



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní



Studentská vědecká a odborná činnost 2017

Strojírenství

29. květen 2017

**Technická univerzita v Liberci
Univerzitní náměstí 1410/1
budova G,
461 17 Liberec**



Recenzent: Klára Antlová

Editor: Tereza Semerádová

© Technická univerzita v Liberci – 2017

ISBN 978-80-7494-336-2

Obsah

STROJÍRENSTVÍ – bakalářský studijní program

František MANLIG

Úspora prostoru na výrobní hale	7
---------------------------------	---

Jiří RÁGULÍK

Aktivně řízená pneumatická pružina	16
------------------------------------	----

Jiří SOUČEK

Zvláknovací elektroda pro výrobu směsného nanovláknenného materiálu	26
---	----

STROJÍRENSTVÍ – navazující a doktorský studijní program

Petr ČEČÁK

Optimalizace vztahu údržby, kvality a výroba v organizaci	36
---	----

Jiří ČECH

Inovace zařízení pro aplikaci pěnového těsnění	46
--	----

Matěj FILIP

Zařízení k odstraňování sirných sloučenin z odpadního vzduchu	56
---	----

Václav JIŘÍČEK

Diagnostika kavitace ve vodním čerpadle	66
---	----

David KLIMENTA

Inovace separátoru kovových částic pro plastikářské provozy	73
---	----

Tomáš KOŘÍNEK

Snižování CO ₂ z vnitřních prostor	83
---	----

Petr KULHAVÝ

Využití hyperelastického elementu při výrobě tvarovaných šablon vysocestrukturovaných kompozitních plátů	91
--	----

Radek LAZÁK

Inovace mobilní povodňové zábrany	101
-----------------------------------	-----

Václav MÁLEK

Tribologické vlastnosti a abrazní odolnost karbidu wolframu a titanu	111
--	-----

Ondřej MATÚŠEK

Detekce zdeformované části plaveného skla pomocí laserového paprsku	118
---	-----

Roman RYBÁČEK

Projekční návrh spalovacího motoru pro hybridní vozidlo	125
---	-----

Tomáš TISOVSKÝ

Numerický model mikropumpy	135
----------------------------	-----

STROJÍRENSTVÍ

bakalářský studijní program

ÚSPORA PROSTORU NA VÝROBNÍ HALE

Manlig František

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,

Fakulta strojní, 3. ročník

Bakalářský studijní program – STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

Abstrakt: Téma této práce vzniklo ve spolupráci s firmou ABB, Jablonec nad Nisou. Na montážní hale M1 plánují navýšit výrobu a proto potřebují uvolnit prostor. Podstatné je i to, že se zde nachází nízkoobrátkové zboží, což vyžaduje nízké náklady na realizaci. Cílem práce proto bylo uspořít prostor na montážní hale M1 s co nejnižšími náklady na realizaci.

Je zde stručně uveden postup řešení. Při řešení byly použity postupy zlepšování procesů. Nejprve bylo vyhodnoceno nejvhodnější výrobní pracoviště pro optimalizaci, kterým je výrobní linka Perilex. Následně je popsána analýza současného stavu, která byla zaměřena celostně jak na výrobní část (chod linky), tak i na linky. Poté jsou uvedeny optimalizační kroky, obsahující například odstranění některých částí linky, vhodnější uspořádání či jinou organizaci pracovišť.

Výsledným optimalizačním návrhem bylo ušetřeno 20m², což z celkových 66m² tvoří 30% úsporu prostoru. Na závěr je provedeno vyhodnocení práce a další její přínosy.

Klíčová slova: projektování výrobního systému, úspora prostoru, zlepšování procesů, výrobní linka

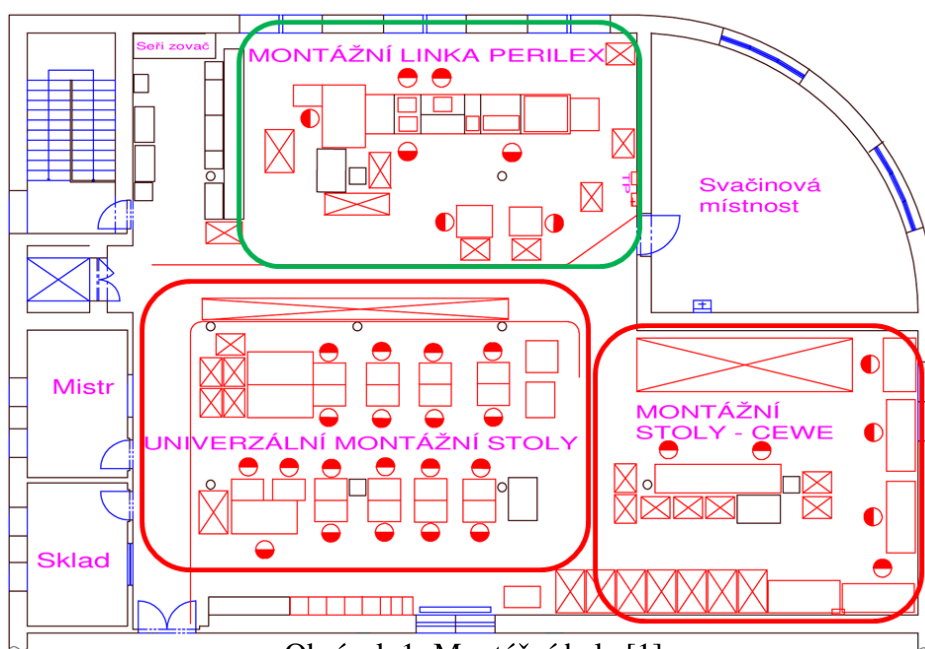
1 Úvod

Optimalizace výrobních procesů patří k základním dovednostem, chce-li firma hrát zásadní roli na dnešním konkurenčním poli. Jednou z optimalizačních variant je úspora prostoru. Úspora prostoru obnáší pro firmu velký přínos, neboť na volný prostor se může navrhout nová výroba, čímž se skutečná návratnost budov výrazně zvýší. Z důvodu ušetřeného prostoru není třeba nových staveb, tedy nových velkých finančních investic, které mohou jít do vývoje. Práce popisuje optimalizaci linky Perilex ve firmě ABB Jablonec n. N. Hlavním cílem optimalizace byla úspora místa z důvodu navýšení výroby. Proto byly využity i některé z metod zlepšování procesů, jako například 5S, SMED, projektování buněk. Více v odborné literatuře například [2,3,4,5,6,7,8].

2 Analýza montážní haly

Na montážní halu, viz obrázek 1, přicházejí produkty, které nespádají do hromadné výroby a mají klesající charakter produkce. Z důvodu vyžadované vysoké flexibility výroby, se většina výroby ve firmě transformuje na využití univerzálních montážních stolů. Univerzální montážní stoly jsou ideálním řešením flexibilní výroby, proto je snaha veškerou novou výrobu upravit technologicky do té podoby, aby tyto stoly bylo možné využít.

Při analýze využití jednotlivých montážních bloků, viz tabulka 1, bylo zjištěno u montážní linky Perilex třetinové využití montážního bloku v porovnání s dalšími montážními bloky. Montážní stoly CEWE obsahují málo flexibilní zařízení, výrobní množství je zde však relativně velké. Montážní linka Perilex byla navrhována kolem roku 1975 na hromadnou výrobu. Linka zároveň neprošla žádnou optimalizací, proto je zvolena pro další optimalizaci.



Obrázek 1: Montážní hala [1]

Tabulka 1: Vytížení montážních bloků na montážní hale

	Operátorů průměrně	Max. operátorů	Vytížení
Univerzální montážní stoly	5	19	26%
Montážní stoly CEWE	2	6	33%
Montážní linka Perilex	0,64	7	9%

3 Analýza montážní linky Perilex

3.1 Výrobní mix

Na montážní lince se vyrábí 5 druhů produktů viz tabulka 2. Tabulka také zobrazuje všech 8 operací – dvě přípravné (P1 a P2), pět hlavních (1,2,3,4,5) a finální balení (6). Dále tabulka zobrazuje zatížení jednotlivých operací.

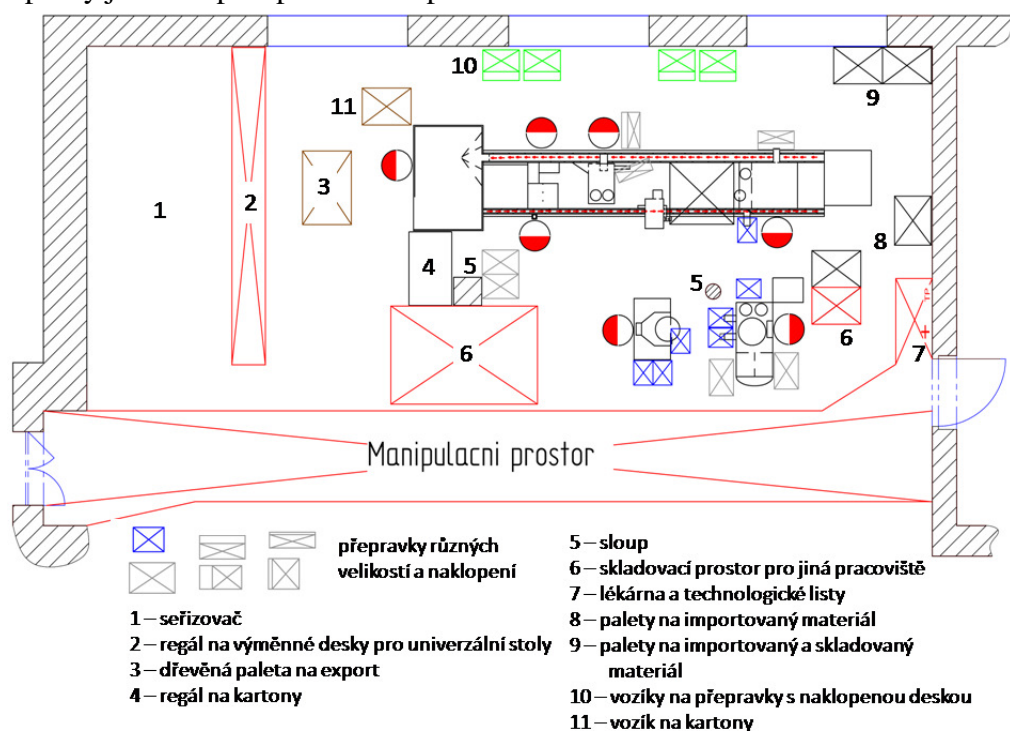
Tabulka 2: Výrobní mix

Operace	Typ dílu ->	0045	0098	0113	0192	0921	Nh/rok
P1-kontakty	pořadí operace	P	P	P	P	P	187
(1kks celkového produktu)	Nh/1000ks	1,802	1,802	1,802	1,802	1,802	Nh/rok
P2-dutinky	pořadí operace	P	P	P	P	P	178
	Nh/1000ks	1,715	1,715	1,715	1,715	1,715	Nh/rok
1-dutinky do spodku	pořadí operace	1.	1.	1.	1.	1.	496
	Nh/1000ks	4,195	4,195	4,195	4,195	5,201	Nh/rok
2-ucpávky (balící stůl)	pořadí operace		2.		5.		
	Nh/1000ks		3,674		2,815		16 Nh/rok
3-třmeny	pořadí operace			2.	2.		
	Nh/1000ks			2,094	1,974		56 Nh/rok
4-víko, kryt, mezivložky	pořadí operace	2.v	3.m	3.v	3.k		164
	Nh/1000ks	3,514	7,472	3,514	4,012		Nh/rok
5-sklopná víka	pořadí operace		4.		4.		
	Nh/1000ks		3,751		3,504		17 Nh/rok
6-balení	pořadí operace	3.	5.	4.	6.	2.	136
	Nh/1000ks	2,177	2,177	2,177	3,027	0,682	Nh/rok
Počet ks/rok		1300		2540		6060	
		0	3200	0	1390	0	

Z tabulky je vidět, že operace 2, 3 a 5 jsou velmi nevyužitá, proto je zde snaha tyto operace maximálně zjednodušit.

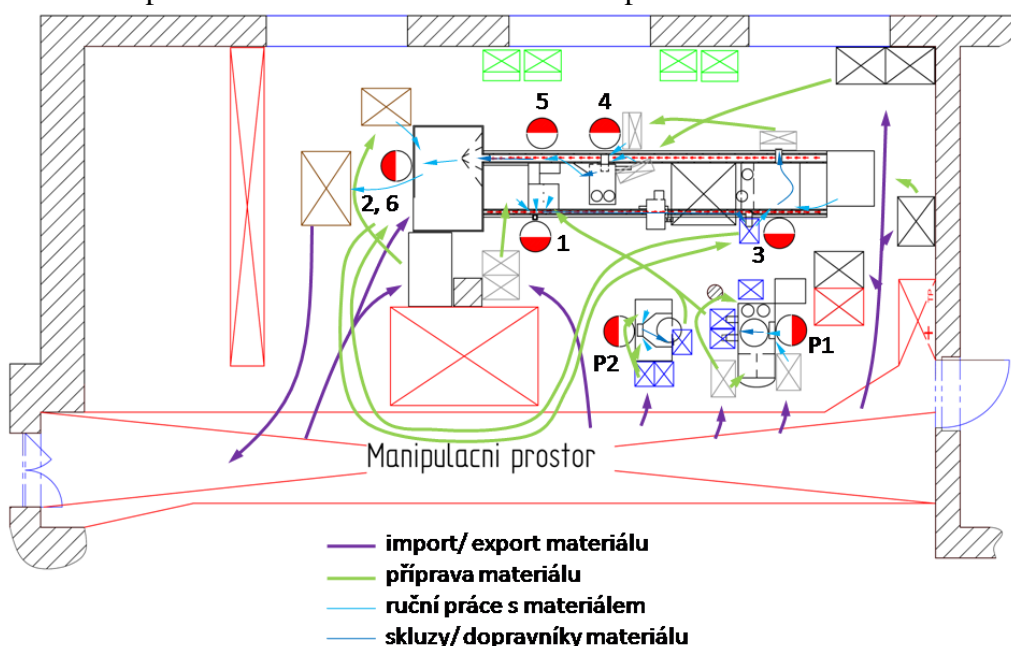
3.2 Analýza linky

Následující obrázek 2 znázorňuje prvky, které se nacházejí v prostoru linky Perilex. Nejen s těmito prvky je nutné při optimalizaci pracovat.



Obrázek 2: Montážní linka Perilex – rozbor prvků

Analýzu toků materiálu zobrazuje obrázek 3. Zásadní je především import a export materiálu, který nám zásadně omezuje možnosti uspořádání. Přípravné toky materiálu ukazují, který materiál a odkud je nutné dopravit. Je proto nutné brát při návrhu v potaz normu minimální šířky uličky, která zde je 0,6m viz [9]. Na obrázku jsou označeny dvě přípravné operace P1 a P2, pět hlavních operací 1-5 a finální balení označené operací č. 6.

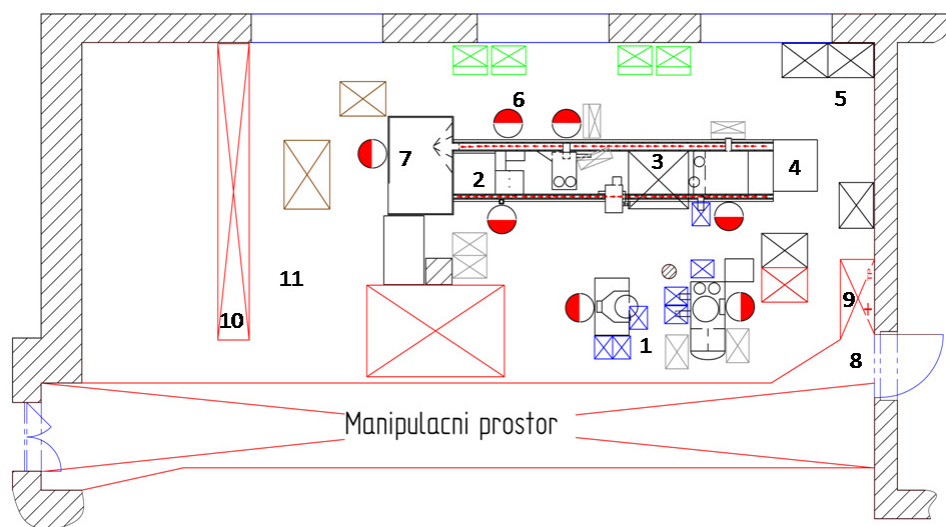


Obrázek 3: Montážní linka Perilex – tok materiálu

Pro další optimalizaci je důležité, že na pracovišti pracuje pouze jeden operátor.

4 Optimalizační návrhy

Uspořádání jednotlivých pracovišť jsou znázorněny na předchozím obrázku č. 3. Na následujícím obrázku č. 4 jsou znázorněny části, které optimalizace nejvíce zasáhla.



Obrázek 4: Montážní linka Perilex – optimalizační kroky

Přípravné operace, viz pozice č. 1, je možné vhodněji natočit tak, aby prostor operátora byl shodný. Na pozici č. 2 je skladovací prostor pro operaci č. 1. Bylo navrženo skladovací prostor odstranit a potřebné díly umístit na nakloněný pojízdný vozík. U operace č. 2 byla změněna technologie výroby. Ucpávky se již nenahřívají a proto je možné nahřívací komoru, která je na pozici č. 3, odebrat. Na pozici č. 4 je zvedák, který slouží ke zvedání těžkých třmenů. Jelikož se však třeny přesypávají do kovové bedny, je již snazší přepravku zvednout o ca 15cm výš a snadno vyklopit na stůl. Bylo proto navrhováno odstranění zvedáku. Na pozici č. 5 se nachází paleta se skladovacím materiálem. K tomuto skladovacímu prostoru je však velmi problémová cesta, neboť se musí vždy nejdříve odklidit. Což je nutné zohlednit při novém návrhu uspořádání linky. Také se zde nachází jedna paleta, která slouží pro uskladnění zbytkových kusů, které se v případě potřeby využívají. K této jedné paletě není potřebný přístup s paletovým vozíkem. Na pozici č. 6 je operace 5, která má vytížení pouhých 17h/rok. Tato operace obsahuje lehký pneumatický lisovací přípravek. Bylo navrženo umístit tuto operaci na technologickou desku, kterou je možné uložit v nepotřebný čas do regálu, který je vyčleněn pouze technologickým deskám. Na pozici č. 7 se nachází operace č. 2 a balení označené operací č. 6. Tyto dvě operace potřebují relativně málo prostoru. Většina prostoru je využita ke skladování dílů, což je způsobeno koncepcí aktuálního uspořádání a chodu samotné linky.

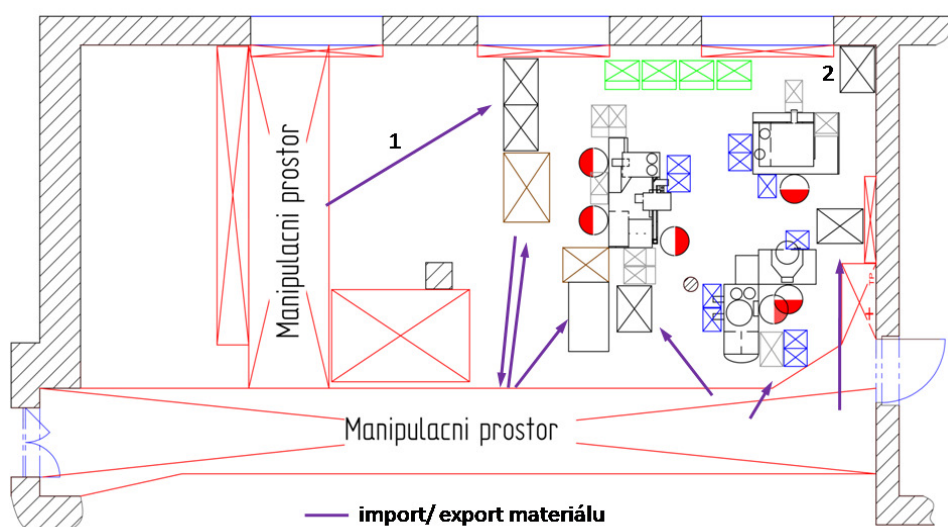
Při návrhu nového uspořádání je nutné vzít do úvahy několik faktů. Na pozici č. 8 jsou dveře do svačinové místnosti, zde je proto nutný zcela volný přístup. Navíc se u dveří nachází lékárna a technická dokumentace, viz pozice č. 9. Na pozici č. 10 se nachází regál s technologickými výměnnými deskami, které mají přístup z pravé strany označené pozicí č. 11. Za současné situace není přístupová cesta volná. Bylo by však vhodné navrhovat nové uspořádání tak, aby volný prostor vznikl u tohoto manipulačního prostoru, čímž se zároveň uvolní a v případě nedostatku místa umožní drobné využití i tohoto manipulačního prostoru.

5 Návrh uspořádání

5.1 Návrh nového uspořádání

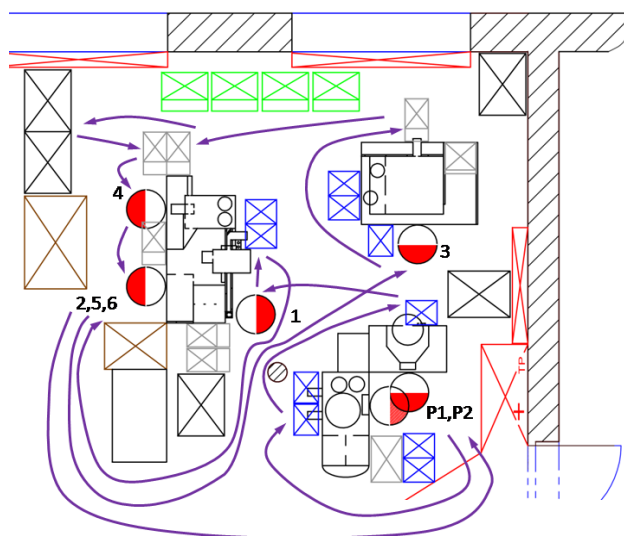
Při navrhování byla snaha řídit se pravidly pro projektování výrobních buněk, viz literatura [6, 7]. V tomto případě však výrobní linka je již vyrobena a výroba má upadající charakter, proto nejsou vhodné investice. Proto budeme při návrhu preferovat uspořádaný prostor před dodržením pravidel projektování výrobních buněk.

Následující obrázek 5 znázorňuje nové uspořádání linky. Dále zobrazuje import a export materiálu, kdy na pozici č. 1 je znázorněn import materiálu, se kterým je nutné počítat při návrhu nové výroby. Na pozici č. 2 se nachází paleta, která je určená pro drobný zbytkový materiál, který je dle potřeby využít. Není proto nutný přístup s paletovým vozíkem.



Obrázek 5: Návrh nové linky – import/export

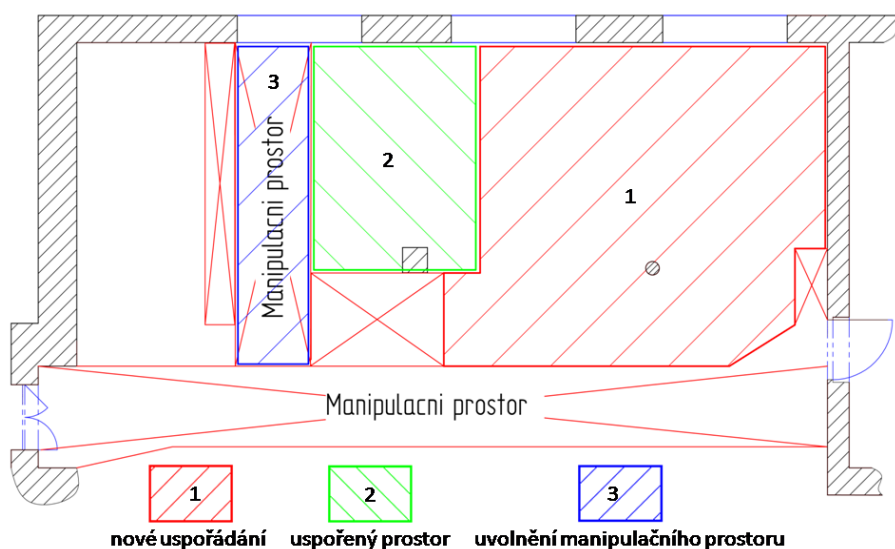
Následující obrázek č. 6 zobrazuje rozmístění jednotlivých operací. U přípravných operací P1 a P2 byl sjednocen prostor operátora. Operace 2, 5, 6 byly sjednoceny a vzniklý prostor je dle potřeby použit jako montážní či skladovací prostor, kde se v případě potřeby operace 5 vymění technologická deska s montážním přípravkem. Vše bylo uspořádáno tak, aby se minimalizovaly veškeré volné plochy, zároveň v manipulačních uličkách byla dodržena minimální šířka 0,6m, která odpovídá normě [9].



Obrázek 6: Návrh nové linky - operace

5.2 Hodnocení návrhu

Rozložení prostoru je na obrázku 7. Původní linka byla na prostoru označené pozicí č. 1 a 2, zároveň však zasahovala i do manipulačního prostoru označené pozicí č. 3. Návrhem se podařilo uvolnit kompletně manipulační prostor, viz pozice č. 3. Uvolněný prostor, viz pozice č. 2 je u tohoto manipulačního prostoru, což je výhoda pro plánování nové výroby, protože je možné manipulační prostor v případě potřeby částečně využít. Nové uspořádání se vešlo na plochu 38m^2 , což z původních 51m^2 činí 25%. Dle započítání manipulačního prostoru se můžeme dostat na úsporu až 34%, což znázorňuje tabulka č. 3.



Obrázek 7: Hodnocení úsporeného prostoru

Tabulka 3: Hodnocení uspořeného prostoru

původní bez manipulačního prostoru (1+2)	51 m ²
po optimalizaci (1)	38 m ²
manipulační prostor (3)	8 m ²
čistě uspořeno (bez manipulačního prostoru) (2)	13 m ²
uspořeno (+ uvolněn manipulační prostor) (2)	25 %
uspořeno (včetně manipulačního prostoru) (2+3)	34 %

Uspořená plocha se dle hodnocení pohybuje v rozmezí 25-34%.

6 Závěr

Práce se zabývala úsporou prostoru na výrobní hale. Hlavním cílem po úspoře prostoru bylo docílit co možná nejnižších nákladů na realizaci.

Nejprve byla provedena vstupní analýza zaměřená na stávající chod výrobní haly a volba vhodného výrobního bloku pro optimalizaci. Vybrána byla montážní linka Perilex. Analyzovala se jednak výrobní část (chod linky), ale i zásobování linky.

V návaznosti na provedenou analýzu a cíl projektu byla navržena výsledná varianta.

Hlavní přínosy optimalizace:

- Uspořený prostor je obdélníkového tvaru (ideální tvar, z důvodu možnosti využití univerzálních stolů, tedy výměnných technologických desek) o rozměrech 4,2*3 m, což je plocha 12,6 m², tedy 25 % úspora. S uvolněnou manipulační cestou je úspora až 34 %.
- V případě potřeby lze částečně využít i manipulačního prostoru.
- Je možné navýšit montážní halu o další výrobu. Firma tedy nemusí řešit žádné finančně náročné možnosti, jako je například nová stavba budov.
- Navýšení práce/zakázek, na této výrobní hale, usnadní organizaci práce volných kapacit operátorů. Což usnadní práci nejednomu mistrovi.
- Jedná se o jednoduchý a levný optimalizační návrh dopředu projednaný s technologem pro co nejjednodušší realizaci.
- Realizace je možná vlastními silami firmy.
- Díky konzultacím s operátory se očekává minimum problémů s doladěním procesu po jeho zavedení.
- Realizace je možná bez zastavení výroby – velké úspory na plánování realizace, protože nevyžaduje předzásobení.
- Navýšení efektivity práce minimalizací problémových úseků.

Zadání práce se podařilo splnit. Úspora prostoru o velikosti 25-34 % je vzhledem k jednoduchosti a nízké ceně realizace překvapením, které firma uvítala. V rámci optimalizace se podařilo odstranit mnoho problémových míst, které i operátoři považují za velký plus. Optimalizace tedy přinesla i velký přínos operátorům.

Literatura

- [1] ABB, *M1 vršek aktualizace 2016-puvodni_layout.dwg*, ABB s.r.o. Jablonec nad Nisou, oddělení technologie, interní materiály [30.09.2016]
- [2] GOLDRATT, Eliyahu M. a Jeff COX. *Cíl: proces trvalého zlepšování*. 2. přeprac. vyd. Praha: INTERQUALITY, 2001. ISBN 80-902770-2-0.
- [3] SMED - IPA Slovník - IPA Czech. *Firemní vzdělávání, Inovace, Strategický rozvoj, Výrobní manažment, Optimalizace výroby, Soft skills - IPA Czech* [online]. Copyright © 2012 [cit. 01.05.2017]. Dostupné z: <http://www.ipaczech.cz/cz/ipa-slovník/smed>
- [4] 5S Metodika :: IWPNet - 5S Metodika. IWPNet - 5S Metodika [online]. Copyright © 2011 Všechna práva vyhrazena. [cit. 01.05.2017]. Dostupné z: <http://iwpnet-5s.webnode.cz/o-nas/>
- [5] Co je 5s | 5S Definice. *Kaizen Lean poradenství | Zvyšování výkonnosti | Kaizen Institute Consulting Group* [online]. Dostupné z: <https://cz.kaizen.com/slovník/co-je-5s.html>
- [6] Obecné zásady při projektování výrobních buněk. *Svět produktivity* [online]. [cit. 29.04.2017] Dostupné z: <http://www.svetproduktivity.cz/clanek/Obecne-zasady-pri-projektovani-vyrobnich-bunek.htm>
- [7] Projektování výrobních buněk - PDF. *Představujeme Vám pohodlné a bezplatné nástroje pro publikování a sdílení informací*. [online]. Copyright © DocPlayer.cz [cit. 01.05.2017]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/5542731-Projektovani-vyrobnich-bunek.html>
- [8] VOLKO, Vladimír. Co je to: "7 muda"? Volko [online]. [cit. 2017-02-23]. Dostupné z: http://www.volko.cz/new/slovník_vykonnosti.php?ID_term=7
- [9] Šíře uliček a komunikací na pracovišti | BOZPinfo.cz. *BOZP info - Časopis JOSRA* [online]. Copyright © 2002 [cit. 29.04.2017]. Dostupné z: <http://www.bozpinfo.cz/sire-ulicek-komunikaci-na-pracovisti>

AKTIVNĚ ŘÍZENÁ PNEUMATICKÁ PRUŽINA

Jiří Rágulík

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,
Fakulta strojní, 3. ročník
Bakalářský studijní program – STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

Abstrakt: V této práci se zabývám experimentálním zjištěním závislosti síly pneumatické vlnovcové pružiny v na zdvihu a vnitřním přetlaku. Tato data následně vhodnými matematicko-statistickými metodami prokládám odvozenými funkcemi a porovnávám naměřená a odvozená data. Dále popisuji návrh a sestavení aktivně řízeného systému pro udržení konstantní výšky pružiny při změně zatížení.

Klíčová slova: pneumatická pružina, regulace, matematicko-statistické metody, polytropický děj

1 Pružiny

Pružiny se řadí mezi strojní součásti pro akumulaci energie. Mezi spojenými součástmi působí při vychýlení vratnou silou nebo momentem a zajišťují, aby se rázy a kmity nepřenášely mezi odpruženými součástmi. Materiál pružícího prvku může mít i nezanedbatelné tlumící schopnosti, což znamená pohlcení mechanické energie a její přeměnu na teplo. Při návrhu pružiny řešíme především požadavky na silové působení v závislosti na deformaci, zástavbový prostor, rozsah pracovních teplot, chemická odolnost, spolehlivost a trvanlivost. Dalším důležitým faktorem může být i hmotnost samotné pružiny.

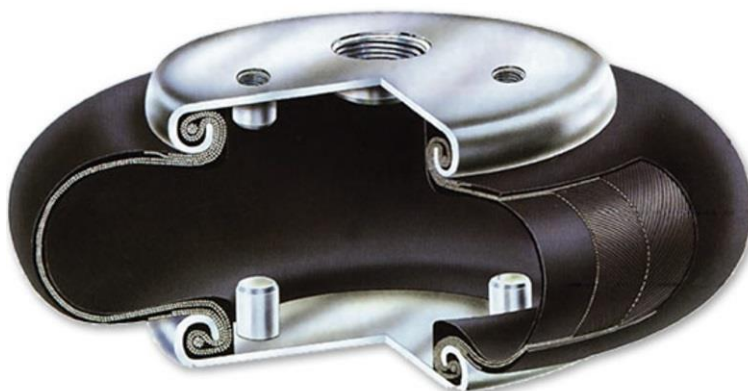
1.1 Rozdělení pružin

Podle materiálu, tvaru a namáhání je dělíme na:

- 1) Kovové namáhané ohybem –šroubovitě zkrutné, spirálové, listové
- 2) Kovové namáhané krutem – šroubovitě válcové a kuželové, zkrutné tyče
- 3) Kovové namáhané kombinovaně - talířové
- 4) Nekovové – pryžové, plastové
- 5) Pneumatické a hydropneumatické

2 Pneumatické pružiny

Tyto pružiny využívají jako pružící médium stlačený plyn uvnitř měchu. Jejich hlavní výhodou oproti levnějším a konstrukčně jednodušším vinutým pružinám je možnost měnit jejich charakteristiku změnou vnitřního přetlaku.



Obrázek 1: Názorný řez pneumatickou pružinou

2.1 Rozdělení

Pneumatické pružiny se rozdělují podle tvaru měchu na :

- 1) Vlnovcové – můžeme deformovat v axiálním i v radiálním směru, 1 až 3 vlny, se stoupajícím počtem vln klesá radiální tuhost, mezi vaky jsou zpravidla ocelové kroužky, mají velkou životnost
- 2) Membránové – podobná funkce jako u vlnovcových pružin, s tím rozdílem, že jsou pryžové prstence nahrazeny kovovými tělesy, plnicí funkci pístu a válce, jejich těsnění zajišťuje pryžová membrána, velká radiální tuhost
- 3) Vakové – tyto pružiny mají píst, po kterém se při pružení odvaluje vak, dochází tak ke značným deformacím, z toho plynou vyšší nároky na materiál vaku a tvarování pístu
- 4) Hadicové – nízká radiální tuhost, je tedy nutné použít u odpružených objektů vedení

2.2 Konstrukční provedení

Pneumatická pružina se skládá většinou z rotačně symetrického, případně obdélníkového, pryžového měchu armovaného kříženým kordem v několika vrstvách a vík, která pružinu uzavírají. Upevnění měchu k víku je provedeno nejčastěji převlečeným kroužkem nebo lisováním. Jedno z vík je opatřeno plnicím otvorem, do kterého je přiveden přívod stlačeného vzduchu přes regulátor.

2.3 Využití

V praxi se nejčastěji používají k odpružení náprav vozidel a také jako prvky systémů eliminujících vibrace strojů a strojních součástí. Systémy odpružení využívající tyto pružiny mají oproti klasickým vinutým pružinám hned několik výhod. Například se v závislosti na zatížení nemění vlastní frekvence odpružené hmoty. Další velkou výhodou je možnost nastavení světlé výšky vozidla. Mohou také vyrovnávat nesymetrické zatížení vozidla. Nevýhodou je potom potřeba kompresoru a regulátoru, což pro některé případy znamená nemožnost použití pneumatických pružin.

3 Odvození zatěžovací charakteristiky

Při odvozování zatěžovací charakteristiky jsem provedl několik zjednodušujících předpokladů.

3.1 Zjednodušující předpoklady

Prvním zjednodušením je uvažování vzduchu v pružině jako ideálního plynu. Ideální plyn je dokonale stlačitelný a bez vnitřního tření. Skutečné děje probíhající ve strojních zařízeních jsou ději nevratnými, zatímco já uvažuji, že při deformování pružiny, dochází k vratné změně stavu, tedy bez ztrát. Posledním zjednodušením je uvažování efektivní plochy pouze jako kvadratickou funkcí dráhy.

3.2 Odvození

Celkové silové působení pružiny bude způsobeno silou způsobenou přetlakem p_p a silou způsobené deformací:

$$F(x) = F_p(x) + F_v(x). \quad (1)$$

Vlnovec se při stlačení nebo natažení chová jako nelineární pružina. Velikost této síly bude závislá pouze na výchylce od klidové polohy:

$$F_v(x) = k_1 \cdot x + k_2 \cdot x^2 + k_3 \cdot x^3. \quad (2)$$

Pro uzavřený systém jsem použil stavovou rovnici ideálního plynu pro polytropický děj:

$$p \cdot V(x)^n = \text{konstanta}, \quad (3)$$

kde p představuje absolutní tlak v systému, V celkový objem a n polytropický exponent. Jistě tedy bude platit:

$$p_0 \cdot V_0^n = \text{konstanta}, \quad (4)$$

kde p_0 představuje počáteční absolutní tlak v systému a V_0 počáteční celkový objem.

Z rovnosti vztahů (3) a (4) jsem vyjádřil závislost tlaku na počátečních hodnotách tlaku a objemu a na celkovém objemu, který bude určitě funkcí posuvu.

$$p(x) = \frac{p_0 \cdot V_0^n}{V^n(x)}. \quad (5)$$

Sílu vyvozenou tlakem v pružině jsem určil ze vztahu:

$$F_p(x) = A_{ef}(x) \cdot (p(x) - p_{atm}), \quad (6)$$

kde A_{ef} představuje efektivní plochu pružiny. Dále jsem uvažoval, že efektivní plocha je kvadratickou funkcí posuvu:

$$A_{ef}(x) = A_0 + A_1 \cdot x + A_2 \cdot x^2. \quad (7)$$

Dosazením vztahu (7) do (6) jsem dostal sílu v pružině vyvolanou přetlakem:

$$F_p(x) = (A_0 + A_1 \cdot x + A_2 \cdot x^2) \cdot (p(x) - p_{atm}). \quad (8)$$

Takto vyjádřený tlak jsem dosadil do vztahu (1), čímž jsem získal zatěžovací charakteristiku uzavřené pružiny:

$$F(x) = (A_0 + A_1 \cdot x + A_2 \cdot x^2) \cdot \left(\frac{p_0 \cdot V_0^n}{V^n(x)} - p_{atm} \right) + k_1 \cdot x + k_2 \cdot x^2 + k_3 \cdot x^3. \quad (9)$$

Pro elementární stlačení pružiny lze napsat následující diferenciální vztah pro změnu objemu pružiny. Tu jsem uvažoval závislou pouze na změně délky pružiny.

$$dV = -A_{\text{ef}} \cdot dx. \quad (10)$$

Do vztahu (11) jsem dosadil za efektivní plochu ze vztahu (2):

$$dV = -(A_0 + A_1 \cdot x + A_2 \cdot x^2) \cdot dx. \quad (11)$$

Integrací vztahu (12) ve vhodných mezích jsem získal vztah popisující závislost objemu na prodloužení pružiny:

$$\int_{V_0}^V dV = - \int_0^x (A_0 + A_1 \cdot x + A_2 \cdot x^2) \cdot dx$$

$$V(x) = V_0 - A_0 \cdot x - \frac{1}{2} \cdot A_1 \cdot x^2 - \frac{1}{3} \cdot A_2 \cdot x^3. \quad (12)$$

Získaný vztah jsem dosadil do vztahu (9):

$$F(p_0, x) = (A_0 + A_1 \cdot x + A_2 \cdot x^2) \cdot \left(\frac{p_0 \cdot V_0^n}{\left(V_0 - A_0 \cdot x - \frac{1}{2} A_1 \cdot x^2 - \frac{1}{3} A_2 \cdot x^3 \right)^n} - p_b \right) + k_1 \cdot x + k_2 \cdot x^2 + k_3 \cdot x^3. \quad (13)$$

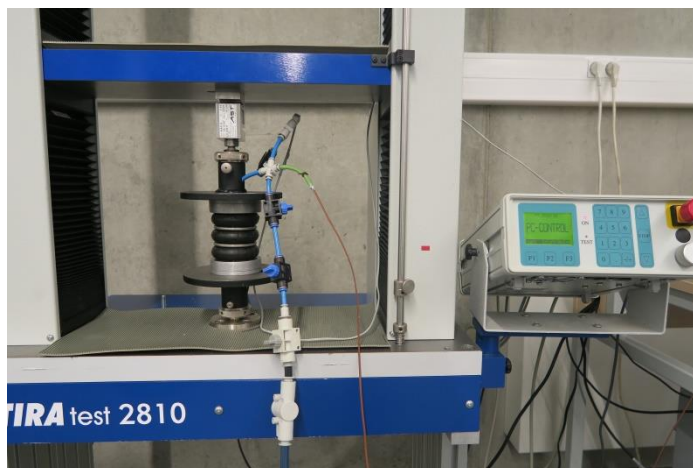
4 Měření a aproximace

K získání dat potřebných pro získání neznámých koeficientů jsem provedl několik experimentálních měření. Měření byla prováděna na zatěžovacím zařízení TIRA test 2810. Naměřená data jsem následně zpracoval v softwaru Maple 2015.

Tabulka 1 :Podmínky při měření

Teplota v laboratoři	20,8 °C
Tlak v laboratoři	101 kPa
Posun příčnicku zkušebního zařízení	±20 mm
Volná délka pružiny	112 mm

Pro potřeby měření jsem sestavil pneumatický obvod, skládající se z hadic, redukcí, spojek a ventilů. Obvod musel umožňovat přívod vzduchu, výfuk vzduchu, měření tlaku a měření teploty.



Obrázek 2: Měřená pružina upnutá ve zkušebním zařízení s připojeným pneumatickým obvodem

4.1 Pružina bez vnitřního přetlaku

Toto měření jsem provedl kvůli zjištění tuhosti vlnovce, který se při deformaci chová jako nelineární pružina. Provedl jsem celkem tři měřící cykly. Získal jsem tak závislost síly na zdvihu s nulovým vnitřním přetlakem. Naměřená data jsem proložil polynomem třetího stupně:

$$F_v(x) = k_1 \cdot x + k_2 \cdot x^2 + k_3 \cdot x^3. \quad (14)$$

Pro aproximaci jsem použil matematicko-statistickou metodu nejmenších čtverců. Jedná se o metodu vhodnou pro aproximaci řešení přeuroččených soustav rovnic, tedy soustav, kde je více rovnic než neznámých. Výsledné řešení má minimalizovaný součet čtverců odchylek vůči každé rovnici. V ideálním případě by byl průběh naměřené funkce F_n a odvozené funkce F_a totožný, tedy by platilo, že:

$$(F_a - F_n)^2 = 0. \quad (15)$$

V reálném případě jejich průběh nebude totožný a bude tedy platit:

$$(F_a - F_n)^2 = T. \quad (16)$$

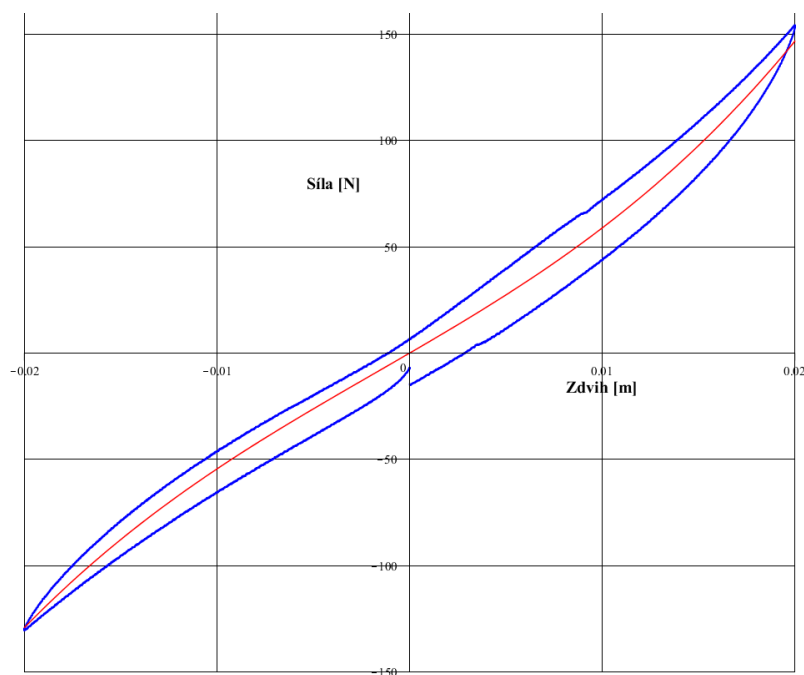
T je funkce odchylky a metodou nejmenších čtverců najdeme její minimum :

$$\frac{\partial T}{\partial k_1} = 0, \quad (17) \quad \frac{\partial T}{\partial k_2} = 0, \quad (18) \quad \frac{\partial T}{\partial k_3} = 0. \quad (19)$$

Výsledkem těchto parciálních derivací je soustava rovnic. Vyřešením této soustavy získáme koeficienty. Numerické řešení jsem provedl v Maplu 2015. Aproximací získané hodnoty koeficientů uvádím v následující tabulce:

Tabulka 2: Hodnoty koeficientů popisující chování vlnovce

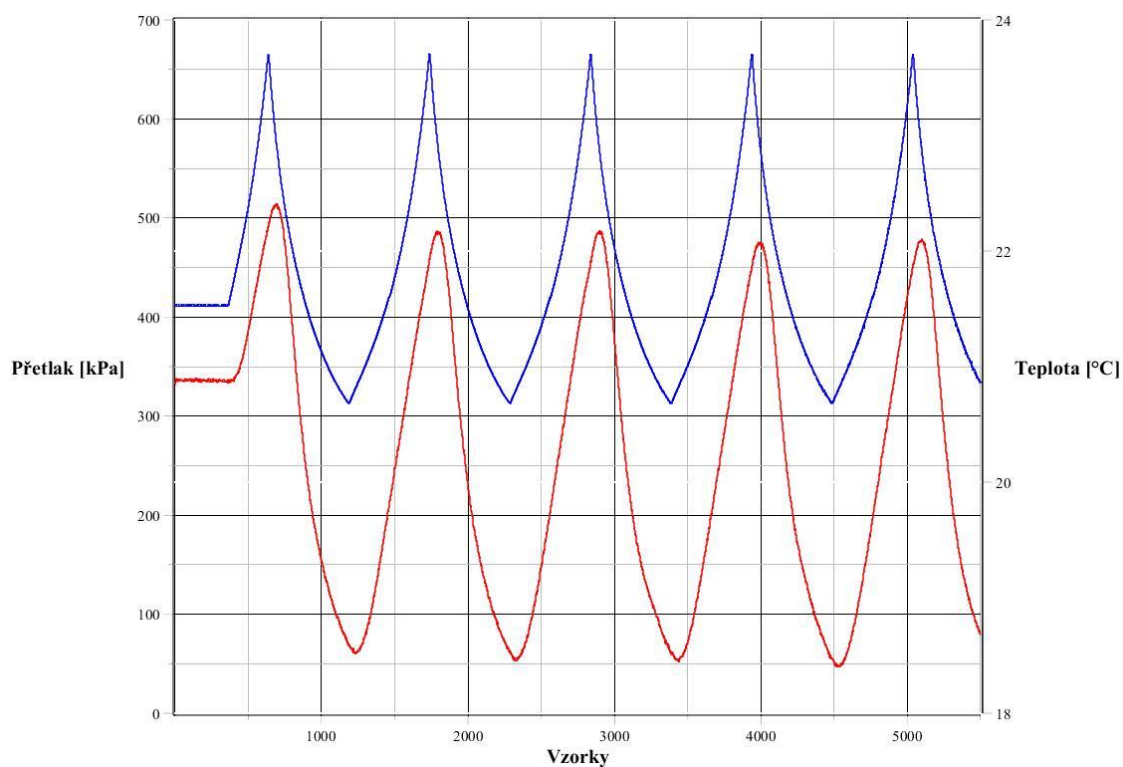
Koeficient	Hodnota
k_1	5263.65959543
k_2	21996.30421224
k_3	4107402.07780035



Obrázek 3: Naměřené (modře) a aproximované (červeně) hodnoty

4.2 Měření teploty

Měření teploty vzduchu uvnitř měchu pružiny při uzavřeném systému bylo nutné provést kvůli určení polytropického koeficientu.



Obrázek 4: Průběh tlaku (modře) a teploty (červeně)

V grafu naměřených hodnot, spolu průběhy přetlaku (modrá) a teploty (červená) jednoznačně korelují, pouze s drobným zpožděním teploty, které je způsobeno použitým snímačem teploty OMEGA HSTC TT K 24S. Mohu tedy jistotou prohlásit, že změna teploty uvnitř pružiny je způsobena změnou tlaku.

Z naměřených hodnot jsem určil hodnotu polytropického exponentu dle vztahu, vyjádřeného z Poissonových rovnic:

$$n = \frac{\ln \frac{p_2}{p_1}}{\ln \frac{p_2}{p_1} - \ln \frac{T_2}{T_1}} = \frac{\ln \frac{665}{312}}{\ln \frac{665}{312} - \ln \frac{295,6}{291,7}} = 1,0179. \quad (20)$$

4.3 Pružina s vnitřním přetlakem

V tomto měření jsem provedl celkem 4 měření. Při každém z nich byla pružina nafouknuta na tlak p_0 při daném zdvihu, tak aby síla byla větší než nula, případně aby nebyl překročen maximální dovolený přetlak.

Při prvním měřicím cyklu byla pružina nafouknuta na maximální dovolený přetlak při minimální délce 92 [mm] a následně natažena. Při druhém jsem nastavil v měchu takový tlak, aby zde působila nulová síla, ale přitom bylo dosaženo maximální délky 132 [mm]. Po těchto dvou měřeních jsem z naměřených hodnot tlaku odečetl hodnoty tlaků při volné délce [455] a 125 [kPa]. Pružinu při volné délce jsem nafoukl na hodnotu vnitřního přetlaku 260 [kPa], což byla hodnota ležící mezi tlaky při volné délce z předchozích dvou měřicích cyklů.

Tímto postupem jsem se snažil měřením získat hodnoty síly a zdvihu rovnoměrně rozložené v celé pracovní oblasti. Pracovní oblastí se rozumí všechny stavy pružiny, kdy při daném zdvihu příčníku není překročen maximální přetlak a zároveň je alespoň dosaženo maximální délky pružiny.

Naměřené hodnoty jsem následně proložil hodnotami, které jsem opět získal metodou nejmenších čtverců. Hodnotu objemu V_0 při volné délce jsem změřil naplněním pružiny vodou a následným měřením objemu vody z pružiny odměrným válcem. Zjištěná hodnota tohoto objemu je $V_0=160$ [ml].

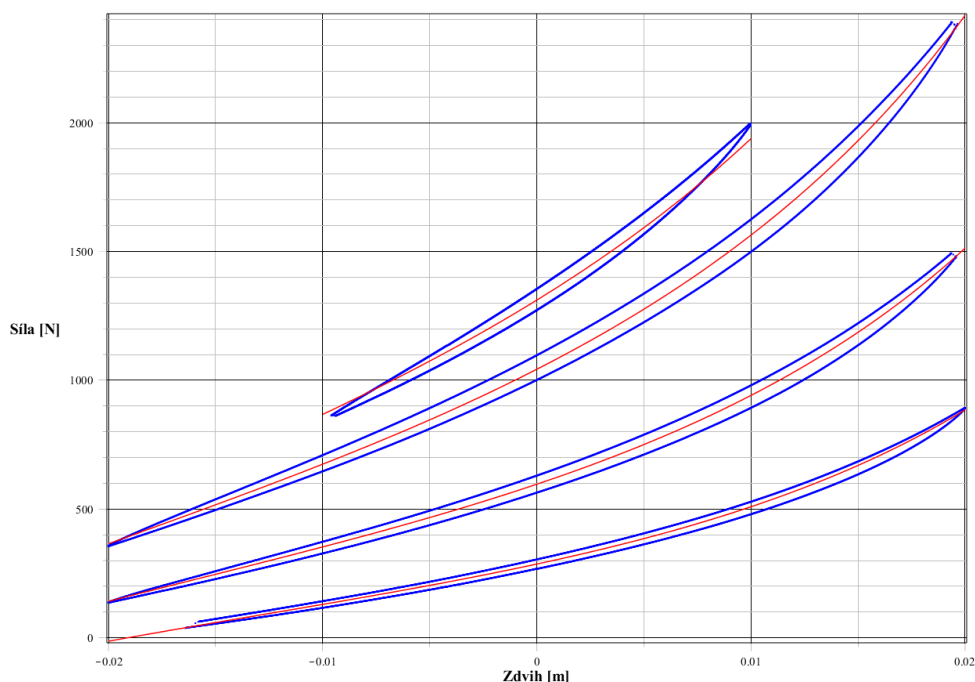
Získal jsem tak funkční závislost odchylky T a z ní jsem parciálními derivacemi získal soustavu rovnic:

$$\frac{\partial T}{\partial A_0} = 0, \quad (21) \quad \frac{\partial T}{\partial A_1} = 0, \quad (22) \quad \frac{\partial T}{\partial A_2} = 0. \quad (23)$$

Vyřešením této soustavy jsem získal chybějící koeficienty odvozené závislosti síly na zdvihu pružiny.

Tabulka 3: Hodnoty koeficientů popisující změnu efektivní plochy a objemu

Koeficient	Hodnota
A_0	0.00229046
A_1	0.04106738
A_2	0.12756194



Obrázek 5: Naměřené (modře) a aproximované (červeně) hodnoty

5 Návrh aktivně řízeného systému

Mým posledním úkolem bylo navrhnout aktivně řízený systém pneumatické pružiny pro udržení konstantní výšky pružiny při změně zatížení. Mnou navržený řízený systém se skládá z laserového snímače délky, regulátoru tlaku a PID regulátoru.

Spodní víko ovládané pružiny, skrze které je do pružiny přiváděn přetlak, jsem upnul do rámu. Horní víko pružiny je šroubovým spojem upevněno k pohyblivé části rámu, desce, na kterém je umístěno závaží. Polohu této desky snímá laserový snímač polohy optoNCDT 1402. Výstupem laserového snímače je napětí, které se porovnává s nastavenou hodnotou. Rozdíl těchto hodnot, který je realizován invertorem a sumátorem, je přiveden do PID regulátoru. Napětí z jednotlivých složek PID regulátoru se sečteno a výsledek této sumace provedený opět sumátorem je následně invertován invertorem. Výstupní napětí regulátoru je přiváděno na svorky regulátoru tlaku SMC VY1A00 a ten vytváří uvnitř měchu pružiny odpovídající přetlak.

Tento systém jsem následně namodeloval v programu MapleSim 2015. Laserový snímač a regulátor tlaku jsem zde namodeloval čistě z matematických operátorů (součet, rozdíl, součin a podíl). V tomto modelu plní laserový snímač pouze funkci přepočtu délky paprsku na napětí a tlakový regulátor funkci přepočtu vstupního napětí na tlak. Došlo tak k zanedbání jejich reálných vlastností, jako je například doba odezvy. Pneumatickou pružinu jsem také namodeloval pouze z matematických operátorů. Zbytek modelu tvoří elektronický obvod zajišťující regulaci. Regulátor jsem rovněž sestavil i fyzicky na nepájivém poli.

5.1 Složky PID regulátoru

PID regulátor je tvořen třemi paralelními složkami, tj. proporcionální, integrační a derivační.

Proporcionální složka r_0 zajišťuje základní funkci regulačního pochodu, zesílení regulační odchylky $e(t)$ a následné přivedení na vstup regulované soustavy v opačné fázi než má porucha.

Vliv integrační složky r_{-1} se zvyšuje tak dlouho, dokud nepotlačí regulační odchylku. Pak nárůst integrační složky ustane. Regulátor obsahující integrační složku pracuje v ustáleném stavu teoreticky s nulovou regulační odchylkou.

Derivační složka r_1 reaguje na časové změny regulační odchylky, r_1 tedy nezávisí na okamžité velikosti regulační odchylky a nesnaží se jí odstranit a přiblížit tak regulovanou veličinu žádané hodnotě. Význam derivační složky spočívá v možnosti ovlivnit dynamický průběh regulace, především pak omezit velké překmity a potlačit vliv náhlých poruch.

Charakteristická rovnice PID regulátoru má tvar:

$$u(t) = r_0 \cdot e(t) + r_{-1} \cdot \int e(t) \cdot dt + r_1 \cdot \frac{de(t)}{dt}. \quad (24)$$

5.2 Realizace PID regulátoru

Jeho realizaci jsem provedl vhodným zapojením operačních zesilovačů se zpětnými vazbami a se stavitelnými parametry.

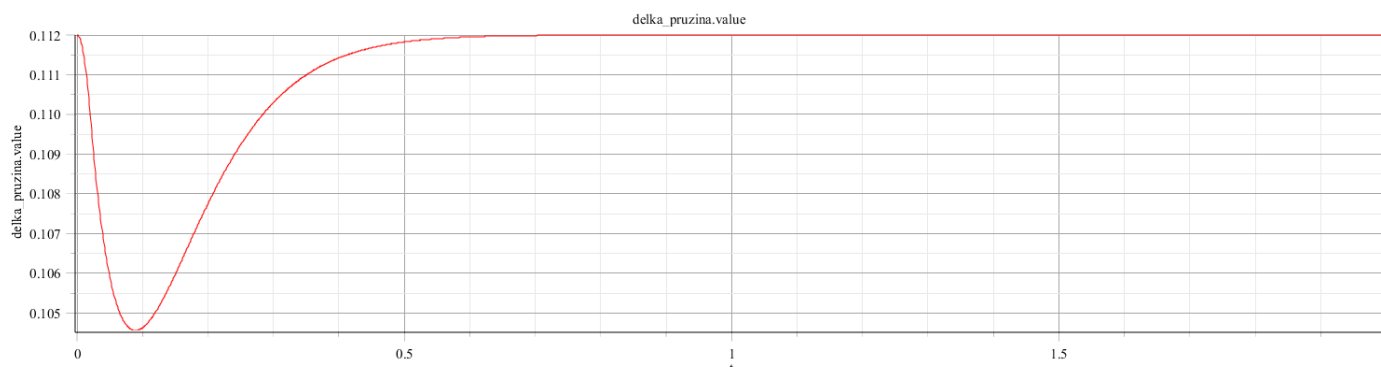
K nastavení regulátoru jsem použil Wadeho manuální metodu, která se dá považovat za nejjednodušší. Metoda spočívá v nastavení žádané hodnoty w , vyřazení integrační a derivační složky a následné zvyšování zesílení proporcionální složky regulátoru tak dlouho, dokud nemá odezva y při skokové změně požadovaný průběh. Následně se o čtvrtinu sníží takto zjištěné zesílení proporcionální složky. Poté se začne zvyšovat vliv integrační složky až je odstraněna trvalá regulační odchylka. Zesílení derivační složky se následně nastaví podle vztahu :

$$r_1 = \frac{r_0^2}{10 \cdot r_{-1}}. \quad (25)$$

Následně se zesílení proporcionální složky zvýší o čtvrtinu a zesílení integrační složky o třetinu.

Zásadní rozdíl v chování systému mezi modelem v MapleSimu a reálným zapojením, je způsoben mnoha faktory, jako například nepřesností hodnot standartních elektronických součástek (rezistor se jmenovitou hodnotou odporu 10 [kΩ] má ve skutečnosti hodnotu odporu 9,7 [kΩ]), dopravním zpožděním, atd.

Výsledkem simulace provedené v MapleSimu je časový průběh délky pružiny, který se dá považovat za uspokojivý. Poměrně velký propad hodnoty délky je sice určitým nedostatkem, na zvýšení hmotnosti (přidání dalšího závaží) však již systém reaguje velmi rychle. Co je však na získaném průběhu délky pružiny velmi dobré je absence jakéhokoli překmitu.



Obrázek 6: Časový průběh délky pružiny

6 Závěr

Naměřené hodnoty jsem aproximoval do odvozeného vztahu pro sílu pneumatické pružiny. Na průběhu naměřených hodnot je vidět výrazná disipace energie. Ta je způsobena především pryží, která mění své silové působení v čase při konstantní deformaci. Tento jev, známý jako relaxace pryže, je však obtížně popsatelný. Pro zachování jednoduchosti mého modelu, ji zde neuvažuji. Pro malá zatížení, kdy silový účinek vlnovce převládá na silovým účinkem přetlaku, je mnou vytvořený model nepoužitelný. To ale nepředstavuje velký problém, protože nepředpokládám, že by se někdo pokoušel pneumatickou pružinou odpružit lehká tělesa. V praxi jsou totiž pružiny využívány pro odpružení náprav vozidel nebo vibroizolaci velmi těžkých strojů.

Systém aktivní regulace funguje poměrně uspokojivě. S přihlédnutím k tomu, že byla použita nejjednodušší metoda nastavení zesílení jednotlivých složek regulátoru a v obvodu chybí filtry a podobná vylepšení, která by ale znamenala zvýšení složitosti obvodu. Výsledná regulace je dostatečně kvalitní a stabilní.

Práce má určitě potenciál dalšího rozvoje, především v oblasti regulačního obvodu. Další možností rozvoje vidím v sestavení modelu dalších typů pneumatických pružin, které jsou také často využívány, jejich popis by však byl mnohem komplikovanější, než u vlnovcové.

Literatura

- [1] OLEHLA, M. - NĚMEČEK, S.: Základy aplikované kybernetiky. Liberec: TUL, 2005.
- [2] STŘEDA, I.: Základy rovnovážné termodynamiky, skriptu TUL, Liberec, 2009
- [3] PEŠÍK, L.: Části strojů. 1. díl. Liberec, TU 2005. ISBN 80-7083-938-4

ZVLÁKŇOVACÍ ELEKTRODA PRO VÝROBU SMĚSNÉHO NANOVLÁKENNÉHO MATERIÁLU

Jiří Souček

Sekce – STROJÍRENSTVÍ

Fakulta strojní, 3. Ročník

Bakalářský studijní program – STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

Abstrakt

Předložená práce se zabývá konstrukcí nového druhu elektrody pro výrobu směsného nanovláknenného materiálu, užitím technologie zvlákňování pomocí střídavého elektrického napětí, neboli AC-electrospinningu. Předpokladem přitom je zvlákňování dvou různých polymerních roztoků, aniž by se mísily. V rámci návrhu byly zpracovány analýzy elektrického pole v programu Autodesk Simulation Mechanical. Analýzy byly zaměřeny především na rozložení elektrické intenzity ve zvlákňovací oblasti, což je jeden z hlavních parametrů elektrody. Dále bylo provedeno konstrukční zpracování upínacího přípravku elektrody, který umožňuje zvlákňování dvou různých polymerních roztoků. Funkčnost navržené elektrody byla laboratorně testována při zvlákňovacím procesu a vytvořený nanovláknenný materiál byl podroben analýze pomocí elektronové mikroskopie.

Klíčová slova: elektrické pole, nanovláknna, AC-electrospinning, zvlákňovací elektroda

1. Úvod

Nanovláknna jsou vlákna o průměru menším než $1\mu\text{m}$. Průměry nanovláken, které jsme schopni vyrobit, se momentálně pohybují v desítkách až stovkách nanometrů. Nanovláknna si své postavení získávají díky svým unikátním vlastnostem: malým rozměrům, vysoké měrné ploše a mechanickým vlastnostem.

Technický vývoj byl vždy poháněn objevem nových materiálů, způsobem jejich výroby a zpracování. Veliký potenciál mají nanovláknenné materiály, které se již aplikují v mnoha odvětvích medicíny a průmyslu např. elektronice, strojírenství a mnoha dalších.

Nejpoužívanější technologií pro výrobu nanovláknenného materiálu je zvlákňování pomocí elektrického pole (electrospinning), jelikož umožňuje výrobu nanovláken z největšího množství materiálů. Tato technologie rozlišuje dva různé přístupy, užití stejnosměrného nebo střídavého napětí. V současné době je nejrozšířenější technologií zvlákňování pomocí stejnosměrného napětí (DC electrospinning), kterou využívá i první průmyslový stroj na výrobu nanovláken „Nanospider“. Technologie zvlákňování pomocí střídavého elektrického napětí (AC electrospinning), která je předmětem této práce, byla vynalezena na Technické univerzitě v Liberci v roce 2012 a ukázala se být o řád produktivnější než její předchůdce DC electrospinning.

2. AC electrospinning

AC electrospinning, neboli zvlákňování pomocí střídavého elektrického napětí, je elektrohydrodynamický proces. Tato technologie byla patentována Technickou univerzitou v Liberci. Princip je velmi podobný zvlákňování pomocí stejnosměrného napětí, ze kterého se vyvinul. U obou se používá ke zvlákňování účinků elektrického pole. V případě zvlákňování pomocí stejnosměrného napětí vzniká elektrické pole mezi kladně nabitou elektrodou a záporně nabitým kolektorem. Elektrické pole u AC elektrospinningu vzniká vlivem časového průběhu vysokého napětí. Okolí elektrody, která je připojena ke zdroji střídavého

napětí, se střídavě nabíjí a vybíjí a tím se utváří tzv. virtuální elektroda. Elektrické pole tedy vzniká mezi hmotnou a virtuální elektrodou. [1]

Metoda zvlákňování pomocí střídavého elektrického napětí využívá poznatky o zvlákňování z volné hladiny polymerního roztoku. Nejprve se na povrchu elektrody vytvoří vrstva polymerního roztoku, poté se na elektrodu přivede vysoké napětí. Při dosažení kritické intenzity elektrického pole se na povrchu polymerního roztoku vytvoří řada polymerních trysek, z nichž se masivně vypařuje rozpouštědlo, což vede ke tvorbě nanovláken. Vlákná se po vytvoření pohybují ve směru gradientu elektrického pole a uskupují se do tzv. vlečky, která se dále pohybuje vlivem elektrického větru [2].

Některá nanovlákná se po vzniku oddělí od vlečky. Tato oddělená vlákna dopadají zpět na elektrodu a do jejího okolí a tím může docházet k zanášení povrchu elektrody a přerušování stabilního zvlákňovacího procesu. Na elektrodu je z tohoto důvodu dopravováno větší množství polymerního roztoku, než je k zvlákňovacímu procesu zapotřebí. Zbylý roztok stéká po elektrodě a zabraňuje usazování nanovláken na elektrodě, protože vlákna, která dopadnou zpátky na elektrodu, se opět rozpustí v roztoku. Tím vzniká samočistící efekt, který má ovšem za následek větší nároky na množství polymerního roztoku, který je nutný pro provoz.

Zařízení na výrobu nanovláken pomocí technologie AC-electrospinningu se skládá z několika částí. Základem je zdroj vysokého napětí s rozpětím výstupního napětí mezi 16–36 kV. Zdroj ovlivňuje mnoho parametrů zvlákňovacího procesu, kterými jsou produktivita, průměr vyrobených vláken, a také svým výkonem ovlivňuje velikost plochy, ze které jsme schopni zvlákňovat. Další důležitou součástí je způsob dopravy polymerního roztoku. Konvenčně používané způsoby pro laboratorní účely jsou dávkovací čerpadla a peristaltické pumpy. Elektroda je klíčovou součástí zvlákňovacího zařízení, která významně ovlivňuje mnoho parametrů výsledného materiálu. Nejčastěji se užívá elektrod rotačně symetrických. Na okrajích elektrod je obvykle maximum elektrické intenzity.

2.1. Elektrody pro AC electrospinning

Elektrody pro AC electrospinning jsou popsány v patentové přihlášce podané Technickou univerzitou v Liberci číslo spisu PV 2015-928, která v době psaní práce ještě nebyla zveřejněna. Jak již bylo zmíněno výše, elektrody jsou většinou konstruovány rotačně symetrické a skládají se ze dvou základních částí, kterými jsou stopka a zvlákňovací hlava. Stopka elektrody je obvykle tenkostěnná trubička, která slouží k dopravě polymerního roztoku a která slouží k uložení hlavy. Hlava elektrody je její funkční částí. Na hlavě dochází k samotnému zvlákňování. Elektrody využívají přeplavovacího samočistícího efektu popsaného výše. Polymerní roztoky mají oproti vodnému roztoku vyšší viskozitu, což může způsobit problémy při dopravě a při přeplavování elektrody.

Rozložení elektrické intenzity na povrchu elektrody ovlivňuje produktivitu technologie a průměr vyrobených vláken. Intenzita elektrického pole je přímo úměrná velikosti napájecího napětí. Intenzita také závisí na prostorové křivosti elektrody, proto mají hlavy elektrody malé rozměry. Základní typem hlavy elektrody pro AC electrospinning je hlava kuželová (Obr. 1). Jak již název napovídá, hlava elektrody má kuželovitý tvar se zaoblenou hranou. Zvlákňování započne v místě zaoblené hrany kužele. Tato skutečnost souvisí s rozložením intenzity elektrického pole v okolí elektrody. Intenzita elektrického pole má své maximum právě v místě zaoblené hrany elektrody. V tomto místě se vlákna



Obr. 1 Kuželová elektroda [5]

vytvoří nejdříve, jelikož zde dojde k překročení kritické intenzity polymerního roztoku. Technologie AC electrospinningu byla a je testována právě na těchto typech elektrod.

3. Výroba kompozitních nanovláken

Kompozitní nanomateriály se vyrábějí technologií AC electrospinningu dvěma způsoby a to zvlákňování směsí a zvlákňování ze dvou vrstev roztoků. Při zvlákňování směsí se do polymerního roztoku přidá aditivum nebo další polymer. Všechny složky směsi tedy musí být rozpustné ve stejném rozpouštědle. Tato směs je posléze zvlákňována na jedné elektrodě [3].

Při zvlákňování ze dvou vrstev roztoků se všechny složky výsledného materiálu dostanou do kontaktu až na zvlákňovací elektrodě. K tomu je zapotřebí speciálního druhu elektrody se dvěma dopravními kanály polymerního roztoku. Elektrody jsou navrženy tak, aby vytvořily dvě vrstvy polymerního roztoku na sobě. Zvlákňováním z tohoto povrchu vzniknou vlákna typu jádro-plášť. Plášť vzniká z vnějšího roztoku, který obvykle obsahuje polymerní materiál. Jádro může být tvořeno jiným polymerním materiálem nebo tekutinami obsahujícími léčiva, buňky, nanočástice, DNA nebo růstové faktory. [4]

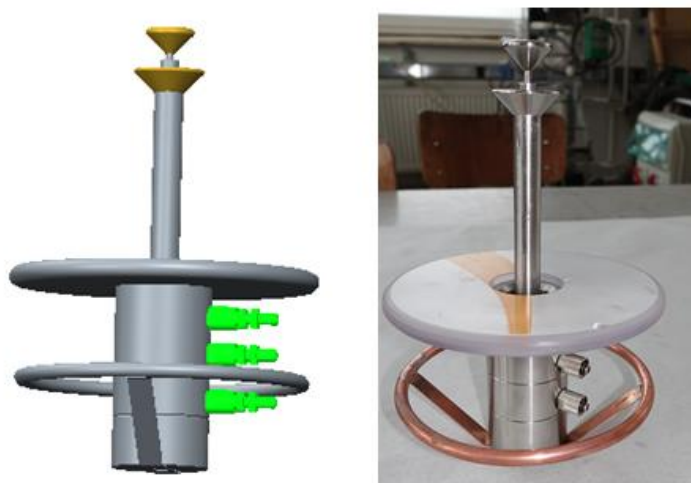
4. Návrh nového druhu elektrody

Jak již bylo popsáno výše, úkolem této práce je návrh nové elektrody na výrobu kompozitního nanovláknenného materiálu pro technologii AC electrospinningu. Předpokladem je, že na této elektrodě bude možné zvlákňovat dva různé polymery, aniž by se smíchaly. Tím bude možné zvlákňování polymerů nemísitelných. CAD model a vyrobený funkční vzorek navržené elektrody je na Obr. 2

Elektroda byla rozdělena na několik částí: **zvlákňovací hlavy**, na kterých se zvlákňují polymery, **trubičky**, na kterých jsou zvlákňovací hlavy uloženy a slouží k dopravě a oddělení jednotlivých polymerů, a **uložení trubiček**, přes které se připojuje elektroda ke zdroji vysokého napětí. K dopravě dvou polymerních roztoků k hlavám je zapotřebí užití minimálně tří trubiček.

Při návrhu elektrody byl kladen důraz na několik kritických vlastností:

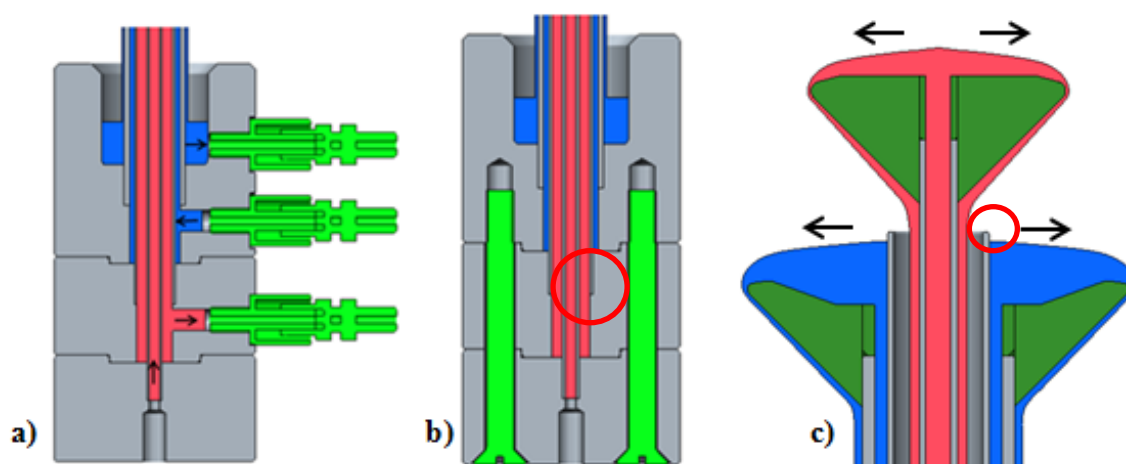
nemísitelnost polymerních roztoků, čistitelnost elektrody a rozložení intenzit elektrického pole na hlavách. Návrh má dvě kritická místa z hlediska nemísitelnosti roztoků, kterými jsou oblast zvlákňovacích hlav a uložení oddělovací trubičky. V oblasti zvlákňovacích hlav se polymerní roztoky nesmí přelévat přes oddělovací trubičku (červeně zvýrazněný detail na Obr. 3c). Jelikož horní část oddělovací trubičky není přehřívána, musí být v tzv. „elektrickém stínu“. Uložení oddělovací trubičky musí zajišťovat potřebnou těsnost, aby se polymerní roztoky nemísily (Obr. 3b). V případě netěsnosti by mohlo docházet k mísení a srážení polymerních roztoků uvnitř dopravních kanálů elektrody. Elektroda byla navržena tak, aby byla instalovatelná do zkušebního



Obr. 2 Zkonstruovaná elektroda

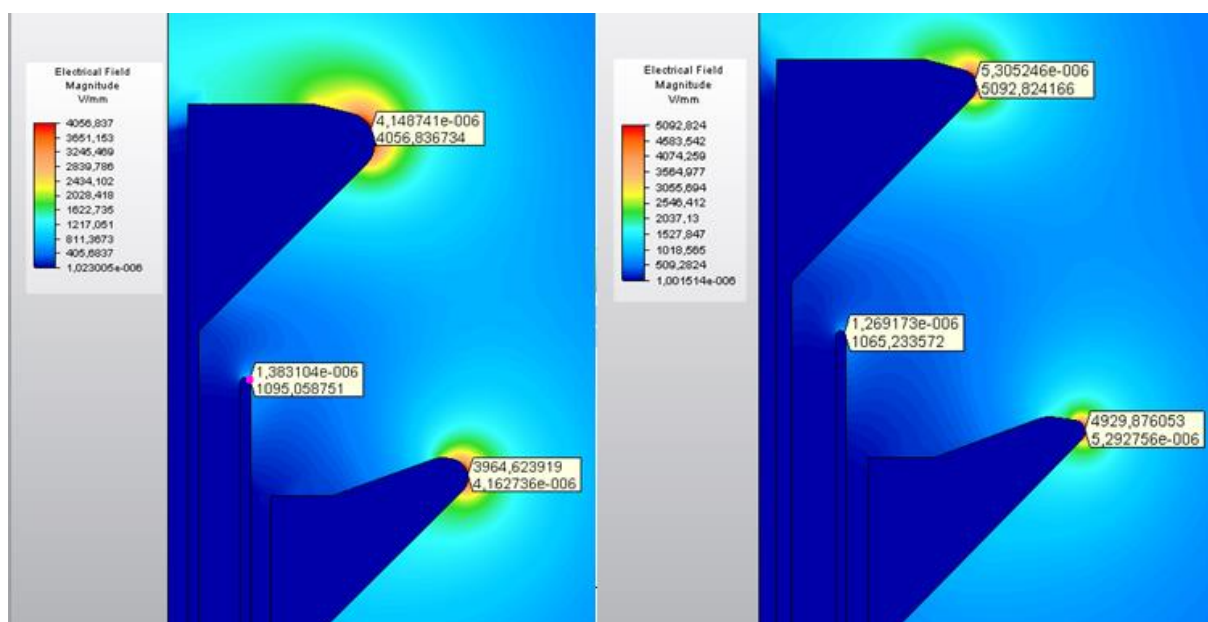
zvlákňovacího zařízení. Uložení musí dále splňovat tyto předpoklady: mít dva vstupy a dva výstupy polymerních roztoků, uložit tři sousední trubičky elektrody, zajistit nemísitelnost polymerních roztoků, a musí být snadno čistitelné.

Byl navržen rozebíratelný přípravek válcového tvaru se třemi radiálně orientovanými kanály polymerních roztoků (Obr. 3a a 3b). Jeden kanál slouží jako vstup a zbylé dva jako výstupy polymerních roztoků. Druhý vstup se nachází v ose sestavy a slouží také k upínání přípravku do zkušebního zařízení. Roztoky budou přiváděny plastovými trubičkami, k jejich připojení byly použity průmyslové hadicové spojky s velikostí závitu M5. Pro trubičky bylo použito přechodné uložení k zajištění snadného vyčištění. Celý přípravek je smontován pomocí dvojice šroubů se zápusťnou hlavou M5x50. Stažení šroubů zajišťuje dostatečnou těsnost.



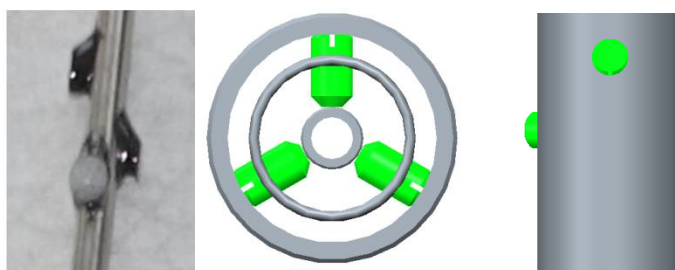
Obr. 3 Konstrukce elektrody

Zvlákňovací hlavy (Obr. 3c) byly navrženy vyměnitelné, aby bylo možné konfigurací elektrody ovlivňovat zvlákňovací proces. Mnoho parametrů zvlákňovacího procesu a výsledného materiálu je závislých na rozložení a velikosti intenzity elektrického pole na hlavách elektrody. Z toho důvodu byly zkonstruovány dvě dvojice hlav, v rámci dvojice se stejnou intenzitou elektrického pole a s rozdílem mezi dvojicemi 1000 V/mm . Záměrem bylo pomocí kombinace různých zvlákňovacích hlav ovlivňovat sktrukturu vytvořeného materiálu, tedy poměr složek a průměr vláken. Byla provedena série analýz elektrického pole metodou konečných prvků v programu Autodesk Simulation Mechanical, aby bylo dosaženo výše popsaných vlastností. Výsledky vidíme na Obr. 4



Obr. 4 Výsledné rozložení elektrické intenzity na zvlákňovacích hlavách

Důležitým aspektem návrhu je středění trubiček. V případě špatného vystředění trubiček dojde v oblasti zvlákňovacích hlav k narušení toku roztoků a jejich následnému mísení. V našem návrhu byly použity tenkostěnné nerezové trubičky o rozměrech 3x0,5mm, 8x0,5mm a 12x0,5mm ($D \times t$). Středění bylo realizováno pomocí lepidla tzv. tekutého kovu, které je po zatvrdnutí obrobitelné. Na obou vnitřních trubičkách byly vytvořeny tři kapky v různých výškách, abychom co nejméně bránili průtoku roztoku. Kapky byly vytvrzeny a následně obrobeny pro dosažení potřebného uložení do vnitřní plochy vedlejší trubičky s minimální vůlí. Ukázka středění je na Obr. 5.



Obr. 5 Středění trubiček

Tento způsob středění byl funkční, ale po dlouhodobém styku s polymerními rozpouštědly došlo k jeho odlepení. Byl tedy navržen nový způsob středění pomocí tří stavěcích šroubů M2, které byly zašroubovány radiálně do střední oddělovací trubičky tak, aby spolu v půdorysu svíraly úhel 120° a každý byl umístěn do jiné výšky.

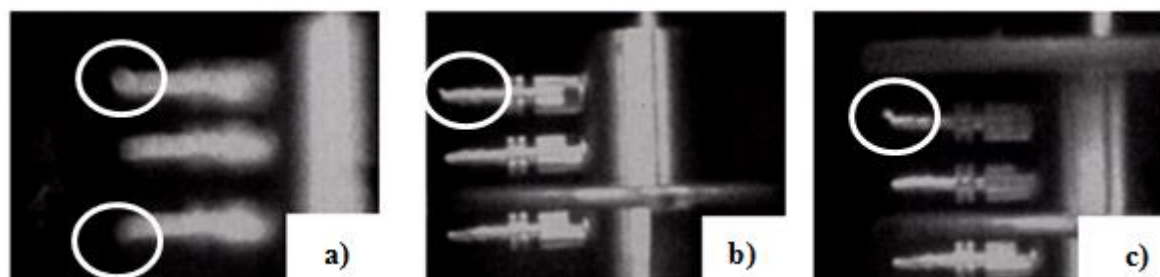
Dalšími součástmi, které byly k elektrodě navrženy, jsou plastový kryt a korónový prstenec. Korónový prstenec zabráňuje ve svém okolí korónovým výbojům. Korónový výboj je nepříznivý efekt vysokého napětí, který vzniká v místech s velkou křivostí povrchu. Tento výboj ionizuje vzduch v okolí, čím vzniká ozón a elektrické ztráty. Korónový prstenec byl zkonstruován jako kruh z měděného drátu o průměru 6 mm, ke kterému je připájený měděný plíšek, přes který se prstenec připojuje k sestavě. Plastový kryt byl navržen jako kruhová součást s otvorem a osazením uprostřed, která se pokládá na vršek upínacího přípravku a brání dopadání vláken na hadicové spojky a měla by také bránit hoření korónového výboje.

5. Testování elektrody

Funkční testy námi zkonstruované elektrody byly provedeny na testovacím zvlákňovacím zařízení. Byly testovány základní parametry zvlákňovací elektrody: vznik korónových výbojů na elektrodě, tok polymerních roztoků a zvlákňovací proces. Při testování byly použity roztoky polymerů PVB (polyvinylbutyral) a PVA (polyvinylalkohol). Během testování byly odhaleny některé nedostatky našeho návrhu, z nichž některé již byly odstraněny úpravami elektrody.

5.1. Měření korokamerou

Korokamera, nebo též UV-kamera, je zařízení, které je schopné zobrazit, zda v daném místě probíhá korónový výboj. Při našich měřeních byla použita korokamera CoroCam 6N. Měření bylo nutné provádět při provozním napětí. Na displeji korokamery se korónový výboj zobrazuje plamínkovým útvarem. Na Obr. 6 je vidět průběh měření korokamerou.



Obr. 6 Průběh měření korokamerou

Korónový výboj byl zaznamenán při napětí vyšším než 28 kV. Obr. 6a ukazuje, že při absenci korónového prstence probíhá výboj na konci horní a spodní spojky. Na Obr. 6b je vidět, že po přidání korónového prstence ustal výboj na spodní spojnici. Korónový výboj i přes přidání krytu stále hoří na konci horní spojky, což je vidět na Obr. 6c. Po připojení hadic se okolní podmínky změnila a výboj hořet přestane, protože náboj se rozšíří na plastové trubičky.

5.2. Prověřování toku polymerních roztoků

Tok polymerních roztoků byl zajišťován pomocí čtyř individuálních peristaltických pump. První dvě pumpy byly použity k dopravě roztoků na zvlákňovací hlavy a druhé dvě pumpy k jejich odsávání z elektrody zpět do rezervoáru. Ke zkouškám toku roztoků, byly využity dva roztoky PVB v etanolu o hmotnostní koncentraci 10 %, přičemž jeden z roztoků byl obarven berlínskou modří a druhý byl čirý. Roztoky byly po 10 minut volně přeplavovány přes hlavy elektrod. Po uplynutí času nebyla pozorována znatelná změna barvy čirého roztoku. Poté byly ještě prováděny pokusy se zvlákňováním a roztoky stále nejevily změnu barvy, čímž byla prokázána nemísitelnost roztoků uvnitř upínacího přípravku a dobré zvolení tolerancí v uložení trubiček. Roztoky se během zkoušek nemísily ani v oblasti zvlákňovacích hlav.

5.3. Testy zvlákňovacího procesu

Zvlákňovací proces byl prověřován nejdříve s jedním roztokem 10% PVB. Nejprve bylo testováno, zda lze zvlákňovat na každé zvlákňovací hlavě zvlášť a následně bylo vyzkoušeno zvlákňování ze dvou hlav najednou. Tento pokus byl úspěšný. Nanovlákná se vytvářela na každé elektrodě zvlášť a následně i na dvojici s nižší intenzitou elektrického pole.

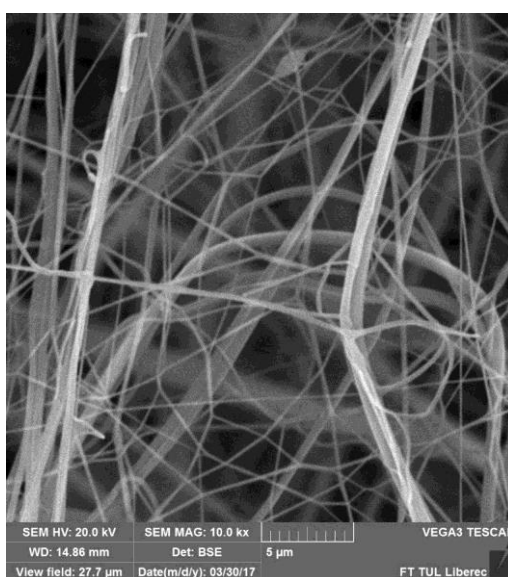
Při dalších testech již byly používány dva druhy různých polymerních roztoků. Použity byly 10% roztok PVB v etanolu a 10% roztok PVA ve vodě obarvený berlínskou modří. Tato dvojice roztoků byla zvlákňována pomocí různých konfigurací zvlákňovacích hlav. Vizually bylo ověřeno, že zvlákňovací proces probíhá na obou hlavách elektrody. Z Obr. 7 je jasné

patrné, že zvlákňovací proces probíhá na obou hlavách elektrody. Také je vidět, že na hladině vnější elektrody se formuje velké množství částic. Naše hypotéza pro tento jev je, že tyto částice vznikají vlivem intenzivního odpařování nevhodných rozpouštědel v okolí elektrody. Vzorky nanovláknenného materiálu, které jsme při pokusech získali, byly podrobeny analýze pomocí elektronové mikroskopie SEM, která byla provedena kolegy z Katedry netkaných textilií.



Obr. 7 Zvlákňování s polymerními roztoky PVB (na horní hlavě) a PVA (na spodní hlavě)

Snímky z elektronové mikroskopie však neprokázaly přítomnost dvou různých polymerních vláken. Ze snímků (viz. Obr. 8) je patrné, že ve vzorku se vyskytují vlákna velice jemná a druhá s výrazně větším průměrem, což nasvědčuje tomu, že vlákna jsou z různých materiálů. Předpokládá se, že množství použitého barviva nebylo pro prokazatelné zjištění dvou materiálů dostatečné.



Obr. 8 Snímek SEM nanovláknenného materiálu

6. Závěr

Nově zkonstruovaná elektroda prokázala schopnost zvlákňovat dva různé polymerní roztoky při stejném napětí, což ukazuje správnost návrhu geometrie zvlákňovacích hlav. Ovšem z Obr. 7 je patrné, že elektroda neumožňuje dlouhodobě zvlákňovat dvojici polymerů, jejichž rozpouštědla při zvlákňování způsobují sražení na povrchu jednoho z polymerů (aniž by byly roztoky v kontaktu). Tyto sraženiny následně zanesou hadicové spojky. Pro další experimenty budou proto použity vhodnější polymerní roztoky, resp. jejich rozpouštědla. Při experimentech bylo také zjištěno, že navržený vrcholový úhel kuželů zvlákňovacích hlav je citlivý na smáčivost a může dojít k nežádoucímu skápnutí roztoku. Pro snadnější obsluhu navrženého zařízení by bylo proto vhodné zajistit vyšší smáčivost přeplavovaného povrchu, nebo optimalizovat geometrii elektrody pro snazší přeplavení roztoku.

Literatura

- [1] **Mikeš, Petr a Lukáš, David.** *Fyzikální principy tvorby nanovláken I.* Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2015. 55-073-15.
- [2] **Pokorný, P, a další.** *Effective AC needleless and collectorless electrospinning for yarn production.* Physical chemistry chemical physics, 2014. Sv. 16. 26816-26522.
- [3] **Teo, Wee-Eong a Ramakrishna, Seeram .** *Electrospun nanofibers as a platform for multifunctional, hierarchically organized.* Composites Science and Technology. [Online] 1.12.2008.[Citace:21.4.2017.] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353809001651>.
- [4] **Vysloužilová, Lucie, a další.** *Design of coaxial needleless electrospinning electrode.* Applied Mechanics and Materials. [Online] 1. 12. 2014. [Citace: 21. 4. 2017.] <http://citeseerx.ist.psu.edu>.
- [5] **Batka, Ondřej.** *Zařízení na výrobu jádrové příze.* Liberec : Diplomová práce, Technická Univerzita v Liberci, 2015.
- [6] **Skřivánek, Josef, a další.** *Design of electrode for coaxial electrospinning.* Nanocon, Brno : Technical university of Liberec, 2016.

STROJÍRENSTVÍ

navazující a doktorský studijní program

OPTIMALIZACE VZTAHU ÚDRŽBY, KVALITY A VÝROBY V ORGANIZACI

Čečák Petr

Sekce - Strojírenství,
Fakulta strojní, 2. ročník
Magisterský studijní program – Výrobní systémy a procesy

Abstrakt: Tato práce se zaměřuje na optimalizaci vztahu výroby, kvality a údržby v organizaci. V teoretické části se práce zabývá aktuálními trendy v oblasti vývoje matematických modelů pro prediktivní údržbu, dále implementaci totálně produktivní údržby a vztahu Průmyslu 4.0 a údržby zařízení v organizaci. Praktická část práce je zaměřena na optimalizaci tohoto vztahu pomocí optimalizace údržby strojních součástí mající největší vliv na vznik neshodného dílu

Klíčová slova: Údržba, Kvalita, Snímač, Průmysl 4.0, CEZ

1. Úvod

Jak začít tuto práci. Nejlepším začátkem této práce je úvaha nad tím, co pro člověka znamená kvalita produktu. Na tuto úvahu se pohledy liší jako noc a den. Pro některé při slově kvalita okamžitě napadne ta negativní část a to nekvalita. Tato nekvalita je pro uživatele spojena s problémy, poruchami, zdržením. Bohužel je tento pohled na kvalitu nejvíce spojován s firmami z Asie. Tento fenomén nekvality se bohužel již ale stále více přesouvá i do Evropy. Naštěstí existuje ještě druhá strana mince a to kvalita. Pod pojmem kvalita si lidé spojují pojmy jako bezporuchovost, kvalitní dílenské zpracování, spolehlivost. Tyto všechny jmenované vlastnosti si uživatelé spojují například s německými automobily nebo švýcarskými hodinkami. V této části nejde opomenout zemi, ve které se pojem kvalita v současném chápání zrodil a to Japonsko. Po válce se japonské automobilky upnuly k maximální kvalitě svých produktů. Nejproslulejší svou kvalitou vozů je firma Toyota. Firma Toyota je průkopníkem ve kvalitě produktů a řízení firemních procesů.

Hlavní motivací pro tvorbu této práce byly autorovy osobní zkušenosti z organizace a snaha o napravení vztahu mezi jednotlivými odděleními. Cílem této diplomové práce je optimalizace vztahu údržby, kvality a výroby v organizaci. Pomocí optimalizace tohoto vztahu lze dosáhnout snížení množství neshodných dílů v organizaci. Optimalizací údržby zařízení v organizaci lze dosáhnout zlepšení vztahů mezi jednotlivými odděleními organizace.

2. Definice pojmů

Pro další pokračování v práci je nutné definovat následující pojmy:

Údržba - Pojem údržba definuje norma ČSN EN 13 306:2002 jako: „... kombinaci všech technických, administrativních a manažerských činností během životního cyklu stroje s cílem navrátit zařízení do stavu, v němž bude moci dále vykonávat činnost, na kterou byl určen“ [21]. Problematika údržby je natolik obsáhlá, že ji bude věnována celá kapitola této práce, kde budou rozvedeny různé možnosti řízení údržby.

Neshodný díl - se v této práci definuje jako díl, který nesplňuje kvalitativní požadavky zákazníka. V práci budou dále rozvedeny příklady neshodných dílů i s příčinami vzniku neshod [23].

Proces - se chápe jako soubor vzájemně působících činností, které mění vstupní materiál na hotové výrobky. Všechny procesy musí obsahovat pouze činnosti, které přidávají hodnotu výslednému produktu. [1] [3] [5]

Procesní přístup - Procesní přístup je jeden ze způsobů, jak řídit procesy v organizaci. Zaměřen je oproti funkčnímu přístupu horizontálně. Uspořádává po sobě jdoucí činnosti v procesy, které mají konkrétního dodavatele a odběratele nezávisle na tom, zdali je proces na začátku výroby dílu, uprostřed výroby nebo na jejím konci. Takto provázané procesy lze zakreslit do procesní mapy (Obrázek 1). Tato mapa má odpovídat i pružné organizační struktuře. [2] [3] [4] [5]

3. Údržba

Typů přístupu rozeznáváme několik jako například preventivní údržba, prediktivní údržba nebo údržba po poruše. Jako speciální metodou přístupu k údržbě je TPM.

Preventivní údržba - Tento typ je založen na předem stanovené frekvenci údržby nebo kontroly stavu zařízení. Pro optimální nastavení této frekvence je nezbytně nutné statistické sledování nutnosti údržby. Bez tohoto sledování nelze nalézt optimální poměr mezi náklady na údržbu a náklady při případné poruše zařízení. Při špatném nastavení frekvence může docházet ke zbytečným údržbářským úkonům a tím navyšovat cenu výsledného výrobku. [1]

Údržba podle předpokládaného stavu zařízení - neboli také **Prediktivní údržba**. Využívá také snímače fyzikálních vlastností stroje, zprávy od údržby, obsluhy a dalších. Pro získávání dat se využívá technická diagnostika stroje. Takto nasbíraná data se statisticky vyhodnocují, aby se našel optimální interval výměny dané součásti. Tento přístup k údržbě je rozvedením Údržby dle stavu zařízení. [1]

Údržba po poruše - Tento přístup k údržbě je nejstarším přístupem k údržbě zařízení. Hlavní výhodou tohoto přístupu je, že se využívá celý fond životnosti zařízení. Mezi nevýhody tohoto přístupu patří neplánované dlouhodobé odstávky, vysoké zásoby náhradních dílů. V následující tabulce jsou shrnuty hlavní výhody a nevýhody tohoto přístupu. [1]

TPM - neboli Totálně Produktivní Údržba je produktem japonské firmy Toyota a jde spíše o celkovou fylozofii než přímo o metodiku. TPM spočívá v 5ti základních pilířích a to koeficientu CEZ, tréninku pracovníku údržby, autonomní údržbě a plánování preventivní údržby.[1]

4. Literární rešerše

Tato literární rešerše je rozdělena do třech částí a to matematické modely pro prediktivní údržbu, implementace TPM ve výrobních závodech a vztahu průmyslu 4.0 a údržby.

4.1. Matematické modely

V této části se matematické modely vyvíjí ve dvou hlavních proudech a to pro pronajaté vybavení nebo vybavení zakoupené na leasing a druhý proud se zabývá tvorbou matematických pro prediktivní údržbu z různých úhlů pohledu jako například věk součásti degradace systému, stylu kontrolních plánů. Autoři ve studiích zabývající se pronajatým vybavením nebo leasingově zakoupeným vybavením se snaží nalézt ideální strategii pro údržbu zařízení. Autoři v textu [6] řeší údržbu zařízení při prodloužení záruky. Autoři v článku [7] studují využití prediktivní údržby pro pronajaté zařízení.

Autoři v textech [8][9][10][11][12] rozvíjí matematické modely pro prediktivní údržbu z nejrozličnějších úhlů pohledu. Autoři se snaží nalézt ideální matematický model pro prediktivní údržbu. V textu [8] se autoři zabývají nalezením ideálního modelu při zvážení zda-li je aktuálně nastavený systém údržby dokonalý nebo nedokonalý. Rozvádí podmínky, za kterých lze nedokonalý systém údržby považovat za dokonalý a dále navrhuje ideální strategii údržby pro zbytkovou životnost součásti. V práci [10] autoři rozvádí využívání matematických modelů pro preventivní údržbu a porovnávají je s modely pro prediktivní údržbu. Na nevhodné navržené systémy údržby zařízení v organizacích se zaměřuje práce [11]. Na základě studia stávajících modelů autoři navrhuje optimalizace těchto stavů. V práci [12] autoři rozepisují využití matematických modelů pro skupiny dílů v zařízení.

4.2. Implementace TPM

Z provedené literární rešerše vyplývá, že implementace TPM je dlouhodobá záležitost, protože se nejedná jen o zavedení několika metod, ale jde o komplexní změnu uvažování výrobních pracovníků i vedení společnosti [15] [16] [17]. Z článků [13] a [14] lze vyčíst, že TPM má vliv nejen na produktivitu pracoviště, ale i na snížení ekologického dopadu výroby. Značné rozdíly ve využití prvků TQM autoři [18] zjišťují mezi japonskými a nejaponskými organizacemi výrobními závody ve vybrané oblasti.

4.3. Vztah Průmyslu 4.0 a údržby

Prof. Legát v rozhovoru v článku [19] rozvádí myšlenku o implementaci metod Průmyslu 4.0. V současné době je dle něj ještě krátká doba od vydání brožury Ministerstva průmyslu a obchodu o Průmyslu 4.0 (vydána v září 2015). Jako největší přínos vidí přechod od údržby preventivní a po poruše k údržbě prediktivní a proaktivní. Jako největší problém zatím zmiňuje nepřípravenost firem od nejvyššího managementu přes střední management až po obvyčejné zaměstnance podniku.

Autoři v textu [20] uvažují, zdali je prediktivní údržba opravdu klíčovým faktorem k úspěšné implementaci Průmyslu 4.0, nebo zda je to jen módní vlna přiživována prodejci senzorů a celých řešení pro údržbu. Autoři provádí průzkum ve firmách, kde pokládají dotaz, zdali podniky cítí zvýšenou potřebu zavádění prediktivní údržby. 41% respondentů odpovědělo, že cítí zvýšenou potřebu a dalších 41% tuto potřebu cítí již delší dobu.

Další částí průzkumu v textu [20] ve firmách bylo zkoumání využívání typů údržby v podnicích. Výsledky ukazují, že přes 87,7% firem využívá preventivní údržbu a 80,7% využívají reaktivní údržbu (údržba po poruše). Pouze 54,4% firem využívá prediktivní údržbu.

Dále se autoři v [20] dotazovali firmem, zda cítí vliv Průmyslu 4.0 na oblast údržby. Pouze 19% respondentů uvádí, že cítí vliv Průmyslu 4.0 na údržbu, 15,8% respondentů netuší, co je to Průmysl 4.0 a 36,8% respondentů necítí vliv na oblast údržby. Tyto výsledky jsou potvrzením slov prof. Legáta o nedostatečné připravenosti firem na Průmysl 4.0 v článku [19]

5. Organizace

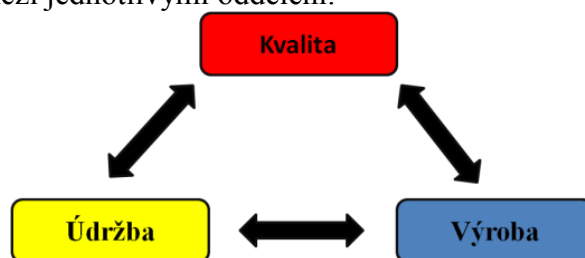
Tato práce je zpracovávána v organizaci ve Východních Čechách. Počet zaměstnanců je 150 a organizační struktura organizace je liniová. Výrobním programem je obrábění držáků brzdových třmenu a druhotným výrobním programem je obrábění přesných strojních součástí dle požadavků zákazníka (Obrázek 1). Výrobní proces probíhá na strojích a v přípravcích vlastní konstrukce. Organizace disponuje certifikacemi dle norem - ČSN EN ISO 9001:2009 a ISO/TS 16949:2009 [24][25].



Obrázek 1 - Výrobní program podniku [22]

6. Vztah reklamací produkce a údržby zařízení

V každé výrobní společnosti probíhá neustálý boj mezi výrobou, údržbou a kvalitou. Úkolem vedení podniku je nalézt ideální kompromisní stav, ve kterém jsou náklady na jednotlivé oddělení minimální a mezi jednotlivými oddělení.



Obrázek 2 - Trojúhelník vztahů [23]

Z obrázku (Obrázek 2) je vidět, že každé oddělení ve firmě má vliv na ostatní oddělení ve firmě. Tuto část práce je nutné rozdělit na tři části a to:

- Vztah kvalita - údržba
- Vztah kvalita - výroba
- Vztah výroba - údržba

6.1. Vztah kvalita - údržba

Tento vztah není tolik komplikovaný jako ostatní vztahy. Pracovníci kvality i pracovníci údržby jsou tzv. režijní pracovníci, tudíž nedochází ke konfliktům, že jedno oddělení brzdí to druhé, viz vztah výroba - údržba. Jak bude v další části práce rozepsáno, tak kvalita a údržba spolu úzce spolupracují při údržbě přípravků.

6.2. Vztah kvalita - výroba

Tento vztah je komplikovanější než vztah kvalita - údržba. Zde již dochází ke střetům zájmů jednotlivých oddělení, protože každé oddělení je financováno jinak. Kvalita je placena režijně, ale výroba je placena od produkce. Z tohoto vychází první střet zájmů a to výroba chce maximálně vyrábět bez ohledu na výslednou kvalitu produktu, ale naproti tomu stojí kvalita, v jejímž zájmu je také maximálně vyrábět, ale ne za cenu neshodných dílů.

6.3. Vztah výroba - údržba

Tento vztah se velice podobá vztahu kvalita - výroba. Jedná se i zde o konflikt ve financování jednotlivých oddělení. Zde dochází ke konfliktům o údržbu výrobních zařízení. Výroba při ohledu na financování nerada uvolňuje stroje k údržbě, protože dochází k ztrátám produkce. Údržba naopak požaduje po výrobě, aby uvolňovala stroje z výroby pro provedení plánované údržby.

6.4. Zhodnocení

Při prostudování jednotlivých vztahů lze v rámci této práce zjednodušit na vztah údržba + kvalita - výroba (Obrázek 3).



Obrázek 3 - Zjednodušený trojúhelník vztahů [32]

7. Vstupní analýza dat

Na základě studia vztahů jednotlivých oddělení a prozkoumání Knihy separátoru do nichž se zapisují neshodné díly bylo vybráno jako nejlepší optimalizace neshodnosti produkce v organizaci. Bylo provedena analýza neshodnosti s následujícími výsledky. Cíl nastavený vedením organizace jsou 0,2% neshodných dílů za kalendářní rok. Výsledky organizace jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 1).

Tabulka 1 - Neshodnost výroby 2013-15

	POČET N.D.	VYROBENO	NESHODNOST
2013	12430	2189686	0,57%
2014	8881	2310537	0,38%
2015	10385	2268652	0,46%
CELKEM	31696	6768875	0,47%
PRŮMĚR	10565	2256292	0,47%

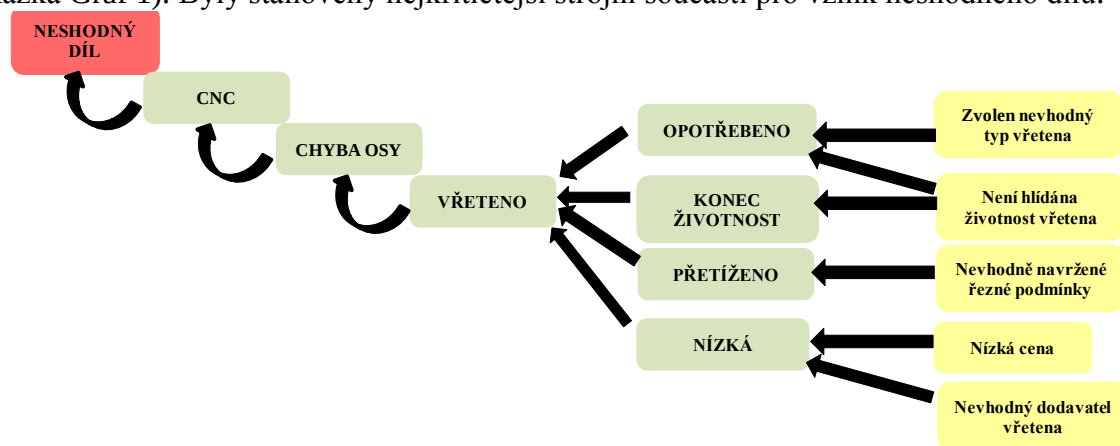
Pro další vyhodnocení byla vypočtena i celková finanční náročnost neshodnosti pro organizaci za tyto roky (Tabulka 2).

Tabulka 2 - Statistika nákladů na interní reklamace

Statistika nákladů na interní reklamace						
Rok	N.D	CNC	NÁSTROJ	PŘÍPRAVEK	SEŘÍZENÍ	SUMA
2013	12430	296 570,46 Kč	89 364,84 Kč	98 282,13 Kč	177 831,42 Kč	662 048,85 Kč
2014	8881	274 910,13 Kč	64 006,15 Kč	102 596,65 Kč	83 166,37 Kč	524 679,30 Kč
2015	10385	322 755,11 Kč	75 103,10 Kč	106 148,20 Kč	83 146,12 Kč	587 152,53 Kč
Průměr	10565	298 078,57 Kč	76 158,03 Kč	102 342,33 Kč	114 714,64 Kč	591 293,56 Kč
CELKEM	31696	894 235,70 Kč	228 474,09 Kč	307 026,98 Kč	344 143,91 Kč	1 773 880,68 Kč

8. Závěr ze vstupní analýzy dat

Po provedení Paretovy analýzy a na základě rozřídění jednotlivých neshod dle příčiny zavinění dané neshody dále zkoumány (CNC, přípravek, nástroj, slévárenská vada a člověk) Po vyřídění nerelevantních výstupů z Paretovy analýzy (seřízení, chyba člověka a slévárna) byl vypracován diagram příčin a následku dále byl proveden příčně následkový řetězec (ukázka Graf 1). Byly stanoveny nejkritičtější strojní součásti pro vznik neshodného dílu.



Graf 1 - Příčně následkový řetězec

Na základě těchto analýz byla sestavena následující tabulka (Tabulka 2) kde jsou jednotlivé kritické faktory ohodnoceny pomocí vícekritériální analýzy.

Tabulka 3 - Výsledné hodnocení kritických faktorů

Pořadí	Problém	Výsledné hodnocení
1	Není hlídána životnost součástí stroje	8,2
2	Údržba neprovedla opravu přípravku	7,2
3	Není hlídán stav nástroje	7,0
4	Nevhodný systém údržby částí stroje	7,0
5	Porucha přípravku	6,4
6	Obsluha neplní předepsanou údržbu stroje	6,2
7	Nedostatečný interval údržby	6,0
8	Obsluha neprovedla kontrolu přípravku	5,2
9	Údržba neprovedla kontrolu stroje	4,4
10	Seřizovač neočistil nástroj před vložením do stroje	4,4
11	Porucha mazacího hospodářství stroje	3,4
12	Porucha hydraulického systému přípravku	3,4
13	Porucha řídicího systému	2,8
14	Využívání nástrojů nad životnost	2,6
15	Záměna vybavení	1,8

9. Návrhy na zlepšení

Na základě těchto analýz byly navrženy dvě varianty monitorování následujících součástí (Vřeteno Čerpadlo chlazení a hydrauliky, Hydraulický a chladicí systém, Kuličkový šroub, Upínací přípravek). První variantou zlepšení je monitoring pomocí průmyslových snímačů a druhým je klasické monitorování stroje pomocí SPC, neshodnosti, koeficientu CEZ, monitorování strojního času a pochůzkovém systému.

9.1. Pomocí snímačů

Snímači se osadí pouze kritické součásti (viz výše) a monitorovány budou pomocí fyzikálních veličin. Na tomto základě lze následně predikovat pomocí matematického modelu stav součásti nebo přímo na základě těchto dat lze součást opravit nebo vyměnit. Pro monitoring stavu stroje byl navrženo celkové řešení obsahující snímání všech kritických strojních součástí. Pro monitoring čerpadel byly navrženy dvě varianty a to pomocí teploty na povrchu čerpadla a pomocí měření spotřeby elektrického proudu, které má výhodu v multifunkčnosti (lze využít i při snižování spotřeby el. proudu v organizaci). Z těchto možností monitorování čerpadel byl díky jeho multifunkčnosti vybrán postup měření spotřeby proudu. V následující tabulce (Tabulka 3) jsou uvedeny všechny součásti i s fyzikálními principy na jejichž základě se monitoring provádí. Firma využívá stroje dvou typů konstrukce a to vertikální a horizontální osy vřetena.

Tabulka 4 - Finanční náročnost

Součást	Princip	Cena
Vřeteno	Vibrace	72 212 Kč
Kuličkový šroub - Horizontální osa	Vibrace	94 452 Kč
Kuličkový šroub - Vertikální osa	Vibrace	110 572 Kč
Kapalinové hospodářství stroje	Spotřeba proudu a průtok kapalin	140 000 Kč

Celkem organizace potřebuje tímto monitoringem osadit 21 CNC frézek. Při započtení počtu strojů s horizontální a s vertikální osou vychází celkové náklady na 7 142 264 Kč. Návratnost investice nelze s určitou přesností stanovit, protože je velice obtížné stanovit účinnost navrhovaného systému. Průměrné náklady na interní reklamace jsou 476 579 Kč za rok při zvážení pouze ceny odlitků a při zvážení ceny hotových výrobků 865 623 Kč je na zvážení,

zdali se tento systém vyplatí jako komplet, nebo by bylo ekonomičtější vybrat jen část a tu aplikovat.

9.2. Klasické monitorování

Jako druhou variantou možnosti monitorování strojních součástí je klasické sledování výrobních ukazatelů, strojních časů a kontroly těsnosti kapalinového vedení. V rámci práce byl vytvořen vyhodnocovací skript pro SPC. Tento skript se spouští v intervalech 1x týden (Týdenní SPC report) a 1x měsíc (Měsíční SPC report). Tento skript zpracovává naměřená data ze souřadnicového měřicího stroje, který odesílá náměry jednotlivých dílů do databáze. Skript je umístěn na serveru organizace kde se v pravidelných intervalech spouští. Takto zpracované reporty slouží pro odhalení blížícího se problému. Dále tyto reporty mohou sloužit seřizovačům výroby ke korekcím na strojích.

Pro zefektivnění zapisování neshodných dílů byla vytvořena webová aplikace do které zapisuje vedoucí kontroly neshodné díly. Tato aplikace byla opatřena i tiskovými sestavami aby každý s oprávněním přístupu mohl nahlížet do databáze neshodných dílů organizace. Tiskové sestavy byly optimalizovány dle výsledků této práce a tedy byla vytvořena tisková sestava pro neshody zaviněné strojem, přípravkem, nástrojem a pro vedoucího kontroly neshody zaviněné pracovníkem. Na následujícím obrázku (Obrázek 4) je ukázka zápisu neshody do databáze a vyhodnocovacího skriptu pro SPC, možnosti práce s knihou a ukázka tiskové sestavy.

Kniha separatoru

Vložení neshody

Datum:

Typ výrobku:

Počet neshodných dílů:

Příčina neshody:

Seřizovač:

Obsluha:

Zaviněno :

Operace zachycení neshody:

Stroj zachycení neshody:

Operace vzniku neshody:

Stroj vzniku neshody:

Číslo hlášení neshody:

Rozměr:

Vypořádání:

Kontrolor:

Směna:

```

57 dotaz=""
58 dotaz=dotaz+"SELECT * FROM PROVOZ WHERE"
59 dotaz=dotaz+" S_DATUM>='"+DATUM$DATUMOD+"' AND"
60 dotaz=dotaz+" S_DATUM<='"+DATUM$DATUMDO+"' AND"
61 dotaz=dotaz+" S_ID='"+VYROBK$VYROBER+"' AND"
62 dotaz=dotaz+" OPERATOR IN ('+scnc+') "
63 dotaz=dotaz+" ORDER BY S_DATUM, S_CAS"

```

Kniha separátoru

Možnosti práce s knihou

Základní pracovní prvky

Zápis neshody

Náhled do knihy

Založení nového účtu

Tiskové sestavy

Neshody za poslední měsíc

Neshody za poslední rok

Neshody zaviněné strojem

Neshody zaviněné přípravkem

Neshody zaviněné nástrojem

Neshody zaviněné lidmi

Odhlásit!

Kniha separátoru

Neshody zaviněné strojem

Výroba	Počet neshod	Stroj zachycení	Stroj vzniku
205489	3	19	15
205489	8	19	14
205489	3	9	15

Obrázek 4 - Zjednodušený trojúhelník vztahů

Další možností jak monitorovat stav strojů je výpočet koeficientu CEZ (Celková efektivita zařízení). Díky tomuto koeficientu lze ideálně porovnávat jednotlivé výrobní stroje mezi sebou a na základě něj lze i finančně hodnotit údržbu. Lze jej využít i pro dlouhodobý monitoring trendů produktivity jednotlivých strojů. Správným nastavením cílu lze pracovníky motivovat. V opačném případě dojde k demotivaci pracovníků, protože cíl nastavený vedením nelze splnit. Návržnost finanční investice na tuto variantu nelze určit, protože všechny tyto části zlepšení byly vytvořeny v rámci organizace.

9.3. Změna přístupu k údržbě

Na základě jedné nebo druhé varianty zlepšení lze přesněji předpovídat stav strojních součástí. Díky tomuto monitoringu lze přesněji naplánovat údržbu daného stroje a tím snížit neshodnost produkce. Nejpodstatnější pro snížení neshodnosti je změna uvažování lidí o práci. TPM jako jeden ze svých pilířů má autonomní údržba. To spočívá v přenesení odpovědnosti za běžné údržbářské práce na obsluhu jednotlivých strojů a tím uvolnit ruce údržbě pro provádění sofistikovanější práce. Procesní přístup také přenáší část kompetencí z vedení firmy na obsluhy strojů. V současném rozložení organizace jsou pracovníci bez větší odpovědnosti za odvedenou práci a všichni pracovníci jsou hodnoceny dle stejných podmínek bez větších rozdílů. Pracovníci jsou demotivováni k lepším výkonům, protože i přes zvýšenou aktivitu v údržbě strojů, zvýšené samostatnosti nebo zvýšené produkci nejsou lépe ohodnoceni než ostatní pracovníci.

10. Závěr

Cílem této práce bylo optimalizovat vztah údržby, produkce a kvality v organizaci. Ze zkušeností autora s poměry těchto oddělení bylo vybráno zaměření na snížení neshodnosti výroby v organizaci. Pro vstupní analýzu byly vybrány záznamy o neshodnosti produkce firmy v podobě Knihy separátoru. Na základě analýz byly stanoveny kritické strojní součásti mající největší vliv na vznik neshodného dílu. Pro minimalizaci vlivu těchto součástí na neshodnost výroby byly navrženy dvě varianty jak predikovat jejich stav. Na základě této predikce lze následně upravovat a plánovat údržbu součástí. První variantou možnosti monitorování stavu bylo využití snímačů fyzikálních veličin. Tato varianta poskytuje velice přesné a kvalitní výsledky. Pro implementaci celého tohoto monitoringu na všech 21 strojů v organizaci je třeba vyčlenit částku 7 142 264 Kč. Druhou variantou možností monitoringu je klasické sledování stavu strojní součásti pomocí SPC, vyhodnocování neshodnosti, monitoring strojního času, těsnosti vedení a monitorování koeficientu CEZ. Při implementaci těchto zlepšení dojde i ke zlepšení vztahu údržby, kvality a výroby v organizaci. Díky tomuto zlepšení se sníží počet neshodných dílů, tím dojde ke zlepšení vztahu kvality a výroby, dále dojde k možnostem predikovat případné problémy na stroji a možnosti lépe plánovat odstávky zařízení.

ZDROJE

- [1] LEGÁT, V. *Management a inženýrství údržby*. Praha: Professional Publishing, 2013. ISBN 978-807-4311-192
- [2] VEBER, J., M. HŮLOVÁ a A. PLÁŠKOVÁ. *Management kvality, environmentu a bezpečnosti práce: legislativa, systémy, metody, praxe*. Praha: Management Press, 2006. ISBN 80-726-1146-1.
- [3] PELANTOVÁ, V. aj. HAVLÍČEK. *Integrace a systémy managementu: [monografie]*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-164-1.
- [4] JURAN, J. M. a Joseph A. DE FEO. *Juran's quality handbook: the complete guide to performance excellence*. 6th ed. New York: McGraw Hill, c2010. ISBN 00-716-2973-4.
- [5] MAŠÍN, Ivan a Petr LEPŠÍK. *Analytické a kreativní postupy v údržbě strojů a zařízení*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-224-2.

- [6] HAJEJ, Zied, Nidhal REZG a Ali GHARBI. *A Decision Optimization Model for Leased Manufacturing Equipment with Warranty under Forecasting Production/Maintenance Problem* [online]. [cit. 2017-02-13]. DOI: 10.1155/2015/274530. ISBN 10.1155/2015/274530. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/mpe/2015/274530/>
- [7] ALASWAD, Suzan, Yisha XIANG a Ali GHARBI. *A review on condition-based maintenance optimization models for stochastically deteriorating system* [online]. [cit. 2017-02-13]. DOI: 10.1016/j.res.2016.08.009. ISBN 10.1016/j.res.2016.08.009. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0951832016303714>
- [8] DO, Phuc, Alexandre VOISIN, Eric LEVRAT a Benoit IUNG. *A proactive condition-based maintenance strategy with both perfect and imperfect maintenance actions* [online]. [cit. 2017-02-13]. DOI: 10.1016/j.res.2014.08.011. ISBN 10.1016/j.res.2014.08.011. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095183201400204X>
- [9] CABALLÉ, N.C., I.T. CASTRO, C.J. PÉREZ a J.M. LANZA-GUTIÉRREZ. A condition-based maintenance of a dependent degradation-threshold-shock model in a system with multiple degradation processes. *Reliability Engineering* [online]. 2015, **134**, 98-109 [cit. 2017-02-13]. DOI: 10.1016/j.res.2014.09.024. ISBN 10.1016/j.res.2014.08.011. ISSN 09518320. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0951832014002403>
- [10] HE, Kai, Lisa M. MAILLART, Oleg A. PROKOPYEV a J.M. LANZA-GUTIÉRREZ. Scheduling Preventive Maintenance as a Function of an Imperfect Inspection Interval. *Reliability Engineering* [online]. 2015, **134**, 98-109 [cit. 2017-02-23]. DOI: 10.1109/TR.2015.2417153. ISBN 10.1109/TR.2015.2417153. ISSN 09518320. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7091969/>
- [11] DUAN, Chaoqun, Chao DENG, Kui WANG a J.M. LANZA-GUTIÉRREZ. A reliability based model to optimize phased sequential preventive maintenance with considering maintenance resources. *Reliability Engineering* [online]. 2015, **134**, 98-109 [cit. 2017-02-23]. DOI: 10.1109/ICIEA.2015.7334408. ISBN 10.1109/ICIEA.2015.7334408. ISSN 09518320. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7334408/>
- [12] SHAFIEE, Mahmood, Maxim FINKELSTEIN, Kui WANG a J.M. LANZA-GUTIÉRREZ. An optimal age-based group maintenance policy for multi-unit degrading systems. *Reliability Engineering* [online]. 2015, **134**, 98-109 [cit. 2017-02-23]. DOI: 10.1016/j.res.2014.09.016. ISBN 10.1016/j.res.2014.09.016. ISSN 09518320. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0951832014002324>
- [13] BELEKOUKIAS, Ioannis, Jose Arturo GARZA-REYES, Vikas KUMAR a Tiedo TINGA. The impact of lean methods and tools on the operational performance of manufacturing organisations. *Reliability Engineering* [online]. 2015, **134**, 98-109 [cit. 2017-03-05]. DOI: 10.1080/00207543.2014.903348. ISBN 10.1080/00207543.2014.903348. ISSN 09518320. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207543.2014.903348>
- [14] CHIARINI, Andrea, Jose Arturo GARZA-REYES, Vikas KUMAR a Tiedo TINGA. Sustainable manufacturing-greening processes using specific Lean Production tools: an empirical observation from European motorcycle component manufacturers. *Reliability Engineering* [online]. 2015, **134**, 98-109 [cit. 2017-03-05]. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.07.080. ISBN 10.1016/j.jclepro.2014.07.080. ISSN 09518320. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652614008087>

- [15] SINGH, Ranteshwar, Ashish M. GOHIL, Dhaval B. SHAH a Sanjay DESAI. Total Productive Maintenance (TPM) Implementation in a Machine Shop: A Case Study. *Reliability Engineering* [online]. 2015, **134**, 98-109 [cit. 2017-03-05]. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.01.084. ISBN 10.1016/j.proeng.2013.01.084. ISSN 09518320. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705813000854>
- [16] SUKARMA, Lukman, Hafizah AZMI, Nurlisa Loke ABDULLAH a Sanjay DESAI. The Impact of World Class Manufacturing Practices on Company Performance: A Critical Review. *Reliability Engineering* [online]. 2015, **134**, 98-109 [cit. 2017-03-05]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.564.727. ISBN 10.4028/www.scientific.net/AMM.564.727. ISSN 09518320. Dostupné z: <http://www.scientific.net/AMM.564.727>
- [17] ATTRI, Rajesh, Sandeep GROVER, Nikhil DEV a Deepak KUMAR. Analysis of barriers of total productive maintenance (TPM): A Critical Review. *Reliability Engineering* [online]. 2015, **134**, 98-109 [cit. 2017-03-03]. DOI: 10.1007/s13198-012-0122-9. ISBN 10.1007/s13198-012-0122-9. ISSN 09518320. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s13198-012-0122-9>
- [18] AHMAD, Md. Fauzi Bin, Sha'ri Mohd YUSOF, Nikhil DEV a Deepak KUMAR. Comparative study of TQM practices between Japanese and non-Japanese electrical and electronics companies in Malaysia: Survey results. *Reliability Engineering* [online]. 2015, **134**, 98-109 [cit. 2017-03-05]. DOI: 10.1080/14783360903492520. ISBN 10.1080/14783360903492520. ISSN 09518320. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14783360903492520>
- [19] "Přínos implementace výzvy Průmysl 4.0 do procesů údržby ke zvýšení konkurenceschopnosti podniků je evidentní," [online]. Praha: AF POWER agency, 2016 [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/clanek/prinos-implementace-vyzvy-prumysl-4-0-do-procesu-udrzby-ke-zvyseni-konkurenceschopnosti-podniku-je-evidentni/>
- [20] *Prediktivní údržba 4.0: Nesmysl, nebo nezbytnost?* [online]. Český Těšín: Trade Media International, 2017 [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: <http://udrzbaPodniku.cz/hlavni-menu/artikuly/artikul/article/prediktivni-udrzba-40-nesmysl-nebo-nezbytnost/>
- [21] *Norma ČSN EN 13 306:2002 - Terminologie údržby*. Praha: ÚNMZ, 2002.
- [22] Firemní dokument
- [23] Vlastní dokument
- [24] *Norma ČSN EN ISO 9001:2009 Systém managementu kvality - požadavky*. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [25] *Norma ČSN P ISO/TS 16494:2009 Systémy managementu kvality – Zvláštní požadavky na používání ISO 9001:2008*. Praha: ÚNMZ, 2009.

INOVACE ZAŘÍZENÍ PRO APLIKACI PĚNOVÉHO TĚSNĚNÍ

Čech Jiří

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,
Fakulta strojní, 2. ročník
Navazující studijní program – STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

Abstrakt: Tato práce pojednává o inovaci zařízení pro aplikaci pěnového těsnění ve společnosti Denso Manufacturing s.r.o. V práci je popsán průběh inovačního procesu počínaje analýzou stávajícího řešení, přes systematický návrh konceptů řešení, až po výběr finálního návrhu řešení. Volba finálního návrhu probíhá na základě definovaných kritérií a hodnocení schopnosti jednotlivých konstrukčních variant dané funkce plnit. Dále je v práci proveden kompletní návrh zvoleného konceptu. Závěrem práce je vyhodnocení přínosů tohoto zařízení a ekonomické zhodnocení.

Klíčová slova: inovace, lepení, automatizace, pneumatické systémy

Úvod

Značný technologický pokrok a příznivé hospodářské podmínky v posledních letech s sebou přináší rapidní nárůst objemu výroby. S tímto nárůstem vzrůstá také poptávka firem po kvalitní pracovní síle, které je však na trhu práce akutní nedostatek. Z tohoto důvodu, jsou společnosti nuceny hledat cesty, jak efektivněji využívat lidskou práci svých zaměstnanců. Tento přístup vede k optimalizaci a zeštíhlování výrobních procesů, odstraňování plýtvání, prostojů a neefektivních činností ve výrobě.

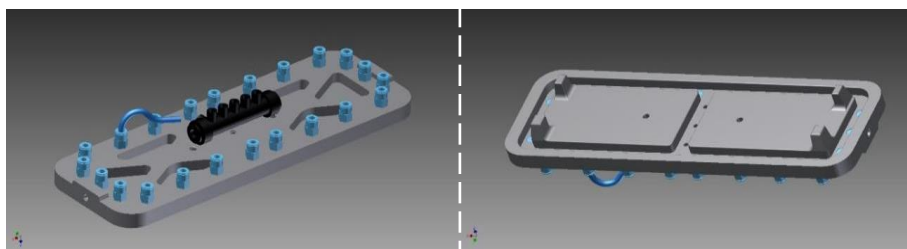
1 Technické zadání a cíle práce

Cílem této práce je navrhnout inovaci přípravku pro lepení pěnového těsnění na výduchy klimatizačních jednotek. Automatizací pracoviště, v rámci optimalizace výrobní linky, lze docílit odebrání 1 operátora. Je požadováno zkrácení času aplikace pěnového těsnění minimálně o 5 % vůči aktuálnímu času operátora, který je 11,5 s. Operace se bude provádět v okamžiku, kdy klimatizační jednotka stojí na transportní paletě v bufferu před další operací. Ostatní operace prováděné operátorem budou rozloženy mezi ostatní operátory. Zařízení musí splnit ergonomické požadavky pro obsluhu zajišťující doplnění materiálu. Hodnocenými kritérii budou také provozní náklady (při třísměnném provozu), očekává se jejich snížení minimálně o 50 % vůči současnému stavu. Požadovaná návratnost zařízení je jeden rok.

2 Analýza stávajícího řešení

2.1 Současný přípravek pro lepení těsnění

Stávající přípravek byl navrhnout jako druhá generace přípravku pro lepení těsnění. V první generaci se nejednalo o autonomní zařízení, operátor lepení prováděl manuálně.



Obr. 1: Model stávajícího přípravku

Zdroj: Vlastní

Na Obr. 1 je naznačeno alternativní řešení ke konceptu navrženému v této práci. Toto řešení využívá nahrazení mechanického upínání těsnění pomocí podtlakového ejektoru. Nejedná se zde však o bezobslužné, plně automatizované řešení, jehož návrhem se bude tato práce dále zabývat. Souhrn kladů a záporů současného řešení je proveden v Tab. 1.

Klady	Zápory
+ Nízký počet dílů	- Neefektivní upínání – vysoká spotřeba vzduchu na vytvoření podtlaku
+ Přesné vystředění přípravku při lepení těsnění	- Vedení pomocí balancerů je nestabilní a kýve se
+ Snadná modifikace pro další pracoviště	- Operátor obsluhuje zařízení manuálně
+ Mechanické řešení řízené manuálně	- Manuální oddělování krycí pásky
	- Ergonomická zátěž pracovníka

Tab. 1: Souhrn kladů a záporů (Zdroj: Vlastní)

3 Benchmarking – možnosti lepení PU pěn

Pro určení inovačních příležitostí lepicího přípravku byl proveden zevrubný průzkum trhu. Byly určeny alternativní možnosti pro lepení pěnového polyuretanu. Lepení pórovitých materiálů provází mnohá specifika.

Polyuretanové pěny mají otevřenou strukturu, protože jsou velmi často formátovány řezáním. To způsobuje, že velmi účinně vstřebávají tekutiny i lepidla. Účinnou metodou lepení PU pěn je nástřik lepidla. Dalším možným řešením, jak lepit PU pěny, je použití vodou ředitelných dvousložkových lepidel. Používají se speciální lepidla pro tzv. sdružený nástřik lepidla a aktivátoru. Současné řešení využívá tzv. lepidlo s trvale lepivým účinkem neboli tlakově citlivá lepidla „samolepky“. Nejčastěji se jedná o měkké akryláty s nízkou kohezí. V průmyslu často využívanými lepidly jsou také tavná lepidla. [1]

4 Inovační záměr

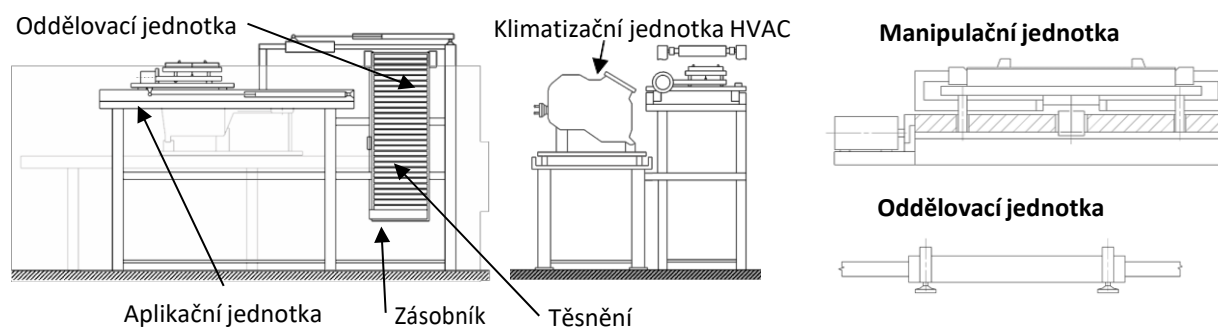
Záměrem je navrhnout a zvolit nový koncept řešení lepicího přípravku. Přípravek by měl eliminovat monotónní opakující se práci operátora při aplikaci pěnového těsnění na výdouch klimatizační jednotky. Dále by měl zajistit vyšší přesnost a spolehlivost při aplikaci těsnění při nižších nákladech, než je stávající koncept řešení.

5 Návrh konceptů řešení

Pro návrh možných konceptů řešení budou využity dříve identifikované technologie vhodné pro lepení polyuretanové pěny. Každý z konceptů se vyznačuje svými specifickými výhodami pro řešení daného problému.

5.1 Koncept 1

První návrh řešení zachovává stávající těsnění s použitím na tlak citlivého lepidla. Ke stávající konstrukci výrobní linky je přidáno zařízení, které zajistí oddělení krycí pásky lepidla na těsnění pomocí vakuového ejektoru, přemístění těsnění do montážní pozice a jeho následné nalepení na správnou pozici na výduchu klimatizační jednotky.



Obr. 2: Koncept 1 – schéma (Zdroj: Vlastní)

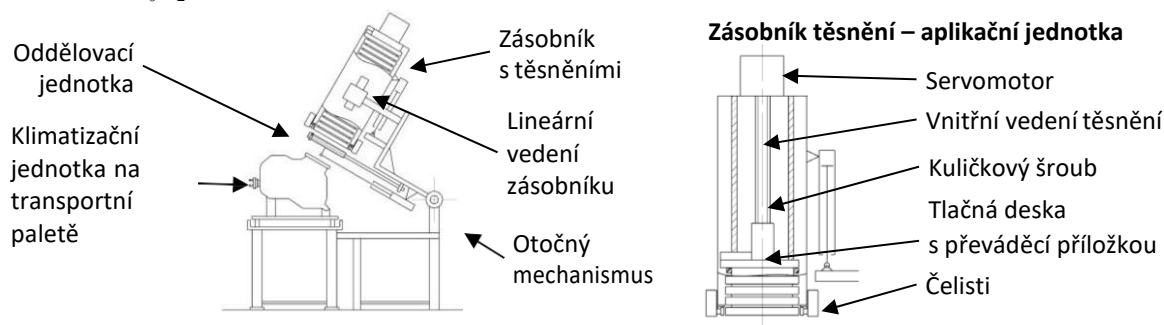
Zařízení se skládá ze tří základních částí, jak je schematicky vyobrazeno na Obr. 2. Obsluha bude v pravidelných intervalech doplňovat zásobník těsnění. Pohyb jednotlivých jednotek bude zajištěn lineárním vedením a pneumatickým pohonem tvořeným pneumatickými válci.

Klady	Zápory
+ Jednoduché pohyby jednotek	- Velký počet pohybů a přeupnutí
+ Spolehlivé řešení oddělení krycí pásky	- Složitě seřízení úhlu natočení aplikační jednotky
+ Přesné vystředění přípravku při lepení těsnění	- Operátor obsluhuje zařízení manuálně
+ Snadná modifikace pro další varianty	- Při špatném seřízení natočení apl. jednotky nerovnoměrná přitlačná síla
+ Snadné doplnění zásobníku	- Vyšší pořizovací náklady (větší počet pneu. válců, senzorů, spotřeba vzduchu)

Tab. 2: Koncept 1 – souhrnné hodnocení (Zdroj: Vlastní)

5.2 Koncept 2

Tento koncept předpokládá použití těsnění s tlakově citlivým lepidlem. Hlavní myšlenkou je snížení počtu potřebných pohybů a snížení celkové manipulace s těsněním od oddělení krycí pásky až po samotné nalepení těsnění. Menší počet pohybů přispívá ke zkrácení strojního času potřebného k nalepení těsnění na klimatizační jednotku. Základní schéma konceptu je naznačeno na Obr. 3. Nejvýraznější úpravou v tomto konceptu je převedení funkce posouvání těsnění manipulační jednotky přímo na zásobník těsnění, který je umístěn na lineárním vedení a jeho pohyb zajišťuje pneumatický píst.



Obr. 3: Koncept 2 - schéma

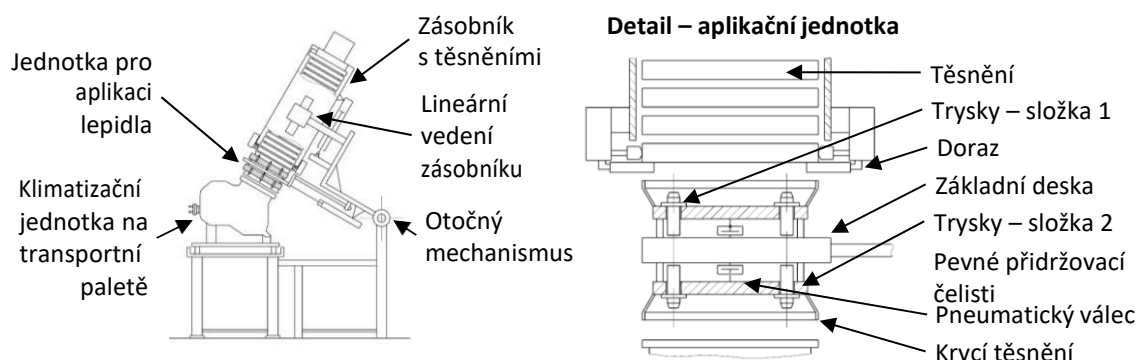
Zdroj: Vlastní

Klady	Zápory
+ Jednoduché pohyby jednotek	- Mechanismus pro otočení zásobníku při doplňování těsnění
+ Nízký počet pohybů (krátký ct)	- Menší kapacita zásobníku
+ Spolehlivé řešení oddělení krycí pásky	- Servopohon pro podávání těsnění
+ Jednoduché vystředění přípravku při lepení těsnění	- Větší setrvačné síly při pohybu celého zásobníku – robustnost konstrukce
+ Rovnoměrně rozložená přitlačná síla při lepení těsnění	
+ Snadná modifikace pro další varianty	

Tab. 3: Koncept 2 - souhrnné hodnocení (Zdroj: Vlastní)

5.3 Koncept 3

Hlavní pohyby jsou na straně zásobníku, který zajišťuje manipulaci a přilepení těsnění na správnou pozici na klimatizační jednotce. Konstrukce zařízení je schematicky naznačena na Obr. 4. Základní myšlenkou tohoto konceptu je využití dvousložkového lepidla, které by bylo zvlášť nanášeno na těsnění a protilehlou plochu klimatizační jednotky. Jednotlivé složky lepidla jsou samy o sobě inertní a nedochází tak k chemické reakci. K reakci dojde až ve chvíli, kdy se spojí obě složky. Při aplikaci této varianty by bylo třeba provést úpravu designu stávajícího těsnění.



Obr. 4: Koncept 3 – schéma (Zdroj: Vlastní)

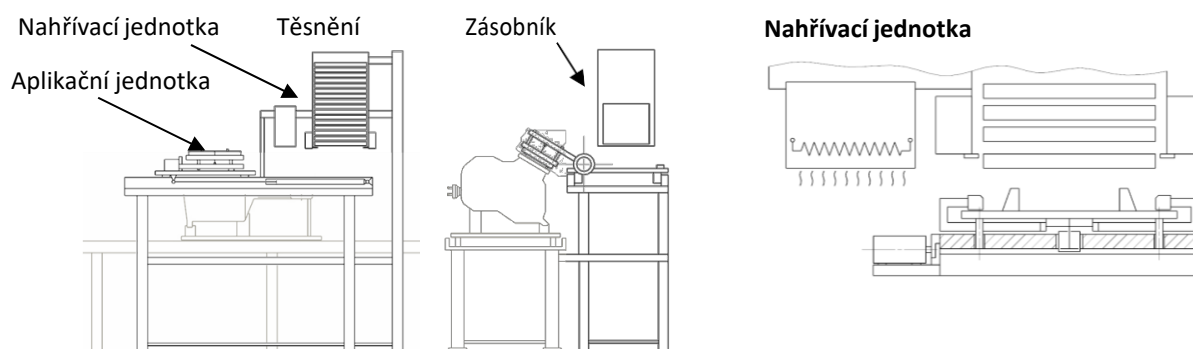
Klady	Zápory
+ Jednoduché pohyby jednotek	- Mechanismus pro otočení zásobníku při doplňování těsnění
+ Nízký počet pohybů (krátký ct)	- Menší kapacita zásobníku
+ Spolehlivé řešení oddělení krycí pásky	- Servopohon pro podávání těsnění
+ Jednoduché vystředění přípravku při lepení těsnění	- Cena a objem spotřebovaného lepidla
+ Rovnoměrně rozložená přitlačná síla při lepení těsnění	- Složitá modifikace pro nasazení na dalších výrobních linkách
+ Snadná modifikace pro další varianty	

Tab. 4: Koncept 3 - souhrnné hodnocení

Zdroj: Vlastní

5.4 Koncept 4

Princip zařízení je založen na použití tavného lepidla, což z praktického hlediska přináší mnohé výhody. Především zde bylo docíleno celkově jednoduššího pracovního postupu s menším počtem manipulací s těsněním a tím i zkrácení času cyklu. Schéma zařízení je na obr. 5. Těsnění jsou dávkována pouze pomocí gravitace bez dalších přidavných mechanismů. Vrstva tavného lepidla na těsnění je natavena horkým vzduchem těsně před přilepením na klimatizační jednotku.



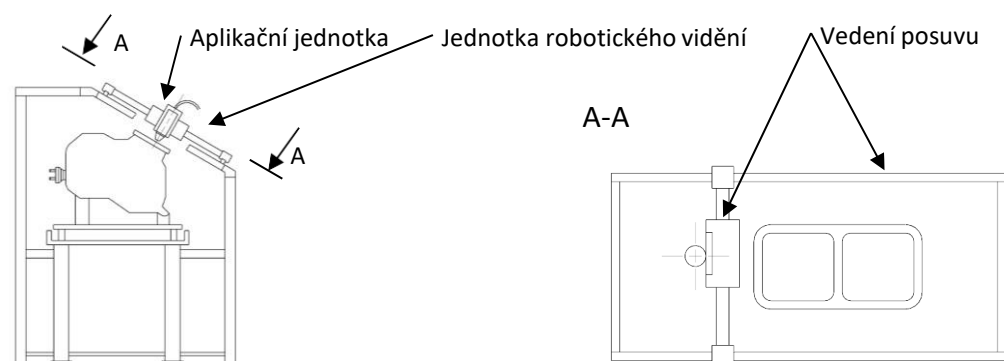
Obr. 5: Koncept 4 – schéma (Zdroj: Vlastní)

Klady	Zápory
+ Jednoduché pohyby jednotek	- Krátký čas mezi natavením lepidla a aplikací (tuhnutí lepidla)
+ Natavení lepidla za pohybu jednotky (snížení ct)	- Energetická náročnost (ohřev vzduchu)
+ Těsnění ze zásobníku posouvána gravitací	- Citlivost na přítlačnou sílu při lepení (zatlačení lepidla do pórů)
+ Snadná modifikace pro další varianty	- Při špatném seřízení natočení apl. jednotky – nerovnoměrný přítlak

Tab. 5: Koncept 4 – souhrnné hodnocení (Zdroj: Vlastní)

5.5 Koncept 5

Toto řešení předpokládá opuštění konceptu pěnového těsnění spojovaného s výdchem klimatizace pomocí lepidla. Namísto předvyrobeného těsnění, dodaného výrobcem, bude nanášena přímo pěna na povrch výdchu klimatizace. Granulát dopravovaný ze zásobníku umístěného v blízkosti výrobní linky, je natavován v nanášecí jednotce. Ve vyfukovací trysce je do taveniny pod tlakem přiváděn inertní plyn a vzniká homogenní směs. Navíc plyn v tavenině vytvoří uzavřenou strukturu a až dvakrát zvětší objem vytlačovaného materiálu. Použití této technologie obecně přináší snížení spotřeby materiálu.



Obr. 6: Koncept 5 – schéma (Zdroj: Vlastní)

Klady	Zápory
+ Jednoduché pohyby jednotek	- Velmi drahý systém řízení posuvů
+ Nanášení těsnící pěny podle potřeby přímo na klimatizační jednotku	- Cena robotického vidění
+ Schopnost vytvořit jakýkoli tvar	- Operátor obsluhuje zařízení manuálně
+ Snadná modifikace pro další varianty	- Čas pro nanášení těsnící pěny (delší ct)

Tab. 6: Koncept 5 – souhrnné hodnocení (Zdroj: Vlastní)

5.6 Hodnocení konceptů

Pro daný případ se jako nejvhodnější metoda prvního hodnocení konceptů jeví sestavení rozhodovací tabulky pro hrubé rozřídění konceptů. Pro hrubé rozřídění

konceptů provedené v tab. 7 bylo využito intuitivního vyhodnocení síly plnění jednotlivých, předem daných kritérií.

Kritérium	Koncept				
	1	2	3	4	5
Spolehlivost aplikace těsnění	+	+	0	0	+
Složitost řídicího systému	0	+	+	0	-
Pořizovací náklady	+	+	-	-	-
Kapacita zásobníku	+	0	0	-	+
Provozní náklady	+	+	-	-	-
Komplexnost	0	-	-	0	+
Složitost kinematických pohybů zařízení	-	+	+	-	-
Energetická náročnost	0	0	-	-	0
Integrace zařízení	0	+	+	0	+
Využití standardních dílů	+	+	+	+	0
Objemnost řešení	-	0	0	0	0
Hmotnost zařízení	0	0	0	0	0
Skóre	3	6	0	-4	0
Pořadí	2.	1.	3.	4.	3.
Další postup	Ano	Ano			

Legenda

+ Silné plnění kritéria
0 Dostatečné plnění kritéria
- Slabé plnění kritéria

Tab. 7: Rozhodovací tabulka (Zdroj: Vlastní)

5.7 Volba výsledného konceptu

O podobě finálního návrhu bylo rozhodnuto analýzou silných a slabých stránek. V tomto bodě je nejzásadnější správně určit významnost jednotlivých kritérií. Při hodnocení konceptů byl každý ze dvou postupujících návrhů bodově ohodnocen (na stupnici 1 – nejhorší, až 5 – nejlepší). Výsledné skóre bylo určeno jako součet vážených hodnot podle bodového ohodnocení.

Koncept		1		2	
Kritérium	Váha	Hodnota	Vážená h.	Hodnota	Vážená h.
Spolehlivost aplikace těsnění	15%	3	0,45	4	0,60
Složitost řídicího systému	12%	2	0,24	2	0,24
Pořizovací náklady	10%	3	0,31	5	0,52
Kapacita zásobníku	9%	1	0,09	5	0,45
Provozní náklady	9%	3	0,27	3	0,27
Komplexnost	9%	3	0,27	3	0,27
Složitost kinematických pohybů zařízení	7%	2	0,15	4	0,30
Energetická náročnost	7%	4	0,30	2	0,15
Integrace zařízení	7%	4	0,30	4	0,30
Využití standardních dílů	6%	3	0,18	3	0,18
Objemnost řešení	4%	3	0,13	3	0,13
Hmotnost zařízení	3%	2	0,06	4	0,12
Skóre			2,7		3,5
Pořadí			2.		1.

Tab. 8: Rozhodovací matice – detailní hodnocení konceptů (Zdroj: Vlastní)

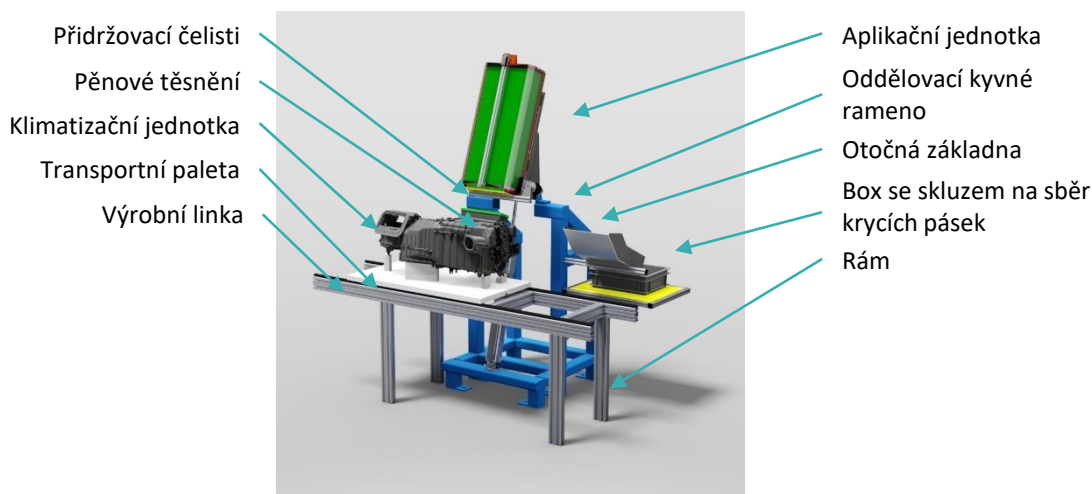
ZVOLENÁ VÁRIANTA: KONCEPT 2

6 Konstrukční řešení zvolené varianty aplikačního zařízení

V této kapitole byl proveden postupně návrh jednotlivých konstrukčních celků aplikačního zařízení, včetně potřebných výpočtů. Ve výpočtu byly definovány vztahy pro kinematické závislosti jednotlivých členů sestavy. Následně pak byly vypočteny zatěžující síly na základě dynamického zatížení sil. V další kapitole je proveden výpočet potřebné síly pro oddělení krycí pásky

6.1 Popis sestavy aplikační jednotky

Na obrázku obr. 7 je celkový pohled na 3D model zařízení pro aplikaci pěnového těsnění. Jsou zde popsány jednotlivé části zařízení.



Obr. 7: Zařízení pro aplikaci pěnového těsnění (Zdroj: Vlastní)

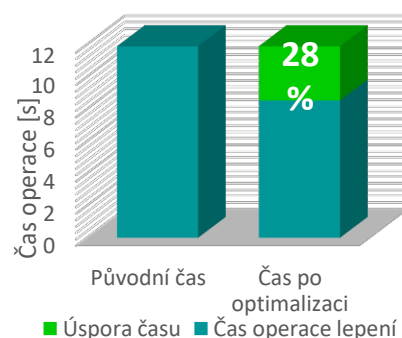
7 Hodnocení výsledného řešení

7.1 Vyhodnocení časové náročnosti

Ze srovnání vypočteného času automatické aplikace pěnového těsnění a původního času při lepení operátorem je možné konstatovat, že automatizací procesu dojde nejen k úspoře pracovníka, ale i ke zkrácení času, potřebného k provedení operace.

Původní čas [s]	Čas po optimalizaci [s]	Úspora času
11,9	8,5	28%

Tab. 8: Časy operace lepení těsnění



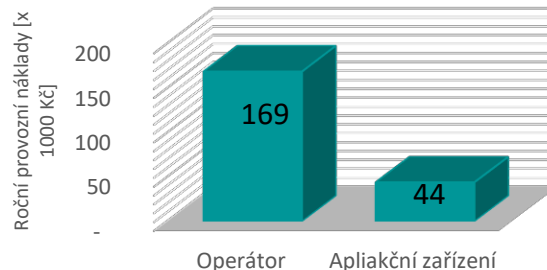
Graf 1: Porovnání času operace

7.2 Ekonomické hodnocení návratnosti zařízení

Pro vyhodnocení výhodnosti investice do nového zařízení je vždy důležité zhodnotit jeho přínosy získané jeho pořízením a investice do pořízení zařízení vložené. Důležitý vliv mají také provozní náklady, které provoz zařízení neodmyslitelně generuje.

Provozní náklady	
Spotřeba tlakového vzduchu	1 380 Kč/rok
Náklady na doplnění materiálu	30 000 Kč/rok
Spotřeba elektrické energie	4 200 Kč/rok
Náklady na údržbu	8 500 Kč/rok
Celkové roční provozní náklady	44 080 Kč/rok

Tab. 9: Provozní náklady (Zdroj: Vlastní)



Graf 2: Porovnání provozních nákladů

Závěr

Výsledkem této diplomové práce je návrh inovovaného zařízení pro aplikaci pěnových těsnění na výdech klimatizační jednotky pro vozy BMW vyráběné ve společnosti Denso Manufacturing s.r.o. v Liberci. Cílem této práce bylo navrhnout možné způsoby, jak nahradit práci operátora na výrobní lince a docílit tak zrychlení a zefektivnění výrobního procesu. Pro návrh jednotlivých konceptů řešení byl proveden průzkum trhu, kde bylo nalezeno jen málo technických aplikací řešících danou problematiku oddělování a lepení pórovitých materiálů s permanentním, na tlak citlivým lepidlem. V rámci průzkumu trhu byly zvažovány i další možné způsoby spojení polyuretanového těsnění s tělem klimatizační jednotky. Na základě průzkumu trhu bylo navrženo pět možných konceptů řešení lepení pěnového těsnění na výdech klimatizační jednotky. Pro každý z návrhů byly vyhodnoceny jeho schopnosti plnit požadované funkce.

Pomocí metod pro porovnávání konceptů bylo zvoleno nejvhodnější řešení pro aplikaci pěnových těsnění. Vítězný návrh byl dále rozpracován. Byl zvolen primární zdroj energie, kterým byl vzduch, pro zajištění primárních pohybových funkcí aplikační jednotky. Pro oddělení krycí pásky pěnového těsnění byl navržen podtlakový ejektor s přísavkou, umístěný na otočném rameni.

Nalepení pěnového těsnění zajistí aplikační jednotka o výsledné kapacitě 70 ks těsnění (hodinová zásoba + bezpečnostní rezerva), pohybující se po lineárním vedení. Pohyb aplikační jednotky zajišťuje pneumatický válec o průměru 32 mm a efektivním zdvihu až 150 mm. Kontrolu síly při lepení (30 N) zajišťuje soustava proporcionálních ventilů a snímačů tlaků. Řídící jednotka následně vyhodnocuje tlak před a za pístem ve válci a podle požadavků kompenzuje tlak vzduchu ve válci. Aplikační zařízení, vzhledem ke své kapacitě vyžaduje doplnění zásobníku těsnění pracovníkem logistiky. K tomuto účelu slouží otočný mechanismus, který jednotku naorientuje do pozice vhodné pro doplnění materiálu. Tento mechanismus je tvořen pneumatickým válcem s bezpečnostní brzdou. Jednotka se otáčí na kluzných ložiskách s měrným dovoleným tlakem až 140 MPa a na čepech z oceli 11 500.

Celý návrh byl podroben ekonomickému zhodnocení. Investice do zařízení by činila přibližně 155 000 Kč s návratností do 1 roku. Roční náklady na provoz jsou spočítány na 44 080 Kč, úspora ročních provozních nákladů činí 68 %.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Lepení pěnových materiálů v průmyslu. *mmspektrum.com*. [Online] [Citace: 17. 10 2016.] Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lepeni-penovych-materialu-v-prumyslu.html>.
- [2] MAŠÍN, I. *Inovační inženýrství - Pánování a návrh inovovaného výrobku. 1. vydání. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2012. ISBN 978-80-7372-852-6.*
- [3] PETRAŠOVÁ, I. *Analýza možných způsobů a důsledků poruch (FMEA). Praha : Česká společnost pro jakost, 2008. ISBN 978-80-02-02101-8.*
- [4] festo.com. [Online] 1999. [Citace: 12. 10 2016.] Dostupné z: https://www.festo.com/cat/cs_cz/data/doc_cs/PDF/CZ/DHPS_CZ.PDF.
- [5] Rexroth Bosh Group. [Online] [Citace: 12. 10 2016.] Dostupné z: <https://www.boschrexroth.com/en/xc/products/product-groups/linear-motion-technology/profiled-rail-systems/ball-rail-systems/index>.
- [6] festo. [Online] 1999. [Citace: 11. 09 2016.] Dostupné z: https://www.festo.com/cms/cs_cz/9830.htm#id_12372.
- [7] e-konstrukter. [Online] 2013. [Citace: 10. 12 2016.] Dostupné z: <http://e-konstrukter.cz/novinka/porovnani-skutecných-nakladu-na-vakuove-ejektory>.
- [8] VAKUUMTECHNIK. [Online] [Citace: 13. 10 2016.] Dostupné z: <http://www.vakuumtechnik.cz/download/piab/prisavky.pdf>.
- [9] NOVOTNÝ, F. a M. HORÁK. *Efektory průmyslových robotů. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-195-5.*
- [10] e-konstrukter. [Online] 2013. Dostupné z: <http://e-konstrukter.cz/novinka/jak-stanovit-velikost-prisavky>.
- [11] FESTO. [Online] [Citace: 13. 10 2016.] Dostupné z: https://www.festo.com/cat/cs_cz/data/doc_cs/PDF/CZ/OVEM_CZ.PDF.
- [12] GGB. [Online] [Citace: 10. 12 2016.] Dostupné z: https://www.ggbearings.com/cz?gclid=Cj0KEQIAwrbEBRDqxqzMsrTGmogBEiQAeSE6ZUjiU_bhOMGg26USMqeRUyv55QC95oEXh76W38348LoaAlYd8P8HAQ#strate_product.
- [13] PEŠÍK, L. *Části strojů. 1. díl. Liberec : Technická univerzita, 2005. ISBN 978-80-7372-573-0.*
- [14] MAŠÍN, I. a P. JIRMAN. *Metody systematické kreativity. Liberec : Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-7372-853-3.*
- [15] LEIVEBER, J. a P. VÁVRA. *Strojnické tabulky. Úvaly : Albra, 2011. ISBN 978-80-7361-081-4.*
- [16] MAŠÍN, I. a L. ŠEVČÍK. *Metody inovačního inženýrství: Inovace, plánování a navrhování výrobku. Liberec : Institut technologií a managementu, 2006. ISBN 80-903533-0-4.*
- [17] K., KORANE. *pneumatictips.com*. [Online] 17. 3 2016. [Citace: 12. 10 2016.] Dostupné z: <http://www.pneumatictips.com/size-vacuum-cup/>.
- [18] WIKIPEDIA. [Online] 28. 6 2016. [Citace: 13. 10 2016.] Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Venturiho_efekt.
- [19] PEŠÍK, L. *Části strojů. 2. díl. Liberec : Technická univerzita, 2005. ISBN 978-80-7372-574-7.*

ZAŘÍZENÍ K ODSTRAŇOVÁNÍ SIRNÝCH SLOUČENIN Z ODPADNÍHO VZDUCHU

Bc. Matěj Filip

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,

Fakulta strojní, 2. ročník

Navazující magisterský program – STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

Abstrakt:

Tato práce obsahuje informace o výrobě kordového vlákna, následný vznik sirných škodlivin a jejich následné zpracování. Cílem této diplomové práce je energeticky zbilancovat stávající zařízení na zpracování sirných sloučenin nazývaném jako Sulfox ve firmě Glanzstoff Bohemia. Následně vytvořit nové zařízení s pomocí spalovacího motoru na zemní plyn. Na závěr obě varianty porovnat.

Klíčová slova:

zemní plyn, CNG, sirné sloučeniny, sirouhlík, sirovodík, stacionární spalovací motor, zpracování sirných sloučenin, kyselina sírová, vodní pára, větrací vzduch, spalování zemního plynu, Matlab, Simulink

Úvod

Ekologie a zákony o ochraně ovzduší nutí podniky, které svojí výrobou vytváří emise, k omezování množství těchto nebezpečných látek vypuštěných do atmosféry. Z tohoto důvodu se v mnoha podnicích musela vytvořit opatření, která omezují množství vypuštěných látek do přírody. Tato opatření byla pro některé firmy likvidační, což vedlo k omezení výroby případně její zastavení z důvodu vysoké investice a téměř žádné návratnosti. V některých případech byly uděleny výjimky v důsledku nerealizovatelnosti.

Tato práce se zabývá problematikou zpracování znečištěného větracího vzduchu vzniklého při výrobě kordového vlákna. Hlavními znečišťujícími látkami jsou sirné sloučeniny zejména sirouhlík a sirovodík. Tyto látky se z emitovaného místa v minulosti odsávaly a následně se vypouštěly komínem do atmosféry. Po zavedení či zpřísnění ekologických limitů si firma pořídila zařízení na částečné zpracování sirných sloučenin z důvodu omezení hmotnostních toků směřujících na komín. Na trhu bylo mnoho technologií, ale pouze jedna byla vyhovující pro dané koncentrace a požadavky na přeměnu ze sirných sloučenin na kyselinu sírovou, která se ve výrobě značně využívá. Cílem bylo zacyklit cestu síry ve výrobě a tím i snížit výrobní náklady. Tato technologie se jmenuje Sulfox a pracuje na bázi oxidační reakce.

Z důvodu zvýšení výroby kordového vlákna a zpřísnění zákona o ochraně ovzduší se po pořízení prvního zařízení za krátkou dobu muselo pořídit druhé. Nyní se obě zařízení provozují na nominální výkon a v plánu je opět zvyšování kapacity výroby. Obě zařízení mají značnou spotřebu zemního plynu, která se nevysvětlitelně zvyšuje.

Cílem této diplomové práce je zbilancovat současné zařízení, najít případné problémy či nesrovnalosti funkce a navrhnout řešení. Dalším cílem je návrh komplexnějšího nového zařízení z důvodu vyšší kapacity zpracovaného větracího vzduchu za použití pístového spalovacího motoru na zemní plyn. Dále porovnat současné a nové zařízení z pohledu technického, ekologického a ekonomického.

1. Popis současného stavu

1.1 Zdroj sirných sloučenin

Samotný vznik sirných sloučenin bych rozdělil do tří kategorií. Hlavním zdrojem je spřádání vlákna.

Při spřádání vlákna tedy koagulaci vzniká chemická reakce, při které se produkuje sirouhlík CS_2 . Ve spřádacím stroji se uvolňuje téměř po celou dobu cesty vlákna strojem. Největší produkce je samozřejmě na začátku, kdy vlákno prochází spřádací a plastifikační lázní. Ve stroji je snaha odsát sirouhlík u zdroje do odsávacího potrubí na jeho zpracování, bohužel konstrukce stroje nedovoluje tak dobré zkoncentrování proudu, takže se velké množství zředí s větracím vzduchem, který pak pokračuje do komína a do atmosféry.

Dalším zdrojem sirných sloučenin zejména sirouhlíku a sirovodíku jsou další technologie, kde se vyrábí a zpracovává spřádací lázeň a výroba xantogenátu. Všechny tyto technologické celky jsou odsávány potrubím, které vede k zařízení, kde se zpracovávají sirné sloučeniny a vyrábí se z nich kyselina sírová.

1.2 Současné zařízení

V současném stavu zpracovávají sirné sloučeniny dvě zařízení, která jsou označena jako Sulfox 1 a Sulfox 2.

Sulfox 1 má za úkol zpracovávat sirné sloučeniny obsažené ve větracím vzduchu z budovy, kde se spřádá viskóza a vyrábí se vlákno, interně označeno jako přádelna kordů. V přádelně kordů jsou umístěny spřádací stroje KVKH. Tyto stroje jsou řazeny v řadách označených A až D. V každé řadě je 14 strojů. Každý stroj má 36 výrobních míst, která jsou odsávána štěrbinou. Odsávání je umístěno co nejbližší k emitovaným škodlivinám, aby nedocházelo k ředění či velkému úniku ze stroje. Každý stroj je tedy odsáván potrubím o rozměru DN125, které je napojeno na páteřové potrubí řady o rozměru DN600. Páteřové potrubí řady jsou napojena do centrálního potrubí, které dopravuje vzdušinu do zařízení Sulfox 1. Do centrálního potrubí jsou napojeny další proudy jako provzdušnění prací vody, odplynění plastifikační lázně a odplynění z rozbíječek pěny spřádací lázně. Celkové množství větracího vzduchu, které zpracuje Sulfox 1 je přibližně 30 000 metrů krychlových za hodinu. Vstupní koncentrace do Sulfox 1 jsou přibližně 2200 mg sirouhlíku CS_2 na metr krychlový větracího vzduchu a 200 mg sirovodíku H_2S na metr krychlový větracího vzduchu.

Sulfox 2 zpracovává sirné sloučeniny obsažené ve větracím vzduchu z jiných technologií a budov. Nejprve popíšu odsávání z technologie výroby xantogenátu, kde se alkaliceululóza sytí sirovodíkem v zařízení, které se nazývá SIXA aparát. Zde se odsává přebytečné množství sirovodíku, které je vedeno jedním potrubím do Sulfoxu 1. Dále je na řadě budova spřádací lázně, ve které se odsávají stékační nádrže spřádací lázně, prací voda, rozbíječky pěny spřádací lázně, vakuová jednostupňová odparka, 12-ti stupňové odparky, tři linky vakuové krystalizace a odstředivky. Tyto odtahy jsou svedeny do páteřního potrubí, které je napojeno na hlavní potrubí Sulfox 2. Celkové množství větracího vzduchu, které zpracovává Sulfox 2 je přibližně 20 000 metrů krychlových za hodinu. Vstupní koncentrace jsou 5000 mg sirouhlíku na metr krychlový větracího vzduchu a 4000 mg sirovodíku na metr krychlový větracího vzduchu.

Vstupy do obou zařízení Sulfox jsou propojeny pomocí klapky. Při výpadku jednoho zařízení dojde k propojení všech proudů a větrací vzduch se zpracovává v omezeném množství v jednom zařízení. Pokud dojde k poruše obou zařízení zároveň, komplex potrubí dopravující větrací vzduch má rezervní okruh, který je napojen na komín. Komín je osazen ventilátorem o nominálním výkonu 900 000 metrů krychlových za hodinu.

Všechny ostatní proudy větracího vzduchu, které nesou nízkou koncentraci, obvykle do 400 mg na metr krychlový větracího vzduchu jsou napojeny na komín. Velkou část objemového toku tvoří odsávání přádelny kordů, kde se odsává horním a spodním odsáváním spřádací stroj. Koncentrace sirných sloučenin na komíně nesmí překonat určitou hranici stanovenou hygienickou normou.

Zařízení Sulfox pracuje na principu katalytické oxidace. Cílem je odstranit z větracího vzduchu sloučeniny sirovodíku a sirouhlíku. Jedním z hlavních používaných médií celé továrny je

kyselina sírová, která byla hlavním požadavkem přeměny škodlivin na kyselinu. Aby mohla vzniknout kyselina sírová je k tomu potřeba voda H_2O a oxid sírový SO_3 . Oxid sírový vznikne oxidací oxidu siřičitého SO_2 a oxid siřičitý vznikne oxidací sirouhlíku CS_2 a sirovodíku H_2S . Výhodou těchto reakcí je, že všechny jsou exotermní. Aby došlo ke katalytické oxidaci, je bohužel potřeba relativně vysoká teplota větracího vzduchu. Při velkých objemových tocích větracího vzduchu je nutné dodat velký tepelný výkon v řádech megawatt.

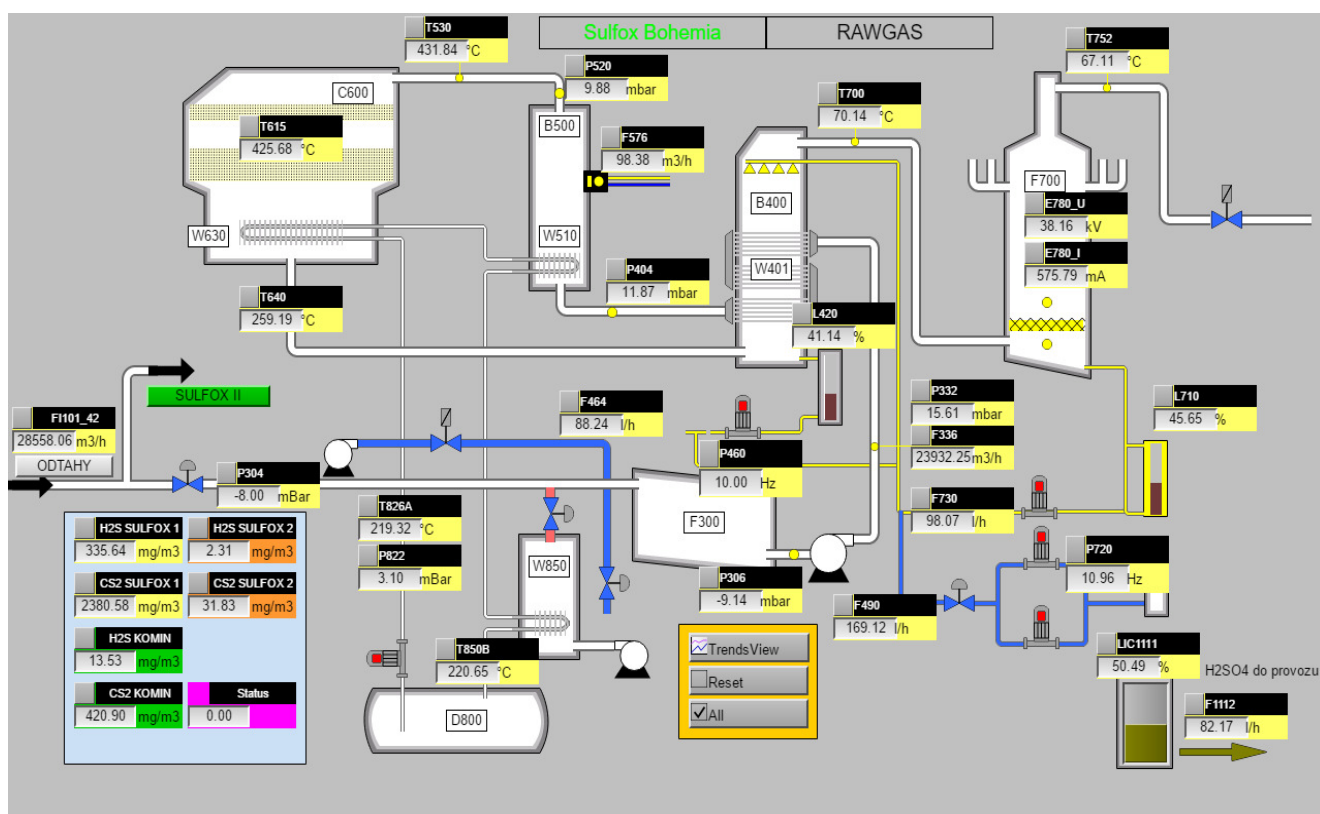
Větrací vzduch, který vstupuje do zařízení Sulfox 1 o teplotě $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ se nejdříve vyfiltruje pomocí hrubých kapsových filtrů. Dále pokračuje přes ventilátor, který vytváří potřebný tlakový spád do skleněného výměníku W401, kde se ohřeje přibližně na $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ od zpracovaného vzduchu. Následně se větrací vzduch ohřeje od solného výměníku W510, který napomáhá k přenosu tepla v zařízení. Následuje plynový hořák, umístěný v koloně B500, který dodá další teplo, aby se dosáhlo určité zvolené reakční technologické teploty $430\text{ }^{\circ}\text{C}$. Spálením zemního plynu se do systému dostane vodní pára $H_2O(g)$ a oxid uhličitý CO_2 . Takto ohřátý větrací vzduch pokračuje do kolony reaktoru C600, který se skládá ze dvou oxidačních reaktorů. Na prvním reaktoru sirné sloučeniny oxidují na oxid siřičitý, tím vzniká teplo a další molekuly oxidu uhličitého a vody. Médium dále pokračuje do druhého reaktoru, kde oxiduje oxid siřičitý na oxid sírový. Při této reakci opět vzniká teplo. Velmi ohřátý vzduch vstupuje do výměníku W630, kde se sdílí teplo do solného okruhu. Ochlazený větrací vzduch o teplotě přibližně $240\text{ }^{\circ}\text{C}$ pokračuje do již zmíněného skleněného výměníku W401 a teplo předává vstupujícímu vzduchu. Výměník je umístěn v koloně B400. Při sdílení tepla se nastřikuje pomocí sprch zředěná kyselina sírová H_2SO_4 a na výměníku vzniká za přítomnosti oxidu sírového ostrá kyselina sírová. Při této reakci (hydrataci) vzniká teplo. Tato kyselina stéká na dno kolony a odčerpává se do výroby, kde se ředí a následně používá. Větrací vzduch je nyní teoreticky vyčištěn od sirných sloučenin. Bohužel při sprchování vzniká aerosol kyseliny sírové, který je unášen větracím vzduchem a musí se odstranit. Proto následuje další kolona F700, kde je umístěn vysokonapěťový elektrofiltr, který při vstupu větracího vzduchu odstraňuje aerosol kyseliny sírové. Kapičky se shlukují za přítomnosti vysokého napětí a vzniklá kapalina stéká na dno kolony a čerpá se zpět do předchozího zařízení, kde vstupuje do sprch. Z elektrofiltru vychází čistý větrací vzduch, který je napojen na komínový kanál.

Solný okruh, který má za úkol přemísťovat teplo v rámci zařízení, cirkuluje přes zmíněné výměníky. Pokud dojde k přehřátí soli, výměník W850 s ventilátorem přebytečné teplo vysdílí do okolního (atmosférického) vzduchu. Solný okruh má zásobník, kde se udržuje konstantní teplota.

Sulfox 2 je velmi podobný Sulfoxu 1. Rozdíl je pouze v médiu, které přemísťuje teplo v zařízení. Sulfox 1 používá sůl, přesněji Durferit, který lépe odolává vysokým teplotám. Nevýhoda této soli je krystalizační teplota. Pokud okruh soli vychladne, sůl zkrystalizuje a celý okruh se zaplní zkrystalizovanou solí, která za normálních teplot je velice tvrdá a potrubí se špatně čistí. Celý okruh musí být velice dobře izolovaný. Plášť okruhu je vyhříváný, aby nedocházelo k lokální krystalizaci. Sulfox 2 používá místo soli olej, který má menší tepelnou kapacitu, ale provozní vlastnosti jsou lepší.



Obrázek 1 Sulfox 1 a 2



Obrázek 2 Řídicí systém Sulfox 1

1.3 Zhodnocení současného zařízení

Ve výpočtech bilance zařízení Sulfox 1 jsem se velmi dobře seznámil se všemi toky, teplotami a tepelnými výkony v běžném provozu. Zmapoval jsem celé zařízení, tedy cestu škodlivin se všemi patřičnými chemickými reakcemi. Součástí bilance byl i solný okruh.

Dle mého názoru byl Sulfox 1 dobře koncipován a navržen. Největší problém tohoto zařízení je špatný výměník W510, který nedokáže předat teplo ze soli do vzdušiny. Stáří celého zařízení bylo ovlivněno potřebnou rekonstrukcí. Bohužel se při rekonstrukci zřejmě nedbalo na výpočet výměníku a došlo k jeho poddimenzování. Výměník je vystaven kyselému agresivnímu prostředí a provozováním ztrácí výkon. Zejména to je zanášením a zmenšením teplosměnné plochy. Výměník W510 by měl předat stejný výkon jako výměník W630, bohužel předá pouze 55% tepelného výkonu. Nevysídlené teplo musí dohnat do vzdušiny plynový hořák a odebrat ze soli ventilátor a výměník W850, kde se přebytečné teplo znehodnocuje. Při velké spotřebě se do větracího vzduchu dostává velké množství vody (vodní páry) a oxidu uhličitého, které zvyšují objemové množství a hmotu.

Dalším velkým problémem je regulace, která je závislá pouze na teplotách. Řídicí systém nemá informaci, kolik přibližně oxidu sirového vychází z reaktoru. Na toto množství je třeba dostatek vody, která vstupuje do sprch. Nátok vody je regulován pouze teplotou na výstupu z kyselinové kolony B400.

Vstupní koncentrace je také velmi závislá na oxidačním teple vytvořeném v reaktorech. Ve výpočtu mi vyšla velmi nízká účinnost reakce. Domnívám se, že je to způsobeno nízkou vstupní koncentrací, špatnými měřidly nebo velkým únikem tepla z kolony reaktoru.

Pokud by se zvýšila koncentrace škodlivin na dvojnásobek a vyměnil by se výměník W510, Sulfox 1 by mohl fungovat bez potřeby spalování zemního plynu. Dále bych navrhl implementovat do řídicího systému výpočet potřebného přebytku vody pro výrobu kyseliny sirové, protože se domnívám, že při vyšších koncentracích je pravděpodobné, že část oxidu sirového uniká na komín.

Výměník W401 pracuje na obou stranách pouze se vzdušinami. Přenáší neuvěřitelných 1,8MW. Po prozkoumání technických dokumentací jsem zjistil, že výměník je obrovský.



Obrázek 3 Sklotrubkový výměník W401

Na závěr celé bilanci jsem vytvořil do graficky znázorněného Sulfoxu 1 tepelné výkony v bodech, kde byly počítány.

2. Nové zařízení

2.1 Požadavky nového zařízení

Nové zařízení by mělo splňovat určité požadavky potřebné pro provoz i jiných zařízení v celé továrně. Mělo by mít lepší využití tepla a zemní plyn by se mohl využít na mechanickou energii popř. elektrickou energii. Celý systém by měl pracovat jako kapacitní zařízení, které by při zvyšování výroby mělo pokrýt přebytečné množství větracího vzduchu.

2.1.1 Výroba elektrické energie

Hlavní myšlenkou tohoto projektu je výroba elektrické energie. Při prvních návrzích, kde nevystupovalo zpracování škodlivin, byla kogenerační jednotka, která využívala jako palivo zemní plyn. Od této myšlenky se upustilo z důvodu návratnosti a realizovatelnosti. Dalšími cestami je redukce páry pomocí turbíny, která je špatně realizovatelná, jelikož difference tlaků páry není dostačující.

Nové zařízení by mělo být koncipované alespoň na 2 MW elektrického výkonu, aby pokrylo část spotřeby továrny.

2.1.2 Zvýšení kapacity zpracování škodlivin

Kapacita v současné době již nestačí a při výpadku jednoho ze zařízení sirné toky, které by měly být zpracovány v zařízení, putují do komína. To má špatný vliv na životní prostředí. Odhadnout kapacitu nového zařízení není jednoduché, ale po dvouletém seznamování se s problematikou bych kapacitu navrhl mezi 15 000 až 20 000 krychlovými metry zpracovaného větracího vzduchu. Výroba vlákn se neustále zvyšuje a je dobré nové zařízení koncipovat na vyšší kapacitu.

2.1.3 Výroba kyseliny sírové

Tento požadavek je primární, jelikož cesta síry ve výrobě je velmi důležitá, aby se cyklus dodržel a síra, která vstupuje do systému továrny, pokud možno vystupovala pouze ve vlákně a v malém měřítku komínem.

2.1.4 Výroba vodní páry

Některé technologie, zejména v budově spřádací lázně, spotřebovávají velké množství tzv. "technologické páry". Jedná se o 130 °C páru na mezi sytosti. Spotřeba této páry je značná. Pára se používá na vakuové dvanáctistupňové odparky a vakuové krystalizátory. Nové zařízení by tedy mělo vyrábět páru o těchto vlastnostech. Hmotnostní tok by měl být co největší.

2.1.5 Ekonomická výhodnost

Z kapitoly ekonomické vlastnosti jsem se dozvěděl, že obě zařízení jsou ztrátová a to jsem v kalkulaci nepočítal údržbu, která je u těchto zařízení značná. Nové zařízení by tedy nemělo být ztrátové. Požadavek je takový, aby nové zařízení bylo výdělečné.

2.1.6 Ekologičnost

Celková ekologie tohoto zařízení by měla být velmi dobrá. Co se týče likvidace sirných sloučenin, je zde pozitivum nižších koncentrací na komíně. Dále je zde energetická náročnost zařízení, která by měla spotřebovávat pouze zemní plyn, který by měl být velmi dobře využit s dobrou účinností. Spotřeba elektrické energie, zejména pro ventilátor a čerpadla, bude zanedbatelná proti výrobě elektrické energie.

2.2 Návrh nového zařízení

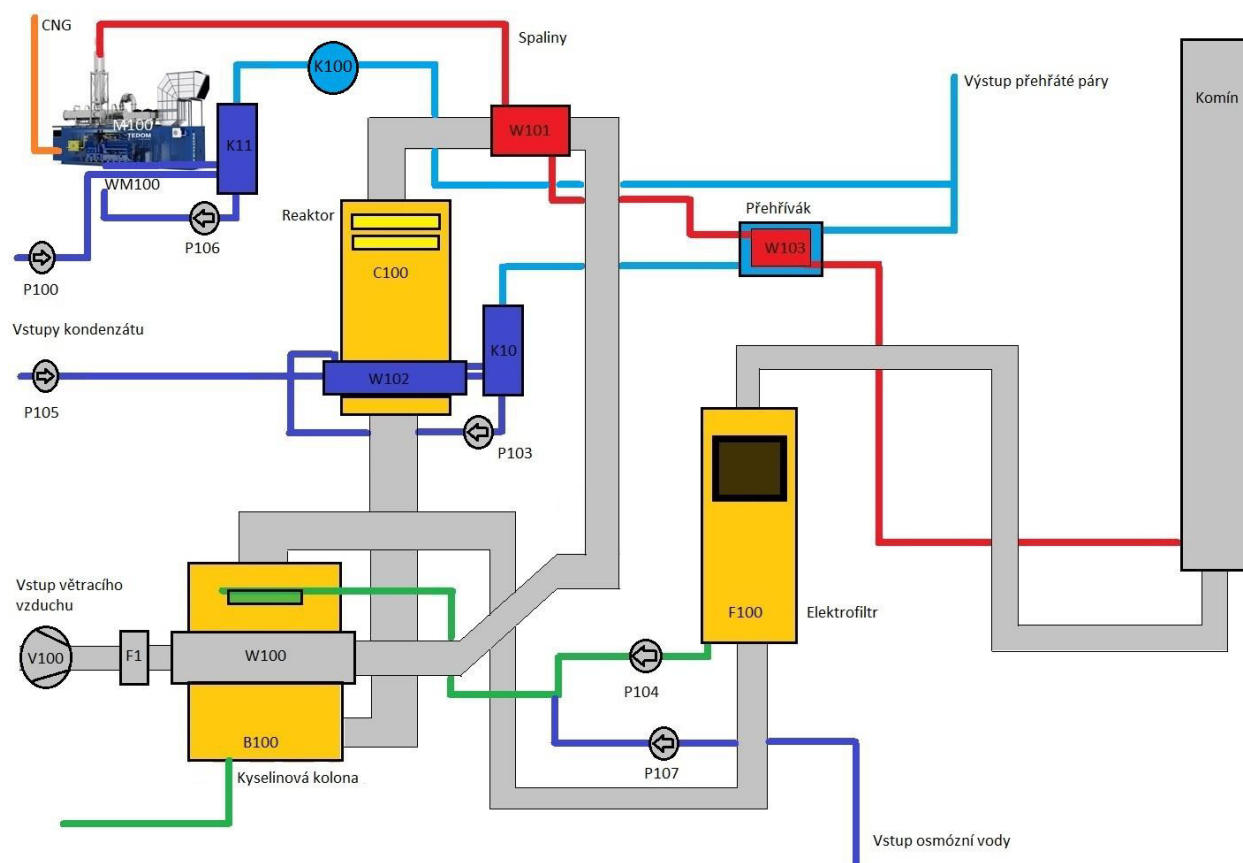
Nové zařízení bude velmi sofistikované a složité, snahou budou využít co nejvíce tepla. Nové zařízení se bude skládat z mnoho jiných zařízení. Zbytkové teplo se budu snažit přesouvat do vody popř. vodní páry. Pro tuto práci jsem vytvořil 8 různých schémat a hledal jsem optimální řešení, kde jsem musel zohlednit mnoho faktorů. V diplomové práci uvedu pouze jedno optimální řešení, které zde podrobně vysvětlím a vypočítám.

Nové zařízení je velmi odlišné od stávajícího stavu. Pístový spalovací motor M100, který spaluje zemní plyn, vytváří mechanický výkon. Elektrický generátor transformuje tento mechanický výkon k výrobě elektrické energie. Zbytkové teplo, které se nevyužije k transformaci na mechanickou energii se využije následovně. Čerpadlo P100 dopravuje kondenzát do motoru M100 tedy do pomyslného výměníku WM100, kde se kondenzát ohřeje. Dále pokračuje do výparníku K11. Čerpadlo P106 cirkuluje kondenzát přes výměník WM100, kde se do kondenzátu dostává teplo a následně ve výparníku dochází k vypařování a vzniká sytá vodní pára. Tuto páru nasává parní kompresor a stlačí ji na požadovaný tlak. Vodní pára se při kompresi dostane do přehřáté oblasti.

Dalším zdrojem zbytkového tepla jsou spaliny o vysoké teplotě ve výfuku, které pokračují do výměníku W101, kde ohřívají větrací vzduch na příslušnou katalytickou teplotu.

Znečištěný větrací vzduch vstupuje do zařízení přes ventilátor V100 a kapsový filtr F1. Dále pokračuje do sklotrubkového výměníku W100, kde se ohřeje od zpracovaného větracího vzduchu. Dále pokračuje do již zmíněného výměníku W101, kde se ohřeje. Následuje reaktorová kolona, kde v katalytickém reaktoru dojde k oxidační reakci a vznikne oxid sírový. Při této reakci vzniká teplo. Zpracovaná vzdušina pokračuje do výměníku W102, kde se sdílí teplo do kondenzátu.

Čerpadlo P105 dopravuje kondenzát do výměníku W102 a dále do výparníku K10. Odtud čerpadlo P103 cirkuluje kondenzát přes výměník W102 a dochází jako v předchozím případě k výrobě vodní páry.



Obrázek 4 Schéma nového zařízení

Hmotnostní tok vodní páry z výparníků K10 má špatné vlastnosti v důsledku syté páry, která je nevhodná pro následnou dopravu. Proto musí projít přehřívákem W103, který vodní páru dostane do přehřáté oblasti pomocí zbytkového tepla ve spalínách.

Hmotnostní toky přehřáté páry z přehříváku a kompresoru K100 mají stejné fyzikální vlastnosti, tedy tlak a teplota. V důsledku toho se bez problémů mohou spojit do jednoho hmotnostního toku. Zpracovaný ochlazený větrací vzduch, který vystupuje z výměníku W102, pokračuje do kyselinové kolony B100. Zde je princip stejný jako v zařízení Sulfox. Čerpadlo P104 dopravuje zředěnou kyselinu sírovou do sprchy, která je umístěna v kyselinové koloně B100. Do tohoto toku se ještě připojuje tok osmózní vody pomocí čerpadla P107. V kyselinové koloně je umístěn sklotrubkový výměník W100, kde dochází ke sdílení tepla do vstupujícího větracího vzduchu. Nástřikem zředěné kyseliny sírové do zpracované vzdušiny obsahující oxid sírový vzniká za chemické reakce hydratace kyselina sírová. Tato reakce je exotermní v důsledku toho se do systému přidává teplo. Vzniklá kyselina sírová dopadá na dno kolony B100 a odtud se odčerpává. Předpokladem je, že opouštějící větrací vzduch z kolony B100 obsahuje (jako v případě Sulfox) aerosol kyseliny sírové a vody. Tyto sloučeniny se dále separují v elektrofiltru F100 odkud se odčerpají již zmíněným čerpadlem P104.

Čistý zpracovaný větrací vzduch pokračuje do komína. Spaliny pokračují do výměníku na ohřev užitkové vody popřípadě kondenzátu.

Nové zařízení je pouze regulováno výkonem spalovacího motoru a nátoky kondenzátu. Výhodou je, že nové zařízení neobsahuje problematický solný okruh.

3. Porovnání nového a současného zařízení

Nové zařízení je koncepčně odlišné od zařízení Sulfox. Je ovlivněno požadavky firmy především na výrobu elektrického proudu a vodní páry. Výsledkem je kombinace různých zařízení. Porovnání je tedy dosti komplikované. Jedním z hlavních problémů zařízení Sulfox je ohřívací solný výměník před hořákovou komorou, kde se nesdílí takové množství tepla, jaké by bylo potřeba. Je zřejmé, že tento výměník je poddimenzován. Otázkou je regulace v tak složitém zařízení. Pokud by se

výměník optimalizoval, mohlo by dojít k přehřátí vzdušiny při vyšších koncentracích sirných sloučenin větracího vzduchu. Přebytkové teplo se bez využití vypouští do atmosféry. Regulace je zde velice obtížná.

Nové zařízení jsem chtěl koncepčně změnit, zejména již zmíněný solný okruh, který je velice problematický i z pohledu údržby a provozu. Solný okruh a hořáková komora v novém zařízení chybí, jejich funkci nahradily výměník W101 za použití výfukových plynů z pístového spalovacího motoru a výměníku W102 na výrobu vodní páry. V systému je zřejmé, že u výměníku W101, který ohřívá nezpracovaný větrací vzduch na požadovanou teplotu, není potřeba měnit významně výkon, který sdílí při odlišných koncentracích. V případě reaktoru a následného výměníku W102, kde má velmi velký vliv koncentrace sirných sloučenin v důsledku chemické reakce a vzniku tepla serozdílné teplo velmi dobře reguluje již zmíněným výměníkem W102, který vždy sníží teplotu na požadovanou hodnotu. Vedlejším jevem je zvýšená výroba vodní páry. V zařízení Sulfox se teplo přidané spálením zemního plynu po zpracování vypustí do atmosféry.

Koncepčně podobná u obou zařízení je kyselinová kolona, která se řídí pouze nátokem osmózní vody. V praxi ověřený způsob regulace je bez větších problémů.

Při návrhu nového zařízení jsem musel neustále myslet na provozuschopnost jednotlivých částí zařízení při poruše jednoho z nich. Při výpadku kyselinové kolony, či reaktoru dojde k zastavení výroby vodní páry z výparníku K10, ale neustále bude pracovat spalovací motor s generátorem a výroba elektrického proudu a vodní páry z výparníku K11. Při poruše spalovacího motoru je nutné dodat teplo do systému, které by se dalo realizovat spalováním zemního plynu hořákem ve výfukovém potrubí před výměníkem W101. Jednalo by se o nouzové řešení pro běh zpracování sirných sloučenin. Dále by se tedy produkovala vodní pára a kyselina sírová.

3.1 Ekonomické porovnání

V této kapitole shrnuji a porovnávám ekonomii ročního a víceletého provozu zařízení. Do ekonomické bilance je potřeba zahrnout spotřebu zemního plynu, výrobu vodní páry, výrobu kyseliny sírové a v neposlední řadě výrobu elektrické energie.

Nejdříve zavedu přepočtové koeficienty pro různé druhy energie, které budou pro lepší přehlednost vztaženy na jednu megawattu.

Druh energie	Počet watthodin	Cena (Kč)
Elektrická energie	1 MWh	2.000
Vodní pára	1 MWh	828
Elektrická energie pomocí PSM (bez využití zbytkového tepla)	1 MWh	1.474
Energie ve formě spalování CNG	1 MWh	653

Tabulka 1 Ceny za 1MWh

Z tabulky je patrné, že nejlevnější druh energie je ve spalování zemního plynu. Nejdražší je elektrická energie odebíraná ze sítě. Kompromis tvoří spalovací motor s generátorem. Jako druhý nejlevnější zdroj energie je vodní pára. Zde bych chtěl upozornit, že zařízení využívá ještě zbytkové teplo ve spalínách a reakční teplo. Z tohoto důvodu nelze surově s těmito cenami počítat.

Nové zařízení má velkou výhodu v tom, že při vysokých koncentracích stoupá výroba páry, u zařízení Sulfox nikoliv. Pro demonstraci jsem matematický model podrobil různým koncentracím a výstupy jsem vložil do tabulky.

Název	Sulfox 1	Nové zařízení (koncentrace 2300 CS ₂ ,230 H ₂ S)	Nové zařízení (koncentrace 3000 CS ₂ ,1000 H ₂ S)	Nové zařízení (koncentrace 5000 CS ₂ ,2500 H ₂ S)
Spotřeba plynu (m ³ /h)	100	624	624	624
Spotřeba plynu za rok (m ³ /rok)	876000	5466240	5466240	5466240
Cena plynu v korunách za rok (Kč/rok)	7.008.000	43.729.920	43.729.920	43.729.920
Výroba kyseliny sírové za hodinu (dm ³ /h)	90	57	101	191
Výroba kyseliny sírové za rok (m ³ /rok)	855	499,32	884,76	1673
Cena kyseliny v korunách za rok (Kč/rok)	-2.087.400	-1.219.041	-2.160.056	-4.084.858
Energie - elektrický výkon (Kč/rok)	1.000.000	-55.394.160	-55.394.160	-55.394.160
Energie - vodní pára(Kč/rok)	0	-16.649.000	-17.499.000	-19.255.000
Celková cena v korunách za rok (Kč/rok)	5.920.600	-29.532.282	-31.323.296	-35.004.098
Celková cena v korunách za 4 roky (Kč)	23.682.400	-118.129.126	-125.293.185	-140.016.395
Celková cena v korunách za 5 let (Kč)	29.603.000	-147.661.408	-156.616.481	-175.020.493

Tabulka 2 Ekonomická bilance

Z výpočtů je patrné, že nové zařízení není ztrátové. Zařízení Sulfox 1 vyjde za pět let na přibližně třicet milionů korun. Nové zařízení se stejnými koncentracemi vytvoří zisk okolo 147 milionů korun za pět let. Zkoncentrování sirných sloučenin by mělo významný vliv na celkový zisk celého zařízení, které by se dostalo na přibližně 175 milionů korun, při podmínkách jako má Sulfox 2.

Otázkou je zde cena zemního plynu, která by mohla být ještě nižší v důsledku vyššího odběru od poskytovatele pro spalovací motor.

V této bilanci jsou obsaženy spotřeby elektrického proudu, ale údržby a odstávky nikoliv. Tento výpočet je čistě orientační, jelikož se ceny komodit na trhu velmi mění a zařízení se nemůže provozovat celý rok 24 hodin denně.

Důležitou otázkou je pořizovací cena celého zařízení. Výslednou cenu nedokážu odhadnout, ale myslím si, že by mohla být nižší než sto milionů korun. Z toho lze usoudit, že návratnost by mohla být přibližně 4 roky při nízké koncentraci sirných sloučenin obsažených ve větracím vzduchu a 3 roky při vysokých koncentracích.

4. Závěr

Po seznámení se s technologiemi odstraňování sirných sloučenin mohu říci, že současné zařízení je vhodně použito pro provozní podmínky. Vyčerpávající kapitola, kde jsem celé současné zařízení musel pochopit a zbilancovat byla velmi časově náročná, ale velmi prospěšná. Dozvěděl jsem

se velmi důležité technologické a provozní informace. V zařízení jsem našel mnoho nesrovnalostí ohledně špatného hospodaření s teplem. To způsobuje vysoké spotřeby zemního plynu a špatné řízení v kyselinové komoře. Na tyto nedostatky jsem upozornil a navrhl vylepšení.

Dalším cílem diplomové práce bylo vytvořit úplně nové zařízení, které by plnilo požadavky podniku. Největším problémem bylo vytvoření správného uspořádání, aby využití tepla bylo optimální. Tato problematika byla nejvíce časově náročná v důsledku velkého množství dat a následného porovnávání. Dalším problémem bylo určení kapacity celého zařízení, které bylo závislé na mnoha faktorech. V novém zařízení jsem musel vybrat vhodný spalovací motor s generátorem, který by splňoval dané požadavky. Většina zbytkového tepla se využívá k výrobě vodní páry, která je pro podnik velmi potřebná. Výhodou tohoto řešení je velmi dobré řízení a velmi dobrý přestup tepla do vodního kondenzátu. Nové zařízení pracuje na principu katalytické oxidace podobně jako staré zařízení. Výhodou nové koncepce je kombinace různých technologií a lepší využití energií. Bilanční výpočty byly vypočteny pomocí softwaru Matlab, Excel a Simulink.

Dalším úkolem bylo celkové porovnání, kde se zejména ověřovala ekonomie provozu. Dle hlavního požadavku a výpočtu není nové zařízení ztrátové. Za pět let provozu nového zařízení by úspory mohly dosáhnout až 175 milionu korun.

Výsledkem práce jsou bilanční schémata s tepelnými výkony a teplotami pro různé koncentrace, tabulky s hodnotami a zdrojový kód nového i starého zařízení s nastavitelnými koncentracemi.

Tato práce poskytuje důležité informace, které povedou k následným rozhodnutím firmy. Diplomová práce je pro podnik podnětem k rekonstrukci současných zařízení a navrhuje nové optimalizované zařízení s lepšími ekonomickými a ekologickými výsledky.

Literatura

- [1] ALAN E. COMYNS. *Encyclopedic dictionary of named processes in chemical technology*. Fourth edition. S.l.: Crc Press, 2014. ISBN 1466567767.
- [2] DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7.
- [3] EDITED BY EMILSON PEREIRA LEITE. *MATLAB :modelling, programming and simulations*. Rijeka: Sciyo, 2010. ISBN 9533071257.
- [4] HROMÁDKO, Jan. *Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada, 2011. ISBN 8024734753.
- [5] KRUTIL, Jaroslav a Milada KOZUBKOVÁ. *Modelování přestupu tepla ve výměnících - sbírka příkladů: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2011. ISBN 978-80-248-2712-4.
- [6] MORAVEC, Jan. *Návrh kogenerační jednotky pro průmyslový areál*. Diplomová práce. Praha 2016. ČVUT Praha. Fakulta elektrotechnická. Dostupné na: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/65314/F3-DP-2016-Moravec-Jan-00-Navrh_kogeneracni_jednotky_pro_prumyslov_y_areal_.pdf?sequence=-1&isAllowed=y
- [7] PERRY, Robert H. a Don W. GREEN. *Perry's chemical engineers' handbook*. 8th ed. / . New York: McGraw-Hill, c2008. ISBN 978-0071422949.
- [8] PETŘÍKOVÁ, Markéta a Pavel KRYŠTŮFEK. *Tabulky a diagramy pro termodynamiku*. Vyd. 5. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2013. ISBN 978-80-7372-945-5.

DIAGNOSTIKA KAVITACE VE VODNÍM ČERPADLE

Jiříček Václav

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,

Fakulta strojírenství, 2. Ročník

Magisterský studijní program – ENERGETICKÉ ZAŘÍZENÍ

Abstrakt: Tato práce se zabývá především zkoumáním stavu techniky a vědeckého poznání týkající se diagnostiky kavitace ve vodním čerpadle. Část práce se zabývá současnou technikou a zbylý obsah je zaměřen na vlastní experimentální měření pomocí PVDF filmu.

Klíčová slova: Kavitace, čerpadlo, diagnostika, PVDF film.

1. Úvod do problematiky

Tato práce se zabývá diagnostikou fyzikálního jevu kavitace.^{1,2} Jedná se o dynamický fenomén vzniku a zániku bublin v kapalině, jak již zmíněný termín kavitace (z latinského slova *cavitas* = dutina) naznačuje. Lze ho najít v místech s kapalinou, v níž dochází ke snížení tlaku za stálé teploty. Tento pokles tlaku může být způsoben například lokálním zúžením potrubí či průchodem silné akustické vlny. Pokud bublina zůstává v místě nižšího tlaku, konkrétně na tlak nasycených par její poloměr se zachovává, nebo roste. Z počátku je vyplněna vakuem, později se do ní dostává, pára z okolní kapaliny. Jakmile se kavitační bublina dostane nad tlak sytých par, začne kolabovat. Při kolabování do bubliny vniká velikou rychlostí okolní kapalina. Pokud se tato dutina nachází v blízkosti stěny, může imploze způsobit mechanické poškození daného tělesa. Dochází tak ke kavitační erozi.

Přestože je kavitace zkoumána již řadu desetiletí, zájem o její výzkum se zvýšil teprve v posledních letech, jelikož se zvyšují požadavky na různá hydraulická zařízení, jako jsou vodní turbíny, čerpadla, jejich armatury atd. Kavitace způsobuje hluk, snižuje účinnost strojů a má další negativní následky, proto je potřeba se jí bránit, případně navrhovat stroje tak, aby u nich nevznikala. Ovšem kavitace nemá jen záporné účinky, ale používá se i účelně například v lékařství, němž se s její pomocí odstraňuje zubní kámen či ledvinové kameny. Lze ji uplatnit i v průmyslu, v němž se s její pomocí dociluje zpevnění povrchu.

Čerpadla se často instalují do míst, u nichž není zcela jasné, v jakých režimech pracují a jestli v nich právě nedochází ke kavitaci. Je proto dobré vědět předem, že tento jev se tam objevuje a má vliv na životnost čerpadla. Tak lze včas předejít nečekaným odstávkám čerpadel, plánovat jejich opravy a zajistit nehavarijní provoz. Vytváří se možnost upravit podmínky potrubí natolik efektivně, aby ke kavitaci nedocházelo.

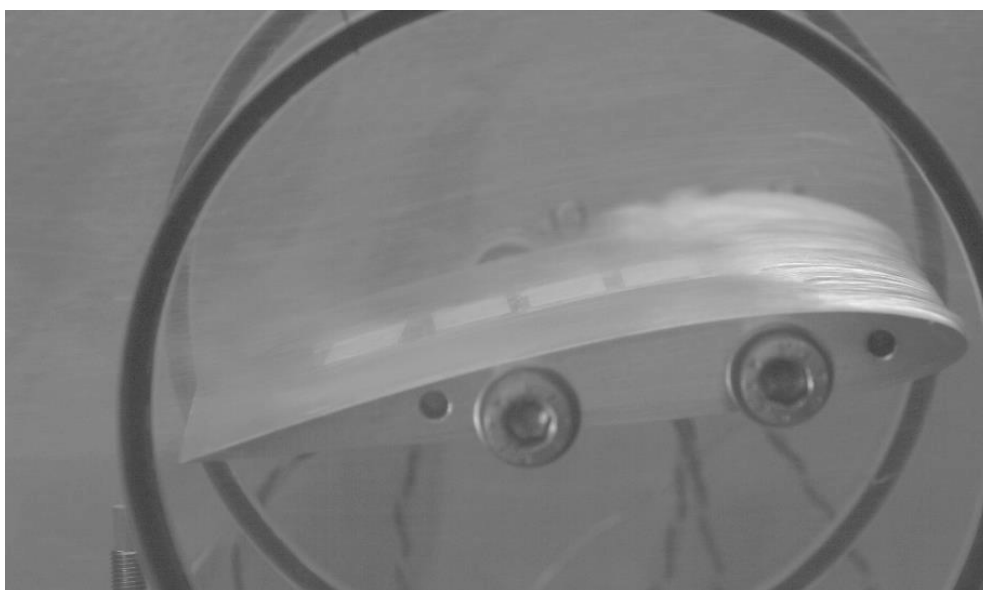
Jedním z hlavních důvodů, proč tato práce vznikla, je, že diagnostika k určení kavitace ve vodních čerpadlech neinvazivní metodou, není pro trh ještě příliš zajímavá (především cenou). Tím se otevírají možnosti ke zkoumání nových a levných alternativ.

Tato práce se zabývá především kavitací ve vodním odstředivém čerpadle a její diagnostikou.

2. Měření pomocí PVDF filmů

PVDF filmy (piezoelektrický polyvinylidenfluorid) se stávají čím dál častěji používaným měřicím snímačem. Jsou oblíbené především pro možnost měřit rychlé dynamické jevy, které mají vysokou amplitudu. Dobrých výsledků dosahuje též jejich životnost. PVDF jsou založené na piezoelektrickém jevu, kdy tlaková síla mechanicky deformuje piezoelektrický element. Lze je použít při měření impulzů síly. Jak již bylo zmíněno, bubliny vytvářejí tlakové změny, které lze vyjádřit silou. Když bubliny kolabují, projevuje se to na vnějším zařízení tlakovými změnami.³ Element, který je deformován, je polarizován a vytváří určitý náboj. Tento náboj je pak v zesilovači zesílen a změřen. Následnou kalibrací (testováním jaký elektrický náboj odpovídá jaké síle) lze určit odpovídající hodnotu tlaku v kapalině.

Tyto filmy se především instalují na profily lopatek čerpadel, turbín a dalších profilů. Jedná se tedy o testování mimo čerpadlo. Tím se studuje pouze vliv oběžného kola. Jeden z příkladů instalace těchto filmů na profil je na obrázku č. 2.



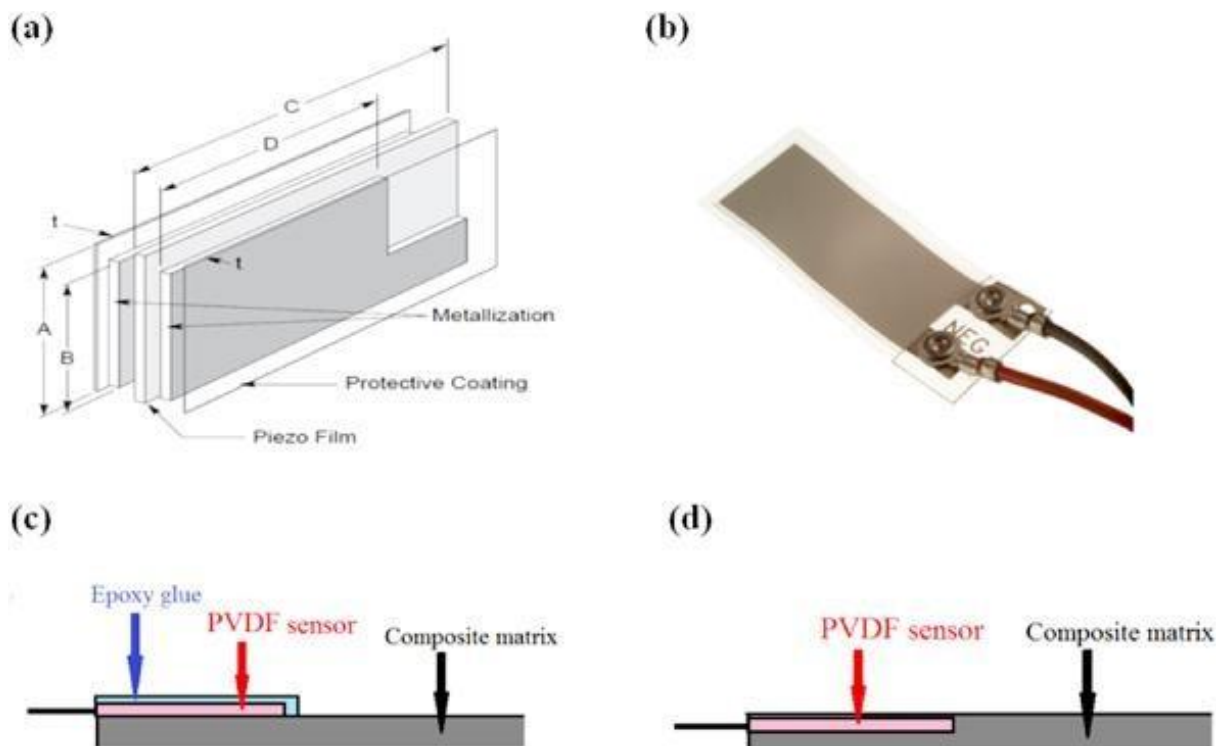
Obrázek 1 Příklad instalace filmů na profil

Tato metoda slouží především k určení sil působících na povrch lopatky. Lze s ní na základě právě již předem známých sil též měřit různé stupně kavitace. Ovšem umístění těchto filmů do reálných čerpadel je pro běžnou praxi téměř nemožné a slouží k především k návrhu tvaru lopatek.

Tyto filmy lze však lepit vně čerpadla a na základě toho detekovat kavitace. Tímto druhem diagnostiky se zabývá tato práce a bude rozepsána později.

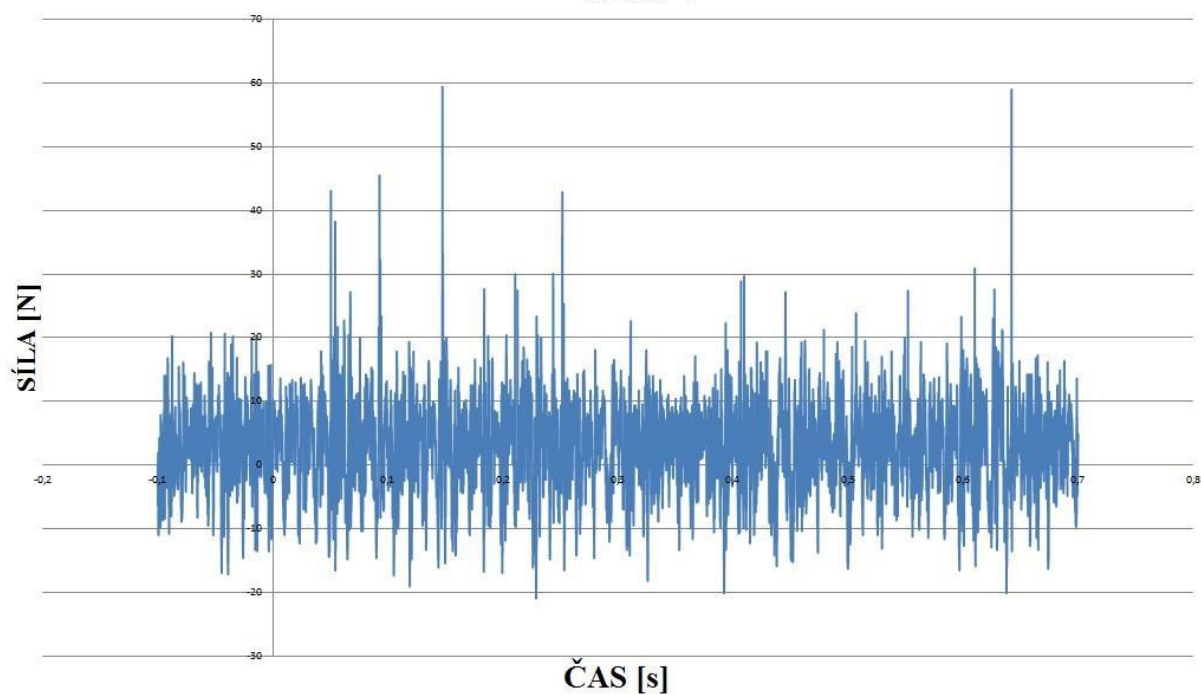
Jedním ze způsobů, jak dále aplikovat tento film, je zařízení zvané hydrofon (popsán je níže v práci).

PVDF piezoelektrické fólie (DT1-028K/L) použité v této práci vyrábí firma Measurement Specialties, Inc., PA, USA. Skládá se z aktivní oblasti 12 mm × 30 mm, která má potisk stříbrnou barvou, jež představuje elektrody na povrchu obou ochranných fólií (uretanu) s rozměry 15 mm × 40 mm. Ochranná fólie má tloušťku 28 μm. Dva elektrické vodiče jsou pak přinýtovány na konci filmu k elektrodám pro výstupní signál. Celková tloušťka je 40 μm. Jelikož je tloušťka tak malá, dosahuje film podle odhadu výrobce vysoké citlivosti až 0,013 V/N (citlivost = napětí/síla).

Obrázek 2 Ukázka PVDF filmů a jejich konstrukce ⁴

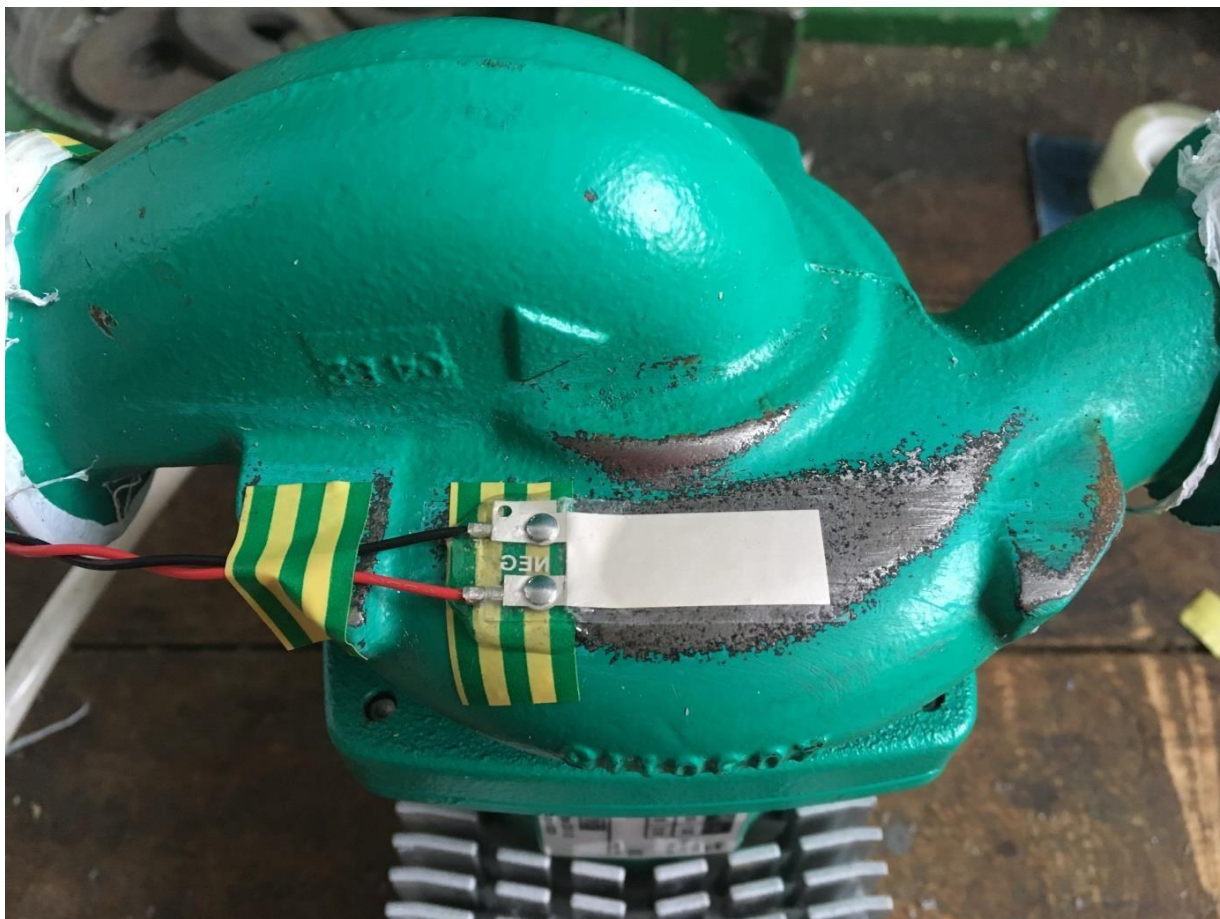
Jeden ze signálů z PVDF filmů umístěných na lopatce NACA 2412, který je velice podobný signálům získaným z vnějšku čerpadla, viz graf 14.

Film 4

Graf 1 Ukázka měřeného signálu pomocí PVDF filmů ⁵

3. Analýza signálu

K dosažení cíle jsme zvolili metodu měření pomocí PVDF filmů, které bylo třeba nalepit na vhodná místa na čerpadle a následně signál z těchto filmů zpracovat. Nalepení filmu lze vidět na obrázcích 11 a 12. Místo 1 bylo zvoleno tak, aby byl získán signál před vstupem do oběžného kola čerpadla. Místo 2 bylo vybráno tam, kde voda opouští komoru čerpadla. Tato místa by měla být zasažena kolapsem bublin nejvíce.



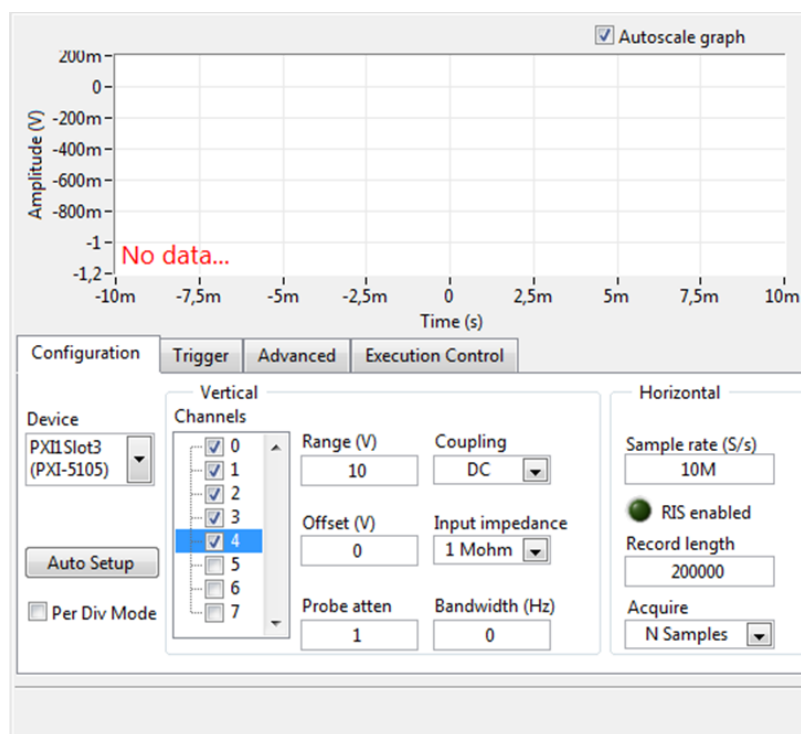
Obrázek 3 Nalepení PVDF filmu na výstupu z čerpadla

Jednotlivé filmy musely být přilepeny na předem obroušenou a odmaštěnou plochu pomocí gelového lepidla od firmy Loctite. Části, kde jsou přivedeny kabely k filmu, musely být přilepeny jiným druhem lepidla, které je pružnější a snáze se s ním vytvoří větší izolační vrstva. Odizolování kabelu je nutné, neboť jinak by docházelo k mnoha zkreslujícím jevům v signálu. Následně byly kabely ještě přilepeny izolační páskou, aby při náhodném zavadění o kabel, nedošlo k natržení filmu, který je k tomu při nalepení náchylný.



Obrázek 4 Nalepení PVDF filmu na vstupu do čerpadla

Celé zapojení čerpadla je pak stejné jako při měření jeho charakteristiky. S tím rozdílem, že filmy jsou zapojeny do osmikanálového osciloskopu. Následně zpracovaný signál byl přenesen do PC k dalšímu zpracování pomocí programu SignalExpress. Zásadním nastavením bylo nastavení osciloskopu pomocí programu Labview, který dokázal zpracovat elektrická data z osciloskopu. Nastavení ke snímání nalezneme zde na screenu.



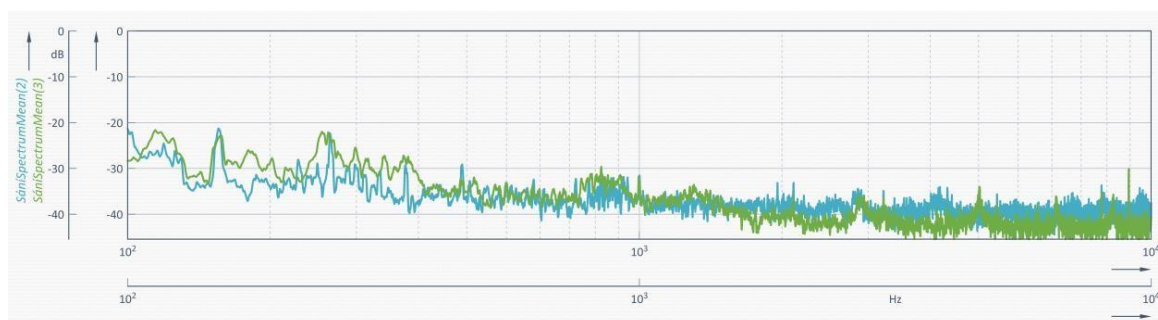
Obrázek 5 Nastavení osciloskopu

Zde se nastavovalo, které kanály mají být snímány z osciloskopu a jaký bude rozsah daného měření ve voltech. Dále se přednastavoval druh signálu a odpor. V pravé části se nastavovala délka nahrávání signálu a rychlost snímkování. V našem případě se rychlost snímkování nastavila na 1M a délka signálu na 3 000 000 záznamů. Délku signálu a rychlost snímkování je nutné nastavovat rozumně vůči technice, která je k dispozici. Sice platí, že čím větší snímkovácí frekvence a delší záznam, tím jsou k porovnání lepší, ale hardware PC poté není dostatečný a program se hroutí. Měření se spouštělo ručně a nebylo nutné nastavovat další funkce jako trigger apod.⁶

Naměřené hodnoty v Labview byly dále exportovány do programu FlexPro 10. Labview má sice funkce ke zpracování signálu, ale pro podrobnou diagnostiku, která je nutná u tohoto měření, je nedostatečná.

4. Výsledky z analýzy

Jedná se frekvenční spektrum, které na mnoha místech ukazuje odchylky mezi režimem bez kavitace (modrá křivka) a mezi křivkou s kavitací (zelená křivka).



5. Závěr

Na základě frekvenční analýzy, kde měříme pomocí PVDF filmů, lze určit pomocí diagnostiky kavitaci ve vodním čerpadle. Ovšem zařízení, které by bylo plně automatické, by muselo mít velice složitý vyhodnocovací algoritmus.

Seznam literatury

CERNETIČ, J., J. PREZELJ, M. CUDINA. Use of noise and vibration signal for detection and monitoring of cavitation in kinetic pumps. and University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenia, jan.cernetic@fs.uni-lj.si, 2008.

Experiences on cavitation detection methods authors: Researcher, M. Sc. Timo KOIVULA, Professor, Dr.Tech. Asko ELLMAN and Professor, Dr.Tech. Matti VILENIUS, Institute of Hydraulics and Automation (IHA), Tampere University of Technology.

KOTB, Ashraf, MORGAN Abdulaziz. Cavitation Detection in Variable Speed Pump by Analyzing the Acoustic and Vibration Spectrums. Ain Shams University, 2015.

HUJER, Jan. Diagnostika kavitace v hydraulickém tlumiči [bakalářská práce]. Liberec TUL, 2010.

JIŘIČEK, Václav. Kavítace ve vodním čerpadle. Liberec TUL, 2015.

TŮMA, Jiří. Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT. Liberec TUL, 1997.

Internetové zdroje

FLEK, Ondřej. Diagnostika kavítace v hydrodynamických čerpadlech [online]. Praha: Výzkumné středisko Rockwell Automation Praha [cit. 11.2004]. Dostupné z: http://automa.cz/cz/casopis-clanky/diagnostika-kavitace-v-hydrodynamickych-cerpadlech-2004_11_32626_2745/

GRUNDFOS Management A/S. Příručka čerpací techniky [online]. 2004 [cit.2017]. Dostupné z: http://net.grundfos.com/doc/webnet/waterutility/_assets/downloads/gcz/pumphandbook_gcz.pdf

HOVORKA, František. Charakteristika odstředivého čerpadla [online]. 2017 [cit.2017]. Dostupné z: <http://uchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/labchi/Ch.pdf>

Kavítace [online]. Wikipedie []. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kavitace>

Prospekt k čerpadlu Wilo: Data sheet: Wilo-Stratos – 30/1–12. http://productfinder.wilo.com/es/en/c0000001b0000accb00010023/_00000018000029430002003a/product.html#tab=6

Charakteristika čerpadla [online, cit. 2017]. http://www.mssch.cz/sites/default/files/_uzivatele/valentova/charaktcerp.pdf

INOVACE SEPARÁTORU KOVOVÝCH ČÁSTIC PRO PLASTIKÁŘSKÉ PROVOZY

KLIMENTA DAVID

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,
Fakulta strojní, 2. ročník
Magisterský studijní program – INOVAČNÍ INŽENÝRSTVÍ

Abstrakt: Práce se zabývá inovací a konstrukčním návrhem separátoru kovových částic určeného pro plastikářské provozy, kde separace probíhá v pomalu pohybujícím se sloupci materiálu. Práce je vypracována pro firmu A.M. spol. s r.o. První část se zabývá průzkumem trhu a patentů. Na základě zjištěných informací jsou vytvořeny čtyři koncepty, z nichž je pomocí metody AHP vybrána vítězná varianta. Ta je dále rozpracována a jsou provedeny návrhové a kontrolní výpočty. Konstrukce a princip jsou podrobně popsány. Práce zahrnuje konstrukční návrh včetně výkresové dokumentace a ekonomického zhodnocení, ve kterém je stanovena cena zařízení.

Klíčová slova: inovace, konstrukce, separace kovů, patentový průzkum, QFD, koncept, pevnostní kontrola, cenová kalkulace

1 Úvod

Tématem práce bude inovace separátoru kovových částic pro plastikářské provozy. Tento druh zařízení se řadí do oblasti periférií plastikářských strojů konkrétně k zařízením zajišťující čistotu materiálu. Vstupním materiálem do plastikářských strojů bývá buď čistý materiál v podobě granulátu, či zpětný materiál v podobě re-granulátu nebo drtě. Vzhledem k ekologickému myšlení spojeného s ekonomickou výhodností se zavádí stále častější zpracování drtě, která ovšem obsahuje prach a může obsahovat kovové nečistoty. V případě průchodu kovové částice až do plastikářského stroje by mohlo mít v některých případech až fatální důsledky. Částice by mohla poškodit jednu z hlavních částí stroje, šnek, trysku či vytlačovací hlavu. V případě procesu vstřikování by mohlo dojít k poškození formy, jejíž cena může převyšovat cenu vstřikovacího stroje. Cílem bude návrh a inovace separátoru kovových nečistot, který zajistí čistotu materiálu a tím zamezí nákladným opravám strojů a procesů s tím spojených. Přínosem pro firmu A.M. spol. s r.o., bude rozšíření portfolia a možnost nabídnout firmám cenově dostupné zařízení pro zajištění čistoty materiálu.

2 Cíle práce

Cílem diplomové práce je inovace separátoru kovových částic pro plastikářské provozy. Tyto separátory se používají pro separaci přímo na vstřikovacím stroji / extruderu a jsou posledním článkem dopravy materiálu. V tomto případě musí separace proběhnout ve sloupci pomalu se pohybujícího materiálu. Tento úkol bude řešen pro firmu A.M. spol. s r.o., která je dodavatelem a výrobcem přídatných strojů a zařízení pro plastikářské provozy. Důvodem inovace je zvýšení konkurenceschopnosti výrobku a rozšíření portfolia nabízených výrobků. Úkol vychází z požadavků zákazníků na tento druh výrobku.

Konstrukce separátoru musí brát ohled na strojní vybavenost firmy, kde bude separátor vyráběn. Životnost separátoru se uvažuje 5 roků při nepřetržitém provozu se 14 denní odstavkou (351 dní za rok). Separátor musí splňovat parametry viz tab. 1.

Tab. 1 - Parametr výrobku

Parametr výrobku	Hodnota	Jednotka
Velikost nejmenší detekované částice	1	[mm]
Výkon separátoru	280	[kg/hod]
Průchozí světlost	50	[mm]
Maximální velikost částice materiálu	10	[mm]
Maximální zástavbová výška	300	[mm]
Maximální teplota materiálu	100	[°C]
Maximální provozní teplota	60	[°C]

K návrhu požadovaného výrobku bude využito metod inovačního inženýrství. Bude proveden průzkum trhu a patentový průzkum, který poslouží k vyhledání možných principů separace kovových materiálů. Díky patentovému průzkumu bude možné využít znalostí z oblasti separování i z jiných oborů, než je jenom plastikářský průmysl. Zjištěné informace, parametry a požadavky povedou k vypracování 4 inovačních návrhů neboli konceptů.

Po vybrání vítězné varianty bude možné přikročit k její detailní konstrukci. V první řadě se provede rozbor separačního děje, ze kterého vyplynou odpory a síly namáhající jednotlivé součásti. Po zjištění sil a namáhání bude možné přikročit k návrhu pohonu a součástí. Navrhované součásti musí splňovat požadavky bezpečnosti a životnosti. Konstrukce separátoru bude podrobně rozebrána, popsány jednotlivé součásti a vysvětlen přesný princip funkce. Popis musí obsahovat potřebné obrázky konstrukce včetně popisů jednotlivých dílů. Konstrukce separátoru by měla být provedena s ohledem na DFX.

Práce musí také obsahovat ekonomické zhodnocení výrobku. Posledním bodem práce musí být celkové zhodnocení inovačního procesu.

3 Průzkum trhu - konkurenční separátory

S+S Protector Primus



Obr.1 - Protector Primus [1]

Nevýhody:

- hliníkové mechanické části, které mohou kontaminovat materiál a mají sníženou odolnost vůči abrazivním materiálům
- základní provedení umožňuje maximální teplotu materiálu do 80°C

Novatec EMS



Obr. 2 - Novatec EMS [2]

Nevýhody:

- velké množství odsátého materiálu
- dlouhé přerušení toku materiálu

4. Patentový průzkum

Databáze vyhledávání:

- <http://www.epo.org/>
- <https://patents.google.com/>

Vyhledávané dotazy:

- separovat materiál - separate material
- přesměrovat materiál - divert material
- odstranit kov - remove metal
- přemístit částici - relocate particle

aj.

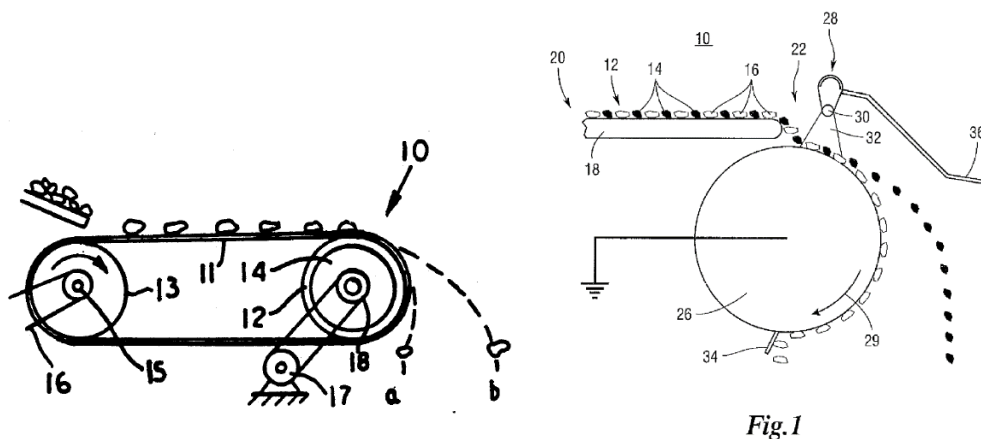
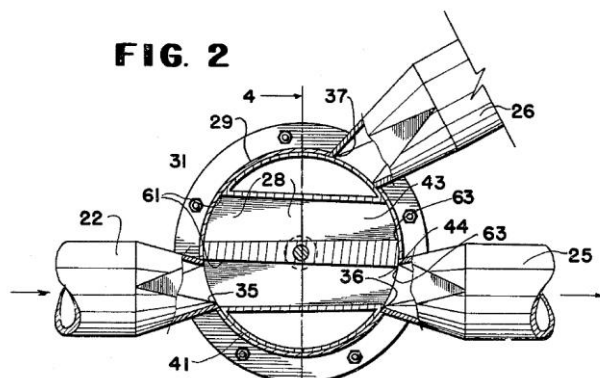


Fig.1

Obr. 3 - Separátor využívající vířivých proudů[3] Obr. 4- Vysokonapěťový elektrostatický separátor[4]



Obr. 5 - Přepínací ventil [5]

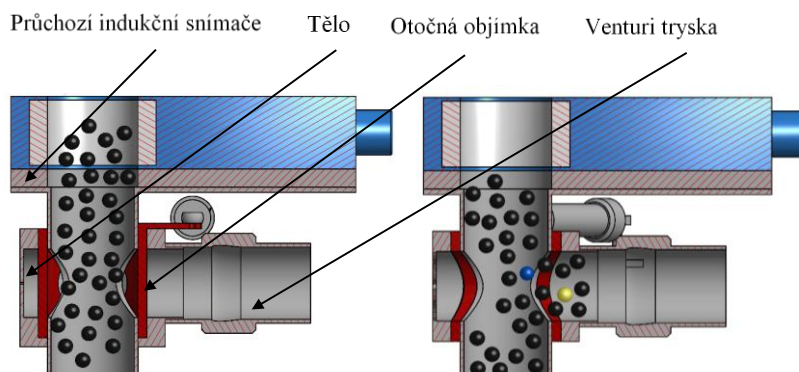
Pomocí vyhledávání v patentech byly nalezeny dva odlišné způsoby searace a jeden způsob odklonění materiálu.

5. Generování konceptů

Ze získaných informací bylo navrženo několik konceptů. Z návrhů byly vybrány čtyři koncepty, které využívají odlišného principu. Ve skicách konceptů jsou znázorněny částice materiálů dle následujícího zobrazení:

-  Plastové částice
-  Neželezné kovové částice
-  Feromagnetické částice

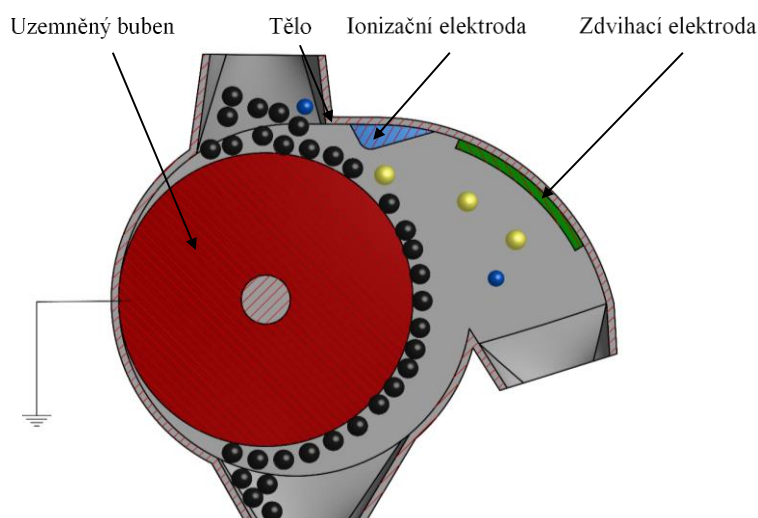
4.1 Koncept A



Obr. 6 – Koncept A

Pneumatická varianta využívá indukčního čidla pro detekci kovových částic. Kontaminovaná část materiálu je pak odsáta pomocí pneumatického dopravního systému, využívajícího venturi efektu. Tyto systémy využívají stlačeného vzduchu a pro vysoký účinek venturi efektu jsou schopné přepravovat materiál na dlouhé vzdálenosti vysokou rychlostí.

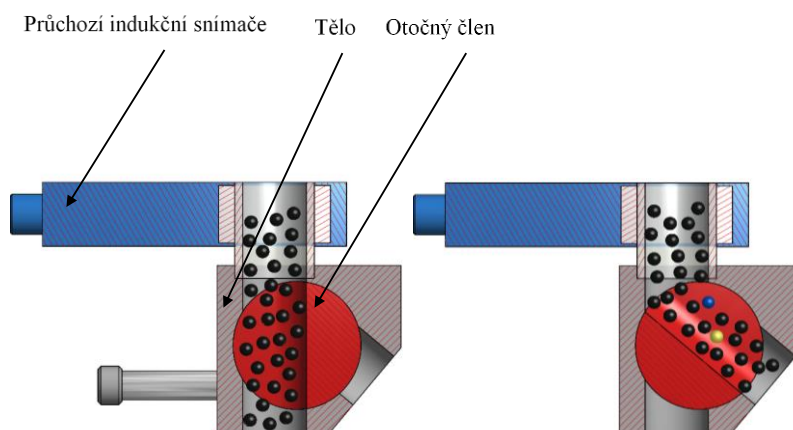
4.2 Koncept B



Obr. 7 – Koncept B

Vysoké napětí cca 30 kV je přivedeno na ionizační elektrodu, ta vytváří elektrický výboj (označovaný jako korón), při kterém dochází k ionizaci vzduchu. Vytvořené ionty a elektrony dopadají na proud materiálu přecházející přes uzemněný rotující bubnu. Dochází k nabíjení částic materiálu v závislosti na polaritě ionizační elektrody a uzemněného rotujícího bubnu. U elektricky nabitých částic vzniká elektrostatické silové působení. Částice s vyšší elektrickou vodivostí ztrácí náboj rychleji, než částice s nižší elektrickou vodivostí. Elektricky vodivé částice tedy odlétávají z důvodů působení odstředivé síly rotujícího bubnu. Zdvihací elektroda zvyšuje účinnost separace, vytváří elektrické pole, které v částicích indukuje nový elektrický náboj. Dohází k přitahování částic odlétávajících z rotujícího bubnu a jejich odchýlení od klesající dráhy [6].

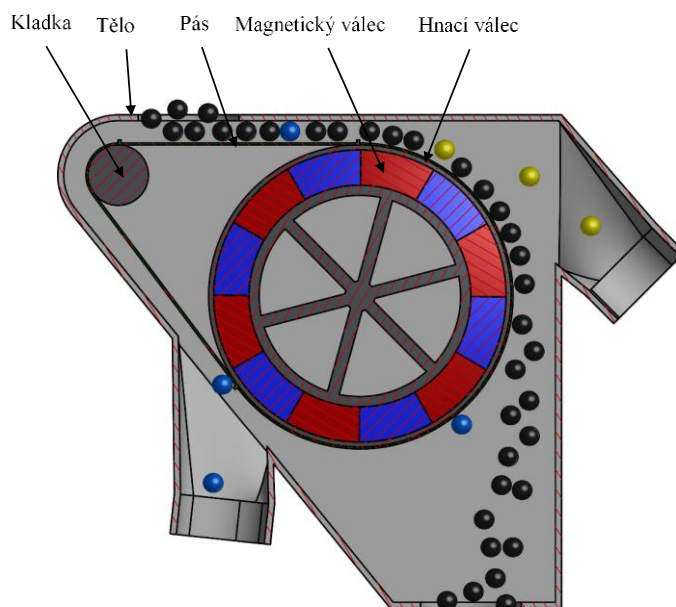
4.3 Koncept C



Obr. 8 – Koncept C

Tato varianta opět využívá k identifikaci kovové částice indukční snímač. Po identifikaci kovové částice dojde k odklonění toku materiálu pomocí otočného vyhazovacího mechanismu. Ten využívá principu rotačního přepínacího materiálového ventilu (dvoucestného přepínacího ventilu). Ten se skládá z kovového disku, který se otáčí kolem své osy, v disku je radiální díra pro průchod materiálu. Otočný disk se pomocí pneumatického či elektrického pohonu otáčí o daný úhel a tím dochází k natočení díry disku vůči statické části. Statická část má tři otvory, jeden otvor je vstupní a dva otvory výstupní, mezi výstupními otvory dochází k přepínání toku materiálu.

4.4 Koncept D



Obr. 9 – Koncept D

Čtvrtý koncept je inspirován separátory kovů na pásových dopravnících. Tyto separátory využívají vlastností vířivých proudů. Vířivé proudy působí odlišně na materiály s různou elektrickou vodivostí např. kovy a nekovové částice. Základem je rotující magneticky indukční válec, který má velký počet střídajících se pólů a rotací vytváří rychle se měnící magnetické pole. V kovových předmětech nacházejících se v tomto poli vznikají vířivé proudy, ty působí

proti změně, která je vyvolala. Kovové částice neželezných kovů jsou odpuzovány od rotoru. Materiály s nízkou elektrickou vodivostí, v tomto případě se bude jednat o plasty, nejsou magnetickým polem rotoru ovlivňovány a padají vlivem gravitace dolu. Feromagnetické částice přitahuje magnetické pole válce [7].

4 Výběr konceptu

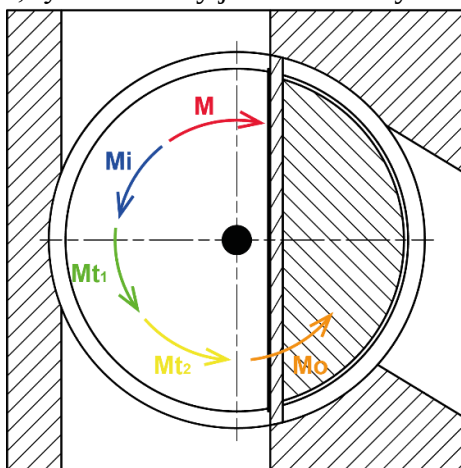
Výběr konceptu byl proveden pomocí metody AHP (Analytic hierarchy proces) pro následující kritéria:

1. Min. velikost částic
2. Množství odstraněného materiálu
3. Rychlost odstranění částice
4. Jednoduchost konstrukce
5. Spolehlivost
6. Max. zástavbová výška

Z výsledků analýzy AHP vychází nejlépe koncept C, neboli koncept s indukčním čidlem a otočným mechanickým vyhazovačem. Přednosti vítězného konceptu oproti ostatním jsou v jednoduchosti konstrukce, spolehlivosti a zástavbové výšce. Oproti jiným je horší v množství odstraněného materiálu. Koncept C vychází jako vítězný v závislosti na stanovených váhových kritériích. V dalších fázích bude podrobněji rozpracovávána varianta s indukčním čidlem a otočným mechanickým vyhazovačem

5 Výpočty a výběr pohonu

Pro návrh pneumatického pohonu bude nutné určit odporové momenty, které působí proti pohybu kyvného pohonu, tyto momenty jsou zobrazeny na obr. 10.



Obr. 10 – Momenty působící na rotor

M	-	Moment pneumatického válce
M _i	-	Setrvačný moment
M _{t1}	-	Třecí moment těsnění o rotor
M _{t2}	-	Třecí moment materiálu o stěnu těla
M _o	-	Ohybový moment pryžového těsnění
M _h	-	Moment od hybnosti materiálu

Po provedení výpočtů vyšly odporové momenty následovně:

- Setrvačný moment

$$M_i = 0,99 [N \cdot m] \quad (1)$$

- Třecí moment těsnění o rotor

$$M_{t_{t1}} = 1,51 [N \cdot m] \quad (2)$$

- Třecí moment materiálu o stěnu těla

$$M_{t_{2,1}} = 0,26 [N \cdot m] \quad (3)$$

- Odporový moment pryžového těsnění byl stanoven pomocí experimentu



Obr. 11– Měření odporového momentu pryže [vlastní]

$$M_o = 0,919 \pm 0,001 [Nm] \quad (4)$$

$$M \geq M_{p1} + M_{p2} \quad (5)$$

Potřebné momenty

$$M_{p2} = M_i \cdot 10 = 0,99 \cdot 10 = 9,9 [N \cdot m] \quad (6)$$

$$M_{p1} = (M_{t1} + M_{t_{2,1}} + M_o) \cdot (3 \text{ až } 5) = (1,51 + 0,26 + 1) \cdot 3 = 8,31 [Nm] \quad (7)$$

Potřebný moment pneumatického kyvného pohonu

$$M \geq 8,31 + 9,9 \geq 18,21 [Nm] \quad (8)$$

Vhodný typem je pneumatický kyvný pohon od firmy SMC CRA1BXU63TF-180Z.

Pevnostní kontrola hřídele

Předpokladaný počet cyklů je zaokrouhleně $1,3 \times 10^6$ cyklu, jedná o vysokocyklovou únavu.

Koeficienty a součinitele vyplývají z [8]

Materiál: ocel - E335 (1.0060)

Mez pevnosti v tahu: $R_m = 580$ [MPa]

Mez kluzu: $R_e = 436$ [MPa]

Časová mez únavy v ohybu:

$$\sigma_c^* = \frac{0,43 \cdot R_m \cdot v_2 \cdot \eta}{\beta_{No}} \quad (9)$$

$$\beta = 1 + q \cdot (\alpha - 1) \quad (10)$$

$$q = \frac{1}{2} \cdot (q_1 + q_2) \quad (11)$$

$$\beta_N = 1 + (\beta - 1) \frac{\log^4 N}{b + \log^4 N} \quad (12)$$

$$b \cong \left(\frac{12250}{R_m} \right)^2 \quad (13)$$

Vrubové součinitele hledané v grafech literatura [8]:

$q_1=0,62$ [-], $q_2=0,82$ [-], $v_2=0,90$ [-], $\eta=0,90$ [-], $\alpha=1,95$ [-]

$$q = \frac{1}{2} \cdot (0,62 + 0,82) = 0,72 \quad [-] \quad (14)$$

$$\beta_o = 1 + 0,72 \cdot (1,95 - 1) = 1,68 \quad [-] \quad (15)$$

$$b \cong \left(\frac{12250}{R_m} \right)^2 = \left(\frac{12250}{580} \right)^2 = 446 \quad [-] \quad (16)$$

$$\beta_{No} = 1 + (1,68 - 1) \cdot \frac{\log^4 1263600}{446 + \log^4 1263600} = 1,51 \quad [-] \quad (17)$$

$$\sigma_c^* = \frac{0,43 \cdot 580 \cdot 0,9 \cdot 0,9}{1,51} = 133,78 \quad [\text{MPa}] \quad (18)$$

Napětí v ohybu:

$$\sigma_o = \frac{M_{omax}}{W_o} = \frac{32 \cdot M_{omax}}{\pi \cdot d^3} = \frac{32 \cdot 6260}{\pi \cdot 25^3} = 4,08 \quad [\text{MPa}] \quad (19)$$

Bezpečnost v ohybu

$$k_\sigma = \frac{\sigma_c^*}{\sigma_o} = \frac{133,78}{4,08} = 32 \quad [-] \quad (20)$$

Časová mez únavy v krutu:

$$\tau_c^* = \frac{0,25 \cdot R_m \cdot v_3 \cdot \eta}{\beta_{Nk}} \quad (21)$$

Vrubové součinitele hledané v grafech literatura [18]:

$v_3=0,90$ [-], $\alpha_k=1,7$ [-]

$$\beta_k = 1 + 0,72 \cdot (1,7 - 1) = 1,50 \quad [-] \quad (22)$$

$$\beta_{Nk} = 1 + (1,50 - 1) \cdot \frac{\log^4 1263600}{446 + \log^4 1263600} = 1,38 \quad [-] \quad (23)$$

$$\tau_c^* = \frac{0,25 \cdot 580 \cdot 0,9 \cdot 0,9}{1,38} = 85,11 \quad [\text{MPa}] \quad (24)$$

Kontrola na krut:

Napětí v krutu:

$$\tau_k = \frac{M_k}{W_k} = \frac{16 \cdot M_{0,6}}{\pi \cdot d^3} = \frac{16 \cdot 20600}{\pi \cdot 25^3} = 6,71 \quad [\text{MPa}] \quad (25)$$

Bezpečnost v krutu

$$k_\tau = \frac{\tau_c^*}{\tau_k} = \frac{85,11}{6,71} = 12 \quad [-] \quad (26)$$

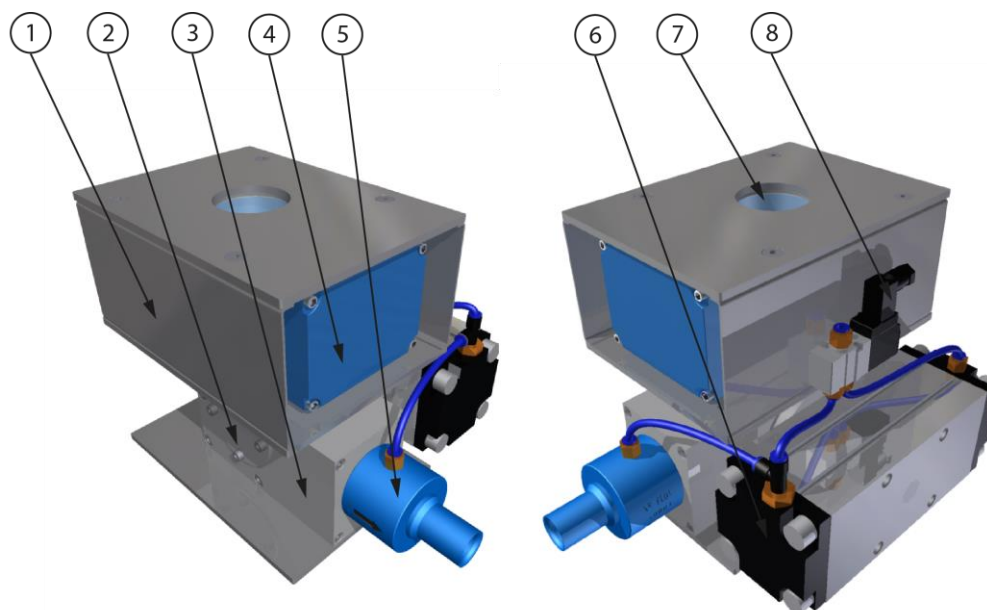
Celková bezpečnost

$$k = \sqrt{\frac{k_{\sigma 1}^2 \cdot k_{\tau 1}^2}{k_{\sigma 1}^2 + k_{\tau 1}^2}} = \sqrt{\frac{32^2 \cdot 12^2}{32^2 + 12^2}} = 11 \quad [-] \quad (27)$$

Bezpečnost hřídele vychází vysoká, ovšem průměr hřídele je dán připojovacími rozměry pro spojení s pneumatickým pohonem.

6 Konstrukce

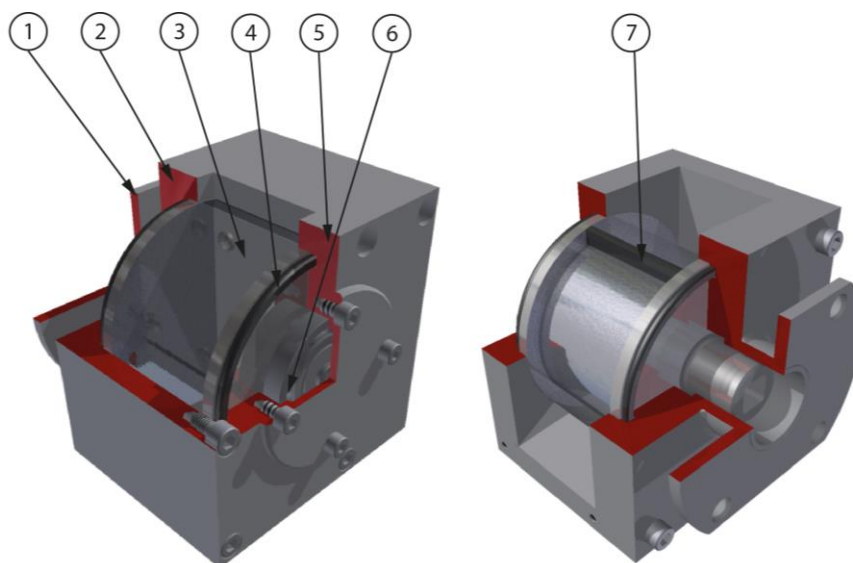
3D model je zobrazen na obr. 12 s označením základních dílů, které jsou pojmenovány v legendě pod obrázkem.



Obr. 12 – Konstrukce separátoru [vlastní]

1 – krytí čidla, 2 – diverter (vyhazovací mechanismus), 3 – odsávací komora, 4 – indukční snímač KJR-D70AN-DNIA-VE, 5 – pneumatický dopravní systém - venturi tryska, 6 – pneumatický kyvný pohon s pastorkem a hřebenem, 7 – skleněná trubka, 8 – solenoid ventil

Zařízení je uzpůsobeno pro montáž přímo na hrdlo plastikářského stroje, spodní a horní příruba bude uzpůsobená dané aplikaci. Nad separátorem může být násypka na materiál popřípadě zařízení pro dopravu materiálu. V případě zaznamenání nečistoty dojde k otočení rotoru diverteru o 121° a tím k odklonění toku materiálu. Diverter je popsán na obr 13.



Obr. 13 – Konstrukce divertéru [vlastní]

1 – zadní víko – příruba kyvného pohonu 2 – tělo diverteru, 3 – plech pro upevnění těsnění, 4 – o kroužek, 5 – přední víko, 6 – kuličkové ložisko, 7 – pryžové těsnění

7 Závěr

Práce se zabývala inovací a konstrukčním návrhem separátoru kovových částic určeného pro plastikářské provozy. Separace probíhá ve sloupci pomalu se pohybujícího materiálu a je možné separátor umístit přímo na hrdlo plastikářského stroje. Separátor byl navrhován jako nový výrobek pro firmu A.M. spol. s r.o., který rozšíří portfolio nabízených zařízení. Při návrhu bylo využito metod inovačního inženýrství.

Nejdříve byl proveden průzkum trhu separátorů pracujících ve sloupci pomalu se pohybujícího materiálu a byly zmíněny některé jejich nedostatky. Jako další krok následoval patentový průzkum. Nalezení několika patentů vedlo k odhalení dvou různých způsobů separace kovů a jednoho patentu týkajícího se odklonění materiálu. V dalším kroku již bylo možné přikročit k návrhu konceptů, které vycházejí z parametrů stanovených v předchozích kapitolách. Došlo k navržení čtyř konceptů, s různými principy separace. Dva koncepty využívají pro identifikaci částice indukčního čidla a část kontaminovaného materiálu je odstraněna. Další koncept využívá principu elektrostatické separace a v posledním navrhnutém konceptu je kovová částice odstraněna díky vířivým proudům. Ze čtyř navržených konceptů bylo nutné vybrat ten nejlepší. Pro výběr se využilo metody AHP. Nejvhodnější variantou se stal koncept s indukčním čidlem a otočným mechanickým vyhazovačem (diverterem).

Pro konstrukci bylo nejdříve nutné provést výpočty navrhovaných součástí a výběr nakupovaných dílů zejména pneumatického pohonu a indukčního senzoru. Velikost nejmenší detekované částice je zaručena indukčním snímačem, který detekuje kovové částice větší než 1 [mm]. Senzor obklopuje skleněnou trubku, ta umožňuje průchod materiálu o teplotách do 100 [°C] a zároveň definuje průchozí světlost separátoru na požadovaných 50 [mm]. Provozní teplota separátoru je omezena maximální pracovní teplotou senzoru 70 [°C], což splňuje požadavky. Výkon 280 [kg/hod] je zaručen výpočty při návrhu diverteru. Konstrukce předpokládá maximální velikost částic 10 [mm], případné problémy s velikostí částic odhalí testování prototypu. Zástavbová výška separátoru činí 215 [mm]. Návrh splňuje parametry zadané v cílech práce, bere zřetel na výrobitelnost v podmínkách firmy a na jednoduchost montáže. Konstrukce byla provedena s ohledem na metody DFX. Byly vytvořeny 3D modely a z nich následně výkres sestavy s kusovníkem a výrobními výkresy počítaných dílů.

Výsledná cena separátoru kovových částic byla vypočítána 109524 Kč bez DPH za kus a jedná se o prodejní cenu.

Práce tedy splňuje všechny stanovené cíle. Výsledkem je návrh separátoru kovových částic, který splňuje požadované parametry. Návrh umožní zhotovení funkčního prototypu a jeho následné testování.

Literatura

- [1.] PROTECTOR [online]. [cit. 2017-02-28]. Dostupné z: <http://www.sesotec.com/en/profiler/production-industry/plastics-industry/injection-molding-machines/protector/>
- [2.] Electronic Metal Separators EMS-23 [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://www.novatec.com/wp-content/uploads/2012/08/EMS-23-MAR-2015.pdf>
- [3.] Eddy current separator and method of making a rotor. US5236091A. Uděleno 1993-08-17
- [4.] High-tension electrostatic separator lifting electrode. US7973258B2. Uděleno 2011-07-05
- [5.] Diverter valve. US3489178A. Uděleno 1970-01-13.
- [6.] Waste Management. 2009, 29(1). ISSN 0956-063X.
- [7.] SEPARÁTORŮ NEŽELEZNÝCH KOVŮ [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <https://www.magnety.cz/separatory-nezelezných-kovů/>
- [8.] JÁGROVÁ, Jitka a Lukáš ČAPEK. Dynamická únosnost a životnost. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-135-1.

SNÍŽOVÁNÍ CO₂ Z VNITŘNÍCH PROSTOR

Kořínek Tomáš

Sekce – STROJÍRENSTVÍ,

Fakulta strojní, 2. ročník

Doktorský studijní program – STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

Abstrakt: Tato práce pojednává o zařízení určeném ke snižování oxidu uhličitého (CO₂) ve vnitřních prostorách. Je zde podrobně popsán princip adsorpce, na které zařízení pracuje. Pro ověření teoretických poznatků bylo vyhotoveno jednoduché zařízení, které bylo podrobeno důkladným měření. Zařízení využívá teplotní adsorpční-desorpční smyčky (TSA). Bylo provedeno několik numerických simulací pro lepší pochopení teoretických poznatků. Na základě výsledků a poznatků z experimentu a numerických simulací byly navrženy úpravy zařízení, aby ho bylo možné použít i v běžných podmínkách.

Klíčová slova: oxid uhličitý, kvalita vnitřního prostředí, adsorpce, aktivní uhlí

1 Úvod

Americká agentura pro ochranu prostředí prokázala, že ve vnitřních prostorách se nachází 2x-5x více znečišťujících látek než ve venkovním prostředí. Právě dlouhodobý výskyt v prostředí s vysokými hodnotami znečišťujících látek má výrazný vliv na lidský organismus [1-2]. Světová zdravotnická organizace a mezinárodní agentura pro výzkum rakoviny došly ke zjištění, že velká část rakovinových onemocnění je připisována prostředí než genetickým předpokladům.

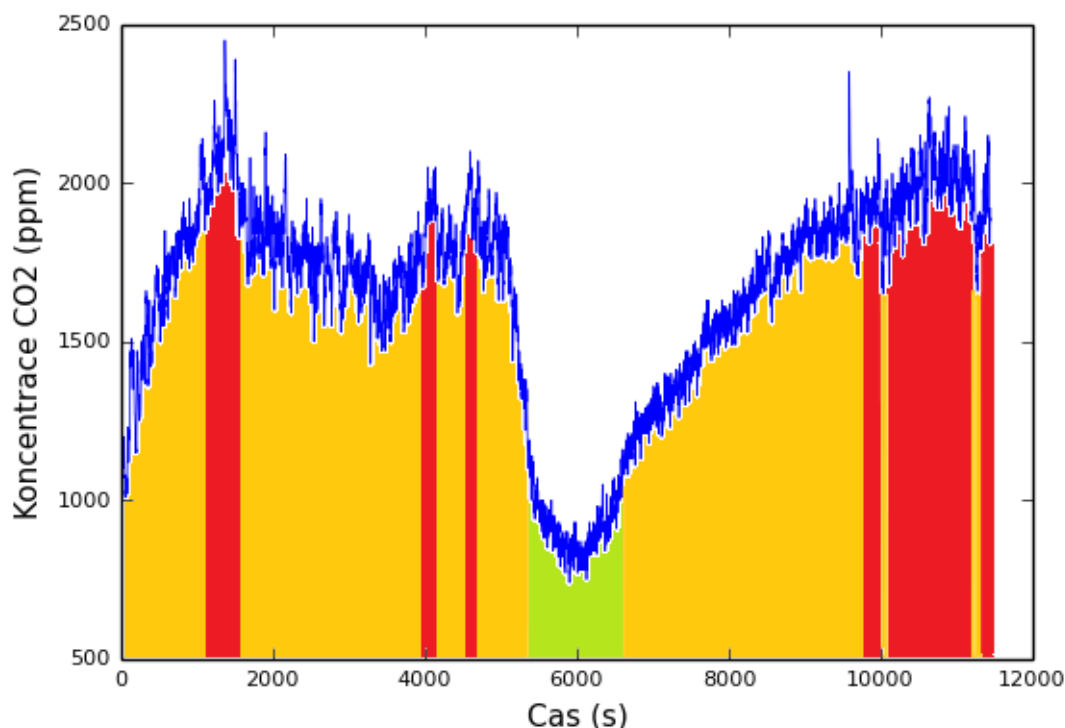
Oxid uhličitý (CO₂) je primárním produktem lidského metabolismu a bývá často používán jako indikátor kvality ovzduší uvnitř. Zároveň je nutno podotknout, že právě CO₂ je nejčastěji zastoupenou znečišťující látkou. Koncentrace CO₂ venku se v současné době pohybuje na úrovni 400 ppm. Přijatelná hodnota koncentrace CO₂ uvnitř je do 1000 ppm, kdy do této koncentrace nemá CO₂ prakticky žádný vliv na lidský organismus. V rozmezí 1000-2000 ppm se mohou projevit u lidí příznaky únavy a ztráty koncentrace. V rozmezí 2000-5000 ppm se už vyskytuje bolest hlavy a nad 5000 ppm je nevolnost, zvýšený tep, hodnoty nad 15000 ppm už provází dýchací potíže a nad 40000 ppm dochází ke ztrátě vědomí [3]. Mezi další znečišťující látky patří např. formaldehyd, radon, ozon a dále různé radikální organické sloučeniny (VOC).

Právě vysoké hodnoty CO₂ uvnitř byly hlavní motivací pro tvorbu zařízení, které by bylo schopno udržovat hladinu CO₂ v přijatelných mezích.

1.1 CO₂ v učebnách

Jak již bylo řečeno, motivací pro tvorbu zařízení schopného snížit koncentraci CO₂ uvnitř jsou nadlimitní koncentrace. Zároveň bylo provedeno několik měření při výuce, kde byl měřen časový průběh koncentrace CO₂. Celkový součet naměřených hodnot ve výuce je více než 50 hodin. Při těchto měřeních bylo zjištěno, že v některých učebnách je koncentrace CO₂ již od začátku vyučovacího bloku v nepříznivé oblasti. Jeden ze záznamů je zobrazen na obrázku 1. Při tomto měření bylo během prvního vyučovacího bloku přítomno 25 studentů a během druhého 16 studentů. Dvě okna ze tří celkových byla otevřena do režimu větrání a vstupní dveře byla zavřená. Průměrná teplota během měření byla 24 °C uvnitř a 19 °C venku. V pauze mezi bloky byly vstupní dveře plně otevřeny. V grafu jsou barevně odlišeny časové úseky,

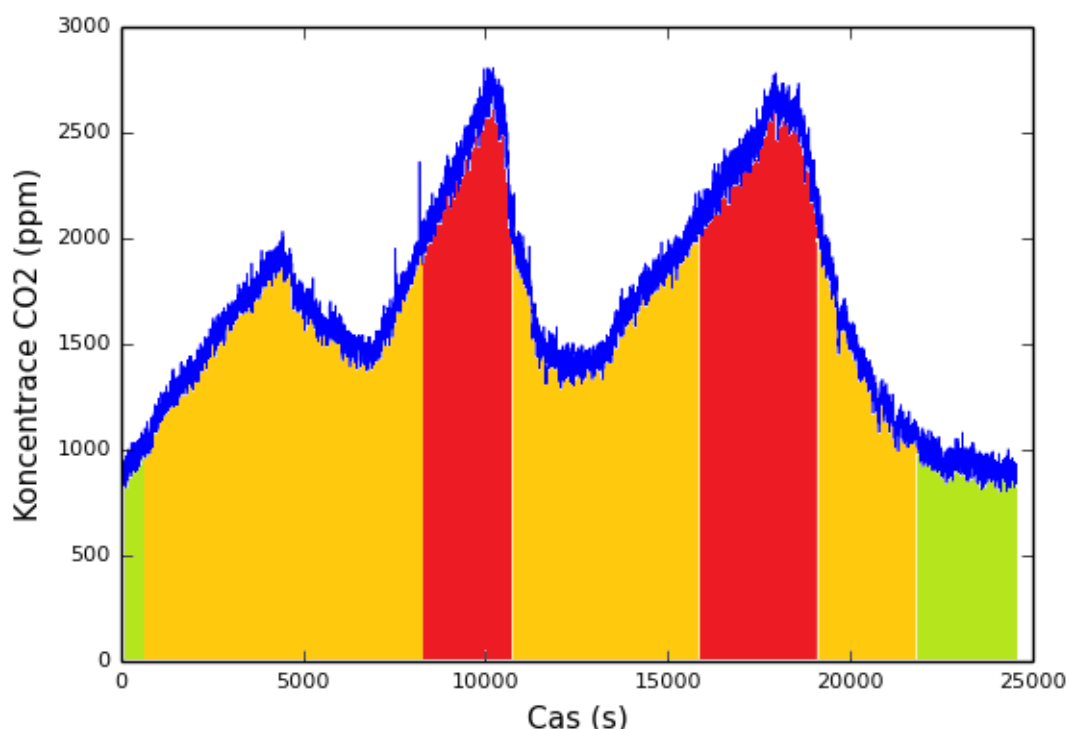
podle vlivu na lidský organismus. Zeleně označený úsek je pro koncentraci CO_2 , která nemá vliv na lidský organismus. Oranžově označená oblast je pro hodnoty CO_2 , kdy se může vyskytovat u lidí snížená koncentrace a únava. Červeně je označena oblast, kdy se začínají u lidí objevovat bolesti hlavy.



Obrázek 1 : Průběh koncentrace CO_2 během dvou po sobě jdoucích vyučovacích bloků.

1.2 CO_2 v kanceláři

Kromě měření ve výuce byla dále prováděna měření v kanceláři. Celkový součet naměřených hodnot v kanceláři je více než 150 hodin. Jeden ze záznamů je zobrazen na obrázku 2. Při tomto měření se většinu času nacházely 2 osoby v kanceláři. Jediné okno, které je v kanceláři, bylo střídavě otevíráno do režimu větrání. Průměrná teplota během měření byla $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ uvnitř a $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ venku. V grafu jsou barevně odlišeny časové úseky, podle vlivu na lidský organismus. Zeleně označený úsek je pro koncentraci CO_2 , která nemá vliv na lidský organismus. Oranžově označená oblast je pro hodnoty CO_2 , kdy se může vyskytovat u lidí snížená koncentrace a únava. Červeně je označena oblast, kdy se začínají u lidí objevovat bolesti hlavy.



Obrázek 2 : Průběh koncentrace CO₂ v kanceláři.

2 Teorie snižování CO₂

Existuje několik způsobů jak snížit CO₂ ze vzduchu, mezi ty hlavní patří adsorpce a absorpce. Absorpce je proces při kterém dochází k přeměně látky na novou sloučeninu v důsledku chemické reakce. Adsorpce je povrchová záležitost, při které nedochází k přeměně látky na novou sloučeninu [4]. Při adsorpci jde vlastně o ulpívání látky (adsorbát na povrchu materiálu s vysokou hodnotou specifického povrchu (adsorbent). Opačný proces, při kterém dochází k uvolňování adsorbátu z adsorbentu, se nazývá desorpce.

V základu lze rozlišovat dva druhy adsorpce, fyzikální a chemickou. Tyto dvě adsorpce se od sebe liší způsobem ulpívání. Chemická adsorpce je zprostředkována silnými chemickými vazbami a probíhá pouze v jedné vrstvě na povrchu. Fyzikální adsorpce je naopak zprostředkována slabšími Van der Waalsovými silami a na rozdíl od chemické dochází i k vícevrstvé adsorpci.

Pro případ jednoduchého opakování cyklu adsorpce a desorpce není chemická adsorpce příliš vhodná vzhledem k náročnosti procesu desorpce z důvodu silných vazeb. Právě fyzikální adsorpce je mnohem vhodnější a to právě díky časově a energeticky méně náročného procesu desorpce.

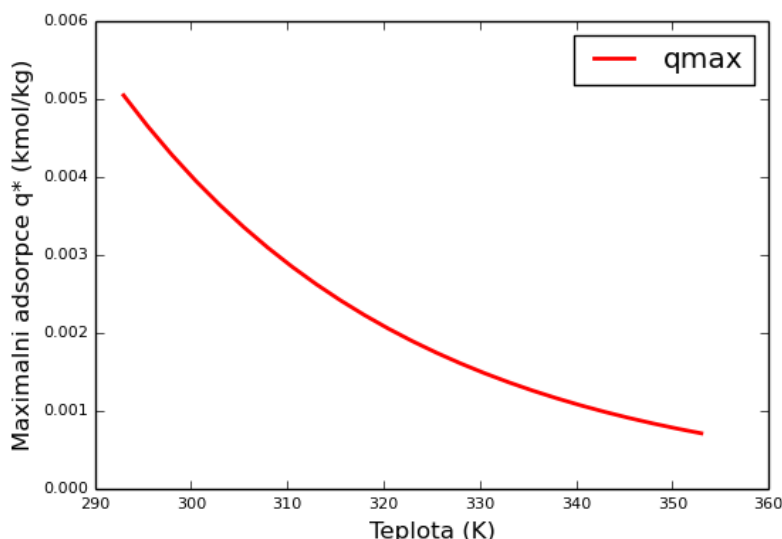
V rovnici 1 je napsán vztah pro výpočet maximální hodnoty adsorbované látky [5]. Z této rovnice lze vyčíst, že tato maximální hodnota závisí na tlaku a teplotě. Právě na těchto dvou parametrech jsou závislé způsoby procesu adsorpce-desorpce. První způsob je proces při změně tlaku, v angličtině je tento proces označován Pressure Swing Adsorption (PSA) [6]. Druhý proces je při změně teploty, v angličtině označován jako Temperature Swing Adsorption (TSA) [7]. Další používaný proces vychází z procesu TSA a je založen na Joulově efektu, kdy zapojením adsorbentu ke zdroji elektrického napětí dojde k jeho zahřívání. Tento proces bývá označován jako Electric Swing Adsorption (ESA) [8].

Pro naše zařízení byla zvolena varianta TSA pro její snazší provedení pro případ užití ve vnitřních prostorách a dále z důvodu použití granulovaného adsorbentu. Jako adsorbent bylo zvoleno granulované aktivní uhlí od firmy CarboTech. Aktivní uhlí má nárůzdíl od ostatních adsorbentů možnost regenerace na původní vlastnosti. Další skupinou hojně zkoumaných adsorbentů jsou Zeolity. Ty nárůzdíl od aktivního uhlí nemají sto procentní regeneraci a postupem používání dochází k degradaci adsorpčních vlastností.

$$q^* = q_{max} \exp \left[- \left(\frac{RT}{E_a} \ln \left(\frac{p_s}{p} \right) \right)^n \right] \quad (1)$$

Kde E_a je aktivační energie, n je Dubinin-Astakhův koeficient, p je tlak, p_s je saturační tlak q^* je korigovaná hodnota maximální adsorpce, q_{max} je maximální hodnota adsorpce při saturační teplotě a tlaku, R je univerzální plynová konstanta, T je teplota.

Závislost korigované maximální hodnoty adsorpce na teplotě je zobrazena na obrázku 3. Adsorbentem je aktivní uhlí a adsorbát je CO_2 . Zde jde vidět, že zvýší-li se teplota o 60 Kelvinů, dojde k pětinasobnému snížení maximální hodnoty adsorpce.



Obrázek 3: Závislost maximální hodnoty adsorpce na teplotě, adsorbát= CO_2 , adsorbent=aktivní uhlí.

Kinetika adsorpce je popsána v rovnici 2. Jedná se o lineární model, který je nejčastěji používán při numerických simulacích [9].

$$\frac{\partial q}{\partial t} = k(q^* - q) \quad (2)$$

Kde k je koeficient přenosu hmoty.

V rovnicích 3-6 je popsán matematický model adsorpce plynu na pevném adsorbentu. Tento model byl využit pro numerickou simulaci cyklu adsorpce-desorpce v režimu TSA.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) + \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right) \rho_{AC} \frac{\partial q}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - u_i \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right) \rho_{AC} \frac{\partial q}{\partial t} \quad (4)$$

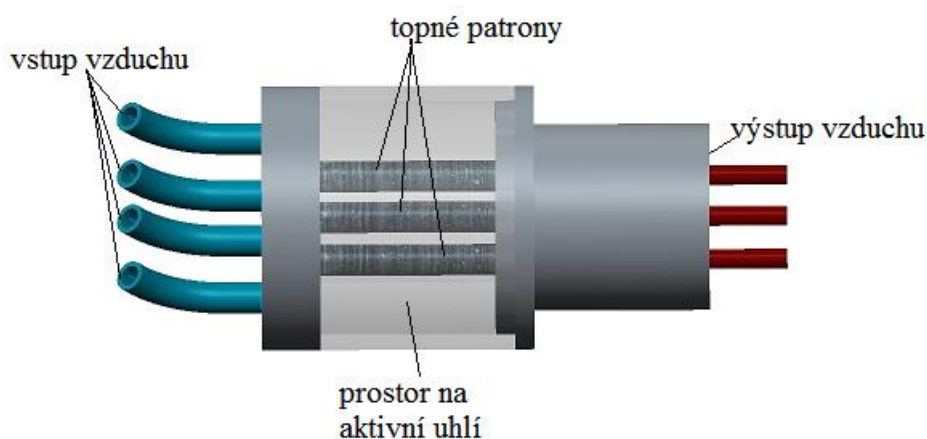
$$\frac{\partial \rho Y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho Y u_j) = \rho D \frac{\partial^2 Y}{\partial x_j^2} - \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right) \rho_{AC} \frac{\partial q}{\partial t} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho H u_j) = \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} u_i) - \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right) \rho_{AC} \frac{\partial q}{\partial t} \quad (6)$$

Kde D je koeficient molekulární difuze, H je celková entalpie, p je tlak, u je rychlost, Y je hmotnostní podíl CO_2 ku směsi, ρ je hustota směsi, ρ_{AC} je hustota aktivního uhlí, ε je porozita, τ je tenzor smykových napětí.

3 Experiment

Pro ověření schopnosti aktivního uhlí adsorbovat CO_2 bylo vybudováno jednoduché zařízení. Schéma zařízení je zobrazeno na obrázku 4. Základem zařízení je komora s aktivním uhlím, která byla vyrobena z polykarbonátu. Na levé straně zařízení se nacházejí 4 vstupy vzduchu, na pravé straně je jeden výstup vzduchu. V prostoru pro aktivní uhlí jsou umístěny 3 topné patrony. V této variantě bylo aktivní uhlí přímo ohříváno topnými patronami a chlazeno vstupním přívodem vzduchu.



Obrázek 4 : Schéma zařízení pro zachycení CO_2 na aktivním uhlí.

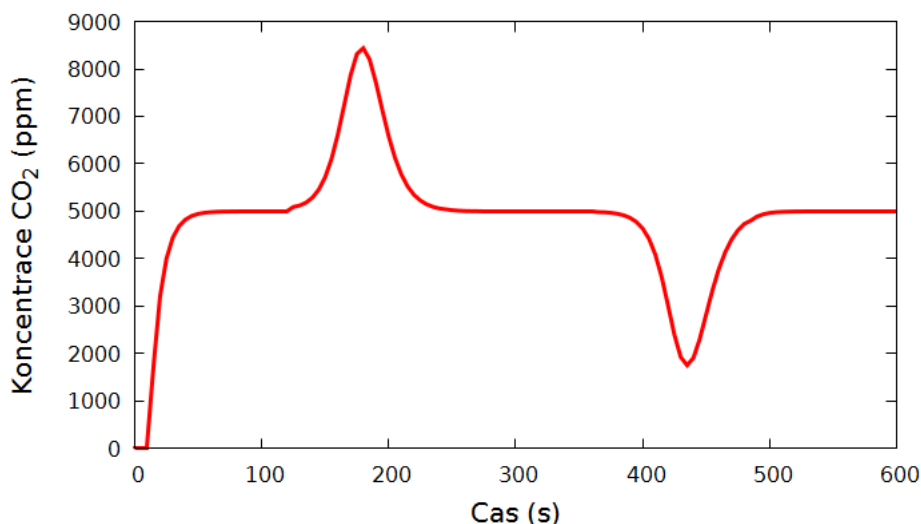
Výše popsané zařízení nebylo jediné, které bylo vytvořeno. Této variantě předcházelo několik dalších variant, na kterých byly postupně eliminovány jednotlivé nedostatky. Jedním z hlavních nedostatků byl proměnlivý průtok vzduchu na vstupu z důvodu použití nevykonného ventilátoru. Nedostatečný výkon topných patron, který způsobil zdlouhavý proces ohřívání aktivního uhlí.

Měření vstupní a výstupní koncentrace CO_2 zajišťoval NDIR sensor Cozir od firmy Gas Sensing Solutions. Sensor byl připojen k počítači Raspberry Pi, který pomocí jednoduchého pythonovského kódu zpracovával a ukládal data.

Zajištění smyčky TSA bylo pomocí mikro kontroléru Arduino UNO, který zpracovával data ze snímačů teploty a ovládal spínání topných patron. Arduino bylo dále propojeno s Raspberry Pi z důvodu přenosu informace o výstupní hodnotě koncentrace CO_2 .

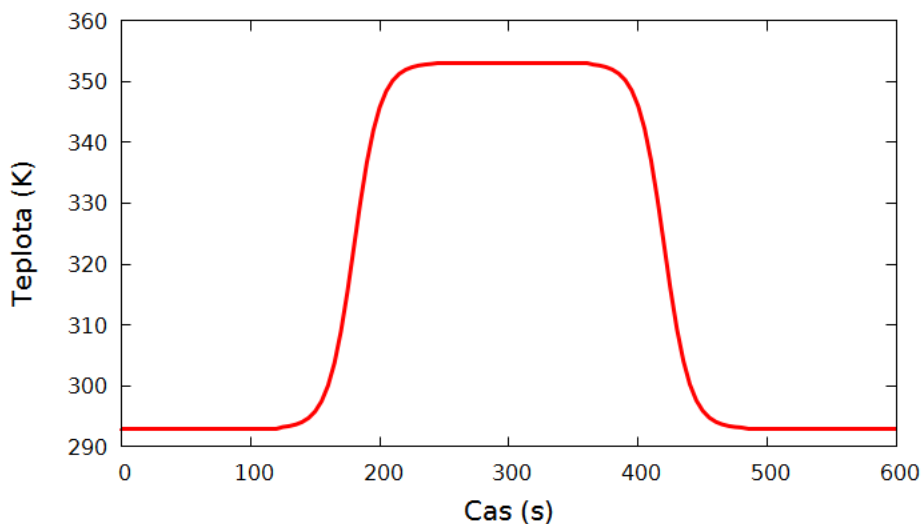
Funkce zařízení byla podrobena i numerickému experimentu. Numerické simulace byly provedeny v opensource softwaru OpenFOAM. Pro účely simulace byl naprogramován nový řešič, který dokázal řešit proces adsorpce-desorpce. Řešič vycházel z řešiče pro simulování vícesložkového systému v OpenFOAMu označován jako reactingFoam. Do řešiče byl doprogramován lineární kinetický model, Dubinin-Astakhův vztah a dále byly upraveny rovnice popisující transport hmoty, tepla a momentu.

Na obrázku 5 je vyobrazen časový průběh hodnoty koncentrace CO_2 na výstupu ze zařízení získaný ze simulace. Jdou zde vidět jednotlivé fáze procesu adsorpce desorpce. Vstupní koncentrace CO_2 byla 5000 ppm. V první fázi jde vidět postupný nárůst koncentrace CO_2 na vstupní hodnotu, tím jak docházelo k postupnému zaplňování aktivního uhlí. V druhé fázi je vidět rapidní nárůst koncentrace CO_2 a následný pokles na vstupní hodnotu koncentrace. V této fázi došlo k uvolnění CO_2 adsorbovaného v aktivním uhlí. Třetí fázi již představuje začátek další smyčky, kdy docházelo opět k adsorpci CO_2 na aktivním uhlí, dokud nedošlo k jeho zaplnění.



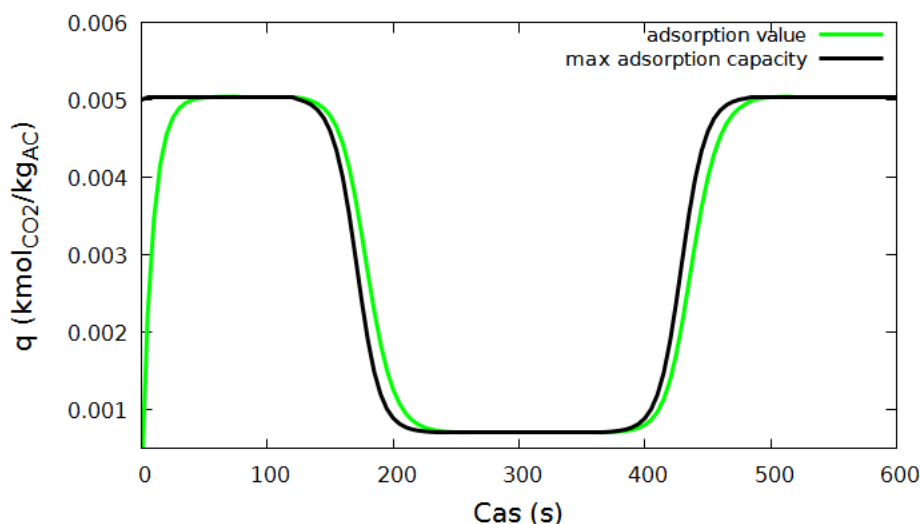
Obrázek 5: Průběh koncentrace CO_2 v čase během TSA cyklu.

Další graf na obrázku 6 představuje průběh teploty během smyčky. Vstupní teplota vzduchu byla 293 K a teplota, na kterou bylo aktivní uhlí zahříváno, byla 353 K. V tomto případě, jde o průběh teploty ze simulace, která odpovídala střední hodnotě teploty v aktivním uhlí.



Obrázek 6: Průběh teploty v čase během TSA cyklu.

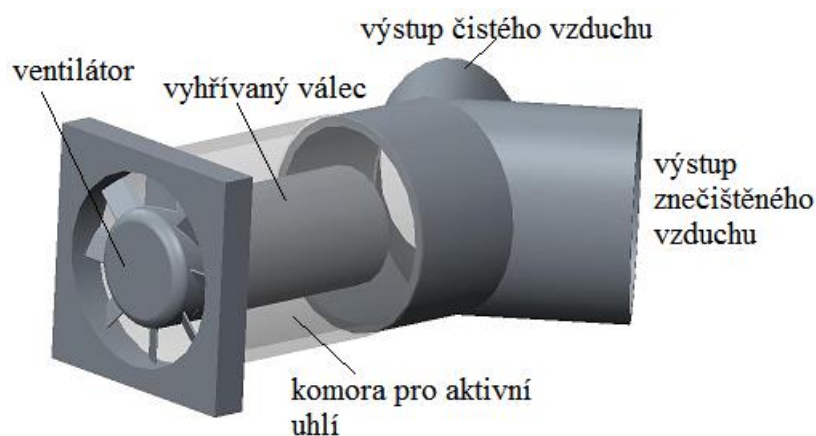
Pro lepší pochopení chování klíčových parametrů adsorpce je na obrázku 7 vyobrazen graf průběhu maximální adsorpční kapacity a aktuální hodnoty adsorbovaného množství.



Obrázek 7: Průběh parametrů adsorpce během TSA cyklu.

4 Zařízení pro běžné použití

Vzhledem k příznivým výsledkům z experimentu bylo navrženo několik úprav zařízení, tak aby bylo vhodné pro běžné použití. Tlakový přívod vzduchu je nahrazen ventilátorem a s tím souviselo několik úprav komory s aktivním uhlím. Komora se skládá ze dvou částí, kde vnitřní část tvoří vyhřívaný válec a vnější část tvoří válec z tepelně nevodivého materiálu. Aktivní uhlí se nachází mezi těmito válci. Za komorou je umístěn separátor čistého vzduchu, který je formě potrubní spojky s klapkou. Klapka má za účel měnit cestu proudu vzduchu v závislosti na cyklu zařízení. Pro případ adsorpce je vzduch ze zařízení vrácen zpět do místnosti. V procesu desorpce z aktivního uhlí je vzduch směřován ven z místnosti. Zjednodušený 3D model zařízení je na obrázku 8.



Obrázek 8: Zařízení pro zachycení CO₂ pro běžné užití.

5 Závěr

V úvodu této práce je uvedena krátká motivace, proč se zabývat snižováním škodlivých látek uvnitř. Jsou zde uvedeny výsledky z měření koncentrace CO₂ v učebně a kanceláři. Z těchto výsledků je patrné, že člověk je po většinu doby vystaven koncentracím CO₂, které už mají vliv na jeho organismus.

Dále zde byl popsán základní princip zařízení využívající adsorpci pro snížení CO₂ v místnosti. Na základě teoretických poznatků byl vybudován jednoduchý funkční vzorek pro

prvotní testování procesu adsorpce-desorpce. Na tomto zařízení byl ověřen princip adsorpce-desorpce pomocí teplotní smyčky TSA.

Pro lepší pochopení teoretických poznatků byly provedeny numerické simulace, kde výsledky z těchto simulací byly v dobré shodě s daty získanými z experimentu. Právě numerické simulace mohou dále posloužit pro optimalizaci zařízení vzhledem k širokému spektru výsledků, které z nich můžeme získat.

Hlavní přínos této práce spočívá v samotném zařízení, které bylo vybudováno. Toto zařízení je oproti ostatním doposud vybudovaným zařízením mnohem menší a skládá se z cenově dostupných komponent a materiálů. Použitá měřicí a řídicí technika snížila cenu experimentu na zlomek ceny realizovaných doposud užívaných zařízení při zachování stejné kvality a přesnosti.

Jedním z možných budoucích směrů je využití nových adsorbentů na bázi organických kovů, které mají vyšší adsorpční kapacitu. Další směr se může týkat parametrické analýzy z pohledu energetické účinnosti. Závislost množství a rozložení aktivního uhlí na tlakové ztrátě může být další možností optimalizace zařízení pro zachycení CO₂.

Poděkování

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže Technické univerzity v Liberci č. SGS 21124, využívající účelové podpory na specifický vysokoškolský výzkum a je financovaná Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Literatura

- [1] GEE I. Monitoring indoor air pollution, *Indoor and Building Environment*, 2001, Vol. 10, 123-124.
- [2] XING H, HATTON A, AWBI HB. A study of the air quality in the breathing zone in a room with displacement ventilation, *Building Environment*, 2001, Vol. 36, 809-820.
- [3] JOVANOVIĆ M, VUCICEVIĆ B, TURANJAMIN V, ZIZKOVIĆ M, SPASOJEVIĆ V. Investigation of indoor and outdoor air quality of the classrooms at a school in Serbia, *Energy*, 2014, Vol. 1, 42-48.
- [4] BARTOVSKÁ L, ŠIŠKOVÁ M. *Co je co v povrchové a koloidní chemii*, Vydavatelství VŠCHT, 2005.
- [5] BUREVSKI D. The application of the Dubinin-Astakhov equation to the characterization of microporous carbons, *Colloid and Polymer Science*, 1982, Vol. 1, 260-263.
- [6] HAUCHHUM L, MAHANTA P. Carbon dioxide adsorption on zeolites and activated carbon by pressure swing adsorption in a fixed bed, *Int. J. Energy Environ. Eng.*, 2014, Vol. 5, 349-356.
- [7] ZEHETNER E, SCHONY G, FUCHS J, PROLL T, HOFBAUER H. Fluid-dynamic study on a multistage fluidized bed column for continuous CO₂ capture via temperature swing adsorption, *Powder Technology*, 2016, In Press.
- [8] RIBEIRO RPPL, GRANDE CA, RODRIGES AE. Activated carbon honeycomb monolith - Zeolite 13X hybrid system to capture CO₂ from flue gases employing Electric Swing Adsorption, *Chemical Engineering Science*, 2013, Vol. 104, 304-318.
- [9] SIRCAR S, HUFTON JR. Why does the linear driving force model for adsorption kinetics work?, *Adsorption*, 2000, Vol. 6, 137-147.

VYUŽITÍ HYPERELASTICKÉHO ELEMENTU PŘI VÝROBĚ TVAROVÝCH ŠABLON VYSOCESTRUKTUROVANÝCH KOMPOZITNÍCH PLÁTŮ

Kulhavý Petr

Sekce - Strojírenství,
Fakulta strojní, 4. ročník
Doktorský studijní program – KONSTRUKCE STROJŮ

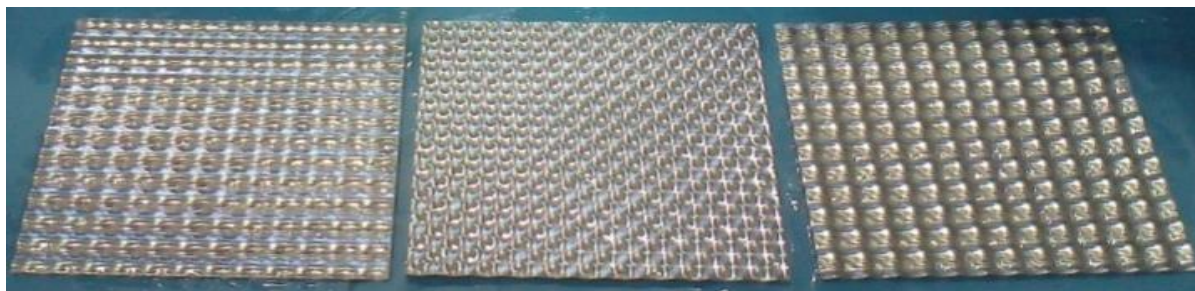
Abstrakt: Práce se zabývá vývojem nové metody určené pro výrobu vysoce strukturovaných plechů. Je navržena a testována nová koncepce tváření do elastického média, jako např. pryž nebo elastomer. Cílem takto vytvořených dílů, je jejich využití pro replikaci dílů kompozitních, které se vyznačují specifickými vlastnostmi. Na základě provedených simulací a následných experimentů byl navržen nový koncept na bázi separovaných pryžových a ocelových dílů. Byl vyroben plech se zcela novou jednostrannou strukturou a z jeho tvaru byl pomocí infuzního sycení replikován kompozitní materiál složený z uhlíkové a skelné tkaniny. Pro takto vzniklý nový strukturovaný díl, bylo nutné vytvořit funkční virtuální model. Jelikož není možné nakreslit podobný model klasickou cestou, byl využit 3D skener a výsledná upravená data byla převedena do funkční CAD geometrie a zároveň i posouzena možnost jejich úprav s ohledem na numerické simulace nové struktury.

Klíčová slova: kompozit, digitalizace, hyperelastický materiál, struktura, FEM

Úvodem

Vzhledem k vysoké poptávce po energiích a rostoucím cenám materiálů hraje snižování váhy důležitou roli napříč téměř všemi průmyslovými odvětvími. Zejména v automobilovém průmyslu je nutné minimalizovat hmotnost dílů a zařízení bez ovlivnění jejich funkce a bezpečnosti. Podle Malinkova [1] hmotnost vozidla snižená o 100 kg ušetří 0,25 až 0,5 l / 100 km paliva, což znamená snížení emisí CO₂ z 3,5 na 8,4 g / km. Při porovnávání kovových a kompozitních materiálů jsou kompozity vhodnější zejména z hlediska efektivnějšího využití materiálu a úspory hmotnosti. Kovové materiály mají však stále nižší cenu, velký potenciál vzhledem k možnosti jejich recyklace a vynikající technologické vlastnosti. Tenké strukturované plechy (obr. 1) jsou již dlouhou dobu známy, byly však často používány pouze jako dekorativní prvky. To je způsobeno hlavně tím, že výrobní technologie byla do nedávna obvykle pouze diskontinuální [2]. V současné době je výroba ocelových šablon technologický postup založený převážně na lisování neb válcování. Tímto způsobem vytváříme strukturované plechové listy pro konkrétní aplikace s možností ovlivnění mechanických parametrů, a to nejen z hlediska rozložení napětí, ale také změny tuhosti, posunu přirozených frekvencí nebo dokonce přizpůsobení aerodynamických vlastností. Jejich použití by mohlo být jako tepelné štíty nad výfukem a motorem, krytem pohyblivých částí, reflexní vrstvou svítidel nebo dokonce bubny praček [3]. Současně se používají pro terénní vozidla jako jeden z nejlepších ochranných prostředků podvozku. Rovněž i jejich použití v tepelných výměnících nebo v hydrodynamických strojích by mohlo zlepšit jejich účinnost ve srovnání s prostými pláty [4, 5]. V dnešní době, kdy použití kompozitních materiálů prochází mnoha sektory, mohou být strukturované listy použity také jako šablony pro výrobu materiálů vyztužených vlákny. Metoda uvedená v tomto článku popisuje možnost výroby nové struktury se specifickými vlastnostmi. Cílem je navrhnout a ověřit funkčnost zařízení, které z jedné strany přitlačí požadovaný strukturovaný tvar skrze plechový plát proti hyper-elastickému médiu na druhé straně. Protože není možné vyrábět takovou strukturu kompozitního materiálu přímým

způsobem, bude tato struktura primárně použita jako tvarová šablona pro replikaci z uhlíkových a skelných tkanin.



Obrázek 1: Příklad používaných strukturovaných plechů [6, 7]

Použité materiály a technologie

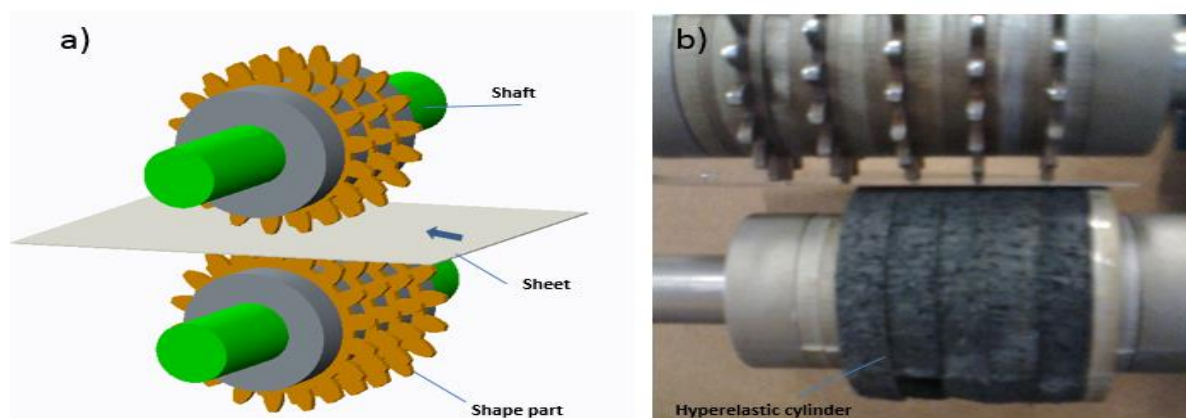
Strukturované plechy se díky vysoké tuhosti v ohybu používají jako polotovary, zejména v automobilovém průmyslu. Výroba lehkých konstrukčních profilů je primárně založena na lisování nebo tváření za studena. Další možnosti výroby strukturovaných plechů je jejich válcování, kdy jsou vyráběny kontinuálně z cívky. Tento kontinuální proces tvarování mezi rotujícími válci byl ovšem ve srovnání s ostatními metodami objeven mnohem později. Tato poměrně jednoduchá a nenákladná technologie dokáže pozitivně přeměnit celkové vlastnosti daných dílů. Jako nejznámější z těchto technologických metod by mohly být plechy vyztužené určitou strukturou nebo otvory obecně známé pod názvem *tahokov*.

Kress [8] ve své práci popsal strukturované plechy s ohledem na mechanické vlastnosti v tahu, ohybu a smyku v závislosti na hloubce použitého profilu. Sterzing [9] se věnoval studiu lokálních mechanických změn v klenbách (lokálně nejvíce deformovaných místech). V díle Simona [7] jsme mohli číst o porovnání různých struktur, jejich aplikacích a možnostech jejich spojování nebo finálních instalací do technických zařízení. Rovněž jsou popsány výrobní postupy pro několik nových struktur a jejich základní mechanické vlastnosti. Malinkov [1] ve svých studiích popsal mimo jiné skutečnost, že výrobní proces podstatně mění formovatelnost a mechanické vlastnosti původního plechu a přes počáteční zpevnění má proces pouze omezený počet možných následných kroků.

Aktuální stav

Jak je znázorněno níže (obr. 2), jedním z možných způsobů výroby jsou dvě hnané hřídele vybavené profilovanými ozubenými koly a distančními kroužky. Pro takové řešení je možné měnit rozestup a axiální vzdálenost mezi jednotlivými koly, čímž je možné docílit výrazných změn výsledného tvaru.

Pro některé případy použití strukturovaných plechů nastává problém způsobený problematickou montáží oboustranně trojrozměrných tvarů, a proto je cílem této práce je najít výrobní proces, který bude vhodný pro výrobu strukturovaných dílů profilovaných pouze na jedné straně. Idea této metody je založena na jednostranném profilování čelního ozubeného kola skrze plech proti hyperelastickému médiu, jakým by mohl být např. elastomer nebo pryž. Během testování bylo ovšem nalezeno mnoho geometrických a materiálových kombinací, které nemohou fungovat. Problém byl způsoben především nedostatečnou tuhostí a velkými deformacemi pružných prvků.



Obrázek 2: Výrobní zařízení a) Standardní metoda b) Prototypové zařízení s čelními ozubenými a gumovými válci

Materiál

Pro hliníkové plechy je možné stanovit Poissonovu konstantu na základě hodnot deklarovaných výrobcem (Tab.1). Po vytvoření struktury je výsledné anizotropní mechanické vlastnosti pro další výpočty obvykle nutné diferencovat hodnotou μ pro podélný a příčný směr. Je důležité si uvědomit, že geometrie je vždy založena na jednoduché obecně goniometrické funkci, která se pravidelně opakuje. Jak snadno zjistit rozložení napětí ve 2D texturovaných listech popisuje ve své práci např. Peng [10]. Vlnitá deska má obvykle ohybové vlastnosti různé ve dvou vzájemně kolmých směrech tzv. orthotropii. Briassoulis [11] a Samantha [12] popsali předpoklad, že strukturované desky mohou být analyzovány jako tenká skořepina s rovnoměrnou tloušťkou. Ta může být numericky analyzována jako ekvivalentní ortotropní lichoběžníkovitě nebo sinusoidně vlnitá deska (obr. 3a) [12]. Na základě toho je možné použít analytické výrazy pro ekvivalentní tuhost ortotropních tenkostěnných skořepin (1, 2). Na druhou stranu, jak je možné vidět v průřezu reálné struktury níže (Obr. 3b), v reálném případě není tloušťka v ploše průřezu konstantní a nacházíme spoustu oslabených či naopak zesílených míst.

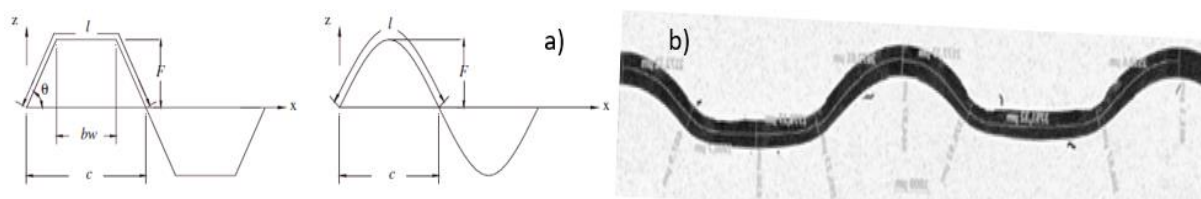
$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{(1-\mu_x\mu_y)} \begin{bmatrix} E_x & E_\mu & 0 \\ E_\mu & E_y & 0 \\ 0 & 0 & (1-\mu_x\mu_y)G_{xy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{xz} & 0 \\ 0 & G_{yz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

U vlnitého plechu je Poissonova konstanta pro v_{yx} stejná jako u izotropního materiálu, pak platí že $v_{yx} = v$. E je Youngův modul a μ Poissonův poměr. σ je normálové namáhání ve specifikovaném směru, τ tangentské napětí a ε a γ vyjadřují posunutí a rotace.

Tabulka 1: Mechanické vlastnosti daného materiálu AlMg2,5 [13]

Hustota	E-modul	Smykový modul	Rp0,2	Rm	Tažnost
[g cm ⁻³]	[Mpa]	[MPa]	[N mm ⁻²]	[N mm ⁻²]	[%]
2,68	70 000	26 300	140	210	4



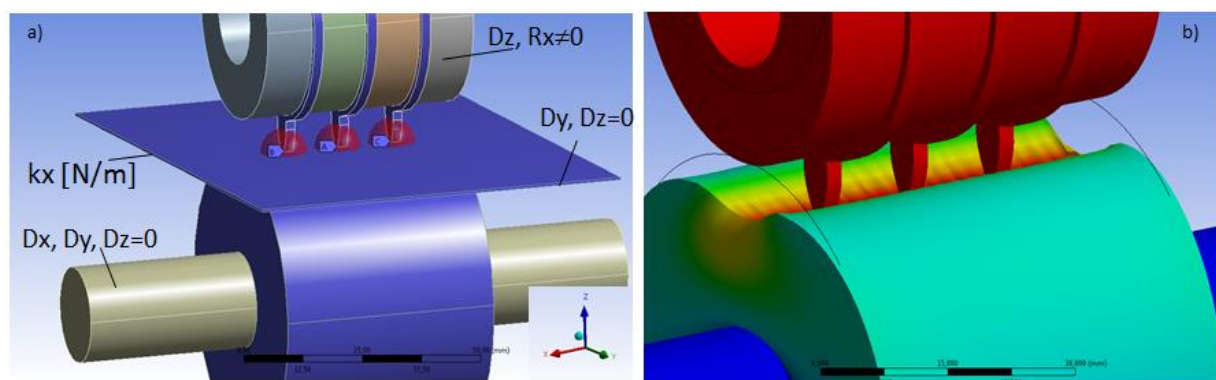
Obrázek 3: Strukturovaný tvar a) Idealizovaný trapezoidní nebo sinusový b) Reálný mikroskopicky měřený průřez vyrobeného dílu [14]

Model

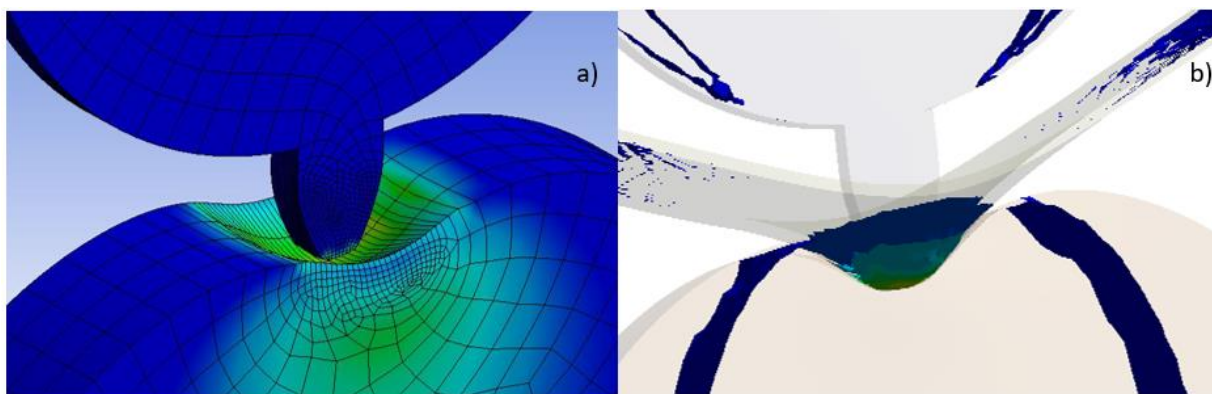
Pro ověření koncepce a volby nejvhodnějšího elastického materiálu byl sestaven kontaktní model obsahující zjednodušený tvar ozubení, které prochází plechovým listem a tlačí proti elastickým válcům (obr. 4a). Abychom v prostoru vhodně popsali nepravidelnou plochu vznikajícího kontaktu a deformované zóny několika částí, byla k zlepšení lokální kvality vytvořené síť s velikostí prvků až 1 mm použita *sféra influence* s poloměrem 5 mm. Pro list byla použita síť s čelním mapováním a *multizone hexa* metoda s krokem 1 mm pro pryžový válec. Vytvořená síť byla složena z 88 270 uzlů a 17 800 prvků.

Složité nelineární plastické transformace vznikající v hliníkovém plechu nejsou v tomto okamžiku předmětem výpočtu, a proto bylo chování plechového listu zjednodušeno. Byla zvolena formulace kontaktů Augmented Lagrange, neboť s poměrně velkými nelineárními deformacemi při využití této formulace nedochází ke kmitání (skokový stav mezi otevřeným a uzavřeným kontaktem) v konvergenci výpočtu. Eventuální penetrace těl nemá na model zásadní vliv a také je možné do jisté míry řídit průnik v integračních bodech.

Kvůli velké deformaci a různé tuhosti použitých materiálů bylo vhodné nastavit poměrně velký Pinball region - toto nastavení je u velkých deformací obzvláště důležité. S využitím Lagrangeovy formulace bylo také výhodné použít relativní detekci kontaktů na kolmý směr v integračních bodech [15, 16]. Okrajové podmínky sestaveného modelu byly: Plné omezení ve směru osy elastického válce vytvořeného z několika různých testovaných materiálů. Plech byl upevněn ve směru Z a Y, boční (X) pohyb byl omezen slabou pružinou. Lisovací pohyb čelního ozubeného kola byl vytvořen posunem ve směru Z a současně malou rotací kolem osy X a fixací středové osy kola pro směr Y. Cílem prvotní simulace nebylo najít přesná hodnotu kontaktního tlaku, vznikající napětí atd., ale pouze ověřit možné elastické materiály a především celkovou fyzikální proveditelnost daného konceptu.



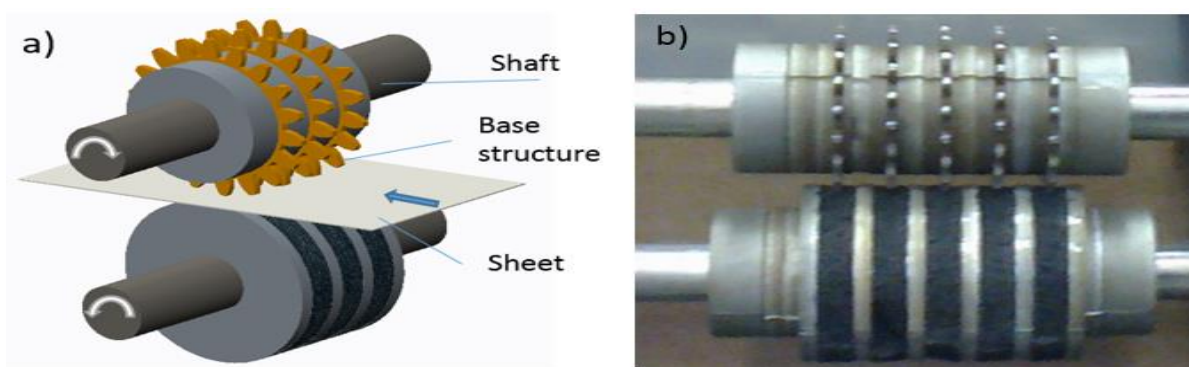
Obrázek 4: Počáteční idea zařízení s využitím hyperelastického materiálu: a) Model – okrajové podmínky b) Výsledek posouzení FEM metodou



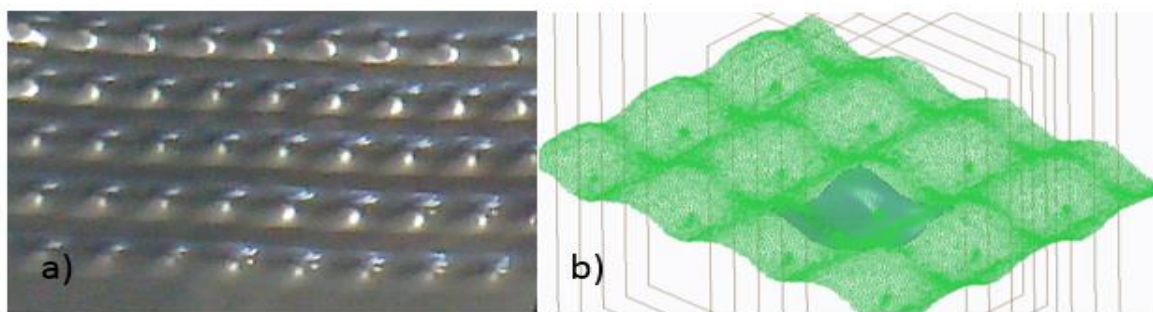
Obrázek 5: Simulace inovovaného konceptu s přidáním ocelovými kroužky: a) Výsledek s viditelným zubem a elastickým dílem b) Isoplochy zobrazující jednotlivé deformace

Výroba prototypu

Původně navrhovaná myšlenka s jednou cylindrickou hyperelastickou částí (obr. 2, 4), se po provedených experimentech a numerických simulacích možných variant materiálů neprokázala jako fyzikálně proveditelná. Žádný z nalezených a testovaných pryžových ani elastomerových materiálů nemá takové elastické vlastnosti, aby mohl vytvořit a opakovat stejný profil ve více řadách vedle sebe (obr. 4b). Jak se ukázalo u pokusu s hliníkovými plechy a v některých případech dokonce i zcela bez plechu, žádný z testovaných materiálů neměl dostatečnou tuhost a při zatížení se deformoval téměř po celé šířce, jak je možné vidět v simulaci na obr. 4b. Tímto způsobem vytvořená struktura byla jen velmi malá nebo žádná. Proto, na základě výsledků získaných v numerické simulaci (obr. 5), kde je možné vidět, že myšlenka pouze s jedním ozubeným (razícím) prvkem funguje, byl navržen koncept nový, který je kombinací oddělených ocelových a elastomerových kroužků (obr. 6). Konečná struktura je vidět na obr. 7a. Předkládaná poměrně jednoduchá metoda umožňuje variaci použitých materiálů, nastavení parametrů, jako je hloubka a orientace struktury, hustota tvaru a pravidelnost tvaru.



Obrázek 6: Nový koncept výrobního zařízení se separovanými kroužky a) Model b) Fyzický prototyp

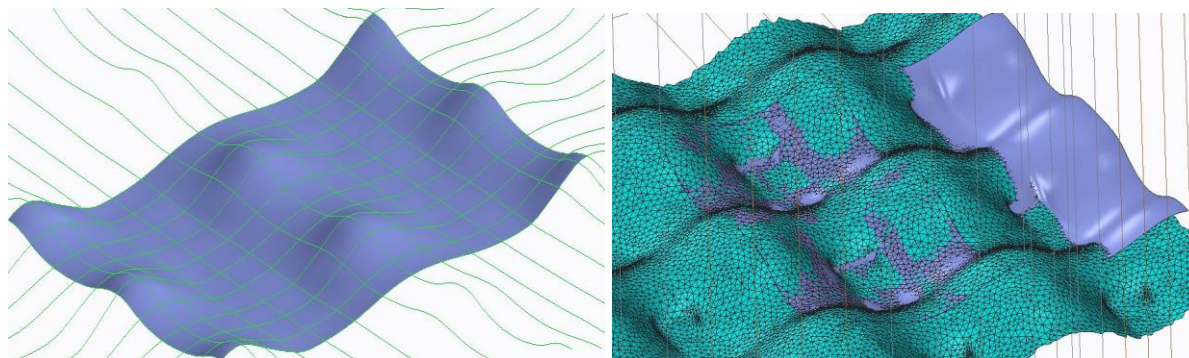


Obrázek 7: Nově vytvořená struktura Al listu a) Fotografie povrchu b) První vizualizace pomocí 3D skeneru

Tvorba a modifikace CAD modelu

Navzdory výhodám jako relativně rychlá a jednoduchá technologie není s použitím standardních CAD technologií možné nakreslit reálný model přímou cestou. To je způsobeno zejména mnoha nelineárními procesy, které se vyskytují během formování kdy klasické operace, jenž by mohli podobná probíhající přetvoření pomocí funkcí jako např. *warp* či *punch* namodelovat, neodpovídají realitě.

Za účelem získání CAD modelu a geometrie pro numerickou simulaci musí být šablony a následně vytvořené kompozitní součásti pro každou rozměrovou variantu naskenovány. Pro proces skenování a počáteční úpravy geometrie byl použit komerční software od výrobce skeneru. Údaje získané během 3D skenování ovšem nejsou ve vhodném formátu, dostáváme obří mračno datových bodů, které jsou prokládány nedefinovaným povrchem (obr. 7b). Následně, nejčastěji s využitím komerčního softwaru, jako například Creo, Catia, Inventor, Rhino nebo Geomagic studio, je mrak bodů parametrizován ve spojitý povrch. V našem případě byl pro možnost importovat takovou datovou strukturu do klasického CAD systému použit modelář PTC Creo – modul Import Data Doctor.

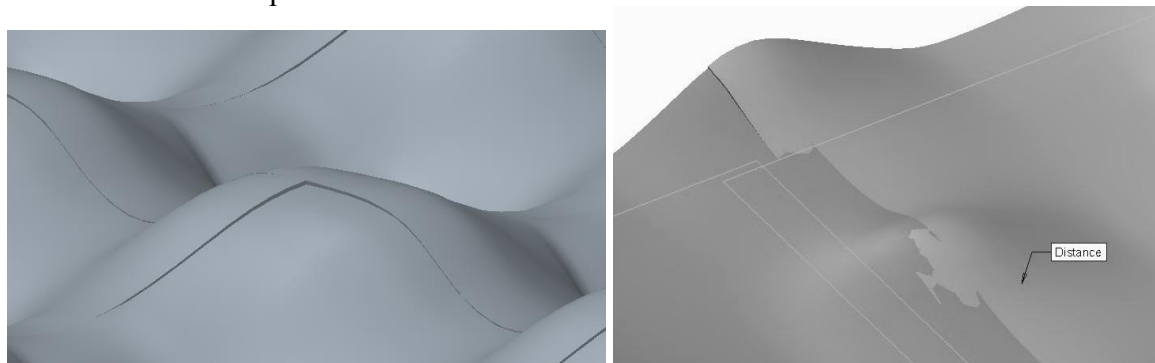


Obrázek 8: Restylovaný model a) Dílčí element blendu b) Překrytí původního mračna a nové parametrizované plochy

Existují moduly obsahující algoritmy pro další úpravy, vyhlazení a čištění importovaných sítí nebo povrchů. Je také možné vyplnit otvory, uzavřít nedokonalý tvar nebo oříznout povrch. Nejvhodnější metodou pro vytvoření standardního CAD modelu této poměrně komplikované struktury by mohlo být složení celého objemu jednotlivých fragmentů. Přesně definovaný fragment ve formátu NURBS, který je vhodný pro CAD data, bychom mohli získat lokálními výřezy a vytvořením hraničních *blendů*, jak je vidět na obr. 8 [17].

Tento fragment je pak vrácen zpět do své polohy v původní STL síti, jak je vidět na obr. 7b. Navzdory poměrně rychlému vytvoření hlavního tvaru, existující v modelu zdánlivě nepatrné nepřesnosti, k jejichž vzniku dochází během bezkontaktního měření. V tomto okamžiku jsou

všechny nepřesnosti ze skenování a také geometrické odchylky vytvořeného vzorku nasčítány a obvykle na rozhraní tvarů či kvadrantů oblých ploch dochází k jejich projevu. Jak je zřejmé např. na obr. 9, kde jsou umocněné nepřesnosti krásně viditelné podél os jednotlivých kvadrantů zobrazeného vrchlíkového tvaru a v druhém případě je možné vidět nepravidelné prolínání sousedících ploch.



Obrázek 9: Detail z míst kde se projeví drobné odchylky vznikající během celého procesu tvorby modelu

Rekonstrukce tvaru objektu je podle Bernardinyho [18] často řešeným problémem. Možnými metodami pro rekonstrukci poškozených oblastí je použití rekonstrukčních algoritmů jako Piecewise-Lineární rekonstrukce, restrukturalizace povrchu (sada bodů s aproximačním polynomem nebo implicitním povrchem) a Bernstein-Bezierovou kubikou. V našem případě byla použita aproximace Bezierovou křivkou. Důvodem byly snadno dosažitelné body křivky v deformovaných okrajích a také možnosti definování konstantního zakřivení v místě dotyku s okolními povrchy.

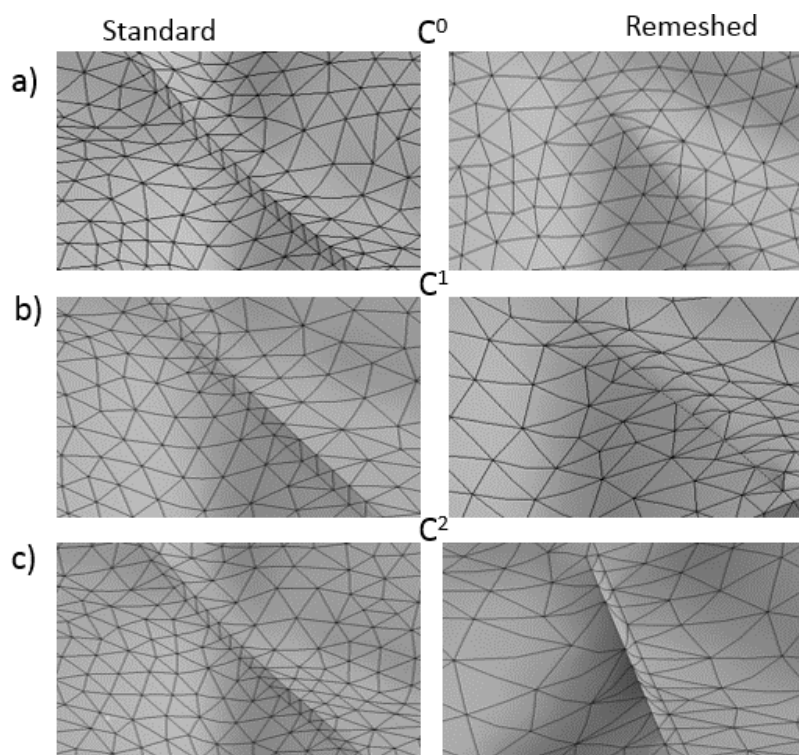
Pravděpodobně nejlepší nalezenou variantou, jak opravit chybné oblasti, je nastavit jejich hranice a vyplnit oblast vektorovým polem. Pro požadovanou definici vektoru bylo možné jednoduše použít nastavitelné parametry normálnosti, tangenciality nebo parametrické nastavení přechodů.



Obrázek 10: Použité třídy přechodové spojitosti napojovaného vektoru

Velmi důležitým parametrem je nastavení parametrických tříd n přechodů mezi jednotlivými segmenty, které definují 3 třídy kontinuity (Obr. 10). Připojení C0 ve společném bodě znamená dva libovolně procházející vektory a dvě křivky s různým poloměrem zakřivení. Kontinuita C1 je charakterizována společnou tečnou vektorem $\vec{t}_i$ v přechodovém bodě, avšak s různými poloměry zakřivení. Analogicky pak poslední třída C2 poskytuje společný tečný vektor a hodnotu poloměru zakřivení v přechodovém bodě. Na základě takto vyhlazených povrchů mohl být vytvořen a vyexportován odpovídající CAD model do požadovaného

formátu. Následně s ohledem na budoucí numerické simulace bylo vytvořeno šest příkladů modelu různé kvality (obr. 11), aby se zjistila závislost geometrické rekonstrukce (stupeň kontinuity vektorů, stupeň polynomu) na parametrech budoucí sítě a konvergence výpočtu.



Obrázek 11: Závislost sítě na zvoleném stupni přechodového vektoru pro standardní a optimalizovanou síť

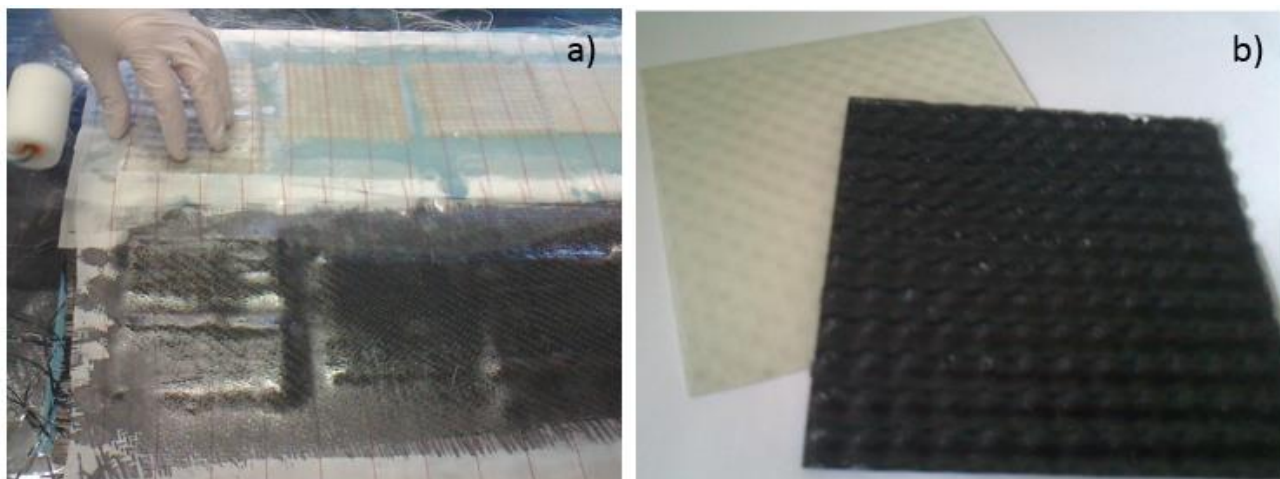
Závislost parametrů sítě na kontinuitě geometrického vektoru byla testována v komerčním software Ansys. Prvním případem byla automaticky generovaná tetrahedrální síť s + 80% vyhlazením jemné relevance (obr. 11 Standard). Ve druhém případě byla síť poměrně snadno a rychle optimalizována pomocí vyhlazení uzlů podél hraničních křivek a vylepšena pomocí virtuálních buněk. Výsledky lze vidět na obr. 11 (sloupec *remeshed*) nebo výslednou statistiku sítě v Tabulce 2. Jak je zřejmé z tabulky a obrázku, vysoký stupeň optimalizace geometrie nemá přímý vliv na kvalitu sítě. Dokonce i pro hrubý přenos C^0 bychom s použitím nástrojů pro vyhlazení mohli získat síť takřka stejné kvality za zlomek vynaloženého úsilí.

Tabulka 2: Statistické parametry testované sítě

	Metoda:	C^0	C^1	C^2
Standardní síť	Počet elementů	9 576	10 268	10 017
	Počet uzlů	17 261	18 316	17 959
Optimalizovaná	Počet elementů	9 427	8 603	9 788
	Počet uzlů	17 024	15 647	17 576

Výroba kompozitu

Na základě nové prototypové struktury bylo vytvořeno několik prototypů z FRP (vlákna vyztuženého polymeru). Byla provedena jednostranná replikace tkaných textilií přes strukturovaný list. Chemicky ošetřené plochy [14] strukturovaných hliníkových plechů byly pokryty čtyřmi vrstvami skelných nebo uhlíkových tkanin (obr. 12) a postupně nasyceny epoxidovou matricí. Na závěr bylo provedeno infuzní syčení a vytvrzení ve vakuu.



Obrázek 12: Výroba finálního kompozitu a) Manuální laminace b) Výsledný kompozitní díl ze skelné a uhlíkové tkaniny

Závěr

V prezentované práci je popsán prototypový koncept výroby a použití strukturovaných plechových dílů. S ohledem na budoucí specifické aplikace (jednostranné upevnění, tlumení vibrací a tepelné štíty) byla navržena nová výrobní metoda využívající elastického elementu. Neboť žádný z testovaných pryžových nebo elastomerových materiálů neměl takové elastické vlastnosti, aby bylo možné vytvořit a replikovat stejný profil ve více řádcích, byla po provedených experimentech a numerických simulacích interakce čelních ozubených kol a hyperelastických částí, navržena modifikovaná koncepce s výztužnými ocelovými kroužky. Tímto způsobem byla nalezena a vytvořena nová jednostranná struktura, jejíž parametry je možné změnou nastavení přístroje měnit s ohledem na konkrétní aplikaci.

Tato struktura vyrobená na hliníkovém plechu byla následně replikována ze skelného a uhlíkového kompozitu. Výsledná kompozitní struktura (obr. 12) dosahuje kvality kontury nad očekávání dobrou. Malým lokálním problémem však jsou nedokonale nasycené vlákna a praskání povrchu matrice v horních a dolních místech vyklenutí.

Nevýhodou této relativně jednoduché technologie je velmi komplikované vytvoření CAD modelu finálních dílů. To znamená, že předem přesně nevíme, jak budou vypadat finální části, především přesné rozměry při změně jednotlivých výrobních parametrů. Z toho důvodu byly použity bezkontaktní metody měření, konkrétně 3D skenování. Následně vzhledem k mnoha viditelným nepřesnostem, byla nutná relativně složitá optimalizace vznikajícího CAD modelu. Následně byl sestaven pokusný numerický model nové konstrukce, pro ověření parametrů sítě a požadavků na kvalitu geometrii s ohledem na parametry sítě a dosažení konvergence modelu. Jak bylo překvapivě zjištěno, některé malé lokální skokové změny v geometrii by mohly být pro budoucí numerické výpočty řešitelné snadněji než komplikovaná a např. výše popsanými Bezierovými vektory vysoce aproximovaná a vyhlazená oblast. Vliv na přesnost

řešení se s horší kvalitou geometrie nezdá důležitý, doba potřebná k řešení je kratší a konvergence síly je nalezena na menší počet iterací, což je značným přínosem.

Práce představila novou ucelenou výrobní metodu, včetně popisu relativně složité tvorby CAD modelu. Významným výsledkem je taktéž zmíněná nalezená úspora času a úsilí, kterých je možné dosáhnout při optimalizaci skenovaných dat pro numerické simulace.

Cílem budoucích prací bude další experimentální testování a modelování takto vytvořených dílů, aktuálně zejména v oblastech přenosu vibrací, zvýšení tuhosti v ohybu, aerodynamických vlastností a schopností tepelného stínění.

Poděkování

Tato publikace vznikla na Technické univerzitě v Liberci v rámci projektu "Inovace struktur technických systémů s využitím kompozitních materiálů" s podporou grantu specifického univerzitního výzkumu poskytovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy v České republice v roce 2016. Velké poděkování patří Prof. Sylvio Simon (BTU University, DE) za prvotní ideu začlenit hyperelastický materiál a za možnost realizace v laboratořích BTU Senftenberg.

Literatura

- [1] MALINKOV. V. 2013. *Experimentelle und numerische Untersuchungen der Umformung von strukturierten Blechen*, PhD Thesis, Berlin.
- [2] MIRTSCHE, F.; MIRTSCHE, S., SCHADE, M. 2002. *Wölbstrukturierte Flachmaterialien mit synergetischen Eigenschaften*; Konstruktion; Springer – Verlag, 10.
- [3] LU V. D. 2008. *Entwicklung eines Tools zur Erzeugung Strukturierter*, Master thesis, Leipzig.
- [4] OLUJIC Z. 1999. Effect of column diameter on pressure drop of a corrugated sheet structured packing, *Trans IChemE*, Vol 77, Part A,
- [5] FRANA K., SIMON S. 2015. Air Flows along Perforated Metal Plates, *Journal of appl. Mech*, 9.
- [6] KRAHL T. 2014. *Untersuchung der mechanischen Eigenschaften an strukturierten Feinblechen*, Masterthesis, HS-Lausitz.
- [7] SIMON S. ET.AL. *Energieeffizienz in der Maschinen-konstruktion*. AMO Conference, Moskauer Energ. Institut, Smolensk, 2016
- [8] KRESS S. 2013. *Steigerung der Ressourcen-Effizienz von Feinblechen durch Formfeld-Strukturpressen und deren analytische Dimensionierung*. Technische Universität Berlin: Fraunhofer Verlag.
- [9] STERZING A. 2005. *Bewertung von Leichtbaupotenzial und Einsatzfähigkeit wölbstrukturierter Feinbleche*, Wissenschaftliche Scripten Zickau: Dreht aus dem IWU, Dissertation.
- [10] PENG L.X., LIEW K.M. 2006. Analysis of stiffened corrugated plates based on the FSDT via the mesh-free method, *Int. Journal of Mech. Sciences* 49.
- [11] BRIASSOULIS D. 1986. Equivalent orthotropic properties of corrugated sheets, *Elsevier, Computers & Structures*, Volume 23, Issue 2.
- [12] SAMANTA A.; MUKHOPADHYAY M. 1999. Finite element static and dynamic analysis of folded plates, *Engineering Structures*, 21.
- [13] AXONAL, Manufacturer of aluminum materials, available at: <http://www.anoxal.com>
- [14] THILL C.; ETCHES J.A.; BOND I.P. 2010. Investigation of trapezoidal corrugated epoxy laminates under large tensile displacements transverse to the corrugation direction, *Applied Science and Manufacturing*, 41.
- [15] ALTAIR ENGINEERING, 2015. *Practical Aspects of Finite Element Simulation*, United States.
- [16] ANSYS, Inc. 2010. *Mechanical Structural Nonlinearities - Advanced Contact*, Training Material.
- [17] KULHAVÝ P., LEPIŠK P.: *Digitization of structured composite plates with regard to their numerical simulations*, In: *Manufacturing technology*, 2017
- [18] BERNARDINI, F., BAJAJ, C., CHEN, J. 1999. Automatic reconstruction of 3D CAD models from digital scans. *International Journal of Computational Geometry*, vol. 9.

INOVACE MOBILNÍ POVODŇOVÉ ZÁBRANY

Bc. Radek Lazák

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,
Fakulta strojní, 2. ročník
Magisterský studijní program – INOVAČNÍ INŽENÝRSTVÍ

Abstrakt: Diplomová práce je zaměřena na inovaci mobilní protipovodňové bariéry. Na návrh nového typu řešení vykládání bariéry, které směřuje k vysoké rychlosti výstavby bariéry. Práce obsahuje základní kroky postupu inovace výrobku. Z navržených konceptů je pomocí metody Analytic hierarchy process vybrána vítězná varianta, která byla podrobněji rozpracována do vize nového řešení.

Klíčová slova: inovace, mobilní bariéra, bariéra, Analytic hierarchy proces

1 Úvod

V dnešní době stále přibývá incidentů, kdy přílivová voda povodně zasáhne obydlené oblasti a oblasti obhospodařované člověkem. Proto zde vystává problém ochrany těchto oblastí. Nejenže přílivová vlna ničí majetek, tak předměty zasažené povodňovou vodou jsou kontaminovány různými bakteriemi, kvůli kterým se tyto předměty, popřípadě jídlo musí zlikvidovat. Pro řešení těchto problémů vznikají ochranná opatření, která vytvářejí umělou hranici a směřují tok, nebo se jednotlivé oblasti v celém obvodu obklopí hranicí, která zamezí zásahu povodňové vody.

Dosavadní řešení chrání nejcennější oblasti, jako jsou části měst. Pokud to prostor umožní, zvyšují se břehy. Zvýšené břehy zajišťují nejbezpečnější ochranu proti přívalové vodě. Dalším řešením vytváří umělý břeh pomocí polo mobilních bariér. Tyto bariéry mají na určeném místě zabetonované základy, do kterých se v případě záplav namontují desky, které zadrží vodu.

Tato řešení jsou velice nákladná a dokáží ochránit pouze jednu oblast. Z této nevýhody vyplynul nový typ bariér. Tyto bariéry jsou mobilní. Nemají pevné místo určení a převážně se liší rychlostí mobilizace a množstvím lidských zdrojů potřebných k mobilizaci. Tyto bariéry jsou nyní potřebné ve vyšší míře, jelikož díky jejich rychlému nasazení může být zachráněno více oblastí, které nejsou běžně chráněny. Proto se tato diplomová práce zaměřuje na inovaci mobilních protipovodňových bariér. Zejména se zaměřuje na jejich snadnou a rychlou mobilizaci a nasazení v ohroženém místě.

1.1 Cíle práce

Cílem diplomové práce je sestavit novou vizi mobilní povodňové bariéry, která se zaměřuje na vysokou rychlost mobilizace. Konstrukční řešení navrhuje bariéru jako ochranu proti jednomu výškovému metru vody. Mezi další parametry patří délka bariéry. Délka udává velikost jednotlivé části bariéry, které mohou na sebe navazovat. Tato hodnota odpovídá sta metrům. Čas výstavby jednotlivé části bariéry by neměl přesáhnout dvacet minut. To odpovídá třetině výstavbového času většiny existujících řešení mobilních bariér. Tato úspora času by měla zajistit větší šance pro záchranu majetku. Návrh bariéry je zaměřen na výstavbu na nezpevněných površích, jako jsou: písek, hlína, štěrk. Dalším důležitým parametrem je životnost bariéry, která musí dosahovat maximálně deseti nasazení jednotlivé bariéry. Další

nezanedbatelnou věcí je počet operátorů, který je potřeba při výstavbě bariéry. Maximální počet obsluhy nesmí přesáhnout 3 operátory. Průsak bariéry by také měl být co nejnižší. Parametry jsou shrnuty v tabulce 1. Po definování základních parametrů budou následovat tyto kroky.

Tabulka 1.: Základní parametry bariéry

Parametr	Hodnota
Výška hladiny	1 m
Délka bariéry	100 m
Čas výstavby	20 minut
Počet operátorů	Max. 3 operátoři
Životnost (počet možných nasazení)	Maximálně deset nasazení
Typ povrchu	Nezpevněný povrch

První krok je zaměřen na definování základních problémů, které mohou nastat při výstavbě bariér a při povodních. Návrh konstrukce musí být přizpůsoben pro tyto základní problémy. Průzkum trhu je dalším navazujícím krokem, který obsahuje popis již existujících řešení. Průzkum bude proveden se zaměřením na ty varianty, které se svým řešením přibližují zadaným hodnotám.

Druhý krok odpovídá naplňování projektu. Nejprve budou naplánovány jednotlivé kroky řešení, ke kterým budou přiřazeny časové úseky. Z těchto dat vznikne podrobný harmonogram s milníky řešení. Nalezením konkrétního řešení se zabývá další část řešení. K tomu budou využity inovační příležitosti. Základní směr řešení bude shrnut v inovačním prohlášení a dům kvality (HoQ) poslouží k dalšímu upřesnění řešení.

Dále bude navrženo 5 konceptů, které všechny určují vlastní směr řešení. Na základě předpokládaných vlastností se koncepty ohodnotí. Toto hodnocení poslouží k výběru nejlepší varianty s využitím matematické metody Analytic Hierarchy Process.

Vítězná varianta bude rozpracována do vize řešení se základními parametry. U které se následně provede výpočet základních parametrů. Dále provedte popis řešení obsahující popis základních funkcí jednotlivých částí bariéry a její funkční principy.

Předposlední krok obsahuje shrnutí a porovnání inovovaného řešení k již stávajícím řešením. Porovnání bude provedeno s bariérami, které jsou konstruovány do stejných podmínek. Zejména výška hladiny jednoho metru a možné délky sta metrů. Mezi porovnávané parametry patří rychlost výstavby, povrch a počet obsluhy potřebných pro montáž bariéry v postiženém místě.

Na závěr budou shrnuty všechny kroky, které byly provedeny, a proběhne hodnocení jejich naplnění.

1.2 Průzkum stávajících řešení

V dnešní době existuje několik základních typů mobilních bariér. V této kapitole budou popsány a rozděleny do skupin. Rozdělení bariéry proběhne na základě způsobu zatížení bariéry. A to na plněné a neplněné. Průzkum provede průzkum řešení, které odpovídají základním parametrům inovovaného řešení.

Plněné bariéry

Tento typ bariér využívá různých typů materiálu pro plnění. Tímto materiálem může být voda, popřípadě písek. Nejzákladnějším typem jsou bariéry pískové. Výhody této bariéry spočívají v možnosti výstavby kdekoliv, kde se vyskytují pytle a písek. Nevýhodou této bariéry je velká hmotnost, doba plnění, obtížná manipulace a nutnost ekologické likvidace použitého písku.

Dalším typem plněných bariér jsou systémy společnosti **Svitap**. Hrazení je vytvořeno nosnou ocelovou konstrukcí, která je opatřena speciálním nátěrem. Na konstrukci se upevní

plášť z PES tkaniny nánosované PVC. V podélném směru je hrazení sestaveno z polí délek 3, 6, nebo 12 metrů, přičemž je možné vytvořit libovolně dlouhou řadu. Nejmenší délka bariéry je 12 metrů. Bariéry zastaví povodňovou vodu do výšky 1 metru. Po sestavení je možno naplnit vzniklou nádrž vodou nebo sypkým materiálem. Při použití sypkého materiálu roste čas sestavení 3m hráze na 7 hodin. Při použití vody je tento čas roven hodině na 100 metrů bariéry [1].



Obrázek 1.: Bariéra Svitap, zdroj: [1]

Poslední zmíněnou plněnou bariérou jsou bariéry **Velox**.

Bariéry fungují na principu zachytávání povodňové vody využitím její hmotnosti. Tíhová síla přílivové kapaliny vytváří dostatečnou sílu pro udržení bariéry ve správném místě. Slouží spíše pro klidnou přílivovou vodu. Jelikož její plnění a tedy její přitlačné vlastnosti musí pozvolna přibývat. Při příchodu přílivové vlny je nenaplněná bariéra stržena s proudem. Je náchylná na stržení bočním proudem [2].

Výhody: Rychlé ustavení na místo, téměř žádná potřebná lidská síla, skladné

Nevýhody: nevydrží boční proud, náchylná na odsunutí v důsledku přílivové vlny



Obrázek 2.: Bariéra Velox, zdroj: [2]

Neplněné bariéry

Mobilní bariéry **Inero** jsou švédské bariéry vyrobené z hliníku, který odolává i mořské vodě. Jednotlivé části bariéry drží ve vzpřímené poloze hliníkové nohy se spodní deskou. Jednotlivé sekce se spojují pomocí patentovaného rychloupínání, které funguje na principu bajonetu. Společně desky vytvoří flexibilní bariéru, která se dokáže přizpůsobit terénním nerovnostem. Dají se využít na všech běžných podkladech, jako tráva, štěrk nebo asfalt. Mohou být zakřiveny pomocí rohových sekcí, které mají úhel 22,5°. Bariéra odolá nejenom klidné ale i proudící vodě. Může být vystavěna přímo v kontaktu s vodou za předpokladu, že její hladina nepřesáhne 30 cm. Celá bariéra se pokryje PVC folií, která utěsní pole jednotlivých desek. Folie je přichycena pytlí s pískem a sponami. Sto metrů bariéry se 4 pracovníky je postavena v čase okolo hodiny [3].

Výhody: Lehká konstrukce umožňuje snadnou manipulaci. Konstrukce je provedena tak, že 100 metrů bariéry je možné převést na 2 paletách.

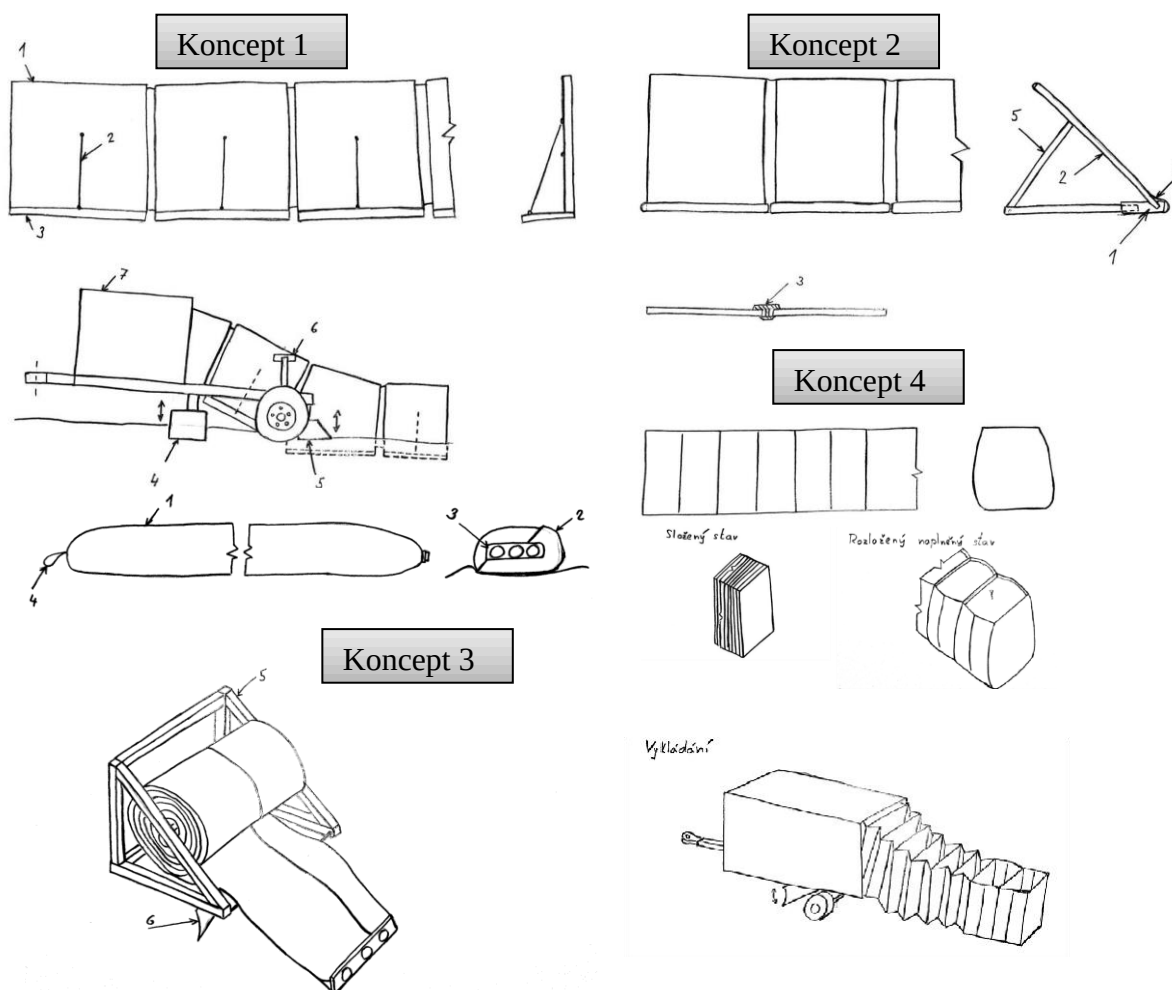
Nevýhody: Doba složení 100 bariéry odpovídá době kolem hodiny. Jednotlivé desky se mohou deformovat a může nastat problém s rozebíráním bariéry.



Obrázek 3.: Bariéry Inero, zdroj: [3]

2 Návrh konceptů

V této práci je zpracováno 5 konceptů pro inovaci protipovodňové bariéry. Tyto návrhy vyšli z předchozího průzkumu stávajících řešení. Také byly využity metody inovačního inženýrství, které učili směr, kterým koncepty byly směřovány. Byly navrženy 2 koncepty, které jsou řešeny jako bariéry plněné a 3 směřují k řešení využívající povodňovou vodu pro zatížení.



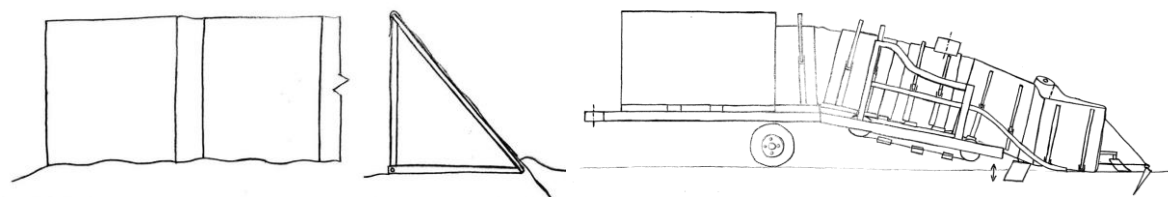
Obrázek 4.: Přehled konceptů 1-4, zdroj: vlastní

2.1 Výběr varianty

Výběr varianty byl vytvořen na základě rozhodovací techniky Analytic hierarchy proces, dále jen AHP.

AHP je strukturovaná technika organizace a analýzy strukturního rozhodování založená na matematice a psychologii.

Vítěznou variantou se stal koncept 5



Obrázek 5.: Vítězný koncept 5, zdroj: vlastní

3 Rozpracování vítězné varianty

V této kapitole je nastíněna konstrukce a základní výpočty pro řešení vítězného konceptu. Celá tato konstrukce nereprezentuje hotový výrobek. Jedná se o prvotní vizi tohoto konceptu vykládání.

Výpočet zatěžující síly a polohy nohy.

Pro tento výpočet budeme předpokládat, že proud tekoucí vody směřuje rovnoběžně s bariérou. Pro tento případ můžeme použít zjednodušení, při kterém bude na bariéru působit pouze hydrostatický tlak. Nejprve vypočítáme základní hodnotu hydrostatického tlaku v případě, že hladina dosahuje maximální úrovně bariéry. V následující kapitole bude popsán postup výpočtu s referenčním úhlem 40° .

Tento výpočet počítá hydrostatickou sílu na jednotlivý segment a ke každému segmentu je připočítaná plocha spojovacího materiálu.

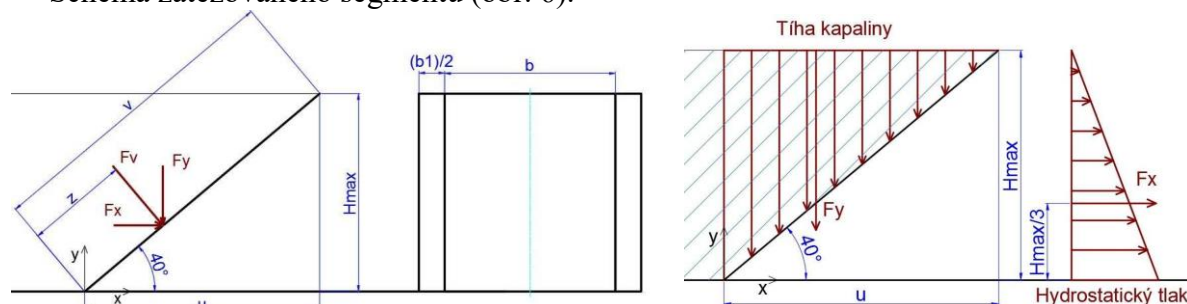
Základní parametry bariéry jsou vypsány v tabulce 2.

Tabulka 2. : Základní parametry bariéry

Výška desky	v	1800 mm
Délka desky	b	1000 mm
Délka spojovacího členu	b ₁	300 mm
Úhel sklonu bariéry	α	40°
Hustota povodňové vody	ρ_{H_2O}	1200 kg/m^3

Pro získání maximálního hydrostatického tlaku bylo nutné vypočítat maximální výšku hladiny, která je dosažena při začátku přetékání bariéry.

Schéma zatěžovaného segmentu (obr. 6).



Obrázek 6. : Schéma zatěžovaného segmentu bariéry, zdroj : vlastní

Maximální výška hladiny

$$H_{max} = v \cdot \sin(\alpha) \quad (1)$$

$$H_{max} = 1800 \cdot \sin(40^\circ) = 1157 \text{ mm} \quad (92)$$

Poloha síly je vypočítána na základě zatěžujícího obrazce. Pro obdélníkovou plochu je rovna :

$$z = \frac{1}{3} \cdot \frac{H_{max}}{\sin(\alpha)} \quad (3)$$

$$z = \frac{1}{3} \cdot \frac{1157}{\sin(40^\circ)} = 600 \text{ mm} \quad (4)$$

Další potřebnou veličinou, která byla potřeba vypočítat je vodorovná síla F_x . Která byla získána z rovnice 5. Do této rovnice budou rozměry bariér dosazovány v metrech.

$$F_x = \frac{H_{max}^2}{2} \cdot (b_1 + b) \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \quad (5)$$

$$F_x = \frac{1,157^2}{2} \cdot (0,3 + 1) \cdot 1200 \cdot 9,81 = 10243,4 \text{ N} \quad (6)$$

K výpočtu svislé síly z rovnice 9 bude zapotřebí dopočítat vodorovnou délku desky, která je zaplavená. Tuto veličinu vypočítáme dosazením do rovnice 7.

$$u = v \cdot \cos(\alpha) \quad (7)$$

$$u = 1800 \cdot \cos(40^\circ) = 1379 \text{ mm} \quad (8)$$

$$F_y = \frac{1}{2} \cdot H_{max} \cdot (b_1 + b) \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \cdot u \quad (9)$$

$$F_y = \frac{1}{2} \cdot 1,157 \cdot (0,3 + 1) \cdot 1200 \cdot 9,81 \cdot 1,379 = 12207,6 \text{ N} \quad (10)$$

Z dílčích složek bude vypočítána výsledná zatěžující síla F_v .

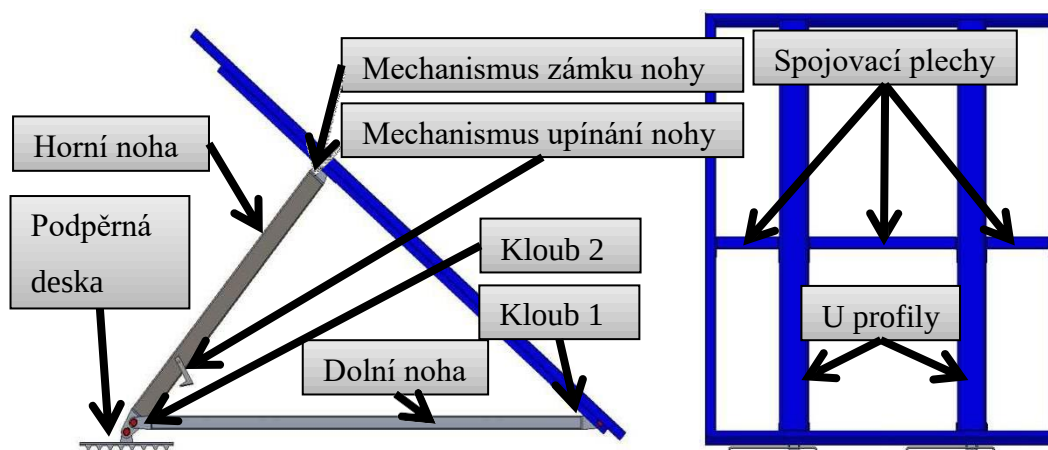
$$F_v = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (11)$$

$$F_v = \sqrt{10234,4^2 + 12207,6^2} = 15935,9 \text{ N} \quad (12)$$

U bariéry stavěné pod úhlem 40° , bude převládat svislá zatěžující složka. Tato složka pomůže k upevnění bariéry na místě. Také výsledná zatěžující síla je u této varianty nejvyšší. Díky tomu bude konstrukce konstruována na menší zatížení a tím bude vytvořena lehčí konstrukce.

3.1 Konstrukce segmentu bariéry

Segment se skládá ze čtyř hraných ocelových profilů o rozměrech 30x30 mm. Profily jsou k sobě v rozích svařeny. K této konstrukci jsou svisle přivařeny 2 U profily, ke kterým jsou příčně navařeny spojovací plechy, částečně zasahují do místa těžiště zatěžující síly vyvozené hydrostatickým tlakem. K těmto plechům a vodorovným profilům je přichycena ocelová síť. Tato konstrukce je podepřena dvěma sestavami nohou. Každá sestava nohou se skládá z dolní a horní nohy.

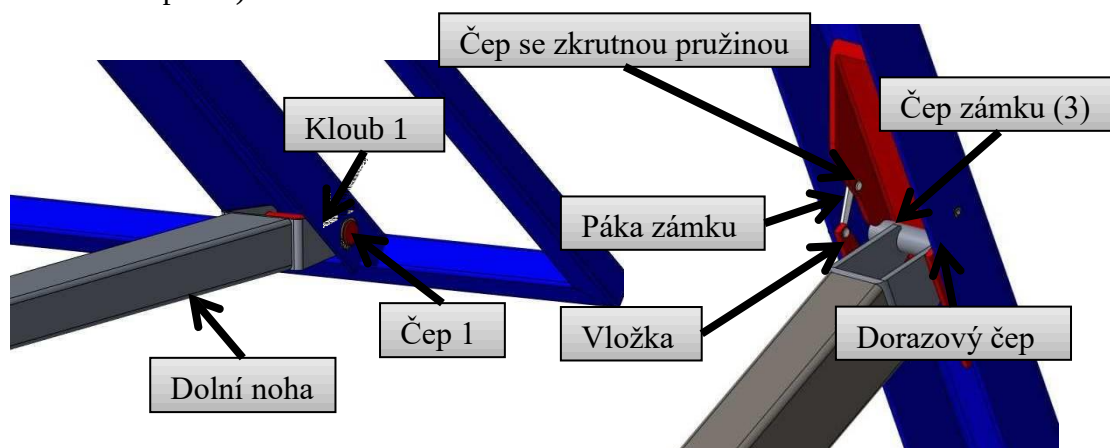


Obrázek 7.: Segment bariéry, zdroj: vlastní, zdroj: vlastní

Dolní noha je přichycena k U profilu pomocí čepu a v axiálním směru je zajištěná pojistným kroužkem (obr. 7, 8 – kloub 1). K horní noze je dolní noha opět přichycena pomocí čepu a pojistného kroužku (obr. 7 – kloub 2).

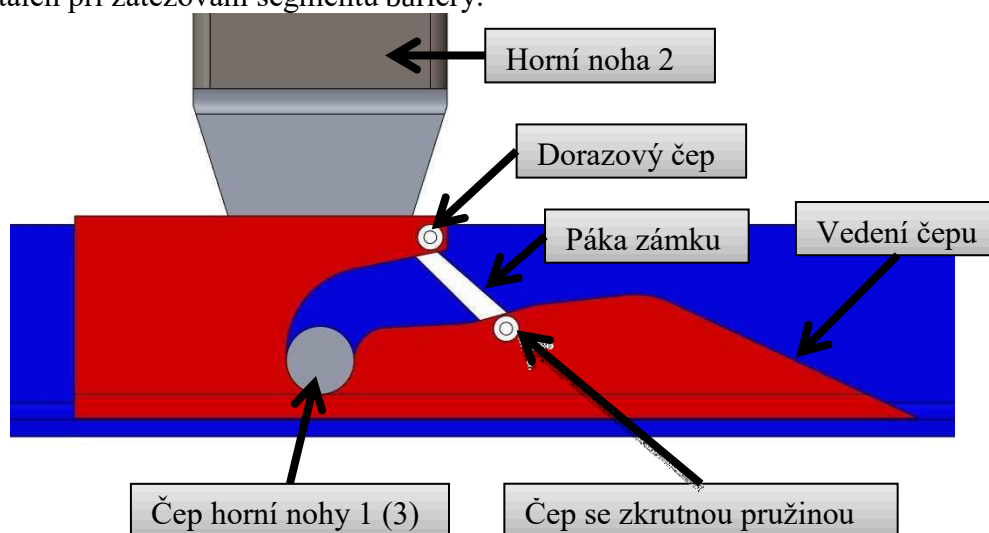
Mechanismus zámku nohou se skládá ze 4 součástí a funguje na principu karabiny. První částí je vložka, přes kterou je přenášena síla z konstrukce segmentu do nohy. Druhou součástí jsou dvě páky zámku, které fungují jako uzavírací prvek. Páka se přichycená na čepu a opírá

se o dorazový čep zámku. Dalšími součástmi jsou čep zámku a zkrutná pružina. Zkrutná pružina spojuje tělo a páku. Tímto spojením drží páku zámku v základní zavřené poloze (viz obrázek 8 - vpravo).



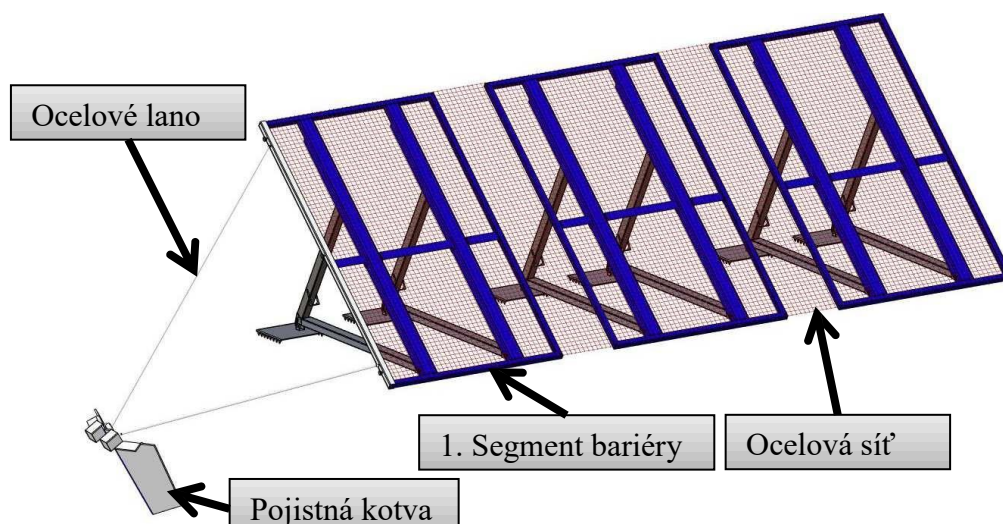
Obrázek 8.: Upevnění nohy k tělu hráze (vlevo). Mechanismus zámku nohy (vpravo), zdroj: vlastní

Horní noha se při sestavování posouvá po dně U profilu. Když čep narazí na mechanismus zámku nohy je veden naváděcí hranou vložky. V další fázi čep přetlačí pružinu a odklopí páku zámku. Následně pokračuje do kapsy, kde je uzavřen pákou zámku, která byla přetlačena zpátky pružinou. Čep se nyní nachází v kapse, kde má umožněné vůle a při zatížení se přesune do prostoru, který přesně kopíruje tvar čepu. V této pozici (obrázek 9) je čep ustálen při zatěžování segmentu bariéry.



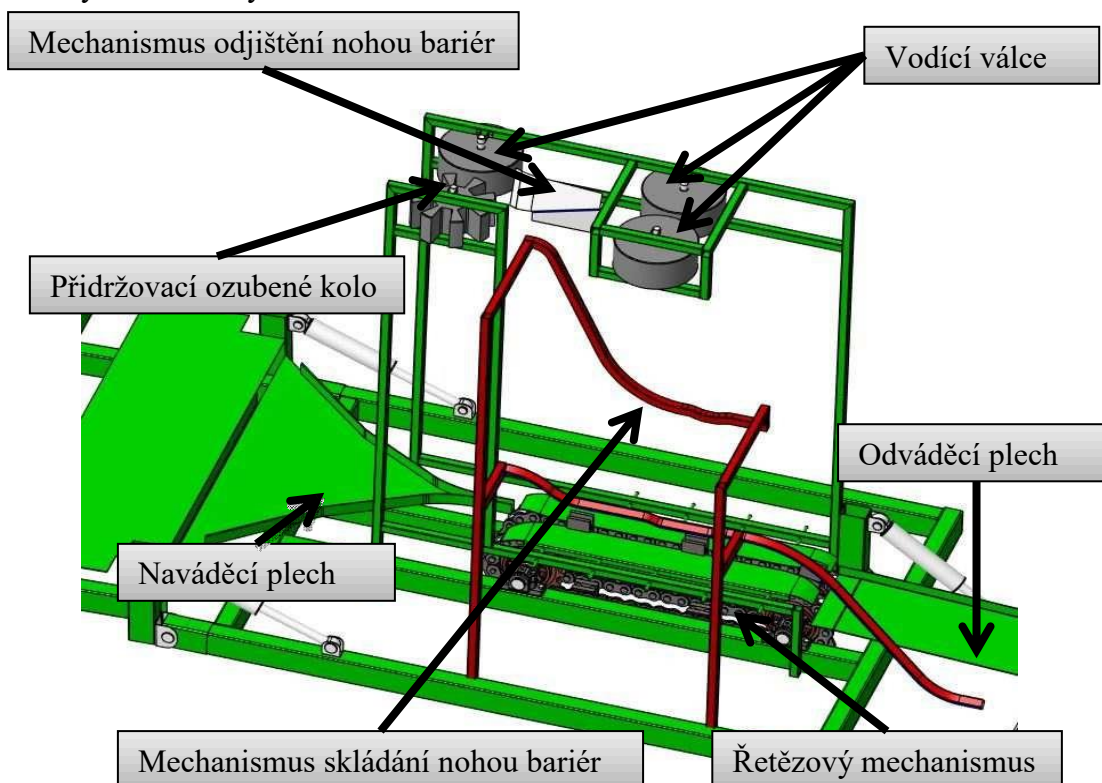
Obrázek 9.: Řez mechanismem zámku nohy, zdroj: vlastní

Jednotlivé segmenty jsou propojeny ocelovou sítí. Tato síť umožňuje pevné a pružné propojení mezi jednotlivými segmenty a umožňuje bariéře kopírovat konturu terénu. Jednotlivé segmenty bariéry mají šířku 1 metr. K ocelové síti jsou připevněny ve vzdálenosti 300 mm. Toto spojení umožní jak boční tak výškové natočení jednotlivých segmentů. Rozložená bariéra v plné délce za předpokladu rovného povrchu dosahuje délky necelých 130 metrů. Při nerovném terénu se tato vzdálenost částečně snižuje. Na síť se pomocí mechanismu napne nylonová textilie napuštěná kaučukem, která se částečně zapustí do země a vytvoří utěsnění bariéry.



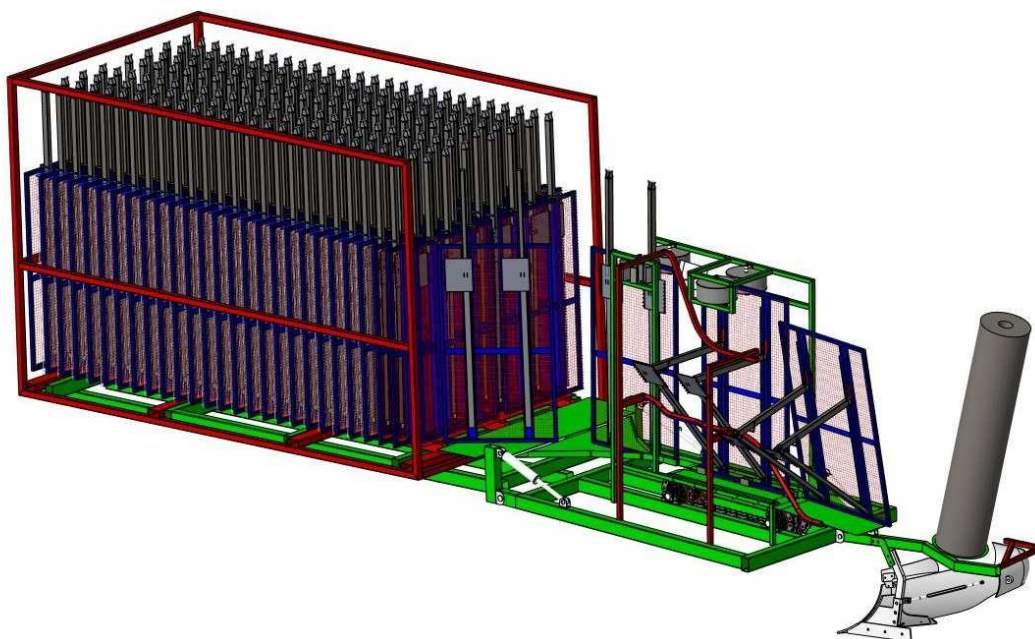
Obrázek 10.: První 3 segmenty rozložené bariéry, zdroj: vlastní

Složené bariéry se přepravují v boxu. Tento box slouží pro převoz a vykládání bariéry. Box je umístěn na tažném zařízení, které obsahuje vykládací mechanismu. Dále obsahuje pluh, který vytváří rýhu na usazení nylonové textilie. Vlek obsahuje klouby, které slouží pro dodržování kontury terénu a pro správné vykládání bariéry. Při převozu lze vlek částečně složit. Na nadcházejícím obrázku je hlavní vykládací část vleku. Obsahuje řetězový mechanismus, který pohání vykládání. Táhne nohy přes skládací mechanismus, kde se nohy bariéry automaticky složí.



Obrázek 11.: Řez mechanismem zámku nohy, zdroj: vlastní

Na obrázku 12 je zobrazen celý vlek s částečně rozloženou bariérou, která je vytahována z výměnného boxu.



Obrázek 12.: Vykládací vlek bariéry, zdroj: vlastní

4 Závěr

K dosažení výsledků zadání práce bylo nutné splnit jednotlivé kroky, které jsou nyní shrnuty. První krok obsahuje definování základních problémů, které se mohou objevit při výstavbě bariér. Tyto možné problémy byly brány v úvahu při konstrukci inovovaného řešení. Dále proběhl průzkum trhu a popis existujících řešení. Průzkum obsahuje základní 2 typy bariér. Plněné a neplněné. Všechny typy dosahovali podobných základních parametrů jako zvolené požadované hodnoty inovované bariéry.

Druhý krok obsahuje naplánování projektu. V tomto kroku jsou jednotlivým krokům řešení přiřazeny časové úseky a také plánované milníky řešení. Jednotlivé fáze jako rešerše, plánování inovace, návrh konceptů a zpracování dokumentace, jsou shrnuty v podrobném harmonogramu vypracovaném v programu MS Project. Plánovaným koncem projektu je den 15. Května, který je volen s rezervou 7 dní do plánovaného odevzdání diplomové práce. V této části byly využity metody inovačního inženýrství k získání konkrétního směru řešení.

Následně bylo navrženo 5 konceptů, jejichž řešení směřuje na rychlé a mechanizované vystavení bariéry. Využití mechanizace zajišťuje rychlé vystavení. Dva koncepty byly navrženy jako bariéry plněné vodou a zbylé tři pak jako bariéry neplněné, které ke svému zatížení využívají okolního prostředí, nebo povodňovou vodu. Z těchto pěti konceptů bylo pomocí analytické metody AHP vybráno nejlepší řešení. Pro vítězný koncept 5 následuje řešení konstrukce.

Vítězný koncept byl poté rozpracován do vize. Byly provedeny základní výpočty zatížení vodou proudící rovnoběžně s bariérou. Z těchto výpočtů byl navržen sklon bariéry a kontrola proběhla i u čepů uložení. Nejnižší bezpečnost tohoto výpočtu je rovna 3,75. Tato hodnota bezpečnosti je dostačující i v případě možného nárazu plovoucím předmětem. Po vypracování výpočtů byly navrženy jednotlivé segmenty bariéry. Konstrukce se v průběhu práce několikrát přepracovala z důvodu potřebných tvarů pro vykládací mechanismus.

Navržená bariéra se skládá z metrových segmentů, které tvoří ocelový rám. Ten je spojen dvěma U nosníky, na kterých jsou připevněny nohy bariéry. Také je zde přivařen mechanismus zajištění nohou, do kterého mechanismus vykládání zajistí při sestavování nohy bariéry. Na ocelovém rámu je připevněno ocelové síto, které propojuje všechny segmenty bariér. A vymezuje jejich vzájemnou polohu. Tato poloha je určena vzdáleností 300 mm,

kteřá umožňuje výškové a stranové natočení bariéry pro správné kopírování kontury terénu. Utěsnění je zajištěno nylonovou textilií napuštěné kaučukem. Ta je ukotvena na prvním segmentu bariéry a její spodní část je zapuštěna do země.

Spolu se základní bariérou byl vypracován částečný konstrukční návrh vykládacího zařízení. Toto zařízení je navrženo ve formě vleku, který je možno připojit za tažné zařízení, která má vlastní zdroj hydraulické kapaliny a výstupní hnaný hřídel se závislými otáčkami na rychlosti. Toto umožní správné rozvíjení segmentů bariér a její pokládání s nulovou relativní rychlostí vůči terénu. Vlek je navržen jako tři dílná soustava. První část obsahuje vyměnitelný přepravní box bariér a vlastní uložení kol. Druhá část obsahuje vykládací mechanismus a vlastní uložení kol, které umožňuje kopírování terénu. Také je zde uložen mechanismus vykládání pojistné kotvy, která ukotvuje první segment bariéry. Třetí část obsahuje pluh, špulku nylonové textilie napuštěné kaučukem a přihrnovací pluh. Tyto poslední dvě jmenované části jsou uloženy v kloubech. To umožňuje správné kopírování terénu a skládání mechanismu při přepravě.

Dalším krokem bylo porovnání inovovaného řešení s již stávajícím řešením. Inovovaná bariéra dosahuje lepších časů vyložení než zbylé bariéry s výjimkou bariéry Velox. Oproti ostatním bariérám, které mají čas výstavby 100 metrů okolo hodiny, je čas výstavby inovovaného řešení roven jedné šestině potřebného času dalších řešení. A to při využití 2 členů obsluhy. Jeden pracovník řídí tažné zařízení a druhý zajišťuje navigování řidiče a kontroluje správné rozkládání bariér.

Výsledkem této práce je vize nového typu řešení protipovodňových opatření. Byla navržena mobilní bariéra, která splňuje zadané požadavky, jako je délka výstavby, která je rovna 100 metrům. Výška zadržené vody je navržena na 1 metr s navrženou rezervou do zadržetí hladiny 1 157 mm. Čas výstavby bariéry dosahuje ještě lepších výsledků, než bylo v zadání a odpovídá 10 minutám na výstavbu 100 metrů s využitím 2 členů obsluhy. Jeden člen obsluhy ovládá stroj a druhý dohlíží na správné vykládání a také přiděluje kotvu a nylonovou textilií k prvnímu segmentu. Životnost bariéry odpovídá maximálně deseti nasazením. Bariéra byla konstruována pro nepevné povrchy.

Literatura

- [1] Protipovodňové hrazení. *Svitap* [online]. 568 02 Svitavy [cit. 2016-10-16]. Dostupné z: <http://www.svitap.cz/protipovodnove-hrazeni/>
- [2] Velox. *Aggeres* [online]. [cit. 2016-10-17]. Dostupné z: <http://www.aggeres.com/product/velox/>
- [3] Flood barrier h180. *Inero* [online]. [cit. 2016-10-17]. Dostupné z: <http://www.inero.se/products-en/flood-barrier-h180>
- [4] MAŠÍN, Ivan. Inovační inženýrství: plánování a návrh inovovaného výrobku. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012, 178 s. ISBN 978-80-7372-852-6.]
- [5] Analytic Hierarchy process. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Analytic_hierarchy_process
- [6] LEPSÍK, P. a VODIČKA, J. *Plánování a řízení společných projektů*. 1. vydání. Liberec: TUL, 2012. 124s. ISBN 978-80-7372-920-2.
- [7] LEPSÍK, P. a MAŠÍN, J. *Nástroje řízení projektů*. 1. vydání. Liberec: TUL, 2012. 202s. ISBN 987-90-7372-854-0.
- [8] LEPSÍK, P. a MAŠÍN, J. *Analýza procesů*. 1. vydání. Liberec: TUL, 2012. 132s. ISBN 987-90-7372-456-6.
- [9] Ježek, J., Varádiová, B., Adamec, J.. *Mechanika tekutin*. Praha, 1997.

TRIBOLOGICKÉ VLASTNOSTI A ABRAZNÍ ODOLNOST
KARBIDU WOLFRAMU A TITANU
Málek Václav

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,
Fakulta Strojní, 4. ročník
Doktorský studijní program – MATERIÁLOVÉ INŽENÝRSTVÍ

Abstrakt: Karbidy wolframu (WC) a karbidy titanu (TiC) patří do skupiny tvrdých materiálů, které se používají pro řezné nástroje. Vzorek substrátu byl povlakován zařízením PVD. Povlaky nc-WC / a-C: H byly nanášeny ve vakuové komoře magnetronovým rozprašováním. Toto zařízení má čtyři nezávislé planární magnetrony s kruhovými targety. Povlakovací proces umožňuje přenos částic kovů, které jsou běžně tavitelné za vysokých teplot, na povlakované vzorky.

Byly použity tři targety z čistého grafitu a jeden z čistého wolframu. Karbid wolframu je přibližně dvakrát tvrdší než ocel. Parametry vlastností ovlivňujících proces tenkých vrstev byly amorfní mikrostruktura, tvrdost a adheze k substrátu. Tribologická měření byla provedena testovací metodou "ball-on-disk". Tribologické testování (EN1071-13: 2010) bylo provedeno s použitím kuličky vyrobené z Si_3N_4 o průměru 6 mm s konstantním zatížením 10 N. Výsledky byly analyzovány pomocí profilometru a optického mikroskopu.

Klíčová slova: naprašování, PVD, karbid wolframu, karbid titanu

1 Úvod

Řezné nástroje jsou vyráběny z mnoha druhů materiálů, hlavním materiálem na výrobu řezných nástrojů jsou v současnosti karbidy a nitridy. Nové moderní povlaky mohou řezným nástrojům několikanásobně zvýšit jejich trvanlivost a umožňují pracovat s vyššími řeznými a posuvovými rychlostmi. V dnešní době je trend jednotlivých výrobců vyrábět multivrstvy na destičkách sloužících k obrábění.

Karbid wolframu je přibližně dvakrát tvrdší než ocel, s Youngovým modulem přibližně 650-700 GPa. Na konci procesu povlakování byl do komory přiváděn Ar / metan (Ar 25 sccm / CH_4 12,5 sccm), který se dostává do povrchové vrstvy. Parametry vlastností ovlivňujících proces tenkých vrstev byly amorfní mikrostruktura, tvrdost a adheze substrátu. Tribologická měření byla provedena testovací metodou "ball-on-disk". Tribologické testování (EN1071-13: 2010) bylo provedeno s použitím kuličky vyrobené z Si_3N_4 o průměru 6 mm s konstantním zatížením 10 N při pokojové teplotě a vlhkosti $40 \pm 2\%$. Výsledky byly analyzovány pomocí profilometru a optického mikroskopu.

2 Experimentální část vytváření povlaků

1.1 Popis experimentu vytvoření povlaku karbidem wolframu

Vzorky byly připravené z rychlořezné oceli HSS třídy 19 830. Povrch vzorku byl vyleštěn brusnou pastou a sametem na drsnost přibližně $R_a \ 0,02 - 0,03$.

Tabulka 1: Chemické složení substrátu oceli HSS 19 830

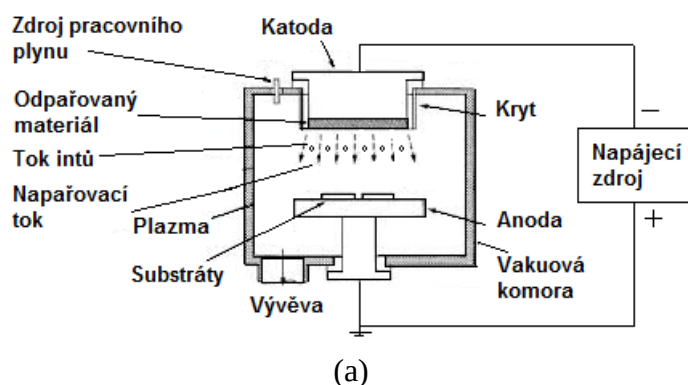
Elements	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	W	V
[wt. %]	0,8-09	0,25	0,33	0,029	0,0003	3,97	4,76	5,95	1,72

Leštěný povrch vzorku byl očištěn v acetonu a ultrazvukové lázni. Tvrdost vzorků substrátu byla 63-64 HRC. Materiálem k povlakování byly použity leštěné vzorky (o tloušťce 5 mm, Ø 20 mm) z oceli HSS 19 830. Jedná se o vysokorychlostní ocel s vysokou houževnatostí. Chemické složení oceli HSS 19 830 [hmotnostních wt%] je uvedeno v tabulce 1.

Tabulka 2: Parametry PVD procesu

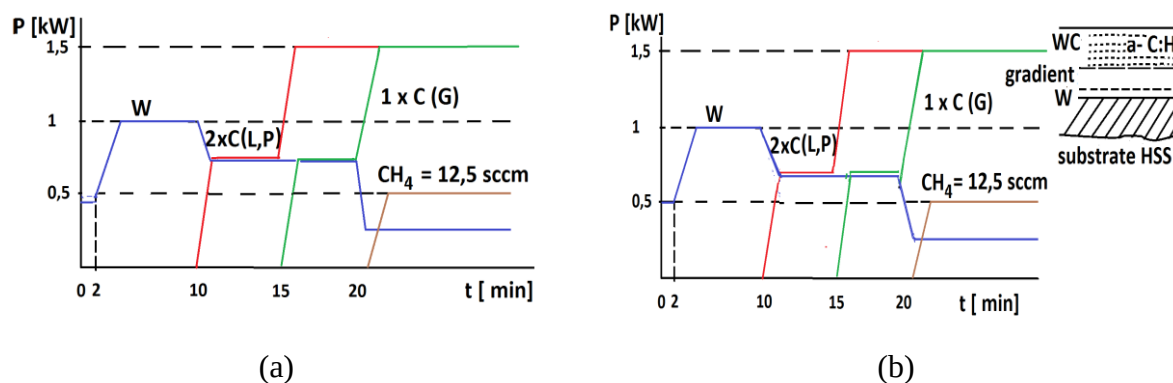
Elements	Tlak ve vakuové komoře	Množství Argonu	Napětí U bias
[wt. %]	4,39.10-4 Pa	25 sccm	-50V (0,011A)

Povlakování je prováděno plazmatickým naprašováním metodou PVD



Obrázek 1: (a) Schéma zařízení pro naprašování

Metoda PVD (Physical vapor deposition) využívá relativně jednoduchého principu, bombarduje terč energetickými částicemi a materiál terče se rozprašuje a tento rozprašený materiál se ukládá (deponuje) na substrát v podobě rostoucí tenké vrstvy. Nejvíce se tato technologie používá pro povlaky obsahující vodivé materiály (kovy). Systém pro magnetronové naprašování se skládá z jednoduché vakuové komory, která udržuje vysoké vakuum. Obvyklý pracovní tlak v komoře je okolo 1 Pa. Uvnitř komory je usazen terč zvoleného složení a nad ním je umístěn držák se substráty (obr. 1). Samotný terč je zapojen jako katoda a na něj se přivádí napětí. Do komory se připouští pracovní plyn (nejčastěji argon). Nad terčem se po přivedení napětí zapálí v argonu doutnavý výboj (plazma). [2] Argonové ionty bombardují povrch substrátu, terč (povlakující materiál) se rozprašuje a na substrátu vzniká povlak. [5] Pod materiálem terče je umístěn silný magnet, který je chlazený vodou. Přítomnost magnetického pole zefektivňuje ionizaci argonu v plazmatu a ve svém důsledku zlepšuje rozprašování. [6]



Obrázek 2: Depoziční proces, (a) wolfram k. (WC 1), (b) wolfram k. (WC 2) změna výkonu parametrů magnetronu wolframu z (0,45 kW; 2,1 A), na (0,5 kW; 3,5 A).
(Marcin Makowka, Politechnika Łódzka [1])

Obr.1 schémata popisující průběhy a postup potahových vrstev. Časy a výstupy magnetronů. Magnetron wolframu 2a(0,45 kW; 2,1 A), 2b(0,5 kW; 3,5 A). Na pravé straně diagramu je vzorek umístěn se strukturou vrstvy. Zařízení pro magnetronové naprašování se skládá z jednoduché vakuové komory, která udržuje vysoké vakuum. (1 Pa) Uvnitř komory je upevněn terč (target) v tomto případě byly použity tři targety z grafitu a jeden z wolframu a nad ním je umístěn držák se substráty. Samotný terč je zapojen jako katoda a na něj se přivádí napětí. Podle (Obrázku 2.) můžeme sledovat, nejprve byla vytvořena mezivrstva z wolframu a poté byly zapojeny další tři targety z grafitu a ke konci povlakovacího procesu byl do komory připouštěn metan.

1.2 Popis experimentu vytvoření povlaku karbidem titanu

Target chromu (čistota 3N) je použit pouze v počáteční fázi depozice, k vytvoření gradientu mezivrstvy Cr/ Cr + Ti / Ti + C. Celková doba depozice byla 150 min při postupném zvyšování výkonu magnetronů. Target Cr měl hodnotu výkonu přibližně 1,0 kW, také target titanu měl 1 kW. V dalším kroku, tři targety (dva C a jeden Ti) byly rozprašovány při stálém otáčení stolu se vzorky. Výsledkem byla povlakovaná vrstva o tloušťce přibližně 1,5 μm . Vrstva byla vytvořena podobným způsobem jako karbid wolframu.

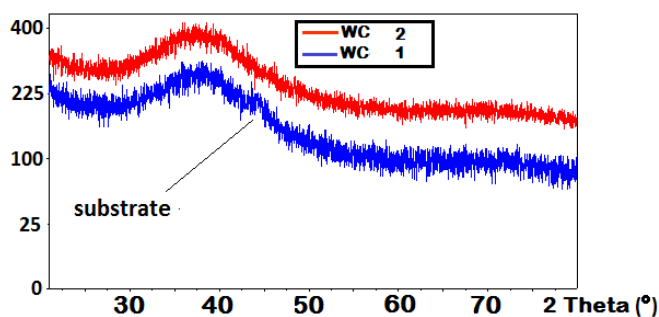
1.3 Chemická analýza metodou XPS

Tabulka 2: Chemické složení metodou XPS analýza

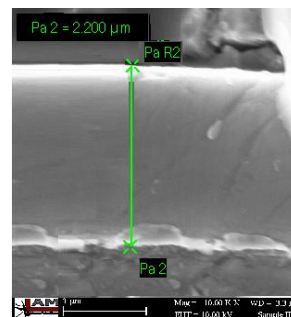
Variable	C1s	N1s	O1s	W 4 d5/2
WC-1	90,4	0,5	7,5	1,5
WC-2	89,2	0,6	7,2	3,0

Spektra XPS vykazují kromě C, O, W a malou kontaminaci N pravděpodobně z procesu depozice. Uhlík s vysokým rozlišením Cs nevykazují důkazy vazby C-W očekávané při vazebné energii kolem 283 eV [7,8]. Malá složka tohoto BE je pravděpodobně ovlivněna substrátem, který se dále zvyšuje množství W ve vzorku WC 1 je poměrně nízké asi 1,5%, ve vzorku WC 2 došlo ke změně obsahu wolframu na 3%.

1.4 Analýza metodu XRD



(a)

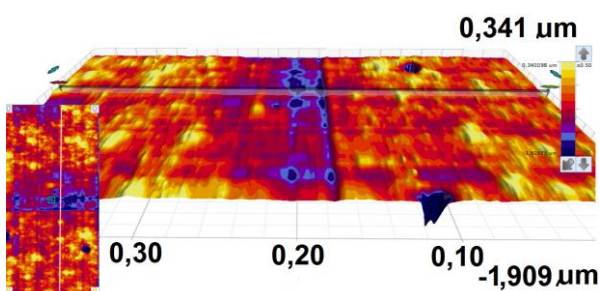


(b)

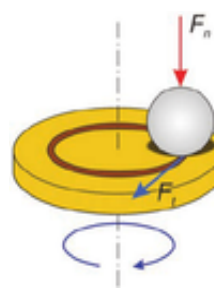
Obrázek 3: a) Graf rentgenové difrakce amorfnní vrstvy, (b) SEM snímek vrstvy WC 1
(Petr Ryšánek, Univerzita Jana Evangelisty Purkyně)

Rentgenová difrakce umožňuje zjistit vlastnosti dané krystalické látky. V tomto případě dokazují amorfnní základ těchto povlaků.

3 Tribologické vyhodnocení povrchu povlaků



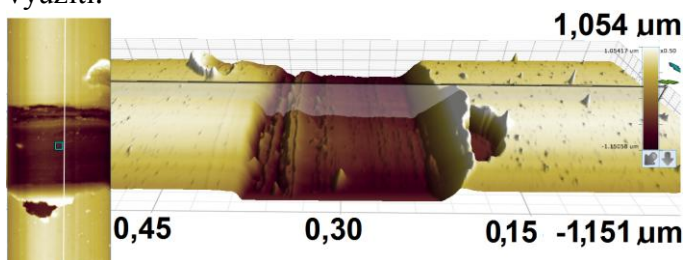
(a)



(b)

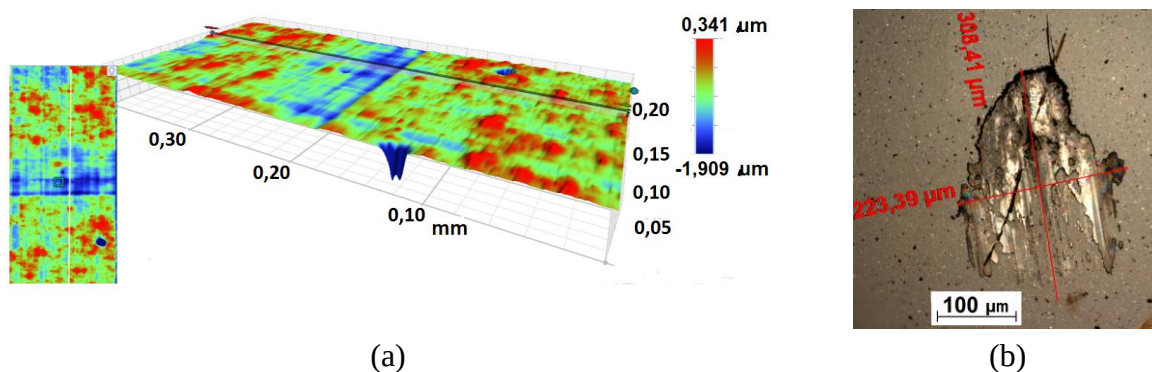
Obrázek 4: (a) vzorek WC 1, (b) Princip metody ball on disc

Za účelem ověření chování systému vrstva-substrát se provádí tribologické zkoušky. Tribologická zkouška „PIN-on-DISC“. V této práci jsou použity výsledky varianty, „BALL-on-DISC“, kde ve formě pinu byla použita kulička. Pro získání hodnot koeficientu tření určité materiálové dvojice, ale je jedním z nejdůležitějších laboratorních testů, který má za cíl určit charakter daného experimentálního materiálu a možnosti jeho využití.

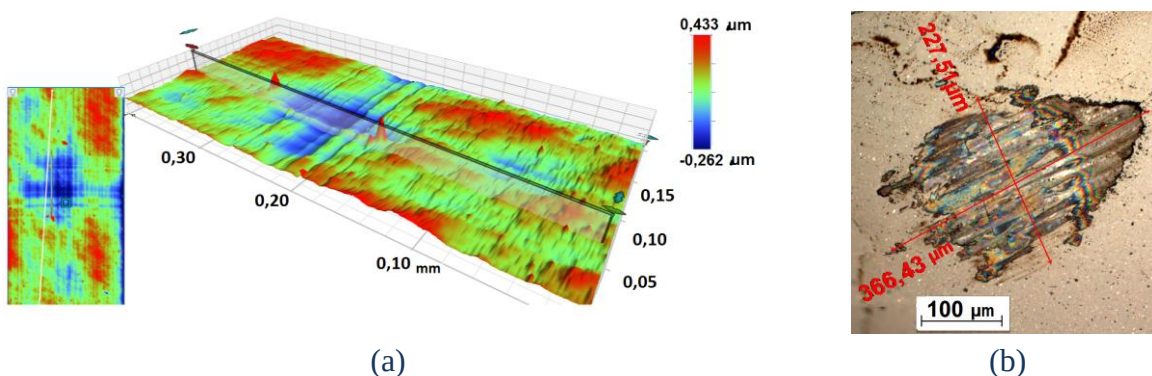


Obrázek 5: (a) vzorek TiC ,

Porovnání vrstvy karbidu wolframu a k. titanu WC (1700 - 2500 HV), TiC(2000-3000 HV). V literatuře nalezeno adheze TiC 80N [3].

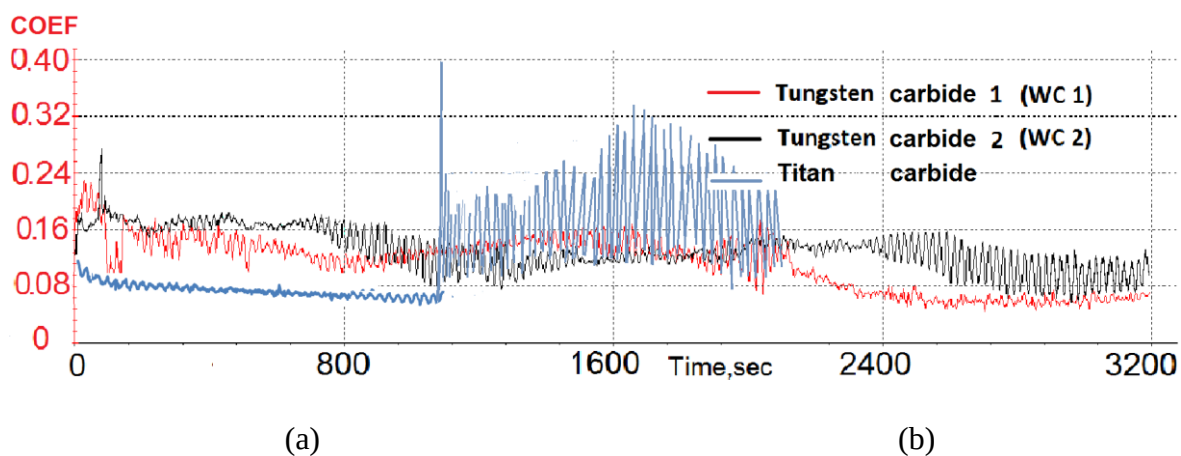


Obrázek 6: (a) vzorek WC 1, (b) otěr kuličky o povlak WC 1



Obrázek 7: (a) vzorek WC 2, (b) otěr kuličky o povlak WC 2

Oba povrchy povrchy wolframu karbidu představují podobné vlastnosti. Pro zjišťování tribologických vlastností by bylo zajímavé porovnat velikost otěru keramickou kuličkou Si₃N₄, (tvrdost 14-18 GPa) [4]. a kuličkou z oceli.



Obrázek 8: Porovnání koeficientů tření .

4 Závěr

Porovnání naměřených difraktogramů tenkých vrstev WC 1, WC 2. Z charakteru difrakčních záznamů je patrné, že oba vzorky jsou amorfni. Nevýrazné difrakční maximum u vzorku WC 1u cca 44st 2 theta patří substratu. Bohužel vzhledem k charakteru difraktogramu není možné určit fázové složení. Lze usuzovat, že vrstvy jsou amorfni a mohou obsahovat malé krystality v řádu nanometrech. Pro lepší zkoumání malých krystalů by bylo lepší použít transmisní mikroskop, který má větší rozlišovací schopnost.

Můžeme se domnívat, že podle grafu u vzorku WC 2, na základě výchylek u třecí dvojice kulička dochází při tření jsou větší rozdíly ve struktuře materiálu z hlediska tvrdosti. Ve vzorku WC 2 jsou větší zárodky krystalů.

Z grafu zjistíme podobnou velikost koeficientu tření pro vzorky Karbidu wolframu (WC 1, WC 2) mají podobný průměrný koeficient tření 0,12. Původní drsnost povrchu před povlakováním Ra 0,02-0,03. Vzorek WC 2 obsahuje větší množství wolframu 3%, které je dáno větším výkonem magnetronu na začátku povlakování. Materiál karbid wolframu je užíván především pro potřeby obrábění naměřený koeficient 0,12 dále můžeme snížit použitím vhodné chladicí a lubrikační provozní kapaliny při obrábění. Adhezní opotřebení hraje významnou roli zejména při obrábění litiny, kdy vzniká tříška, která vykazuje minimální plastickou deformaci. V kontaktní ploše čelo - tříška nedochází ke vzniku vnitřního tření a následkem toho je zde řezná teplota podstatně nižší. [3]

Karbid titanu TiC (tl. 1,5 μm) má v porovnání s karbidem wolframu nižší koeficient tření 0,08, avšak dochází u této vrstvy dříve k prodření na podkladový materiál.

Literatura

- [1] MAKOWKA, M., PAVLAK, W., KONARSKI, P., WENDLER, B., Hydrogen content influence on tribological properties of nc- WC/a-C:H coatings. *Diamond & Related*, 2016, vol. 67, no. 6, pp. 16-25.
- [2] SOSNOVÁ, M., Kluzné vrstvy a metody hodnocení adhezivně-kohezivního a tribologického chování. ZČU, Plzeň. 2006.
- [3] LOLADZE, T. N., Das Zusammenwirken von Werkzeug und Werkstückstoff beim Schneiden von Metallen - Industrie Anzeiger 1959, č. 62
- [4] old.vscht.cz/sil/keramika/Ceramic_Technology/SM-Lect-9-C.pdf
- [5] GONNORD, H., JAOUEN, M., DELAFOND, J., GIRARDEAU, T., Wear improvements of stainless steel and tungsten carbide substrates covered by thin carbon films combining ion beam assisted deposition and plasma enhanced chemical vapor deposition from pure CH₄ deposition methods. *Wear*, 1999, vol. 231, no. 6, pp. 38-46.
- [6] BATORY, D., JEDRZEJCZAK, A., SZYMANSKI, W., NIEDZIELSKI, P., FIJALKOWSKI, M., LOUDA, P., KOTELA, I., HROMÁDKA, M., MUSIL, J., Mechanical characterization of a-C:H:SiO_x coatings synthesized using radio-frequency plasma-assisted chemical vapor deposition method. *Wear*, 2015, vol. 590, no. 4, pp. 299-305.

- [7] KRASOVSKII, P.V, MALINOVSKAYA, O.S, SAMOKHIN, A.V, Determination of oxygen in WC-Co nanopowders, *Applied Surface Science*, 2015, vol. 339, no. 6, pp. 46–54
- [8] DIAZ, J., J., PAOLICELLI, G., FERRER, S., COMIN, F., Separation of the sp³ and sp² components in the C1s photoemission spectra of amorphous carbon films. *Physical review B*, 1996, vol. 54, no. 8, pp. 11-15.

Poděkování:

Marcinu Makowkovi, Politechnika Łódzka, Poland

Martinovi Kormundovi, Petru Ryšánkovi

z Přírodovědecké fakulty, katedry fyziky, Univerzita Jana Evangelisty Purkyně

za pomoc při přípravě měření

DETEKCE ZDEFORMOVANÉ ČÁSTI PLAVENÉHO SKLA POMOCÍ LASEROVÉHO PAPRSKU

Matúšek Ondřej

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,

Fakulta strojní, 4. ročník

Doktorský studijní program – STROJE A ZAŘÍZENÍ

Abstrakt: Práce se zabývá vyhodnocením povrchu pásu plaveného skla pomocí strojního vidění a to s využitím detekce deformace odražené laserové linie na projekční desku. Metoda byla připravena tak, aby ji bylo možné aplikovat on-line na pracovní linku. Přesnost navrhované metody byla porovnána se současně použitou off-line metodou a s vysoce přesným měřením pomocí konfokálních snímačů.

Klíčová slova: deformace povrchu, ploché sklo, detekce paprsku

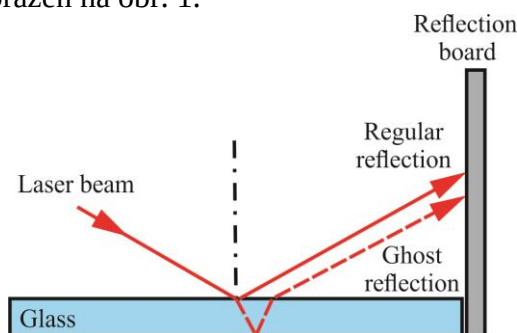
1 Úvod

Práce se zabývá aplikací robotického vidění a nových metod snímání transparentních materiálů. Práce cílí na vyhodnocování tvaru transparentních a vysoce lesklých materiálů s využitím projekce laserového paprsku.

Cílem předkládané práce bylo určit zdeformovanou zónu skleného pásu. Pro měření byly vybrány přířezy z okrajových částí plaveného skla. Během výrobního procesu jsou okraje plaveného skla zdeformovány od rolen, zajišťujících roztahování skloviny do definované šířky. Tyto zdeformované okraje musí být následně odřezány. Šířka odřezu je v současné době několikrát denně nastavována manuálně operátorem, na základě průběžně odebraných a off-line vyhodnocených odřezů okraje plaveného pásu skla. Z ekonomických důvodů je vhodné řešit toto vyhodnocování online na výrobní lince

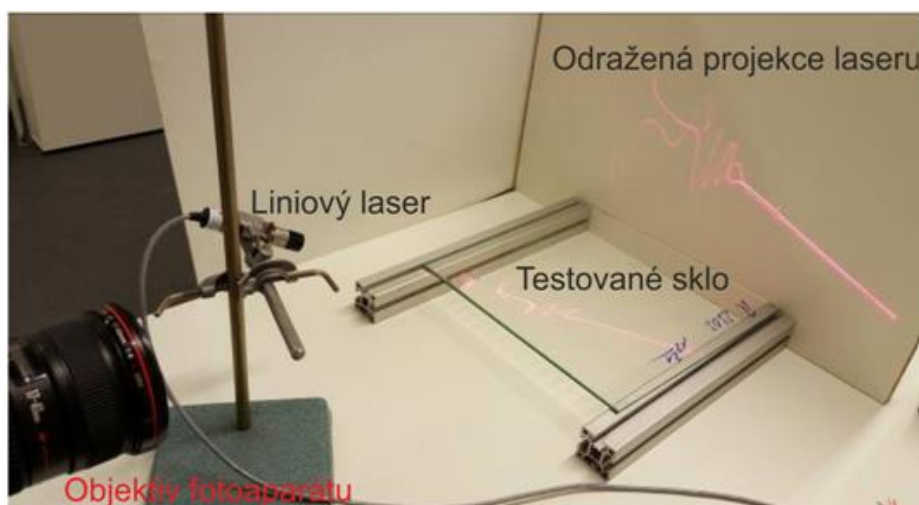
2 Připravené pracoviště

V první fázi projektu bylo postaveno stacionární experimentální pracoviště. Zde byla testována navrhovaná metodika měření. Standardní metoda získání 3D profilu pomocí deformace laserového paprsku není pro sklo vhodná kvůli jeho transparentci. Proto bylo přistoupeno k vyhodnocování odraženého laserového paprsku, respektive k vyhodnocení jeho deformace. Princip je vyobrazen na obr. 1.



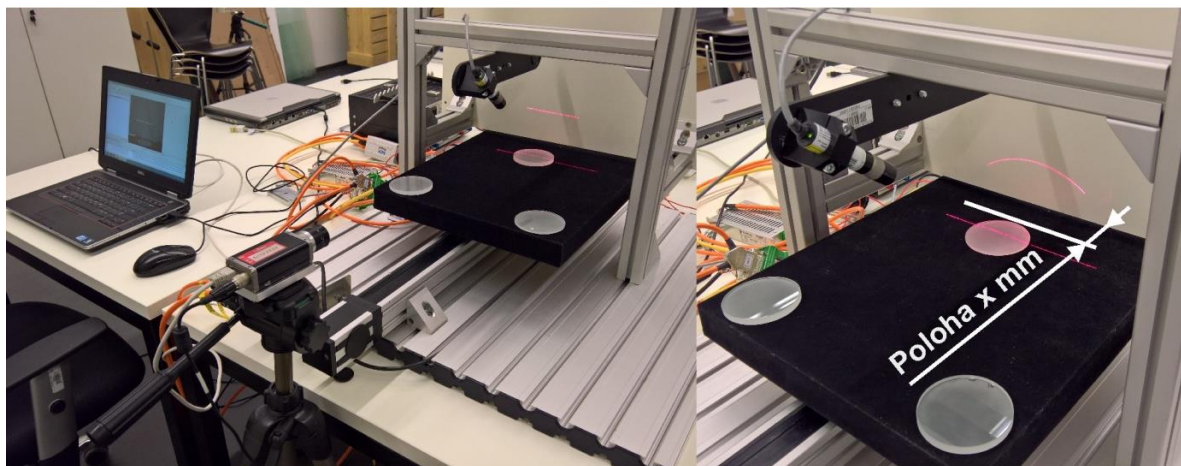
Obrázek 1: Zjednodušený princip navrhovaného řešení

Pro prvotní účely vyhodnocení deformace povrchu (horní strany skla) byl analyzován pouze řádný odraz, pro další výzkum bude ale uvažován i odraz mimořádný k určení tloušťky skla. První verze experimentálního pracoviště je zobrazena na obr. 2.



Obrázek 2: Stacionární experimentální pracoviště

Po odladění bylo přistoupeno ke stavbě druhé verze experimentálního pracoviště a to s aktivní pojezdovou jednotkou. Princip i parametry zůstaly stejné jako v prvním případě, pojezdová jednotka pouze umožňuje vyhodnocovat v čase proměnnou deformaci skla (online) a tím získávat 3D informaci z odrazu laserového paprsku. Metodika generování dat je založena na postupném skládání obrazů. Experimentální pracoviště je zobrazeno na obr. 3.



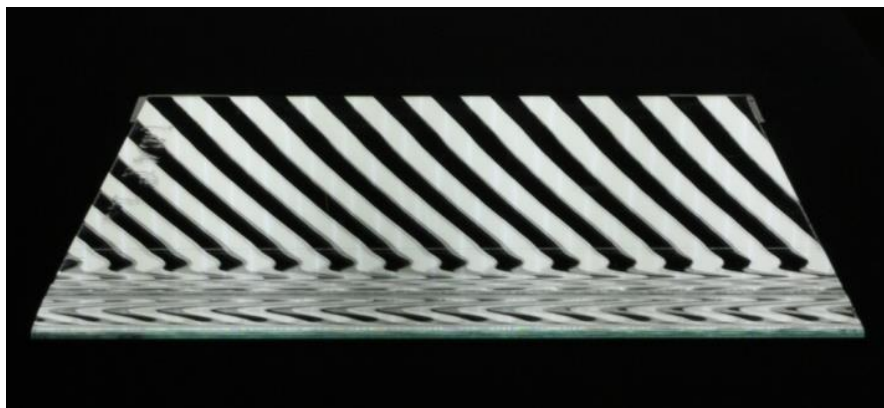
Obrázek 3: Experimentální pracoviště s aktivním pojezdem

3 Dosažené výsledky

Pro měření byly vybrány přířezy z okrajových částí plaveného skla. Během výrobního procesu jsou okraje plaveného skla zdeformovány od rolen, zajišťujících roztahování skloviny do definované šířky. Tyto zdeformované okraje musí být následně odřezány. Šířka odřezu je v

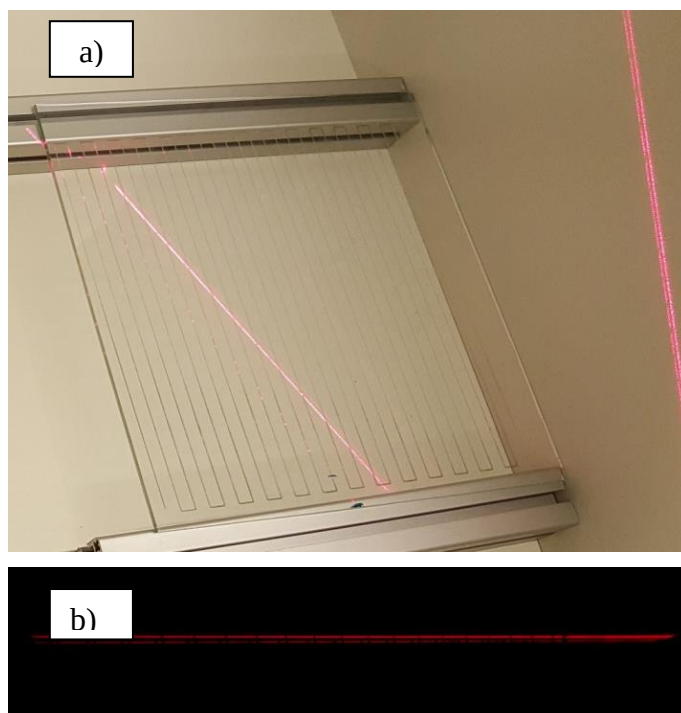
současné době několikrát denně nastavována manuálně operátorem, na základě průběžně odebraných a off-line vyhodnocených odřezů okraje plaveného pásu skla. Z ekonomických důvodů je vhodné řešit toto vyhodnocování online na výrobní lince a z důvodu vysokého aplikačního potenciálu byly testovány právě tyto vzorky. Pro testování v rámci projektu byly použity vzorky o rozměrech pro standardní zkoušky, tj. 300x300 mm, šířky 3 a 4 mm.

Současná off-line kontrola probíhá pomocí promítaného zebra vzoru a zvlněný okraj skla se projeví distorzí promítaného obrazu (obr. 4).



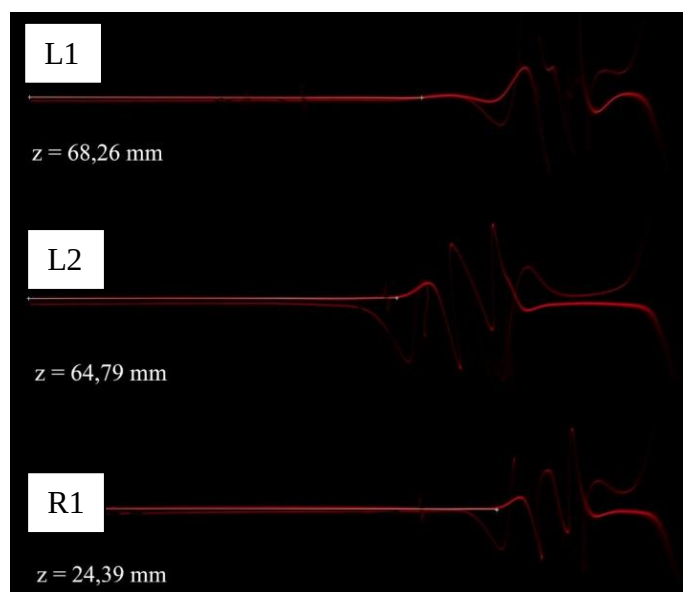
Obrázek 4: Přířez zdeformovaného skla

K získání odpovídajících výsledků bylo potřeba systém zkalibrovat. Za tímto účelem byl ve spolupráci s Katedrou výrobních systémů a automatizace na TUL vytvořen kalibrační vzorek vypálením přesného vzoru do plochého skla dané tloušťky (obr. 5a). Odražená linie je zobrazena na obr. 5b.



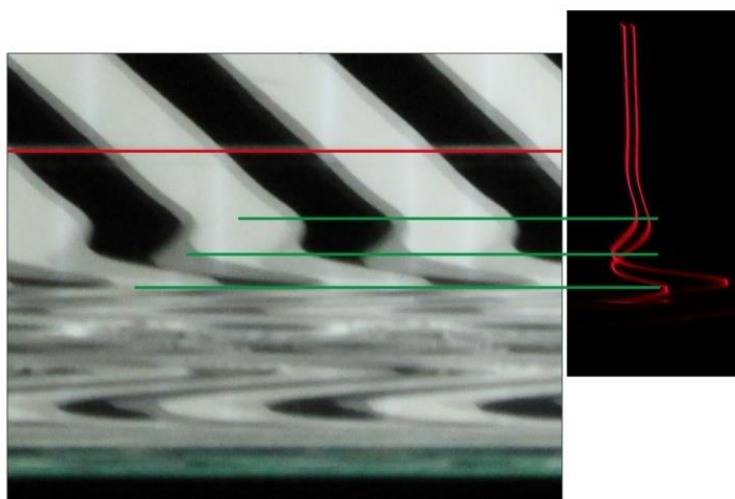
Obrázek 5: a) Kalibrační vzorek, b) odražená kalibrační linie

Z kalibračního vzorku byl vytvořen matematický model pro vzdálenostní přepočet. Poté byl vytvořen skript pro určení velikosti zdeformované části. Byly analyzovány vzorky odebrané v průběhu plavení různých skel (obr. 6).



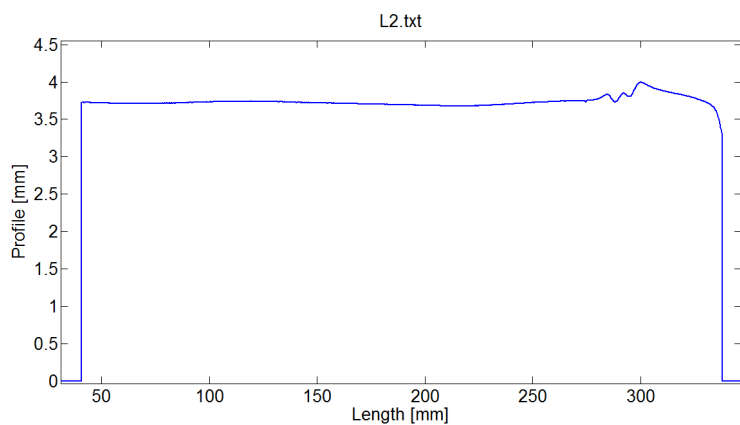
Obrázek 6: Odražený paprsek - analyzované vzorky L1,L2,R1

Získané výsledky byly následně porovnány s výsledky se standardně používanou metodou promítáním zebra vzoru (obr. 7).

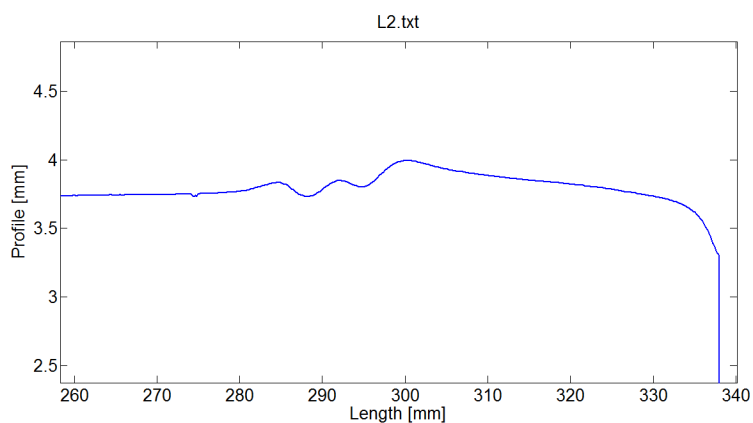


Obrázek 7: Porovnání metody laserové projekce a standardního zebra testu

Tato používaná metoda je ovšem pouze subjektivní a přesnost určení rozhraní mezi řádnou a distorzní částí se i u zkušených operátorů pohybuje v řádu milimetrů. Proto byly vzorky zároveň laboratorně proměřeny pomocí konfokálních snímačů.

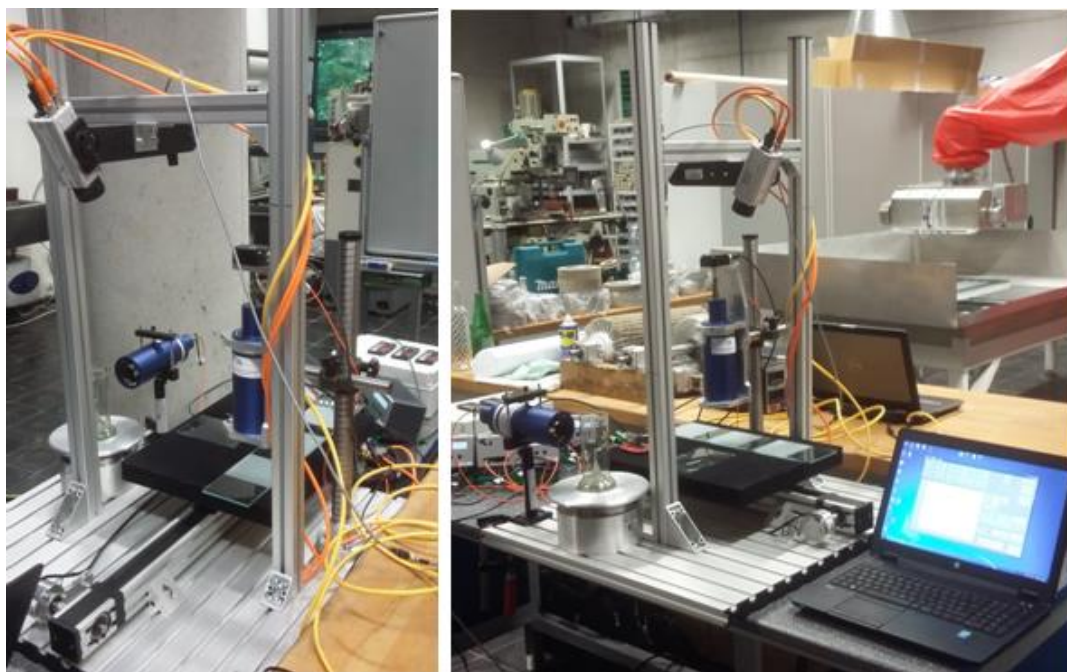


Obrázek 8: Měřený profil přířezu L2 - konfokální snímač

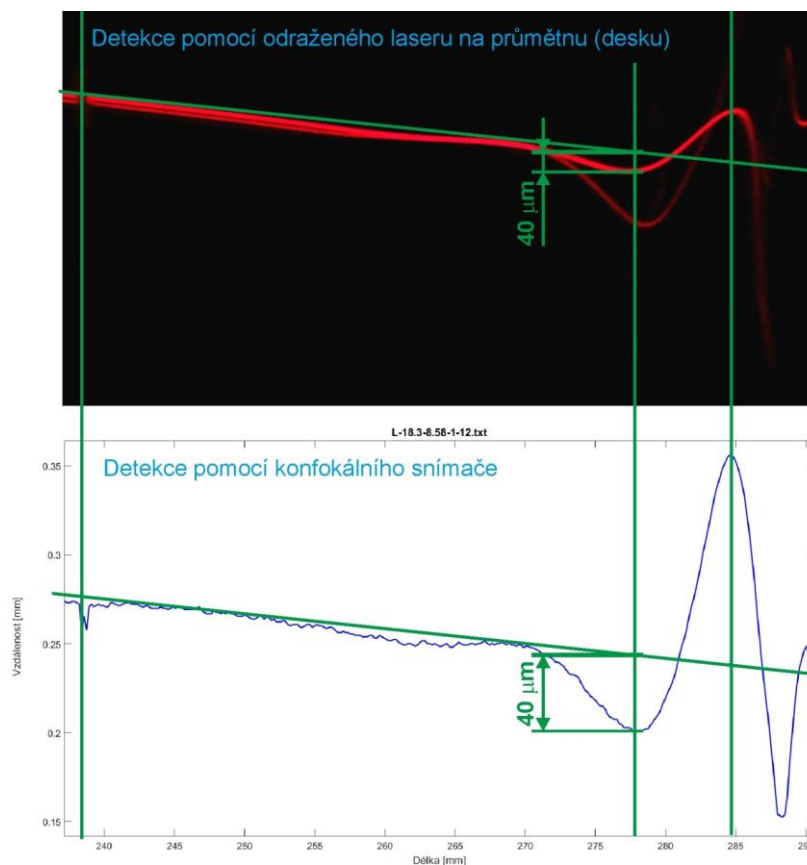


Obr. 8 Detail zdeformované části přířezu L2 - konfokální snímač

Profil analyzovaného přířezu pomocí s konfokálního snímače je zobrazen na obr. 8. Detail zdeformované části je poté na obr. 9. K měření bylo upraveno připravené experimentální pracoviště (obr 10.).



Obr. 9 Upravené pracoviště pro snímání konfokálními snímači



Obr. 10 Porovnání metody odraženého laserového paprsku a měření konfokálním snímačem

Byly porovnány výsledky z testovaných metod (obr. 6, obr. 10). Ty jsou zobrazeny v tabulce 1. Hodnoty z nejpřesnějšího měření – pomocí konfokálních snímačů jsou brány jako etalony. Hodnoty získané pomocí zebra testu byly vyhodnocovány subjektivně a jsou tedy přibližné.

Tabulka 1: Hodnoty vzdálenosti získané 3 použitými přístupy.

vzorek	Laserová projekce	Zebra test	Konfokální senzor
L1	68,3	70	66,9
L2	64,8	65	62,9
R1	24,4	27	25,8

4 Závěr

Cílem předkládané práce bylo připravit objektivní metodu pro detekci zdeformovaného okraje plaveného skla. Bylo navrženo a sestaveno experimentální pracoviště, na kterém byla připravená metodika pro přepočítání laserového paprsku ověřena.

V další části práce byla porovnávána přesnost připravené metody projekce laserového paprsku se standardně používanou off-line metodou – metodou zebra testu. Navíc bylo realizováno i ověření pomocí vysoce přesných konfokálních snímačů.

Obecně lze říci, že standardně používaná metoda zebra testu není velice přesná. Na základě testů provedených na několika vzorcích skla lze konstatovat, že pomocí projekce laserového paprsku a následného vyhodnocování jeho deformace je možné dosáhnout větší přesnosti. Nejpřesnější výsledky potom udává konfokální snímač. Bohužel, z podstaty principu jeho funkce jej není možné použít pro on-line vyhodnocení ve výrobním procesu. Zebra test by bylo možné zautomatizovat, avšak zde budou větší nároky zástavbu a údržbu zařízení. Více detailů o jednotlivých metodách i samotném měření lze najít v autorových publikacích.

Poděkování

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže Technické univerzity v Liberci č. SGS 21181/115, využívající účelové podpory na specifický vysokoškolský výzkum a je financovaná Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Literatura

- [1] MATÚŠEK, O. Rear-view mirror holder position determination by an industrial camera. In: *Sborník příspěvků Mezinárodní Masarykovy konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2011*. Hradec Králové: Magnanimitas, 2011, s. 647-654. ISBN 978-80-904877-7-2.
- [2] Automatizace HW [online]. [cit. 2015-08-14]. In: <http://automatizace.hw.cz/komponenty>
- [3] Průmyslová automatizace Omron [online]. [cit. 2015-08-11]. In: <http://www.micro-epsilon.cz/displacement-position-sensors/confocal-sensor>
- [4] OSORIO, M. F., A. SALAZAR, F. PRIETO, P. BOULANGER a P. FIGUEROA. *Three-dimensional digitization of highly reflective and transparent objects using multi-wavelength range sensing*. *Machine Vision and Applications*. 2012, 23(4): 761-772. DOI: 10.1007/s00138-010-0308-6. ISSN 0932-8092.
- [5] Ihrke I., K. Kutulakos, H. Lensch, M. Magnor, and W. Heidrich, State of the art in transparent and specular object reconstruction, *Computer Graphics forum* Volume 29 (2010), number 8 pp. 2400–2426, DOI: 10.1111/j.1467-8659.2010.01753.x
- [6] HOTAŘ, V., MATÚŠEK, O. Využití reflexe plochého skla pro jeho detekci. *Sklář a keramik*, 62 [2012], č. 7 -8, s. 170-173, ISSN 0037-637

PROJEKČNÍ NÁVRH SPALOVACÍHO MOTORU PRO HYBRIDNÍ VOZIDLO

Bc. Roman Rybáček

Sekce - STROJÍRENSTVÍ

Fakulta strojní, 2. ročník

Magisterský studijní program – KONSTRUKCE STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

Abstrakt: Práce se zabývá koncepčním návrhem zážehového dvouválcového agregátu pro hybridní vozidlo s požadovaným výkonem alespoň 45 kW při 6 000 min⁻¹. Práce analyzuje současné legislativní požadavky omezující automobilový průmysl. Dále popisuje současný stav hybridních a elektrických pohonů automobilů. V teoretické části práce je nastíněn přehled technických opatření používaných ke snížení produkce CO₂ a dalších škodlivých emisí. Hlavní část práce obsahuje návrh spalovacího motoru a 3D CAD model, vytvořený s podporou zjednodušených analytických výpočtů a ověřených FEM analýzou.

Klíčová slova: hybridní vozidlo, elektromobil, konstrukce motoru, motor.

1 Úvod

Současné emisní limity výrazně omezují možnosti výrobců a plně určují vývojový směr pro výrobce automobilů. V příštích několika letech dojde k významnému snižování podílu vznětových agregátů na trhu. Vzhledem k tomu, že tyto vozy značně pomáhají snižovat flotilové emise CO₂, bude snížení prodaného počtu těchto vozů pro výrobce znamenat citelnou ránu. Jednou z možností, jak budou moci výrobci tento problém vyřešit, je použití hybridních vozidel typu HEV. Vzhledem k tomu, že tyto vozy nepotřebují velké množství drahých lithiových baterií, mohly by se stát cestou vývoje pro dalších několik let.

Cílem práce je navrhnout koncepční návrh motoru, který bude splňovat požadavek minimálního výkonu 45 kW při 6 000 min⁻¹, a přitom udržet minimální spotřebu paliva.

Práce se v teoretické části zabývá hybridními a elektrickými pohony vozidel a zhodnocuje možný potenciál každé varianty. Práce se dále zabývá možnostmi zvýšení účinnosti zážehových motorů. Vybraná opatření popisuje a snaží se odhadnout potenciální možnost vývoje těchto opatření a jejich nasazení do sériové produkce.

V návrhové části práce je navržen celý spalovací motor včetně mazacího a chladicího okruhu, které byly navrženy po prozkoumání moderních spalovacích agregátů od firem Škoda, BMW, VW, Suzuki a McLaren, kterými se řídila konstrukce motoru. Následně je provedena simulace navrhovaného motoru v softwaru Ricardo Wave, součástí konceptu je i analytický návrh turbodmychadla. Na tuto část navazují zjednodušené analytické výpočty hlavních součástí motoru.

Hlavní část práce se zabývá vytvořením 3D CAD modelu spalovacího motoru. Jednotlivé díly byly zkonstruovány na základě výsledků výpočtů a simulací. Konstrukce vybraných součástí je následně podrobena analýze pomocí metody konečných prvků.

2 Problematika hybridních pohonů

Emisní, a především CO₂ limity, se v EU od 90. let v pravidelných intervalech neustále snižují. Tím je na výrobce spalovacích agregátů neustále zvyšován tlak na to, aby věnovali velké množství svých zdrojů zejména na snižování nežádoucích exhalovaných plynů a spotřeby paliva automobilů. Limity naplánované na rok 2020 se blíží fyzikální hranici maximální účinnosti spalovacího motoru (spotřeba paliva 4l/100 km pro zážehové motory a 3,6 l/100 km pro vznětové motory). Výrobci automobilů proto musí hledat cestu v hybridizaci spalovacích pohonů vozidel, případně použití elektromobilů namísto klasického pohonu vozu.

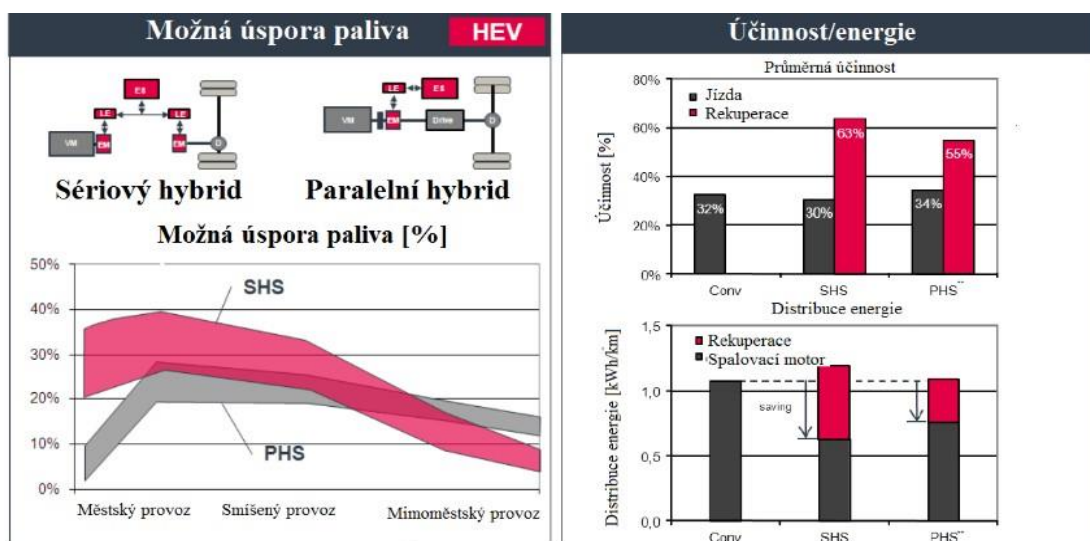
Jednotlivé typy vozidel na trhu

Různé typy elektrifikace a jejich vliv na redukci CO₂



Obrázek 1: Závislost úspory paliva na stupni elektrifikace vozu

Vzhledem k tomu, že cena Li-ion baterií neumožňuje snížení ceny vozů typu BEV a PHEV v příštích několika letech, je jednou z možností výrobců, jak splnit přísné CO₂ limity, produkce hybridních vozidel. Porovnáním hlavních konceptů hybridních vozidel, tedy sériového a paralelního typu hybridu (Obrázek 2), lze hledat další cestu vývoje právě v sériovém typu hybridu, který přináší výraznější úsporu paliva, zejména v městském provozu. Diplomová práce se zabývá právě koncepčním návrhem spalovacího motoru, který by se mohl použít u hybridního vozidla v sériovém provedení, popř. v elektromobilu jako range extender.



Obrázek 2: Porovnání sériového a paralelního typu hybridního vozidla

3 Návrh spalovacího motoru

Cílem práce je vytvořit koncepční návrh dvouválcového motoru o minimálním výkonu 45 kW při $6\,000\text{ min}^{-1}$, který je určen pro použití v hybridním vozidle. Z výše zmíněných důvodů bylo vybráno použití motoru v sériovém typu hybridu (HEV, případě BEV). Motor určený pro použití v tomto typu vozidla pracuje v předem daných režimech, na které je možné motor přímo optimalizovat a zvýšit tak jeho účinnost a udržet minimální spotřebu paliva při zachování nízkých výrobních nákladech. Výstup práce je ve fázi finálního koncepčního návrhu motoru, tedy ve stavu představitelném zákazníkovi.

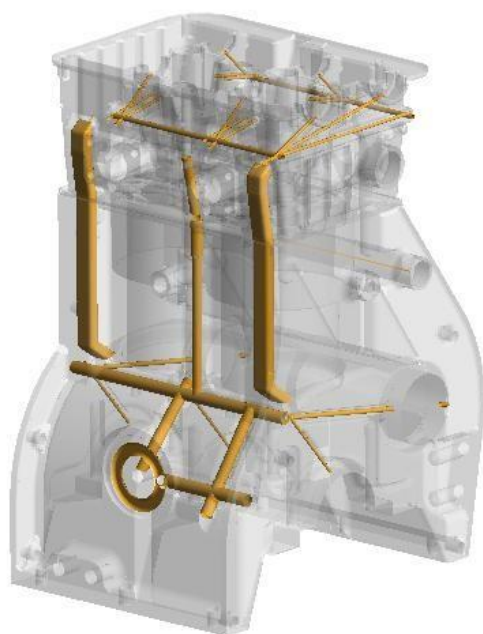
3.1 Koncepční návrh motoru

Spalovací motor je koncipován jako řadový dvouválec se souběžnými písty. Vzhledem k požadavku vysokého minimálního výkonu je motor navržen jako přeplňovaný. Motor bude pracovat v ustálených režimech, kdy bude dobíjet baterie vozu – sériového hybridu. Prvním režimem je režim minimální spotřeby paliva, tedy chod motoru při $3\,500\text{ min}^{-1}$. Druhým režimem je režim maximálního výkonu, tedy chod při $6\,000\text{ min}^{-1}$.

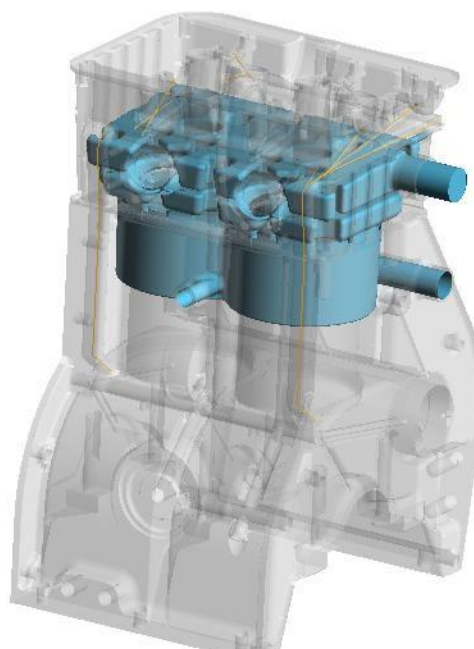
3.2 Mazací a chladicí soustavy

Navržený spalovací motor má standardní koncepci mazací soustavy. Motor využívá chlazení pístů ostřikem jejich dna. Aby bylo zajištěné dostatečné ochlazení oleje, je soustava vybavena tepelným výměníkem. Ten je umístěn přímo pod olejovým filtrem.

Motor je chlazen kapalinou, k jejímuž oběhu využívá čerpadlo s vnitřním ozubením, poháněné přímo vyvažovací hřídelí. Chlazení je navrženo dle současného trendu konstrukce spalovacích motorů. Vodní prostor v hlavě motoru je rozdělen na dvě části, vrchní část funguje především jako ustalovací komora. Odtud následně proudí kapalina okolo zapalovacích svíček do spodního prostoru.



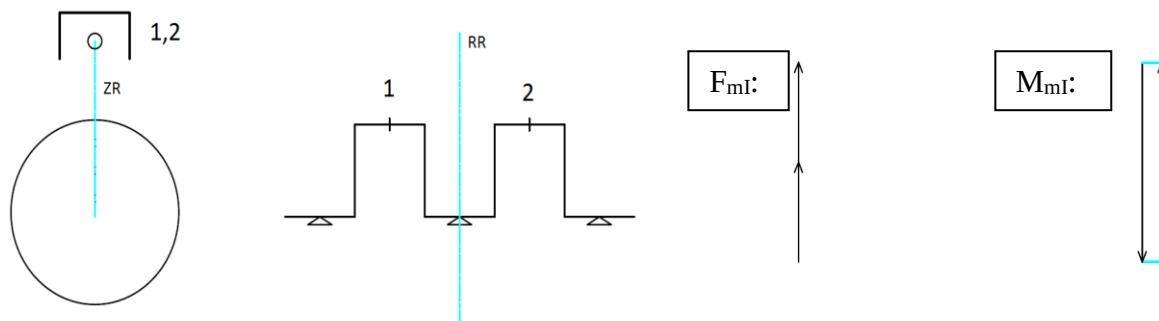
Obrázek 3: Mazací schéma motoru



Obrázek 4: Chladicí schéma motoru

3.4 Vyvážení motoru

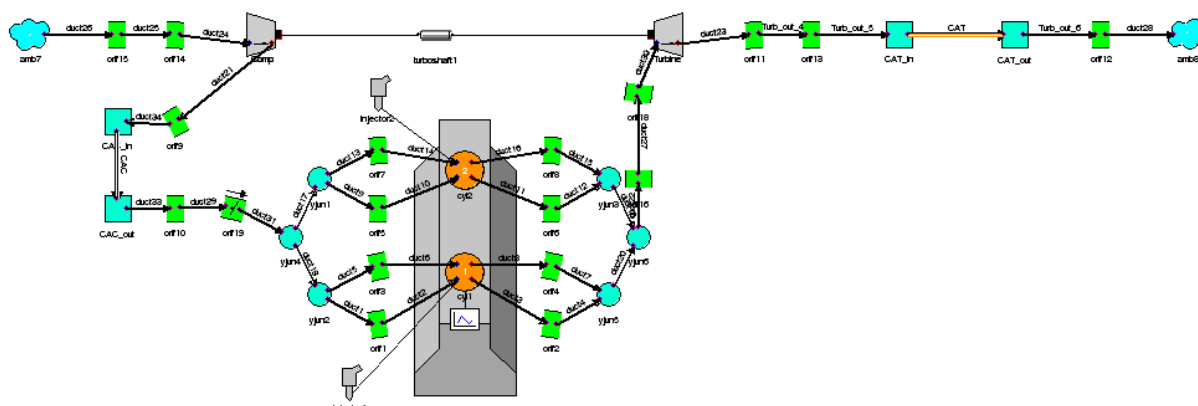
Vzhledem ke zvolení koncepce souběžných pístů je spalovací motor nevyvážen setrvačnými silami prvního a druhého řádu. Z hlediska klidného chodu motoru a z hlediska akustických projevů motoru bylo motoru provedeno vyvážení setrvačných sil na 100 % pomocí vyvažovací hřídele s rozložením vyvažovacích hmot 50:50.



Obrázek 5: Nevyváženost motoru od setrvačných účinků posuvných hmot prvního řádu

3.4 Simulace spalovacího motoru

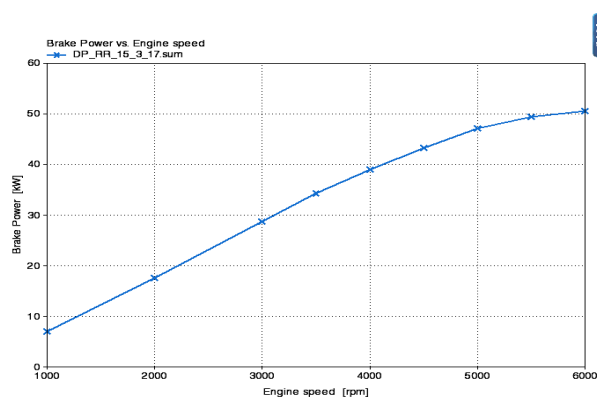
Simulační návrh motoru byl vytvořen v softwaru Ricardo Wave. Při návrhu motoru bylo navrženo několik variant, které ovšem nesplnily jeden nebo více parametrů na požadavky koncepce.



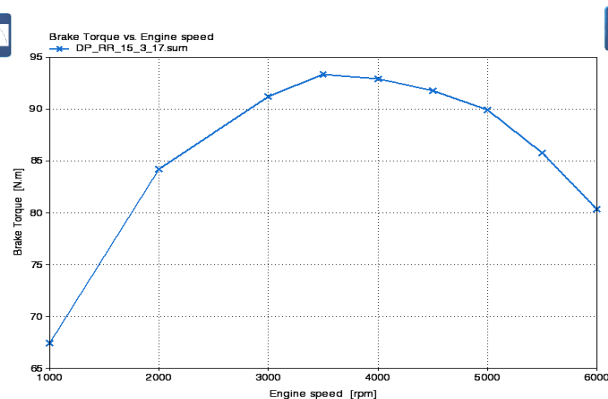
Obrázek 6: Simulační schéma motoru

Tabulka 1: Výsledné parametry třetího návrhu motoru

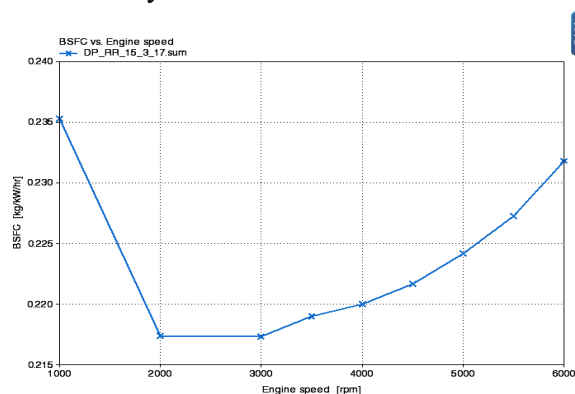
Měrná spotřeba paliva při 3 500 min ⁻¹	m _{pe}	219	g/kWh
Celkový výkon motoru při 3 500 min ⁻¹	P	36	kW
Točivý moment motoru při 3 500 min ⁻¹	Mt	93,5	Nm
Měrná spotřeba paliva při 6 000 min ⁻¹	m _{pe}	232	g/kWh
Celkový výkon motoru při 6 000 min ⁻¹	P	50	kW
Točivý moment motoru při 6 000 min ⁻¹	Mt	80	Nm



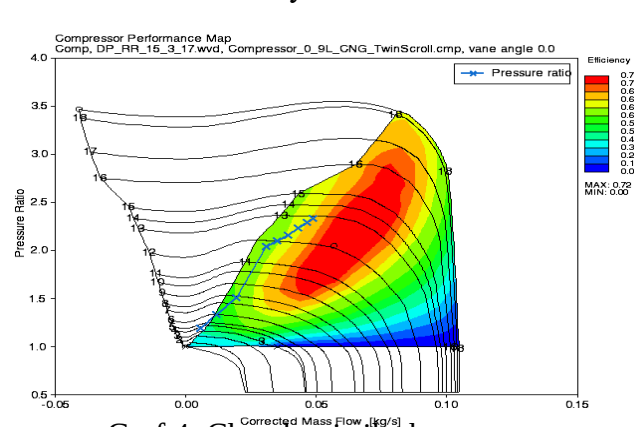
Graf 1 : Výkon motoru



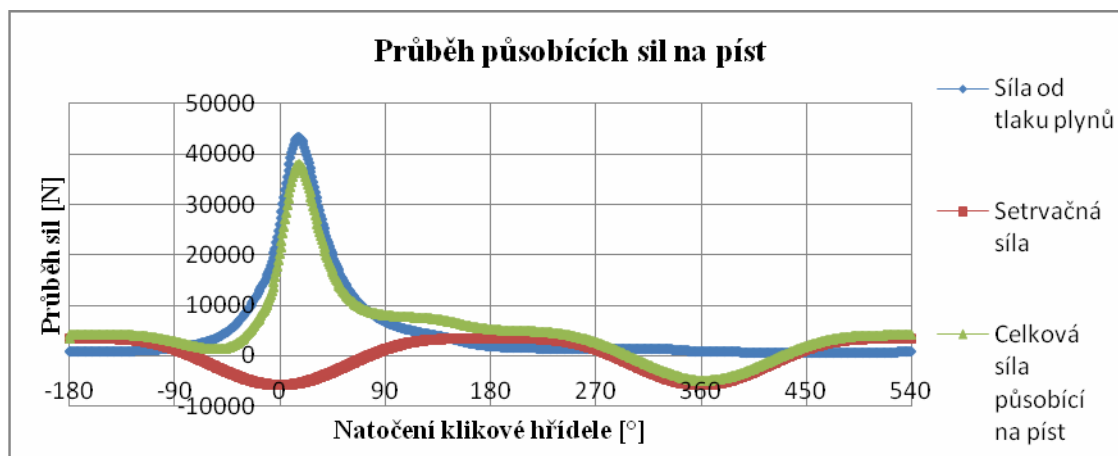
Graf 2 : Točivý moment motoru



Graf 3: Měrná spotřeba paliva motoru



Graf 4: Charakteristika kompresoru



Graf 5 : Průběh působících sil na píst

Z hodnot získaných pomocí simulace v softwaru Wave byly následně provedeny zjednodušené návrhové výpočty jednotlivých komponentů motoru, na jejichž základě byly tyto součásti následně zkonstruovány v softwaru Creo parametric 2.0.

4 Konstrukce motoru

4.1 Ojnice

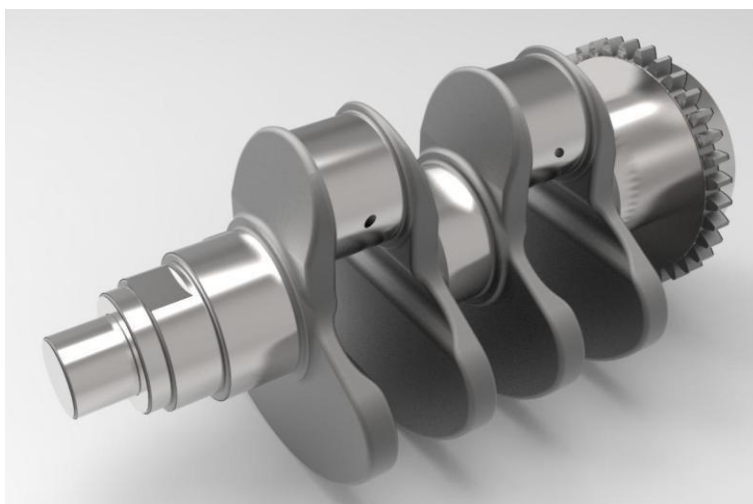
Rozměry ojnice jsou definovány především klikovým poměrem a rozložením hmoty ojnice. Rozměry ok byly dány návrhovými výpočty pístního čepu a ojničního čepu na klikové hřídeli. Po prvotním návrhu byla na ojnici provedena pevnostní a deformační analýza pomocí MKP. Celkový návrh ojnice byl proveden tak, aby montáž a demontáž ojnice mohla proběhnout jejím protáhnutím válcem motoru. Což značně usnadňuje montáž.



Obrázek 7: Sestava ojnice

4.2 Kliková hřídel

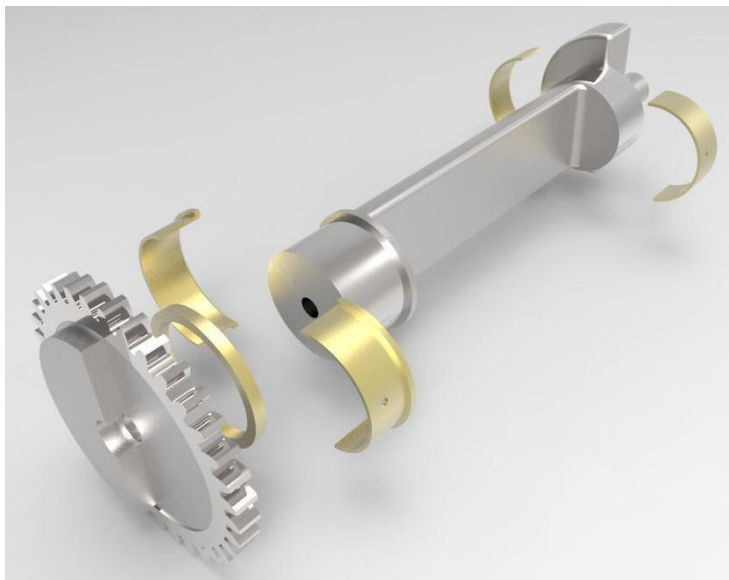
Hlavní rozměry klikové hřídele vycházejí z výpočtu provedeného v rámci diplomové práce. Axiální zajištění je provedeno na prostředním čepu. Vedení oleje k ojnicím je provedeno provrtáním krajních čepů skrze ramena doprostřed ojničních čepů. Kliková hřídel slouží zároveň jako pohon pro vyvažovací hřídel, proto na straně příruby setrvačníku je tedy obrobena ozubená kola. Na druhé straně je následně hřídel použita pro pohon olejového čerpadla což výrazně zmenší zástavbový prostor motoru.



Obrázek 8: Kliková hřídel

4.3 Vyvažovací hřídel

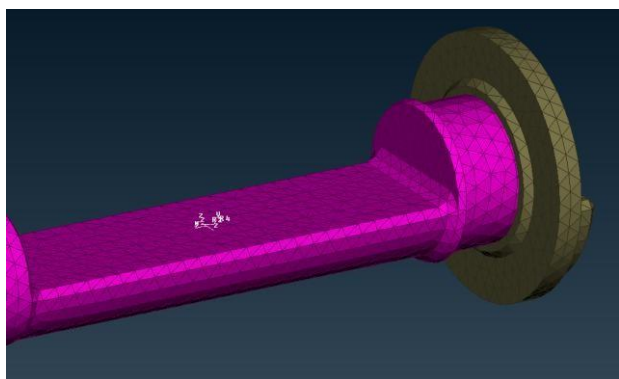
Jak bylo zmíněno výše, při použití koncepce souběžných pístů v motoru je vhodné použít vyvažovací hřídel, která minimalizuje vliv setrvačných sil od posuvných hmot prvního řádu. Vyvažovací hřídel je poháněna ozubeným kolem přímo z klikové hřídele (převodový poměr 1:1). Kvůli snazší montáži je hřídel skládaný ze dvou částí, které jsou vzájemně sešroubovány. Uložení hřídele je realizováno kluznými ložisky.



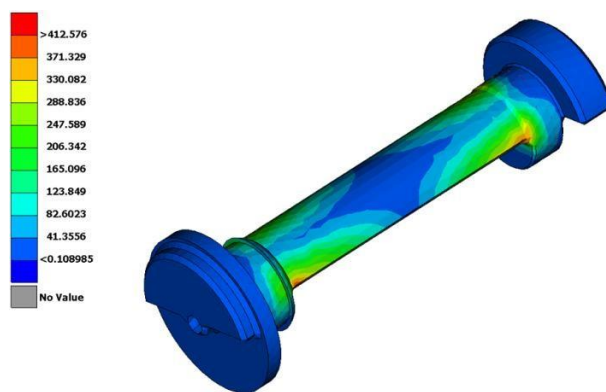
Obrázek 9: Sestava vyvažovací hřídele

4.3.1 Pevnostní kontrola vyvažovací hřídele

Vyvažovací hřídel je namáhán odstředivou silou od rotace hřídele (6000 min^{-1}) a krouticím momentem ($1,5 \text{ Nm}$) přiváděným na vyvažovací hřídel ozubeným kolem a odváděným drážkováním na vodní čerpadlo. Zátěž krouticím momentem lze v tomto případě oproti účinku odstředivé síly zanedbat. Důsledkem rotace, a tedy působením odstředivé síly, jsou průhyb a ohybové kmity hřídele. Z hlediska funkce tedy bylo nutné zjistit i vlastní frekvence hřídele.



Obrázek 10: Sít' elementů vytvořena pro FEM analýzu



Obrázek 11: Napětí vyvažovacího hřídele

K vyšetření namáhání vyvažovací hřídele bylo přistoupeno dvěma způsoby. Nejprve byla provedena modální analýza pro vyšetření vlastních frekvencí a tvarů, poté byl proveden výpočet implicitní dynamiky, v kterém byl vyšetřen vliv odstředivé síly na pevnost hřídele.

Tabulka 2 : Vlastní frekvence vyvažovací hřídele

MODE NO	EIGENVALUE	E I G E N V A L U E		O U T P U T	
		FREQUENCY (RAD/TIME)	FREQUENCY (CYCLES/TIME)	GENERALIZED MASS	COMPOSITE MODAL DAMPING
1	7641.3	87.415	13.912	1.0000	0.0000
2	2.95501E+08	17190.	2735.9	1.0000	0.0000
3	8.52415E+08	29196.	4646.7	1.0000	0.0000
4	1.25909E+09	35484.	5647.4	1.0000	0.0000
5	1.87644E+09	43318.	6894.3	1.0000	0.0000

V tabulce 2 jsou uvedeny výsledné vlastní frekvence hřídele. Hřídel pracuje při 6000 min^{-1} , což je rovno 628 rad/s (při 3000 min^{-1} 314 Rad/s). Nejbližšími hodnotami jsou první a druhá vlastní frekvence hřídele. Ty jsou však výrazně jiné než frekvence provozní. V praxi je nicméně vyvažovací hřídel navíc často tlumen pomocí připojení přidavného odběru výkonu (nejčastěji vodní nebo olejové čerpadlo), což bylo využito i v diplomové práci.

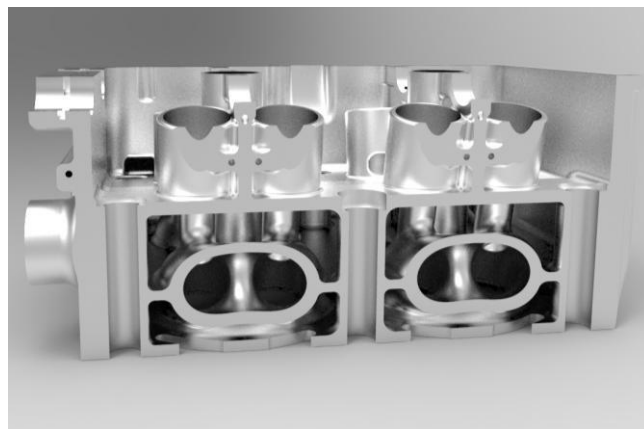
Z výsledků FEM analýzy (Obrázek 11) vyplývá, že špička napětí se soustřeďuje v oblasti počátku zúžení hřídele. V tomto místě je napětí (von Mises) rovno 412 Mpa , tato hodnota je rovna zhruba $2/3$ meze kluzu nevrženého materiálu (42CrMo4).

4.4 Hlava válců

Hlava válců je hliníkový odlitek (materiálem slitina je AlSi10Mg(Cu)). Výroba je provedena vysokotlakým litím. Jedná se o progresivní metodu, která umožňuje vyrábět součásti s velice malou tloušťkou stěn (až 3 mm).



Obrázek 12: Hlava spalovacího motoru



Obrázek 13: Řez hlavou motoru

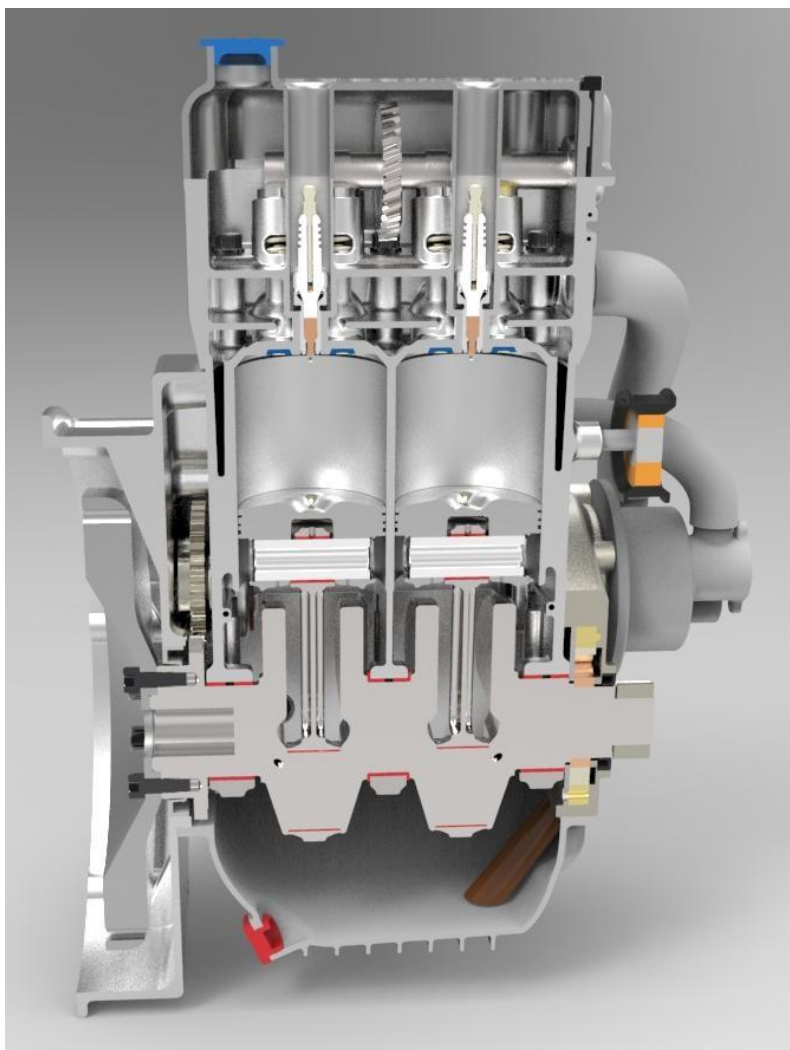
4.5 Vrcholná sestava motoru



Obrázek 14: Sestava hlavy válců



Obrázek 15: Sestava rozvodů motoru



Obrázek 16 : Řez celou sestavou motoru

5 Závěr

Výsledkem práce je koncepční návrh spalovacího motoru určeného k pohonu sériového hybridního vozidla nebo jako range extender. V rámci diplomové práce byla vytvořena kompletní simulace motoru v softwaru Ricardo Wave, která poskytla poměrně přesné výsledky vlastností finálního motoru. Před konstrukcí součástí spalovacího motoru byly provedeny návrhové výpočty pro ojnici, pístní čep, klikovou hřídel, vyvážení motoru, klopný moment motoru a velikost setrvačniku. Následně byla provedena MKP analýza vybraných součástí, a to analýza vyvažovací hřídele a analýza ojnice.

Koncept slouží jako základ k následným simulačním modelům (tepelné analýzy, analýzy proudění, deformační analýzy pístové skupiny, hlavy a bloku motoru), na jejichž základě bude model optimalizován a následně použit jako technologický demonstrátor tohoto typu pohonu.

Literatura

- [1] RYBÁČEK, R. *Projekční návrh spalovacího motoru pro hybridní vozidlo.*, Diplomová práce, Katedra vozidel a motorů, Fakulta strojní, Technická univerzita v Liberci,
- [2] Alternative fuel vehicle registrations: +37.6% in first quarter of 2017 | ACEA - European Automobile Manufacturers' Association. *ACEA - European Automobile Manufacturers' Association* [online]. Copyright © 2017 ACEA [cit. 10.05.2017]. Dostupné z: <http://www.acea.be/press-releases/article/alternative-fuel-vehicle-registrations-37.6-in-first-quarter-of-2017>
- [3] Schöppe D., Zhang H., Rösel G., Achtleitner E., Kapphan F., Dupont H. *Next Generation Engine Management Systems for Gasoline Direct Injection*. Vienna motor symposium 2013.
- [4] Yole development at CAR-ELE Japan Tokyo. *What does future of automotive market hold?* [Online] 2016. [Citace: 05. 02 2017.] Dostupné z: http://www.slideshare.net/Yole_Developpement/what-does-the-future-of-automotive-market-hold-2016-presentation-yole-developpement-at-carele-japan-tokyo.
- [5] FILIPI Zohar, JUNG Dohoy, HOFFMAN, Mark. *Engine Thermal Management*. John Wiley & Sons, Ltd, 2014. 9781118354179.
- [6] WEINOWSKI, Rolf, WITTEK, Karsten, HAAKE, Bernd, DIETERICH, Carsten, SIEBEL, Jörg, SCHWADERLAPP, Markus. *CO2-Potenzial eines zweistufigen VCR-Systems in Kombination mit zukünftigen ottomotorischen Antriebskonzepten*. 33. Internationales Wiener Motorensymposium , 2012.
- [7] SCHOLZ, Celestýn, BRABEC, Pavel. *Konstrukční projekt pístového spalovacího motoru*. Liberec : Technická univerzita Liberec, 2015. 978-80-7494-201-3.
- [8] GANGOPADHYAY, A. MCWATT, D.G., ZDRODOWSKI, R.J. *Engine friction Reduction through surface finish and rating. Ford research and advanced engineering Dearborn*. Deer Conferenc , 2010.

Numerický model mikropumpy

Tisovský Tomáš

Sekce - STROJNÍ,

Fakulta textilní, 2. ročník

Doktorský studijní program – APLIKOVANÁ MECHANIKA – MECHANIKA TEKUTIN

Abstrakt: Miniaturizace konvenčních zařízení na urychlení představuje problém jak z hlediska konstrukce, tak i z hlediska účinnosti. Princip funkce tzv. mikropump, tedy zařízení umožňujících pumpování tekutin, jejichž charakteristické rozměry jsou v řádu mikrometrů, je fundamentálně odlišný od principu funkce konvenčních, často lopatkových, zařízení. V uvedené práci je představen numerický model membránové mikropumpy zpracovaný v programu Fluent.

Klíčová slova: mikropumpa, numerická simulace

1 Návrh mikropumpy

1.1 Rozdělení mikropump

Na základě kategorizace mikropump představené v práci [1] byl vytvořen český ekvivalent tohoto dělení. Zároveň byl výčet vhodně upraven vzhledem k tématu práce.

Tabulka 1: Rozdělení mikropump

Objemové	Dynamické
s vratným pohybem	odstředivé
membránové	elektrohydrodynamické
rotační	elektroosmotické
aperiodické	magnetohydrodynamické
pneumatické	
se změnou fáze	
tepelné	
tektrochemické	
elektrosmáčivé/termokapilární	

Membránové mikropumpy lze dále dělit dle následující tabulky.

Tabulka 2: Membránové mikropumpy

Membránové mikropumpy	
	dle typu pohonu
	piezoelektrické
	termopneumatické
	elektrostatické
	pneumatické
dle typu ventilu	tryska/difuzor
	pouze difuzor
dle typu komory	jedna komora
	více komor – v sérii
	více komor - paralelně

1.2 Membránové mikropumpy

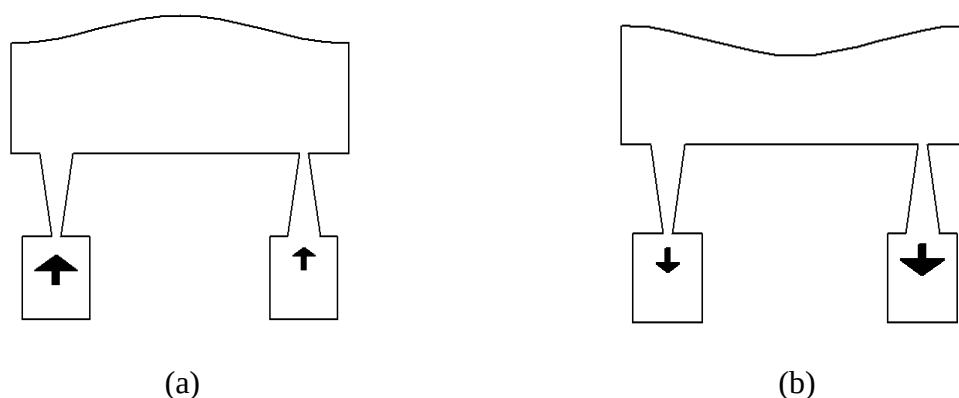
Většina mikropump, kde je pracovní látka rozpohybována vratným pohybem hnacího prvku, jsou mikropumpy membránové. Běžně je membrána upevněna na svém obvodu a uzavírá komoru vyplněnou pracovní látkou. Během provozu membrána kmitá, čímž střídavě zvětšuje a zmenšuje objem vzduchu v komoře. Pohyb membrány je tradičně vyvozen piezoelektricky, ačkoli byly navrženy membránové mikropumpy s membránami hnanými i jinými způsoby, například elektrostaticky nebo pneumaticky.

Laser a Santiago uvádí [1], že hlavními parametry ovlivňujícími průtok V a tlak p_V na výstupu z mikropumpy jsou:

- rozdíl mezi maximálním a minimálním objemem vzduchu v komoře pumpy v průběhu periody kmitání membrány
- minimální objem vzduchu uzavřený mezi vstupem a výstupem z pumpy v průběhu periody kmitání membrány
- frekvence kmitání membrány

Do roku 2002 byla představena řada vzduchových mikropump hnaných periodickým pohybem membrány, zejména:

V roce 1993 navrhli E. Stemme a G. Stemme bezventilovou mikropumpu poháněnou piezoelektricky rozkmitávanou membránou. [2] Schéma této mikropumpy je na obrázku 1.



Obrázek 1: Schéma mikropumpy podle (Stemme): a) sací stupeň a b) výtlačný stupeň

V sacím stupni je membrána vychýlena nahoru, což způsobí pokles tlaku v komoře mikropumpy a vzduch je vháněn do komory skrze připojený difuzor (na obrázku 1a a 1b vlevo) a trysku (na obrázku 1a a 1b vpravo). V sacím stupni je tlaková ztráta v trysce větší než v difuzoru a více vzduchu proudí do komory skrze difuzor. Ve výtlačném režimu je situace obrácená, v komoře vznikne vyšší tlak než v okolí a vzduch proudí pryč z komory. Větší tlaková ztráta difuzoru má nyní za následek větší hmotnostní tok tryskou. Výsledkem je nenulový průměrný tok (za jednu periodu pohybu membrány) vzduchu mikropumpou.

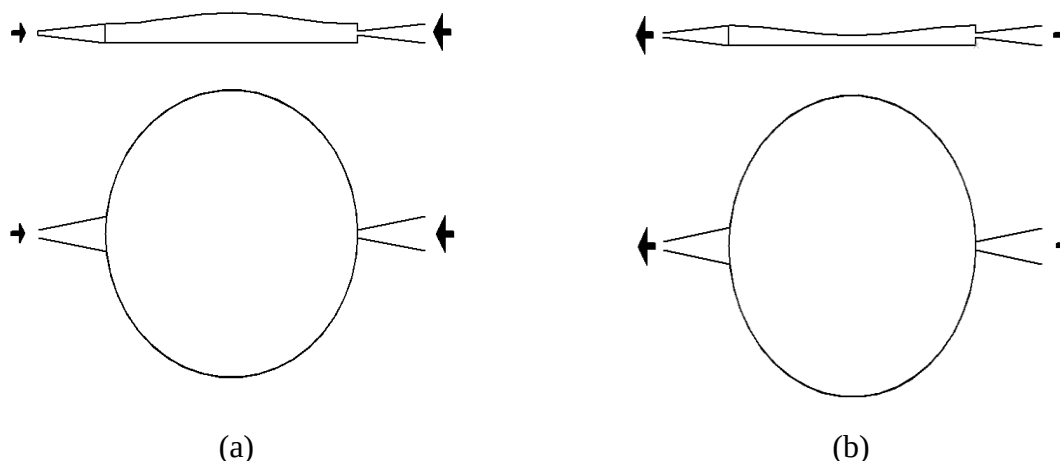
Mikropumpa na základě návrhu A. Stemme a G. Stemme může však pracovat i “opačně“. T. Staley a kol. navrhli ve své práci mikropumpu [3], jež je konstrukčně stejná jako mikropumpa v navržena v práci [2], avšak pracuje na fundamentálně odlišném principu, což jí činí vhodnou v aplikacích zabývajících se chlazením mikroelektronických zařízení. Namísto využití

závislosti tlakové ztráty v difuzoru/trysce na směru proudění je zde využit známý jev, kdy je místo o nejmenším efektivním průřezu proudu protékajícího skrze náhlé zúžení lokalizováno v určité vzdálenosti za zmíněným náhlým zúžením (ve směru proudu). Tento jev je v literatuře označován vena contracta.

Autorovým cílem je reprodukovat chování mikropumpy pracující na principu vena contracta a následně určit její optimální parametry (zejména z hlediska rozměrů).

1.3 Geometrie zařízení

Schéma navrženého zařízení je na obrázku 2.



Obrázek 2: Schéma navrženého zařízení: a) sací stupeň a b) výtlačný stupeň

V této práci bude jako tryska označován kanál, který je konvergentní ve směru od středu komory mikropumpy. Uvedené pojmenování se liší od toho, jež je používáno při popisu mikropumpy, kterou navrhli A. Stemme a G. Stemme.

Průměr komory je $D=10$ mm, výška komory je $h=1$ mm a vrcholový úhel difuzoru a trysky je $\theta=20^\circ$. Délka difuzoru a délka trysky je $l=3$ mm.

Rozměrově patří navržené zařízení mezi mikropumpy. Zároveň jsou ale tyto rozměry dostatečně velké tak, aby mohl být pumpovaný vzduch modelován jako kontinuum. [4] Stupeň zředění plynu je dán Knudsenovým číslem definovaným jako

$$Kn = \frac{\lambda}{L}, \quad (1)$$

kde λ je střední volná dráha molekul daného plynu (pro vzduch při standardních podmínkách je to zhruba 70 nm) a L je charakteristický rozměr problému. A hypotéza kontinua platí pro $Kn < 0.001$, což je splněno pro v této práci řešený problém.

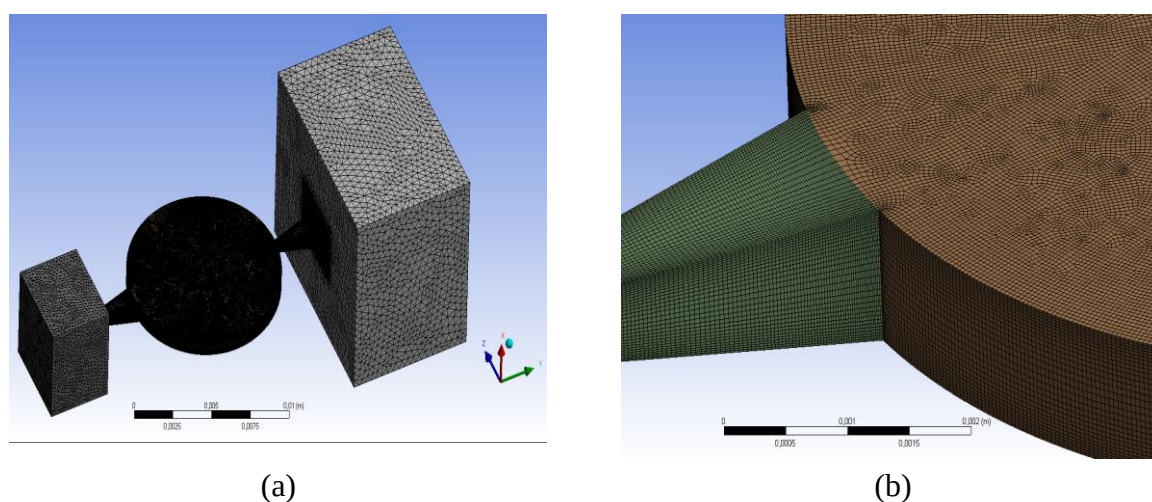
Střed souřadného systému byl zvolen ve středu válcové komory mikropumpy.

2 Matematický model

2.1 Výpočetní síť

Vzhledem k symetrii geometrie mikropumpy se nabízí možnost numericky modelovat pouze její polovinu a na dělicí rovinu předepsat podmínku symetrie, což je možné pouze tehdy, je-li symetrické i proudové pole. Symetrii proudového pole lze předpokládat v případě, kdy je proudění laminární a kdy zároveň rovina symetrie nedělí vír. Platnost těchto předpokladů lze ověřit simulací na úplné geometrii, což bylo provedeno. Ukáže-li se, že proudové pole je symetrické vzhledem k rovině, která je kolmá na plochu membrány a paralelní vzhledem ke směrovému vektoru pohybu membrány, bude v budoucnu dostatečné řešit rovnice proudění na poloviční doméně.

Výpočetní síť je zobrazena na obrázku 3.



Obrázek 3: Výpočetní síť a) celková a b) detail trysky

2.2 Generování sítě

Výpočetní síť byla vygenerována v programu Ansys Meshing. Pro účely předepsání pohybu vnitřních uzlů v komoře pumpy a ve snaze dosáhnout co nejlepší kvality sítě byla výpočetní geometrie rozdělena na osm oddělených částí, přičemž jednotlivé elementy sítě na rozhraní mezi jednotlivými částmi geometrie mají shodné stěny patřící přilehlému rozhraní. V opačném případě by vznikala chyba vlivem interpolace mezi elementy sousedícími s rozhraními.

Síť na oblastech komory mikropumpy a trysky a difuzoru byla generována s využitím Sweep method (z dolní podstavy válcové komory na dolní) s celkem 32 děleními a s vhodným zjemněním u stěn. Dále bylo nastaveno množství Edge sizing na hranách trysky a difuzoru rovnoběžných s rovinou plochy podstavy komory mikropumpy. Cílem bylo vymodelovat na trysce a difuzoru dostatečně jemnou síť s přijatelným zjemněním u stěn.

Kvalita sítě byla vyhodnocena v programu Ansys Meshing. Hodnoty vybraných parametrů pro nejhorší elementy sítě jsou následující:

Tabulka 3: Kvalita sítě

	nejhorší element	průměr	směrodatná odchylka
Aspect ratio	18.7	1.8	0.5
Skewness	0.924	0.177	0.133
Orthogonal Quality	0.128	0.917	0.092

Indikátor Element quality dosáhl minimální hodnoty 0.12.

Počet elementů sítě dosáhl bezmála 4 milionů.

2.3 Rovnice popisující proudění

Vzduch v mikropumpě je popsán modelem ideálního plynu. Bilanční rovnice proudění jsou tedy rovnice pro stlačitelnou tekutinu a modelované proudění je neizotermní.

Reynoldsovo číslo je dáno

$$Re = \frac{vL\rho}{\mu}. \quad (2)$$

Maximální rychlost dosažená v trysce je zhruba 25 m/s. Při charakteristickém rozměru 0.4 mm (jedna strana čtvercového průřezu trysky v jejím nejužším místě) a při kinematické viskozitě vzduchu odpovídající podmínkám v trysce je Reynoldsovo číslo zhruba 660. Pro proudění v trubce je kritické Reynoldsovo číslo 2300. Lze tedy předpokládat laminární proudění. Tento předpoklad je však vhodné ověřit experimentálně.

Rovnice kontinuity, rovnice balance hybnosti a energetická rovnice spolu se stavovou rovnicí ideálního plynu tvoří systém 6 sdružených skalárních parciálních diferenciálních rovnic se 6 neznámými. Neznámé veličiny v tomto případě jsou: vector rychlosti $\mathbf{v}$, měrná energie e a tlak p . Výše zmíněné rovnice jsou [5]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho e) + \nabla \cdot [\mathbf{v}(\rho e + p)] = \nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} \mathbf{v}), \quad (5)$$

$$\rho = \frac{p}{r_{\text{air}} T}, \quad (6)$$

$$e = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}, \quad (7)$$

$$h = c_p T, \quad (8)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \left[(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{v} \mathbf{I} \right] + \lambda \nabla \cdot \mathbf{v} \mathbf{I}. \quad (9)$$

Rovnice (3) až (9) spolu s vhodnými okrajovými podmínkami dávají řešitelný problem.

2.4 Okrajové podmínky

V případě stěn mikropumpy, včetně membrány, byla použita podmínka nulové rychlosti na stěnách.

Za ústími trysky a difuzoru do okolí byla vymodelována část tohoto okolí ve formě hranolů, na jejichž stěnách byly předepsány podmínky typu pressure-outlet. Vzhledem k tomu, že vzduch může téci jak z okolí do domény, tak i z domény do okolí, a to v závislosti na fázi pohybu membrány, je zde podstatná schopnost podmínky pressure-outlet modelovat zpětný tok do domény. Na obrázku 4 jsou šedě vyznačeny pevné stěny, zeleně membrána (což je

vlastně pohybující se pevná stěna) a modře jsou vyznačeny plochy, na nichž je předepsána tlaková výstupní podmínka.

Aby se omezil vliv okrajových podmínek, je vhodné vymodelovat poměrně rozsáhlou oblast okolí ústí trysky a difuzoru. V předkládané práci jsou výška a šíře okolí ústí trysky 10x větší než odpovídající rozměr ústí trysky. Okolí ústí difuzoru bylo patřičně zvětšeno s ohledem na větší šíři ústí difuzoru oproti trysce.

Průhyb membrány je simulován pomocí funkce *Dynamic mesh* v programu Ansys Fluent 17.0. Pohyb každého bodu membrány (horní podstava komory mikropumpy) je předepsán funkcí

$$z = \frac{h}{2} + \left[z_1 \cos \left(\pi \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{D} \right) \sin(2\pi ft) \right], \quad (10)$$

kde z_1 je maximální průhyb membrány a jeho hodnota je **0,1 mm**. Pohyb membrány předepsaný vztahem (10) je do Fluentu implementován skrze uživatelsky definovanou funkci (UDF).

Aby byla zabezpečena co největší kontrola přesít'ování vnitřních uzlů sítě v oblasti komory mikropumpy, je všem těmto uzlům předepsán pohyb dle následujícího vztahu

$$z = z_0 + \left(\frac{z_0 + \frac{h}{2}}{h} \right) * \left[z_1 \cos \left(\pi \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{D} \right) \sin(2\pi ft) \right]. \quad (11)$$

Tato volba zajišťuje zachování dobré kvality jednotlivých elementů sítě a zároveň udržuje kvalitní mezní vrstvy při stěnách (viz níže). Konstanta z_0 je pole hodnot souřadnic výšky všech vnitřních uzlů komory mikropumpy ve výchozím stavu. Pro tyto hodnoty musí být na začátku výpočtu alokovaná paměť pomocí uživatelsky definované paměti (UDM).

Bylo zjištěno, že vychýlení uzlů sítě je natolik malé, že má zanedbatelný vliv na celkovou kvalitu sítě. Nejhorší kvality sítě bylo dosaženo v horní poloze membrány, kdy jediným parametrem, jež se globálně zhoršil, bylo Maximum aspect ratio. Nárůst v této hodnotě bylo však pouze 1% oproti původní nejvyšší hodnotě.

2.5 Diskretizace rovnic

Ve výpočtu byla využita diskretizační schémata podle tabulky 4.

Tabulka 4: Diskretizační schémata

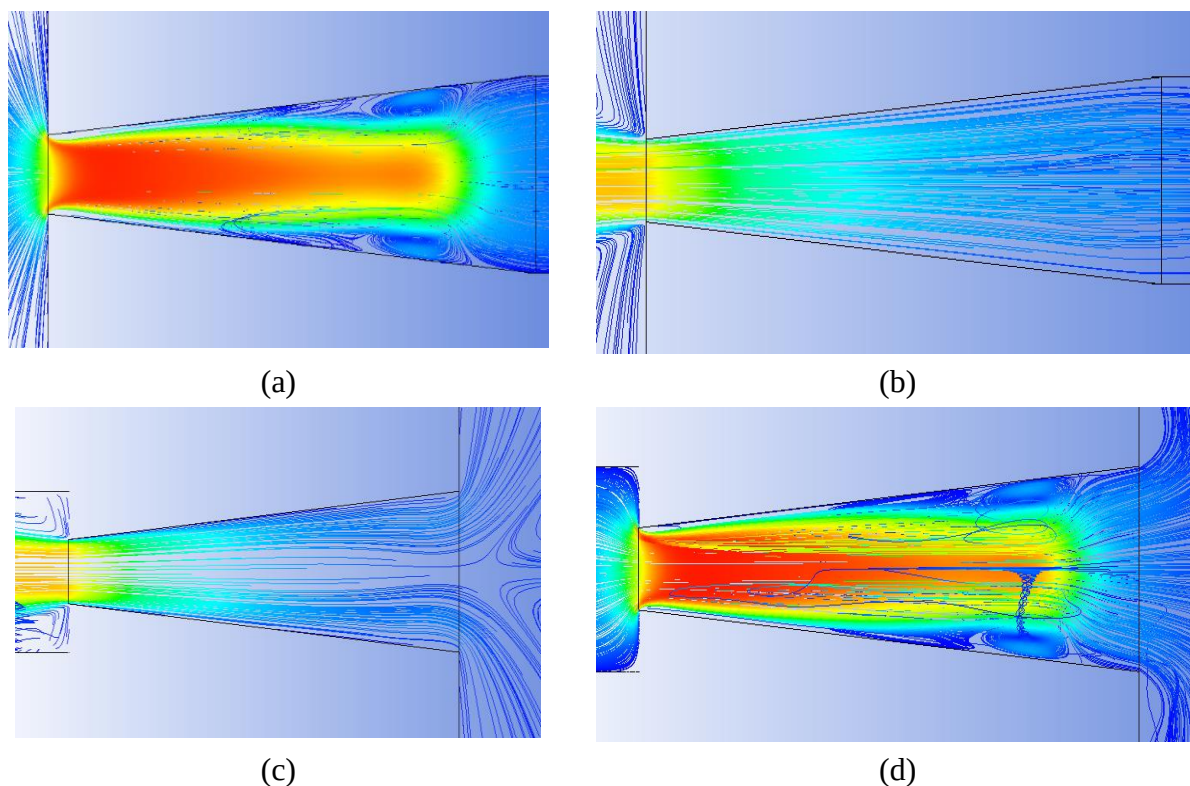
Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	Second Order
Density	Second Order Upwind
Momentum	Second Order Upwind
Energy	Second Order Upwind
Time	First Order Implicit

Pole počítaných veličin jsou vyhodnocována je druhém řádu přesnosti. Upwind interpolace zajišťuje omezenost řešení, avšak tato schémata jsou numericky difuzivní. [6]

Tlaková a rychlostní pole byla řešena společně pomocí algoritmu PISO. [7]

3 Vyhodnocení výsledků

Pole počítaných veličin jsou vyhodnocována je druhém řádu přesnosti. Upwind interpolace zajišťuje omezenost řešení, avšak tato schemata jsou numericky difuzivní. [6]



Obrázek 4: Proudnic v okolí zúžení trysky/difuzoru a) sací stupeň – tryska, b) výtlačný stupeň – tryska, c) sací stupeň – difuzor, d) výtlačný stupeň - difuzor

Na obrázku 4 jsou zobrazeny proudnice v momentech, kdy je rychlost pohybu membrány maximální a to jak v případě, kdy se membrána pohybuje nahoru (sací stupeň – 4a a 4c), tak i v případě, kdy se pohybuje dolů (výtlačný stupeň – 4b a 4d). Komora mikropumpy je na obrázcích 4a a 4b (tryska) vpravo a na obrázcích 4c a 4d vpravo. Proudí-li vzduch ve směru rozšiřujícího se kanálu (tj. difuzorem dle klasické konvence), vznikají u stěn kanálu vírové struktury. Zúžení proudu, neboli Vena Contracta, je patrné ve všech případech mimo případu, kdy je tryska ve výtlačku (obrázek 4b). Ukazuje se, že při daných parametrech je v sacím stupni dosaženo v trysce vyšší rychlosti než v difuzoru a zároveň je při výtlačném stupni dosaženo v difuzoru dosaženo vyšší rychlosti než v trysce.

Víry vznikající v trysce a difuzoru představují tlakovou ztrátu a je příhodné jejich vzniku zamezit, například snížením úhlu difuzoru/trysky.

Průměrná rychlost vzduchu, který tiskou proteče za jednu periodu kmitavého pohybu membrány je 0.3 m/s a proteče ve směru difuzor-komora-tryska. Princip *vena contracta* má tedy v tomto konkrétním případě větší efekt než nárůst tlakové ztráty ve směru proudění konvergentním kanálem.

Maximální rychlost v trysce ve směru difuzor-komora-tryska je 17.35 m/s a v opačném směru je maximální rychlost 17.3 m/s .

Lze tedy říci, že geometrie mikropumpy není z hlediska její funkčnosti zvolena vhodně. S pomocí vytvořeného modelu lze však již poměrně jednoduše provést parametrickou analýzu, jež je schopna pomoci při návrhu zařízení s optimálními parametry.

Vzhledem k získaným výsledkům je vhodnou úpravou snížení úhlů trysky a difuzoru tak, aby měli v konvergentním směru proudu nižší tlakovou ztrátu. Tím bude umocněn dominantní vliv efektu *vena contracta*.

4 Závěr

V rámci práce byl sestaven funkční numerický model mikropumpy daných rozměrů. Hlavním přínos práce spočítá v efektivním řešení dynamické sítě v souladu s požadavkem zachování co možná nejvyšší kvality sítě v průběhu výpočtu.

Dalším krokem v této práci bude analýza vlivu geometrie mikropumpy na její nejdůležitější charakteristiky, tj. tlak na výstupu a hmotnostní tok na výstupu.

Literatura

[1]	D. J. Laser, J. G. Santiago. A review of micropumps. J. Micromech. Microeng. 14 (2004) R35–R64.
[2]	E. Stemme, G. Stemme. A valveless diffuser/nozzle-based fluid pump. Sensors and Actuators A, 39 (1993) 159-167.
[3]	T. Staley, D. Somlea, A. Tsinovkin, T. Le, J. Morris, Ch. Coleman. Novel Solid State Air Pump for Forced Convection Electronics Cooling. Electronic Components and Technology Conference, 2008.
[4]	G. A. Bird. Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flows. New York: Oxford Science Publications, Oxford University Press Inc., 1994.
[5]	FLUENT 17.1 Users Guide. Fluent Inc., © 2016 SAS IP, Inc.
[6]	Ferziger, J.H., Peric, M.: Computational Methods for Fluid Dynamics, 3rd Edition. Springer, Berlin (2002).
[7]	Issa, R.I.: Solution of implicitly discretized fluid flow equations by operator splitting. J. Comput. Phys., 62, 40-65 (1986).

Název	Studentská vědecká a odborná činnost 2017 - Strojírenství
Autor	kolektiv autorů
Vydavatel	Technická univerzita v Liberci
Určeno pro	studenty
Schváleno	čj.RE 14/17, schváleno rektorátem TUL dne 22.5.2017
Vyšlo	v květnu 2017
Vydání	1.
Počet stran	142
Tiskárna	Vysokoškolský podnik Liberec, spol. s r.o., Studentská 1402/2, Liberec
Číslo publikace	55-014-17

ISBN 978-80-7494-336-2



ISBN 978-80-7494-336-2