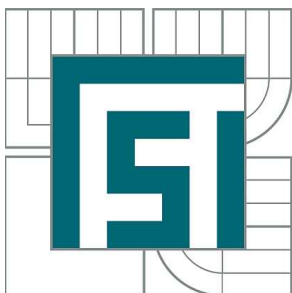


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

TRYSKÁNÍ SUCHÝM LEDEM V PRŮMYSLOVÉ PRAXI

DRY ICE BLASTING AND INDUSTRIAL PRACTICE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

EVA KONEČNÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PAVEL KUBA

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Eva Konečná

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

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:

Tryskání suchým ledem v průmyslové praxi

v anglickém jazyce:

Dry Ice Blasting and Industrial Practice

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zaměřuje na moderní a vysoce efektivní způsob průmyslového čištění povrchů: tryskání suchým ledem. Bude předložen teoretický úvod k tomuto procesu zahrnující vlastnosti suchého ledu jako materiálu, principy čištění a používanou techniku. Představeny budou konkrétní průmyslové aplikace, přičemž zvláštní pozornost bude věnována procesu degradace suchého ledu při jeho skladování. Výsledky práce najdou uplatnění v Laboratoři energeticky náročných procesů NETME Centre.

Cíle bakalářské práce:

- představení procesu tryskání suchým ledem
- přehled aplikací tryskání suchým ledem v průmyslové praxi
- základní popis procesu degradace suchého ledu včetně jeho experimentálního ověření

Seznam odborné literatury:

SPUR, G.; UHLMANN, E.; ELBING, F.: Dry-ice blasting for cleaning: process, optimization and application, Wear, Elsevier, 1999, Vol. 233–235, p. 402-411

LIU, Y., HIRAMA, D., MATSUSAKA, S.: Particle removal process during application of impinging dry ice jet, Powder Technology, Elsevier, 2012, Vol. 217, p. 607-613

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Kuba

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 24.11.2014

L.S.

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

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

Abstrakt

Práce se zabývá problematikou tryskání suchým ledem a jeho využitím v průmyslové praxi. Jsou zde popsány základní informace o suchém ledu, stejně jako přehled praktického použití tryskání suchým ledem v různých odvětvích průmyslu. Hlavní část práce se zaměřuje na studium degradace suchého ledu na základě několika experimentů a pozorování.

Klíčová slova: suchý led, tryskání, čištění, degradace

Abstract

This thesis deals with the subject of dry ice blasting and its industrial practice. The key characteristics of dry ice are described as well as an overview of dry ice blasting practical usage in various industries. Main part of this thesis focuses on a study of dry ice degradation, through a series of experiments and observations.

Key words: dry ice, blasting, cleaning, degradation

KONEČNÁ, E. *Tryskání suchým ledem v průmyslové praxi*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Kuba.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně pod odborným dohledem vedoucího práce a že jsem použila prameny, které cituji a jsou uvedeny v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 29.5.2015

Poděkování

Chtěla bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Kubovi za jeho odborné vedení, rady, připomínky a doporučení, které mi poskytl během vypracovávání bakalářské práce. Také bych ráda poděkovala Ing. Tomáši Zikmundovi, Ph.D. za možnost snímkování pomocí počítačové tomografie.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	9
1 Úvod	10
2 Teoretická část	11
2.1 Suchý led.....	11
2.2 Využití suchého ledu v průmyslu.....	12
2.2.1 Zmrazování kalu.....	12
2.2.2 Nahrazení čpavkové redukce suchým ledem.....	12
2.2.3 Články se suchým ledem jako zdroj stlačeného plynu.....	13
2.2.4 Výměník tepla se suchým ledem.....	14
2.3 Tryskání suchým ledem.....	14
2.3.1 Mechanismus tryskání suchým ledem.....	15
2.3.2 Tryskací stroj.....	17
2.4 Využití tryskání suchým ledem v průmyslu.....	18
2.4.1 Odstraňování nežádoucích vrstev z povrchu.....	18
2.4.2 Zlepšení přilnavosti plasmou stříkaných povlaků.....	20
2.4.3 Příprava hliníkového povrchu pro zlepšení pevnosti lepených spojů.....	22
2.4.4 Zlepšení dielektrických vlastností vinutí vysokého napětí v turbogenerátoru.....	23
2.4.5 Přípravný proces pro galvanizování plastů.....	23
2.5 Degradace suchého ledu.....	23
3 Praktická část	25
3.1 Sledování úbytku hmotnosti suchého ledu.....	25
3.2 Experiment lámání suchého ledu.....	26
3.2.1 Vyhodnocení výsledků.....	27
3.3 Snímání suchého ledu pomocí počítačové tomografie.....	29
4 Závěr	32
5 Seznam použitých zdrojů	34
Přílohy	37

Seznam použitých symbolů a zkratek

<i>označení</i>	<i>jednotka</i>	<i>význam</i>
E_k	J	kinetická energie
F	N	síla
L	dB	hladina intenzity zvuku
m	kg	hmotnost
n		rozsah statistického souboru
p	Pa	tlak
q_0	$\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}$	hmotnostní chladivost
T	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$	teplota
t	s, hod	čas
v	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	rychlost
x_1	s	prvek statistického souboru
\bar{x}	s	průměr statistického souboru
ρ	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	hustota

1 Úvod

Napříč celým průmyslem je obecná snaha využívat čisticí metody, které budou rychlé, efektivní a ekologické. Tryskání suchým ledem je moderní čisticí technologie, která tyto parametry splňuje a navíc přináší velké zjednodušení v údržbě a přípravě povrchů. Do budoucna se tedy tryskání suchým ledem jeví jako ideální alternativa pro současné průmyslové čištění. Nicméně je okolo této metody stále plno otázek, které dosud nebyly objasněny, a které nabízí možnost pro její další studium a následné zlepšení. Tato bakalářská práce se zaměří na hlavní výhody a nevýhody této technologie a prozkoumá nedostatky, které bude třeba řešit, aby bylo využití tryskání suchým ledem rozšířeno do dalších průmyslových odvětvích.

V teoretické části práce budou představeny základní znalosti o suchém ledu, jeho vlastnosti, výroba a aplikace. Mezi nejčastější použití suchého ledu patří chlazení v potravinářském a zdravotnickém průmyslu nebo využití suchého ledu jako čisticí médium při tryskání suchým ledem. Nejčastěji je tryskání suchým ledem využíváno pro odstraňování nežádoucích látek z povrchů. Větší část této práce bude věnována právě popisu samotného tryskání suchým ledem. Cílem je shrnout základní poznatky o čisticím mechanismu tryskání, výhodách či nevýhodách této metody a jednotlivých aplikacích v průmyslové praxi.

Důležitým tématem, jež ovlivňuje samotné tryskání, je degradace suchého ledu, která má zásadní vliv na jeho vlastnosti a následnou účinnost procesu tryskání. Studium degradace bude prováděno na základě tří experimentů. Prvním z nich bude sledování úbytku hmotnosti v závislosti na čase, ke kterému dochází vlivem sublimace suchého ledu. Z měření bude určena závislost hmotnosti suchého ledu na čase.

Další experiment se bude zabývat popisem změn mechanických vlastností suchého ledu a to hlavně jeho pevnosti, která bude zkoumána pomocí obecně známé zkoušky tříbodovým ohybem. Zkouška bude upravena pro potřeby suchého ledu. Podstatou je stanovit rozdíl mezi suchým ledem ihned po výrobě a ledem uchovávaným po delší dobu.

Více informací o morfologii suchého ledu poskytne rentgenový snímek, který bude vytvořen v laboratoři počítačové tomografie CEITEC. Na základě výsledků bude možné určit, zda je tato metoda snímání vhodná pro další zkoumání suchého ledu nebo nikoliv.

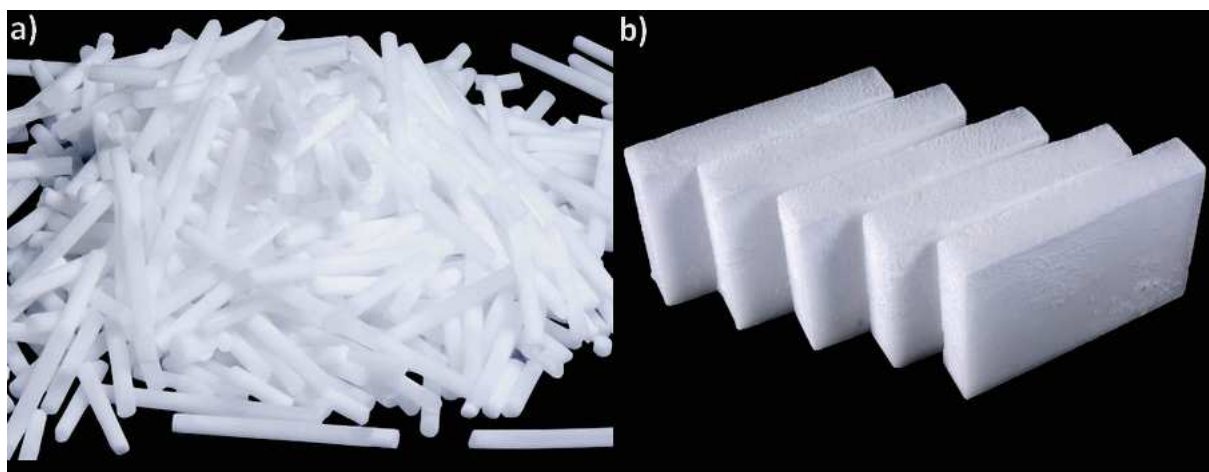
Tato práce si klade za cíl vytvořit ucelený obraz o suchém ledu, tryskacím procesu a poskytnout základní informace o degradaci suchého ledu. Tyto informace mohou být do budoucna odrazovým můstkem pro bližší zkoumání tohoto odvětví a jeho další optimalizaci.

2 Teoretická část

Teoretická část této práce má za cíl shrnout známé informace o suchém ledu z dostupných zdrojů a poskytnout komplexní přehled o využití tryskání suchým ledem v průmyslové praxi.

2.1 Suchý led

Suchý led je obecně užívané označení pro tuhý oxid uhličitý. První zmínka o suchém ledu pochází z roku 1835 od francouzského chemika Adrien-Jean-Pierra Thiloriera, který se věnoval studiu kapalného oxidu uhličitého, při kterém se jeho velká část z nádoby vypařila a na dně vznikl blok suchého ledu. V roce 1897 byl vydán patent na solidifikaci oxidu uhličitého a k prvnímu komerčnímu použití suchého ledu došlo v roce 1925 americkou společností Prest Air Devices, která jej využila pro chlazení v železničním průmyslu. Společnost také získala ochrannou známku na označení pevného oxidu uhličitého jako „suchý led“. [23] Další využití pro suchý led bylo nalezeno při skladování zmrzliny, kde nahradil do té doby používanou „solanku“, tedy zmrzlou směs vody a soli. [20]



Obrázek 1: Suchý led ve formě a) pelet, b) bloků [29]

Výroba suchého ledu spočívá v expanzi kapalného CO_2 na tlak 100 000 Pa a teplotu $-80\text{ }^\circ\text{C}$, kdy vzniká sníh ze suchého ledu. Ten je následně hydraulicky stlačován do požadovaného tvaru skrze matrici. V peletizéru je suchý led pro potřeby tryskání formován do pelet, které mají válcovitý tvar o průměru 2 nebo 3 mm a délce 5 - 15 mm. [20] Pro potřeby chlazení v potravinářském nebo zdravotnickém průmyslu je suchý led tvarován do bloků o různých velikostech. [15]

Suchý led je vyráběn z kapalného CO_2 , který je meziproduktem při různých výrobních procesech (výroba amoniaku, produkce ethanolu, rafinace ropy a plynu) a je také přírodním produktem vulkanického původu. Pro výrobu suchého ledu je tak dobře dostupnou látkou a její opětovné použití je ekologické. [20]

Suchý led při tlaku $p=104\,365\text{ Pa}$ má rovnovážnou teplotu $-78,5\text{ °C}$. Teplem z okolí dochází k jeho sublimaci zpět do plynné fáze. Chladihost 1 kg suchého ledu je $152\text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1}$. Vyšší hospodárnosti lze dosáhnout vytvořením směsi suchého ledu a lihu, která má teplotu -80 °C . [1]

Parametry, které nejvíce ovlivňují čisticí proces jsou tvrdost, hustota, stav povrchu, tvar, velikost a obsah CO_2 . Tvrdost pelet suchého ledu se pohybuje mezi 2. a 3. stupněm Mohsovy stupnice tvrdosti a odpovídá tak sádrovci nebo vápenci. [20] Hustota suchého ledu se pohybuje v rozmezí $1200\text{-}1600\text{ kg}\cdot\text{m}^3$, čímž je podobný materiálům jako klíh ($1270\text{ kg}\cdot\text{m}^3$), asfalt ($1300\text{ kg}\cdot\text{m}^3$), celuloid ($1400\text{ kg}\cdot\text{m}^3$), PVC ($1200\text{-}1500\text{ kg}\cdot\text{m}^3$) nebo vápenec (drcený: $1550\text{ kg}\cdot\text{m}^3$, mletý: $1394\text{ kg}\cdot\text{m}^3$). [24] [25]

2.2 Využití suchého ledu v průmyslu

Hlavním využitím suchého ledu je chlazení v potravinářském a zdravotnickém odvětví. V následujících podkapitolách bude představeno několik méně známých metod využití samotného suchého ledu v průmyslové praxi.

2.2.1 Zmrazování kalu

Zmrazování kalu je vysoce efektivní technika pro odvodňování kalu, nicméně je spojena s vysokými výdaji, které vznikají při mechanickém zmrazování. Suchý led je proto možnou alternativou pro tuto techniku. Pro toto využití je suchý led využíván v blocích (asi 1 cm silných) a jsou jím prokládány jednotlivé vrstvy kalu. Podle experimentu při použití pevného oxidu uhličitého dojde ke zvýšení odvodnění, rychlosti usazování i pevného podílu a naopak je redukován poměr sedimentace. [10]

2.2.2 Nahrazení čpavkové redukce suchým ledem

Při výrobě kůže je zásadním problémem velké množství odpadu z použitých chemikálií, hlavně při procesu loužení a odvápnování, kdy jsou využívány soli jako chlorid amonný nebo sulfan amonný. Tyto soli vytváří plynný amoniak a pracovní podmínky jsou tak ztíženy a mohou vést k nemocem, např. jaterní encefalopatii. Amoniakální dusík představuje až 78 % celkových emisí v koželužství. [18]

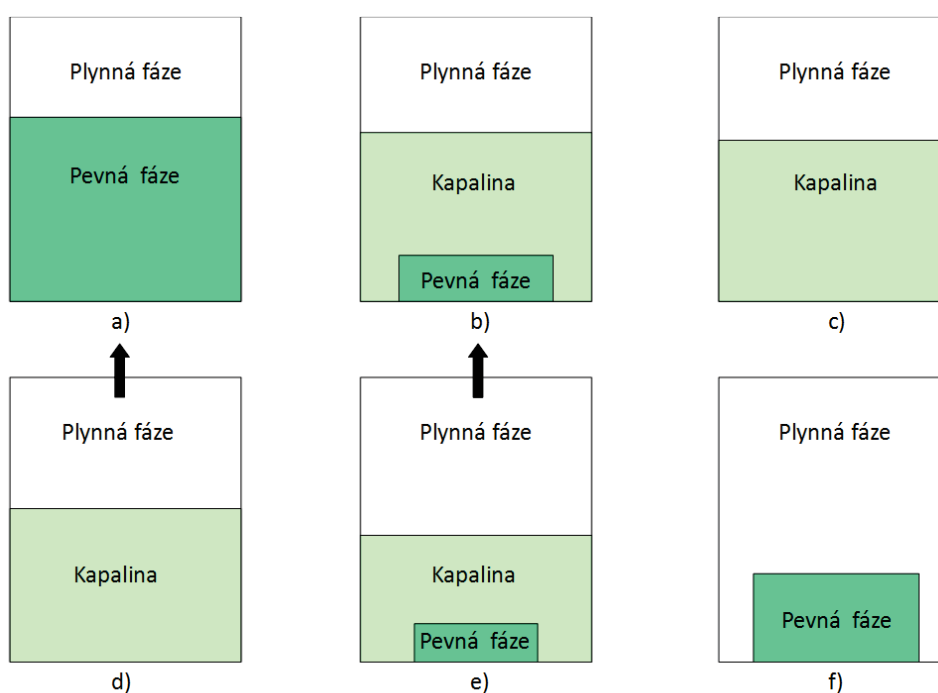
Pro odvápnování lze použít suchý led s destilovanou vodou a nahrazuje tak plynný oxid uhličitý, který je náročnější na manipulaci. Dle Sathish et al. [18] je suchý

led v počátečním stádiu odvápnování efektivnější než amoniak. Hlavními výhodami pro využití suchého ledu pro přípravu kůže jsou [18]:

- eliminace amoniakového zápachu,
- redukce škodlivin a znečištění v odpadních vodách,
- možnost recyklace odpadních vod,
- dobré odvápnění za kratší dobu,
- lepší vlastnosti kůže,
- lehce proveditelný proces bez speciálně kvalifikovaných pracovníků.

2.2.3 Články se suchým ledem jako zdroj stlačeného plynu

Články se suchým ledem jsou zdrojem stlačeného plynu, kde dochází k využití přeměn jednotlivých fází kolem trojného bodu oxidu uhličitého. Zahřátím pevné fáze CO_2 teplota roste, dochází k sublimaci a vzniká plyn. V nádobě roste tlak, jakmile dosáhne hodnoty 0,42 MPa a teplota vzroste na 217 K, nárůst teploty i tlaku ustane. Dalším ohříváním se pevný oxid uhličitý mění na kapalný, dojde k dalšímu nárůstu teploty i tlaku. Po otevření redukčního ventilu je plyn emitován z nádoby a dochází k rychlému poklesu teploty i tlaku. Důsledkem je přeměna kapalného stavu oxidu uhličitého zpět na pevnou fázi a stav v nádobě se vrací na stav trojného bodu. Jednotlivá stádia přeměny suchého ledu jsou znázorněna na obrázku 2. Tyto články byly experimentálně využity pro pohon systému podpory chůze, kde nahrazují kompresor, jež je zdrojem stlačeného vzduchu. Účelem systému podpory chůze je pomoc lidem s omezenou mobilitou dolních končetin. [9]



Obrázek 2: Změna fáze suchého ledu [9]

2.2.4 Výměník tepla se suchým ledem

Suchý led může být využit i do výměníku tepla spolu s glykolem ve formě kryogenní lázně. V této konfiguraci nabízí výměník nízkou spotřebu elektrické energie, vysokou míru chlazení, rychlý pokles teploty a teplotní stabilitu po dobu chlazení. Díky těmto vlastnostem se může jednat o dobrý chladič pro rychlé odstranění tepla pro přenosné termální systémy, kde jejich efektivita závisí na okolní teplotě, např.: chlazení při dopravě potravin nebo rychlé chlazení průmyslových tekutin (voda, olej, pára). [8]

2.3 Tryskání suchým ledem

Tryskání suchým ledem je moderní čisticí metoda, která se rozvíjí od 80. let 20. století. Zakládá se na principu ostřelování povrchu proudem pelet suchého ledu unášených stlačeným vzduchem, čímž jsou odstraňovány nežádoucí látky. [15] Jedná se o metodu zařaditelnou mezi tzv. suché čisticí metody [13].

Hlavní výhodou čištění suchým ledem je, že pelety ihned po kontaktu s povrchem sublimují zpět do plynného stavu. Oproti jiným metodám (např. pískování) je eliminována potřeba odstraňování pozůstatků čisticího média po dokončení čisticího procesu. Další podstatnou výhodou je, že pelety suchého ledu nezpůsobují žádné porušení čištěného povrchu díky své nízké tvrdosti. Nicméně s ohledem na druh materiálu může suchý led působit mírně abrazivně či korozivně. Při použití tryskání suchým ledem tak klesají náklady na následnou likvidaci čisticího média v porovnání s pískováním nebo chemickými procesy. Protože se jedná o suchou čisticí techniku, kde není použita voda, není třeba ani následné vysoušení povrchu, což ještě více urychluje celý proces. [21] Úspora času tak může činit 50-75 % [20].

Během čištění suchým ledem je nutné brát na vědomí, že oxid uhličitý je pro člověka ve větší koncentraci nebezpečný. Při koncentraci vyšší než 10 % může dojít až k udušení. Příznaky jsou malátnost, únava nebo bezvědomí. [26] Z tohoto důvodu je třeba provádět čištění v dobře odvětrávaných prostorech. Při tryskání navíc dochází k nárůstu hladiny hluku až na 125 dB, proto by obsluha měla používat pomůcky určené pro ochranu sluchu. [20]

Tryskání suchým ledem je dobré využít v případech, kdy:

- je nutné čištění provádět během provozu,
- není možná demontáž čištěného zařízení,
- povrch nesmí být kontaminován čisticím médiem,
- povrch je citlivý na použití chemikálií,
- je třeba použít neškodnou metodu, aby byly zachovány některé vlastnosti čištěného povrchu (např. drsnost),

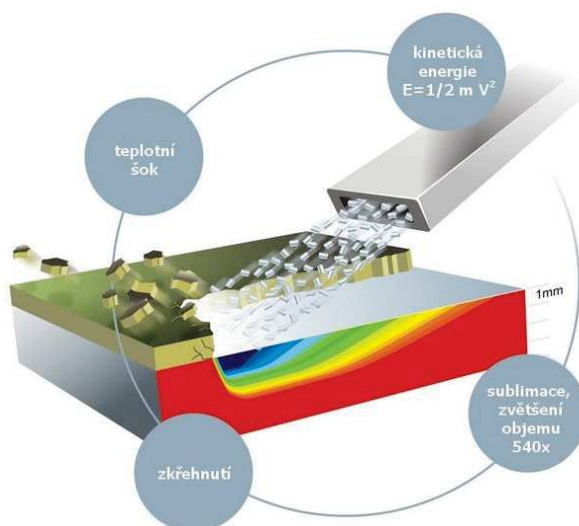
- není možné zpracovat nebezpečný odpad po čištění,
- současná metoda je náročná na pracovní sílu. [21]

Naopak limitujícími podmínkami pro použití tryskání suchým ledem je již zmíněný nárůst koncentrace CO₂ v ovzduší a hluk. Navíc na tvrdších nátěrových systémech je v porovnání s pískováním tryskání suchým ledem pomalejší čisticí metodou, protože daná vrstva musí být tryskána delší dobu, aby na ni dopadalo větší množství pelet. V případě, že je třeba po odstranění nežádoucí vrstvy vytvořit nový dezén povrchu, musí být využita jiná metoda, protože tryskání suchým ledem může odstranit původní geometrii povrchu. Další nevýhodou při čištění složitějších tvarů může být neschopnost suchého ledu se odrazit od tvrdého povrchu s dostatečnou energií pro další čištění. [22]

2.3.1 Mechanismus tryskání suchým ledem

Mechanismus tryskání zatím nebyl zcela objasněn a popsán, nicméně základními principy, které způsobují čisticí účinek, jsou:

- termální efekt vyvolaný lokálním snížením teploty,
- mechanický efekt, který je způsoben přeměnou kinetické energie při dopadu pelety suchého ledu, vlivem expanze díky sublimaci suchého ledu a aerodynamickým tahem, který je nejčastěji vytvářen pneumatickým systémem s kompresorem šroubového typu. [15]



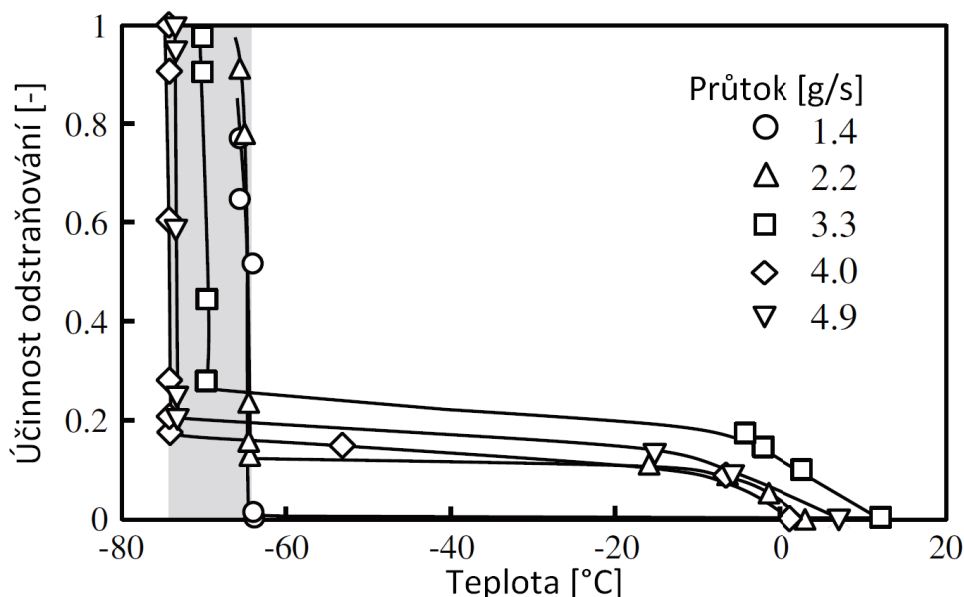
Obrázek 3: Mechanismus tryskání [30]

Mechanický efekt je vyvolán přeměnou kinetické energie při dopadu pelety suchého ledu na povrch a tahem od stlačeného proudu vzduchu. Síla působící na povrch je rozdělena na část vyvolanou působením stlačeného vzduchu a část způsobenou dopadem samotných pelet suchého ledu. Při dopadu na povrch může tato síla dosahovat až 150 N a rychlost pelety na výstupu až 300 m·s⁻¹. Jakmile peleta narazí

na povrch dochází vlivem nárůstu objemu (kvůli sublimaci CO_2) ke vzniku tlakových rázů. Poté oxid uhličitý a vzduch proniknou pod odstraňovanou vrstvu kudy proudí. [19]

Tepelný efekt je způsoben podchlazením tryskaného místa, čímž dojde ke snížení pružnosti nežádoucí vrstvy. Výsledkem je křehnutí a následné zmenšení, zatímco se vytváří trhliny ve vrstvě. Jakmile je překročena adhesivní energie mezi základním materiálem a povlakem, dojde k jeho „odloupnutí“. [20] Větší podíl na účinnosti odstraňování má termální vliv, kolem 60 %. Zbývajících 40 % tvoří mechanický efekt. Hlavní parametry, které mají vliv na tryskací proces, můžeme rozdělit do 3 skupin: podmínky procesu, stroje a pelet. [20]

Efektivitu tryskání ovlivňuje tryskové proudění vzduchu, přičemž platí, že čím větší je tryskové proudění, tím vyšší je účinnost čisticího procesu. Dle Spur, Uhlmann et al.[20] může být kinetická energie, a tím i síla dopadu pelet suchého ledu, více než zdvojnásobena, pokud dojde k co nejmenšímu poničení a sublimaci pelet během dopravy suchého ledu hadicí k trysce nebo během jejich akcelerace. Na to je možné navázat tvrzením, že účinnost také závisí na teplotě proudu vzduchu, kterým je urychlován suchý led. [14] Při pokojové teplotě průtoku je účinnost 20 % nebo méně, naopak blíží-li se teplota proudu k $-70\text{ }^\circ\text{C}$, efektivita tryskání rapidně stoupá, jak je patrné z grafu 1. Pokles účinnosti může způsobovat právě degradace pevného oxidu uhličitého, která je za pokojových teplot výrazně rychlejší než při teplotách kolem $-70\text{ }^\circ\text{C}$. [14]



Graf 1: Závislost účinnosti odstraňování na teplotě proudu vzduchu [14]

2.3.2 Tryskací stroj

Tryskací stroj slouží k transferu pelet na tryskaný povrch. Existuje několik typů, které lze rozdělit následujícím způsobem.

Rozdělení podle formy suchého ledu

Do tryskacího stroje lze dodávat suchý led buďto ve formě ledu nebo již jako hotové pelety, což má vliv na technické složení použitého stroje. V prvním případě sestává přístroj z řezacího mechanismu, kde dochází k rozsekání bloku suchého ledu na drobnější granule, které odtud pokračují do komory. V případě druhého typu stroje jsou již připravené pelety suchého ledu vloženy do násypky a odkud putují do komory. [15]

Další postup je pak stejný pro oba typy strojů. Kompresor nažene stlačený okolní vzduch do komory, kde se smíchá s peletami, případně granulemi suchého ledu, a tato směs je pak hnána do výstupní trysky. [15]

Pokud jde o porovnání těchto dvou typů, pak lze předpokládat, že u prvního druhu s řezacím mechanismem bude efektivita suchého ledu vyšší, protože při skladování v blocích má suchý led delší výdrž a díky tomu nedochází k tak rychlé degradaci jako u pelet suchého ledu. [15]



Obrázek 4: Tryskací stroj firmy Coldjet [31]

Mezi nejznámější výrobce tryskacích strojů patří společnosti AscoJet, Coldjet nebo Ice Tech.

Rozdělení dle způsobu dopravy suchého ledu do trysky

Další rozdělení je možné provést podle toho, jak je suchý led dopravován z komory tryskacího stroje do samotné výstupní trysky.

První možností je vést granule či pelety suchého ledu jednou hadicí společně se stlačeným vzduchem přímo do trysky. Druhou variantou je hnát suchý led jednou hadicí s nízkým tlakem, aby nedocházelo k jejich ničení, zatímco stlačený vzduch putuje samostatnou druhou hadicí k čisticí trysce. Teprve těsně před tryskou jsou pelety/granule vyvedeny hadicí a urychleny stlačeným vzduchem z hadice druhé, čímž je docíleno požadované rychlosti výstupu suchého ledu z čisticí trysky. Jedná se tedy o jedno nebo dvou hadicový systém. [21]

2.4 Využití tryskání suchým ledem v průmyslu

Tryskání suchým ledem je využíváno v mnoha odvětvích průmyslu zejména jako čisticí metoda pro odstraňování nežádoucích částic a vrstev z materiálu nebo pro přípravu materiálu před dalším technologickým zpracováním. Neméně významným využitím suchého ledu je chlazení v potravinářském a zdravotnickém průmyslu. [13]

V automobilovém, leteckém i železničním průmyslu je tryskání suchým ledem používáno pro čištění polovodičových součástí, forem, klimatizací či k odstraňování barevných nátěrů. [15]



Obrázek 5: Ukázka odtahu před a po čištění [32]

Tryskání suchým ledem se také využívá k čištění vzduchotechniky, klimatizace a odtahů napříč všemi odvětvími průmyslu. [32]

2.4.1 Odstraňování nežádoucích vrstev z povrchu

Jednou z hlavních aplikací suchého ledu a tryskání je při odstraňování nátěrů z různých povrchů. Dle Spur, Uhlmann et al. [20] je rychlost posuvu pelet suchého

ledu maximální při úhlu trysky od 70° do 90°. Při tryskání kolmo na povrch je dosaženo kladivového efektu na odstraňovanou vrstvu, naopak při menších úhlech převažuje spíše abrazivní odstraňování. Při větších úhlech roste síla proudu suchého ledu a tak roste i kinetická energie. Zmiňovaná rychlost posuvu může být ještě zvýšena zvětšením pracovní vzdálenosti na interval 50 až 150 mm. Protože další parametry zůstávají neměnné, míra odstranění je tak závislá pouze na odstraňované šířce a rychlosti posuvu. [20]

Navazujícím tématem je odstraňování graffiti tryskáním suchým ledem. Jedná se spíše o novou metodu, která stále zůstává za tradičními metodami jako je chemické a mechanické čištění. I přesto se jedná o efektivní metodu odstraňování, jejím hlavním omezením je způsobený teplotní šok, který neprospívá povrchu pod barvou. [17]

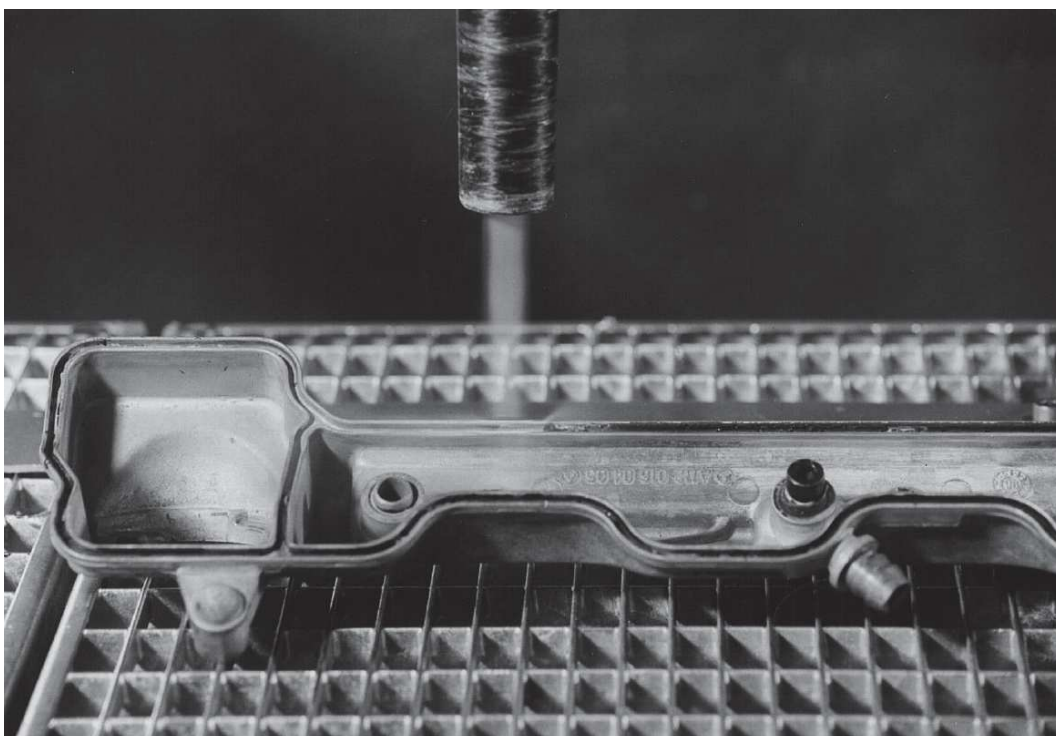


Obrázek 6: Odstraňování graffiti tryskáním suchým ledem [33]

Další nežádoucí vrstvou, kterou je možné odstranit otryskáním, je silikonové těsnění (pro hliníkovo-hořčíkové slitiny), které je zejména využíváno v automobilovém průmyslu. Silikonové těsnění je odstraňováno ručním odřezáváním, což je časově i finančně náročné. Ostatní tryskací metody (písek, sklo) způsobovaly poškození součástí. Mezi další problémy při odstraňování těsnění patří i elastické vlastnosti silikonu a složité tvary součástí, které celý proces značně komplikují a zdržují. [20]

Při tryskání byl pozorován i povrch slitiny, zda nedojde k jeho poškození. Dle pořizovaných snímků nedošlo ke změně struktury ani zásadní změně drsnosti povrchu. Abrazivní účinek se objevil jen na místech, které byly vystaveny vysokému napětí po dobu delší než 1 minutu. [20]

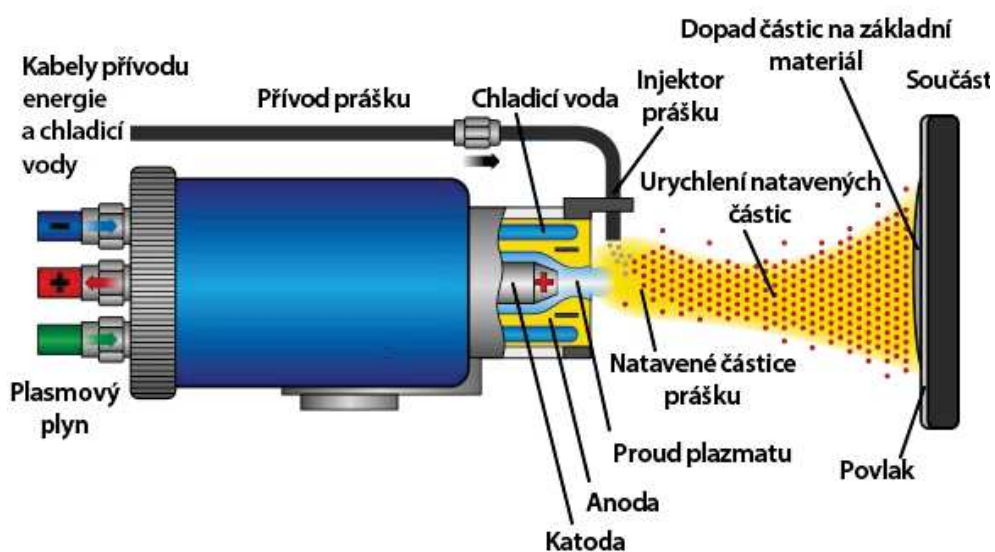
Další látky, které je možné odstranit tryskáním suchým ledem, jsou různá maziva a látky, které vznikají během provozu daného stroje či součástí.



Obrázek 7: Odstraňování silikonového těsnění z víka ventilů [20]

2.4.2 Zlepšení přilnavosti plasmou stříkaných povlaků

Žárové stříkání plasmou je jednou z nejprizpůsobivějších metod pro nástřik kvalitních povlaků se speciálními požadavky a vlastnostmi. [27] Při nástřiku je však třeba zajistit dostatečné chlazení povrchu. V současnosti je využíváno chlazení vzduchem a zde se nabízí místo pro možné uplatnění tryskání suchý ledem.



Obrázek 8: Princip nástřiku povlaků plasmou [27]

Ze sledování struktury kovového (ocelového) povlaku je patrné, že v povlaku chlazeném vzduchem se objevují jednotlivé oxidy a shluky vznikajících oxidů. Podíl těchto oxidů může být až 9,5 %. Zatímco ve struktuře tryskaného povlaku je patrná hustší struktura s menším množstvím pórů a oxidů, které tvoří jen 5 % objemu. Chlazení tryskáním tak u kovových povlaků může snížit množství vměstků téměř na polovinu. Tryskání má vliv také na drsnost povrchu, která se snížila z 16,54 μm na 5,30 μm . Na tuto skutečnost může mít vliv i výše zmíněná přítomnost vměstků, které mají vliv na výsledné vlastnosti povrchu. [4]

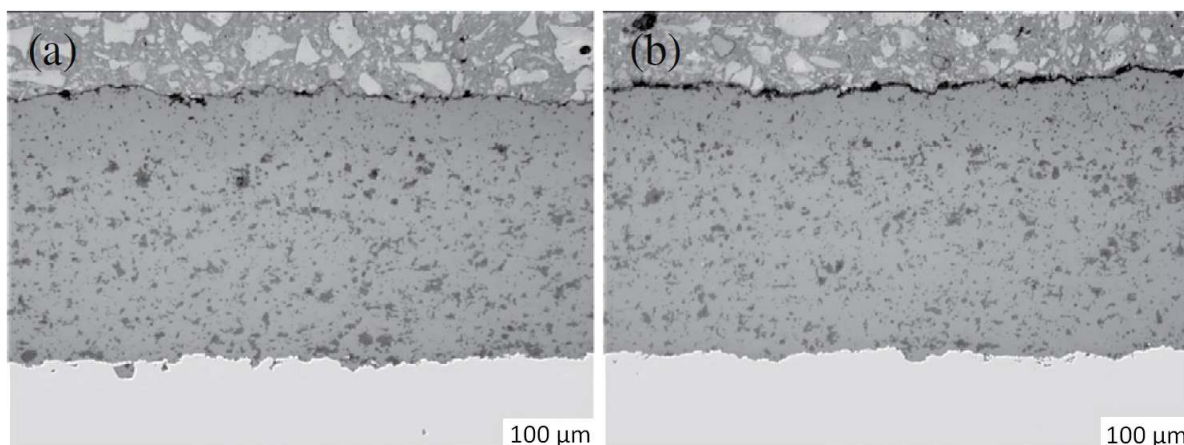
Pro povlakování jsou využívány i slitiny. Nejdříve bude rozebrána slitina CoNiCrAlY. Tryskání suchým ledem má v případě této slitiny podobný efekt jako u kovového povlaku. Dochází tedy ke snížení množství oxidu ve struktuře a zlepšení drsnosti výsledného povrchu. V případě nástřiku slitiny dochází k většímu rozstříku kapek a tak je větší oblast vystavena působení atmosféry a dochází ke zvýšení stupně oxidace. Proto je následná eliminace oxidů při otryskání důležitým procesem. [4]

Další slitinou využívanou k vytváření povlakových vrstev je NiCrBSi, kde tryskání suchým ledem během nástřiku povlaku má za následek hustší strukturu s tenčími lamelami, které nasvědčují větší kontaktní ploše a tím i vyšší míře chladicího efektu, čímž je redukována krystalizace. Další snížení je v oblasti porozity, ale není tak radikální jako u předchozích povlaků. V neposlední řadě dochází k nárůstu množství amorfní fáze, což může být následkem velkého teplotního rozdílu, který je mezi suchým ledem a plasmou. [6]

Rozšířenou slitinou pro magnetická jádra na konstrukce elektrických generátorů je FeSiB slitina. Použitím tohoto materiálu je získána dobrá kombinace vlastností jako vysoká tvrdost, odolnost vůči abrazivnímu opotřebení, odolnost proti korozi a hlavně dobré magnetické vlastnosti. Při použití tryskání během nástřiku povlaku dojde ke snížení počtu nerozpuštěných částic a okolních kapek, které vznikají během rozstříku materiálu. Jak bylo zmíněno v minulém odstavci, dochází k nárůstu množství amorfní fáze v materiálu. Vlivem tryskání je zvýšena míra magnetizace, je dosaženo vyšší tvrdosti a pevnosti v tahu. [5]

Podobné účinky jako u výše zmiňovaných povlaků vznikají použitím tryskání suchým ledem i při nanášení FeAl povlaku. Dochází ke snížení množství oxidů, snížení porozity a vměstků v podobě Fe_3Al . Výsledkem je zvýšení mikrotvrdosti až o 72 %. Na druhou stranu, zvýšení přilnavosti není tak významné. [19]

V případě povlaku oxidu hlinitého není rozdíl ve struktuře tak patrný jako u předchozích dvou případů, nicméně ke snížení množství porosit stále dochází a to z 9,3 % na 6,8 %. [4] Po použití tryskání je ve struktuře patrné, že v povlaku došlo ke snížení množství trhlin na povrchu i ve struktuře v porovnání s původní metodou chlazení vzduchem a povlak je tak složen hlavně z dobře roztavených částic Al_2O_3 . [3]



Obrázek 9: Morfologie povlaku Al_2O_3 na a) vzduchem chlazeném povrchu a b) povrchu trykaném suchým ledem [4]

Protože u všech druhů povlaků došlo díky tryskání k chlazení původního povrchu i k jeho očištění, ve struktuře tak došlo ke snížení množství oxidů, které jsou zpravidla křehké a narušují tak chemickou jednotu povlaku. Tím jsou ovlivněny i mechanické a fyzikální vlastnosti materiálu. Jedním z hlavních parametrů sledovaných u povlakování je adhezní síla mezi původním materiálem a naneseným povlakem. V případě kovového a slitinového povlaku došlo k navýšení o 14 % a 5 %. Nejvyšší nárůst této síly byl zaznamenán u keramického povlaku oxidu hlinitého a to až o 30 %. [4]

Díky lepší chladicí účinnosti a čisticímu efektu tryskání suchým ledem je možné dosáhnout kvalitnějších povlaků než v případě chlazení vzduchem.

2.4.3 Příprava hliníkového povrchu pro zlepšení pevnosti lepených spojů

V současné době jsou pro přípravu povrchu před lepením využívány vodné, rozpouštěcí a chemické čističe, které musí být likvidovány nebo recyklovány. Pozůstatky těchto přípravků musí být navíc odstraněny z upravovaného povrchu dalším odmašťováním. V případě otryskání povrchu suchým ledem tyto problémy nemusí být řešeny, protože se jedná o metodu šetrnou k životnímu prostředí.

Na základě experimentu bylo dokázáno, že povrch připravený tryskáním vykazuje větší přilnavou sílu. Při použití tryskání dojde k odstranění maziva a vznikajících oxidů hliníku a magnézia, což vede ke zlepšení adhezní pevnosti. Nicméně na povrchu nedojde ke změně drsnosti, ani ke změně struktury na povrchu. [7]

2.4.4 Zlepšení dielektrických vlastností vinutí vysokého napětí v turbogenerátoru

Při provozu turbínového generátoru dochází ke vzniku znečišťujících látek (uhlíkový prach, ložiskový olej a další), které se následně usazují ve vinutí a jádře generátoru. Nečistoty vedou k zanesení ventilačních cest a tím navýšení pracovní teploty. Zanesený povrch vytváří vodivé zóny a dochází tak k elektrickému jiskření mezi fází a uzemněným jádrem, což vede k poškození izolace.

Tryskání suchým ledem může být optimální čisticí metodou, protože suchý led není vodivý a neobsahuje vlhkost, a tudíž představuje dobré čisticí médium pro odstranění nečistot z vinutí a jádra. Navíc je ušetřen čas pro sušení stroje. Po otryskání dochází ke zlepšení hodnot izolačního odporu, kapacitního a dielektrického ztrátového výkonu a dalších parametrů, které jsou sledovány. [12]

2.4.5 Přípravný proces pro galvanizování plastů

Plasty jsou v současnosti využívány pro nejrůznější účely a aby mohly do určité míry nahradit kovy, jsou galvanizovány. Nejčastěji se jedná o vrstvy mědi nebo niklu. Získají tak základní kovové vlastnosti jako lesk či teplotní a elektrickou vodivost. Pro vysokou kvalitu kovového povlaku musí být povrch nejdříve důkladně očištěn a připraven, přičemž kvalita povlaku závisí na krocích před úpravou. Z tohoto důvodu je důležité užít metody bez pozůstatků po čištění. Momentálně je pro čištění využívána řada chemických lázní, po kterých se i přesto objevují abrasivní rezidua. Používané lázně poškozují životní prostředí a některé z nich dokonce způsobují rakovinu (kyselina chromová). Další nevýhodou je dlouhé časové setrvání součástí v lázni, čímž rostou náklady procesu.

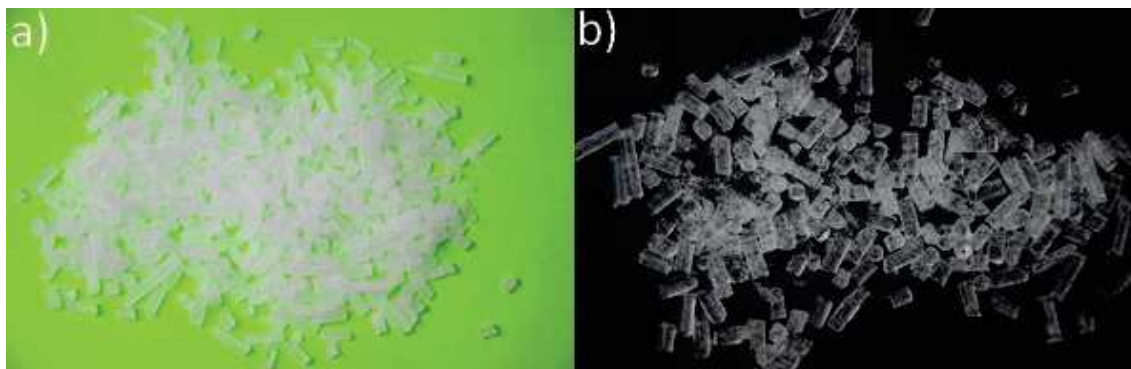
Je dokázáno, že při vyšší polární složce povrchového napětí je dosaženo lepší adhezivní síly. Po tryskání suchým ledem došlo ke zvýšení této složky a současně ke snížení disperzní složky povrchového napětí. Další změn po otryskání doznala drsnost povrchu, která (po bližším zkoumání) nemá vliv na galvanizaci.

Po tryskání suchým ledem bylo docíleno úspěšné galvanizace, ale adhezivní pevnost nedosahuje požadovaných hodnot. Z tohoto důvodu je tryskání suchým ledem uvažováno jako možná náhrada za jiné metody před samotnou galvanizací. Nicméně je třeba dalších operací pro zvýšení zmiňované adhezivní pevnosti. [2]

2.5 Degradace suchého ledu

Ponecháme-li suchý led při atmosferických podmínkách, můžeme po krátké době sledovat viditelné změny. Na povrchu pelet suchého ledu dochází ke změně struktury, změně barvy a úbytku hmoty. Tyto pochody můžeme nazvat degradací suchého ledu, která je způsobena sublimací CO_2 při atmosferických podmínkách.

Čerstvý suchý led se vyznačuje hladkým povrchem a mléčně bílým zabarvením. U staršího suchého ledu, můžeme pozorovat, že povrch hrubne a vytváří se na něm malé trhliny, prostupující směrem do objemu. Dochází i ke změně barvy suchého ledu, která se mění z bílé na průhlednou. Mimo vizuálních



Obrázek 10: Srovnání a) nového suchého ledu a b) starého suchého ledu
[vlastní zdroj]

změn můžeme u starého ledu pozorovat i první mechanické změny. Pokusíme-li se starý suchý led rozdrtit v dlani, bez větších problémů jej rozdrtíme na sníh. V případě čerstvého ledu se to nepodaří.

Z průmyslové praxe je potvrzeno, že při tryskání povrchu za použití staršího suchého ledu, který je po určitou dobu skladován, je třeba použít větší množství suchého ledu ve srovnání s čerstvě vyrobeným suchým ledem. Na základě tohoto tvrzení můžeme říci, že stáří pelet přímo ovlivňuje účinnost tryskání.

I přes to je degradace suchého ledu stále nepopsaná kapitola tohoto odvětví a poskytuje tak prostor pro optimalizaci procesu tryskání suchým ledem.

3 Praktická část

V praktické části práce budou představeny jednotlivé experimenty, které byly se suchým ledem provedeny a budou vyhodnoceny jejich výsledky.

3.1 Sledování úbytku hmotnosti suchého ledu

Jak bylo uvedeno v kapitole 2.3.1 *Mechanismus tryskání suchým ledem*, jedním ze základních parametrů, které mají vliv na účinnost tryskání, je kinetická energie suchého ledu. Dle známého vztahu pro kinetickou energii

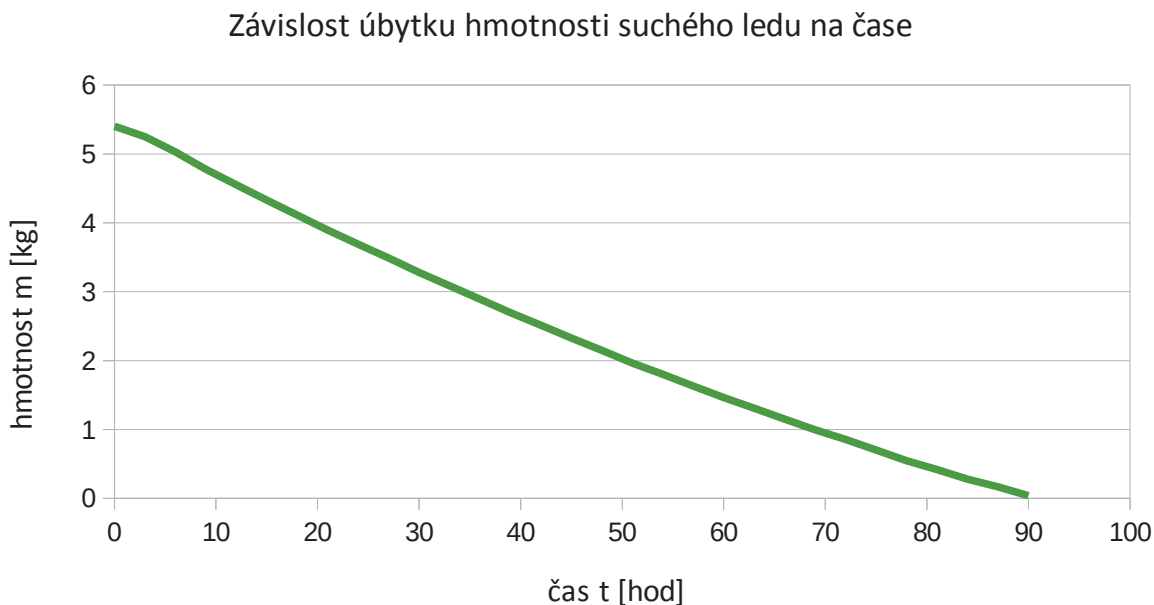
$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (1)$$

je zřejmé, že závisí především na rychlosti a hmotnosti částice, v našem případě pelety suchého ledu. Protože rychlost proudu vzduchu, který peletu unáší je stále stejná, závisí energie na hmotnosti samotné pelety. Vlivem sublimace však dochází k úbytku hmotnosti.

Proto v následující části bude zkoumána závislost úbytku hmotnosti na čase. Tato závislost bude pozorována na vzorku 5 kg pelet suchého ledu o průměru 3 mm, které se běžně pro tryskání využívají. Pelety budou uloženy v polystyrenovém přepravním boxu o tloušťce stěny 35 mm, který bude ponechán v místnosti o pokojové teplotě 21 °C. Hmotnost takto uloženého suchého ledu bude zaznamenána každé tři hodiny. Ze získaných hodnot bude sestavena daná závislost úbytku hmotnosti.

Kompletní změřená data jsou uvedena v příloze 1. Z nich byl vytvořen graf 2, na kterém je zobrazen úbytek suchého ledu v horizontu 90 hodin. Pokles hmotnosti suchého ledu je poměrně rovnoměrný a průměrně za každé 3 hodiny ubylo 178 g suchého ledu.

Po 80 hodinách už byl v boxu spíše roztátý led než led suchý. Led mohl vzniknout ze vzdušné vlhkosti, která byla přítomností suchého ledu ochlazená. V praxi tedy znamená úbytek hmotnosti i snížení kinetické energie dopadajících pelet suchého ledu.

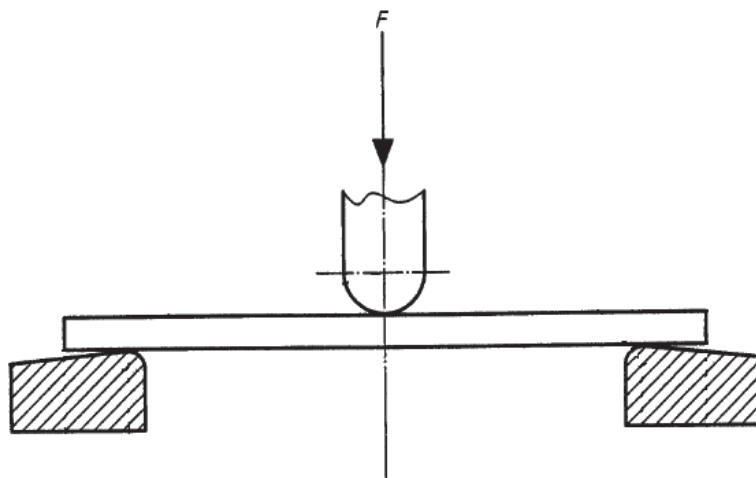


Graf 2: Úbytek hmotnosti suchého ledu v závislosti na čase

3.2 Experiment lámání suchého ledu

V současné době nejsou pro suchý led vytvořeny normované zkoušky, které by posoudily jeho mechanické vlastnosti, kvalitu nebo aktuální stav. Cílem tohoto experimentu je porovnání doby, za kterou dojde k přelomení pelety suchého ledu při působení konstantní síly.

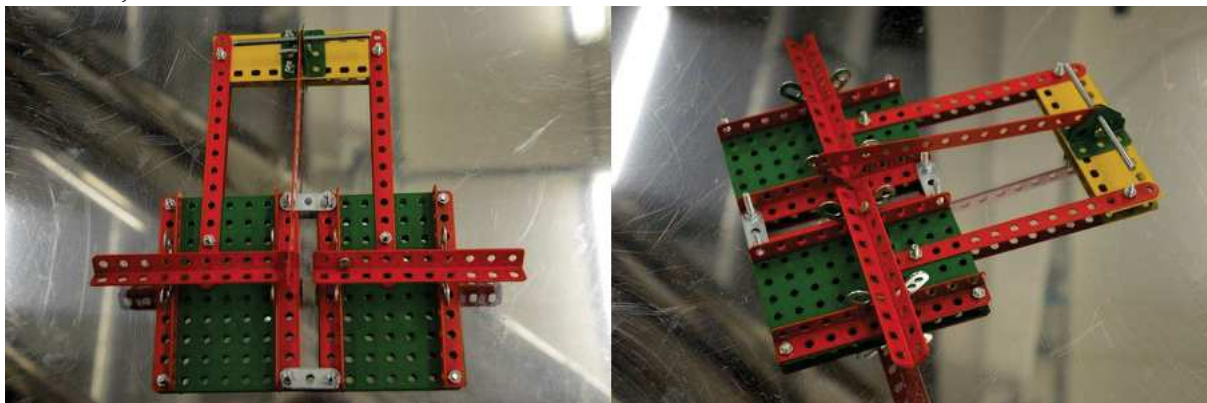
Jak bylo uvedeno v kapitole o suchém ledu, svojí hustotou je podobný PVC. Proto byl tento experiment vytvořen na základě normy ČSN EN ISO 178: Plasty



Obrázek 11: Schéma zatěžování při tříbodovém ohybu [22]

stanovení ohybových vlastností (2011). Jak je z názvu patrné, norma slouží k určení ohybových vlastností jako je pevnost v ohybu, modul pružnosti v ohybu apod. Princip zkoušky spočívá v zatěžování zkušební tělesa volně podepřeného dvěma podpěrami přitlačným trnem uprostřed rozpětí podpěr konstantní silou. Těleso je tak namáháno tříbodovým ohybem. [22]

Protože zkouška je určena pro několikanásobně větší zkušební tělesa byla přizpůsobena pro potřeby suchého ledu. Zkušebními tělesy byly přímo pelety suchého ledu o průměru 3 mm, které byly zatěžovány na mechanismu sestaveném ze stavebnice Merkur. Hlavními funkčními částmi mechanismu jsou dvě pevné podpěry a zatěžující rameno.



Obrázek 12: Lámací mechanismus ze stavebnice Merkur [vlastní zdroj]

Aby nedocházelo k velkému zkreslení výsledků, musela být manipulace se suchým ledem poměrně rychlá. Z tohoto důvodu nebyly pelety volně podepřeny, jak je uvedeno v normě ČSN EN ISO 178 [22]. Pro rychlejší a přesnější uložení pelety byly využity podpěry ve tvaru V, které tvořily krajní podpěry. Jako přitlačný trn bylo použito rameno na páce, které působilo jen svojí vlastní tíhou.

Během experimentu docházelo spíše k překrojení pelet zatěžujícím ramenem, než k jejich přelomení. Proto byl měřen čas od zatížení pelety ramenem až do jejího úplného rozdělení. Pro měření bylo použito 25 vzorků pelet starých 3 hodiny od výroby, dále označovány jako nové pelety, a 25 pelet starých 24 hodin. V první části měření byly pelety zatěžovány ramenem o pokojové teplotě, v druhém případě bylo rameno spolu s podpěrami chlazeno v boxu se suchým ledem.

3.2.1 Vyhodnocení výsledků

Z naměřených dat, která jsou uvedena v příloze 2, byl dle vztahu (2) získán aritmetický průměr [11]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

kde n je rozsah statistického souboru, x_i je pozorovaná hodnota souboru (v našem

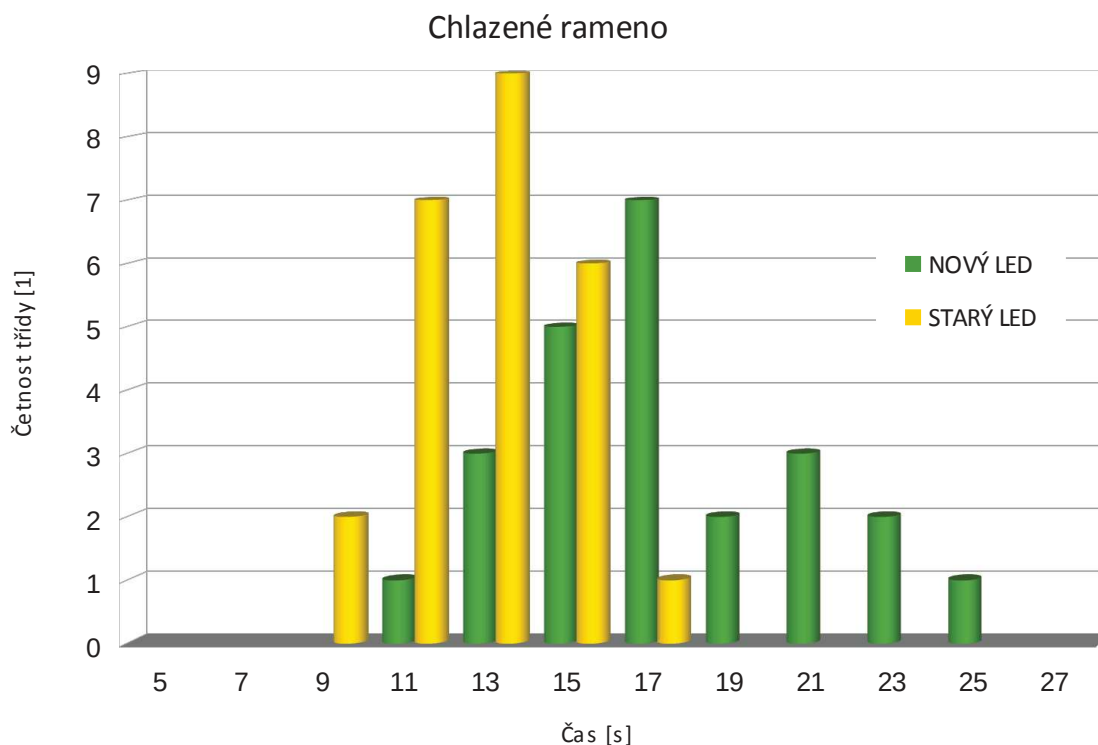
případě čas do lomu).

Získané hodnoty jsou uvedeny pro zkoušené případy v tabulce 1. Z výsledků je patrné, že v případě s ramenem o pokojové teplotě je rozdíl v průměrech pouze 0,5 s. Naopak pro chlazené rameno je rozdíl 5,5 s. Už z tohoto výsledku je možné usuzovat, že změna struktury během sublimace suchého ledu má vliv na jeho pevnostní vlastnosti.

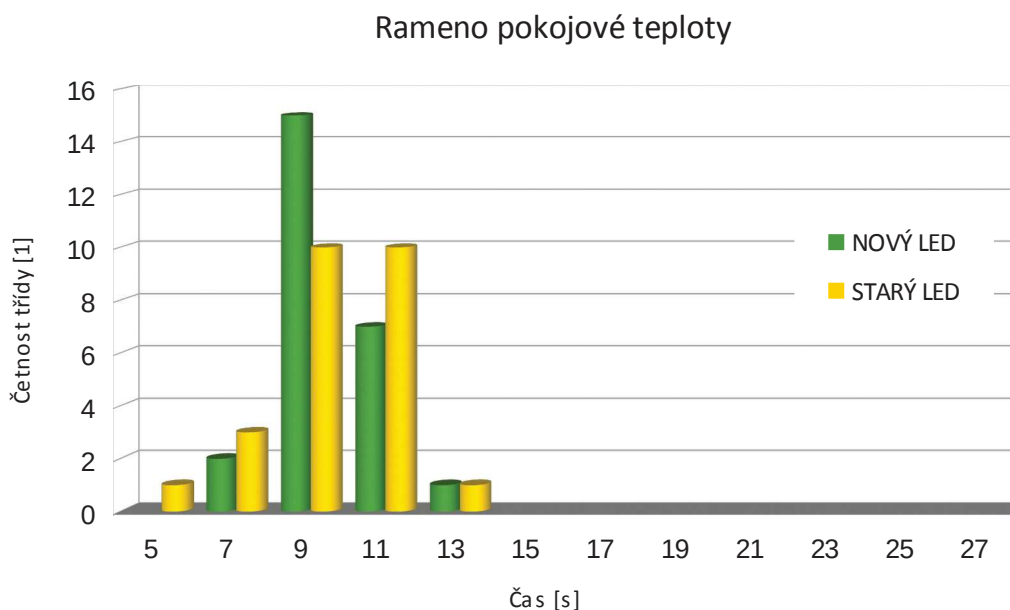
Tabulka 1: Průměrné časy do zlomení pelety

rameno	NOVÝ LED		STARÝ LED	
	chlazené	pokojevé	chlazené	pokojevé
průměr [s]	17,5	9	12	8,5

Dále byl soubor získaných hodnot roztríděn do tříd a na základě těchto dat byly vytvořeny histogramy pro dané podmínky měření. Graf 3 byl vytvořen pro chlazené rameno a je z něj patrné, že nejčetnější hodnota pro starý led spadá do třídy 13. Podle očekávání se pro nový led celý histogram posouvá více doprava do oblasti s vyššími časy a nejčetnější hodnota je dosažena pro třídu 17 s. Z grafu 4 je patrné, že rozdíly mezi starým a novým ledem při zkoušení ramenem pokojové teploty, nejsou tak výrazné jako v případě chlazeného ramene. Z tohoto výsledku je možné usuzovat, že suchý led je citlivější na teplotu nástrojů, které používáme pro manipulaci s ním.



Graf 3: Histogram pro chlazené zatěžující rameno



Graf 4: Histogram pro zatěžující rameno pokojové teploty

3.3 Snímání suchého ledu pomocí počítačové tomografie

Pro bližší prozkoumání struktury suchého ledu byla využita počítačová tomografie. Princip počítačové tomografie spočívá v měření absorpce svazku rentgenového záření ve snímaném objemu, které je následně výpočetně zpracováno. [27] Ke snímání byl použit přístroj GE phoenix v|tome|x L240 v laboratoři počítačové tomografie CEITEC. Jedná se o všestranný CT systém s vysokým rozlišením a mikroohnskem pro 3D a 2D počítačovou tomografii a 2D nedestruktivní rentgenovou kontrolou. [28] Cílem bylo stanovit, zda je tato technologie využitelná pro snímání suchého ledu.



Obrázek 13: Zařízení GE phoenix v|tome|x L240 [34]

Při CT snímkování nesmí docházet k žádným změnám v objemu sledovaného objektu, což vede k několika problémům, které bylo třeba před samotným snímkováním vyřešit. Aby byla změna objemu během sublimace suchého ledu co nejmenší, byla použita izolace ve formě polystyrenového bloku. Dalším opatřením bylo použití pelet o průměru 10 mm, u kterých se předpokládala delší výdrž.

Do polystyrenového bloku o rozměrech 10×10×15 cm byla odporovým drátem vytvořen otvor o průměru 10 mm. Blok byl před samotným snímkováním chlazen v boxu se suchým ledem po dobu 4 hodin. Po této době bylo uvnitř bloku dosaženo teploty -45 °C.

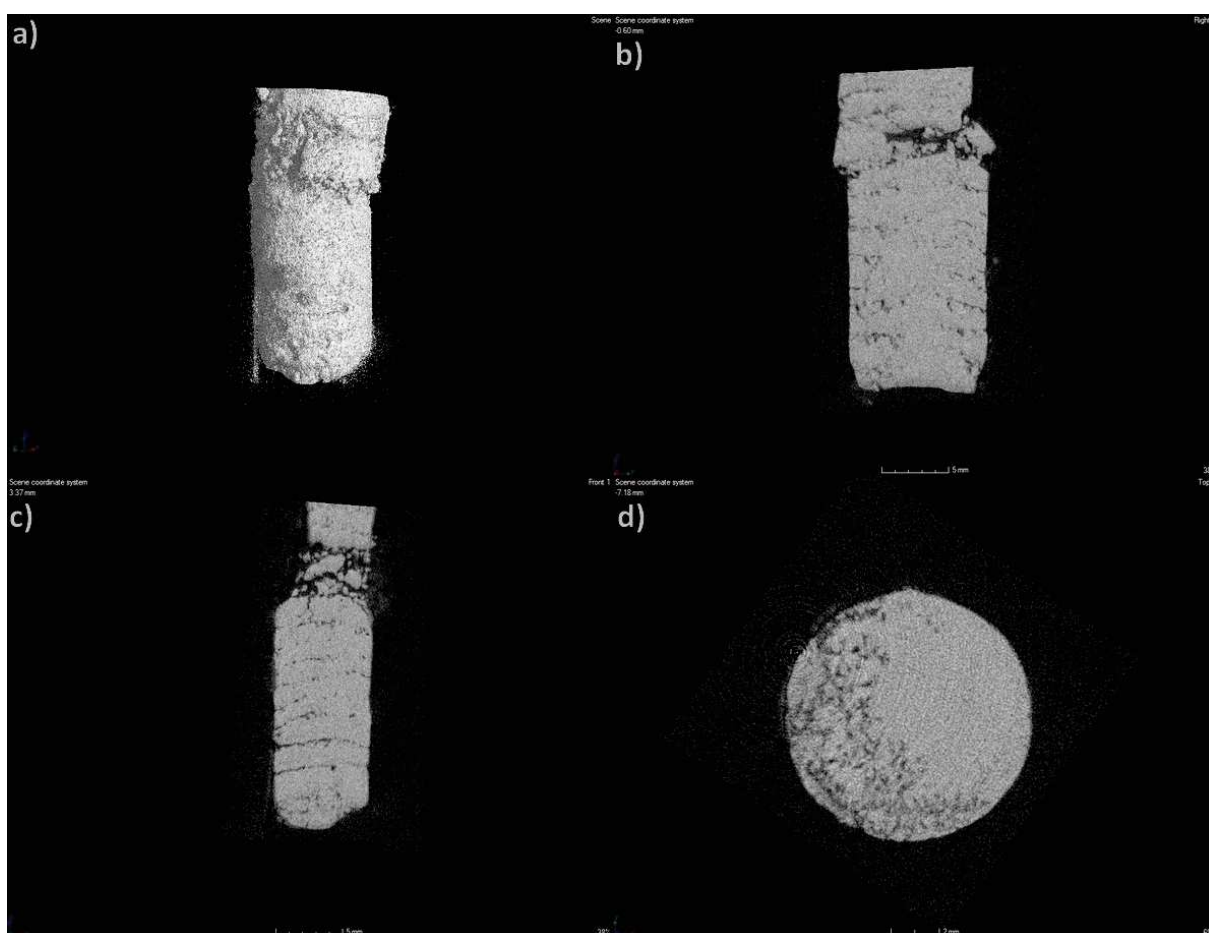


Obrázek 14: Izolační polystyrenový blok [vlastní zdroj]

Pro snímkování byly do bloku vloženy tři pelety. Snímána byla pouze střední peleta, okolní dvě sloužily pro její chlazení, aby bylo co nejvíce zabráněno sublimaci. I přes všechna opatření byl čas snímání snížen na minimum 12 minut.

Výsledkem tohoto experimentu je 3D snímek pelety suchého ledu a další zobrazení ve třech osách. Na 3D snímku na obrázku 13a je patrné, že i přes všechna opatření došlo během snímání k sublimaci suchého ledu, změně objemu a tím posunutí pelety v izolačním bloku. Při pohledu ve směru osy x a y (obrázek 13b a 13c) jsou viditelné tmavé pruhy, které indikují vyšší pórovitost. Jelikož se jedná o pravidelné vrstvy, můžeme usuzovat, že se jedná o pórovitost vznikající během výroby suchého ledu vlivem přechování sněhu oxidu uhličitého. Snímek ve směru osy z (obrázek 13d), tedy při pohledu na peletu shora, byl pořízen pro vzdálenost 3 mm

od dolního konce pelety. Je zde viditelná vyšší koncentrace pórů než v případě střední třetiny objemu. Protože dolní a horní konec nedoléhaly přesně na okolní pelety, byl zde přítomen teplejší vzduch. Z toho můžeme usuzovat, že k sublimaci suchého ledu dochází z povrchu, který je vystaven působení okolního prostředí. Na snímku ve směru osy z jsou patrné kruhové trajektorie, které vznikly během snímání v CT přístroji. Jejich vysoká viditelnost a koncentrace je způsobena rychlým snímáním za krátký časový interval. Pro kvalitnější snímky a tím i přesnější výsledky by bylo nutné prodloužit výdrž pelety suchého ledu alespoň na 1 hodinu, což při použití polystyrenové izolace není možné. Pro lepší výsledky by bylo třeba zajistit externí chlazení pelety suchého ledu, aby její změna v průběhu snímání byla minimální.



Obrázek 15: Snímek pelety suchého ledu a) 3D, b) ve směru osy x, c) ve směru osy y a d) ve směru osy z

4 Závěr

Tryskání suchým ledem je stále se rozvíjející technologie. Její hlavní uplatnění spočívá v odstraňování nežádoucích látek a přípravě povrchů. Pro průmyslové čištění má tryskání několik zásadních výhod, a to že nenarušuje provoz a po tryskání není třeba odstraňovat pozůstatky po čisticím prostředku jako je tomu u současně používaných metod. Jako čisticí přípravek je použit suchý led, tedy pevný oxid uhličitý o teplotě $-78,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Čisticí mechanismus tryskání je založen na termálním a mechanickém působení na ošetřovaný povrch. Termální efekt je způsoben lokálním podchlazením nánosu materiálu, čímž dochází k jeho křehnutí. Mechanický efekt je vyvolán přeměnou kinetické energie při dopadu pelety suchého ledu, expanzí suchého ledu a tahem, který způsobuje stlačený proud vzduchu unášející pelety. Po překonání příslušné síly mezi základním materiálem a nežádoucí vrstvou, dojde k jejímu odloupení.

Nejširší využití nachází tryskání suchým ledem při čištění jednotlivých součástí, forem, klimatizací, vzduchotechniky nebo odtahů. Odstraňované vrstvy mohou být barevné nátěry, silikonová těsnění, oleje, maziva a látky vznikající během provozu stroje nebo jeho součástí.

Tryskání suchým ledem je používáno také jako operace přípravy povrchu před další úpravou materiálů. Při plasmovém nástřiku povlaků se tryskání suchým ledem využívá pro chlazení základního materiálu, na který bude nanášen povlakovací materiál. Dochází také k očištění základního materiálu. Výsledkem při použití tryskání suchým ledem jsou povlaky vysoké kvality s malým počtem vměstků a vysokou přilnavostí. Ke zvýšení přilnavosti dochází také v případě lepených spojů, kde je základní materiál nejdříve zbaven nečistot právě tryskáním.

Degradace suchého ledu je proces, kdy dochází ke změně jeho vlastností, a to zejména mechanických vlastností. V případě použití zestárých pelet pro tryskání suchým ledem je třeba většího množství pro odstranění nežádoucí vrstvy. Vlivem sublimace dochází k úbytku hmotnosti suchého ledu, která má zásadní vliv na kinetickou energii pelet. V případě uchovávání suchého ledu v polystyrenovém boxu dochází k poměrně rovnoměrnému úbytku hmoty vlivem sublimace. Dalším důsledkem sublimace je vznik malých trhlin, kvůli kterým dochází ke křehnutí suchého ledu. V případě pelet, které jsou dopravovány do čisticí trysky, je větší pravděpodobnost, že dojde k jejich zničení. Na výstupu z trysky je pak pouze sníh oxidu uhličitého, který nemá žádný čisticí účinek.

Při zkoušce tříbodovým ohybem byl potvrzen předpoklad o změně

mechanických vlastností. Starý led vykazoval menší výdrž při zatěžování, proto můžeme říci, že dochází k poklesu jeho pevnosti, tedy ke křehnutí či slábnutí. Jak bylo zmíněno, stav suchého ledu je jeden z parametrů, na kterých závisí kvalita tryskacího procesu. Proto je možné usuzovat, že se stářím suchého ledu, klesá efektivita čištění. Při manipulaci se suchým ledem během experimentu se projevila citlivost suchého ledu na předměty pokojových teplot. Při kontaktu s takovými předměty dochází k rychlejší sublimaci ledu. Chceme-li tedy zachovat původní stav suchého ledu i po manipulaci s ním, je důležité používat chlazené nástroje.

Pro bližší zkoumání degradace suchého ledu je do budoucna možné využít počítačovou tomografii, která vytvoří kompletní obraz suchého ledu včetně jeho pórovitosti a vměstků. Nicméně pro kvalitní snímky a jejich analýzu je třeba zajistit chlazení suchého ledu, aby nedocházelo k jejich degradaci během samotného snímání. Na základě těchto snímků by bylo v budoucnu možné stanovit podíl pórů a pevné fáze CO₂ ve zkoumaném objemu.

Tryskání suchým ledem je tedy efektivní a ekologická metoda čištění v průmyslu. Stále však vyvstává mnoho neznámých, které poskytují prostor pro studium celého procesu tryskání a degradace suchého ledu.

5 Seznam použitých zdrojů

- [1] BÄCKTRÖM, M. *Technika chlazení: určeno inž. Technikům, mistrům a montérům v chladírenství a stud. prům. a vys. škol.* Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1959.
- [2] BAIRA, E.M., KRETZSCHMAR, M., HOLLAN, R., HEITMÜLLER, F., UHLMANN, E.: Dry ice blasting as a pre-treatment process for electroplating. In *Advanced Materials Research*, Vol. 1018, pp 123-130, 2014. ISSN 1662-8985.
- [3] DONG, S., SONG, B., HANSZ, B., LIAO, H., CODDET, C.: Improvement of adhesion of plasma-sprayed Al₂O₃ coatings by using dry-ice blasting. In *Materials Letters*, Vol. 66, pp 289-291, 2012. ISSN 0167-577X.
- [4] DONG, S., SONG, B., HANSZ, B., LIAO, H., CODDET, C.: Improvement in the microstructure and property of plasma sprayed metallic, alloy and ceramic coatings by pre-/during-treatment of dry-ice blasting. In *Surface & Coatings Technology*, Vol. 220, pp 199-203, 2013. ISSN 0257-8972.
- [5] DONG, S., SONG, B., ZHANG, X., DENG, C., FENINECHE, N., HANSZ, B., LIAO, H., CODDET, C.: Fabrication of FeSiB magnetic coatings with improved saturation magnetization by plasma spray and dry-ice blasting. In *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 584, pp 254-260, 2014. ISSN 0925-8388.
- [6] DONG, S., SONG, B., LIAO, H., CODDET, C.: Deposition of NiCrBSi coatings by atmospheric plasma spraying and dry-ice blasting: Microstructure and wear resistance. In *Surface & Coatings Technology*, Vol. 268, pp 36-45, 2015. ISSN 0257-8972.
- [7] ELBING, F., ANAGREH, N., DORN, L., UHLMANN, E.: Dry ice blasting as pretreatment of aluminum surface to improve the adhesive strength of aluminium bonding joints. In *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 23, pp 69-79, 2003. ISSN 0143-7496.
- [8] ILCHI-GHAZAANI, M., PARVIN, P.: Characterization of a dry ice heat exchanger. In *International Journal of Refrigeration*, Vol. 34, pp 1085-1097, 2011. ISSN 0140-7007.
- [9] ISHIZUKA, H., OYAMA, O., KITAGAWA, A.: Development of walking assist system with dry-ice power cell. *SICE Annual Conference 2011*, 2011.
- [10] JEAN, D.S., LEE, D.J., CHANG, C.Y.: Direct sludge freezing using dry ice. In *Advances in Environmental Research*, Vol. 5, pp 145-450, 2001. ISSN 0301-4797.

- [11] KARPÍŠEK, Z. *Matematika IV: Statika a pravděpodobnost*. Akademické nakladatelství Cerm, s.r.o. Brno, 2007. ISBN 978-80-214-3380-9.
- [12] KUMAR, P.G.S.: Dry ice cleaning to improvise dielectric features od high voltage windings in turbine generators, *IEEE 1st International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems*, 2013.
- [13] LIU, Y., MARUYAMA, H., MATSUSAKA, S.: Agglomeration process of dry ice particles produced by expanding liquid carbon dioxide. In *Advanced Powder Technology*, Vol. 21, pp 652-657, 2010. ISSN 0921-8831.
- [14] LIU, Y., HIRAMA, D., MATSUSAKA, S.: Particle removal process during application od impinging dry ice jet. In *Powder Technology*, Vol. 217, pp 607-613, 2012. ISSN 0032-5910.
- [15] MÁŠA, V., KUBA, P., PETRILÁK, D., LOKAJ, J.: Decrease in consumption of compressed air i dry ice blasting machine. In *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 39, 2014. ISSN 2283-9216.
- [16] PETEROVÁ, V.: CT – základy vyšetření, indikace, kontraindikace, možnosti, praktické zkušenosti. In *Medicína pro praxi*, Vol. 2, pp 90-94, 2010. ISSN 1803-5310.
- [17] SANMARTÍN, P., CAPPITELLI, F., MITCHELL, R.: Current methods of grafitti removal: A review. In *Construction and Building Materials*, Vol. 71, pp 363-374, 2014. ISSN 0950-0618.
- [18] SATHISH, M., MADHAN, B., SARAVANAN, P., RAO, J.R., NAIR, B.U.: Dry ice – an eco-friendly alternative for ammonium reduction in leather manufacturing. In *Journal of Cleaner Production*, Vol. 54, pp 289-295, 2013. ISSN 0959-6526.
- [19] SONG, B., DONG, S., CODDET, C., HANSZ, B., GROSDIDLER, T., LIAO, H., CODDET, P.: Oxidation control of atmospheric plasma sprayed FeAl intermetallic coatings using dry-ice blasting. In *Journal od Thermal Spray Technology*, Vol. 22, pp 345-351, 2013. ISSN 1059-9630.
- [20] SPUR, G., UHLMANN, E., ELBING, F.: Dry-ice blasting for cleaning: process, optimization and application. In *Wear*, Vol. 233-235, pp 402-411, 1999. ISSN 0043-1648.
- [21] STRATFORD, S.: Dry ice blasting for paint stripping and surface preparation. In *Metal Finishing*, Vol. 98, pp 496-499, 2000. ISSN 0026-0576.
- [22] ČSN EN ISO 178: Plasty – Stanovení ohybových vlastností. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. s. 24.
- [23] History of dry ice. [online]. Poslední úprava: 3.4.2013. [cit. 10.4.2015]. Dostupné na <<http://www.dryiceinfo.com/history.htm>>.

- [24] Suchý led. [online]. Zveřejněno: 2015. [cit. 13.4.2015]. Dostupné na <http://www.lindegas.cz/cs/produkty_and_zasobovani/suchy_led/index.html>
- [25] Hustota pevných látek. [online]. Zveřejněno: 2002. [cit. 13.4.2015]. Dostupné na <<http://www.converter.cz/tabulky/hustota-pevne.htm>>.
- [26] Bezpečnostní list CO₂. [online]. Poslední úprava: 8.3.2009. [cit. 17.5.2015]. Dostupné na <http://www.plynarna-pb.cz/bezp/oxid_uhlicity.pdf>.
- [27] Žárové stříkání. [online]. Zveřejněno: 2015. [cit. 11.5.2015]. Dostupné na <<http://www.plasmametal.cz/pouzite-technologie>>.
- [28] V|tome|x L240 Brochure. [online]. Zveřejněno: 2015. [cit. 20.5.2015]. Dostupné na <https://www.gemeasurement.com/sites/gemc.dev/files/vtomex_1_240_brochure_english.pdf>.
- [29] Dry ice products. [online]. Zveřejněno: 2010. [cit. 24.5.2015]. Dostupné na <<http://www.ates-a.com/en/?p=products>>.
- [30] Suchý led. [online]. Zveřejněno: 2012. [cit. 24.5.2015]. Dostupné na <<http://www.alkion.eu/cz/suchy-led.htm>>.
- [31] Coldjet products. [online]. Poslední úprava: 2015. [cit. 24.5.2015]. Dostupné na <<http://www.coldjet.com/en/products/product-catalog.php?id=13&type=machine>>
- [32] Čištění VZT a odtahů. [online]. Poslední úprava: 2015. [cit. 24.5.2015]. Dostupné na <<http://www.alkion.eu/cz/cisteni-vzt-a-odtahu/prumysl/odtahy.htm>>
- [33] Čištění grafitti. [online]. Zveřejněno: 2011. [cit. 24.5.2015]. Dostupné na <<http://www.elna-renovace.com/default.aspx?obsah=270>>.
- [34] Laboratoř počítačové tomografie. [online]. Zveřejněno: 2014. [cit. 24.5.2015]. Dostupné na <<http://www.ctlab.cz/vybaveni-laboratore/>>.

Přílohy

Příloha 1: Naměřená data při sledování úbytku hmotnosti suchého ledu

t [hod]	m [kg]	úbytek [kg]
0	5,400	
3	5,250	0,150
6	5,030	0,220
9	4,776	0,254
12	4,551	0,225
15	4,330	0,221
18	4,110	0,220
21	3,896	0,214
24	3,691	0,205
27	3,487	0,204
30	3,281	0,206
33	3,087	0,194
36	2,894	0,193
39	2,693	0,201
42	2,514	0,179
45	2,326	0,188
48	2,148	0,178
51	1,964	0,184
54	1,802	0,162
57	1,630	0,172
60	1,462	0,168
63	1,307	0,155
66	1,149	0,158
69	0,997	0,152
72	0,856	0,141
75	0,700	0,156
78	0,545	0,155
81	0,417	0,128
84	0,279	0,138
87	0,166	0,113
90	0,037	0,129

Příloha 2: Data získaná měřeními na lámacím mechanismu

NOVÝ LED		STARÝ LED	
chlazené	pokojevé	chlazené	pokojevé
čas [s]		čas [s]	
11	6	8	5
13	7	9	7
13	8	10	7
13	8	10	7
15	8	11	8
15	8	11	8
15	9	11	8
15	9	11	9
15	9	11	9
16	9	12	9
16	9	12	9
16	9	12	9
16	9	12	9
17	9	13	9
17	9	13	10
17	9	13	10
18	9	13	10
19	10	13	10
20	10	14	10
21	10	14	10
21	10	14	11
22	10	14	11
23	10	15	11
25	11	15	11
28	12	16	12