ledem v průmyslové praxi* [online]. Brno, 2015 [vid. 2020-06-03]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Pavel Kuba. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/83882>
- [6] EIGA. *Guidelines for Safe and Hygienic Handling of Dry Ice – Doc. 150/18* [online]. 2018. Dostupné z: <https://www.eiga.eu/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=3438&token=26488de928ec71074f3b65a607881ce69538e5cc>
- [7] SPONK. *Colored phase diagram of carbon dioxide* [online]. 9. únor 2010 [vid. 2020-05-12]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carbon_dioxide_p-T_phase_diagram.svg?uselang=cs
- [8] KOHLI, Rajiv. Chapter 4 - Applications of Solid Carbon Dioxide (Dry Ice) Pellet Blasting for Removal of Surface Contaminants. In: Rajiv KOHLI a K. L. MITTAL, ed. *Developments in Surface Contamination and Cleaning: Applications of Cleaning Techniques* [online]. B.m.: Elsevier, 2019 [vid. 2020-02-16], s. 117–169. ISBN 978-0-12-815577-6. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-815577-6.00004-9

- [9] SPUR, G., E. UHLMANN a F. ELBING. Dry-ice blasting for cleaning: process, optimization and application. *Wear* [online]. 1999, **233–235**, 402–411 [vid. 2020-02-16]. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:10.1016/S0043-1648(99)00204-5
- [10] Pallet Dry Ice (3mm) - 10 kg. In: *Synergdryice* [online]. Synergdryice, c2019–c2020 [vid. 2020-06-23]. Dostupné z: https://www.synergdryice.com.my/index.php?ws=showproducts&products_id=2548948
- [11] EIGA. *Environmental Impacts of Carbon Dioxide and Dry Ice Production – Doc. 111/16* [online]. 2016. Dostupné z: <https://www.eiga.eu/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=2523&token=5eafda8e9fe0035627288619b7d8759b1271739c>
- [12] Dry Ice Production. *ASCO all about CO2* [online]. c2020 [vid. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://www.ascoco2.com/en/dry-ice-production>
- [13] Dry Ice Production Machines. *Ice Tech Technologies* [online]. c2020 [vid. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://www.icetechtechnologies.com/products/dry-ice-production-machines>
- [14] STRATFORD, Scott. Dry ice blasting for paint stripping and surface preparation. *Metal Finishing* [online]. 2000, **98**(6), 493–499 [vid. 2020-02-16]. ISSN 0026-0576. Dostupné z: doi:10.1016/S0026-0576(00)80450-X
- [15] Dry ice blasting technology in the measurements and test engineering. In: *Foundry-planet*. [online]. Foundry-planet, 2013 [vid. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.foundry-planet.com/tr/kurumsal-haberler/ascojet-dry-ice-blasting-technology-in-motor-development-and-measurement-and-test-engineering/>
- [16] Dry ice blaster IB 7/40 Classic. In: *Kärcher* [online]. Kärcher, c2020 [vid. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.karcher.cn/cn-en/professional/dry-ice-cleaning/ib-7-40-classic-15740010.html>
- [17] Cryonomic. [online]. Gent: Artimpex, c2020 [vid. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.cryonomic.com/en/home>
- [18] Icesonic. [online]. Nova Gradiška: Icesonic, c2020 [vid. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://icesonic.com/>
- [19] ASCO. [online]. Romanshorn: Asco, c2020 [vid. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.ascoco2.com/en/>
- [20] Cold Jet. [online]. Loveland, OH: Cold Jet, c2020 [vid. 2020-04-21]. Dostupné z: <https://www.coldjet.com/>
- [21] Nozzles & Accessories. In: *Cold Jet New Zealand* [online]. Cold Jet New Zealand, c2020 [vid. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.coldjet.co.nz/nozzles-accessories/>
- [22] COLD JET. *Aero series product catalog* [online]. c2015 [vid. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://www.coldjet.com/wp-content/uploads/2019/07/aero-series-catalog-ENG.pdf>

- [23] Hose assembly. *WHITE LION* [online]. c2020 [vid. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://white-lion.eu/en/dry-ice-blasting-devices/accessories/hose-assembly/>
- [24] Podavač. In: *Cold Jet* [online]. Cold Jet, c2020 [vid. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.coldjet.com/cs/nase-vybaveni/zarizeni-pro-tryskani-suchym-ledem/rady-aero/aero-80fp/>
- [25] THE COLD JET TEAM. The importance of dry air with dry ice blasting. In: *Cold Jet* [online]. Cold jet, 16. prosinec 2019 [vid. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://blog.coldjet.com/the-importance-of-dry-air-with-dry-ice-blasting>
- [26] THE COLD JET TEAM. How to use dry ice and CO2 safely. In: *Cold Jet* [online]. Cold Jet, 11. listopad 2019 [vid. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://blog.coldjet.com/co2-safety>
- [27] Alkion. [online]. Jilemnice: Alkion service, c2020 [vid. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://www.alkion.eu/cs/index>
- [28] YOUNG, F.C. Removing fouling residue from molds in-the-press with CO2 pellet blasting. *Rubber World*. 2002, **227**(3), 39–47. ISSN 00359572.
- [29] Plastic manufacturer extends mold running time by 200-500%. In: *Cold Jet* [online]. Cold jet, 1. červenec 2019 [vid. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.coldjet.com/resources/performance-plastics/>
- [30] WILSON, S. Sustainable in-machine mold cleaning using dry ice. *Rubber World*. 2012, **247**(3), 18–24. ISSN 00359572.
- [31] WILSON, S. The most effective deburring and deflashing method. In: *Cold Jet* [online]. Cold Jet, 15. leden 2020 [vid. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://blog.coldjet.com/the-most-effective-deburring-and-deflashing-method>
- [32] Tire Mold Cleaning. In: *Cold Jet* [online]. Cold Jet, c2020 [vid. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.coldjet.com/dry-ice-blasting/industries/rubber-tires/>
- [33] NOVÁ, Iva, Zdeněk HOŠEK a Iva NOVÁKOVÁ. Rozvoj tlakového lití. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2004, (5), 79 [vid. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rozvoj-tlakoveho-liti.html>
- [34] Corebox cleaning. In: *Cold Jet* [online]. Cold Jet, c2020 [vid. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.coldjet.com/en-uk/dry-ice-blasting/industries/foundry/>
- [35] BALUCH, N., S. MOHTAR a C.S. ABDULLAH. Dry-ice blasting of auto robotic assemblies. *International Journal of Supply Chain Management* [online]. 2016, **5**(4), 97–103 [vid. 2020-03-05]. ISSN 20513771. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/316961097_Dry-ice_blasting_of_auto_robotic_assemblies
- [36] THE COLD JET TEAM. Dry ice blasting improves weld line productivity. In: *Cold Jet* [online]. Cold Jet, 28. leden 2019 [vid. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://blog.coldjet.com/dry-ice-blasting-improves-productivity-of-weld-lines>

- [37] CHEN, J., H. MU, Q. HU a Z. JIANG. Investigation on the Process of Dry Ice Cleaning Insulators. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. Xishuangbanna, Yunnan, China: 2018. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/394/4/042112
- [38] MARKS, Wolfgang. Čištění elektrických zařízení pod napětím. *Elektro - odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. 2005, 15(7) [vid. 2020-04-27]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/cistenie-elektrickyh-zarizeni-pod-napetim--13540>
- [39] BRITISH COLUMBIA HYDRO and POWER AUTHORITY. *Dry ice blasting cleaning apparatus*. [online]. Inventors: B. A. SPALTEHOLZ, G. P. NIELSEN. 25. 4. 2006. Int. cl. B24B 49/00 Patent No.: US7033249B2. United States Patent and trademark Office [vid. 2020-02-17]. Dostupné z: <http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO1&Sect2=HITOFF&d=PALL&p=1&u=%2Fnetahhtml%2FPTO%2Fsrchnum.htm&r=1&f=G&l=50&s1=7033249.PN.&OS=PN/7033249&RS=PN/7033249>
- [40] YOUNG, F. C. Cleaning with solid carbon dioxide pellet blasting. In: K. L. MITTAL, ed. *Surface Contamination and Cleaning: Volume 1* [online]. London: CRC Press, 2003 [vid. 2020-04-01], 1, s. 151–159. ISBN 978-90-474-0328-9. Dostupné z: doi:10.1201/9789047403289
- [41] Substation and Switchgear Cleaning. In: *UScleanblasting* [online]. UScleanblasting, c2020 [vid. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://uscleanblast.com/substation-and-switchgear/>
- [42] GENERAL ELECTRIC COMPANY. *Dry ice cleaning apparatus for gas turbine compressor*. [online]. Inventors: P. J. DIAZ, R. E. HEFNER. 23. 2. 2016. Int. Cl. F01D 25/00, F01D 21/00, B24C 1/08, B24C 1/00. Patent No.: US9267393B2. United States Patent and trademark Office. Dostupné z: <http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO1&Sect2=HITOFF&d=PALL&p=1&u=%2Fnetahhtml%2FPTO%2Fsrchnum.htm&r=1&f=G&l=50&s1=9267393.PN.&OS=PN/9267393&RS=PN/9267393>
- [43] BLAŽKOVÁ, Irena. *Jaderné elektrárny, jejich perspektivy a nové koncepce* [online]. Brno, 2003 [vid. 2020-04-10]. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta, Ústav fyzikální elektroniky. Vedoucí práce David Trunc. Dostupné z: <https://www.physics.muni.cz/~blazkova/dp/>
- [44] MID-AMERICAN GUNITE. *Cleaning of radioactive contamination using dry ice* [online]. Inventors: K. P. MASSERANT. US20130263890A1. 13. 3. 2013. Int. Cl. B24C 3/00, B24C 1/00. Appl. no. 13/800466. United States Patent and trademark Office. [vid. 2020-02-20]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US20130263890A1/en>
- [45] THE COLD JET TEAM. Cleaning nuclear power equipment with dry ice. In: *Cold Jet* [online]. Cold Jet, 27. leden 2020 [vid. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://blog.coldjet.com/cleaning-nuclear-power-equipment-with-dry-ice-blasting>
- [46] CHANDRASEKAR MUTHUKUMAR. A Short Review on Alternative Cleaning Methods to Remove Scale and Oxide from the Jet Engine Alloys. *International Journal*

- [57] KUBÍČEK, Jaroslav. *Žárové nástřiky* [online]. [Nevydáno]. Brno, 2018. [vid. 2020-05-15]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hpu Renovace_a_povrchove_upravy_zarove_nastriky_2018_kubicek.pdf
- [58] TURBOCOATING S.P.A. *Method and equipment for removal of ceramic coatings by co2 coatings* [online]. Inventors: A. SCRIVANI, C. GIOLLI, B. A. ALLEGRI. 25. 10. 2012. INT. Cl. B24C 1/00. Appl. No. 13/643478. United States Patent and trademark Office. [vid. 2020-02-21]. Dostupné z: [https://patents.google.com/patent/US20130040538A1/en?q=Method&q=equipment&q=removal&q=ceramic&q=coatings&q=co2&q=coatings\(&oq=Method+and+equipment+for+removal+of+ceramic+coatings+by+co2+coatings](https://patents.google.com/patent/US20130040538A1/en?q=Method&q=equipment&q=removal&q=ceramic&q=coatings&q=co2&q=coatings(&oq=Method+and+equipment+for+removal+of+ceramic+coatings+by+co2+coatings)
- [59] *Separátor forem V11 100ml*. Dopler. [online]. Dopler studio, c2020 [vid. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://dopler.eu/4747-separator-forem-v11-100ml.html>
- [60] CRYONOMIC. *COB Series Dry Ice Blasters* [online]. [c2020] [vid. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.cryonomic.com/Repository/PDFs/CRY-COB-EN-One-Hose-Blasters-LR1504.pdf>
- [61] ŠTĚTINA, Josef. Kompresory. In: *Termoemchanika online* [online]. Brno: VUT v Brně. 22. říjen 2019 [vid. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://docs.google.com/presentation/d/1MsFKInu8nf-47DU1TfK4Scd6IM11NtDFsn0aDC9bSTk/edit#slide=id.p1>
- [62] Kompresory. *dspace.tul.cz* [online]. c2012 [vid. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/79046/kompresory.pdf?sequence=234&isAllowed=y>
- [63] RAEN. Stlačený vzduch - snižování energetické náročnosti. *mpo-efekt* [online]. 2002 [vid. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/dokument/2179.pdf>
- [64] ČSN EN 60034-30-1. *Točivé elektrické stroje - Část 30-1: Třídy účinnosti střídavých motorů provozovaných ze sítě* [online]. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. Dostupné z: http://www.technicke-normy-csn.cz/350000-csn-en-60034-30-1_4_96333.html
- [65] KOLARČÍK, Kamil, Jaroslav KAMINSKÝ a Mojmír VRTEK. *Kompresory* [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2012 [vid. 2020-05-25]. Dostupné z: https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/01_Stavba-a-provoz-stroju_1-3/1_IUT/002_Kompresory---Kolarcik-a-kol---P3.pdf
- [66] Jetty robot S. In: *JettyRobot* [online]. Jetty Robot c2020 [vid. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.jettyrobot.com/technology/>
- [67] DINDORF, R. Estimating potential energy savings in compressed air systems. *Procedia Engineering* [online]. 2012, 39, 204–211. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2012.07.026
- [68] MARTIN MARIETTA ENERGY SYSTEMS. *Centrifugal accelerator, system and method for removing unwanted layers from a surface* [online]. Inventors: C. A. FOSTER, P. W. FISHER. 5. 12. 1995. Int. Cl. B08B 7/00. Patent No. 5472369. United States Patent

and trademark Office. [vid. 2020-05-25]. Dostupné
z: <https://patents.google.com/patent/US5472369A/en>

- [69] VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *Akcelerátor pelet suchého ledu* [online]. Vynálezci: J. LOKAJ, V. MÁŠA, O. BRENKUS. Přihl. 29. 4. 2015. MPT B24C5/06, B24B57/02. Čís. patentu 305814. Úřad průmyslového vlastnictví. [vid. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://isdv.upv.cz/doc/FullFiles/Patents/FullDocuments/305/305814.pdf>

Seznam symbolů a zkratek

Symbols:

a_t	měrná technická práce adiabatického děje	[J/kg]
c_L	cena 1 kg suchého ledu bez DPH	[Kč/kg]
E_B	specifická spotřeba energie procesu tryskání suchým ledem	[kWh/kg]
E_k	kinetická energie částic suchého ledu	[J]
E_{kom}	spotřeba energie kompresoru za 1 měsíc	[kWh]
E_s	spotřeba elektrické energie tryskacího stroje za 1 měsíc	[kWh]
m	hmotnost částic suchého ledu	[kg]
$\dot{m}$	průměrná spotřeba suchého ledu	[kg/h]
m_c	hmotnost spotřebovaného suchého ledu	[kg]
$\dot{m}_v$	hmotnostní tok plynu měřeného na výtlaku kompresoru	[kg/s]
N_L	náklady na suchý led za 1 měsíc	[Kč]
p_1	tlak na vstupu do kompresoru	[kPa]
p_2	tlak na výstupu z kompresoru	[kPa]
P_{ad}	teoretický adiabatický příkon kompresoru	[W]
P_{ef}	efektivní příkon kompresoru	[W]
P_{mot}	příkon elektromotoru	[W]
p_N	tlak při normálních technických podmínkách	[Pa]
p_p	pracovní tlak	[bar]
P_s	příkon tryskacího stroje	[kW]
P_{spec}	měrný příkon	[kWh/ m _N ³]
$\dot{Q}$	spotřeba stlačeného vzduchu při tlaku 6 bar na 1 kg ledu	[m _N ³ /h]
T	doba čištění jedné formy	[min]
T_c	doba čištění za 1 měsíc	[h]
T_d	doba čištění za 1 den	[h]
T_N	teplota při normálních technických podmínkách	[K]
v	výstupní rychlost částic suchého ledu	[m/s]
$\dot{V}$	výkonnost	[m _N ³ /h]
Z	počet čištění za měsíc	[–]
Z_f	počet forem	[–]
η_{cad}	celková adiabatická účinnost	[–]
η_{mot}	účinnost elektromotoru	[–]
η_p	účinnost převodu	[–]

κ Poissonova konstanta [–]

Zkratky:

ČSN EN česká technická norma, která zavádí do soustavy českých norem evropskou norma

HEPA zachytávání mikročástic s vysokou účinností (high efficiency particulate arrestance)

TBC tepelný ochranný povlak (Thermal–Barrier Coatings)

Seznam obrázků

obr. 1 Počet publikací zabývajících se tryskání suchým ledem v daném roce, upraveno z [2] ...	11
obr. 2: Fázový diagram p–T oxidu uhličitého (není v měřítku), upraveno z [7].....	13
obr. 3: Pelety suchého ledu (Ø 3 mm) [10]	14
obr. 4: Proces tryskání suchým ledem [15]	16
obr. 5: Tryskací stroj společnosti Kärcher IB 7/40 Classic [16]	18
obr. 6: Různé typy trysek od společnosti Cold Jet [21]	19
obr. 7: Radiální podavač od společnosti Cold Jet [24].....	20
obr. 8: Blokové schéma peletového tryskacího stroje [vlastní zdroj]	21
obr. 9: Diagram využití tryskání suchým ledem v průmyslu [vlastní zdroj].....	24
obr. 10: Čištění formy na výrobu pneumatiky [32].....	25
obr. 11: Čištění jaderníků [34]	26
obr. 12: Čištění automatických svařovacích linek [36].....	27
obr. 13: Vysokonapěťový jistič a) před b) po tryskání suchým ledem [41].....	28
obr. 14: Čištění lopatek proudového motoru [47]	30
obr. 15: Jetty Robot S od firmy JettyRobot s. r. o.[66]	40
obr. 16: Prototyp akcelérátoru [3]	41

Seznam tabulek

tab. 1: Parametry od výrobců	19
tab. 2 Přehled průmyslových aplikací	32
tab. 3: Vstupní parametry případové studie pro určení energetické náročnosti procesu.....	34
tab. 4: Parametry pro výpočet kompresoru	36
tab. 5: Výsledky.....	38