



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní



Studentská vědecká a odborná činnost 2018

Strojírenství

24. květen 2018

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



Recenzent: Martin Bílek

Editor: Dora Kroisová

Obsah

STROJÍRENSTVÍ – bakalářský studijní program

ANALÝZA ZDROJŮ HLUKU A VIBRACÍ STUDENTSKÉ FORMULE

Jan BĚLÍK 5

EXPERIMENTÁLNÍ HODNOCENÍ TUHOSTI UCHOPENÍ (VÁLCOVÉHO A KUŽELOVÉHO OBJEKTU)

David JAROŠ 15

NÁVRH SACÍHO TRAKTU PRO STUDENTSKOU FORMULI MARKÉTKA TÝMU FS TUL RACING

Jakub JEŽEK 25

OPTIMALIZACE ZADNÍ NÁPRAVY STUDENTSKÉ FORMULE TUL

Martin KOLOMAZNÍK 35

VLIV PROCESNÍCH PARAMETRŮ TECHNOLOGIE SELECTIVE LASER MELTING NA POROZITU VÝSLEDNÉHO VÝROBKU

Filip VÉLE 44

MIKROSTRUKTURÁLNÍ NÁVRH A ANALÝZA 2D ARCHITEKTURY SE ZÁPORNÝM POISSONOVÝM ČÍSLEM

Václav VOMÁČKO 54

STROJÍRENSTVÍ – navazující studijní program

INOVACE STŘIHACÍCH NÁSTROJŮ MODULÁRNÍ VÝROBNÍ LINKY PRO VÝROBU SOFISTIKOVANÝCH ADHEZIVNÍCH KRYTŮ RAN

Martin DOLANSKÝ 64

VLIV PROCESNÍCH PARAMETRŮ NA KVALITU A PŘESNOST 3D TISKU TECHNOLOGIÍ FDM/FFF

Daniel FRIŠ 74

OPTIMALIZACE JÍZDNÍHO KOMFORTU GOLFOVÉHO VOZÍKU

Radka JÍROVÁ 82

DIMENSIONAL STABILITY OF PARTS MANUFACTURED BY ADDITIVE TECHNOLOGY

Rakeshkumar D. SONI, Radomir MENDRICKY

91

STROJÍRENSTVÍ – doktorský studijní program

THE EFFECT OF THE TOOL WEAR ON THE CORRELATION OF FORCES ON THE FACE AND FLANK SURFACES OF THE CUTTING TOOL

Sergei BABAK

101

IDENTIFIKACE DYNAMICKÝCH SYSTÉMŮ POMOCÍ BAYESOVSKÝCH SÍTÍ

Maryna GARAN

109

MODELOVÁNÍ TURBULENTNÍHO PŘENOSU TEPLA

Tomáš KORÍNEK

118

REDUCING LABOR INTENSITY IN THE DEVELOPMENT OF NEW UNIVERSAL CUTTING FLUIDS FOR MACHINING

Iuliia KRASNIKOVA

126

APLIKACE POKROČILÝCH INŽENÝRSKÝCH METOD VE VÝROBĚ RÁMOVÝCH KONSTRUKCÍ NAVÍJENÝCH Z PRE-IMPREGNOVANÝCH UHLÍKOVÝCH VLÁKEN

Petr KULHAVÝ

134

AUTOMATICKÁ VÝROBA KOAXIÁLNÍCH NANOVLÁKENNÝCH STRUKTUR

Andrii SHYINKARENKO

144

ANALÝZA ZDROJŮ HLUKU A VIBRACÍ STUDENTSKE FORMULE

Bělík Jan

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

Abstrakt: Téma vzniklo po závodech, kdy bylo potřeba začít hledat příčiny hluku a vibrací, protože je hluk omezen pravidly a vibrace jsou obecně nežádoucí. Emise hluku prvního vozu byla blízka stanovenému limitu, proto by bylo dobré odhalit zdroje hluku. To je důležité, aby se mohly buď eliminovat, nebo využít nějakých řešení pro snížení. Je zde popsáno několik měření, která proběhla ve firmě VÚTS za účelem analýzy hluku a vibrací, která je k tomuto účelu dobře vybavena. Dále jsou tato měření vyhodnocena a z nich určeny zdroje a posouzeny jejich vlivy na celkový hluk a vibrace. Z těchto výsledků jsou navrženy optimalizace pro další generace. Reálné snížení hluku bude možné ověřit po dokončení nové formule a opětovném měření.

Klíčová slova: formule, měření hluku, měření vibrací

1 Úvod



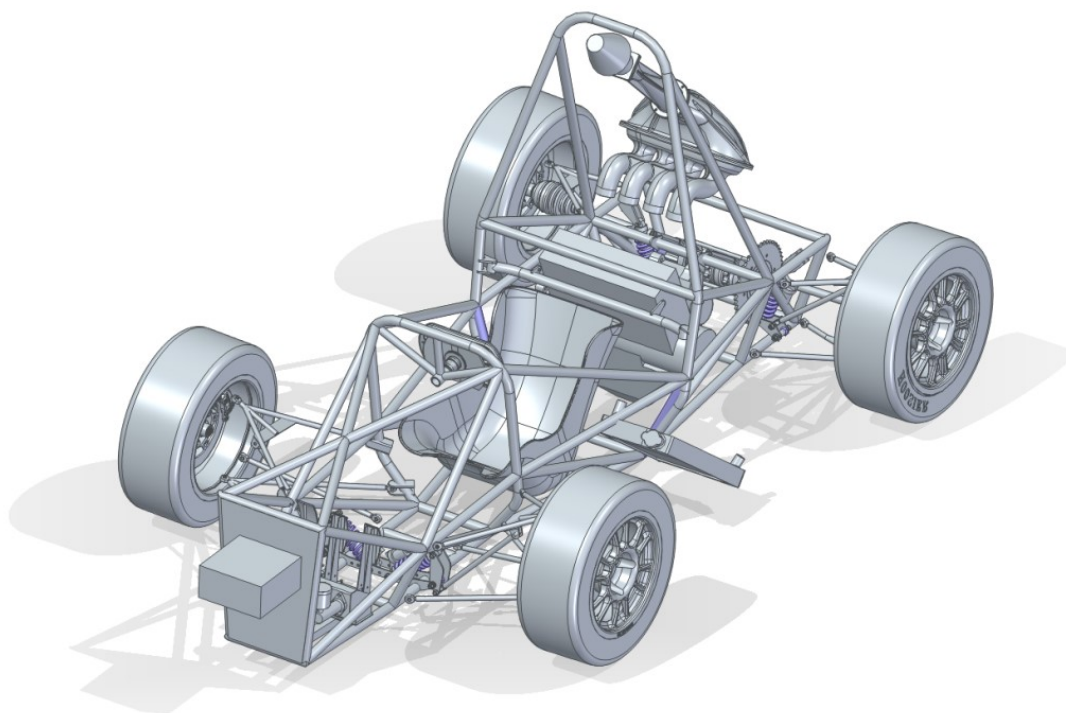
Obr. 1 Formule na závodech v Mostě

Analyzován bude vůz, se kterým tým závodil na 3 závodech v sezóně 2017, viz obr. 1. Byly to první závody nově vzniklého týmu. Jednalo se o první zkonstruovanou a vyrobenou formuli na Technické univerzitě v Liberci. Na všech závodech se podařilo projít hlukovým testem stejně jako zbytkem technických přejímk. Díky tomu vůz mohl nastoupit do závodu.

Hlavní náplní práce je experimentální posouzení zdrojů hluku. Skládá se z několika částí, po jejich vyhodnocení budou navržena opatření pro snížení emise hluku.

2 Popis vozu

Vůz je konstruovaný dle pravidel pro formule SAE [1] viz obr. 2. Jedná se o formule konstruované a vyráběné studenty vysoké školy. V našem případě se jedná o trubkový rám vlastní konstrukce, který odpovídá rozměrovým a konstrukčním požadavkům pravidel. Pohonnou jednotkou je motor ze silničního motocyklu Suzuki GSX-R 600. Motor je přimontován pomocí šroubů přímo k rámu bez využití tlumičích prvků. Motor má omezený průřez sání pro všechny 4 válce s maximálním průměrem 20 mm. Převodovka se spojkou je ve společné olejové náplni s motorem, tak jak tomu je u sériového motocyklu. Chlazení motoru je zajištěno vodním okruhem s chladičem a ventilátorem. Řazení je pomocí elektrického servomotoru ovládaného spínači pod volantem. Karoserie je vyrobena z laminátu, konkrétně z uhlíkové tkaniny vyplněné epoxydovou pryskyřicí. Výfuk je svařen z ocelových trubek a má dva tlumiče.



Obr. 2 CAD model formule bez karoserie

V pravidlech SAE [1] na straně 98 je předepsán maximální hlukový limit, který se měří na závodech. „Pro volnoběžné otáčky je hranice 103 dB(C) a pro zvýšené otáčky (pro náš motor 10 500 ot/min) 110 dB(C). Měří se při konstantních otáčkách, kdy vůz stojí a má zařazený neutrál. Mikrofon je umístěn ve vzdálenosti 0,5 m v rovině pod úhlem 45° od koncovky výfuku.“

Z těchto režimů budeme vycházet při následujících měřeních. Proto budou měření probíhat při volnoběhu a tzv. rychloběhu, tedy při 10 500 ot/min.

3 Měření

Měření jsem provedl ve vývojových laboratořích VÚTS v Liberci. Kvůli bezpečnosti byl vymontován řetěz, který pohání diferenciál. Vzhledem k tomu, že všechna měření budou probíhat staticky na stojícím vozidle, nemá vymontování řetězu vliv na výsledky. Dále

nemůžeme posoudit vliv hluku od pneumatik, ale to nám nevadí, protože při technické přejímce auto stojí a tak to nemá vliv na náš hlukový limit.

- **Měření podle pravidel SAE** – umístění jednoho mikrofonu dle pravidel [1]
- **Referenční měření** – měření hlukového pole ve vnějším prostředí
- **Měření pomocí simulátoru HATS** – měření za podmínek odpovídajících vnímání hluku řidičem
- **Měření pomocí mikrofonního pole** – mapování rozložení hlukového pole v okolí formule
- **Měření hluku a vibrací**

3.1. Prostředí

Měření podle metodiky SAE [1] byla provedena ve volném prostoru na asfaltové ploše před budovou VÚTS v Liberci. Akustické prostředí odpovídá podmínkám při technických přejímkách na závodech.

Další měření zaměřená na identifikaci zdrojů hluku byla provedena v poloodrazové komoře. Jedná se o uzavřenou místnost s odrazivou podlahou, pohltivými stěnami a stropem (absorpční klíny). Místnost má rozměry $L \times B \times H$, 11,9 m $\times$ 8,65 m $\times$ 5,42 m. Objem místnosti je 558 m³.

3.2. Měření podle pravidel SAE

Venku proběhlo měření podle pravidel formule SAE [1] viz obr. 3. Byl použit kondenzátorový mikrofón (Brüel&Kjaer 4190) ve dvou měřicích místech, která definují pravidla. Bylo využito přenosného analyzátoru s baterií (Brüel&Kjaer PULSE 3050-A-6/0) a notebook. Druhý notebook byl připojen k řídící jednotce motoru pro zobrazení otáček.



Obr. 3 Formule při měření podle pravidel SAE

Při volnoběhu docházelo ke kolísání otáček v rozsahu od 3 500 ot/min do 5 500 ot/min. Po té byl měřen rychloběh při otáčkách od 10 500 ot/min do 10 700 ot/min. Celé měření se opakovalo pro druhou pozici.

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 1.

	Hluk A	Hluk C
Volnoběh pozice 1	99,20 dB(A)	109,00 dB(C)
Volnoběh pozice 2 (za kolem)	97,70 dB(A)	106,00 dB(C)
Rychloběh pozice 1	110,00 dB(A)	115,00 dB(C)
Rychloběh pozice 2 (za kolem)	103,00 dB(A)	107,00 dB(C)

Tab. 1 Hladina hluku při měření podle pravidel SAE

Z výsledků je zřejmé, že limit hluku při volnoběhu 103 dB(C) byl překročen v obou případech. Limit hluku na rychloběh 110 dB(C) byl překročen v prvním měřicím místě. Překročení hodnot při volnoběhu mohlo být způsobeno kolísáním otáček, které mělo velký vliv. Důvod překročení v rychloběhu bude nutné zjistit při dalších měření. Zřejmě se jedná o závadu nebo změnu u výfuku oproti provedení při závodech.

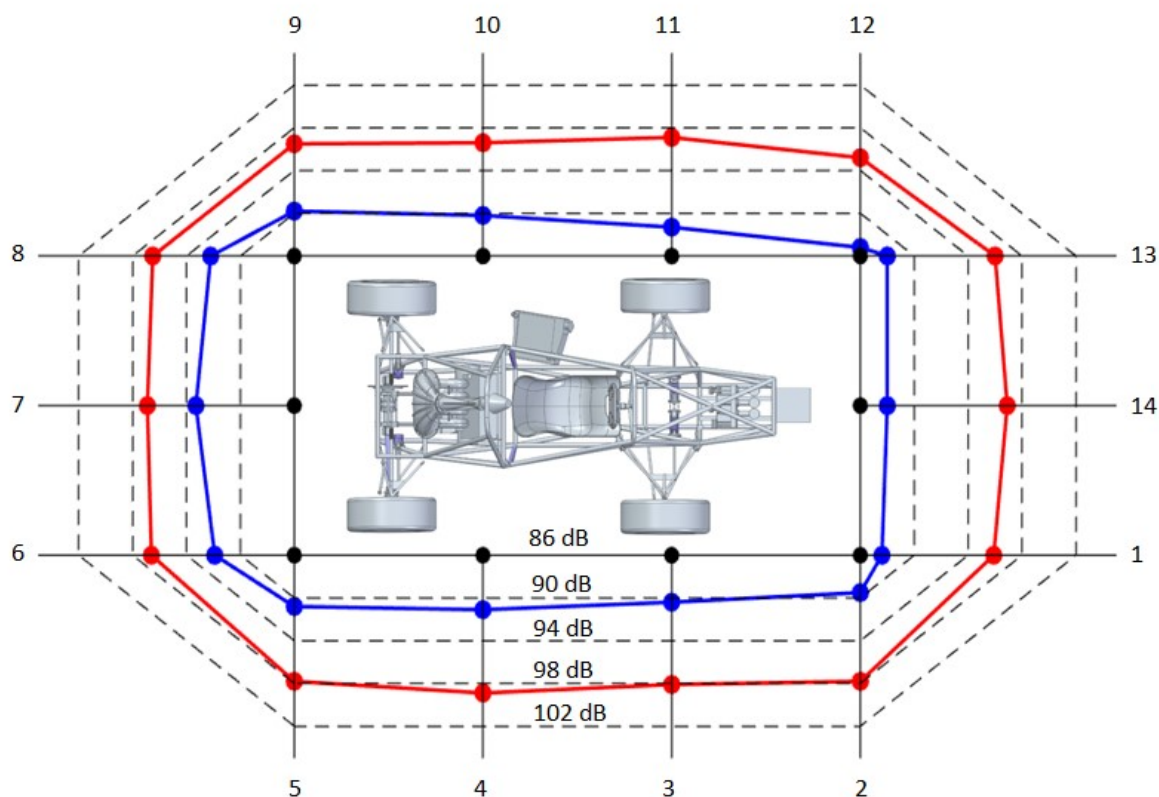
3.3. Referenční měření

Pro referenční měření viz. obr 4 byly stanoveny pozice mikrofónů kolem formule (14 pozic). Kondenzátorový mikrofón (Brüel&Kjaer 4190) byl umístěn na přenosném stativu ve výšce 1 m postupně po obvodu celé formule. Dále byl připojen přenosný analyzátor s baterií (Brüel&Kjaer PULSE 3050-A-6/0) a notebookem stejně jako u prvního měření. Druhý notebook byl připojen k řídicí jednotce motoru pro zobrazení otáček.



Obr. 4 Formule při referenčním měření

Měření bylo provedeno při volnoběhu, který kolísal od 3 800 ot/min do 6 500 ot/min. V každé poloze mikrofonu bylo provedeno lineární průměrování hladiny akustického tlaku o délce 20 s. Z těchto naměřených hodnot bylo zpracováno hlukové pole kolem formule viz graf 1.



Graf 1 Rozložení hlukového pole kolem formule, celkové hladiny akustického tlaku L_{pA} modře a L_{pC} červeně

Zde je vidět že nejvyšší hladina hluku je v zadní části vozu a na pravé straně. To je způsobeno motorem a výfukem.

3.4. Měření pomocí simulátoru HATS

Měření akustického tlaku v místě pilota bylo provedeno pomocí zařízení HATS (head and torso simulator) B&K se dvěma kondenzátorovými mikrofony (Brüel&Kjaer 4190), viz obr. 5. Zařízení je složené z modelu hlavy a části trupu. Simuluje vnímání emise hluku na člověka. Využito bylo znovu multifunkčního analyzátoru (Brüel&Kjaer PULSE 3050-A-6/0).



Obr. 5 Měření figurínou

Výsledky základních hodnot emise hluku jsou zapsány v tabulce 2.

		Hlasitost	Síla kolísání	Drsnost	Ostrost	Čas
		[sone]	[vacil]	[asper]	[acum]	[s]
Volnoběh	Mic L	123,394	0,361	1,140	1,399	19,750
	Mic R		0,387	1,229	1,480	
Rychloběh	Mic L	248,020	0,461	2,405	1,892	19,750
	Mic R		0,406	2,803	1,953	

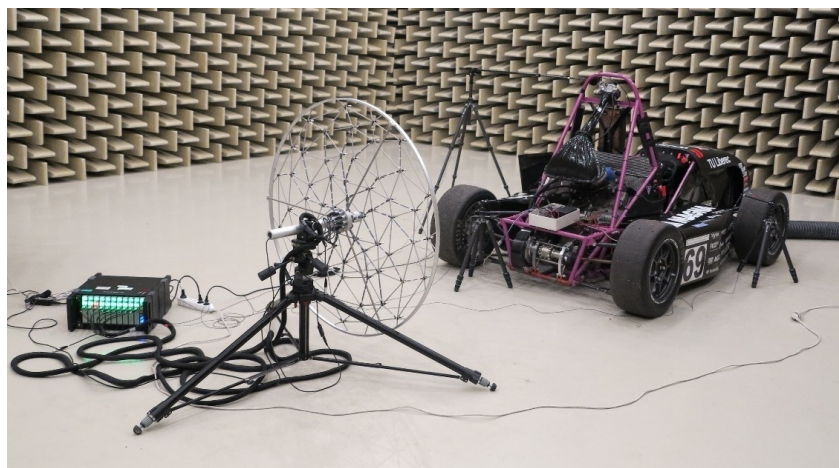
Tab. 2 Vnímání a emise hluku

3.5. Měření pomocí mikrofonního pole

Měření bylo provedeno ve třech polohách mikrofonního pole (na zadní, levé a pravé straně formule) viz obr. 6. Měřicí místa vycházejí z předchozího měření hlukového pole okolo formule, v přední části je hlukové pole méně významné a proto se v této pozici neměřilo.

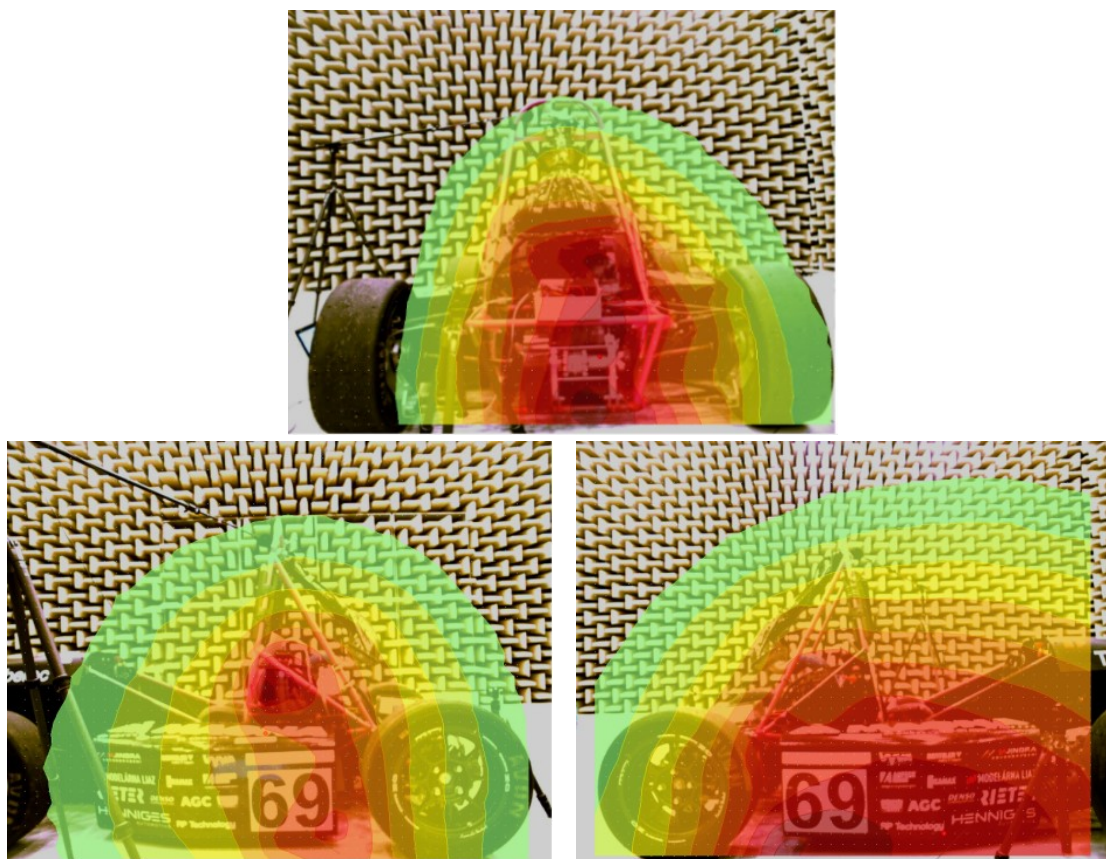
Byly použity tři kondenzátorové mikrofony (Brüel&Kjaer 4190) jako reference. Byly umístěny u největších zdrojů hluku (sání a výfuk motoru).

Pro měření bylo využito multifunkčního analyzátoru (Brüel&Kjaer PULSE) kruhového mikrofonního pole (Brüel&Kjaer WA-1558-W-006) s 60 mikrofony typu 4958.

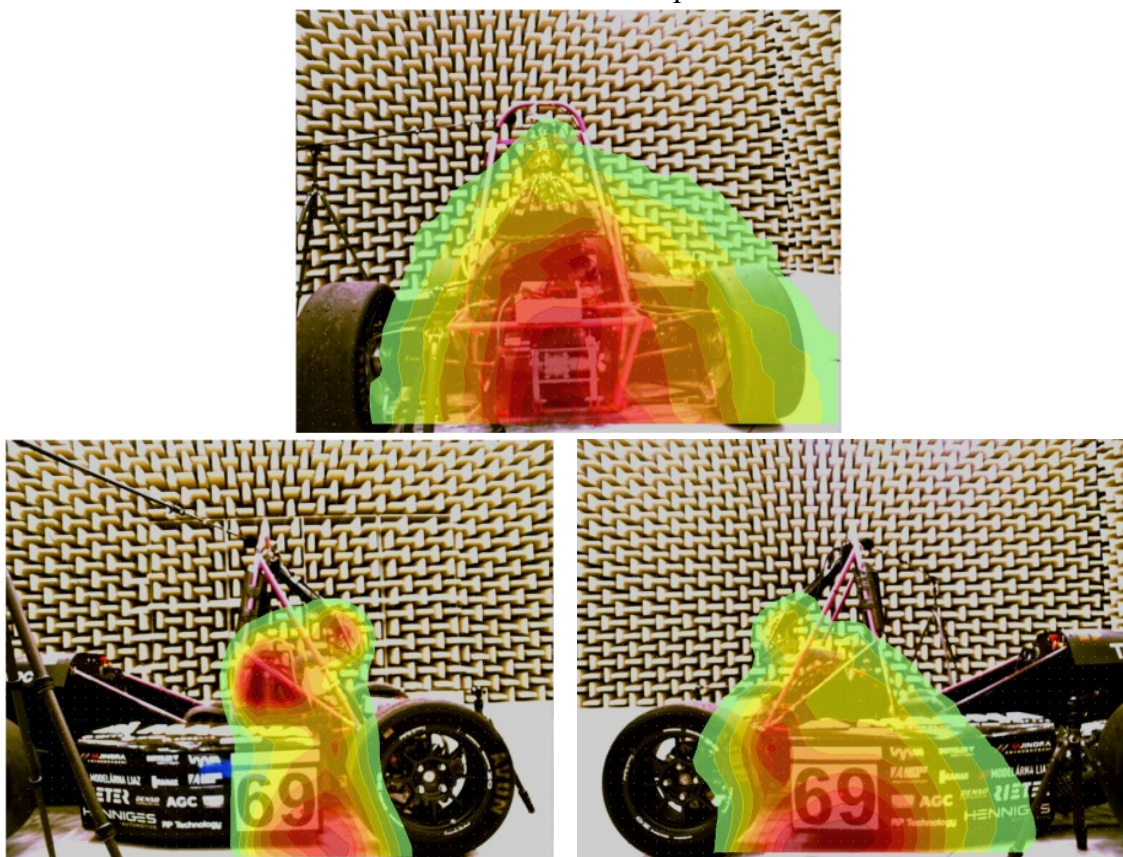


Obr. 6 Měření mikrofonním polem

Výsledky jsou znázorněny na obrázcích 7 a 8.



Obr. 7 Rozložení emise hluku při volnoběhu

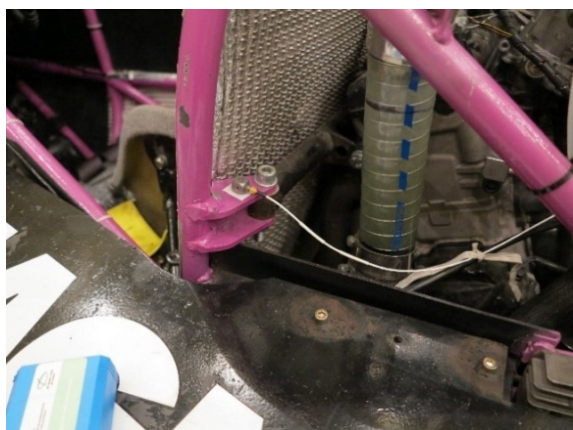


Obr. 8 Rozložení emise hluku při rychloběhu

3.6. Měření hluku a vibrací

Dva kondenzátorové mikrofony Brüel&Kjaer 4190 byly umístěny do poloh č. 4 a 7 s největší emisí hluku. Vibrace byly měřeny pomocí akcelerometru Kistler 8290A25M5 (pro teploty -70 až +250°C) na blok motoru viz obr. 10. Druhý akcelerometr Kistler 8763B1K0AB byl přilepen na rám viz obr. 9, aby byl zachycen přenos vibrací do rámu. Pro akcelerometr na motoru bylo použito nábojových zesilovačů Brüel&Kjaer 2647A, druhý akcelerometr byl připojen přímo k analyzátoru. Na kabel vedoucí k svíčke prvního válce byla připojena proudová sonda Chauvin Arnoux pro přesné určení otáček. Dále byl použit multifunkční analyzátor Brüel&Kjaer PULSE a notebook.

Při volnoběhu kolísaly otáčky od 4 000 ot/min do 4 100 ot/min (cca 2,5 %, posoudit významnost z hlediska hluku). Při měření byl proveden časový záznam veličin o délce 10 s.



Obr. 9 Akcelerometr na rámu

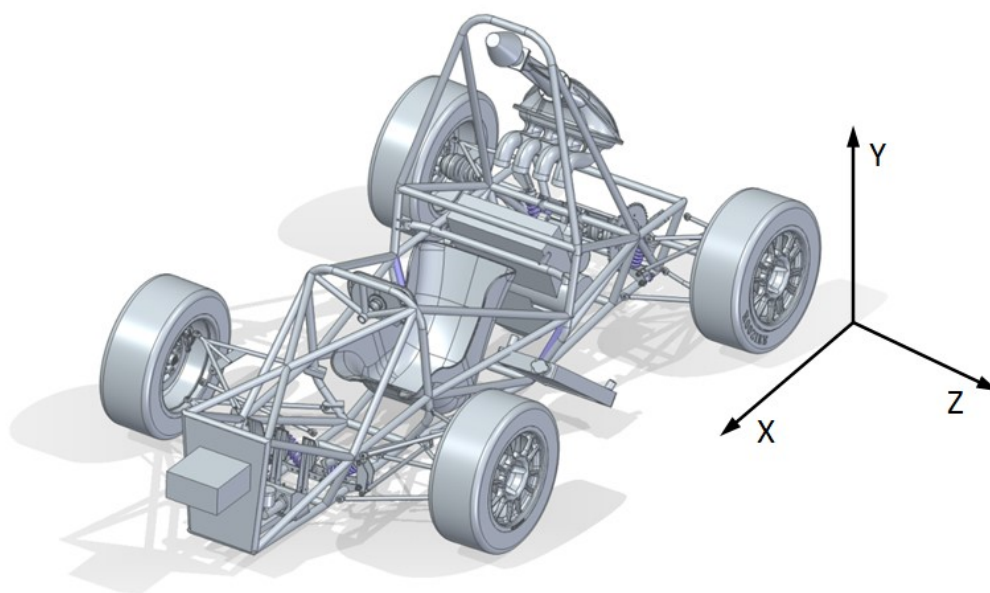


Obr. 10 Akcelerometr na motoru

Výsledky měření hluku jsou uvedeny v tabulce 3. Zajímají nás zde především frekvence a impulzy svíčky.

Režim	Volnoběh		pulz na svíčke	Rychloběh		pulz na svíčke
Pozice	4	7		4	7	
Frekvence	18 Hz	18 Hz		91 Hz	91 Hz	91 Hz
Násobky	0,5	0,5		1	1	1
Frekvence	34 Hz	34 Hz	34 Hz	137 Hz	137 Hz	
Násobky	1	1	1	1,5	1,5	
Frekvence	51 Hz	51 Hz		183 Hz	183 Hz	183 Hz
Násobky	1,5	1,5		2	2	2
Frekvence	67 Hz	67 Hz	67 Hz	275 Hz	275 Hz	275 Hz
Násobky	2	2	2	3	3	3
Frekvence	85 Hz	85 Hz		304 Hz	304 Hz	
Násobky	2,5	2,5		3,3	3,3	
Frekvence	101 Hz	101 Hz	101 Hz	364 Hz	369 Hz	366 Hz
Násobky	3	3	3	4	4	4
Frekvence	118 Hz	118 Hz		458 Hz	458 Hz	458 Hz
Násobky	3,5	3,5		5	5	5
Frekvence	137 Hz	137 Hz	134 Hz			
Násobky	4	4	4			

Tab. 3 Frekvenční spektrum



Obr. 11 Souřadný systém formule

Vibrace jsou uvedeny v tabulce 4 a 5.

Volnoběh					
Frekvence svíčky		34 Hz	67 Hz	101 Hz	134 Hz
Pulz svíčky		1	2	3	4
Akcelerometr motor	x	0,130 m/s	0,168 m/s	0,275 m/s	1,080 m/s
	y	0,109 m/s	0,120 m/s	1,140 m/s	4,580 m/s
	z	0,038 m/s	0,024 m/s	0,968 m/s	1,550 m/s
Akcelerometr rám	x	0,050 m/s	0,114 m/s	0,059 m/s	0,992 m/s
	y	0,052 m/s	0,094 m/s	0,375 m/s	1,190 m/s
	z	0,045 m/s	0,078 m/s	0,402 m/s	0,870 m/s

Tab. 4 Vibrace při volnoběhu

Rychloběh								
Frekvence svíčky		91 Hz	183 Hz	275 Hz	366 Hz	458 Hz	550 Hz	641 Hz
Pulz svíčky		1	2	3	4	5	6	7
Akcelerometr motor	x	2,66 m/s	4,98 m/s	5,10 m/s	33,00 m/s	5,94 m/s	8,47 m/s	7,34 m/s
	y	4,02 m/s	2,58 m/s	9,36 m/s	48,50 m/s	1,67 m/s	0,80 m/s	4,77 m/s
	z	2,56 m/s	3,06 m/s	7,59 m/s	3,23 m/s	1,47 m/s	1,12 m/s	4,86 m/s
Akcelerometr rám	x	1,21 m/s	1,66 m/s	2,19 m/s	11,40 m/s	1,93 m/s	4,10 m/s	3,24 m/s
	y	1,64 m/s	0,80 m/s	2,74 m/s	5,14 m/s	0,80 m/s	3,24 m/s	3,87 m/s
	z	1,27 m/s	4,70 m/s	4,53 m/s	1,31 m/s	1,47 m/s	2,87 m/s	6,88 m/s

Tab. 5 Vibrace při rychloběhu

Z výsledků měření hluku je zřejmé, že dominantní hluk je z motoru. Jedná se o frekvence shodné s rázy, které způsobují výbuchy v komoře válců 1 a 4 a jejich poloviční hodnoty

frekvence, tedy válce 2 a 3. Z této frekvenční charakteristiky je vidět, že ostatní zdroje jsou mnohem menší.

Z výsledků měření vibrací je zřejmé, že se do rámu přenáší jen část těchto kmitů.

4 Závěr

Výsledkem práce je identifikace zdrojů hluku, vibrací a návrh opatření pro snížení hluku a vibrací

4.1. Zdroje

- **MOTOR**
Zdroj vibrací, který se podle očekávání projevil jako nejdominantnější.
- **VÝFUK**
Souvisí s hlukem, který vytváří motor.
- **SÁNÍ**
Dosavadní konstrukce sání a naladění řídicí jednotky motoru nám způsobuje kolísání otáček ve volnoběhu, které se projevují pulzací sání. To má vliv na celkovou hladinu hluku formule.
- **OSTATNÍ**
Dalšími zdroji hluku jsou zejména: převodovka, řetězový převod, diferenciál, pneumatiky. Jsou to zdroje, které se nijak neprojevují při statickém měření, ale až při jízdě formule.

4.2. Navrhované opatření

- **LADĚNÍ MOTORU**
Hlavní příčina zvýšeného hluku bylo kolísání otáček. Bylo by proto vhodné se tomuto efektu při ladění dalších formulí vyhnout.
- **VÝFUK**
Konstrukce výfuku by měla na dalších vozech být efektivnější. Měl by se použít jediný efektivnější tlumič i změna vedení výfukového potrubí.
- **KAROSERIE**
Na první formuli nebyl motor nijak zakrytovaný. Proto se nabízí možnost zakrytování motoru s použitím pohlcující pěny.
- **VIBRACE**
Pro snížení vibrací by bylo vhodné využít pryžových silentbloků.

Literatura

- [1] 2017-18 Formula SAE Rules [online]. Copyright © [cit. 27.04.2018]. Dostupné z: <https://www.fsaeonline.com/content/2017-18-FSAE-Rules-091317.pdf>
- [2] NOVÝ, Richard. Hluk a chvění. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02246-3.

Experimentální hodnocení tuhosti uchopení (válcového a kuželového objektu)

David Jaroš

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

Abstrakt:

Práce předkládá analýzu možných způsobů tuhého staticky určitého robotického uchopování objektů ve tvaru kužel a válec. Následně je předložen konstrukční návrh úchopných prvků pro uchopování rotačních osově symetrických součástí tříprstým chapadlem. V závěru je stručně zhodnocena využitelnost chapadla pro realizaci experimentálního zjišťování tuhosti uchopení.

Klíčová slova: robotické uchopování, uchopování válce, uchopování kužele, tříprsté uchopení, tuhost uchopení, technologické síly

Key words: robot gripping, gripping the cylinder, gripping the cone, three-finger grasping, stiffness of grip, grasping, technological forces

1. Úvod

Tato práce si klade za cíl zhodnocení možností uchopování objektů z reologických materiálů ve tvaru válec a komolý kužel. Z této studie vychází navrhnutí úchopných prvků pro tuhé přesné uchopování objektů bez vychýlení se zachováním dostatečné pohyblivosti chapadla. A následným experimentálním způsobem otestování navržených úchopných prvků při působení technologických sil a měření výchylky uchopení.

2. Rešerše úchopných hlavic z hlediska tuhosti uchopení

Tuhost uchopení je ovlivněna velkým množstvím různých faktorů, mezi nejvýznamnější patří rozložení kontaktních bodů, materiál stykových ploch a druh použitého transformačního bloku.

2.1 Rozložení kontaktních bodů

Zvolení vhodného rozložení kontaktních bodů je jedna z nejdůležitějších vlastností pro tuhé uchopení objektu. Stabilita uchopení při tuhém uchopení je ovlivněna rozmístěním a počtem kontaktních bodů. „Uchopení je stabilní tehdy, pokud má mnohostěn vzniklý spojením kontaktních bodů stálý tvar – poloha bodů se během manipulace nemění“[1].

Díky této podmínce je možné rozdělit uchopení na čtyři základní možnosti:

Plocha / plocha

Plocha / čára

Plocha / bod

Plocha / zdvojená čára

Úchopné prvky jsou nejčastěji řešeny jako výměnné součásti. Rozložení kontaktních bodů je ovlivněno konstrukčním návrhem uložení, přesností výroby a dodržení konstrukčních tolerancí a tuhosti chapadla [1].

Při zjišťování stability uchopení je nutné respektovat rovnici statické určitosti uchopení, která je ve tvaru $m + k = 7$, kde m je počet tvarových kontaktů a k je počet souřadnic podél kterých je držení zajištěno jen třením [2].

2.2 Materiál stykových ploch

Při uchopování dochází ke styku dvou objektů – uchopovacích prvků a uchopovaného předmětu. Tyto dva předměty mohou být z materiálů se stejnými, ale i různými vlastnostmi. Podle tohoto kritéria můžeme popsat 4 způsoby uchopení.

Tuhotuhé uchopení – materiál povrchu chapadla i objektu je tuhý a nedochází k deformacím. Při tomto uchopení dochází při opakovaném uchopování stále ke stejné vystředěnému a přesnému uchopení z důvodu nulových deformací. Nepřesnost uchopení, ale bývá nepříznivě ovlivněna výrobní nepřesností uchopovaného předmětu, ale i úchopných prvků. Další nevýhoda tohoto uchopení je to, že může docházet k poškození povrchu uchopovaného objektu, nejčastěji poškrábání při styku kovu s kovem.

Tuhopoddajné uchopení – materiál povrchu chapadla je tuhý a povrch uchopovaného objektu je z poddajného materiálu. Při tomto typu uchopení je potřeba kontrolovat uchopovací sílu, aby nedošlo k překročení pružné deformace, nebo k poničení povrchu – vznik otlačených ploch. Při tomto uchopení u opakovaného uchopování dochází k nepřesnosti a chybě vycentrování z důvodu rozdílných deformací uchopovaného předmětu.

Poddajnětuhé uchopení – materiál povrchu chapadla je poddajný a objekt je z tuhého materiálu. Toto uchopení z části kompenzuje výrobní nepřesnosti a také zabraňuje poškození povrchu uchopovaného objektu, díky poddajné elastické vrstvě na prstech chapadla. Zároveň díky této poddajné vrstvě dochází ke snížení tření mezi povrchy chapadla a uchopovaného objektu a tím je dosaženo kvalitnějšího uchopení.

Poddajněpoddajné uchopení – materiál povrchu chapadla i objektu je z poddajného materiálu, dochází k největším deformacím. Při tomto uchopení dochází k největším nepřesnostem uchopení z důvodu velké deformace obou objektů. Tyto deformace se mohou lišit u jednotlivých dílů, a proto dochází k nepřesnosti uchopení a vycentrování.

2.3 Transformační bloky

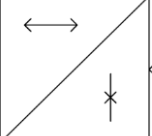
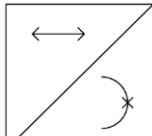
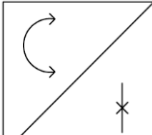
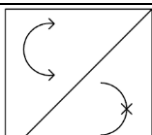
Z hlediska kvality a stability uchopení je velice důležitý transformační blok (tab. 1). Při uchopování předmětu pomocí posuvných úchopných prvků může dojít k chybě středění uchopeného objektu z důvodu špatného seřízení čelistí chapadla, výrobních nepřesností úchopných prvků, nebo nepřesností tvaru uchopovaného objektu. Při uchopování předmětu rotačními úchopnými prvky dojde k lepšímu vycentrování a tudíž k přesnějšímu uchopení.

V současné době převažuje využívání pneumatických pohonů, ale dochází k trendu nahrazování pneumatických pohonů pohony elektrickými, které mají větší citlivost a přesnost ovládání.

Pro správnou volbu transformačního bloku je potřeba znát dva parametry. První parametr je pohyb přicházející z motoru. Tento pohyb je buď rotační, nebo translační. Druhý parametr je charakter pohybu úchopných prvků. V případě, že známe oba tyto parametry, můžeme navrhnout odpovídající transformační blok [1]. Transformační blok může být pákový, ozubený, vačkový, šablonový anebo šroubový. Ve spojení s motorem umožňuje změnu druhu pohybu

změnu smyslu pohybu, změnu úchopné síly, změnu rychlosti pohybu. Také má buď konstantní, nebo variabilní převod [3].

Tabulka 1: Transformační bloky [1]

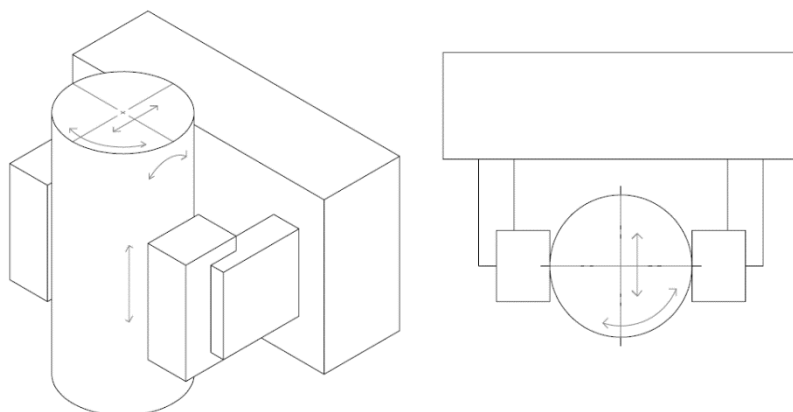
	Motor	Úchopné prvky	Transformační pohyb
Pneumatické pohony	Posuvný	Posuvné	
	Posuvný	Rotační	
Převážně elektrické pohony	Rotační	Posuvný	
	Rotační	Rotační	

3. Analýza vhodnosti chapadel pro tuhé uchopení objektů typu válec a kužel

Pro uchopování objektů typu válec a kužel je možná aplikace řady chapadel s různým počtem úchopných prvků a s uchopením v jedné nebo více rovinách uchopení.

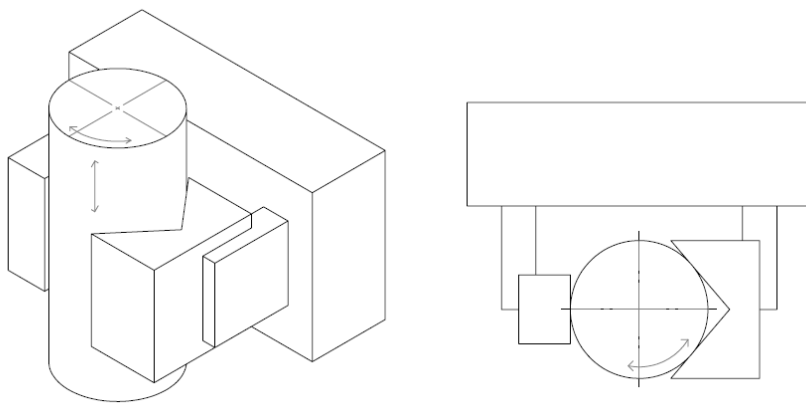
3.1 Uchopování válce dvouprstým chapadlem v jedné rovině uchopení

Při tomto uchopování máme dvě možnosti volby úchopných prvků. První možnost je uchopování pomocí netvarových úchopných prvků (obr. 1), v tomto případě dojde ke kontaktu mezi uchopovacími prvky a objektem pouze ve dvou přímkách a stability objektu je dosaženo pouze v jednom směru, ale ve třech směrech se může objekt pohybovat. Rovnice statické určitosti uchopení je $k + m = 7$, kde $k = 4$ a $m = 3$.



Obrázek 1: Model dvoubodového silového uchopení (šipky určují možný pohyb)

Další možnost je využití jednoho tvarového a druhého netvarového úchopného prvku (obr. 2). Při tomto uchopování dojde ke kontaktu mezi uchopovacími prvky a objektem ve třech přímkách a stability objektu je dosaženo ve dvou směrech, ale ve dvou dalších směrech se může objekt pohybovat. Toto uchopení zajišťuje menší chybu středění než dvoubodové a tříbodové uchopení. Rovnice statické určitosti uchopení je $k + m = 7$, kde $k = 2$ a $m = 5$.



Obrázek 2: Model tříbodového uchopení válce (šipky určují možný pohyb)

3.2 Uchopování válce tříprstým chapadlem

Uchopování válce tří prstovým chapadlem za využití stejných tvarových úchopných prvků je přesná a dostatečně tuhé uchopení. V následující část práce se tímto tématem zabývá více podrobně s využitím mechanismu, který umožňuje uchopovat různé rotačně symetrické objekty.

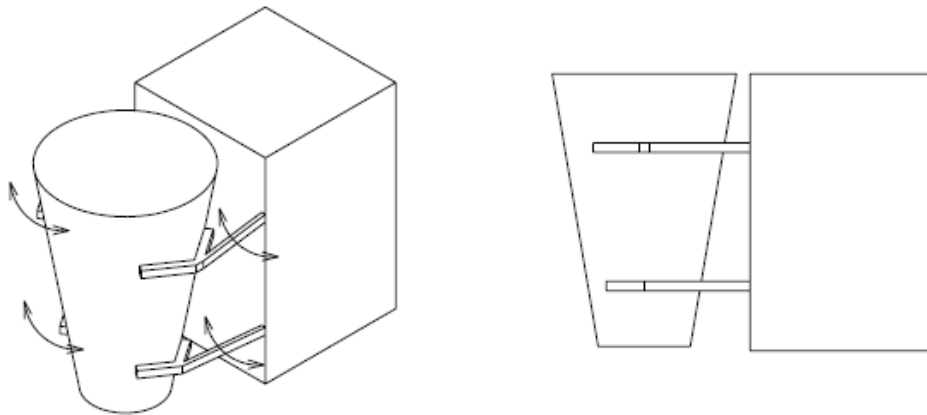
3.3 Uchopování kuželu dvouprstým chapadlem v jedné rovině uchopení

Uchopování kužele jedním chapadlem se dvěma úchopnými prvky je velice nepřesné a nestabilní uchopení, při zvyšování úchopné síly může dojít k vyosení osy kužele od osy chapadla a tím k velké nepřesnosti uchopení.

3.4 Uchopování kuželu dvěma dvouprstými chapadly ve dvou rovinách uchopení

Aby došlo k pevnému, stabilnímu uchopení komolého kužele musíme realizovat uchopování ve dvou rovinách pomocí dvou chapadel (obr. 3). Tato chapadla musí být seřizena tak, aby uchopování probíhalo rovnoměrně a mohlo dojít ke kvalitnímu uchopení.

Můžeme zvolit buď rotační nebo posuvné úchopné prvky. Při uchopování pomocí rotačních úchopných prvků může docházet k chybě středění. K eliminaci této chyby lze dosáhnout vhodným zvolením tvaru úchopných prvků. Nejvhodnější je zvolit zakřivené profily úchopných prvků, které eliminují chybu středění osy chapadla. Při uchopování pomocí posuvných úchopných prvků nedochází k chybě středění.



Obrázek 3: Model uchopení pomocí dvou chapadel s rotačními úchopnými prvky

3.5 Uchopování kuželu tříprstým chapadlem

Uchopování kužele tříprstým chapadlem za využití stejných tvarových úchopných prvků je přesná a dostatečně tuhé uchopení. V následující část práce se tímto tématem zabývá více podrobně s využitím mechanismu který umožňuje uchopovat různé rotačně symetrické objekty.

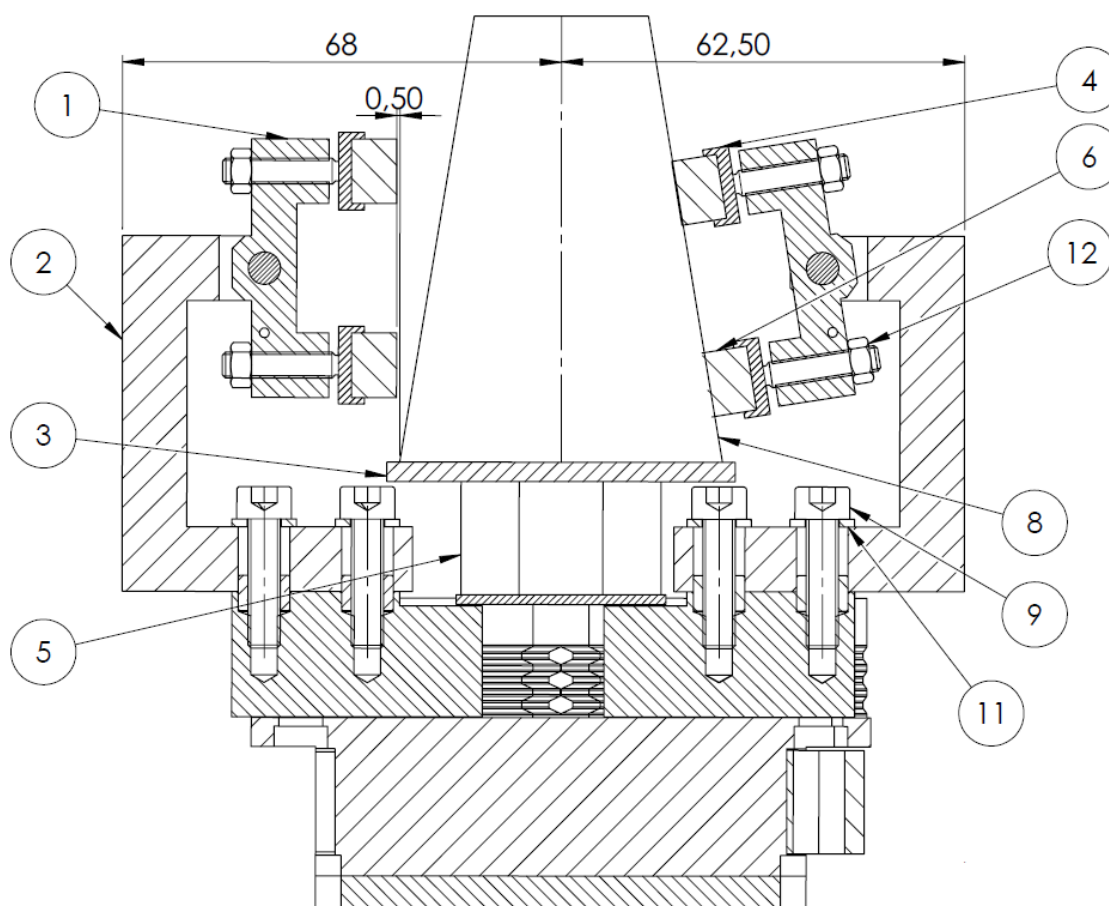
4. Konstrukční řešení úchopných prvků chapadla pro tuhé uchopení

Po zvážení všech možností uchopení a jeho výhod a nevýhod bylo rozhodnuto uchopovat objekty ve tvaru válec a komolý kužel do tříprstého chapadla od renomované firmy Schunk (obr. 4). A to přesně chapadlo PZN plus 80 – 1, toto chapadlo je univerzální tříprsté středové chapadlo s vysokou uchopovací silou s velkým momentem díky vedení s více zuby [4].



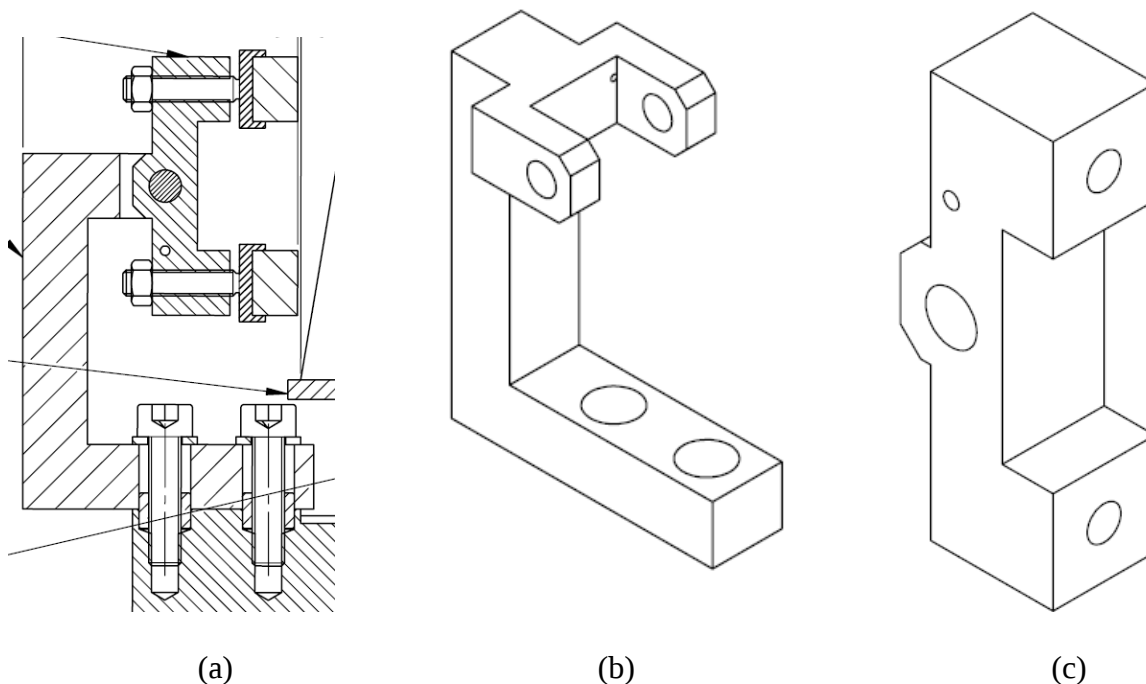
Obrázek 4: Tříprsté chapadlo PZN plus 80 – 1 od firmy Schunk

Na chapadlo PZN plus 80 – 1 byl navrhnout mechanismus, který zajišťuje možnost uchopení různých objektů od válce až po komolý kužel.



Obrázek 5: Konstruktivního řešení: 1 – otočný úchopný prvek; 2 – čelist; 3 – stůl, 4 – uchopovací držák, 5 – distanční sloupek, 6 – třecí materiál, 8 – kužel, 9 – šroub M5, 11 – podložka 5, 12 – matice M4

Konstruktivní řešení (obr. 5) se skládá ze tří čelistí, fixovaných k chapadlu PZN plus 80 – 1 dvěma šrouby M5 s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem a podložkou. Na čelist navazuje otočný úchopný prvek, která je pomocí čepu zajištěného třmenovými pojistnými kroužky, připevněná k čelisti. Na čepu mezi prstem a každou stranou čelisti je navlíknuta zkrutná pružina od firmy Sodemann. Na každé čelisti jsou použity dvě zkrutné pružiny, jedna levotočivá a druhá pravotočivá. Volné konce pružiny jsou zastrčeny do díry na prstu a na čelisti. Na čelist jsou pomocí závitů připevněny uchopovací držáky a pomocí matic M4 jsou zajištěny (detail v obr. 6). Do uchopovacích držáků se vlepují válečky z materiálů s vysokým koeficientem tření, které napomáhají tuhému uchopení. Zvolený třecí materiál, ale na druhou stranu nesmí mít příliš velkou schopnost deformace, velká deformace způsobí nepřesnost uchopení a také zmenšuje tuhost uchopení.



Obrázek 6: (a) Detail uchopení, (b) čelist, (c) úchopný prvek.

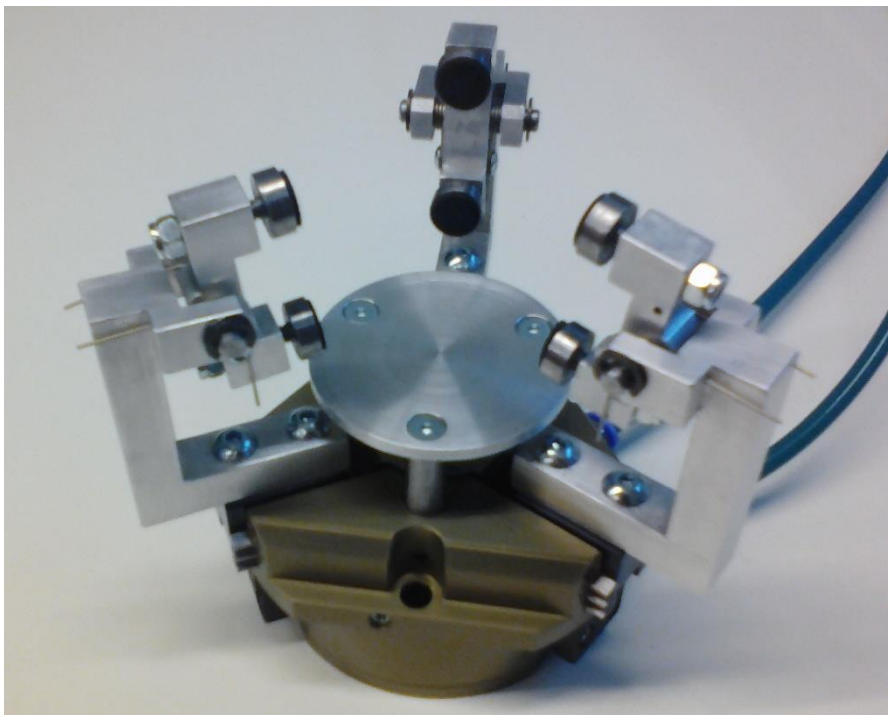
Chapadlo PZN plus 80 – 1 umožňuje vložení tři distanční sloupků, které jsou zajištěny proti vysunutí pomocí pojistných šroubů M3. Na distanční sloupky je přišroubován pomocí tří zápusťných šroubů M4 stolek, který umožňuje volný pohyb čelistí a zároveň je dorazem pro zajištění polohy přesné uchopovaného objektu vzhledem k chapadlu.

Vyrobené úchopné prvky jsou předloženy na obr. 7 a po montáži na obr. 8.

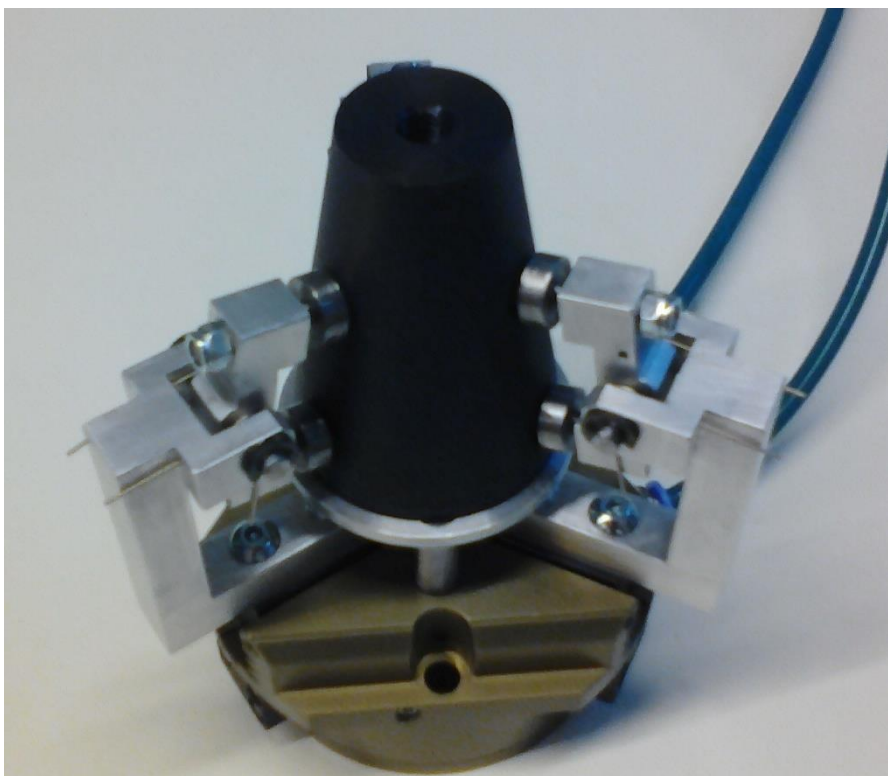
Možnosti uchopování objektů jsou souhrnně uvedeny na obr. 9 – 11.



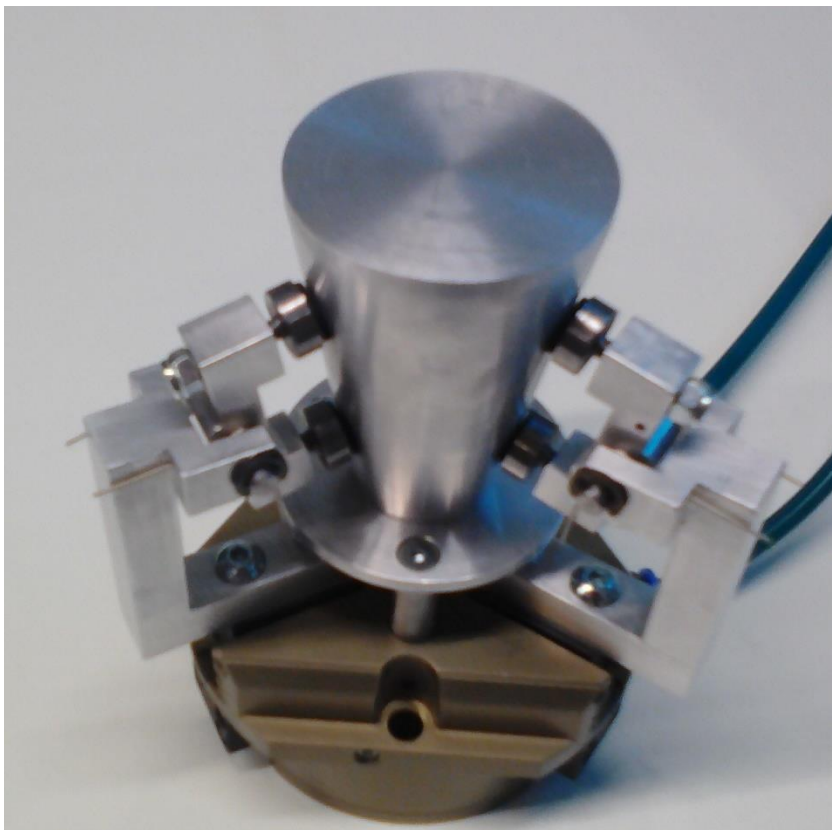
Obrázek 7: Jednotlivé části úchopného systému před montáží



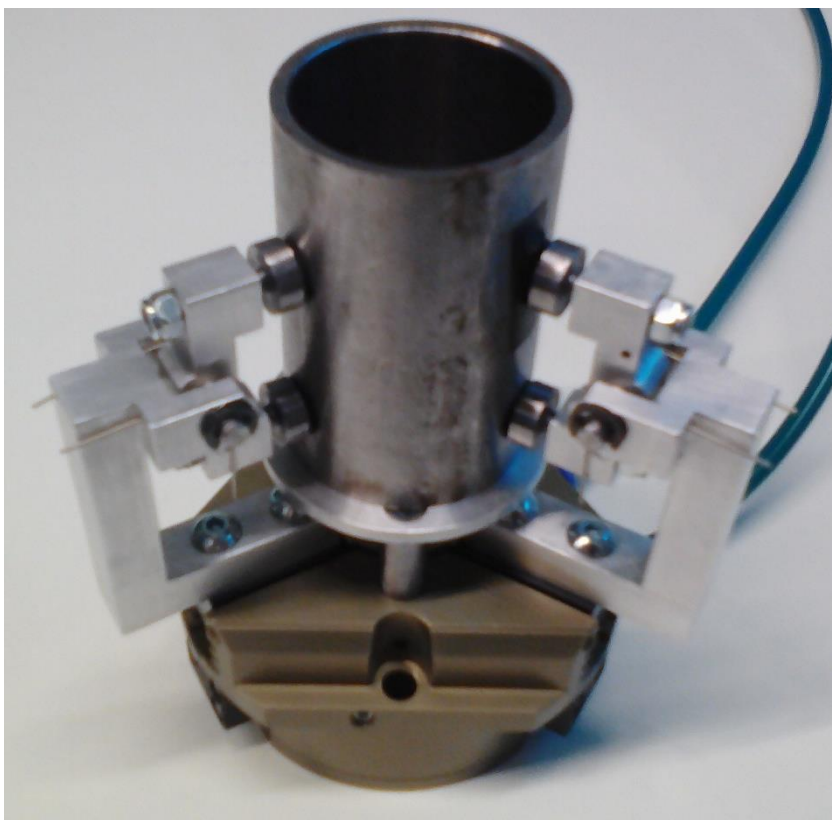
Obrázek 8: Uchopovací systém na chapadle PZN plus 80 – 1 po montáži



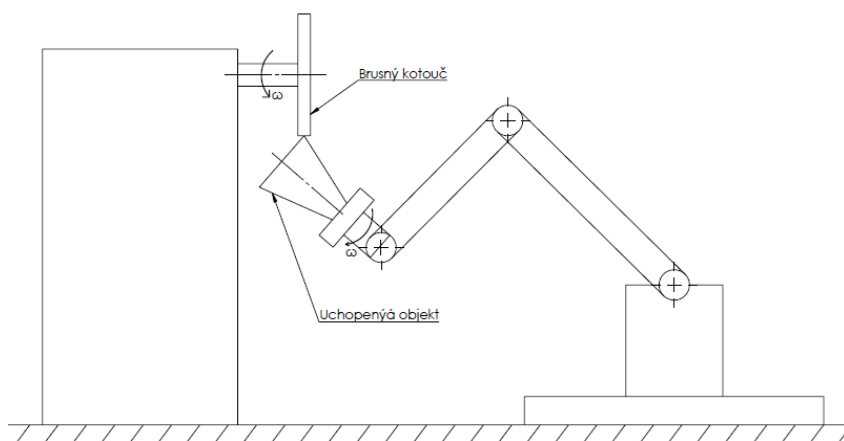
Obrázek 9: Uchopený kužel s velkou přírubou na chapadle



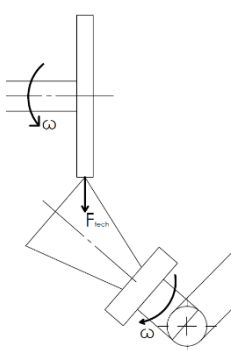
Obrázek 10: Uchopený kužel s malou přírubou na chapadle



Obrázek 11 Uchopení válcového objektu



Obrázek 12: Schéma robotického broušení



Obrázek 10: Schéma působení technologické síly

5. Závěr

Hlavním přínosem předkládané práce je konstrukční návrh a zhotovení úchopných prvků chapadla s třístranným uchopením pro kombinované tuhé uchopení objektů ve tvaru válce a komolého kužele s možným uchopením za menší i větší podstavu.

Chapadlo bude základním modulem experimentálního pracoviště pro ověřování tuhosti uchopení a měření odchylky vzniklé v důsledku působení technologické síly. Technologická síla může působit na objekt například při broušení hrany uchopeného objektu (obr. 12, 13). Tato síla má za důsledek právě vyosení osy uchopeného objektu od osy chapadla a tím vznik nepřesnosti uchopení i souososti obroušené plochy.

Literatura

- [1] Novotný, F., Horák, M., Efektory průmyslových robotů. Skripta TU, TU v Liberci, 2015, 116 s
- [2] Novotný, F. : Chapadla pro roboty a automatickou manipulaci. Skripta pro seminář FESTO. TU v Liberci, 2009, 75 s.
- [3] POLÁČEK, L, Simulace robotické ruky pro automatizaci testování senzoru gest. Diplomová práce, ČVUT 2017, 95 s, dostupné z:
<https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73353/F2-DP-2017-Polacek-Lukas-Diplomova-prace.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [4] Oficiální stránky firmy Schunk, dostupné z:https://schunk.com/fi_en/gripping-systems/seriesaccessory/pzn-plus/product/2319-0303511-pzn-plus-80-1-as/

Návrh sacího traktu pro studentskou formuli Markétka týmu FS TUL Racing

Jakub Ježek

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

Abstrakt: Cílem mojí práce v týmu FS TUL Racing je navrhnout, zkonstruovat a vyrobit sací trakt na motor Suzuki GSX-R 600 studentské formule „Markétka“ týmu FS TUL Racing. Práce se skládá z několika dílčích celků, řazeno ve smyslu proudění – volba vzduchového filtru, sací trumpetka, škrtkávací klapka, restriktor, napojení na plenum, plenum, trumpetky pro nátrubky sání, nátrubky sání, domečky uchycení sání k motoru a vstřiky, dále palivové lišty. Všechny součásti jsou reálně vyráběné a často podléhají pravidlům asociace FSAE, jenž zajišťuje závody studentských formulí. Proto bylo potřeba vyhotovit výrobní dokumentaci, zajistit výrobu a montáž celého celku, respektive montáž na formuli.

V této práci je primárně řešena, z důvodu omezeného rozsahu, geometrie sací trumpetky, klapky (a její konstrukce z pohledu výroby a použitelnosti) a restriktoru (s velkým důrazem na pravidla FSAE). Dále popisují důvody volby dané délky sacího potrubí pro využití pulzního přepínání. V práci se také zabývám reálnými finančními a kapacitními možnostmi týmu FS TUL Racing na výrobu součástí, přičemž právě tyto možnosti ve výsledku výrazně ovlivnily finální podobu konstrukce.

Klíčová slova: Vzduchový filtr, trumpetka, škrtkávací klapka, odvíjecí váčka, restriktor, tryska kombinovaného tvaru, kritické proudění, Eliška, Markétka, pulzní přepínání

1.1 Projekt Studentské formule týmu FS TUL Racing

Projekt, pod záštitou Fakulty strojní, spočívá ve vývoji, návrhu, konstrukci, výrobě a zafinancování závodní formule. Smyslem projektu je dostat studenty vysokých škol ze školních lavic do reálného světa strojírenství (návrh, konstrukce, výroba), potažmo ekonomiky (marketing, sponzoring). Primární myšlenka zakládá na, pokud možno, stoprocentní účasti studentů na celém projektu, tedy je na nich si formuli jak vyvinout a zkonstruovat, tak sehnat potřebné finanční prostředky na její výrobu, potažmo závody.

Studentská formule se staví dle pravidel asociace FSAE [1].

1.2 Formule Markétka

Formule Markétka je již druhou formulí týmu FS TUL Racing. Markétka však z první formule, Elišky, nevychází přímo. Jedná se o koncepčně úplně novou formuli, avšak motor zůstává. Řadový čtyřválec o objemu 598 cm³, výkon v sérii 88kW (výkon na Elišce 64kW) ze Suzuki GSX-R 600 K5. Tedy díky tomu je možnost vzít poznatky a zkušenosti z loňské formule právě z této oblasti a aplikovat je na Markétu. Jedná se primárně o – důraz na utěsnění sacího traktu, zlepšení ovládání motoru (klapka sání – geometrie a její ovládání), celkové zvýšení plnicí schopnosti válců díky upravené geometrii sání (potenciál na zvýšení výkonu), výrazné snížení hmotnosti, mít plná 3D data i se simulacemi jakožto první krok pro založení 1D modelu motoru.

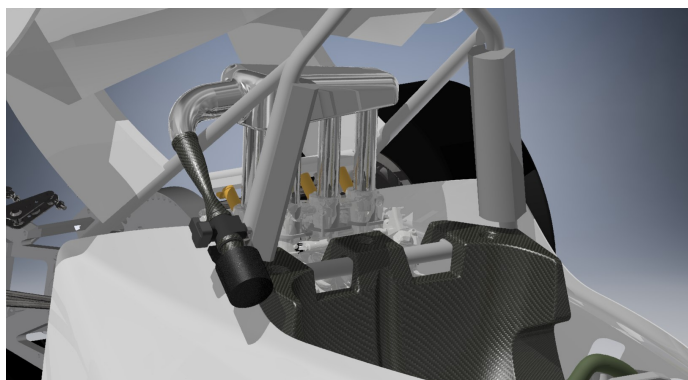
1.3 Sací trakt spalovacího motoru Markétky

Sací trakt spalovacího motoru slouží k dopravě média (vzdušiny), respektive zápalné směsi, z okolní atmosféry do válců. Zároveň slouží pro řízení otáček potažmo výkonu, k čemuž slouží tzv. škrtkávací klapka.

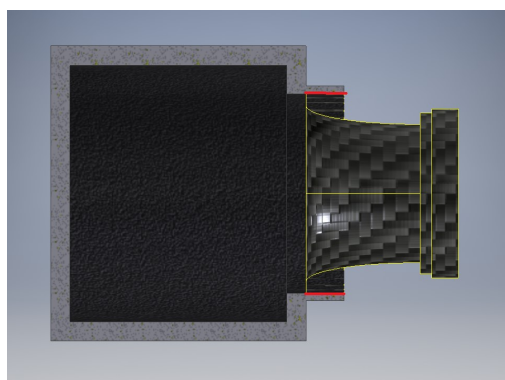
Sací trakt studentské formule se skládá, minimálně, ze součástí – škrtkávací klapka, restriktor, sací plenum, nátrubky sání. Sání Markétky je doplněno, pro zvýšení ochrany motoru, filtrem, dále pro zvýšení plnicí účinnosti trumpetkou na vstupu, trumpetkami na vstupu do nátrubků, či danými délkami nátrubků pro zajištění pulzního přepínání v žádaných otáčkách (více v kapitole 1.9)

1.4 Filtr

Velikost filtru jsem volil primárně dle zástavby sestavy sání v rámci celé formule. Vzhledem k poloze sání (Obr.1) jsem volil filtr poměrně malý s vědomím, že menší velikosti mají větší tlakové ztráty (tuto skutečnost si chci však ověřit během testování motoru na dynamometru, kdy provedu měření s a bez nasazeného filtru a porovnáím průběh a maximální hodnotu výkonu, respektive točivého momentu). Dále jsem volil filtr, právě kvůli tlakovým ztrátám, ze speciální vysocepropustné pěny. Velmi důležitým aspektem byla výstupní velikost díry filtru do sání, jenž jsem potřeboval aby se pohybovala v intervalu 46÷55mm kvůli zástavbě (myšlenkou bylo pro co nejjednodušší konstrukci nasadit filtr přímo na trumpetku, interval je dán výslednou geometrií trumpetky, jenž rozvinu v bodě 1.5). Zvolený filtr značky Pipercross má rozměry - vnější průměr 77mm, výška 77mm, průměr vstupu do sání 52mm. Filtr bude na trumpetku upevněn pomocí stahovací spony.



Obrázek 1: Zástavba sestavy sání



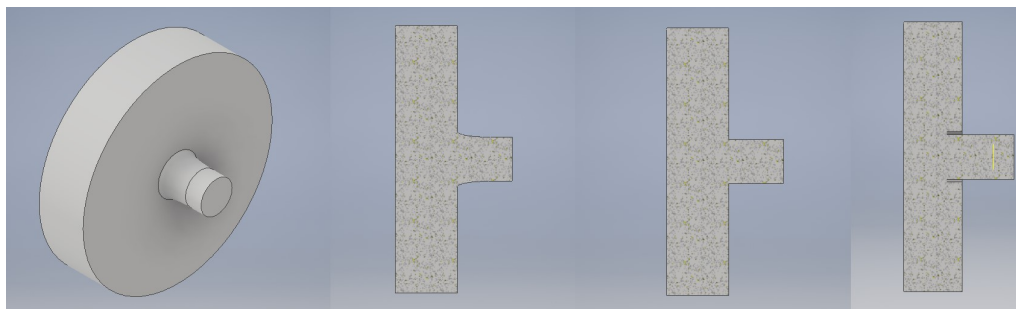
Obrázek 2: Plocha styku filtru s trumpetkou (červeně)

1.5 Trumpetka na vstupu do škrtící klapky

Důvodem pro umístění trumpetky byla snaha o snížení tlakových ztrát na vstupu do samotného sacího traktu. Pro pochopení důsledků použití různých tvarů trumpetek jsem čerpal z [2], kde díky simulacím bylo zjištěno, že neoptimálnějším profilem je profil eliptický. Na základě tohoto zjištění jsem provedl několik simulací za cílem nalezení optimální eliptické geometrie a zároveň pro potvrzení pravdivosti tvrzení ze zdroje [2]. Leč ze zdroje [2] vycházela nejlépe krátká a široká eliptická trumpetka („short and fat“), dle mých simulací tomu bylo jinak.

Simulace jsem provedl v software Autodesk CFD 2018, pro který jsem vytvořil 3D model objemu, ve kterém proudění probíhá (Obrázek 3). Na vstup jsem zvolil dostatečně velké plenum vzduchu tak, abych co nejvíce omezil chybu ve výpočtech jeho vlastním tvarem a objemem. Za konec trumpetky jsem přidal 20mm válcového objemu pro ustálení proudění. Zobrazil jsem si hodnoty statického tlaku, což odpovídá v tomto případě tlakové ztrátě, tedy zmařené energii při vstupu do sacího traktu. Pro jednotlivé geometrie trumpetek jsem tedy měnil pouze část mezi válcovým objemem a plennem. Simulace jsem prováděl pro 2 režimy proudění zohledňující proudění vyvozené sáním motoru a kritického proudění v restriktoru, jenž nastává v okolí 10500 otáček za minutu (dále rozvedu v bodě 1.7). Tedy režimy jsem volil 7000 a 12000 otáček za minutu (objemově 35 l/s a 60 l/s). Uvažoval jsem 100% objemovou plnicí účinnost.

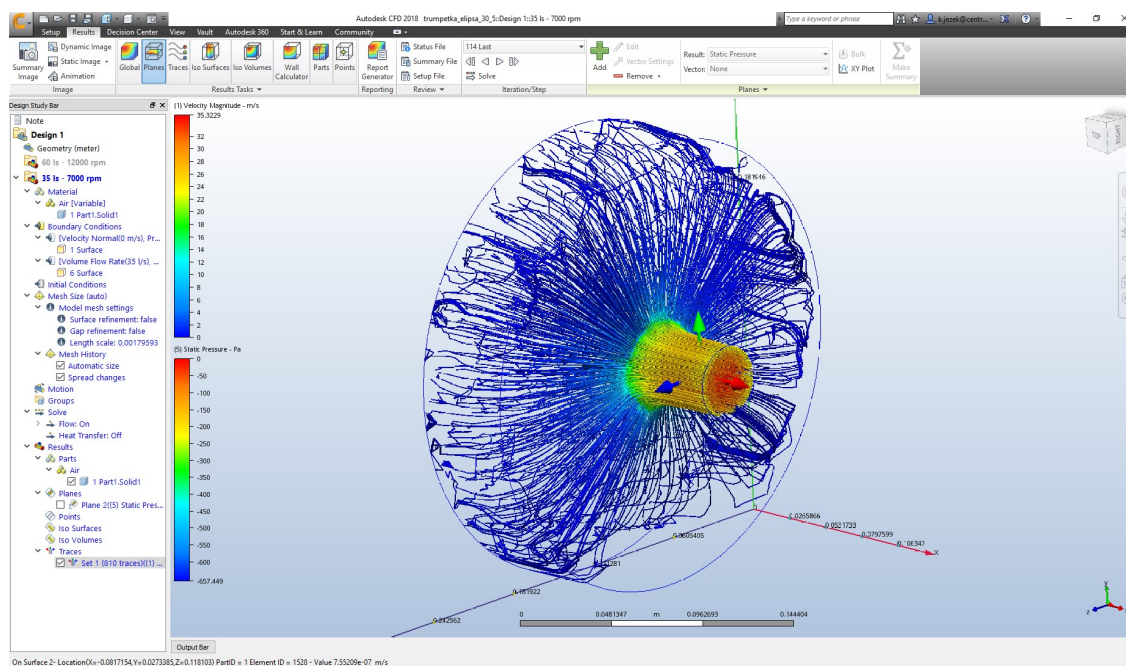
Nejnižší tlakovou ztrátou v obou režimech je, jak je vidět v tabulce výsledků (Tabulka 1), elipsa popsaná rozměry 30x5y (označení popisuje maximální rozměry čtvrtiny elipsy v kartézském souřadnicovém systému). Dále se ukázalo, že toto opatření má velký význam, poněvadž na Elišce žádná trumpetka nebyla, dokonce tam právě byl ekvivalent Ukončené trubky (Obrázek 5), což dle mých simulací vychází jako naprosto nejhorší možnost. Tedy už jen na tomto opatření získáme poměrně velkou úsporu tlakových ztrát a pravděpodobně docílíme zvýšení výkonu skrz celé spektrum otáček.



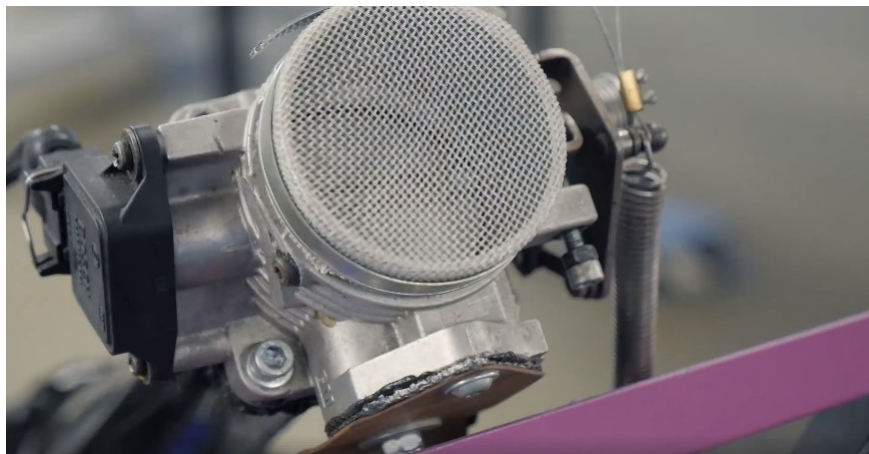
Obrázek 3: Ukázka 3D modelů objemů pro simulace proudění v Autodesk CFD 2018 (zleva: ISO pohled elipsa 30x5y, elipsa 30x5y, ostrý roh, ukončená trubka)

Tabulka 1: Tabulka tlakových ztrát trumpetky na vstupu do sacího traktu + výpis podmínek k simulaci

Boundary C.:	vstup: $p = 0$ Pa (gage), $v = 0$ m/s	výstup: $V = x$ l/s, unknown conditions	síť: min 11k	teorie: Petrov-Galerkin	poč. iterací: min 150; stlačitelný vzduch, 30°C
Elipsa			Radius		
$\rightarrow x \uparrow y$	35l/s = 7000 rpm	60l/s = 12000rpm	Rx	35l/s = 7000 rpm	60l/s = 12000rpm
30x20y	880 Pa	2558 Pa	R10		
36x20y	757 Pa	2225 Pa	R20		
40x20y	756 Pa	2223 Pa	R30		
30x25y	872 Pa	2560 Pa	R40	824 Pa	2417 Pa
40x25y	772 Pa	2259 Pa			
20x30y	961 Pa	2795 Pa			
30x5y	657 Pa	1929 Pa			
50x10y	648 Pa	1951 Pa			
Ostrý roh			Ukončená trubka		
	35l/s = 7000 rpm	60l/s = 12000rpm		35l/s = 7000 rpm	60l/s = 12000rpm
	1129 Pa	3277 Pa		1206 Pa	3528 Pa

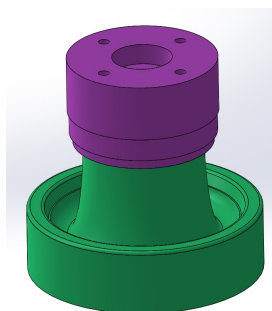


Obrázek 4: Výsledek simulace eliptické trumpetky 30x5y se zobrazenými stopami proudění a výsledky při proudění při 7000 otáčkách za minutu (35 l/s). Stopy barevně reflektují rychlost proudění.



Obrázek 5: Původní škrticí klapka na formuli Eliška o průměru 57mm. Převzata z osobního vozu Opel Astra 1,6.

Výroba – trumpetka bude vyrobena z uhlíkových vláken v autoklávu. Tento způsob výroby jsem zvolil pro zajištění co nejnižší hmotnosti a zároveň aby trumpetka nepraskla z důvodu zatížení od vzduchového filtru (to společně s nutností co nejkvalitnějšího vnitřního povrchu pro snížení tlakových ztrát vedlo k vyloučení aditivní metody 3D tisku, kde by v důsledku principu výroby vznikala hrubý povrch od jednotlivých vrstev polymeru). Forma je rotační, hliníková, dvoudílná, vyráběná na NC soustruhu. Na straně proudění leštěná. Materiál jak na formu tak přímo na trumpetku byl darován v rámci sponzorského daru, stejně tak výroba. Trumpetka bude lepena na škrticí klapku.



Obrázek 6: Skládaná hliníková forma trumpetky. Díly vystředěny osazením, spojeny šroubovým spojem.

1.6 Škrticí klapka

Škrticí klapka, jakožto jediný aktivní člen, přímo ovlivňuje chování motoru během jízdy. Mým cílem bylo získat pro piloty maximální možnou kontrolu a cít tak, aby při řízení na limitu přilnavosti, či lehce za tímto limitem, byl schopný co nejlépe regulovat přenos výkonu na zadní kola monopostu. Formule Eliška měla s tímto zásadní problém z několika důvodů a těm jsem se primárně během návrhu klapky věnoval. Jednalo se o průměr klapky (57mm – nízká rychlost proudění kolem klapky = špatná škrticí účinnost) a natáčení samotného škrticího tělesa v závislosti na poloze plynového pedálu. Dalším důležitým cílem bylo snížit hmotnost, např. využitím aditivních technologií 3D tisku.

Průměr klapky jsem volil dle rychlosti proudění doporučením dle vedoucího mé bakalářské práce (doporučil mi rozsah 40÷80 m/s podle aplikace), tedy zvolil jsem $c_1 = 60$ m/s při stavu kritického proudění. Větší rychlosti nebude možno dosáhnout (vychází z předpokladu aerodynamického ucpání restriktoru). To zároveň udává maximální hmotnostní průtok $m_{krit} = 0,0703$ kg/s, potažmo kritickou hustou vzduchu $\rho_{krit} = 0,745$ kg/m³ (výpočet kritických hodnot proudění v restriktoru v kapitole 1.7). Dále z pravidel je daný maximální průměr restriktoru, tedy $d_{krit} = 20$ mm, respektive jeho kritický průřez $A_{krit} = 3,14 \cdot 10^{-4}$ m². Hustotu vzduchu při c_1 jsem převzal z tabulek [3], pro odpovídající Machovo číslo, $\rho_1 = 0,984$ kg/m³. Nyní po sestavení rovnice kontinuity pro zachování hmotnostního průtoku lze vyjádřit průřez klapky, respektive její průměr.

$$m_1 = m_{krit}$$

$$A_1 \times c_1 \times \rho_1 = A_{krit} \times c_{krit} \times \rho_{krit}$$

$$A_1 = (A_{krit} \times c_{krit} \times \rho_{krit}) / (c_1 \times \rho_1) = 1,051 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

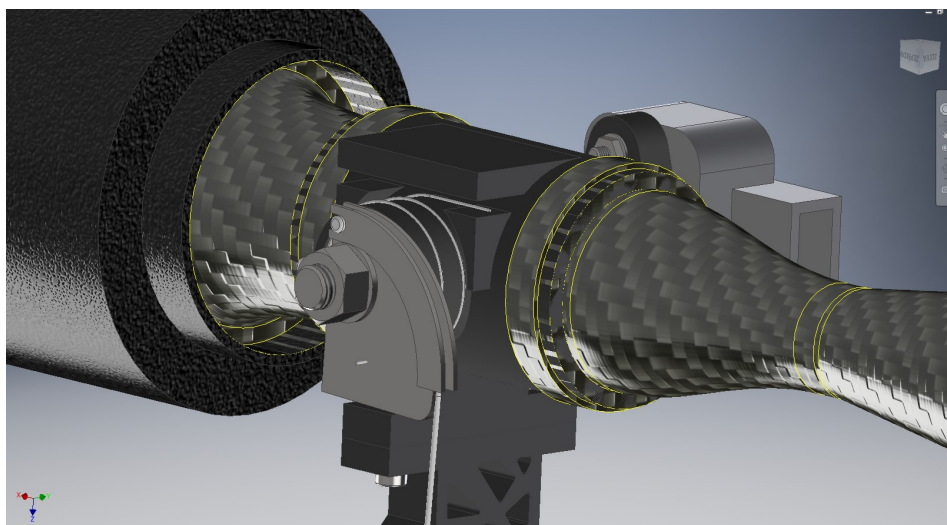
$$d_1 = [(4 \times A_1)/(\pi)]^{0.5} = 0,03659 \text{ m}^2 = 36,59 \text{ mm}^2$$

Nakonec jsem zvolil průměr 36 mm s vědomím, že samotné těleso klapky (a osička) budou další restrikcí. Pro piloty však primárně důležité mít kontrolu i v nízkých otáčkách, čemuž vyšší rychlost proudění kolem klapky dopomůže v důsledku zmenšení plochy pro médium (účinnější škrcení).

Zvolil jsem ovládání klapky pomocí lanka a bowdenu (elektronické ovládání škrtící klapky je podepřeno dalšími pravidly FSAE, jenž jsou poměrně složité ke splnění. Navíc tento způsob řízení klapky nemá u atmosféricky plněného motoru, obzvláště v naší aplikaci, žádné velké výhody. Jedinou výhodou by byla možnost automatických meziplnů při podřazování, což však z důvodu užití antihoppingové spojky nemá smysl. Další výhodou je možnost kontroly trakce přes škrcení motoru, avšak to pro Markétku neplánujeme).

Průběh natočení klapky v závislosti na natočení plynového pedálu se standardně řeší dvěma způsoby – mechanismem či vačkou, po které se odvíjí lanko. Kvůli jednoduchosti jsem navrhl rychlovýměnný systém jednoduché plechové odvíjecí vačky (viz. Obrázek 7). Vačka se skládá z hlavního plechu a dvou vodičích pro lanko (které zároveň drží kuličku bowdenu na místě), jenž budou na hlavní plech zabodovány. Hlavní výhodou tohoto řešení je výroba – plechy lze rychle a levně vypálit na laseru. Díky tomu lze udělat plechy v různých křivkách a tím lze řídit odvin lanka, potažmo natočení klapky. Toto je obrovská výhoda, poněvadž každý pilot může volit různou vačku podle toho, jakou chce mít odezvu na plyn. Toho lze využít jak pro různé tratě, tak hlavně pro různé disciplíny formule student. Například při sprintu na 100m lze volit průběh takový, aby pro start byla odezva jemnější pro přesné dávkování prokluzu při pevném startu, zatímco dále už může dojít k razantnějšímu otevírání klapky, poněvadž po rozjezdu je již potřeba držet pouze plný plyn (řazení probíhá pod plným plynem, Markétka bude vybavena tzv. quickshifterem, jenž vypíná zapalování během řazení a tím odlehčí převodovce). Zvolil jsem tedy tzv. Archimedovu spirálu (na Obrázku 6 lze vidět typ generován dle parametrického popisu v polárních souřadnicích: $R(t) = 20 + 0,1 \times t$, přičemž $t < 0; 90^\circ$). Níže v Grafu 1 lze vidět závislost rychlosti natáčení klapky na její poloze.

Vačka bude uchycena k ose materiálovým stykem (osazením) s pojištěním polohy pomocí podložky s maticí se závitem právě na ose. Pro rychlou výměnu vačky za jinou tedy stačí povolit jednu matici, sundat podložku a již lze vačku vyměnit za jiný kus.



Obrázek 7: Vačka pro odvíjení lanka ve tvaru Archimedovy spirály $R(t) = 20 + 0,1 \times t$, $t < 0; 90^\circ$.



Graf 1: Průběh rychlosti natáčení klapky v závislosti na její poloze (POZN: Pro referenci jsem zvolil rychlost odvíjení lanka 1m/s. Reálně však tuto rychlost je zbytečné kvantifikovat, jedná se tedy primárně o ukázkou průběhu).

Dle pravidel musí být na klapce 2 vratné pružiny. První, zkrutná, je natočena kolem domečku uložení osy, zachycena za tělo klapky a provlečena skrz odvíjecí vačku. Druhá, tažná, bude chycena za odvíjecí vačku k držáku celého těla klapky. Obě tyto pružiny budou slabé a budou cílit primárně na splnění podmínky 2 vratných pružin na klapce tak, aby Markétka prošla technickou přejímkou na závodech. Hlavní, nejsilnější, vratná pružina bude přímo na plynovém pedálu. Obě pružiny volím slabší pro co nejmenší zatížení sestavy klapky tak, abych jí mohl nechat vytisknout z menšího objemu materiálu a tedy ušetřil hmotnost. Dále, držák bude pomocí 3D tisknuté objímky držet za rám Markétky. To však bude naměřeno a vyrobeno až po finální kompletaci celé sestavy sání po reálné výrobě. Tento držák také bude obsahovat držák pro konec bowdenu. Opět finální rozměry se odměří až po výrobě a zástavbě sestavy sání a natáhnutí bowdenu od pedálové sestavy formule ke klapce (POZN: V den odevzdání této práce, 9.5., je sestava sání stále ve výrobě). Nastavování volnoběhu bude prováděno na negativním dorazu pedálu.

Osa klapky bude vyrobena z oceli, uložená ve 2 kluzných pouzdrech Hennlich A180FM. Z jedné strany utěsněna pomocí gufera ANSI/B93.98M 8x22x7, z druhé strany má osazení pro otáčení TPS (Throttle Position Sensor od firmy Ignitech), jenž obsahuje na dosedací ploše o-kroužek, čímž dojde k utěsnění z druhé strany.

Tělo klapky bude vyrobeno aditivně pomocí 3D tisku z uhlíkových vláken. Otvírá to možnost pro další ušetření hmotnosti. Navíc v jednom kuse lze vytisknout jak tělo klapky jako takové, tak hlavně osazení pro uchycení zkrutné pružiny, oba domečky pro uložení osy (resp. uchycení TPS) a domeček pro uchycení držáku celé sestavy k rámu Markétky. Původně byla celá koncepce řešena z hliníku, jenže časová a finanční náročnost na obrábění 6-ti 3-osých dílů nutných k zhotovení jen samotného těla klapky byla neúměrná. Navíc pomocí 3D tisku uhlíkových vláken opět snížím hmotnost a nemusím řešit napojení jednotlivých dílů na sebe (lepení/chemické pájení hliníku/ svařování).

3D tisk proběhne v rámci sponzorského daru od firmy EDAG, kluzná pouzdra a gufero dodá sponzor Hennlich, materiál na výpalek zasponzorován firmou ZF, vypalování proběhne přímo na FS.

1.7 Restriktor

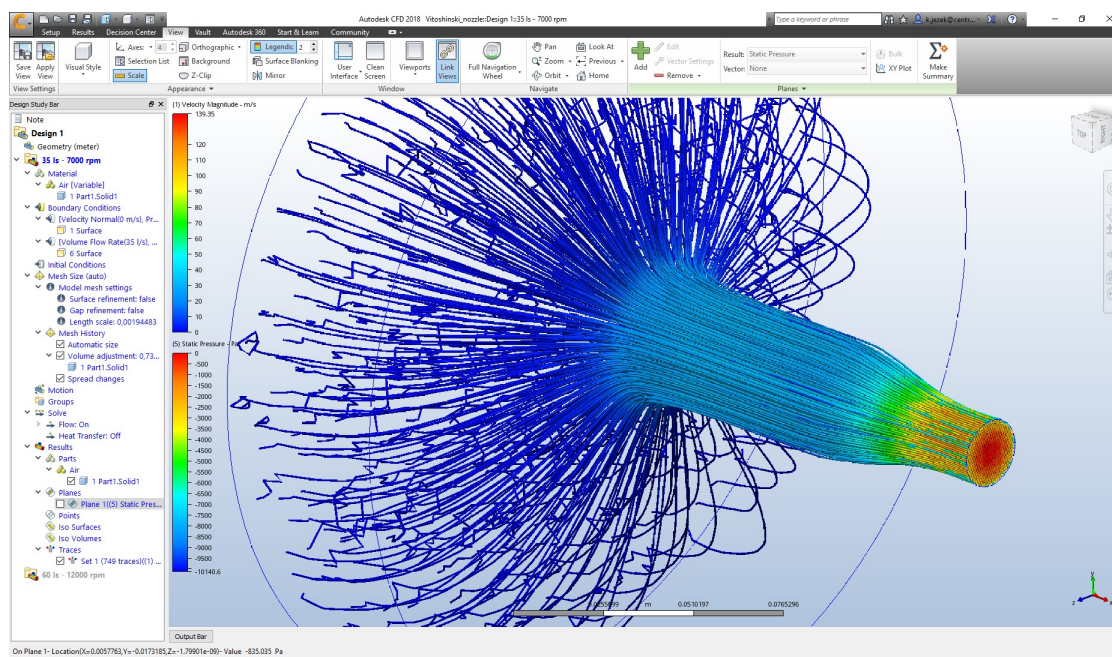
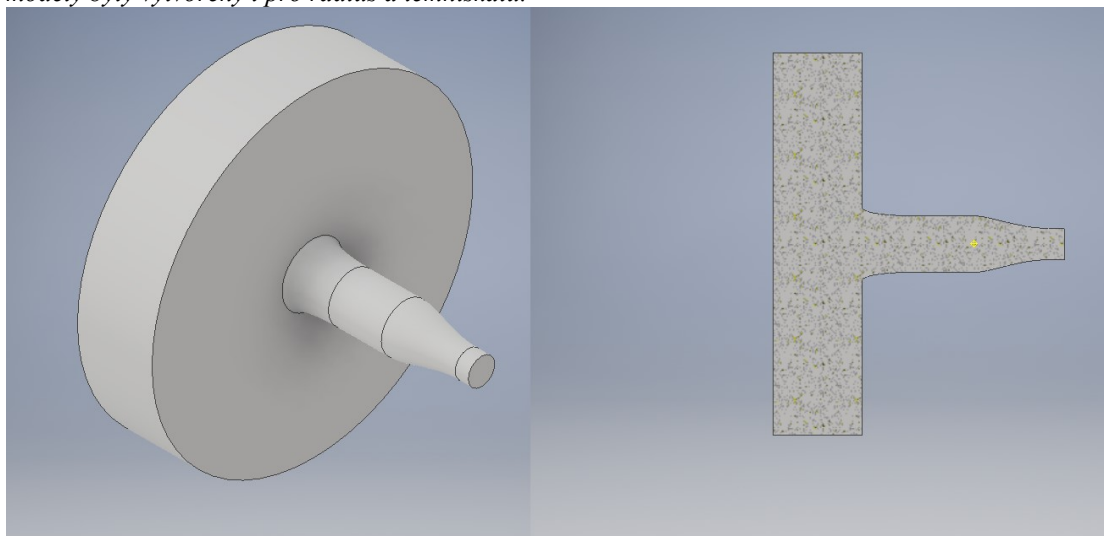
Dle pravidel FSAE [3] musí být mezi klapkou a motorem restriktor. Dalším parametrem je jeho rozměr, tedy maximální průměr (d_{krit}) je roven hodnotě 20mm. Na technické přejímce se tento rozměr kontroluje pomocí přesného trnu, jenž nesmí projít skrz. Co se týče geometrie před a za tímto kritickým průměrem, tak to pravidla nijak nepodchycují. Je zde tedy velký prostor na inovace a přínos studenta.

Restriktor jsem řešil s cílem minimalizovat tlakovou ztrátu během průtoku média jak před, tak i po dosažení tzv. kritického proudění. Zvolil jsem tedy tzv. trysku kombinovaného tvaru, nebo-li na vstupu se zužující právě na d_{krit} (konvergentní část) a následně opět se rozšiřující (divergentní část)

Kritický stav proudění nastává právě při dosažení takového poměru tlaků (vstupní / výstupní), kdy dojde k tzv. aerodynamickému ucpání trysky v nejužším místě (Machovo číslo je rovno právě 1, maximální možný hmotnostní průtok m_{krit}). Rozlišujeme tedy 4 základní stavy proudění v trysce kombinovaného tvaru podle poměru tlaků na výstupu a vstupu $p/p_0 - 1$ $p/p_0 = 1$, nedochází k proudění (Machovo číslo = 0); 2) $p/p_0 >$ kritický, proudění podzvukové v celé trysce (Machovo číslo < 1); 3) $p/p_0 =$ kritický, v nejužším místě trysky (d_{krit}) je rychlost proudění rovna právě rychlosti zvuku (Machovo číslo = 1), dochází k aerodynamickému ucpání (maximální možný hmotnostní průtok m_{krit}), za d_{krit} však proudění stále podzvukové a tedy v divergentní části dochází ke zpomalování proudění a zvyšování tlaku; 4) $p/p_0 <$ kritický, přesto že se zvýšil poměr tlaků na nadkritický, Machovo číslo v d_{krit} je stále rovno 1, avšak v divergentní části dochází k urychlování proudění na Machova čísla větší jak 1 (nadzvukové proudění) a s tím i klesá tlak. Navíc tryska je aerodynamicky ucpaná a tedy hmotnostně nelze dostat více vzduchu do motoru = princip restriktce.

Konvergentní část kombinované trysky je tedy ta část trysky, jenž je před kritickým průřezem. Hledal jsem optimální geometrii, kde bude nejmenší tlaková ztráta v celém rozsahu otáček a zároveň vyrovnaný rychlostní profil, aby ke kritickému stavu došlo rovnoměrně v celém průřezu d_{krit} . Dle publikace [4] jsem se rozhodl provést simulace pro – dvojitý radius, lemniskátu, Vitošinského trysku. Dále jsem věděl průměr vstupu (dle klapky) $d_1 = 36\text{mm}$, průměr výstupu (dle restriktoru) $d_{krit} = 20\text{ mm}$. Pro tyto parametry jsem si udělal 3D modely média, jenž jsem poté nasimuloval v Autodesk CFD dle paramaterů v Tabulce 2.

Obrázek 8: 3D model pro simulaci pro zjištění tlakových ztrát v soustavě s Vitoshinského tryskou, obdobné modely byly vytvořeny i pro radius a lemniskátu.



Obrázek 9: Výsledek simulace Vitoshinského trysky v konvergentní části restriktoru.

Výpočet kritických hodnot proudění – kritická rychlost počítána pro ideální plyn dle publikace [3] na straně 22, rovnice (2.7): $c_{krit} = \left\{ \left[\frac{2 \times \kappa}{\kappa + 1} \right] \times r \times T_0 \right\}^{0.5} = 317 \text{ m/s}$. Tato hodnota se však dle simulací liší. Liší se z důvodu výpočtu s reálným plynem s proměnnými hodnotami (např. hustoty), tedy dle simulací vychází hodnota $c_{krit} = 330 \text{ m/s}$. Kritická hustota dle rovnice (2.9): $\rho_{krit} = \rho_0 \times \left[\frac{2}{\kappa + 1} \right]^{1/(\kappa - 1)} = 0,745 \text{ kg/m}^3$. Kritický hmotnostní průtok je tedy $m_{krit} = A_{krit} \times c_{krit} \times \rho_{krit} = 0,0703 \text{ kg/m}^3$. Reálná hodnota kritického hmotnostního toku se mi nepodařila přesně určit ani dle simulací, každopádně se jedná o hodnotu blízkou, ne však vyšší jak $0,0693 \text{ kg/m}^3$ (vychází ze simulace pro 11000 otáček za minutu dle příložené Tabulky 3).

Boundary C.:	vstup: p = 0 Pa (gage), v = 0 m/s	výstup: V = x l/s, unknown conditions	sít: min 30k	teorie: Petrov- Glarkin	poč. iterací: min 100; stlačitelný vzduch, 30°C
Radius			Vitošinského tryska		
Rx	35l/s = 7000 rpm	60l/s = 12000rpm		35l/s = 7000 rpm	60l/s = 12000rpm
R36	12600 Pa	30251 Pa		10140 Pa	26698 Pa
	142,9 m/s	244,97 m/s		139,35 m/s	238,8 m/s
Lemniskáta					
	35l/s = 7000 rpm	60l/s = 12000rpm			
	11604 Pa	29177 Pa			
	141,1 m/s	241,9 m/s			

Tabulka 2:
Hodnoty
tlakových ztrát
pro jednotlivé
vybrané
geometrie
konvergentní
části
kombinované
trysky

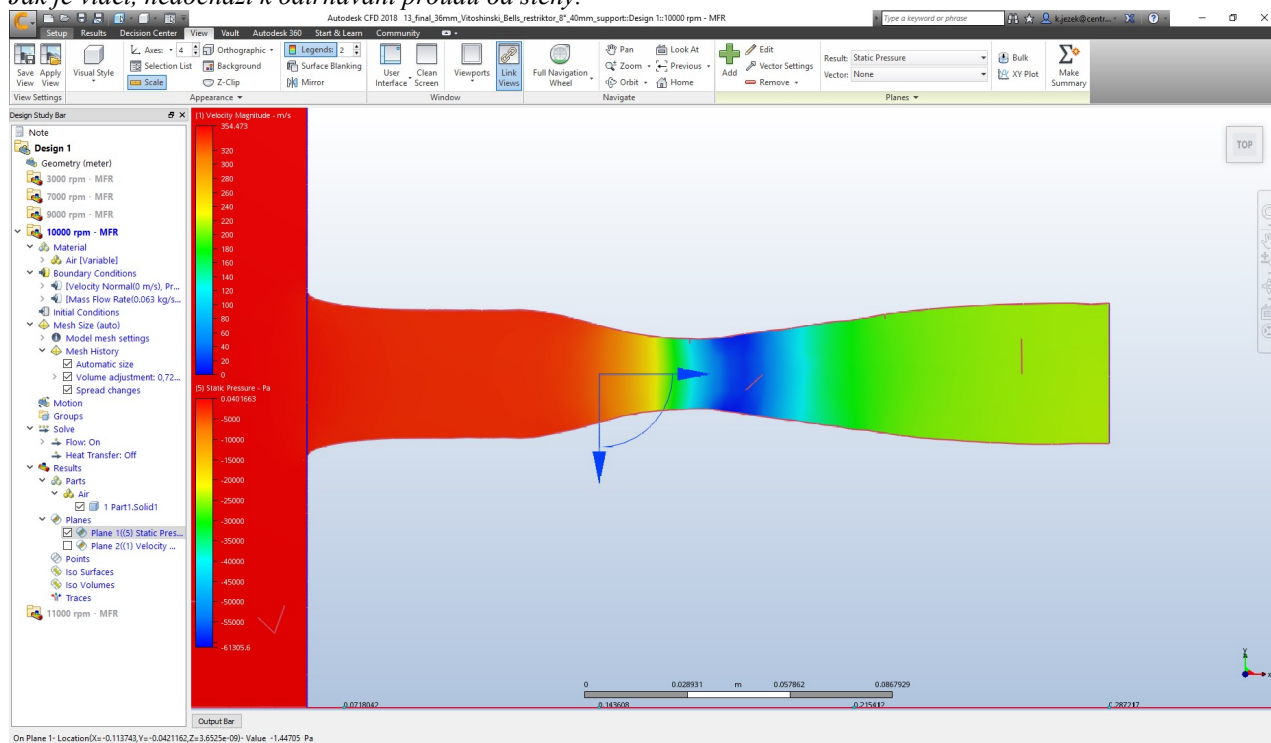
Návrh divergentní části trysky, respektive celého restriktoru, probíhal opět za účelem snížení tlakových ztrát. Jelikož se však jedná o difuzor, tedy o expanzi, může docházet k jevům jako například odtrhnutí proudu od stěny difuzoru (přeexpandovaná tryska) či ke kolmým rázovým vlnám (při nadzvukovém proudění, pak se divergentní část mění na trysku). Obojí vzniká při příliš velkém úhlu rozevření divergentní části kombinované trysky. Dále jsem hledal geometrii s co největší účinností při expanzi a trysku, jenž co nejlépe usměrní médium ve směru toku. Dle přílohy [4] jsem se rozhodl pro užití takzvané Bellovy trysky, tedy trysky s parabolickým průběhem. Dále jsem se rozhodl, že výstup z trysky bude větší jak vstup do konvergentní části, tedy $d_2 = 40\text{mm}$. Udělal jsem tak z důvodu snížení rychlosti proudění před kolenem do plenna sání a tím pádem snížení ztrát místními odpory v koleni. Tyto ztráty jsou dány vztahem $p_z = \xi \times \rho \times (c^2/2)$, kde koeficient odporu je konstanta, hustota se mění jen v promilích původní hodnoty, ale rychlost je ve kvadrátu, tedy to je nejlogičtější volba při snaze snížit ztráty.

Simulace jsem prováděl s obdbočnými okrajovými podmínkami jako při simulacích trumpetek, avšak místo objemového průtoku jsem zadával průtok hmotnostní. Během simulací jsem však zjistil, že při použití Bellovy trysky dochází k odtrhnutí proudu od stěny a tedy k masivním turbulencím a tedy ke ztrátám. Proto jsem na začátek trysky, za prvotní radius, implementoval jednoduchou kónickou trysku (lineárně se zvětšující průřez), jenž je pouze zakončena tryskou Bellova typu. Nyní jsem již pouze zkoušel úhel rozevření kónické části, kde mi nejlépe vyšel úhel 8° . Při hodnotě 6° dle simulací dokonce došlo dříve ke kritickému stavu proudění. Výsledná geometrie trysky kombinovaného tvaru je tedy – konvergentní část je Vitošinského tryska, divergentní je spojením Bellovy trysky s kónickou.

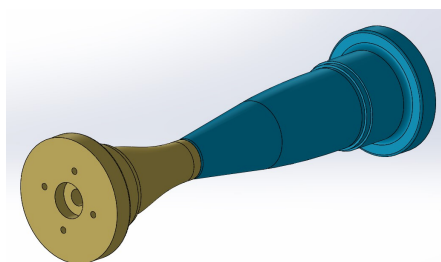
Tabulka 3: Ukázka výpočtu zadávaných hodnot do simulace a výsledné tlakové ztráty za restriktorem v různých otáčkách motoru. Pro 6° jsem simuloval pouze 2x v okolí kritického proudění, kde se ukázalo, že ztráty jsou znatelně. Další simulace tedy neměly smysl.

Průtoky, tlakové ztráty									
objem 4 válců:	litry	dm3	m3						
	0,6	0,6	0,0006						
objem 1 válce:	litry	dm3	m3						
	0,15	0,15	0,00015						
počet sacích zdvihů/ot	2	2	2						
objem nasátý na 1 otáčku	litry	dm3	m3						
	0,3	0,3	0,0003						
otáčky 1/min	3000	7000	9000	10000	11000	13000			
otáčky 1/s	50,0	116,7	150	166,6667	183,3	216,7			
objemový průtok/s xxxx 1/min	litry/s	dm3/s	m3/s						
objemový průtok/s 3000 1/min	15,000	15,000	0,01500						
objemový průtok/s 7000 1/min	35,000	35,000	0,03500						
objemový průtok/s 9000 1/min	45,000	45,000	0,04500						
objemový průtok/s 10000 1/min	50,000	50,000	0,05000						
objemový průtok/s 11000 1/min	55,000	55,000	0,05500						
objemový průtok/s 13000 1/min	65,000	65,000	0,06500						
plocha na konci restriktoru A2 mm2	0,00125	Rychlost zvuku:	317	hustota:	hmotnostní průtok:	ztráta na výstupu:	rychlost na výstupu:	ztráta na výstupu:	rychlost na výstupu:
rychlost na konci restriktoru 3000	12,00000	Machovo č.:	0,03785	1,269492	0,01904	2572 Pa	14,1 m/s		
rychlost na konci restriktoru 7000	28,00000		0,08833	1,265936	0,04431	4877 Pa	32,6 m/s		
rychlost na konci restriktoru 9000	36,00000		0,11356	1,261618	0,05677	10031 Pa	42,2 m/s	17932 Pa	54,8 m/s
rychlost na konci restriktoru 10000	40,00000		0,12618	1,260094	0,06300	18924 Pa	55,6 m/s	41800 Pa	77,9 m/s
rychlost na konci restriktoru 11000	44,00000		0,13880	1,259332	0,06926	56308 Pa	106,2 m/s		
rychlost na konci restriktoru 13000	52,00000		0,16404	1,269746	0,08253				

Obrázek 10: Výsledek simulace průtoku celou sestavou trumpetka/klapka/restriktor. Vyzobrazen statický tlak. Jak je vidět, nedochází k odtrhávání proudu od stěny.



Výroba restriktoru proběhne obdobně jako u trumpetky. Kvůli tepelné dilataci jsem zmenšil průměr restriktoru na $d_{krit} = 19,94 \text{ mm} (+0; -0,02)$



Obrázek 11: Dvoudílná hliníková forma restriktoru. Díly vystředěny osazením, spojeny šroubovým spojem.

Vstupní parametry:	MAX průměr restriktoru d_{max}	20 mm	
	teplota formy při obrábění T_1	300 K	27 °C
	teplota formy v autoklávu T_2	403 K	130 °C
	MAX DOVOLENÝ průměr restriktoru	19,99 mm	0,01999 m
	teplotní roztažnost hliníku α	0,000023 m/K	
POZN:	karbon se po protažení autoklavem již nesmrští! = průměr formy 19,99mm musí být při 403K/130°C		
Výstupní parametry	$\delta d = \alpha \cdot d \cdot \Delta T$	4,73563E-05 m	
	průměr formy na obrábění $d_f = d - \delta$	0,019942644 m	19,94264 mm
	rozměr d_f na výkres	19,94 mm	
	tolerance na výkres	0 mm	
		-0,02 mm	

Tabulka 4: Návrh rozměrů formy restriktoru

1.8 Pulzní přepřňování

Z důvodu omezujícího rozsahu této práce přeskočím složitý návrh plenna sání a rozepíši se ohledně pulzního přepřňování a jeho významu pro naši aplikaci.

Pulzní přepřňování je vlastně využití přetlakových, respektive podtlakových (u výfuků pro lepší výplach spalín z válce), vln uvnitř sání. Tato přetlaková vlna vzniká při nárazu vzdušiny na – a) ventil (překážka, v tu chvíli uzavřený kanál) ; b) výstup (vstup) do sacího kanálu, tedy rozhraní dvou oblastí. Vlna tedy vzniká po uzavření sacího ventilu, kdy vzdušina má díky své rychlosti a hmotnosti setrvačnost. Jenže náhlým uzavřením ventilu dojde k nárazu a tedy vzniku přetlakové vlny v nátrubce. Tato přetlaková vlna cestuje, kmitá, mezi oběma konci kanálu (ventil / vstup do nátrubky) rychlostí zvuku. Při vhodném načasování (délce nátrubky) dojde přetlaková vlna k sacímu ventilu právě ve chvíli jeho otevření a dojde tak k lepšímu plnění válce. Nevýhodou je, že s přetlakovou vlnou vzniká i vlna podtlaková a tedy je nutné opatrně volit délky nátrubek tak, aby naopak nedošla podtlaková vlna do válce a tím naopak nezhoršila plnění. Z principu je jasné, že rychlost zvuku lze považovat za konstantu, avšak časové intervaly otevírání sacích ventilů se liší dle otáček motoru. Proto pulzní přepřňování působí jen ve velmi omezeném

rozsahu otáček (lze konstruovat proměnnou délku sání, to však na Markétku nemáme v plánu aplikovat). Z tohoto důvodu je na nás, abychom si určili, v jakém pásmu otáček chceme motor „posílit“. Na sprint na 100m by bylo ideální posílení na vrchní spektrum otáček, kde se začíná či dál více projevovat vliv restriktoru, avšak formule student má i jiné disciplíny – okruhový závod. Vzhledem k množství bodů, jenž tento závod má oproti sprintu na 100m, je vhodnější posílit motor spíše pro tuto disciplínu. Největší časové ztráty pilot nabírá v nízkých rychlostech (průjezdy zatáčkou a výjezdy z nich), kde je motor zpravidla ve středním pásmu otáček. Rozhodl jsem se tedy posílit motor v oblasti 8000 otáček za minutu (omezovač nastaven na 13000 otáček za minutu). V tabulce 4 je návrh délky nátrubků.

Tabulka 4: Návrh vzdálenosti ventil – trumpetka pro pulzní přepřehování

Návrh délky nátrubků	
1 válec 1 sací zdvih za 2 otáčky	
otáčky [1/min]	8000
otáčky [1/s] = frekvence	133,3
perioda jedné otáčky [s]	0,0075
perioda sacího zdvihu [s]	0,0150
rychlost zvuku vzduchu [m/s]	317
vzdálenost vlny mezi sacími cykly [m]	4,7550
potřeba vydělit na přibližně celé číslo (vlna se x-krát odrazí do doby, než se otevře sací ventil) = navrhují délku 0,25 m	19,0200
Návrh délky ventil - trumpetka 0,25m vyhovuje i z pohledu zástavby sacího traktu	

1.9 Závěr

Moji letošní práci na sání pro Markétu беру jako základní kámen, jenž jsem položil, pro odsimulování celého sání na budoucí monoposty. Mým cílem tedy nebylo určit přesně na jednotky Pascalů tlakové ztráty a podobně, ale ukázat směr, jakým se v budoucnu mohou moji následovníci ubírat při řešení proudění v motoru. Velký potenciál vidím v odladění správné velikosti škrtící klapky pro optimální kontrolu a zároveň aby sama klapka nebyla restrikcí. To samé s filtrem. Dalším důležitým aspektem je velikost plenna sání, která přímo ovlivňuje reakci na plyn a maximální výkon motoru.

Další oblastí mého zájmu v budoucnu je nastavení úhlu vstupu sání tak, aby docházelo k náporovému sání, změřit jeho účinky a dopady (zda má v našich rychlostech smysl). Rád bych také příští rok rozvinul myšlenku proměnné délky nátrubků sání, poněvadž nám to pravidla FSAE umožňují.

Velmi se těším na testování s piloty z pohledu, že jsem jim dal možnost měnit si průběh natočení klapky dle jejich libosti. Doufám, že se můj systém osvědčí a pomůže týmu FS TUL Racing získat vynikající výsledky jak při dynamických disciplínách formule student, tak při prezentaci našeho stroje, naší Markětky.

1.10 Literatura

- [1] SAE INTERNATIONAL, *2017-18 Formula SAE® Rules*, 13.09.2017
Dostupné z: <https://www.fsaeonline.com/content/2017-18-FSAE-Rules-091317.pdf>
- [2] GORDON P. BLAIR, W. MELVIN CAHOON, *Special Investigation: Design of an intake bellmouth*
Dostupné z: http://www.profbclairandassociates.com/pdfs/RET_Bellmouth_Sept.pdf
- [3] ING. VÁCLAV DVOŘÁK, PH.D., *Úvod do proudění stlačitelných tekutin*, Fakulta strojní, Liberec: Technická Univerzita v Liberci, ISBN 978-80-7372-458-0, 2009
- [4] JIŘÍ ŠKORPÍK., *Proudění plynů a par tryskami, Transformační technologie, 2006-02*, Brno, Dostupné z: <https://www.transformacni-technologie.cz/40.html#menu>

OPTIMALIZACE ZADNÍ NÁPRAVY STUDENTSKÉ FORMULE TUL

Kolomazník Martin

Sekce – STROJÍRENSTVÍ,

Fakulta strojní, 3. ročník

Bakalářský studijní program – B2301 BAKALÁŘSKÝ PREZENČNÍ

Abstrakt: Zaměření této práce je na optimalizaci zadní nápravy studentské formule TUL s cílem dosažení lepšího konstrukčního uspořádání jednotlivých dílů se zlepšením jízdních vlastností, vzhledového designu a využití lehčích slitin materiálu. Práce je rozdělena na dvě části. Teoretická část obsahuje popis studentské formule, rozbor jednotlivých druhů uložení nápravy a ukázkou stávající zadní části studentské formule a inspirací na novou zadní část. Praktická část se zaměřila na popis souřadnicového systému, vstupní údaje pro novou optimalizovanou zadní část, konstrukční postup modelování včetně problematiky a finální verzi nové optimalizované zadní nápravy. Závěrem práce je porovnání stávající zadní části s novou optimalizovanou zadní částí.

Klíčová slova: optimalizace, studentská formule, náprava, zadní část, CREO, zavěšení, nezávislé, závislé, MacPherson, konstrukce

1 Úvod

V projektu studentské formule je snaha o postavení závodního vozu s dobrými jízdními vlastnostmi, designem a schopnostmi, které jsou následně předvedeny na závodech, kde mezi sebou jednotlivé týmy soupeří. Cílem práce je zkonstruovat optimalizovanou zadní část pro novou studentskou formuli TUL, která bude mít vhodnější konstrukční uspořádání s dosažením lepších jízdních vlastností a zabudováním i dílů, které současná formule ještě neměla.

2 Teoretická část

1.1 Studentská formule [1]

Je mezinárodní soutěž s účastí přesahující 500 univerzitních týmů po celém světě. Úkolem je navrhnout a následně sestavit formuli, se kterou se následně soutěží proti ostatním týmům v různých disciplínách i závodech, kde se testují jízdní vlastnosti a schopnosti celého týmu.

Tým má za úkol postavení jedno místní formuli dle vlastní představivosti s dosažením co nejlepších jízdních vlastností s velkým důrazem na pravidla, které jsou nutnou podmínkou v technické přejímce před závody.

Závody se dělí na statické a dynamické disciplíny, v kterých tým získává body. Tým, který získá nejvíce bodů z 1000 možných bodů je vítězem.

V první fázi tým prezentuje konstrukční řešení, technickou stránku, ekonomické zhodnocení a analýzu nákladů na postavení studentské formule. V druhé části je kladen důraz na bezpečnost pilota, probíhá kontrola celého vozu, spolehlivost brzd, netěsnosti, kvalita zpracování, rozměry kokpitu a další.

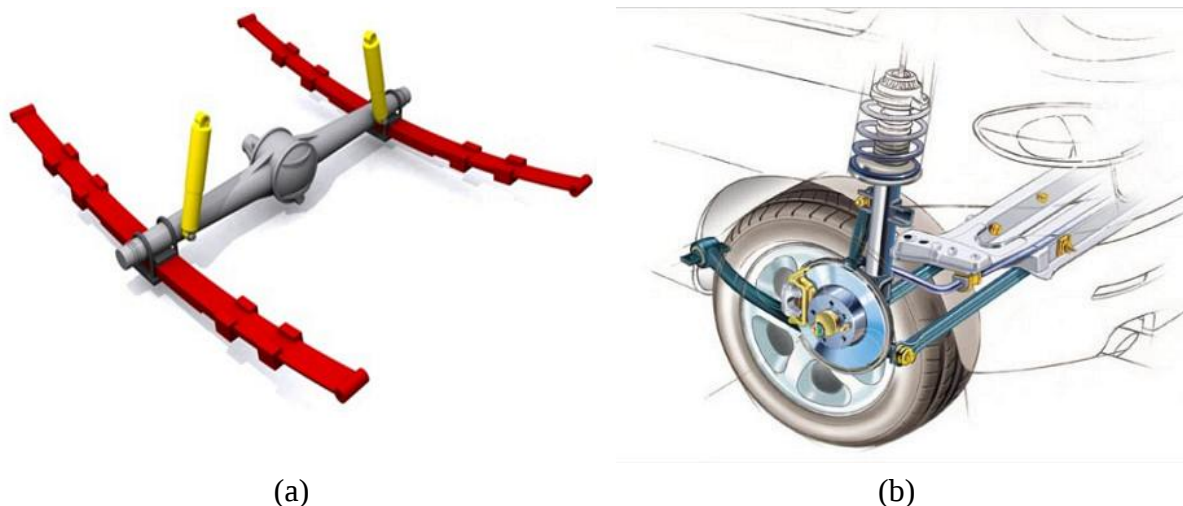
Zábavnější jsou následující zkoušky již na připravené trati, kde se týmy utkají jednotlivě po sobě v akceleračním souboji, průjezdu osmičkou, autokrosu a vytrvalostním závodě na 22 kilometrů s výměnou pilotů.



Obrázek 1: Foto studentské formule

1.2 Konstrukční řešení uložení náprav [2]

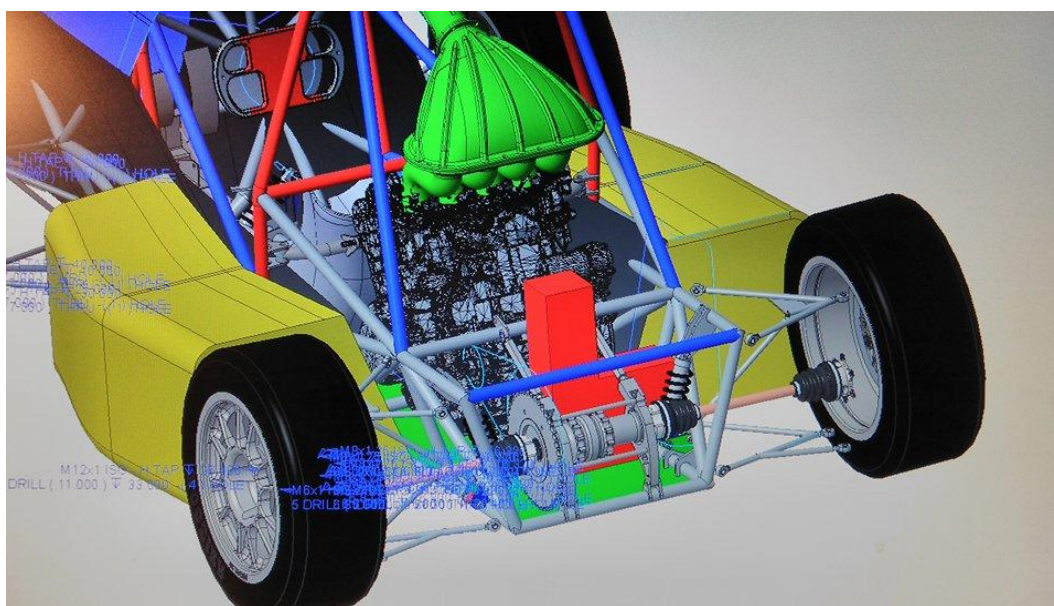
Cílem uložení náprav je propojení kol se zbytkem rámu s dosažením potřebných vlastností. Zavěšení kol se dělí na Závislé a nezávislé zavěšení. Závislé patří mezi nejstarší provedení, kde pevná hřídel propojuje levé i pravé kolo, jak je znázorněno na obr. 2 v levé části (a). Tato hřídel je následně pomocí ložisek spojena pevně, nebo s odpružením k rámu. Tento druh zavěšení je běžně používán i v dnešní době, jelikož je velice jednoduchý a levný, tím i geometrie zavěšení kol je bez odklonů a dalších vlastností. Nezávislé zavěšení kol, jak je znázorněno na obr. 2 v pravé části (b), oproti závislému zavěšení, již nemá pevnou hřídel, ale pravé a levé kolo není pevně spojené, ale pouze propojené například stabilizačními prvky. Zavěšení je například tvořeno pomocí vzpěry MacPherson. Tento druh se častěji používá u přední nápravy, ale bez použití axiálního uložení tlumiče, lze tento druh použít i na zadní nápravu. Nezávislé zavěšení kol zajišťuje přesnější kontrolu pohybu kola, utlumení vibrací a tím i zlepšení pohodlí jízdy. Složitější zavěšení kola je s použitím více prvkové nápravy, která se skládá z více nezávislých ramen, pomocí níž lze dosáhnout lepšího kinematického pohybu kola. Všechny vlastnosti se také projeví ve zvýšené složitosti nápravy a také pořizovací ceně.



Obrázek 2: (a) Závísle zavěšení kol, (b) Nezávislé zavěšení kol.

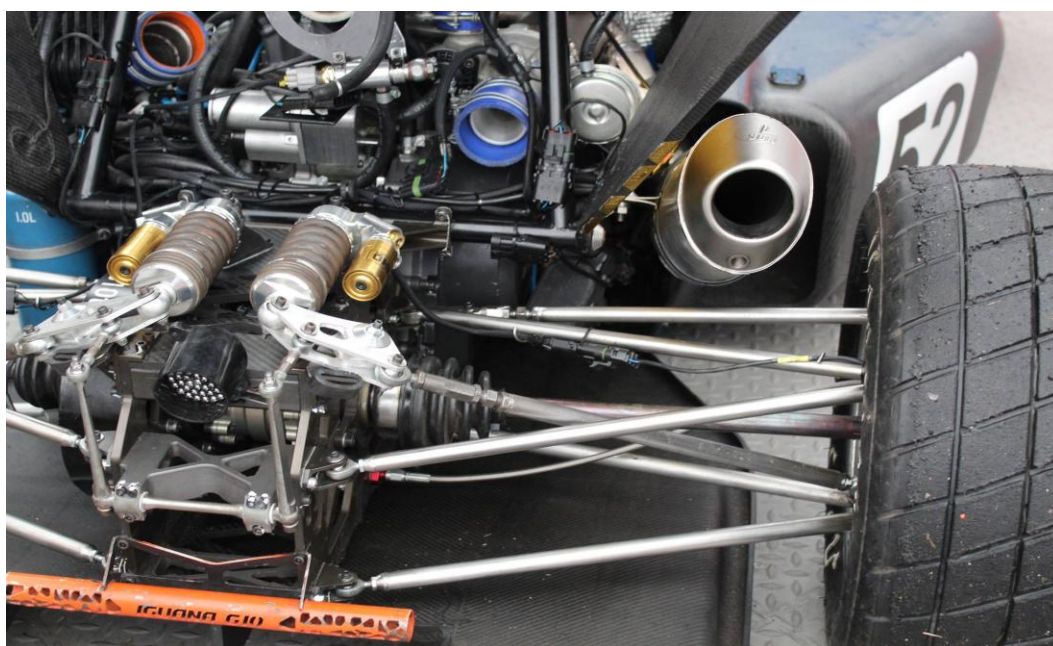
1.3 Původní zadní část a inspirace na nové zadní uložení

Původní zadní část studentské formule TUL s názvem Eliška. Řešením zadní části formule bylo vytvořeno svařením trubek do tvaru, který je zobrazen na obr. 3 níže uvedeném. Pro potřebnou geometrii kol byly zvoleny body pro uložení náprav. Trubky jsou následně svařeny a propojeny v uzlových bodech uložení náprav. Zadní část rámu je pevně svařena se zbytkem rámu. Jednotlivé úchyty pro uložení diferenciálu, odpružení a vahadel jsou přivařené na trubkový rám v místech, kde plní svou funkci. Jelikož není možné dosáhnout vhodného uspořádání trubek tak, aby byly namáhány pouze tahem, nebo tlakem, jsou některé části také namáhány na ohyb. Zvolené rozměry trubek byly větší, aby rám dokázal tyto nevhodné namáhání také eliminovat. Pro uchycení kol k rámu slouží dvě trubky v horní části a dvě v dolní části uložení kola s odpružením v zapojení do pull-rod tj. tyč spojující vahadlo s nápravou je namáháno na tah.



Obrázek 3: Foto stávající zadní části studentské formule TUL

Inspirací pro zadní část druhé studentské formule TUL s názvem Markétka se stala formule, zkonstruovaná konkurenčním týmem ukázka je na obr. 4 níže uvedeném. Základem řešení zadní části studentské formule, bylo využití desek, které jsou mezi sebou propojené vyztužením. Na desky je možné na různá místa, dle potřeby, přidělat úchyty jak na uložení náprav, tak ale i stabilizační a tlumící prvky. Desky tvoří kompletní zadní část studentské formule, která je následně přidělena za pomoci šroubových spojů k trubkovému rámu, který tvoří zbylou část studentské formule. Hlavní výhodou tohoto provedení spočívá v tom, že je možné dosáhnout větších rozměrů nápravy propojující rám s těhlicí na kole. Větší vzdálenost sice způsobuje menší tuhost náprav, ale dojde k výraznému zlepšení geometrie kola v celé oblasti chodu odpružení zadní nápravy. Jedná se o velice komplexní sestavu, obsahující velký počet dílů, bez kterých se formule nemůže obejít, ale také je možné rozšířit o prvky, které pomohou ve zlepšení, jak jízdních, tak i konstrukčních vlastností studentské formule.

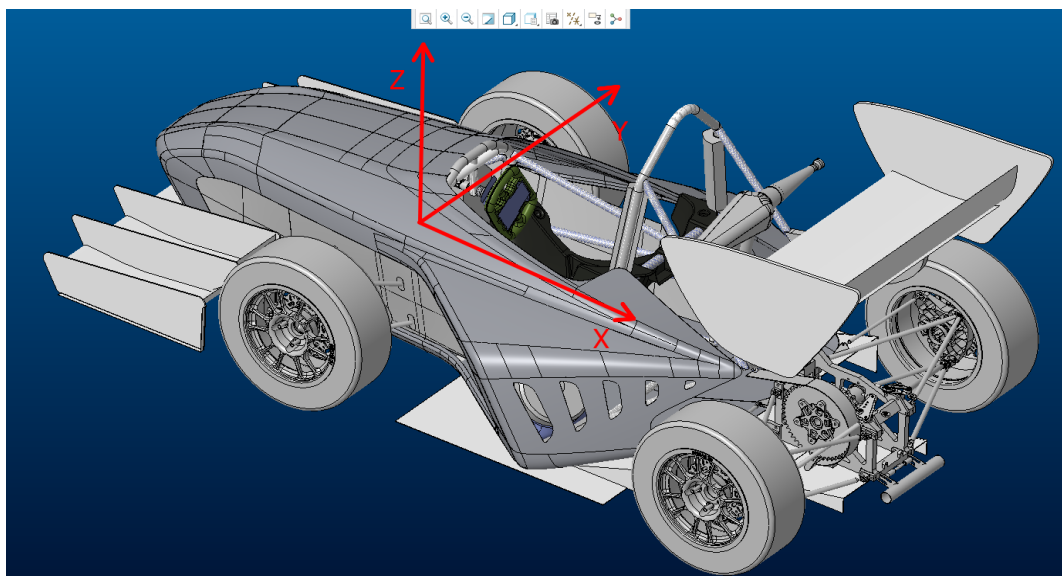


Obrázek 4: Foto inspirace zadní části studentské formule

3 Praktická část

2.1 Souřadnicový systém

Pro modelování druhé studentské formule TUL, se rozhodlo o použití programu na modelování s názvem PTC Creo Parametric 3.0 M050, díky snadnému přístupu se školní licenci a vyučováním v tomto programu. Souřadnicový systém je již zobrazený na téměř hotovém modelu studentské formule TUL s názvem Markétka na obr. 5 níže. Počátek je vložený do místa osy předních kol. Osa Y je orientovaná ve směru osy kol s kladnou orientací doprava ve směru jízdy studentské formule. Osa X je vedena středem studentské formule vodorovně se zemí s kladnou orientací dozadu. Osa Z je orientována kolmo k zemi s kladnou orientací vzhůru od osy předních kol. Díky tomuto centrálnímu souřadnicovému systému je možno snazšímu zavazbení jednotlivých částí studentské formule v jeden velký celek.



Obrázek 5: Foto souřadnicového systému studentské formule

2.2 Postup modelování

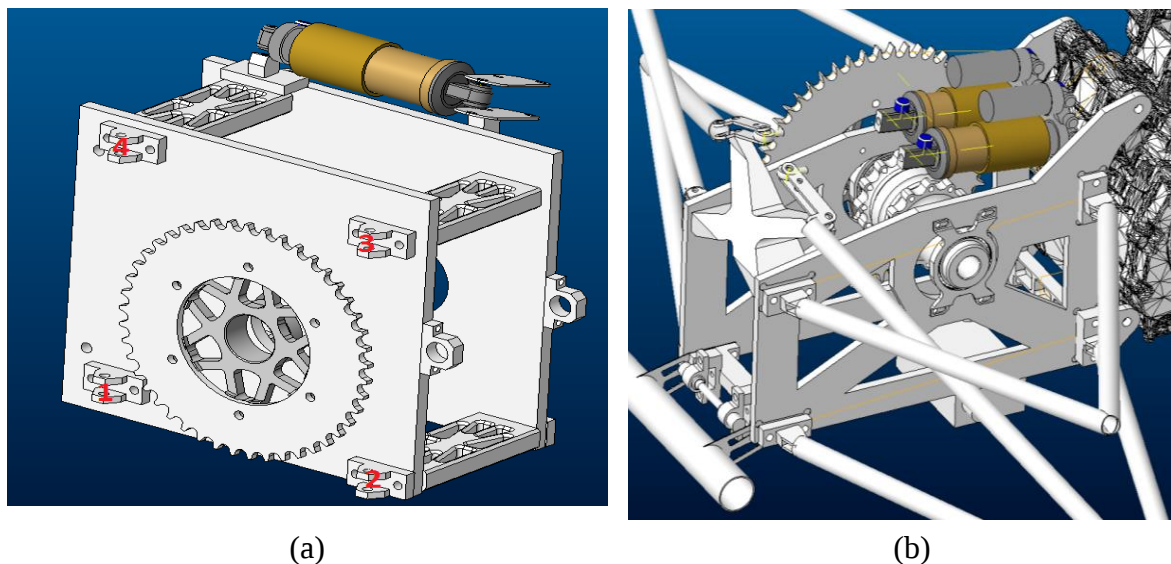
Jelikož se jedná úplně o nový projekt zadní části studentské formule, která nemá téměř nic společného se stávající verzí, bylo třeba vycházet aspoň z některých hodnot kvůli předběžné představě o konstrukci jednotlivých částí. Některé díly není třeba měnit za jiné modely, jelikož se osvědčili, že plní svou funkci velmi dobře, a proto budou použité i v novém projektu studentské formule například: diferenciál, tlumiče, ložiska na uložení diferenciálu, řetězový převod a také úchyty na bloku motoru, za které celá zadní část bude přidělaná. Body pro uložení zadní nápravy na rámu jsou také využity, jako vstupní parametry, ale hodnoty bude vhodné pozměnit z důvodu lepšího konstrukčního uspořádání jednotlivých dílů a také ke zlepšení jízdních vlastností a potřebných úhlů odklonu na uložení kola.

Při prvním návrhu zobrazeno na obr. 6 v levé části (a), se vycházelo z inspirace provedení konkurenčního týmu a vstupních hodnot pro uložení náprav, velikosti řetězového převodu, tlumičů a diferenciálu ze stávajícího projektu studentské formule TUL.

Při dalším postupu zadní části bylo zapotřebí tento celek spárovat se zbytkem nového projektu studentské formule. Jelikož dochází k uložení desek částečně k motoru a také i ke zbytku rámu, proběhla domluva o uložení polohy motoru na rozložení hmotnosti a lepší polohu těžiště celé formule. Zadní část je již možné párovat pouze s motorem, kvůli snaze o jednoduchou demontáž a snadnému přístupu k motoru je možné zadní část modelovat pouze k motoru bez ohledu zbylého rámu studentské formule. Po připojení a ustanovení polohy zadních desek vůči motoru, začala optimalizace bodů pro uchycení zadní nápravy. Pro využití většího počtu rychlostních stupňů motoru a tím dosažení vhodného rozsahu otáček při rychlostech na závodním okruhu, byl změněn počet zubů na rozetě ze 46 na 52 zubů. Díky této úpravě se změnila i velikost rozety, tak i ochranného krytu, a tak při návrhu již velikost rozety, bylo potřeba zavrhnout do polohy bodu uložení, aby nevznikly možné kolize. Pro zlepšení geometrie kol bylo potřeba dodržení určitých vlastností bodů pro uložení náprav (přímkové propojení horních i spodních bodů, náklony bodů uložení) a také byla snaha o co nejmenší změnu geometrie v důsledku zadního odpružení studentské formule. Na odpružení zadní části, se použily tlumiče z předchozí studentské formule. Tyto tlumiče kvůli provedení je potřeba použít jiného stylu uložení, než je naznačeno při prvním návrhu. Je třeba dosáhnout uchycení horního oka tlumiče z obou stran, aby se předešlo deformaci tlumiče. Volba napínacího zařízení řetězu je použita technika z motocyklu, kde je napínání zajištěno

polohou šroubu s aretačními prvky. Ložiska pro uložení diferenciálu budou uchycena v domečkách, které umožní použití této technologie napínání řetězového převodu. Uložení diferenciálu lze také udělat v provedení pevném a následovně je dopínání řešeno pomocí třetího řetězového kolečka, které dopíná řetězový převod.

Velký problém, který navazoval při návrhu dalšího postupu při modelování, bylo spodní oko tlumiče na odpružení, jelikož potřebná délka rozteče ok byla krátká. Zde postupoval návrh možných konstrukčních uspořádání odpružení, aby bylo dosaženo všech potřebných vlastností ke správné funkci odpružení. Konečnou volbou při návrhu odpružení se stal celek obsahující pouze jedno vahadlo. Vahadla pro oba tlumiče jsou konstrukčně uchyceny na rámu v podobě písmene X, torzní a stabilizační tyč je uchycena na zadním spodním propojení desek, které bude propojené s vahadly a následně je již vyobrazena podoba náprav, kvůli lepší představě a názornosti. Na modelu je také znázorněna trubka v zadní části, která slouží ke zvednutí studentské formule a následné montáži, či demontáži kol či jiných dílů. Důraz byl také kladen na nízkou hmotnost vozu, a proto bylo třeba desky začít konstrukčně odlehčovat, při zachování všech potřebných vlastností zadní části. Upravená verze zadní části studentské formule je včetně náprav zobrazena na obr. 6 v pravé části (b) níže uvedeném.



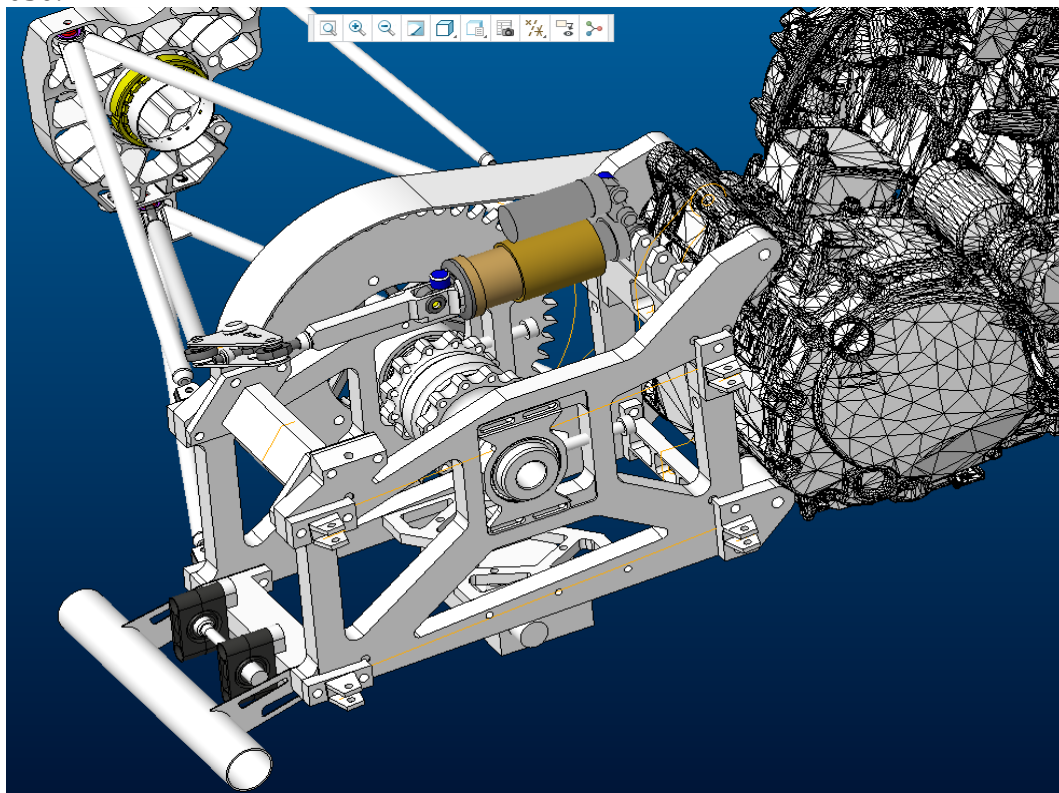
Obrázek 6: (a) První návrh, (b) Před finální verze.

2.3 Finální verze zadní části studentské formule

Finální verze optimalizované zadní části druhé studentské formule TUL s názvem Markétka je zobrazena níže na obr. 7 níže, již obsahuje všechny konstrukční náležitosti, které bylo v plánu udělat. Základ zadní části studentské formule je tvořen pomocí dvou hlavních duralových desek o tloušťce 20mm, na které jsou následně jednotlivé prvky zadní nápravy, odpružení, uložení diferenciálu a servo řazení uchycené pomocí šroubových spojů. Jednotlivé domečky pro uchycení náprav obsahují úhly odpovídající směru jednotlivých náprav v klidové poloze, aby bylo dosaženo optimálního stavu namáhání a kloub se pohyboval v co nejmenším vychýlení od střední polohy. Diferenciál je uložen v kuličkových ložiskách vložených ve vodícím posuvném uložení, které umožňuje nastavovacím šroubem dopínání řetězového převodu. Nastavovací šroub byl v poslední chvíli přemístěn z důvodu levnějšího provedení, a tak šroub se již přímo opírá o uložení diferenciálu. Odpružení zadní části studentské formule zkonstruováno v provedení push-rod, kde dochází k namáhání

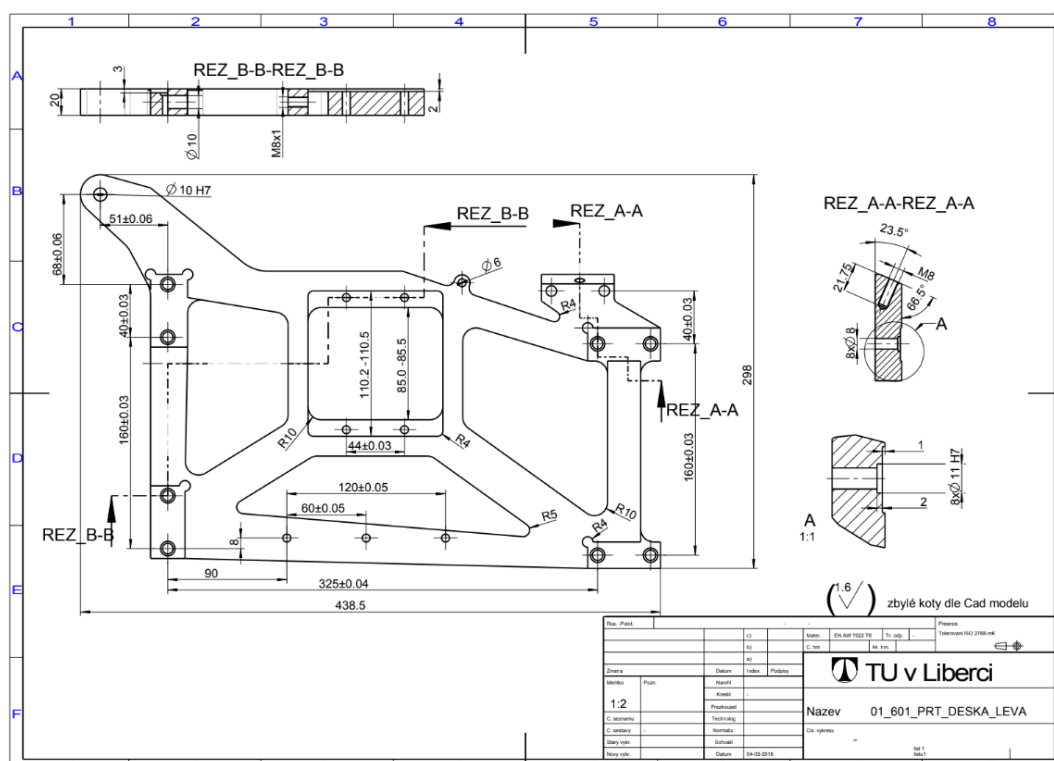
propojovací tyče na tlak. Jsou použity tlumiče z předchozí verze studentské formule TUL, kde pro zvětšení volné délky tlumiče je použita vzpěra propojující spodní oko tlumiče s okem uloženým na vahadle. Horní oko tlumiče je uloženo v otočném domečku na propojovacím prvku desek. Uložení vahadel je vytvořeno v horní zadní části desek pod potřebným úhlem, ale docházelo k eliminaci axiálních sil na vahadlo. Ve spodní části je uchycené servo na řazení pomocí propojovacího prvku, který zvyšuje i patřičnou tuhost zadní části studentské formule. Obě desky v místech uložení náprav jsou vzájemně propojeny vzpěrami, které vyztužují desky mezi sebou a také slouží jako úchyty pro další potřebné konstrukční prvky zadní části. Materiál použitý na většinu dílů, které se budou vyrábět pro zadní část je zvolen dural s názvem EN AW 7022 T6, jelikož má výborné vlastnosti, velkou pevnost a malou hmotnost.

Součástí optimalizace jednotlivých dílů byla i výpočetní část, která vycházela z rozložení hmotnosti studentské formule na jednotlivá kola při daných stavech. Následný přepočet působících sil na jednotlivé body uložení nápravy a výpočet konstrukčních spojů na jednotlivá namáhání. Dále byla provedena i simulace celé zadní části v programu PTC Creo Simulate 3.0 M050.



Obrázek 7: Foto finální zadní části druhé studentské formule TUL

Jednotlivé díly se následně zadaly do výroby. Součástí byly vytvořené výkresy s potřebnými tolerancemi a drsnosti jednotlivých rozměrů a hlavní rozměry dílu. Výkres níže uvedený na obr. 8 se týká dílu 01_601_PRT_DESKA_LEVA.



Obrázek 8: Foto Výkresu Desky levé části

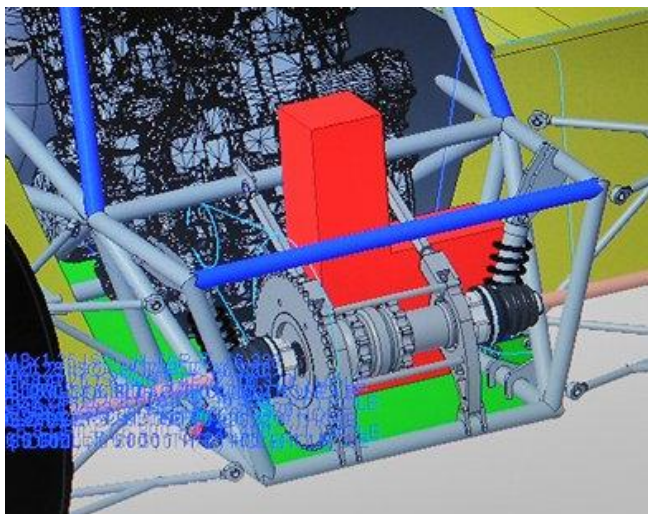
4 Závěr

Na níže uvedeném obr. 9 je ukázka stávající zadní části první studentské formule TUL s názvem Eliška zobrazené v levé části (a) a v pravé části (b) je zobrazena nová optimalizovaná verze zadní části druhé studentské formule TUL s názvem Markétka.

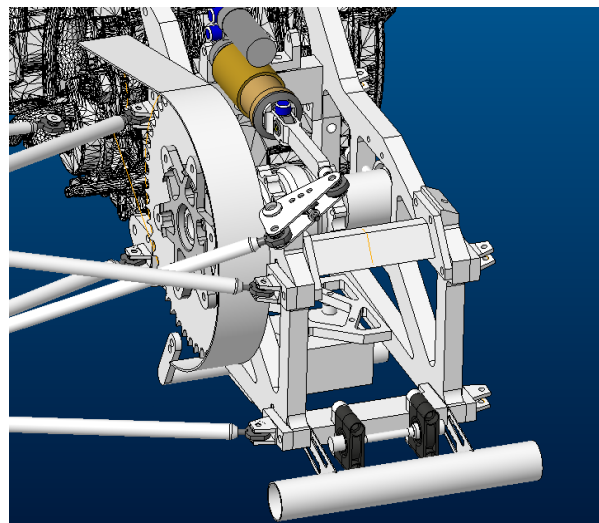
Výhodou nové zadní části studentské formule je vysoká výrobní přesnost, jelikož všechny díly jsou vyráběné na CNC strojích. Pro zadní část, která byla dříve celá svařovaná, bylo nedílnou součástí zhotovení přesného a velkého svařovacího přípravku, již tato technologie u nové zadní části není potřeba, protože všechny díly jsou spojeny pomocí šroubových spojů. Svařovací přípravek již pro zadní část odpadá. Materiál již není ani tepelně ovlivněn, kvůli svařování a proto vlastnosti materiálu zadní části jsou homogenní v celém svém objemu. Díky šroubovým spojení je zaručena snadná montáž a demontáž jednotlivých dílů. Zadní část je konstruována jako celek, který jde včetně motoru snadno vyjmout od zbytku studentské formule povolením pár potřebných šroubových spojení. Díky zvětšené vzdálenosti mezi body uložení náprav a těhlicemi se dosáhlo lepší geometrie zavěšení kol a pro lepší jízdní vlastnosti došlo také i k zabudování stabilizačních a torzních prvků. Ve spodní části zadního celku je také uloženo servo na řazení rychlostních stupňů. Díky tomuto propojovacímu členu bylo dosaženo lepší tuhosti celé zadní části při simulaci, jelikož dochází ke znatelnému propojení desek mezi sebou.

Žádná práce se neobejde bez záporu a proto i nová optimalizovaná zadní část studentské formule TUL má i nepříznivé stránky. Hlavní nevýhodou nové zadní části je kladeno na výrobní náklady jednotlivých dílů, jelikož veškeré díly jsou potřeba obrábět ze surových polotovarů. Kvůli nepřesnému teoretickému výpočtu zatížení není možné novou zadní část optimalizovat na co nejoptimálnější hodnoty, jelikož doposud nejsou známy přesné velikosti zatěžujících sil na zadní část studentské formule a proto zadní sestava bez náprav, motoru, diferenciálu, a tlumičů má hmotnost necelých 7 kilogramů. Tato sestava je jistě těžší

než pár po svařovaných trubek včetně příčných úchytů. I přes to, že šroubové spoje jsou výhodou, kvůli snazší montáži a demontáži jednotlivých dílů, tepelně neovlivňují jednotlivé díly zadní části, tak je kladen velký důraz na zajištění většího počtu šroubových spojů proti povolení dle závodních pravidel.



(a)



(b)

Obrázek 9: (a) První návrh, (b) Před finální verzí.

Literatura

- [1] Studenská formule. *Student Formula Liberec* [online]. V Liberci: Nezmáné, 2017 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <http://studentformula.tul.cz/>
- [2] Zadní náprava. *CAD.CZ* [online]. neznámé: neznámé, 2012 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/3457-zadni-naprava-osobniho-automobilu.html>

VLIV PROCESNÍCH PARAMETRŮ TECHNOLOGIE SELECTIVE LASER MELTING NA POROZITU VÝSLEDNÉHO VÝROBKU

Véle Filip

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,

Fakulta strojní, 3. ročník

Bakalářský studijní program – STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

Abstrakt: Cílem této práce je analýza vstupních parametrů technologie Selective Laser Melting (SLM) a jejich vlivu na výstupní strukturu materiálu. V této práci byly ovlivňovány dva parametry, a to výkon laseru a jeho rychlost. Vyhodnocovaným parametrem procesu byla porozita materiálu, která je jedním z hlavních hledisek úspěšného 3D tisku z kovových prášků. Při plánování a provedení experimentu byly použity principy metody Design of Experiments (DOE) a pro vyhodnocení vlivu zvolených faktorů na porozitu byl použit ANOVA test. Výsledky ukazují, že největší vliv na porozitu má nastavení hodnoty výkonu laseru. Hlavním zjištěním této práce je fakt, že je možné využívat metody DOE pro analýzu vstupních parametrů pro SLM proces. Dále se ukazuje nutnost většího počtu replikací testu pro dosažení vyšší statistické významnosti ANOVA testu.

Klíčová slova: Selective Laser Melting, SLM, Design of Experiments, DOE, Porozita

1 Úvod

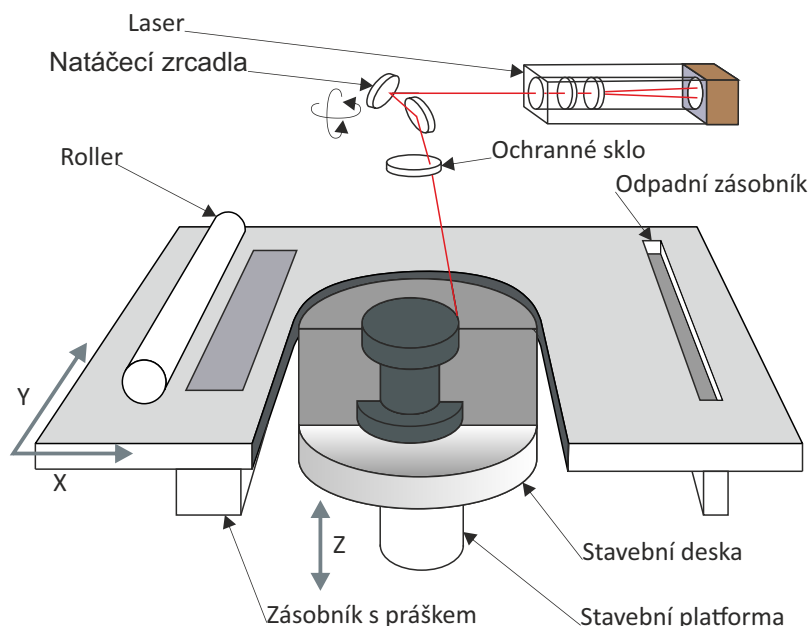
Aditivní technologie je odvětví, které se v poslední době velmi rychle rozvíjí a to zejména díky potřebě průmyslu snižovat náklady na výzkum a vývoj nových produktů. Začátky 3D tisku sahají do devadesátých let dvacátého století, kdy se pro tisk začaly využívat převážně plastové materiály nebo foto-polymery. Průkopníkem ve 3D tisku se stala firma 3D Systems, která jako první představila technologii Stereolitography (SLA). Po tomto milníku se začaly rozvíjet další technologie plastového 3D tisku, mezi které patří například FDM, SLS, Polyjet a jejich další modifikace.

Výhodou využití aditivní technologie oproti konvenčním technologiím je v téměř neomezené geometrické variabilitě požadovaného dílu. Vzhledem k těmto možnostem je nutné změnit myšlení konstruktérů a designerů při návrhu dílu, aby byli schopni využít veškerý potenciál aditivních technologií. Aditivní technologie najdou své uplatnění napříč celým průmyslem, avšak zatím nejsou určeny pro velkosériovou výrobu. Své místo nalézají při tvorbě funkčních prototypů, designových návrhů a dalších aplikacích, při kterých jsou konvenční metody dražší a časově náročnější.

V posledních letech se začaly rozvíjet aditivní technologie výroby, které jsou schopny zpracovávat kovové prášky a vytvářet tak plně funkční kovové díly. Jako příklad lze uvést technologie Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Selective Laser Melting (SLM) a Electron Beam Melting (EBM). Tisk z kovových prášku je velmi užitečnou technologií, protože je díky ní možné vytvářet například složité obráběcí nástroje a vnitřně chlazené vložky do vstřikovacích forem za velmi krátkou výrobní dobu. Úspěšný tisk z kovového prášku stojí na hlubokých znalostech všech procesních parametrů a jejich vlivu na konečný výrobek

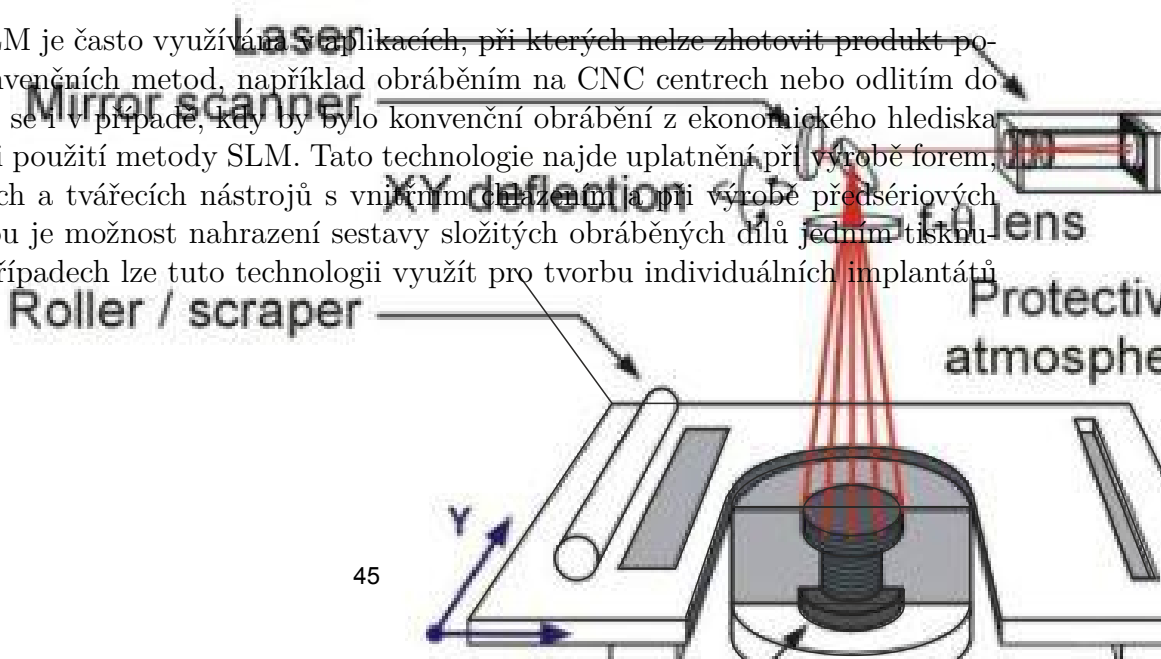
2 Selective Laser Melting

Selective laser melting (SLM) je aditivní technologie výroby, která umožňuje velmi rychle vytvořit plně funkční kovové produkty s téměř neomezenou variabilitou geometrie. SLM je práškovou technologií, při které se nanosený prášek taví díky působení energie z výkonného laseru. Po vypálení jedné vrstvy klesá stůl o výšku vrstvy a probíhá nanosení prášku. Poté se celý cyklus opakuje až do zhotovení poslední vrstvy. Tento proces je znázorněn na obr. 1. Díly, které vzniknout touto technologií bývají zpravidla postavené na podpůrných strukturách, které napomáhají odvodu tepla a redukují vznikající deformace dílu. Deska, na které probíhá proces stavby, může být vyhřívána, což napomáhá ke snížení vnitřního pnutí v dílu. Komora, ve které proces probíhá, je vyplněna inertní atmosférou, která zabraňuje oxidaci dílů při stavbě [9].



Obrázek 1: Princip technologie SLM. [4]

Technologie SLM je často využívána v aplikacích, při kterých nelze zhotovit produkt pomocí známých konvenčních metod, například obráběním na CNC centrech nebo odlitím do formy [5]. Využívá se i v případech, kdy by bylo konvenční obrábění z ekonomického hlediska nákladnější než při použití metody SLM. Tato technologie najde uplatnění při výrobě forem, složitých obráběcích a tvářecích nástrojů s vnitřním chlazením a při výrobě předseriesových dílů. Další výhodou je možnost nahrazení sestavy složitých obráběných dílů jedním tisknutým. V určitých případech lze tuto technologii využít pro tvorbu individuálních implantátů do lidského těla.



3 Procesní parametry

Správnou volbu procesních parametrů, které přímo ovlivňují stavební proces a kvalitu výrobků, je nutné provést ve fázi pre-procesingu, protože je není možné změnit v průběhu tisku [1]. Výsledné vlastnosti výrobků z technologie SLM ovlivňuje více než 150 procesních parametrů a díky tomu vzniká velká variabilita nastavení všech těchto parametrů.

Procesní parametry lze rozdělit do několika skupin a to na ty, které souvisí s nastavením laseru, stavební strategií, inertní atmosférou a vlastnostmi prášku. Rozlišujeme 4 parametry, které jsou stěžejní pro úspěšný tisk:

- rychlost skenování v [mm/s]
- výkon laseru P [W]
- vzdálenost mezi drahami laseru h [μm]
- tloušťka vrstvy t [μm]

Tyto hlavní parametry jsou zahrnuty v tzv. **hustotě energie** E [J/mm³], která je vyjádřena rovnicí 1. Hodnotu E lze použít pro rychlou úpravu hlavních parametrů například při požadavku na zvýšení skenovací rychlosti. [9, 7].

$$E = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} \quad (1)$$

Mezi další faktory ovlivňující díl patří vypalovací strategie a teplota předehřevu, která má velký vliv na snižování tvorby vnitřního napětí.

4 Prášková ocel H13

Plynovou atomizací taveniny oceli H13 lze získat její práškovou verzi. Takto zpracovaná ocel se využívá v aditivních technologiích. U této práškové verze je nutné brát v potaz, že neplatí mechanické vlastnosti a struktury, které jsou známy pro válcovanou ocel H13. Pro použití této oceli ke tvorbě produktů je zapotřebí výzkum procesních parametrů, které mají vliv na strukturu a mechanické vlastnosti. Dále je nezbytné zabránění tvorby prasklin způsobených vysokým vnitřním pnutím vznikajícím během procesu SLM. Chemické složení testované práškové oceli H13 je uvedeno v tabulce 1.

prvek	Fe	C	Cr	Mn	Mo	Si	V
[%]	balance	0,39	5,05	0,29	1,61	0,9	1,1

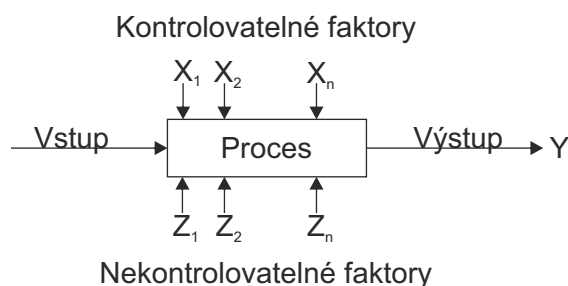
Tabulka 1: Chemické složení práškové oceli H13

Zpracování práškové oceli H13 metodou SLM je velmi složitý proces, při kterém vzniká velké napětí napříč dílem. Dále se při technologii SLM projevuje změna struktury s každou

další vytavenou vrstvou. Tento jev nastává z důvodu opakovaného protavení již hotových vrstev. Problematika zpracování této oceli se stala zdrojem pro zkoumání velkého množství týmů po celém světě. Jejich práce se věnují například mechanickým vlastnostem, struktuře a vnitřnímu pnutí [6, 3].

5 Základy DOE

Metoda DOE je schematicky znázorněna na obr. 2. Na tomto schématu jsou znázorněny všechny faktory, které mohou vstupovat do procesu. Mezi kontrolované patří ty faktory, které lze pevně nastavit nebo jinak ovlivnit. Nekontrolovatelné faktory obsahují vlivy, které není možné ovládat (např. šum).



Obrázek 2: Postup při využití metody DOE

Na výstupu se sledují požadované parametry (odezvy), které se poté pomocí analytických metod porovnávají se zvolenými vstupními parametry. Metoda DOE obsahuje tři základní pravidla, která souvisí s volbou počtu testovacích vzorků a jejich pořadí při provádění experimentu [2, 8]:

1. **náhodnost**
2. **replikace**
3. **rozdělení do bloků**

Využitím náhodnosti lze předejít systematické a osobní předpojatosti při sestavování testu. Pro úspěšný DOE test je nezbytné, aby pořadí jednotlivých vzorků bylo zvoleno náhodně. K tomu jsou využívány generátory náhodných čísel [8].

Dalším je pravidlo replikace. Tím se rozumí aplikování náhodnosti i pro další úrovně testů v řadě. Není tedy možné vzít stejné nastavení testu a udělat jej několikrát v řadě. Tím by byla do procesu vnesena chyba v podobě opakování stejných testů. Replikací se tedy rozumí použití stejných vstupních parametrů pro test, ale v jiném pořadí než předchozí testy [8].

Posledním pravidlem je rozdělení do bloků. Toto pravidlo se hodí, když test obsahuje velké množství vstupních parametrů a velké množství replikování testů. Princip spočívá ve sloučení určité části vzorků do bloku a provedení experimentu a vyhodnocení testů v rámci tohoto bloku. [2, 8].

6 Plán experimentu

Návrh procesních parametrů bývá realizován na tzv. singletracku. Po odladění parametrů pro singletrack se přechází na objemové těleso, kde předchozí parametry nemusí fungovat a je třeba nalézt nové. Z tohoto důvodu byl zvolen jiný přístup a to hledání parametrů za pomoci metody Design of experiment. Tato metoda nabízí potenciál zkoumání vlivů jednotlivých parametrů a jejich kombinací. Metoda DOE byla zvolena též z důvodu ne příliš velkého rozšíření při návrhu procesních parametrů pro aditivní technologie.

Experimenty byly prováděny dle tzv. "full factorial" návrhu, kde se všechny zvolené vstupní parametry a jejich nastavené úrovně kombinují. Pro dva zvolené vstupní faktory (výkon laseru a rychlost skenování) byly zvoleny $k = 3$ úrovně nastavení. Z toho pak vychází počet vzorků n na jednu replikaci testu dle rovnice 2:

$$n = k^2 = 3^2 = 9 \quad (2)$$

Pro vytvoření souboru ke statistickému vyhodnocení byly dále dle požadavků DOE zvoleny 3 replikace testu. Celkem tedy bylo vyhodnocováno 27 vzorků. Při experimentu byly vytvořeny data pro tisk a vytisknuty zkušební vzorky. Dále byly vzorky upraveny na vyhodnocení vnitřní porozity. Proběhlo jejich rozříznutí, zalití do pryskyřice Polyfast a vyleštění metalografického řezu. Na mikroskopu proběhlo focení řezu a vyhodnocení porozity. V poslední fázi došlo ke zhodnocení dat pomocí ANOVA testu a byl posouzen vliv jednotlivých veličin na porozitu.

7 Příprava dat

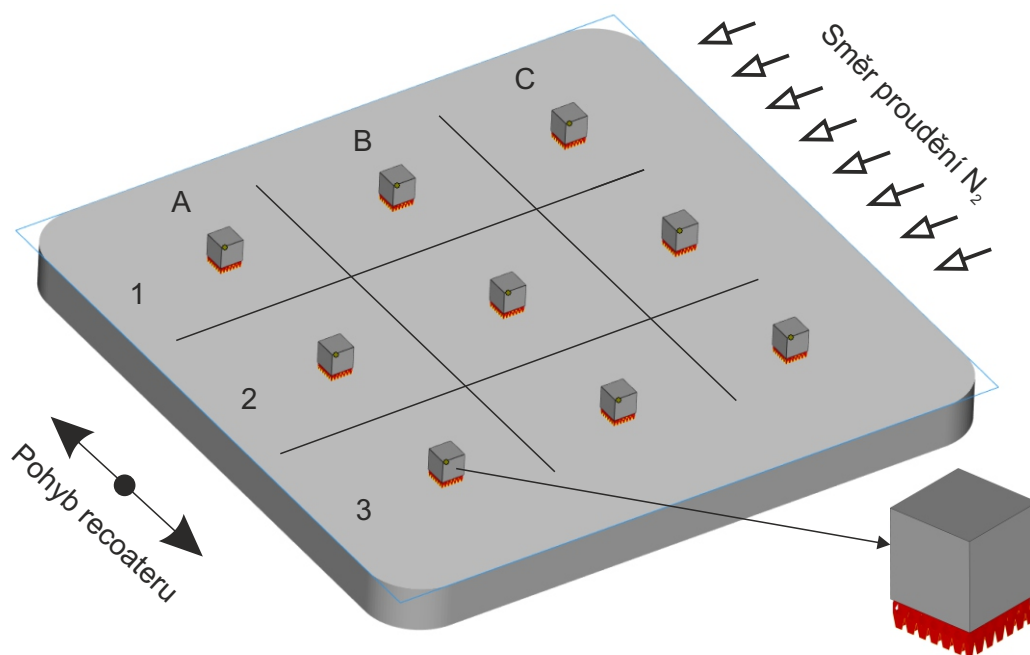
Pro tento experiment byly zvoleny zkušební vzorky o rozměrech 10x10x10 mm. Ty byly vymodelovány pomocí softwaru Autodesk Inventor 2018 a převedeny do formátu STL. Tato data byla otevřena v softwaru Magics 21 (Materialise NV), kde proběhlo umístění vzorků na stavební platformu. Spojení vzorků se stavební deskou bylo realizováno pomocí blokové podpůrné struktury.

Rozmístění zkušebních vzorků bylo provedeno dle obr. 3. Pro tento experiment bylo určeno rozprostření po celé ploše desky, aby bylo možné zhodnotit případný vliv pozice na kvalitu struktury. Dále proběhla příprava dat pro tisk, při které byly jednotlivým vzorkům přiděleny parametry tisku (viz tabulka 2, obsahující všechny možné kombinace zvolených parametrů).

č. kombinace	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P [W]	170	170	170	260	260	260	350	350	350
v [mm/s]	1400	540	970	1400	540	970	1400	540	970

Tabulka 2: vstupní hodnoty

Při využití principu randomizace, která je dalším kritériem při použití analytické metody DOE, bylo nezbytné zajistit, aby rozmístění vzorků na platformě probíhalo náhodně. Toho



Obrázek 3: Rozmístění zkušebních vzorků na platformě.

bylo docíleno pomocí náhodného generátoru v programovacím jazyku Python. Výsledná náhodnost pro jednotlivé replikace je znázorněna v tabulce 3. V další fázi této práce budou jednotlivé vzorky označovány např. 1A2, přičemž první číslo určuje číslo replikace. Písmeno určuje pozici sloupce ve stejné tabulce a druhé číslo určuje pozici řádku v tabulce 3. Po nastavení parametrů jednotlivých vzorků byl vygenerován soubor obsahující nastavené parametry.

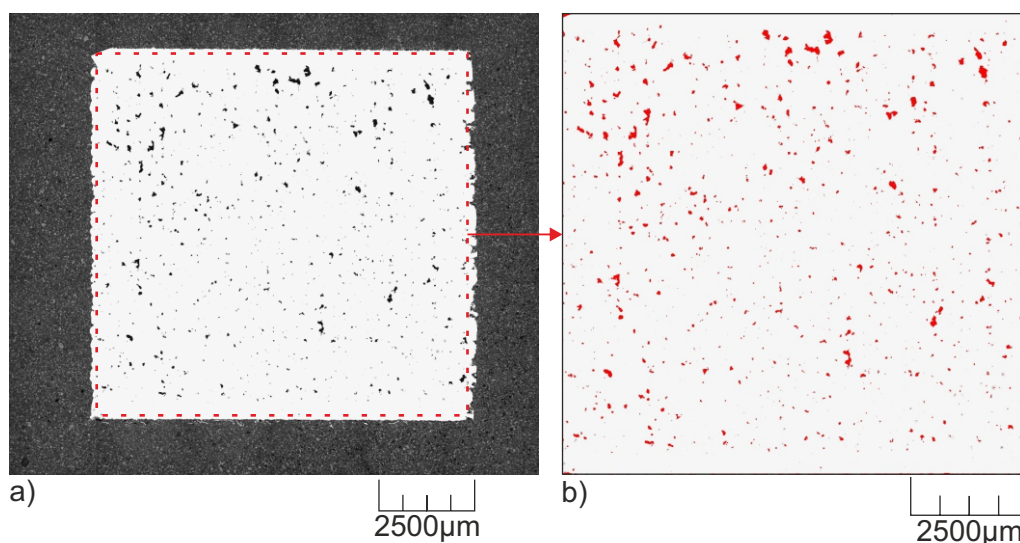
	Replikace 1			Replikace 2			Replikace 3		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	7	4	6	1	3	2	6	1	8
2	1	5	9	4	8	7	2	7	5
3	8	3	2	9	6	5	3	4	9

Tabulka 3: Rozmístění zkušebních vzorků u jednotlivých replikací

Samotná výroba vzorků byla realizována na Technické univerzitě v Liberci v Laboratoři prototypových technologií a procesů (Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace) na zařízení SLM280HL (SLM Solutions AG).

8 Měření porozity

Metalografické výbrusy byly nafoceny na optickém mikroskopu Carl Zeiss Axio imager M2 s objektivem s 50-ti násobným zvětšením. Na obr. 4a) je znázorněna kompletní fotografie řezu, která byla složena z 42 jednotlivých snímků. Obrázek byl dále ořezán tak, aby zobrazoval jen plochu vzorku (obr. 4b). Z tohoto obrázku pak byla díky rozdílu kontrastu mezi póry a plnou plochou řezu vyhodnocena porozita. Výsledkem byla procentuální plošná hodnota pórů zastoupených v daném vzorku. Tento postup byl aplikován pro všech 27 vzorků.



Obrázek 4: Měření porozity. a) snímek celého vzorku, b) ořez a označení pórů

9 Výsledky

Výsledky porozity pro jednotlivé testované vzorky jsou shrnuty v tabulce 4. Hodnota porozity jako sledovaná veličina je uvedena v procentech jako obsah plochy pórů vzhledem k celkové ploše výbrusu.

Před samotným vyhodnocením dle principů DOE byla provedena analýza všech dat porozity s ohledem na rozložení dat a výskytu odchylek. Tato data jsou znázorněna v histogramu na obr. 5a) a boxplotu na obr. 5b). Boxplot ze všech veličin ukazuje 5 odlehlých hodnot, které označují výsledky s vysokou porozitou. Z histogramu porozity pak můžeme určit, že 14 z 27 testovaných vzorků vykazuje porozitu nižší než 1%.

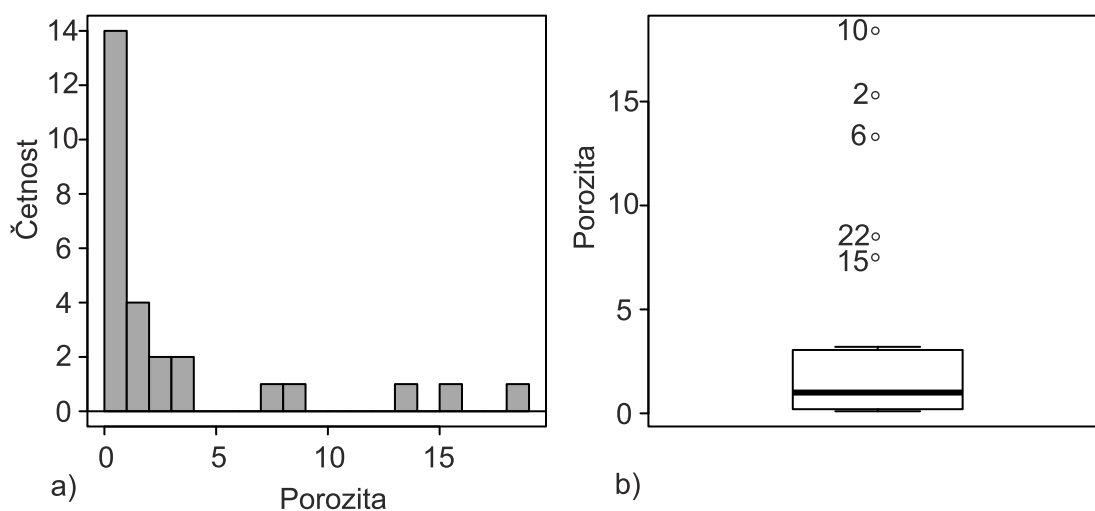
Poté byla provedena analýza pomocí ANOVA testu v programovacím jazyku R. konkrétně byla použita konzole R commander, kde je implementováno nastavení ANOVA testu a dalších statistických vyhodnocení. V tabulce 5 jsou uvedeny výsledky tohoto testu. Na obr. 6 je znázorněn vliv rychlosti skenování a výkonu na porozitu.

Číslo vzorku	Název vzorku	Porozita [%]	Číslo vzorku	Název vzorku	Porozita [%]
1	1A1	1,0	15	2B3	7,5
2	1A2	15,3	16	2C1	1,5
3	1A3	0,2	17	2C2	1,0
4	1B1	3,0	18	2C3	0,3
5	1B2	0,2	19	3A1	0,2
6	1B3	13,3	20	3A2	0,1
7	1C1	3,1	21	3A3	2,0
8	1C2	0,4	22	3B1	8,5
9	1C3	1,7	23	3B2	0,3
10	2A1	18,4	24	3B3	1,8
11	2A2	3,0	25	3C1	0,1
12	2A3	0,2	26	3C2	0,1
13	2B1	3,2	27	3C3	0,1
14	2B2	0,1			

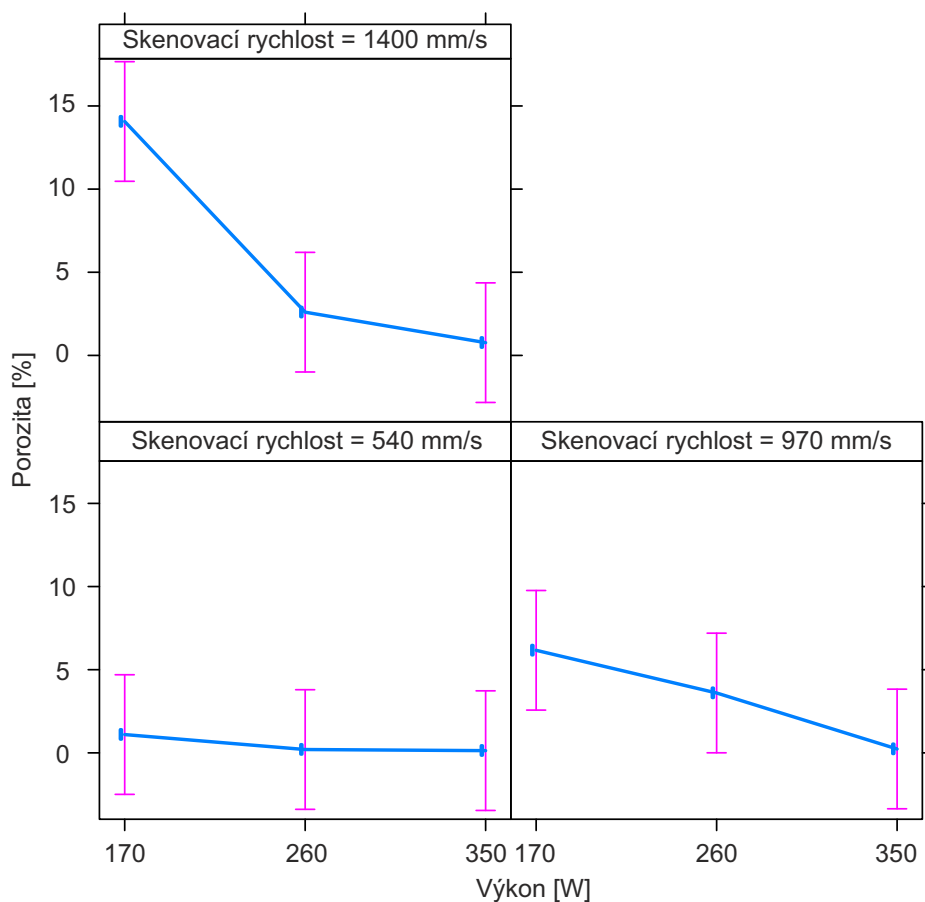
Tabulka 4: Výsledky porozity jednotlivých vzorků.

	Sum.sq	Df	F value	Pr(>F)
Výkon	219,59	2	12,4901	0,0003963
Skenovací rychlost	128,21	2	7,2926	0,0047894
Výkon:Skenovací rychlost	147,02	4	4,1810	0,0144172
Residuals	158,23	18		

Tabulka 5: ANOVA test



Obrázek 5: Vyhodnocení dat porozity a) Histogram, b) Boxplot



Obrázek 6: Graf hlavních efektů

10 Vyhodnocení a závěr

Provedené testy ukazují, že nejvýznamnější vliv na porozitu má nastavení hodnoty výkonu laseru. Pro všechny úrovně rychlosti skenování, které byly v testech nastavené, znamená vyšší hodnota výkonu laseru nižší hodnotu porozity (Obr. 6). Toto tvrzení bylo verifikováno ANOVA testem, díky kterému je vidět významnost tohoto parametru s hodnotou $p = 0,0003963$. Parametr rychlosti skenování se ukazuje jako méně významný, jeho nastavení bude ale hrát roli při finálních úpravách pro získání struktury s minimálním počtem pórů. Přínosy práce lze shrnout do následujících 3 bodů:

1. Nejvýznamnější parametrem technologie SLM k ovlivňování porozity finálního dílu je nastavení výkonu laseru.
2. Práce ověřila použitelnost metody DOE při návrhu vstupních parametrů procesu SLM.
3. Pro hodnotnější výstupy by bylo vhodné provést více replikací experimentu, protože se v datech vyskytují odlehle a nerovnoměrně rozložené hodnoty porozity.

Reference

- [1] ALGARA MUÑOZ, V. Analysis of the optimal parameters for 3d printing aluminum parts with a slm 280 machine. Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2017.
- [2] DEAN, A., VOSS, D., DRAGULJIĆ, D., ET AL. *Design and analysis of experiments*, vol. 1. Springer, 1999.
- [3] KRELL, J., RÖTTGER, A., GEENEN, K., AND THEISEN, W. General investigations on processing tool steel x40crmov5-1 with selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology* 255 (2018), 679–688.
- [4] KRUTH, J.-P., BADROSSAMAY, M., YASA, E., DECKERS, J., THIJS, L., AND VAN HUMBEECK, J. Part and material properties in selective laser melting of metals. In *Proceedings of the 16th international symposium on electromachining* (2010).
- [5] MAGER, V., BÂLC, N., LEORDEAN, D., DUDESCU, M. C., AND FOCKELE, M. Research on producing complex metal parts with lattice structure by selective laser melting. In *Applied Mechanics and Materials* (2013), vol. 371, Trans Tech Publ, pp. 280–284.
- [6] MERTENS, R., VRANCKEN, B., HOLMSTOCK, N., KINDS, Y., KRUTH, J.-P., AND VAN HUMBEECK, J. Influence of powder bed preheating on microstructure and mechanical properties of h13 tool steel slm parts. *Physics Procedia* 83 (2016), 882–890.
- [7] MUGWAGWAA, L., DIMITROVA, D., MATOPEA, S., AND YADROITSEVB, I. Influence of process parameters on residual stress related distortions in selective laser melting. *Procedia Manufacturing* 21 (2018), 92–99.
- [8] ROY, R. K. *Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement*. John Wiley & Sons, 2001.
- [9] VRANCKEN, B. *Study of Residual Stresses in Selective Laser Melting*. PhD thesis, KU Leuven, 2016.

Mikrostrukturální návrh a analýza 2D architektury se záporným Poissonovým číslem

Václav Vomáčko

Sekce - STROJÍRENSTVÍ

Fakulta strojní, 3. ročník

Bakalářský studijní program - STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

Abstrakt: V práci jsou navrženy dvě mikrostruktury s potenciálně záporným Poissonovým číslem (auxetické materiály). Vedle této vlastnosti, která vede k celé řadě možných aplikací, jsou auxetické materiály zajímavé z hlediska možnosti nastavení mechanických vlastností geometrií stuktury (např. lze vhodnou geometrií dosáhnout nulového Poissonova čísla). Metodou konečných prvků byly vypočteny napětí a deformace navržených stuktur, z čehož jsme získali výsledné makroskopické vlastnosti technikou homogenizace. Vypočtené hodnoty byly následně ověřeny mechanickými zkouškami na vzorcích vyrobených 3D tiskem. Ukázalo se, že obě struktury vykazují záporné Poissonovo číslo v určitém rozsahu parametrů. Vhodná pro použití je především struktura A (re-entrant honeycomb), která se vedle záporného Poissonova čísla pyšní i velmi dobrou tahovou kapacitou.

Klíčová slova: auxetický materiál, záporné Poissonovo číslo, lineární elasticita, metoda konečných prvků, homogenizace, 3D tisk

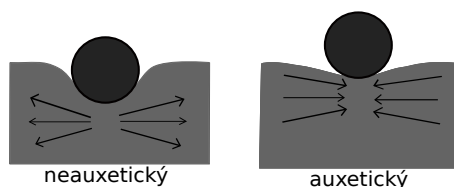
1 Úvod

Auxetický materiál je takový, který má záporné Poissonovo číslo, tedy pokud ho natahujeme v jednom směru, roztahuje se i ve směru kolmém na směr namáhání. Pojem auxetický pochází z řečtiny a znamená zvětšitelný. Tato vlastnost je projevem pouze několika přírodních materiálů v některých směrech a vede k řadě dalších zajímavých vlastností. Záporného Poissonova čísla lze však docílit i u syntetických materiálů příhodnou mikrostrukturální architekturou. S vývojem 3D tisku se naskýtají nové možnosti, jak vhodné mikrostruktury dosáhnout. Cílem této práce je právě navržení potenciálně auxetických struktur, které budou zkoumány z hlediska mechanických vlastností. Ty budou vypočteny pomocí metody konečných prvků a homogenizace. Vypočtené výsledky budou následně srovnány s experimentálním měřením.

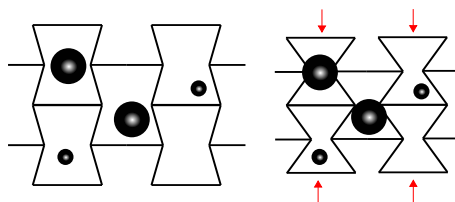
Tyto materiály se používají například v letectví, biomedicině (chirurgické implantáty, stenty, atd.), nebo třeba pro ochranné vojenské, či sportovní pomůcky.

1.1 Vlastnosti auxetických materiálů

Auxetičnost vede k řadě neobvyklých mechanických vlastností. Podle klasické teorie mechaniky kontinua se při záporném Poissonově čísle zvýší modul pružnosti ve smyku G [1]. Dále vede auxetičnost materiálu k nárůstu lomové houževnatosti [2]. Při vhodné velikosti strukturních buněk a indentoru má materiál s auxetickou strukturou větší tvrdost, než stejný nestrukturovaný materiál [3], to je znázorněno na obrázku 1. Při ohýbání auxetických desek můžeme pozorovat synklastické chování, což je schopnost deformovat se do tvaru kopule při ohybu [4]. Auxetické materiály se také pyšní vysokou schopností tlumení a dobrými zvukovými izolačními vlastnostmi [5]. V neposlední řadě vede záporné Poissonovo číslo k zvýšení odolnosti proti nárazu [6] a k disipaci většího množství energie při rázu [7].



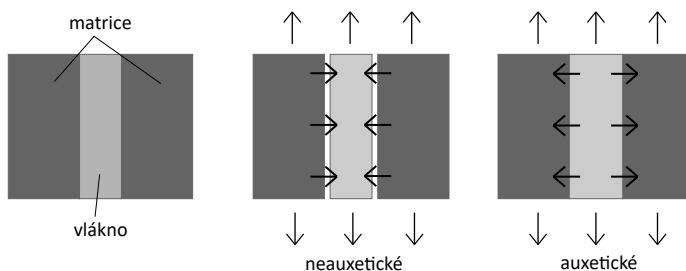
Obrázek 1. Odpor proti vnikání indentoru neauxetického a auxetického materiálu



Obrázek 2. Filtr s řízenou propustností

1.2 Aplikace auxetických materiálů

V mnoha technických, medicínských oblastech či military sektoru je nasnadě použití auxetických materiálů a četnost jejich uplatnění se zvětšuje. Příhodné je použití například pro konstrukci automobilových nárazníků, ochranného armádního oblečení, jako jsou neprůstřelné vesty, či helmy. To díky schopnosti nahromadění materiálu pod indentorem (nůž, projektil, atd.) a absorpci energie [8]. U ochranného oblečení lze díky auxetickému materiálu dosáhnout tenčí vrstvy a tím nižší hmotnosti při stejném stupni ochrany [9]. Stejně tak se auxetické materiály hodí pro sportovní ochranné pomůcky, jako jsou nejrůznější chrániče [10]. Dále je vhodné využití pro hydrofony, piezoelektrické a jiné senzory [11, 12] protože jsou materiály se záporným Poissonovým číslem velmi citlivé na změny tlaku, což je způsobeno nízkou hodnotou modulu objemové pružnosti K [9]. Jsou také zkoumány pro použití na nýty, či hmoždinky. Při montáži se spojovací prvek stlačí a lze tak pohodlně umístit do díry, kde se po zatížení roztáhne [13]. V kompozitech auxetická vlákna zlepšují syntézu matrice s vlákny, což se projeví zvýšenou odolností proti šíření trhlin [14], princip je vidět na obrázku 3. Tyto kompozity jsou používány například v leteckém průmyslu [15].



Obrázek 3. Porovnání chování neauxetického a auxetického vlákna v kompozitním materiálu

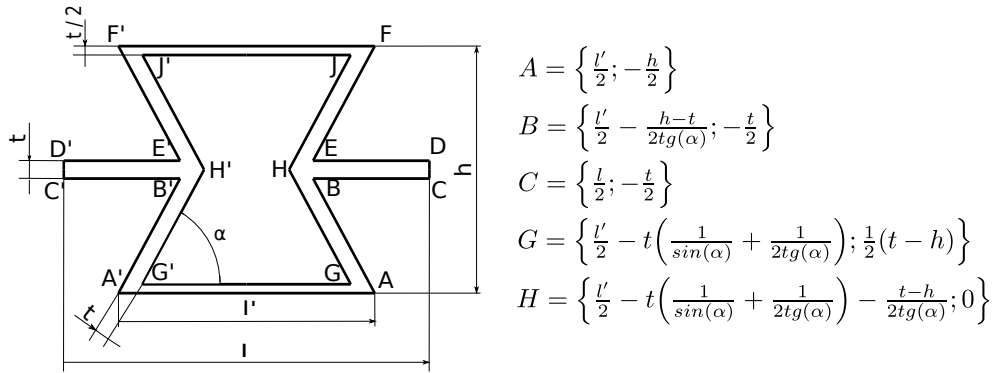
V (bio)medicině se uplatní pro různé druhy stentů [16, 17], chirurgické implantáty, jako jsou kyčelní náhrady [18], umělé meziobratlové ploténky, či kolenní protézy [7]. Mohou být též vyrobeny destičky s auxetickou nanostrukturou, které se uplatní jako selektivní membrány jejichž pórovitost lze nastavit mírou zatížení (obrázek 2). Využití se naskýtá v biomedicině (dialýza), nebo jako membrány pro katalytické reaktory [19].

1.3 Způsoby výroby auxetických struktur

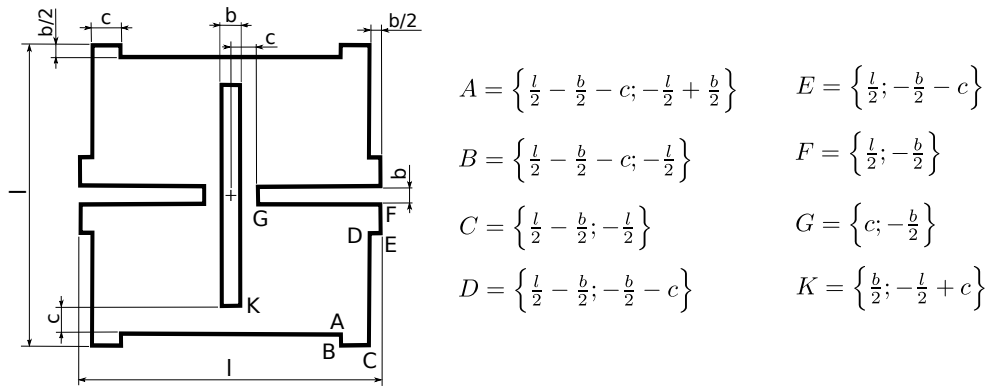
První materiál vykazující záporné Poissonovo číslo byl vyroben modifikací polymerní pěny. Pěna byla stlačena ve všech třech směrech a následně zahřáta, čímž došlo k změně úhlů ve struktuře. Nevýhodou této metody je rozdílnost jednotlivých buněk a tedy hůře předvídatelné vlastnosti [20]. V dnešní době lze pro výrobu auxetických materiálů použít snad všechny metody 3D tisku. Jejich proces začíná v CAD softwaru vytvořením modelu tisknutého objektu. Ten je následně převeden do STL formátu, tím je model "rozřezán na plátky" o tloušťce jedné vrstvy a poté po vrstvách "vytisknut". Pro tenké desky je vhodná metoda hlubokého reaktivního iontového leptání DRIE (Deep Reactive-Ion Etching).

2 Návrh struktur

V této části jsou navrženy potenciálně auxetické struktury. Pro snadnou a rychlou změnu tvaru základní buňky struktury A vyjádříme důležité body v závislosti na parametrech l, h, t, α . Stejně tak struktury B, pro parametry l, b, c . Počátek souřadnicového systému umístíme do středu buňky.



Obrázek 4. Struktura A - v literatuře označována jako "re-entrant honeycomb"



Obrázek 5. Struktura B

3 Výpočtový model

Matematický byl problém popsán rovnicemi lineární elasticity. Předpokládáme velmi malé deformace a lineární závislost mezi napětím a poměrnou deformací - Hookeův zákon. Pro řešení tohoto problému byla použita metoda konečných prvků. Typem použitého prvku je izoparametrický lineární trojúhelníkový prvek, tzv. CST (Constant Strain Triangle). Byly aplikovány kinematické okrajové podmínky.

Skript pro výpočet byl napsán v programovacím jazyce Python s použitím knihovny FEniCS. Obdrženým výsledkem jsou tenzor napětí a poměrné deformace.

3.1 Výpočetní homogenizace

Každý materiál je mikroskopicky heterogenní, přestože se v nějakém měřítku zdá homogenní - skládá se z různých složek, které vykazují rozdílné vlastnosti. Proto je popis jakéhokoliv materiálu z hlediska mechaniky kontinua vždy pouze aproximací. To nás vede k problému mikro-makro propojení - k snaze o spolehlivé stanovení makroskopického chování média, které vykazuje mikroskopickou heterogenitu [21]. Za tímto účelem byla vyvinuta technika nazývaná Výpočetní homogenizace (Computational homogenization). Její princip spočívá v nahrazení mikro-heterogenní části pomocí referenční homogenní části, která se z makroskopického hlediska chová stejným způsobem. Referenční částí je takzvaný RVE (Representative Volume Element) definovaný jako nejmenší měřitelný objem, který plnohodnotně reprezentuje celek (obsahuje veškeré nutné informace o mikrostruktuře) [22].

V našem případě jsou vlastnosti tělesa na makroskopické úrovni velice ovlivněné mikrostrukturální architekturou a makroskopický model tak není explicitně definován. Homogenizace tak bude v této práci sloužit k určení efektivního napětí, díky němuž bude možné určit efektivní tenzor elastických konstant a následně výsledné Poissonovo číslo.

3.1.1 Hill-Mandelův princip

Hill-Mandelův princip je ve skutečnosti zákon zachování energie při přechodu z mikro do makro měřítku. Vyjadřuje, že hustota deformační energie akumulovaná v mikroskopickém měřítku je rovna makroskopické hustotě deformační energie.

Pro jeden element:

$$\hat{W} = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} W d\Omega \quad (1)$$

$\hat{W}$... efektivní(makroskopická) hustota deformační energie, Ω ... obsah prvku, W ... hustota deformační energie

Pro hustotu deformační energie platí $W = \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma}^T \boldsymbol{\epsilon}$ a rovnici (1) můžeme tedy přepsat do tvaru:

$$\hat{\boldsymbol{\sigma}}^T \hat{\boldsymbol{\epsilon}} = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} \boldsymbol{\sigma}^T \boldsymbol{\epsilon} d\Omega$$

Dostaneme se tedy k tzv. zprůměrování napětí (stress averaging):

$$\hat{\boldsymbol{\sigma}} = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} \boldsymbol{\sigma} d\Omega$$

což je náš efektivní (makroskopický) tenzor napětí.

Efektivní tenzor elastických konstant spočítáme numerickou derivací ze vztahu:

$$\hat{C}_{ij} = \frac{\partial \hat{\sigma}_i}{\partial \hat{\epsilon}_j}$$

Tabulka 1. Parametry výpočtů

rozlišení sítě	roz ≈ 50
krok numerické derivace	$h = 1 \times 10^{-7}$
počet opakování buňky	$n_x, n_y = 4$

a inverzí získáme efektivní tenzor poddajnosti $\hat{S}$

3.2 Ortotropní model

Vzhledem k geometrii našich struktur je možné, že mechanické vlastnosti se budou lišit ve směrech na sebe kolmých, proto budeme předpokládat platnost ortotropního modelu. Pokud by Poissonova čísla a moduly pružnosti v tahu vyšly shodně, pak strukturu prohlásíme za izotropní.

$$\begin{bmatrix} \hat{S}_{11} & \hat{S}_{12} & 0 \\ \hat{S}_{12} & \hat{S}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \hat{S}_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\hat{E}_x} & \frac{-\nu_{yx}}{\hat{E}_y} & 0 \\ \frac{-\nu_{xy}}{\hat{E}_x} & \frac{1}{\hat{E}_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\hat{G}_{xy}} \end{bmatrix}$$

$\hat{E}_x, \hat{E}_y, \hat{G}_{xy} \dots$ efektivní moduly pružnosti v tahu (v hlavních směrech ortotropie) a střihu
 $\nu_{xy}, \nu_{yx} \dots$ efektivní Poissonova čísla

3.3 Studie konvergence

Ještě před zahájením samotných výpočtů je důležité optimálně určit parametry, na nichž závisí přesnost výsledku. To jsou rozlišení (jemnost) sítě, počet opakování základní buňky a krok numerické derivace. Jde o to nalézt vhodný kompromis mezi přesností výsledku a délkou výpočtového času. Zvolené parametry pro výpočty jsou shrnuty v tabulce 1.

3.4 Vypočtené výsledky

Byly vypočteny efektivní (makroskopické) mechanické vlastnosti - moduly pružnosti v tahu, smyku a Poissonova čísla. V grafech jsou puntíky označeny hodnoty, pro které byl proveden výpočet. Křivky mezi těmito body jsou pak jejich kubickou interpolací.

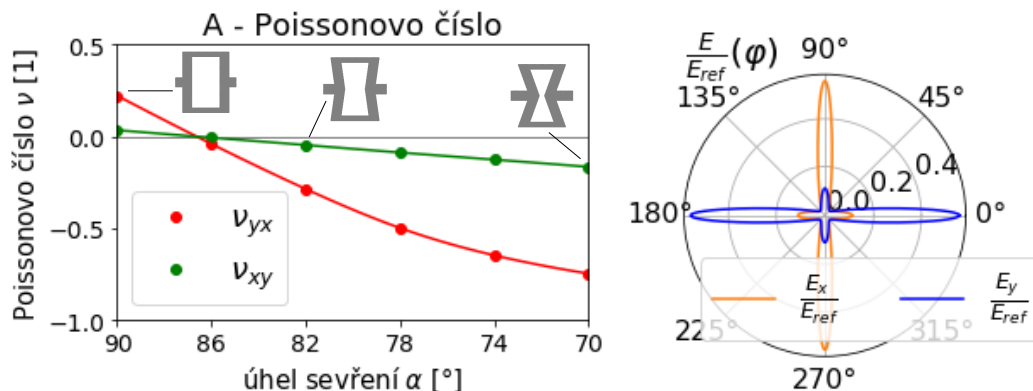
Efektivní moduly pružnosti vztáhneme k referenčním modulům, které byly použity pro výpočet. To proto, aby výsledky byli nezávislé na vstupních materiálových vlastnostech ($E_{ref}, G_{ref}, \nu_{ref}$) a popisovali tak pouze strukturu. Poměry $\frac{\hat{E}}{E_{ref}}$ a $\frac{\hat{G}}{G_{ref}}$ označíme jako tahovou, respektive střihovou kapacitu.

Pro porovnání našich struktur s plným materiálem vztáhneme tahovou a střihovou kapacitu k porozitě struktury. Porozita vyjadřuje poměr plochy (objemu) pórů A_p ku ploše (objemu) celku A_c , tedy $P = \frac{A_p}{A_c}$. Veličiny $\frac{\hat{E}P}{E_{ref}}$ a $\frac{\hat{G}P}{G_{ref}}$ budeme nazývat měrnou tahovou, respektive střihovou kapacitou. Dostaneme tedy porovnání tuhosti struktury a plného materiálu o stejné hmotnosti.

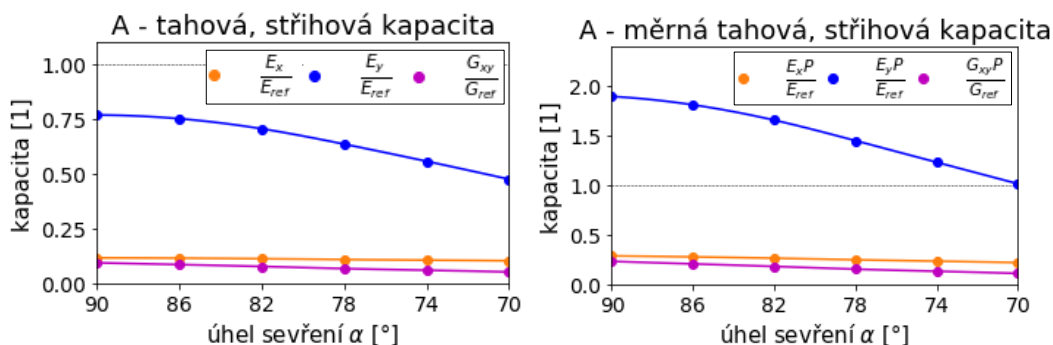
Struktura A

parametry geometrie: $l = 2$ mm, $h = 2$ mm, $t = 0.3$ mm, $\frac{l}{t} = 1.3$, $\alpha \in \langle 90; 70 \rangle [^\circ]$

Počáteční hodnotou úhlu sevření α je pro strukturu A vždy úhel $\alpha = 90^\circ$, to z toho důvodu, že pro úhel $\alpha > 90^\circ$ by vznikla konvenční pláštěv. Na druhé straně je krajní úhel α nejmenší možný tak, aby se obě "re-entrant" ramena nedotýkala a zbyl prostor pro malou deformaci.



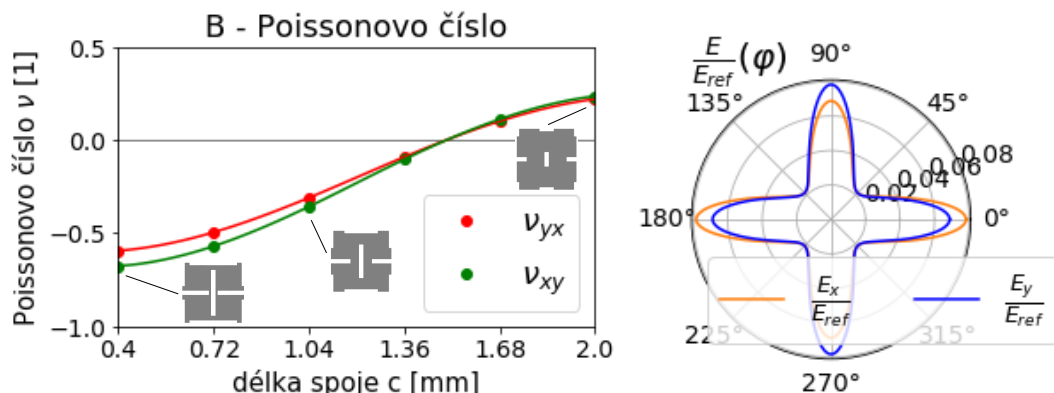
Obrázek 6. V grafu vlevo vidíme závislost Poissonových čísel na úhlu sevření α . Od úhlu sevření $\alpha = 90^\circ$ jsou obě Poissonova čísla $\hat{\nu}_{xy}, \hat{\nu}_{yx}$ kladné až do hodnoty $\alpha \approx 87^\circ$, kdy dosáhnou nuly. Pro nižší hodnoty α se struktura stává auxetickou. Poissonovo číslo $\hat{\nu}_{xy}$ pomalu klesá až na nejnižší hodnotu $\hat{\nu}_{xy} = -0,166$, oproti tomu $\hat{\nu}_{yx}$ klesá výrazně strměji na hodnotu $\hat{\nu}_{yx} = -0,746$ při nejmenším úhlu sevření $\alpha = 70^\circ$. Vpravo je zobrazen polární diagram tahové kapacity v závislosti na úhlu natočení φ .



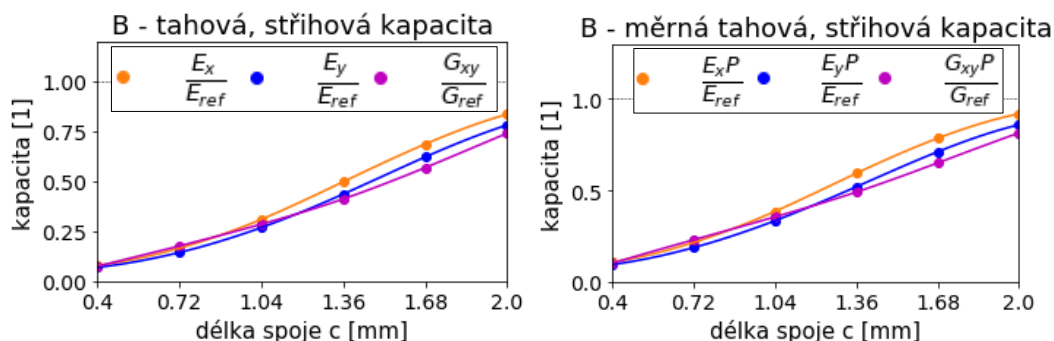
Obrázek 7. Graf vlevo zobrazuje "o kolik" má struktura A2 horší mechanické vlastnosti, než plný materiál, který je charakterizován hodnotou 1. Tahová kapacita ve směru x a střižová kapacita se při změně úhlu sevření α mění minimálně kolem hodnoty 0,1 (dosahují 10 % výkonosti plného materiálu, který má stejný objem). Tahová kapacita ve směru y $\frac{E_y}{E_{ref}}$ začíná na hodnotě 0,77 při $\alpha = 90^\circ$ a se snižováním úhlu α klesá na hodnotu 0,48. V grafu vpravo jsou kapacity navíc vztaženy k porositě struktury ($P = 54,8 \%$).

Struktura B

parametry geometrie: $l = 6 \text{ mm}$, $b = 0.5 \text{ mm}$, $c \in \langle 0, 4; 2 \rangle [\text{mm}]$



Obrázek 8. V grafu vlevo vidíme závislost Poissonových čísel na šířce spoje c . Nejnižší hodnoty Poissonových čísel vykazuje struktura s nejmenší délkou spoje $c = 0,4 \text{ mm}$: $\hat{\nu}_{xy} = -0,676$, $\hat{\nu}_{yx} = -0,594$. Se zvětšováním délky spoje rostou i Poissonova čísla. Při délce spoje $c = 1,5 \text{ mm}$ dosáhnou obě Poissonova čísla hodnoty 0, odsud nadále rostou až na hodnoty $\hat{\nu}_{xy} = 0,235$, $\hat{\nu}_{yx} = 0,22$ při $c = 2 \text{ mm}$. Z podobnosti křivek Poissonových čísel a tahových kapacit (graf vpravo) můžeme tuto strukturu prohlásit za izotropní.

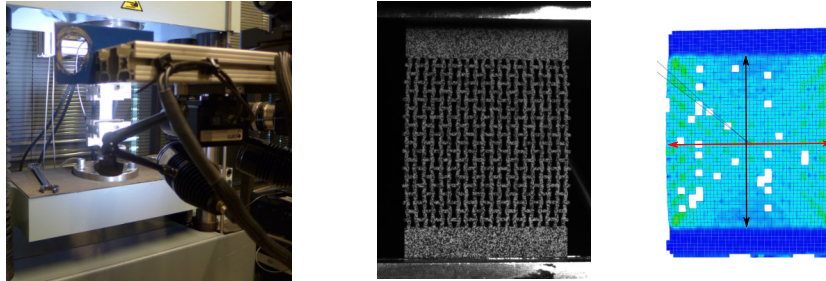


Obrázek 9. Závislost tahové a stříhové kapacity pro strukturu B vidíme v grafu vlevo. Se zvětšováním délky spoje rostou i efektivní mechanické vlastnosti, tahové kapacity startují na hodnotě 0,08 pro $c = 0,4 \text{ mm}$ a končí na 0,8 pro $c = 2 \text{ mm}$. Stříhová kapacita roste z hodnoty 0,29 až na 0,9. Měrné kapacity (graf vpravo) jsou jen mírně posunuty do vyšších hodnot. To kvůli malé porositě struktury B.

4 Experimentální měření

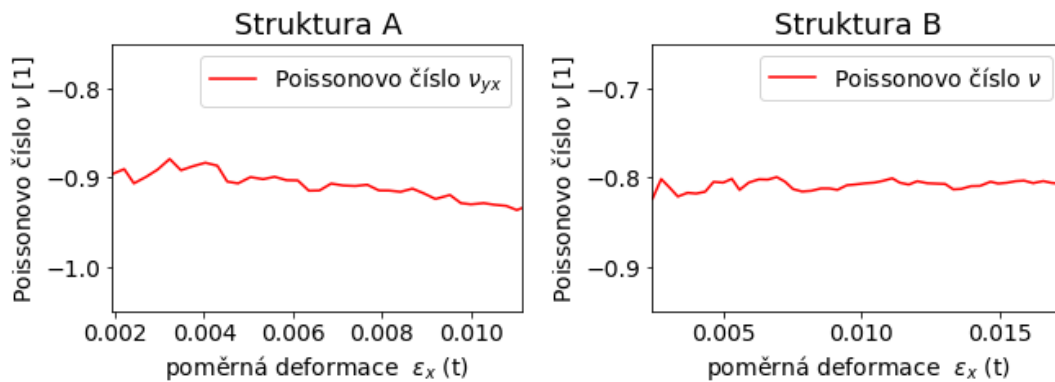
Pro vybrané modifikace struktur A ($\alpha = 74^\circ$) a B ($c = 0,72 \text{ mm}$) byly vypočtené elastické konstanty experimentálně ověřeny. Zkušební vzorky byly vyrobeny 3D tiskem - technologií PolyJet, konkrétně na tiskárně Stratasys J750. Pro tisk byl použit fotopolymerní materiál VeroFlex.

Pro určení Poissonova čísla a modulů pružnosti v tahu byla provedena tahová zkouška, při níž byl průběh deformace snímán optickým měřicím systémem ARAMIS. Tento systém využívá dvou digitálních kamer, které snímají změny poloh bodů v průběhu deformace vzorku zatíženého v trhačím zařízení. Polohy bodů jsou v softwaru vyhodnoceny a porovnány, z čehož je určena deformace vzorků. Snímek ze systému ARAMIS je vidět na obrázku 10.



Obrázek 10. Vlevo snímek měřicího systému. Uprostřed čistý snímek vzorku ze systému ARAMIS, vpravo snímek s vizualizovanou deformací - šipky představují místa měření posuvů.

4.1 Naměřené výsledky



Obrázek 11. Zobrazení průběhu Poissonova čísla ν_{yx} struktury A a ν struktury B v závislosti na změně poměrné deformace v čase.

5 Diskuze

Obě navržené struktury se v určitém rozsahu parametrů projevily jako auxetické, tedy vykazují záporné Poissonovo číslo. Dále se ukázalo, že záporné Poissonovo číslo vede díky pórovitosti ke snížení hodnot modulů pružnosti. Pokud přihlédneme právě i k pórovitosti a porovnáváme plný materiál s pórovitou strukturou o stejné hmotnosti (tedy větším objemu) tak výsledné mechanické vlastnosti nejsou tak špatné. Velmi výkonnou se ukázala struktura A při zatížení ve směru y , kdy pro neauxetickou strukturu A ($\alpha = 90^\circ$) byla nejvyšší měrná kapacita v tomto směru $\frac{\dot{E}_y P}{E_{ref}} = 1,9$, jinak řečeno při stejné hmotnosti dosáhla téměř 190% tuhosti ve směru y oproti plnému materiálu. A pro první auxetickou strukturu A ($\alpha \approx 87^\circ$) $\frac{\dot{E}_y P}{E_{ref}} = 1,82$.

Zajímavých výsledků bylo dosaženo pro smykové moduly pružnosti. Podle lineární elasticity je modul pružnosti ve smyku pro izotropní materiál závislý na Poissonově čísle a modulu pružnosti v tahu podle vztahu: $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$. Pokud do této rovnice dosadíme Poissonovo číslo ν , které je záporné, tak se zmenší jmenovatel zlomku a výsledný modul pružnosti ve smyku G by se měl podle teorie lineární elasticity zvýšit. To se podle výpočtů nepotvrdilo ani u jedné ze struktur. A to ani v případě, pokud jsme mechanické

Tabulka 2. Zhodnocení struktur na základě vypočtených výsledků

struktura	auxetičnost	tahová kapacita x	tahová kapacita y	stříhová kapacita
A	☺	☹	☺	☹
B	☺	☹	☹	☹

vlastnosti auxetické struktury vztáhly k porozitě a porovnávali s plným materiálem o stejné hmotnosti. To vede k závěru, že klasická teorie kontinua není vhodná pro předpovězení stříhových mechanických vlastností auxetických materiálů. Posléze bylo zjištěno, že pro strukturu typu re-entrant honeycomb bylo v [23] dosaženo stejného úsudku. Experimentální výsledky pro porovnání ještě nebyly vyhodnoceny.

Jak již bylo zmíněno, veškeré výpočty jsou platné pouze pro malé deformace a pro materiály, které lze popsat pomocí Hookeova zákona. U struktur, které mají malé vzdálenosti mezi jejich stěnami, či rameny může již při malém zatížení (především stříhem u struktury A) dojít k dotyku stěn. V této chvíli přestává náš model platit. U struktur s malou tloušťkou stěn při zatížení tlakem (A - re-entrant honeycomb) hrozí nebezpečí vzpěru. Vypočtené mechanické vlastnosti nemusí být platné, pokud by již při malém zatížení došlo k vybočení a následnému zhroucení struktury. Ověření stability je ale nad rámec této práce.

Tabulka 3. Porovnání vypočtených a naměřených hodnot

A	Vypočtené	Naměřené	Rozdíl	B	Vypočtené	Naměřené	Rozdíl
ν_{yx}	-0,65	-0,91	29 %	$\hat{\nu}$	-0,57	-0,81	30 %
$\frac{E_u}{E_{ref}}$	0,56	0,98 až 1,65	43 % až 66 %	$\frac{\bar{E}}{E_{ref}}$	0,15	0,15 až 0,26	0 % až 43 %

Hodnoty vypočtených a naměřených hodnot Poissonova čísla jsou vidět v tabulce 3. Pro obě struktury byli vypočteny hodnoty Poissonova čísla zhruba o 30 % nižší než z experimentálního měření. Pro výpočet tahových kapacit stanovených experimentem byl použit modul pružnosti v tahu z technického listu, který udává rozsah 950 až 1600 MPa. U tahových kapacit bylo pro strukturu B dosaženo výpočtem i experimentem velmi podobných výsledků. Pro strukturu A byl již rozdíl větší. Pro spolehlivější porovnání by bylo nutno experimentálně stanovit modul pružnosti v tahu plného materiálu (referenční modul).

Literatura

- [1] Yunan Prawoto. Seeing auxetic materials from the mechanics point of view: a structural review on the negative poisson's ratio. *Computational Materials Science*, 58:140–153, 2012.
- [2] JB Choi and RS Lakes. Fracture toughness of re-entrant foam materials with a negative poisson's ratio: experiment and analysis. *International Journal of fracture*, 80(1):73–83, 1996.
- [3] KL Alderson, AP Pickles, PJ Neale, and KE Evans. Auxetic polyethylene: the effect of a negative poisson's ratio on hardness. *Acta Metallurgica et Materialia*, 42(7):2261–2266, 1994.
- [4] Cesare Davini, Antonino Favata, Andrea Micheletti, and Roberto Paroni. A 2d metamaterial with auxetic out-of-plane behavior and non-auxetic in-plane behavior. *arXiv preprint arXiv:1708.07112*, 2017.
- [5] Xiangwen Zhang and Deqing Yang. Mechanical properties of auxetic cellular material consisting of re-entrant hexagonal honeycombs. *Materials*, 9(11):900, 2016.
- [6] JB Choi and RS Lakes. Non-linear properties of polymer cellular materials with a negative poisson's ratio. *Journal of Materials Science*, 27(17):4678–4684, 1992.

- [7] Fabrizio Scarpa. Auxetic materials for bioprostheses [in the spotlight]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 25(5):128–126, 2008.
- [8] Royale S Underhill. Manufacture and characterization of auxetic foams. 2017.
- [9] Q Liu. Literature review: materials with negative poisson’s ratios and potential applications to aerospace and defence. Technical report, DEFENCE SCIENCE AND TECHNOLOGY ORGANISATION VICTORIA (AUSTRALIA) AIR VEHICLES DIV, 2006.
- [10] Mohammad Sanami, Naveen Ravirala, Kim Alderson, and Andrew Alderson. Auxetic materials for sports applications. *Procedia Engineering*, 72:453–458, 2014.
- [11] Marco Avellaneda and Pieter J Swart. Calculating the performance of 1–3 piezoelectric composites for hydrophone applications: an effective medium approach. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 103(3):1449–1467, 1998.
- [12] Vitor Hugo Carneiro, José Meireles, and Hélder Puga. Auxetic materials—a review. *Materials Science-Poland*, 31(4):561–571, 2013.
- [13] JB Choi and RS Lakes. Design of a fastener based on negative poisson’s ratio foam. *Cellular Polymers*, 10(3):205–212, 1991.
- [14] KL Alderson, VR Simkins, VL Coenen, PJ Davies, Andrew Alderson, and KE Evans. How to make auxetic fibre reinforced composites. *physica status solidi (b)*, 242(3):509–518, 2005.
- [15] Z Wang, A Zulifqar, and H Hu. Auxetic composites in aerospace engineering. *Advanced composite materials for aerospace engineering: Processing, properties and applications*. Cambridge: Woodhead Publishing, pages 213–240, 2016.
- [16] SK Bhullar, AT Mawanane Hewage, A Alderson, K Alderson, and Martin BG Jun. Influence of negative poisson s ratio on stent applications. *Advances in Materials*, 2(3):42–47, 2013.
- [17] Zheng-Dong Ma and Yuanyuan Liu. Auxetic stents, July 2 2010. US Patent App. 12/829,815.
- [18] OA Abdelaal and SM Darwish. Analysis, fabrication and a biomedical application of auxetic cellular structures. *Int J Eng Innov Technol*, 2(3):218–23, 2012.
- [19] Alban Muslija and Andrés Díaz Lantada. Deep reactive ion etching of auxetic structures: present capabilities and challenges. *Smart Materials and Structures*, 23(8):087001, 2014.
- [20] Alaa Mohammed EL-Butch. *Auxetic Polyurethane Foam*. PhD thesis, Helwan University, 2012.
- [21] Dipl-Ing T Luther. *Homogenization of Damaged Concrete Meso-structures using Representative Volume Elements—Implementation and Application to SLang*. PhD thesis, Bauhaus–University Weimar Germany, 2005.
- [22] Rodney Hill. Elastic properties of reinforced solids: some theoretical principles. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 11(5):357–372, 1963.
- [23] MH Fu, OT Xu, LL Hu, and TX Yu. Nonlinear shear modulus of re-entrant hexagonal honeycombs under large deformation. *International Journal of Solids and Structures*, 80:284–296, 2016.

Inovace stříhacích nástrojů modulární výrobní linky pro výrobu sofistikovaných adhezivních krytů ran

Dolanský Martin

Sekce – STROJÍRENSTVÍ,
Fakulta strojní, 2. ročník
Navazující magisterský program – INOVAČNÍ INŽENÝRSTVÍ

Abstrakt: Práce pojednává o inovaci a konstrukčním návrhu stříhacího modulu, který je součástí modulární výrobní linky pro výrobu sofistikovaných adhezivních krytů ran s ohledem na standard Cleanroom ISO Class 8 a odolnosti vůči chlóru. V práci se postupuje dle základních inovačních kroků, jako jsou průzkum trhu a stávajících řešení, patentový průzkum, návrh konceptů a další. Pomocí metody hodnocení konceptů byla vybrána nejvhodnější varianta konceptu. Zvolená varianta byla dále zkonstruována a zpracována, včetně pevnostních výpočtů důležitých částí, až do formy technické dokumentace jednotlivých komponentů a dílů.

Klíčová slova: Inovace, stříhací modul, adhezivní kryt, koncept, výsekový nástroj

1. Úvod

V současné době se stále zvyšují nároky a požadavky v různých nejen technických odvětvích a jejich vývoj stále zrychluje. Například ve zdravotnictví se dnes od původních jednotných tvarů adhezivních krytů ran, které se dále musely odstříhávat či jinak upravovat na požadovaný rozměr jejich uživatelem, přechází na výrobu různě sofistikovaných náplastí. Tento krok ovšem přináší požadavek na úpravu – inovaci stávajících výrobních linek, zejména jejich stříhacích nástrojů.

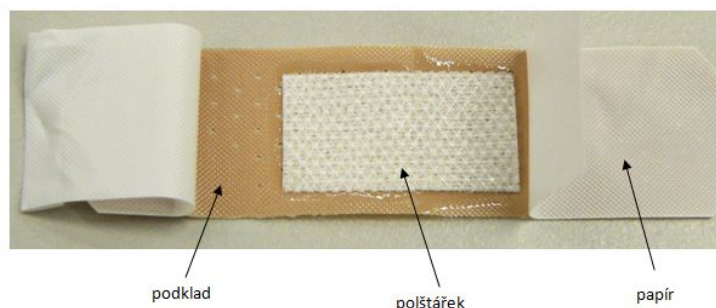
Dnes je ve zdravotnictví využívána široká škála náplastí. Náplast je obvazový materiál, který slouží k překrytí rány, fixaci jiného obvazového materiálu nebo k nouzové fixaci poranění. Bývá vybavena polštářkem, který může nést léčivé nebo dezinfekční látky. Na materiál náplastí jsou kladeny vysoké požadavky. Náplast musí být přilnavá, ale při snímání nesmí poškodovat pokožku. Neměla by způsobovat alergii, měla by být prodyšná, odolná, poddajná, přijatelně estetická a v neposlední řadě i cenově dostupná. Náplast může být v nesterilním nebo sterilním obalu, který překrývá zejména část určenou pro přímý styk s ránou. Lepicí plochy jsou překryty lehce snímatelnými kryty, chránicími lepidlovou plochu před vysycháním a znečištěním. Adhezivní vrstva lepidla je založena na akrylátové bázi. Některá lepidla mohou obsahovat i latex, který ale není příliš vhodný z důvodu častého výskytu alergických reakcí u pacientů. Materiál podkladu pro lepidlo závisí na účelu náplastí; například plastový podklad (PVC, PE, PU aj.) je odolný vůči vlhkému prostředí. Dále jsou vysoce poddajné, prodyšné a elastické látkové (netkané, tkané, stretch) náplastí. Pro citlivou kůži jsou užívány náplastí z jemné netkané textilie. Polštárek je zpravidla vyroben převážně z upravené bavlny a dalších přírodních či umělých vláken, tak aby přilnul, ale nepřilepil se k ráně [1].

1.1. Cíl práce

Cílem této práce je inovace stříhacích nástrojů modulární výrobní linky pro výrobu sofistikovaných adhezivních krytů ran. Navržené koncepty a jejich konstrukční řešení vychází ze zadaných parametrů. Celá výrobní linka musí splňovat standard Cleanroom ISO Class 8 [2]. Tato norma vyskytující se ve výrobě nejen farmaceutických produktů udává úroveň kontaminace výrobního prostředí různými znečišťujícími látkami, jako jsou prach, mikroby, aerosolové částice a jiné chemické látky. Úroveň kontaminace se určuje pomocí počtu částic na 1 m³ a dle norem ISO 14644-1 a ISO 14698 je rozdělena do 9 úrovní. Pro dosažení těchto požadavků je zapotřebí různých chlórových dezinfekcí a čisticích. Proto jednotlivé díly a komponenty musí být tvořeny z odolných konstrukčních materiálů vůči těmto látkám.

S požadavkem na zhotovení modulární výrobní linky pro výrobu sofistikovaných adhezivních krytů ran se na Technickou univerzitu v Liberci obrátila společnost EMTEX s.r.o. sídlící ve Dvoře Králové. Tato společnost se zabývá výrobou a obchodem kusového a metrového textilu, povlečení a adhezivních krytů ran. Dosavadní výroba krytů ran ve jmenované společnosti je rozdělena do tří kroků a je realizována pomocí třech

výrobních linek. Nejprve na prvním zařízení dojde k nanesení lepidla na podkladový materiál. Dalším krokem je přilnutí polštářku a překryvu na adhezivní podklad. Posledním krokem je samotné stříhání náplasti pouze do čtvercového nebo obdélníkového tvaru.



Obrázek 1: Sestava náplasti

Hlavním důvodem inovace stříhacích nástrojů je možnost výroby sofistikovaných tvarů náplasti s ohledem na snadnou změnu stříhaného tvaru. Nástroje musí být navrženy tak, aby byly schopny vystřihovat všechny jednotlivé části náplasti, které jsou tvořeny z plastových, textilních a papírových materiálů. Dalším požadavkem na stříhací modul je možnost dělení materiálů náplasti perforovaně nebo zcela po celém obvodu stříhu. Konstrukce modulu musí být navržena tak, aby bylo možné zařízení umístit „letmo“ na základní nosnou desku výrobní linky. Dělený pás polotovaru musí být veden ve vzdálenosti max. 45 mm od této základní desky.

Tabulka 1: Technické zadání

Parametry výrobku	Hodnota
Maximální možná šíře pásu materiálu	150 mm
Maximální možná délka krytu ran	380 mm
Vzdálenost polotovaru od nosné desky	Max. 45 mm
Rychlost stříhání	1ks/s s odkládáním na dopravníkový pás o rychlosti 200–1500 cm/min
Vystřihovaný tvar	Libovolný
Požadované rozměry krytu	75/100 mm; 100/100 mm; 150/100 mm; 150/150 mm

Při návrhu výrobku se postupovalo dle vybraných metod z inovačního inženýrství [3]. Nejprve je zapotřebí naplánovat inovaci stříhacích nástrojů, která se skládá z následujících kroků:

- Identifikace inovačních příležitostí a jejich hodnocení
- Vypracování harmonogramu
- Inovační prohlášení

Takto získané informace budou dále využity pro navržení 3 konceptů. Neméně důležitým ukazatelem při návrhu konceptu je metoda QFD (Quality Function Deployment), která zajišťuje, že zákazníkův hlas bude zahrnut již ve fázi návrhu a plánování produktu. Dalším významným nástrojem pro kreativní generování konceptu výrobku je Morfologická matice, do které se uvedou dílčí funkce a k nim se přidělí jednotlivé možnosti řešení. Následně se navržené koncepty vyhodnotí pomocí metody AHP (Analytic Hierarchy Process), díky které se vybere nejvhodnější varianta konceptu. Po výběru nejvhodnější varianty dojde k jejímu detailnímu konstrukčnímu rozpracování, které se dále využije k její realizaci. Součástí konstrukce budou i pevnostní výpočty stěžejních součástí a dílů a případná optimalizace rámu.

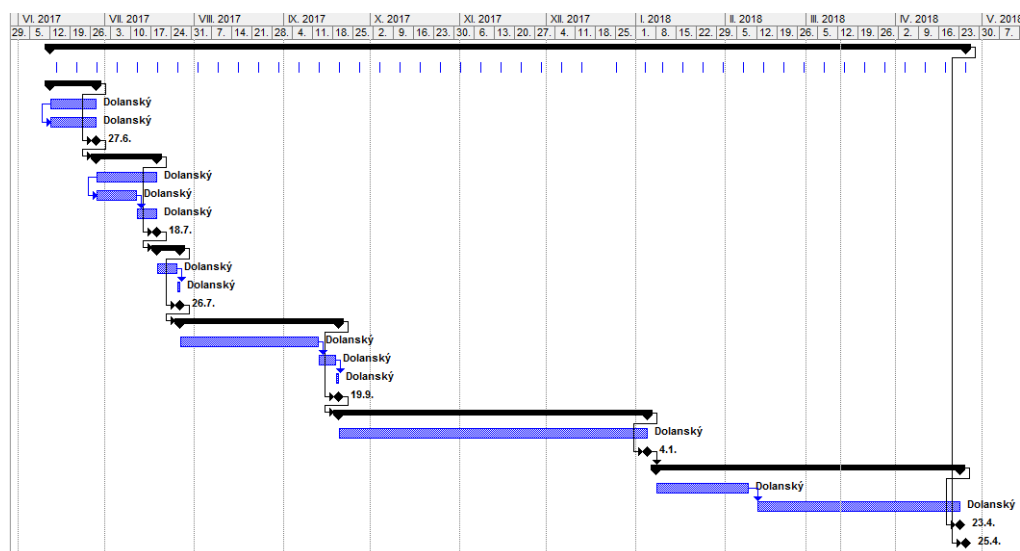
Na závěr se vyhodnotí a porovná inovované řešení se stávajícím. Nejdůležitějšími ukazateli pro hodnocení budou zejména možnost stříhu libovolných tvarů, časová náročnost výměny nástrojů pro změnu stříhaného tvaru a rychlost stříhání.

2. Plánování inovace výrobku

V této kapitole bude rozvržen postup inovace od prvotního plánování, zhotovení harmonogramu projektu, formulace inovačního záměru a prohlášení až po inovační příležitosti, které zahrnují patentový a konkurenční trhový průzkum.

2.1. Harmonogram

Nejprve byl stanoven časový plán inovačního projektu v programu MS Project 2013. V programu se řešení problému rozdělí do více podproblémů – fází, přidělí se zdroje pro plnění úkolů a stanoví se časové omezení včetně dalších potřebných opatření jednotlivých úkolů [4]. Program z těchto informací vygeneruje plán projektu zobrazený v Ganttově diagramu a vypočítá předpokládaný konečný termín.



Obrázek 2: Ganttův diagram

2.2. Inovační záměr

Navrhnete a zkonstruujete vysekávací nástroje modulární výrobní linky. Linka je určena pro výrobu sofistikovaných adhezivních krytů ran. Zařízení musí splňovat technické zadání a parametry uvedené v 1. kapitole. Stříhací modul musí být snadno měnitelný pro různé tvary krytů ran a musí být zajištěn plynulý chod toku materiálu.

2.3. Inovační prohlášení

V inovačním prohlášení jsou uvedeny informace o inovaci ve formě tabulky, která přesněji definuje jednotlivé směry, jež jsou nedílnou součástí při vývoji výrobku (tab. 2).

Tabulka 2: Inovační prohlášení

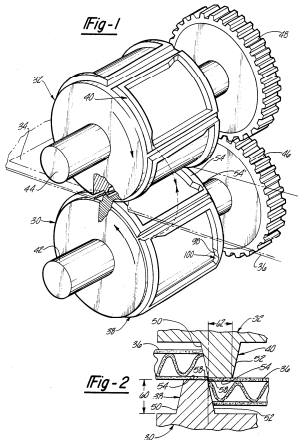
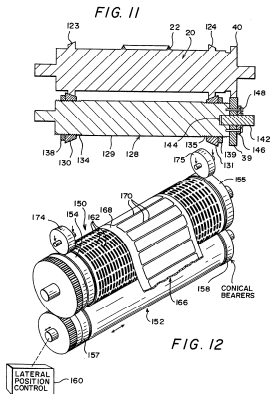
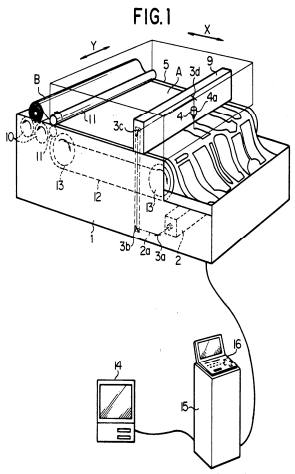
Popis inovovaného výrobku	Stříhací modul sofistikovaných adhezivních krytů ran pro lékařské účely se snadnou a rychlou výměnou nástrojů pro různé tvary
Klíčové obchodní cíle	Prodej navrženého zařízení pro farmaceutické společnosti
Primární trh	Farmaceutické provozy
Sekundární trh	Obalový a tiskařský průmysl zaměřený na výsekové nástroje
Předpoklady	Licence CAD software
Omezení	Závislost na externích dodavatelích a výrobcích

2.4. Inovační příležitosti

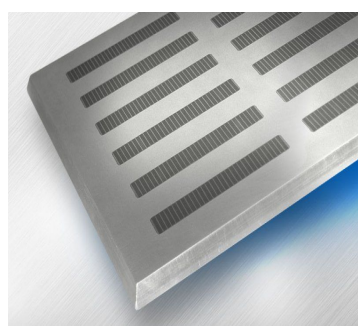
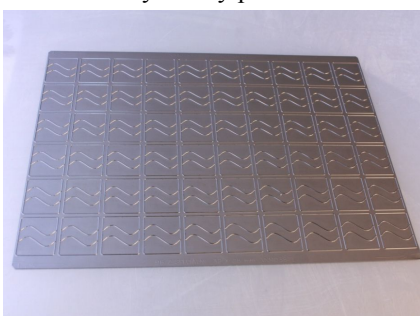
Nedílnou součástí procesu plánování je identifikace příležitostí. V této části se rozhoduje o vzniku nového výrobku nebo na dílčí zlepšení existujícího s ohledem na výrobovou platformu. Pro analyzování příležitostí proběhl patentový průzkum, průzkum trhu a konzultace s uživateli a zákazníkem.

Nejzajímavější nalezené produkty na trhu a v patentovém průzkumu jsou zobrazeny na obrázcích v tabulce 3 a 4.

Tabulka 3: Patentový průzkum

US4608895A Rotary die cutting (1984)	US5388490A Rotary die cutting system and method for sheet material (1990)	US5200592A Automatic cutting apparatus for cloth (1990)
		

Tabulka 4: Průzkum trhu

Výsekový nástroj s pásovým nožem	Magnetická deska s výsekovým plechem	Magnetický válec s výsekovým plechem
		
Výsekový plech 		

3. Návrh konceptů

Další fází inovačního procesu je samotný návrh konceptů. Pomocí metod inovačního inženýrství byly v této kapitole vygenerovány celkem 3 koncepty. Vytváření konceptů bude rozděleno do těchto dílčích aktivit:

- Identifikace zákaznickových potřeb
- Specifikace charakteristik výrobku pomocí metody QFD

- Kreativní generování konceptů pomocí Morfologické matice
- Samotné generování konceptů
- Hodnocení a výběr nejlepšího konceptu

Prvotním ukazatelem pro tvorbu nového výrobku jsou požadavky a představy zákazníka. Proto je zapotřebí od zákazníka tyto zásadní informace získat, správně je interpretovat, uspořádat tyto potřeby do skupin, určit relativní význam těchto potřeb a zpětně je revidovat.

Tabulka 5: Zákaznické potřeby

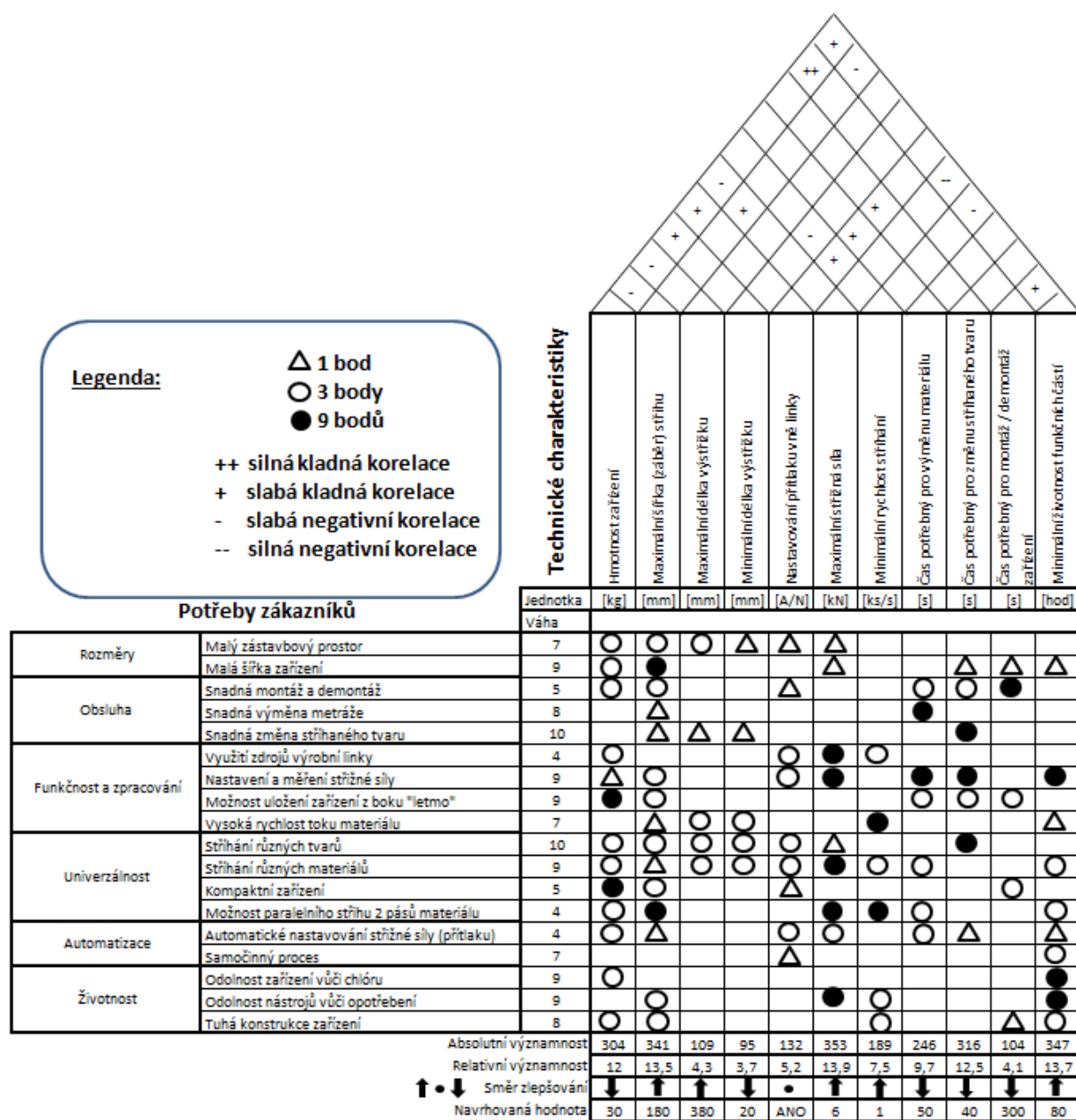
Číslo	Potřeba	Relativní význam
1	Snadná obsluha zařízení, i nekvalifikovanými lidmi	5
2	Rychle a snadno změnit stříhaný tvar náplasti	10
3	Snadná výměna metráže	5
4	Kvalitní a čistý řez různých tvarů	10
5	Využití zařízení i v jiné výrobní lince	4
6	Stříhání plastových, látkových, papírových a jiných vláknitých materiálů	7
7	Rychle a snadno odmontovat z výrobní linky a opět namontovat	4
8	Využití zdrojů linky	3
9	Nastavování střížné síly a ukazatel její hodnoty	9
10	Zařízení pracuje spolehlivě bez nutnosti zásahu člověka	4
11	Malá šířka zařízení	7
12	Letmé uložení ke konstrukci linky	7
13	Odolnost vůči chlóru	10
14	Vysoká rychlost stříhání (1 ks/s)	7
15	Pevná (tuhá) konstrukce	9
16	Automatická regulace přítlaku	4
17	Odolné nástroje vůči opotřebení	7
18	Možnost paralelního stříhání dvou pásů materiálu	4
19	Kompaktní zařízení	5

Nyní dochází k formulaci zákaznických potřeb. Je snahou z výše získaných informací přesně a měřitelně popsat, co musí výrobek obsahovat, umět, aj. Dominantním nástrojem pro tuto formulaci je metoda QFD.

Z matice zobrazené v tabulce 6 vyplynulo těchto 5 nejvýznamnějších parametrů, na které bude kladen důraz při konstrukci:

- Maximální střížná síla
- Minimální životnost funkčních částí
- Maximální šířka (záběru) stříhu
- Čas potřebný pro změnu stříhaného tvaru
- Hmotnost zařízení

Tabulka 6: QFD matice



Při syntéze již známých řešení a kreativních řešení kritických problémů se musí posoudit řešení dílčích problémů a vzájemně je zkombinovat. Jedna z kombinačních metod kreativního generování konceptu výrobku je Morfologická matice. V matici se uvedou na vertikální ose funkce a k nim se ve sloupcích přiřadí všechna možná řešení formou skici. Možnosti řešení se dále spojí a vznikají možné návrhy a koncepty.

Po vzájemné kombinaci dílčích řešení funkcí výrobku v Morfologické matici [5] zobrazené v tabulce 7 se jeví následující 3 koncepty:

- Koncept A
- Koncept B
- Koncept C

Tabulka 7: Morfologická matice

Funkce	Možnosti řešení			
	Nožem	Výsekovým plechem	Laserovým paprskem	Výměnným povrchem válce
Dělení materiálu				
Pohyb nástroje	Rotační	Lineární		Rovinný
Nastavování síly	Manuální	Automatické		NE
Zdroj síly	Pružina	Pneumaticky	Hydraulicky	Závít
Zdroj pohybu nástrojů	NE	Elektrická energie		Lidská energie
Uložení nástroje	Příšroubovat	Magneticky		Ve vodící drážce
Způsob stříhání	Ostří vúči ploše			Ostří přes hranu

Tabulka 8: Navržené koncepty

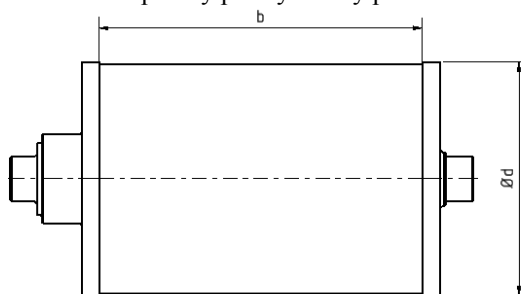
Koncept A pojednává o 2 rotačních válcích přitlačovaných pružinami k sobě. K dělení materiálu dochází v kontaktním místě válců pomocí vybroušeného břitu na vrchním válci. Povrch je výměnný a snadno demontovatelný pomocí 6 šroubů.	Koncept B spočívá opět ve využití páru rotačních nástrojů ve tvaru válců. Spodní válec je opět hladký a plní funkci přitlačovacího válce. Výraznou změnou oproti prvnímu navrženému konceptu je, že vrchní válec je s magnetickým povrchem. Na tento magnetický povrch lze připevňovat takzvaný výsekový plech. Do výsekového plechu o tloušťce do 1 mm lze vybrousit téměř jakýkoliv požadovaný tvar pro dělení materiálu.	Třetím navrženým konceptem C je stříhání krytů ran pomocí pásového ohybatelného nože. Tento princip dělení je znám jako lineární vysekávač. Nůž spolu s deskou, ve které je uložen, a dorazovým plechem tvoří tzv. výsekový nástroj.

Pro výběr nejvhodnější varianty byla zvolena strukturovaná technika pro organizování a analýzu komplexních rozhodnutí založených na matematice a psychologii, která je nazývána zkratkou AHP. Zvolený nástroj pomáhá posuzovatelům najít, co nejlépe vyhovuje jejich cílům formou rozdělení složitých problémů na problémy menšího charakteru, přiřazením k nim příslušných kritérií a tím rozčlenění do hierarchií. Poskytuje komplexní a racionální rámec pro strukturování rozhodovacího problému.

Dle analýzy AHP se jako nejlépe hodnocený koncept jeví koncept B.

4. Rozpracování vítězné varianty

Nejprve se dle technického zadání uvedeného v tabulce 1 stanovily potřebné rozměry válců. Výpočty se dospělo k průměrům válců $d = 130$ mm a šířce plochy pro výsekový plech $b = 180$ mm.

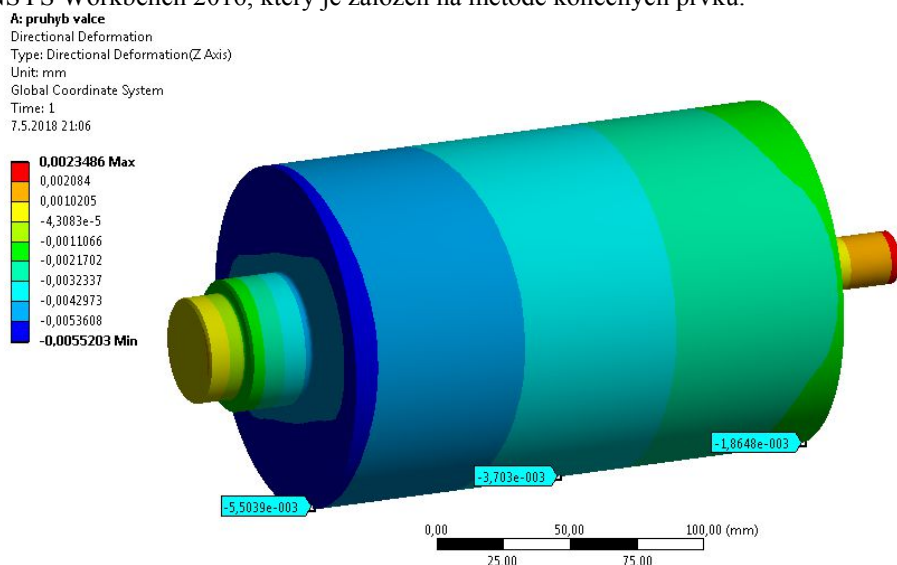


Obrázek 3: Základní rozměry válce

Jako zdroj přitlačné síly byly navrženy pneumatické válce z nerezové oceli dle norem CRDNG, ISO 15552, které jsou schopny vyvinout teoretickou sílu až 4712 N [6].

S touto maximální silou se dále provedl návrh ložisek a přitlačných roln a zároveň byla provedena kontrola životnosti. Nejnižší životnost byla u roln, kde při zatížení maximální silou od válců vyšlo 272 provozních hodin [7]. Ovšem při běžném provozu válců se bude využívat pouze menší části maximální možné přitlačné síly válců.

Dále se provedla i kontrola průhybu namáhaného spodního protitlakového válce. Výpočet průhybu proběhl v software ANSYS Workbench 2016, který je založen na metodě konečných prvků.



Obrázek 4: Průhyb válce

Z výsledků plyne, že průhyb válce při zatížení maximální silou, kterou jsou pneumatické válce schopny vyvinout, je 0,0055 mm. Po konzultaci se zástupcem společnosti ESON CZ s.r.o. panem Ing. Tomášem Šestákem se dospělo k závěru, že takový průhyb nijak neovlivní funkci válců a lze jej zanedbat. Následně byla provedena i pevnostní kontrola válce, včetně vrubové houževnatosti, u které vyšla bezpečnost $k = 6,12$.

Dalším stěžejním problémem byl návrh pohonu válců. Jelikož pro rotační pohyb válců není zapotřebí vysokých kroutících momentů, byl navržen elektrický krokový motor s označením NEMA 23 [8]. Tento motor je vhodný pro naši aplikaci díky svým rozměrům, hmotnosti, přesnosti, se kterou pracuje a snadnému ovládání.

Motor je připevněn k planetární převodovce pro krokové motory s označením GEA-60-3-60-ST-063, která redukuje otáčky převodovým poměrem 3 a zvyšuje krouticí moment motoru.

Krouticí moment od převodovky je na přitlakový válec přenášen pomocí třídílné spojky s označením OLDHAM typu OX57G s průchozím otvorem.

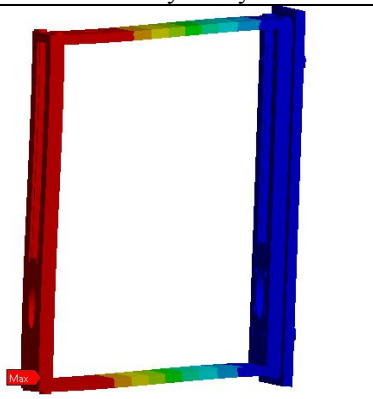
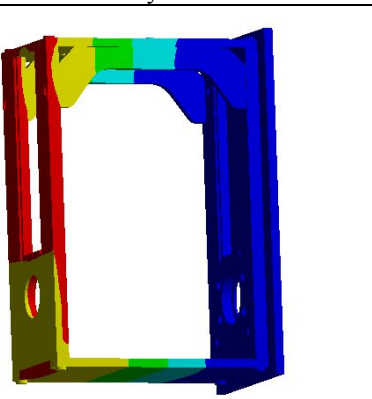
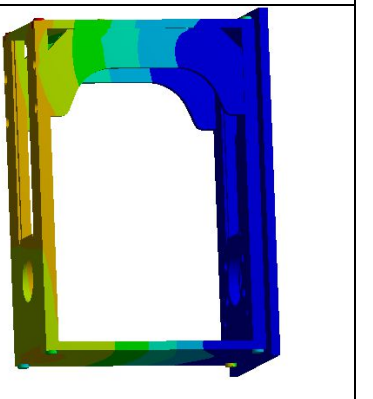
Poslední fází konstrukce bylo navržení rámu pro všechny komponenty. Rám válců bude připevněn letmo ke kotvicí desce výrobní linky pomocí šroubů. Musí být vyroben s vysokou přesností a zároveň je navržen tak, aby byl dostatečně tuhý a nedošlo ke zkосу a jinému osovému křížení válců a tím ke zhoršení kvality stříhu.

Proto bylo nutno provést deformační analýzu rámu. Výpočet statické deformace rámu byl proveden v software ANSYS Workbench 2016 s podmínkou, že velikost deformace nesmí být větší než 0,05 mm.

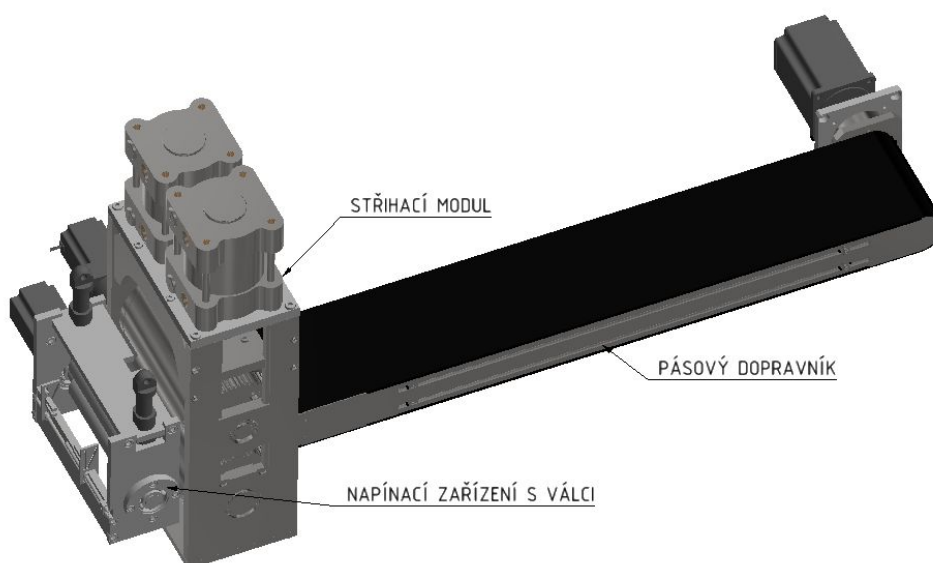
Do programu se nejprve naimportovala geometrie modelu a nadefinovaly materiálové vlastnosti [9]. Dále bylo zapotřebí stanovit typy kontaktů mezi jednotlivými díly, okrajové podmínky, zatížení a vygenerovat síť konečných prvků. V simulačním modelu je rám připevněn pomocí 4 šroubů M8 přes bočnici ke kotvicí desce výrobní linky. Výpočty deformací byly provedeny jak totální (ve všech směrech), tak i pouze v jednom směru (vertikálním). Ovšem rozdíl mezi jednotlivými deformacemi byl minimální, proto jsou na obrázcích uvedeny pouze totální deformace.

Samotný výpočet byl rozdělen do 2 kroků. Nejprve se nadefinovalo předpětí ve šroubech, u kterého pro šroub o jmenovitém průměru M8 s pevnostní třídou pro nerezové šrouby 70, je předepsána orientační osová síla ve šroubu 12,6 kN. Šroub byl předepjat pouze na 10 kN. Ve druhém kroku byl rám zatížen jeho samotnou gravitací, vahou válců v místě uložení ložisek a ve vrchní desce ještě vahou pneumatikých válců.

Tabulka 9: Tuhostní optimalizace rámu

Fáze 1 – bez výztužných žebér	Fáze 2 – výztužná žebra	Fáze 3 – zvětšená v. žebra
		
Deformace = 0,221 mm	Deformace = 0,061 mm	Deformace = 0,035 mm

Optimalizací se dospělo ke snížení deformace z původních 0,221 mm na finálních 0,035 mm. Takto navržený rám splňuje tuhostní požadavky pro správnou funkci zařízení.



Obrázek 5: Stříhací zařízení s napínáním a pásovým dopravníkem

5. Závěr

Cílem této práce byla inovace stříhacích nástrojů. Hlavním důvodem inovace bylo navrhnout takové nástroje, které budou schopny vystříhovat libovolné tvary krytů ran a zároveň nebude složitá a časově náročná změna vystříhovaného tvaru.

Vítězným konceptem bylo modulární zařízení s párem rotačních válců přitlačovaných k sobě, mezi kterými prochází pás materiálu. Vrchní válec je s magnetickým povrchem, na který se umísťuje výsekový plech s libovolným zhotoveným tvarem pro vystříhování, čímž byl splněn hlavní parametr zadání. Spodní válec je s hladkým povrchem a slouží jako protitlakový válec vrchnímu magnetickému válci. Součástí návrhu vítězného konceptu byly i pevnostní a životnostní výpočty stěžejních funkčních součástí.

Jelikož se jedná o zařízení, které je určeno pro výrobu farmaceutických a medicínských potřeb, bylo zapotřebí navrhovat zařízení s ohledem na odolnost vůči chemickým látkám a desinfekcím, zejména chlóru. Tohoto požadavku se docílilo volbou materiálu všech komponent a dílů ze zušlechťené oceli včetně spojovacího materiálu.

Ze zadaných parametrů uvedených v úvodní kapitole práce byly splněny všechny stanovené požadavky. Maximální šíře pásu materiálu byla dodržena a maximální možná délka vystříhovaného tvaru byla z požadovaných minimálních 380 mm navýšena na cca 405 mm. Konstrukce zařízení je navržena tak, aby pás stříhaného materiálu byl ve vzdálenosti 45 mm od základní desky výrobní linky. Jako pohon vystříhovacích válců, napínacích válců a pásového dopravníku byly navrženy krokové motory NEMA s planetární převodovkou pro krokové motory. Pro oba páry válců byly zvoleny výkonové řady motorů 23 a pro pásový dopravník byla zvolena řada 34. Navržené motory splňují zadaný parametr pro rychlost stříhání 1 ks/s navíc s možností regulace otáček, které pokryjí požadovaný rozsah rychlosti pásu dopravníku 200–1500 cm/min.

V práci byly splněny všechny stanovené cíle. Z návrhu je možné realizovat stříhací zařízení modulární výrobní linky pro výrobu sofistikovaných adhezivních krytů ran.



Seznam použité literatury

- [1] MIKULKOVÁ, Monika. Přehled náplastí, které naleznete v lékárně: Od textilních po náplasti ve spreji. *Lékařnické kapky* [online]. b.r. [cit. 2017-06-03]. Dostupné z: <http://www.lekarnickekapky.cz/leky/zdravotnicko-pomucky/prehled-naplasti-ktere-naleznete-v-lekarne-od-textilnich-naplast.html>
- [2] PHARMACIST PHARMA JOURNAL [online]. b.r. [cit. 2018-01-15]. Dostupné z: <http://www.pharmacistspharmajournal.org/2010/02/clean-room-classification-aspects-of.html#.Wu87Wuqsa00>
- [3] MAŠÍN, Ivan. *Inovační inženýrství: plánování a návrh inovovaného výrobku*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012. ISBN 978-80-7372-852-6.
- [4] LEPŠÍK, Petr a Jan VODIČKA. *Plánování a řízení společných projektů*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012. ISBN 978-80-7372-920-2.
- [5] MAŠÍN, Ivan a Pavel JIRMAN. *Metody systematické kreativity*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012. ISBN 978-80-7372-853-3.
- [6] Festo Czech Republic: *Válce podle norem CRDNG* [online]. b.r. [cit. 2017-11-22]. Dostupné z: https://www.festo.com/cat/cs_cz/products_CRDNG
- [7] PEŠÍK, Lubomír. *Části strojů, 1. díl*. 4. dopl. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2010. ISBN 978-80-7372-573-0.
- [8] RAVEO s.r.o.: *Krokové motory* [online]. b.r. [cit. 2017-08-24]. Dostupné z: <http://www.raveo.cz/krokovye-motory-NEMA-23>
- [9] *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 3. dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2006. ISBN 80-736-1033-7.

Vliv procesních parametrů na kvalitu a přesnost 3D tisku technologií FDM/FFF

Daniel Friš

Sekce - Strojírenství,
Fakulta strojní, 2. ročník
Magisterský studijní program – STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

Abstrakt: Práce se zabývá, vlivem procesních parametrů na kvalitu povrchu a rozměrovou přesnost dílů vyráběných 3D tiskem. Poznáním, které parametry patří mezi nejvlivnější, jsme pak dále schopni využít při řešení nákladnosti procesu 3D tisku. Práce obsahuje metodiku zjišťování optimálních úrovní procesních parametrů pro materiál PLA. Práce je zpracována na základě požadavku fy Preciosa a.s. Výsledkem je souhrn procesních parametrů, které mají největší vliv na ukazatele kvality (doba tisku, spotřeba materiálu, kvalita povrchu a rozměrová přesnost).

Klíčová slova: procesní parametr, 3D tisk, kvalita povrchu, rozměrová přesnost.

1 Úvod

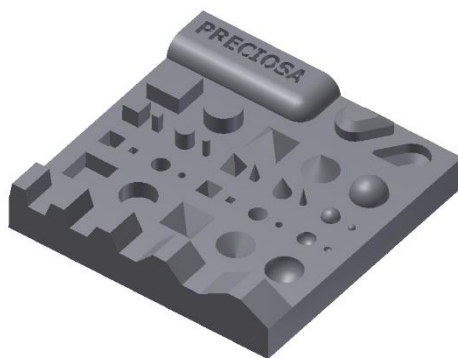
Tlak zákazníků na personalizované produkty nutí podniky ke změnám ve výrobních procesech. Snahou těchto nových systémů je pružnost výroby při zachování nízkých zásob a krátké průběžné doby výroby. To lze zajistit pomocí technologie 3D tisku. Největší nevýhodou této technologie je doba tisku a tedy nákladnost celého procesu. Pro výrobu prototypů je cesta 3D tisku nejrychlejší možnou. Avšak v případě výroby produktů pro koncového zákazníka je 3D tisk několikanásobně nákladnější než konvenční produkční stroje. V tomto případě se snažíme optimalizovat parametry tisku, se snahou dosáhnout požadované kvality povrchu a rozměrové přesnosti.

1.1 Technologie FDM/FFF

Princip této technologie je založen na nanášení termoplastu vrstvu po vrstvě. Termoplast do 3D tiskárny vstupuje ve formě struny, ta je navinuta na cívce. Touto technologií lze zpracovávat celou řadu materiálů (ABS, PLA, ASA, PC, PP, atd...). Celá práce bude zpracovávána na 3D tiskárně Ultimaker 2+. Jedná se o tiskárnu s otevřeným materiálovým systémem. Lze tedy využívat tiskové struny, které nejsou přímo vyráběny firmou Ultimaker.

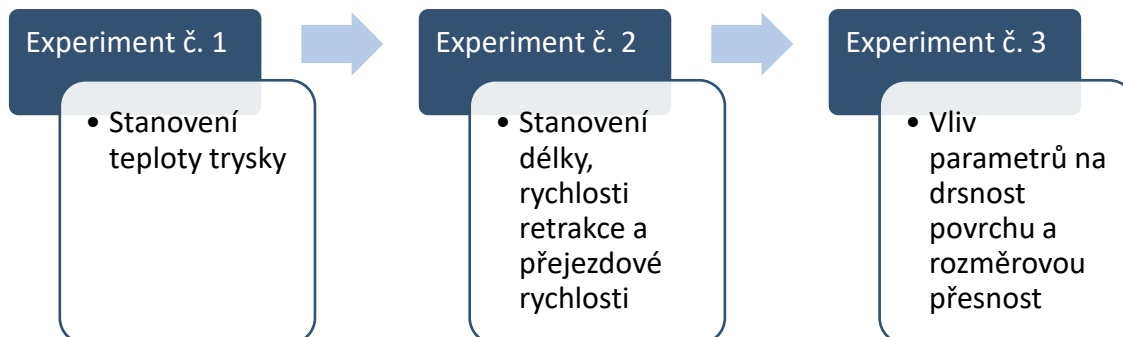
1.2 Referenční vzorek

Pro účely testování procesních parametrů bylo třeba navrhnout komplexní testovací vzorek, který bude sloužit pro měření drsnosti povrchu a rozměrové přesnosti. Tento vzorek viz obrázek 1 obsahuje konvexní i konkávní plochy. Je navržen tak aby jej bylo možné bez problému digitalizovat 3D skenerem.



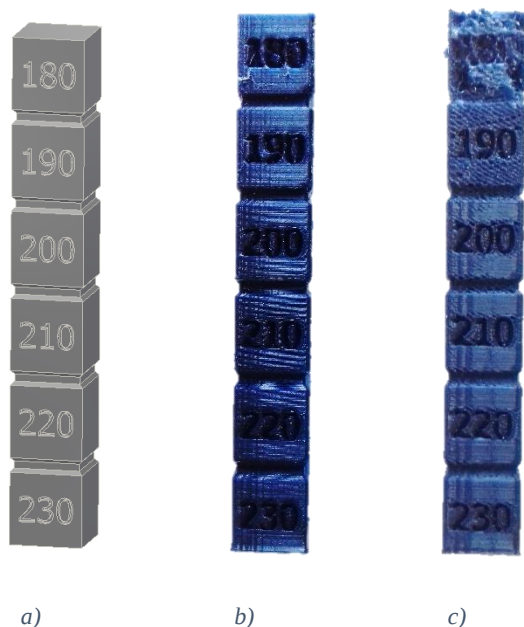
2 Vliv procesních parametrů na ukazatele kvality

Z tabulky 1 je patrné, že se jedná o poměrně velké množství parametrů. Proto jsme se rozhodli rozdělit experiment do 3 částí.



2.1 Stanovení teploty

Pro každou z částí experimentu byl stanoven referenční vzorek, ten nám pomůže zajistit optimální nastavení vyhodnocovaných parametrů. V této části jsme se zaměřili na teplotu trysky. Byl navržený testovací vzorek, viz obrázek 3a. Tento vzorek nám slouží ke zvolení optimální teploty trysky. Vzorek byl rozdělen na několik částí, každé této části byla přidělena určitá teplota. Pokud je teplota trysky příliš nízká, nedochází k vytlačování materiálu. Rozdíl vhodné teploty a příliš nízké teploty lze vidět na obrázku 3b a obrázku 3c.

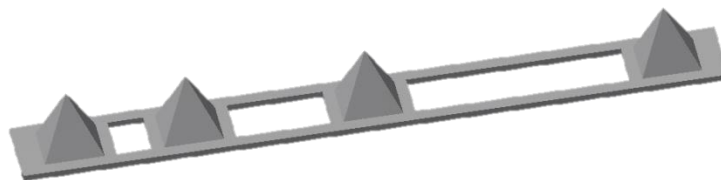


Obrázek 3: a) Navržený vzorek, b) vzorek tisknutý 30 mm.s^{-1} , c) vzorek tisknutý 100 mm.s^{-1} .

2.2 Stanovení retrakce a přejezdové rychlosti

Při tisku referenčního vzorku jsme zjistili, že mezi jednotlivými objekty, ze kterých se testovací vzorek skládá, jsou natažena vlákna. Tato vlákna vznikají v důsledku zbytkového tlaku v trysce. Vlivem tohoto tlaku dochází k vytlačování materiálu. Tento materiál je pak následně přitaven k místu, ke kterému tisková hlava přejíždí. Proto byl navržen testovací vzorek, viz obrázek 4, na kterém budeme zkoušet kombinace experimentů, které povedou k eliminaci tohoto efektu.

Kombinace parametrů pro jednotlivé experimenty byla stanovena pomocí metodiky plánování průmyslového experimentu dle Taguchiho. Ten stanovil pro určitý počet faktorů a určitý počet úrovní



Obrázek 4) Testovací vzorek - retrakce

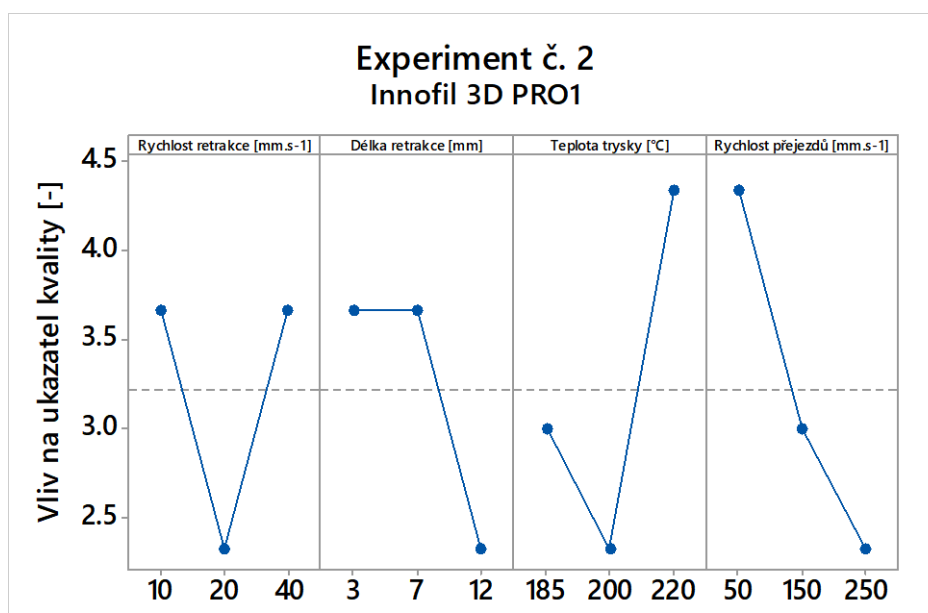
tzv. ortogonální pole. Tato pole udávají, jakým způsobem mezi sebou budeme kombinovat faktory. Pro náš případ, kdy se jedná o 4 faktory (teplota, přejezdová rychlost, délka a rychlost retrakce) je stanoveno ortogonální pole L9. To nám předepisuje 3 úrovně pro každý faktor. Tyto úrovně byly zvoleny následovně, viz tabulka 2. Vzorky jsme po vytištění porovnávali kvalitativně. Vzorky, které měly vlákna natažena skrze celou délku, dostala hodnocení 5, zatímco vzorky, které měly nepatrná vlákna, případně žádná, získala 1. Vzorky, které nebylo možné jednoznačně zařadit, získala ohodnocení 3.

[1]

Tabulka 2 – Stanovené úrovně experimentu

Faktory		Úroveň 1	Úroveň 2	Úroveň 3	
A	Rychlost retrakce	10	20	40	mm.s ⁻¹
B	Délka retrakce	5	7	12	mm
C	Teplota trysky	185	200	220	°C
D	Rychlost přejezdů	50	150	250	mm.s ⁻¹

Vyhodnocení průmyslového experimentu pak vypadalo následovně, viz graf 1.



Graf 1 - Efekt jednotlivých parametrů

Jelikož se snažíme dosáhnout hodnocení 1, v grafu č. 1 nám jde o minimalizaci hodnoty vlivu na ukazatel kvality. V tomto případě odpovídá každému parametru právě jedna hodnota. Nastavení, kterým dosáhneme odstranění tohoto problému je uvedeno v tabulce 3.

Tabulka 3 - Zvolené úrovně parametrů

Innofil 3D PRO1		
Rychlost retrakce	20	mm.s ⁻¹
Délka retrakce	12	mm
Teplota trysky	200	°C
Rychlost přejezdů	250	mm.s ⁻¹

2.3 Stanovení vlivu procesních parametrů na kvalitu a rozměrovou přesnost

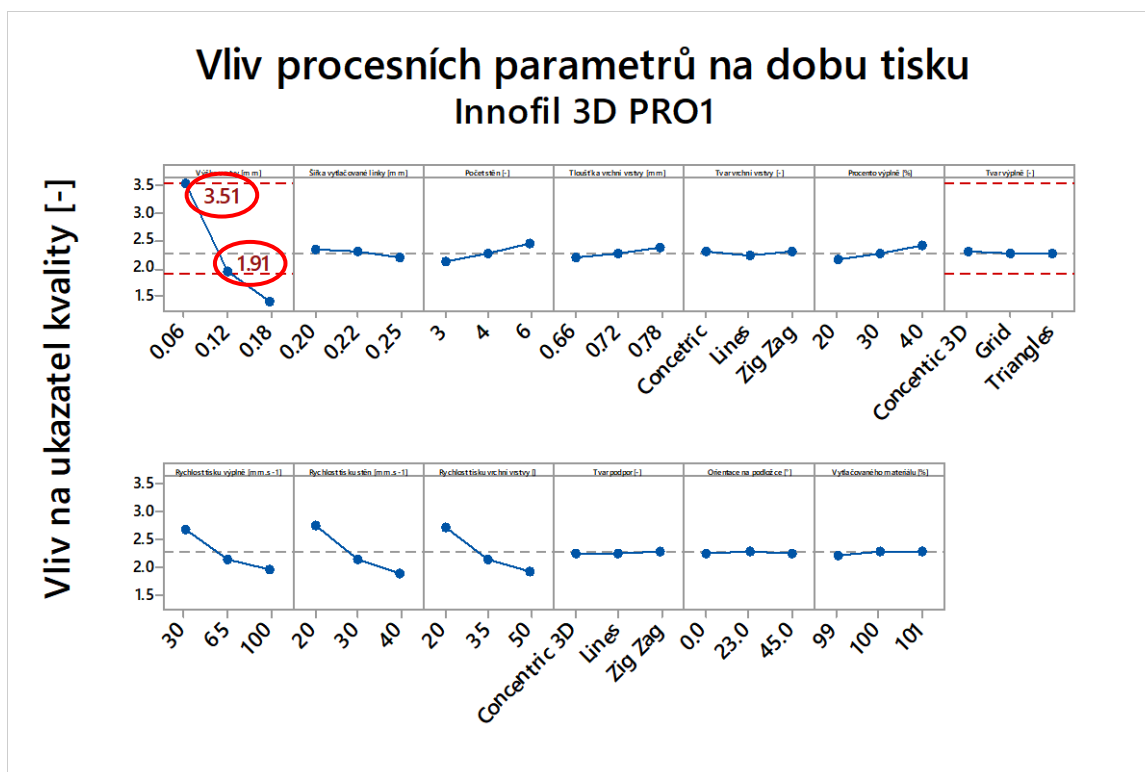
Nyní parametry zjištěné v předchozí části práce budeme uvažovat za konstantní. Je třeba zjistit jaký vliv na kvalitu povrchu a rozměrovou přesnost mají zbylé parametry z tabulky 1. Způsob, kterým to zjistíme, je stejný jako v předchozím případě. Hodnocení jednotlivých vzorků už nebude subjektivní, výsledkem bude hodnota drsnosti případně odchylka rozměru. Taguchi pro 13 faktorů stanovil ortogonální pole L27, toto pole je tři úrovně. Jako další krok je třeba stanovit úrovně procesních parametrů. Hodnoty úrovní jsou uvedeny v tabulce 4. [1]

Tabulka 4 - Stanovené hodnoty úrovní

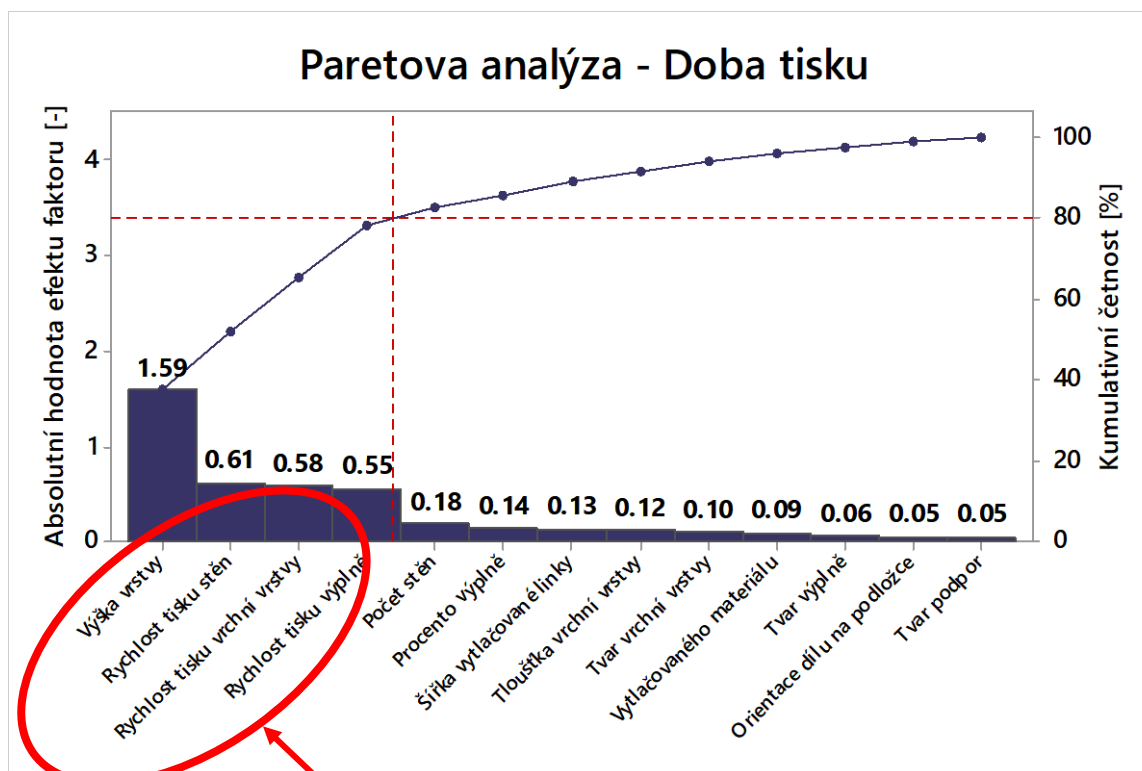
Faktory:		Úroveň 1	Úroveň 2	Úroveň 3	
A	Výška vrstvy	0.06	0.12	0.18	mm
B	Šířka vytlačované linky	0.2	0.22	0.25	mm
C	Počet stěn	3	4	6	-
D	Tloušťka vrchní vrstvy	0.66	0.72	0.78	mm
E	Tvar vrchní vrstvy	Lines	Concentric	Zig Zag	-
F	Procento výplně	20	30	40	%
G	Tvar výplně	Triangles	Grid	Concentric 3D	-
H	Rychlost tisku výplně	30	65	100	mm.s ⁻¹
J	Rychlost tisku stěn	20	30	40	mm.s ⁻¹
K	Rychlost tisku vrchní vrstvy	20	35	50	mm.s ⁻¹
L	Tvar podpor	Concentric 3D	Zig Zag	Lines	-
M	Orientace dílu na podložce	0	23	45	°
N	Vytlačovaného materiálu	99	100	101	%

Tisk veškerých naplánovaných vzorků trval přibližně 61 hodin, bylo spotřebováno 153 g materiálu.

Při rozhodování zda se jedná o vlivný parametr či ne, bylo použito Paretovo pravidlo. Toto pravidlo 80 na 20 nám zjistilo, na které parametry je třeba se zaměřit. V grafu č. 2 lze interpretovat míru vlivu parametru na ukazatele kvality jako největší rozdíl mezi jednotlivými úrovněmi. Hodnoty získané do Paretovy analýzy jsou rozdílem označených hodnot v grafu 2. [2].



Graf 2 - Vliv procesních parametrů na dobu tisku



Toto jsou dle Paretova pravidla procesní parametry, které mají největší vliv na dobu tisku.

Stejným způsobem se postupuje při zjištění vlivu procesních parametrů na spotřebu materiálu, drsnost povrchu vrchní vrstvy, drsnost povrchu boční strany a rozměrovou přesnost. Nyní následuje tabulka 5 s parametry, které mají největší vliv právě na výše uvedené ukazatele kvality. Pomocí grafů obdobných jako je graf 2 lze také stanovit úrovně, při kterých bude výsledek dosahovat nejlepších hodnot.

Tabulka 5- Vlivné procesní parametry

Doba tisku	Spotřeba materiálu	Drsnost Ra Top	Drsnost Ra Side
- Výška vrstvy - Rychlost tisku stěn - Rychlost vrchní vrstvy - Rychlost tisku výplně	- Procento výplně - Počet stěn - Výška vrstvy - Tloušťka vrchní vrstvy	- Výška vrstvy - Tvar vrchní vrstvy - Rychlost tisku výplně - Rychlost vrchní vrstvy - Tvar výplně - Procento výplně - Orientace dílu na podložce	- Výška vrstvy - Rychlost tisku stěn - Orientace dílu na podložce - Šířka vytlačované linky
Odchylka průměr válce	Odchylka rozměr XZ 40 mm	Odchylka rozměr XZ (5mm a 2.5mm) mm	Odchylka rozměr Y (2.5mm)
- Výška vrstvy - Orientace dílu na podložce - Počet stěn - Procento výplně - Rychlost tisku výplně - Rychlost tisku stěn - Rychlost tisku vrchní vrstvy	- Rychlost tisku výplně - Orientace dílu na podložce - Šířka vytlačované linky - Tvar výplně - Rychlost tisku stěn - Tloušťka vrchní vrstvy - Tvar podpor	- Výška vrstvy - Vytlačovaného materiálu - Rychlost tisku výplně - Rychlost tisku stěn	- Výška vrstvy - Tvar výplně - Rychlost tisku výplně - Rychlost tisku vrchní vrstvy

V zájmu fy Preciosa a.s. bylo zjistit vliv procesních parametrů v závislosti na kvalitě použitého materiálu. Byly zkoumány celkem 3 druhy materiálů. Z důvodu rozsahu článku jsou uvedeny pouze výsledky pro jeden materiál.

3. Závěr

Cílem práce bylo zjistit, jaký vliv mají procesní parametry na kvalitu povrchu a rozměrovou přesnost. Tohoto cíle bylo dosaženo, závěrečná tabulka uvádí parametry, které mají největší vliv. Při pohledu do tabulky je patrné, že existuje několik možností jak zajistit aby došlo k zlepšení ukazatele kvality avšak při minimální nárůstu doby tisku. Dalším přínosem práce je zjištění jakých hodnot drsnosti povrchu lze 3D tiskem dosáhnout. Pro zákazníka je těžké si představit, jakého výsledku dosáhneme při použití určitého nastavení parametrů. A zda nedojde k tzv. overkillu kvality. Tedy abychom náš výrobek netiskli déle než je třeba.

Literatura

- [1] BELAVENDRAM, Nicolo. *Quality by design: Taguchi techniques for industrial experimentation*. London: Prentice Hall, 1995.
- [2] Josef Tošenovský, Plánování experimentu, učební text, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Ostrava 2010

OPTIMALIZACE JÍZDNÍHO KOMFORTU GOLFOVÉHO VOZÍKU

Jírová Radka

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,

Fakulta strojní, 2. ročník

Navazující magisterský studijní program – INOVAČNÍ INŽENÝRSTVÍ

Abstrakt: Práce se zaměřuje na řešení minimalizace přenášených vibrací z kol elektrického golfového vozíku na sedadlo a sedící osobu. Tyto vibrace vznikají při jízdě golfového vozíku na nerovném terénu golfového hřiště. Řešením tohoto problému může být podle [2] využití pružné a tlumící vazby mezi rámem vozíku a sedadlem pevně spojeným s bateriemi elektrického pohonu. Podle [2] je rovněž možné použít pružnou a tlumící vazbu mezi rámem golfového vozíku a bateriemi elektrického pohonu a mezi bateriemi elektrického pohonu a sedadlem. K posouzení navrhovaných řešení je použit matematický výpočet popisující golfový vozík jako soustavu setrvačných hmot navzájem spojených pružnými a tlumícími vazbami. Výsledkem řešení matematického popisu navrhovaných řešení je odezva sedadla golfového vozíku na referenční skokový signál.

Klíčová slova: vibroizolace, sedadlo golfového vozíku, minimalizace vibrací, odpružená sedadla

1 Úvod

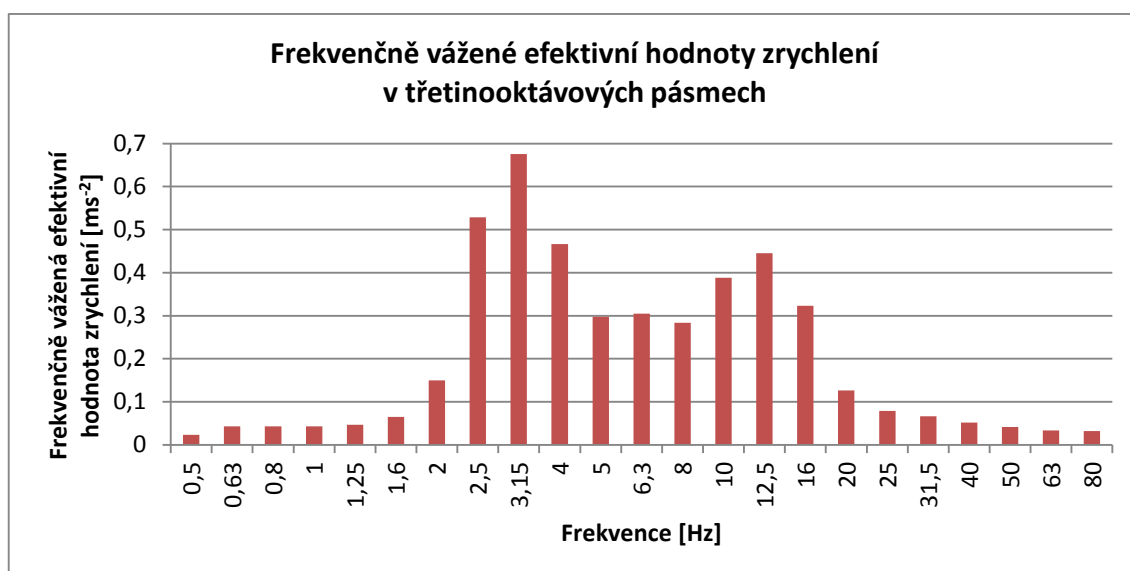
Odpružená sedadla jsou používána v celé řadě dopravních prostředků zejména za účelem ochrany zdraví před škodlivým vlivem vibrací vznikajících při jízdě, a také pro zvýšení pohodlí při jízdě. Při jízdě na nerovném terénu golfového hřiště vznikají intenzivní vibrace kol golfového vozíku, které se přenášejí na jeho rám, sedadlo a na něm sedící osobu. Konvenční golfové vozíky s elektrickým bateriovým pohonem odpruženými sedadly nedisponují, za účelem snížení přenosu vibrací na sedadlo a sedící osobu využívají pružnou a tlumící vazbu vloženou mezi podvozek a rám vozíku. Tyto vazby však přenos vibrací snižují pouze částečně, a tedy jízda v golfovém vozíku může být nepohodlná.

2 Posouzení účinků vibrací na pohodlí

Posouzení účinků vibrací na pohodlí sedící osoby je provedeno v souladu s [1].

Principem posouzení účinků vibrací je naměření časového signálu zrychlení na sedadle ve vertikálním směru při jízdě golfového vozíku na nerovném terénu golfového hřiště. Výsledkem hodnocení účinků vibrací je pak frekvenčně vážená efektivní hodnota zrychlení naměřeného časového signálu zrychlení, a následně porovnání této hodnoty zrychlení s tabulkou uvedenou v [1].

Frekvenčně vážené efektivní hodnoty zrychlení v třetinooktávových pásmech jsou zobrazeny na Obr. 1.



Obrázek 1: Frekvenčně vážené hodnoty zrychlení v třetinooktávových pásmech

Podle [1] zjištěná frekvenčně vážená efektivní hodnota zrychlení a_w spadá do intervalu vibrací hodnoceného jako nepohodlné až velmi nepohodlné.

3 Minimalizace přenosu vibrací

Podstata minimalizace vibrací přenášených z kol golfového vozíku na sedadlo a sedící osobu vyplývají z přihlášky vynálezu [2]. Přenos vibrací může být podle [2] minimalizován pomocí pružné a tlumící vazby umístěné mezi rámem vozíku a sedadlem pevně spojeným s bateriemi elektrického pohonu. Baterie elektrického pohonu spojené tuhou vazbou se sedadlem zvyšují setrvačný účinek setrvačné hmoty, a tím snižují vibrace sedadla. Podle [2] mohou být vibrace minimalizovány rovněž pomocí pružné a tlumící vazby umístěné mezi rámem golfového vozíku a bateriemi elektrického pohonu a mezi bateriemi elektrického pohonu a sedadlem. Spojení baterie elektrického pohonu a sedadla pomocí pružné a tlumící vazby umožňuje tuto soustavu s ohledem na minimalizaci vibrací z rámu na sedadlo účelně ladit. V obou případech je možné pružné a tlumící vazby doplnit vodícím mechanismem.

4 Výpočet přenosu vibrací

Výpočet vychází ze zjednodušeného popisu golfového vozíku jako soustavy hmot vzájemně spojených pružnými a tlumícími vazbami. Obecně tyto soustavy disponují více než šesti stupni volnosti, pro zjednodušení však lze uvažovat pouze vertikální pohyb jednotlivých setrvačných hmot.

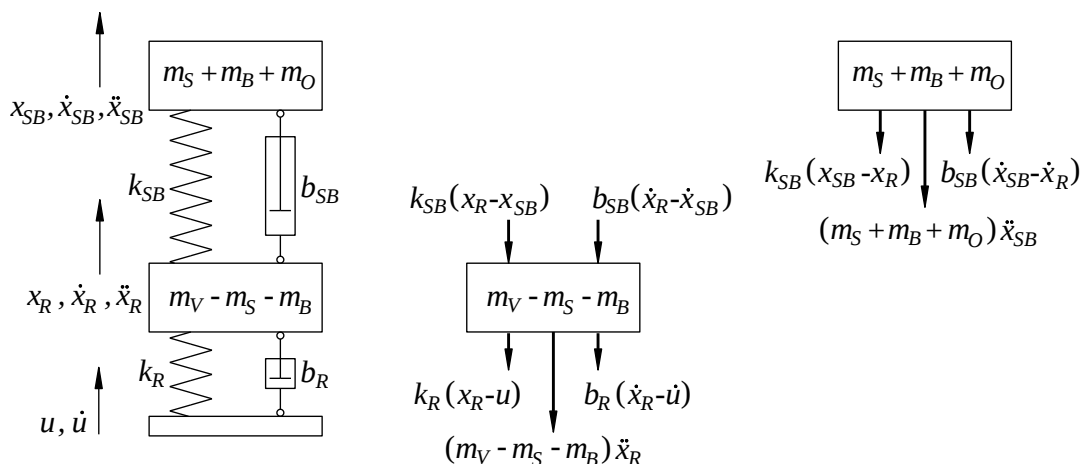
První možné řešení – odpružení sedadla s baterií lze popsat diferenciálními rovnicemi:

$$(m_V - m_S - m_B) * \ddot{x}_R + b_R * (\dot{x}_R - \dot{u}) + b_{SB} * (\dot{x}_R - \dot{x}_{SB}) + k_R * (x_R - u) + k_{SB} * (x_R - x_{SB}) = 0, \quad (1)$$

$$(m_S + m_B + m_O) * \ddot{x}_{SB} + b_{SB} * (\dot{x}_{SB} - \dot{x}_R) + k_{SB} * (x_{SB} - x_R) = 0, \quad (2)$$

kde m_V je hmotnost vozíku, m_S hmotnost sedadla, m_B hmotnost baterie, m_O hmotnost osoby, b_R součinitel tlumení rámu, b_{SB} součinitel tlumení mezi rámem a sedadlem s baterií, k_R tuhost podvozku, k_{SB} tuhost mezi rámem a sedadlem s baterií, x_R výchylka rámu, x_{SB} výchylka sedadla s baterií a u výchylka podvozku golfového vozíku.

Popis soustavy prvního možného řešení je na Obr. 2.



Obrázek 2: Popis diferenciálních rovnic (1) a (2).

Druhé možné řešení podle [2] – odpružení sedadla a baterie lze popsat diferenciálními rovnicemi:

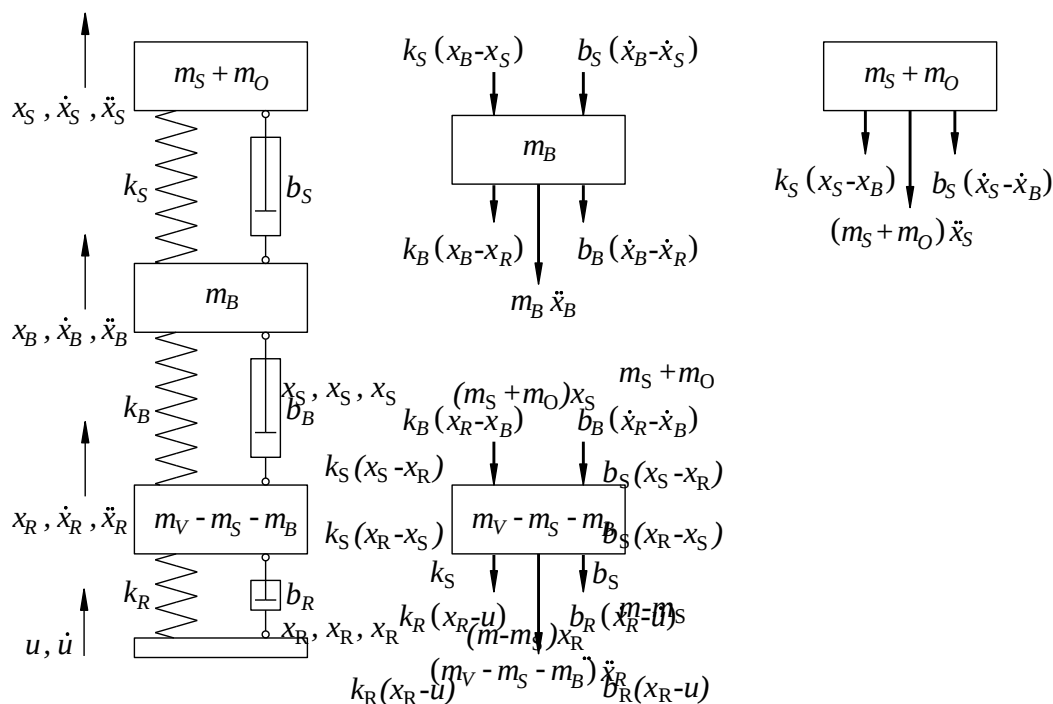
$$(m_V - m_S - m_B) \ddot{x}_R + b_R (\dot{x}_R - \dot{u}) + b_B (\dot{x}_R - \dot{x}_B) + k_R (x_R - u) + k_B (x_R - x_B) = 0, \quad (3)$$

$$m_B \ddot{x}_B + b_B (\dot{x}_B - \dot{x}_R) + b_S (\dot{x}_B - \dot{x}_S) + k_B (x_B - x_R) + k_S (x_B - x_S) = 0, \quad (4)$$

$$(m_S + m_O) \ddot{x}_S + b_S (\dot{x}_S - \dot{x}_B) + k_S (x_S - x_B) = 0, \quad (5)$$

kde b_B součinitel tlumení mezi rámem a baterií, b_S součinitel tlumení mezi baterií a sedadlem, k_B tuhost mezi rámem a baterií, k_S tuhost mezi baterií a sedadlem, x_B výchylka baterie a x_S výchylka sedadla.

Popis soustavy druhého možného řešení je na Obr. 3.



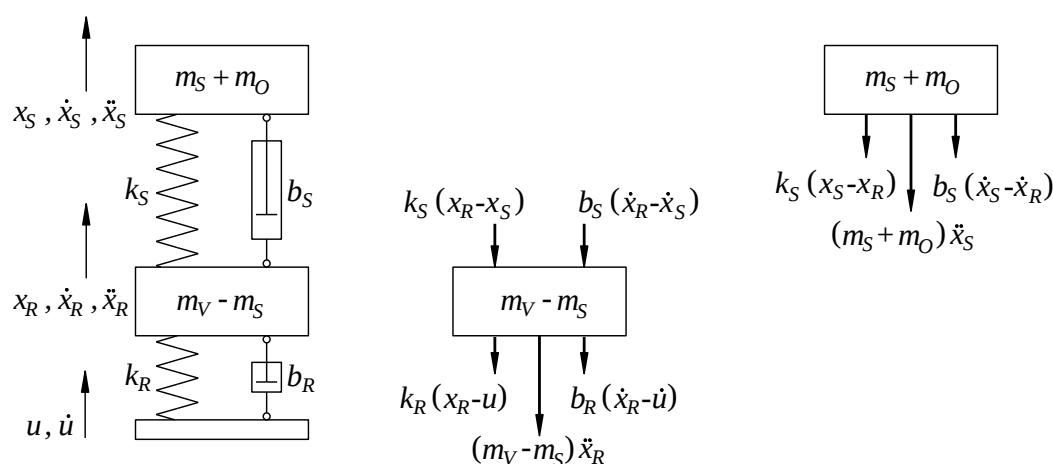
Obrázek 3: Popis diferenciálních rovnic (3) - (5).
 $u(\omega t), u(\omega t)$

Tato navrhovaná řešení lze porovnat se známým principem odpružení sedadel vozidel, kdy je použita pružná a tlumící vazba mezi rámem a samotným sedadlem vozidla, při použití vodícího mechanismu. Diferenciální rovnice popisující tuto soustavu jsou:

$$(m_V - m_S) * \ddot{x}_R + b_R * (\dot{x}_R - \dot{u}) + b_S * (\dot{x}_R - \dot{x}_S) + k_R * (x_R - u) + k_S * (x_R - x_S) = 0, \quad (6)$$

$$(m_S + m_O) * \ddot{x}_S + b_S * (\dot{x}_S - \dot{x}_R) + k_S * (x_S - x_R) = 0, \quad (7)$$

Popis diferenciálních rovnic (6) a (7) je zobrazen na Obr. 4.



Obrázek 4: Popis diferenciálních rovnic (6) a (7).

V maticové podobě lze soustavu popsat rovnicí:

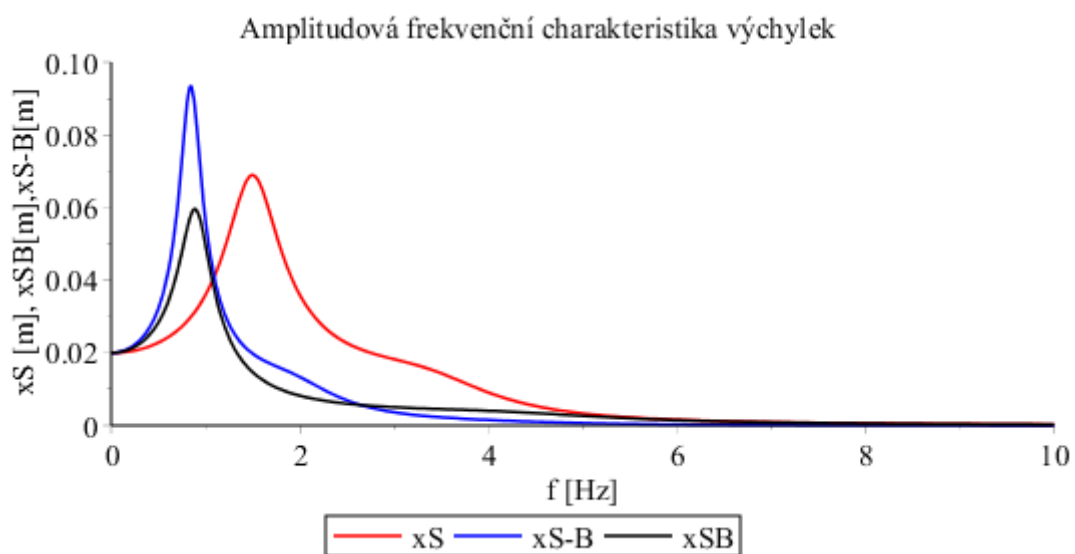
$$\vec{q} = (K + i * \omega * B - \omega^2 * M)^{-1} * \vec{f}, \quad (8)$$

kde $\vec{q}$ je vektor výchylek, $\mathbf{K}$ matice tuhostí, $\mathbf{B}$ matice tlumení, $\mathbf{M}$ matice hmotností, $\vec{f}$ vektor síly odpovídající výchylce $\vec{u}$, ω kruhová frekvence kmitání a i imaginární jednotka.

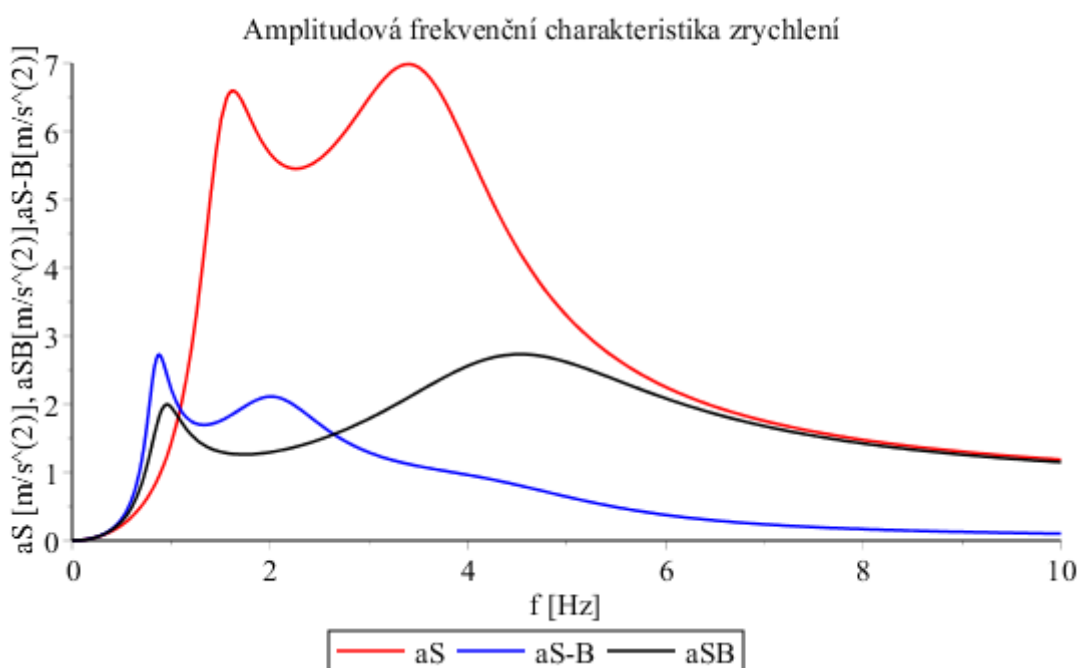
Vektor zrychlení $\ddot{\vec{q}}$ je v maticové podobě možné získat jako:

$$\ddot{\vec{q}} = \left(\frac{\mathbf{K}}{\omega^2} + i * \frac{\mathbf{B}}{\omega} - \mathbf{M} \right)^{-1} * \vec{f}, \quad (9)$$

Výsledkem řešení rovnice (8) a (9) je amplitudová frekvenční charakteristika výchylek a zrychlení sedadel jednotlivých konstrukčních variant. Amplitudové frekvenční charakteristiky jsou zobrazena na Obr. 5 a Obr. 6.



Obrázek 5: Amplitudová frekvenční charakteristika výchylek sedadel soustav.

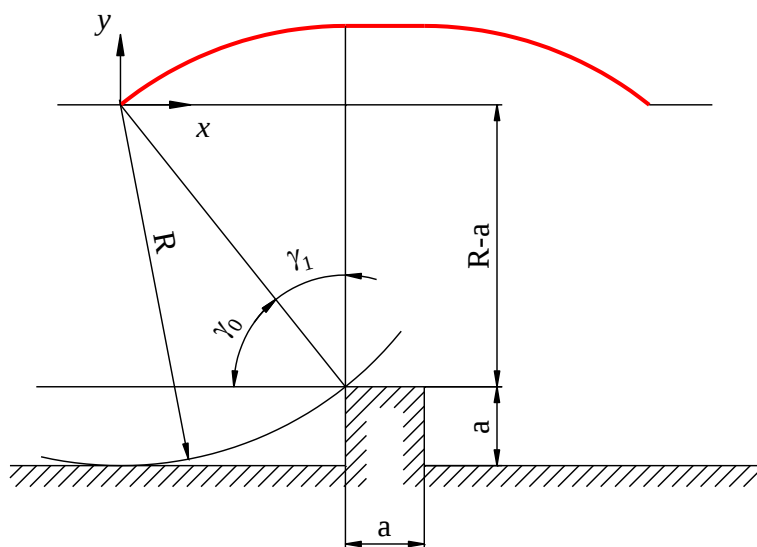


Obrázek 6: Amplitudová frekvenční charakteristika zrychlení sedadel soustav.

Při jízdě elektrického golfového vozíku na nerovném terénu golfového hřiště vznikají obecné neperiodické vibrace, proto je amplitudovou frekvenční charakteristiku zobrazenou na Obr. 5 a Obr. 6 nutno brát jako doplňující.

Obečné neperiodické vibrace si ve zjednodušeném případě lze představit jako jednotlivé skokové funkce. Výhytku podvozku golfového vozíku u v diferenciálních rovnicích (1) – (7) lze pak nahradit referenčním skokovým signálem.

Referenční skokový signál vyplývá z úvahy přejezdu kol golfového vozíku přes referenční nerovnost. V nejjednodušším případě lze uvažovat kola golfového vozíku i referenční nerovnost jako dokonale tuhá tělesa a pohyb těchto kol po referenční nerovnosti jako valivý. V takovém případě lze jednoduše získat závislost vertikální dráhy středů kol na čase. Tato závislost pak zjednodušeně odpovídá výchylce podvozku golfového vozíku u , tedy referenčnímu skokovému signálu. Geometrie referenční nerovnosti je patrná z Obr. 7. Obr. 7 rovněž zobrazuje dráhu středu kola golfového vozíku při přejezdu přes referenční nerovnost.



Obrázek 7: Geometrie referenční nerovnosti a dráha středu kola při jejím přejezdu.

Při konstantní rychlosti elektrického golfového vozíku je možné závislost vertikální dráhy středu kola na čase popsat rovnicemi:

$$y_1(t) = R * \sin(\omega * t + \gamma_0) - (R - a), t \in \langle 0; t_1 \rangle, \quad (9)$$

$$y_2(t) = a, t \in \langle t_1; t_1 + t_2 \rangle, \quad (10)$$

$$y_3(t) = R * \sin(\omega * (t - t_2) + \gamma_0) - (R - a), t \in \langle t_1 + t_2; t_1 + t_2 + t_3 \rangle, \quad (11)$$

kde R je poloměr kola golfového vozíku, γ_0 počáteční úhlová dráha v čase $t = 0$ s, a výška a délka referenční nerovnosti a ω úhlová rychlost.

Úhlová rychlost ω se vypočte:

$$\omega = \frac{v_0}{R}, \quad (12)$$

kde v_0 je zvolená konstantní rychlost golfového vozíku.

Časy t_1 , t_2 a t_3 se vypočtou podle vztahů:

$$t_1 = \frac{\gamma_1}{\omega}, \quad (13)$$

$$t_2 = \frac{a}{v_0}, \quad (14)$$

$$t_3 = t_1, \quad (15)$$

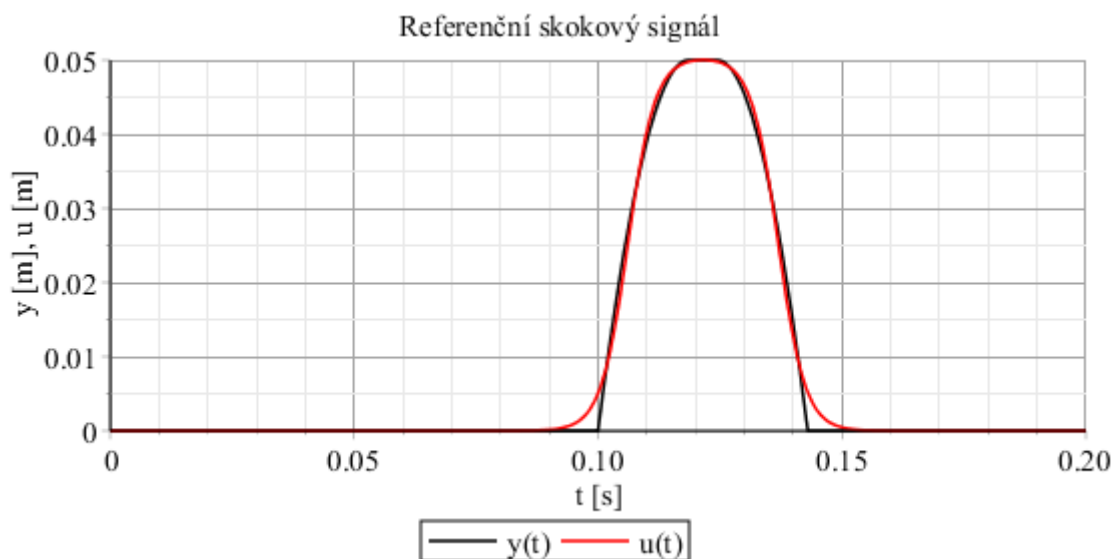
kde úhlovou dráhu γ_1 lze vypočítat jako:

$$\gamma_1 = \arctg \left(\frac{\sqrt{R^2 - (R-a)^2}}{R-a} \right), \quad (16)$$

pak je počáteční úhlová dráha γ_0 v čase $t = 0$ s rovna:

$$\gamma_0 = \frac{\pi}{2} - \gamma_1, \quad (17)$$

Zjištěnou závislost vertikální dráhy středu kola na čase lze proložit spojitou křivkou, která lépe odpovídá skutečnému chování kol golfového vozíku při přejezdu nerovnosti. Tato spojitá křivka pak odpovídá referenčnímu skokovému signálu a tedy výchylce podvozku golfového vozíku u . Závislost vertikální dráhy středu kola na čase a proložení této závislosti spojitou křivkou je popsáno na Obr. 8.



Obrázek 8: Referenční skokový signál $u(t)$.

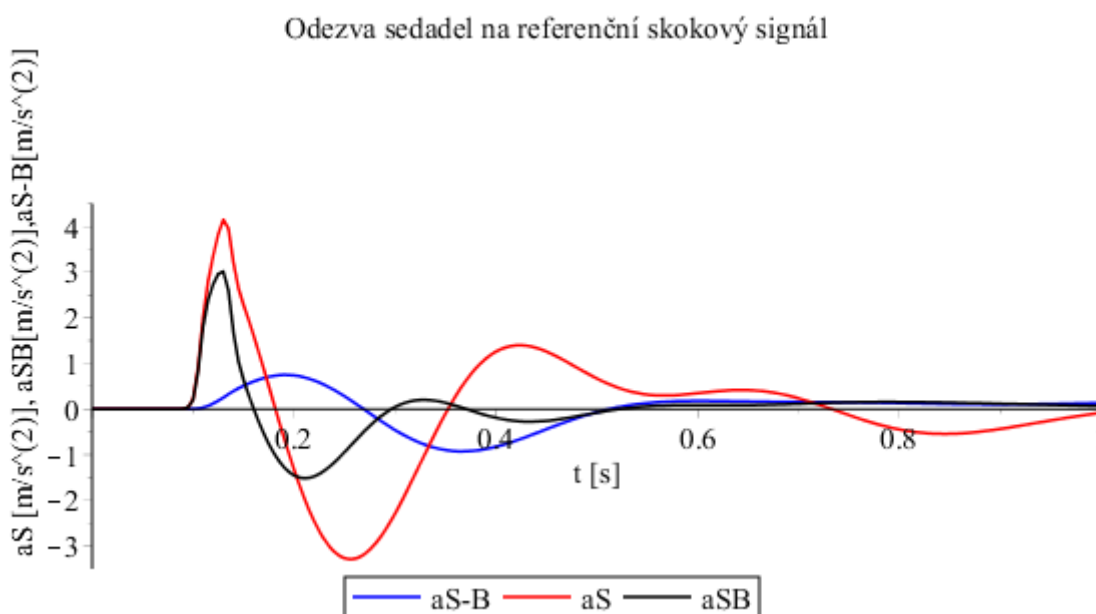
Předpis referenčního skokového signálu u je:

$$u(t) = 20,17 * [0,025 * tgh(180 * t - 19,1) + 0,025] * [-0,025 * tgh(180 * t - 24,65) + 0,025], \quad (18)$$

Výsledkem řešení diferenciálních rovnic (1) – (7) je odezva jednotlivých soustav na referenční skokový signál. Odezvy soustav na referenční skokový signál jsou zobrazeny na Obr. 9 a Obr. 10.



Obrázek 9: Odezva sedadel na referenční skokový signál – časový průběh výchylek



Obrázek 10: Odezva sedadel na referenční skokový signál – časový průběh zrychlení

Pro posouzení minimalizace vibrací přenášených z kol golfového vozíku na sedadlo a sedící osobu z hlediska účinků těchto vibrací na pohodlí je podle [1] rozhodující graf časového průběhu zrychlení (Obr. 10) jako odezva sedadel jednotlivých soustav na referenční skokový signál.

5 Závěr

Práce se zabývá problematikou izolace vibrací sedadla elektrického golfového vozíku. Řešení využívá myšlenku přihlášky vynálezu o zvýšení setrvačného účinku setrvačné hmoty pevně spojené hmoty se sedadlem a rovněž využívá myšlenku možnosti ladění soustavy užitím pružné a tlumící vazby mezi touto hmotou a sedadlem. To umožňuje výrazně snížit vibrace přenášené z kol golfového vozíku na řidiče a spolujezdce.

Literatura

- [1] ČSN ISO 2631-1. *Vibrace a rázy – Hodnocení expozice člověka celkovým vibracím – Část 1: Všeobecné požadavky*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [2] BAG DEVELOPMENT s.r.o. Golfový vozík s bateriovým elektrickým pohonem a sedákem. R. Svoboda, R. Jírová a L. Pešík. Česká Republika. Přihláška vynálezu PV 2018-112. 8.3.2018.
- [3] Pešík, L., Skarolek, A.: Tuning of Vibration Isolation Differential Pneumatic System by Means of Trottle Valve. In *Transactions of the Universities of Košice: Research reports from the Universities of Košice*. 2nd edition. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2011. s. 191-196. ISSN 1335-2334.
- [4] Pešík, L., Skarolek, A.: Heat Transfer Effects on Vibration Isolation Differential Pneumatic System. In *Transactions of the Universities of Košice: Research reports from the Universities of Košice*. 3rd edition. Košice :Technická univerzita v Košiciach, 2012. s. 109-114. ISSN 1335-2334.
- [5] Dresig, H.; Holyweißig, F.: *Maschinendynamik*. 8. Auflage. SpringerVerlag. Berlin, 2008.

Dimensional Stability of Parts Manufactured by Additive Technology

Rakeshkumar D. Soni^{1, a}, Radomir Mendricky^{2, b}

¹*Department of Manufacturing Systems and Processes, Faculty of Mechanical Engineering, 2nd year, Technical University of Liberec, Liberec, Czech Republic.*

²*Department of Manufacturing Systems and Automation, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Liberec, Liberec, Czech Republic.*

^a*rakesh_d_soni@yahoo.com*, ^b*radomir.mendricky@tul.cz*

Abstract

The article focuses on an analysis of the long-term dimensional stability of parts produced by additive technology (using 3D printing). A year ago, models were already manufactured by different additive technologies such as FDM, Polyjet, SLS, and SLA. These models would be scanned by using 3D contactless scanner ATOS II 400 and inspected by GOM Inspect Professional V8 depend on the principles of 3D printing and optical digitization. An inspection was done with duration of time like after the printing 3 months, after a year and after a year with standard test-1 is called humidity and temperature whereas standard test-2 is called UV radiation. Then this analysis of measurement compare with CAD and first day of models printing. Based on this analysis and from point of view of ageing with respect of time, which technology and material will have good dimensional and shape stability is discussed.

Key words: Additive technology, Fused Deposition Modeling (FDM), PolyJet, Selective Laser Sintering (SLS), Stereolithography (SLA), 3D optical scanner, 3D digitization.

1 Introduction

Additive Manufacturing (AM) has been developed for industrial applications due to its remarkable capabilities, such as building complex parts that are otherwise difficult to manufacture by the conventional methods. AM is a layer by layer automated fabrication process for making scaled 3-dimensional physical objects directly from 3D CAD data without utilizing part-depending implements. It was basically called “3D printing”. This is a pleasing to all good quality among AM processes by virtue of its quicker producing time; easily useable and affectability. AM is subdivided into different techniques such as Stereolithography (SLA), Selective laser sintering (SLS), Fused deposition modeling (FDM), Selective Laser Melting (SLM), Laminated Object Manufacturing (LOM) many more processes such as three-dimensional printing (3D printing) and Polyjet, accessed the market. Today AM has a trend in all major industries like automotive, aerospace to medical implants, fashion and other fields (e.g., advanced craftsmanship and structural plan).

Furthermore, AM is applicable in engineering, non-engineering and domestic utilization as well [1, 2, 3]. The advantages and disadvantages of each Rapid Prototyping (RP) processes have dependency on the type of material and building styles utilized for the fabrication of components. The material utilized in these processes include Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS), Polycarbonate (PC), photo-curable resin, polyamide, wax, metal/polymer/ceramic powders, adhesive coated sheets etc. [2,4]. The quality of RP materials is adequate for limited scale application, but does not always fulfill the quality and accuracy precondition for vast application for industrial purposes [2, 4, and 5].

During research, a few additional studies concentrating on the technological details like which parameter to set for printing and which materials used for printing, material properties, after the printing what would be effect of an environmental condition with duration of time [6,7].

In this article mainly the focus is on an analysis of the long-term geometric stability

of parts produced by additive technologies such as Fused Deposition Modeling (FDM), Polyjet, Selective laser sintering (SLS) and Stereolithography (SLA). The models were already printed a year ago and would be scanned by 3D contactless scanner ATOS II 400 and inspected by GOM Inspect Professional V8 with principle of 3D printing and optical digitization. In addition, these all models were scanned and inspected during some time intervals like as after 3 months, after a year and after one year with standard test-1 (i.e. temperature and humidity- One cycle runs for 720 min and temperature range from -40°C to $+80^{\circ}\text{C}$ and relative humidity from 30% to 80%) and test-2 (i.e. Ultraviolet lighting-Outdoor cycle test is described in table 1). These measurements were compared with CAD model and first day of printing. Based on these analyses the dimensional and shape stability of additive manufacturing from point of view of ageing in time must be checked. Furthermore, some of parameters were taken into account such as effect of the used technology used, used 3D printer and an effect of test-1 and test-2.

2 Manufacturing the test sample

The model was already designed in CAD software a year ago as shown in fig.1. Based on the designed 3D CAD model, further description was made with respect to dimensions and measureable parameters by scanning and inspection with help of GOM Inspect Professional V8 software. Measureable parameters were diameters of sphere 1, sphere 2, sphere 3, Spacing between two spheres, diameters of Inner cylinder 1, cylinder 2, cylinder 3, outer cylinder 4 and flatness, horizontal and vertical dimensions.

Table 1: Test climates for Outdoor - daytime

Climate parameter	Unit	Dry climate	Humid Climate
Black standard temperature	$^{\circ}\text{C}$	(measured value)	(measured value)
Test chamber temperature	$^{\circ}\text{C}$	42 ± 3	42 ± 3
Rel. atmospheric humidity	%	< 30	> 60
Radiation intensity	W/m^2	1000 ± 100	1000 ± 100

These all things are represented in the form of 2D drawing of the CAD model with inspection labels in fig.2. Here parts were manufactured by different Additive technologies such as FDM, Ployjet, SLS and SLA with different materials and structure of printing. In addition, the manufacturer's properties of model print are described in table 2.

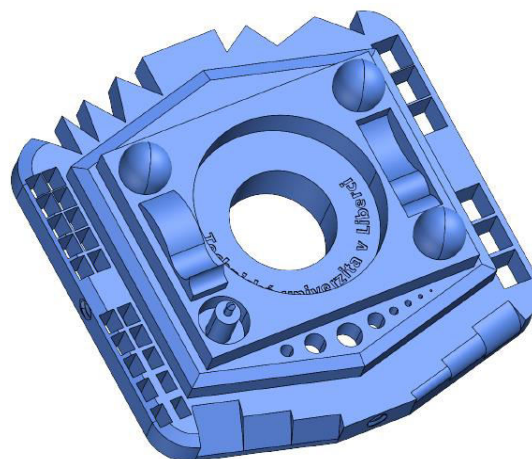


Figure 1: Designed 3D CAD model

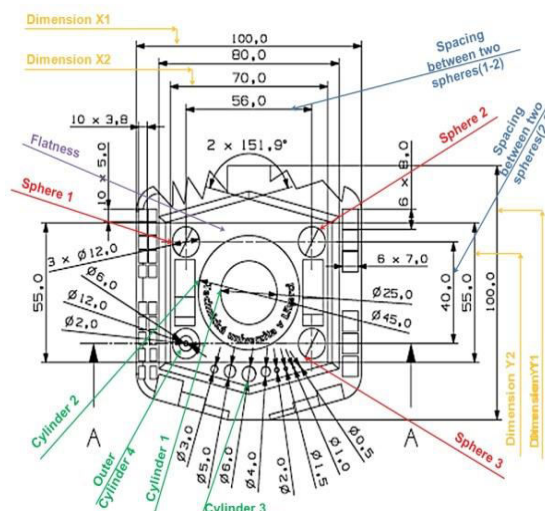


Figure 2: 2D drawing of the CAD model with inspection label

Table 2: Description of model manufacturer and standard test

Sr. No.	Printer	Material	Layer thickness mm	Model	Standard Test
1	FDM Dimension	ABS-P400	0.25 mm	Full Solid	2
2	FDM Dimension	ABS-P400	0.25 mm	Sparse light	1
3	FDM Fortus	ABS-M30	0.25 mm	Full Solid	1
4	FDM Fortus	ABS-M30	0.25 mm	Sparse light	2
5	Polyjet Object 500	Vero Gray	0.016 mm	Matt	2
6	Polyjet Object 500	Vero Gray	0.016 mm	Glossy	1
7	SLS EOSint P395	PA 2200	0.1 mm	Vertically printed	2
8	SLS EOSint P395	PA 2200	0.1 mm	Horizontally printed	1
9	SLA Form 2	White Resin	0.05 mm	Full model TUL	2
10	SLA Ultra 3SP	ABS 3SP Tough	0.05 mm	Full model Out side	1

3 Measurement methods & equipment used

Currently, Optical 3D measuring technology and full-filed surface measurement systems has become a standard tool in virtually all industries worldwide. In this article used Optical Contactless 3D scanner was manufactured by GOM-ATOS II 400 (figure 3). Technical parameters of this scanner are shown in table 3. ATOS 3D scanner is 3D coordinate measuring machine with high degree of flexible. The fast, non-contact, optical 3D scanners deliver a high resolution point cloud which precisely describes free-form surfaces, finishes, and geometries. The sensor forms the basis for a diverse range of measuring tasks – from simple 3D scanning to fully automated

measurement and inspection processes. The ATOS Essential line with the GOM Scan software is designed for simple scanning tasks. Its focus is on 3D scans of high data quality for applications such as reverse engineering or rapid prototyping [8].

Table 3: Technical Parameters of ATOS II 400 optical scanner

ATOS II 400 Optical Scanner	
Weight	5.2 kg
Dimensions	490 x 260 x 170 mm
Time of 1 scan	1 second
Measured Volume	250 x 200 x 200 mm
Number of points in one scan	Up to 1, 8400,000
Point density	0.04 -0.18 -0.5 mm
Measurement accuracy	Approx...30 μ m

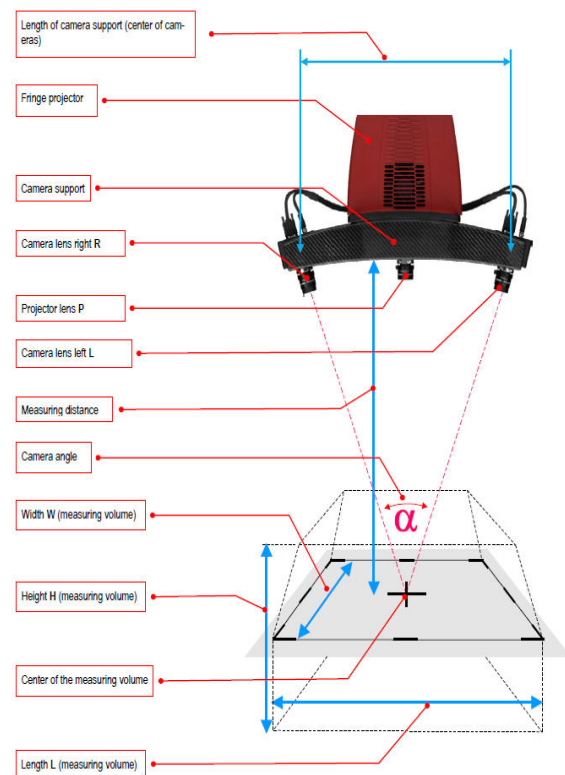


Figure 3: ATOS optical scanner with definition of terms referring to the sensor unit [8]

The ATOS system is based on the triangulation principle: The sensor unit projects different fringe patterns on the object to be measured and observes them by two cameras. Based on the optical transformation equations, the computer automatically calculates the 3D coordinates for each camera pixel with high precision. These devices use lasers, optics and charge coupled devices (CCD) sensors to capture point data.

In scanning, first set the cameras for better scanning the models and fix the scanner on angular position at 45^0 and set the 14 numbers of steps to capture images within 360^0 by rotating table. The digitization process of the inspected sample is shown in fig.4. Depending on the camera resolution, a point cloud of up to 4 million surface points' results for each individual measurement.

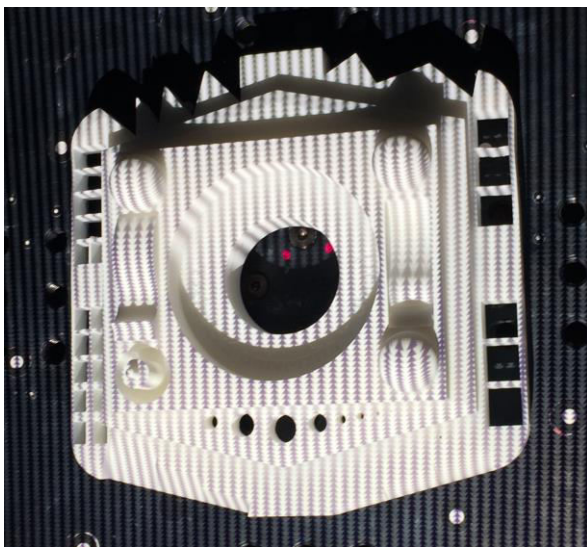


Figure 4: The digitization process of the inspected sample

After the digitize an object; many individual measurements from various views are required. Transformation into a global coordinate system is done automatically by means of the reference points. Each individual measurement completes the building-up of the 3D model of the object to be scanned. In addition, remove the unnecessary part from scanned then converted into .stl file. It gave better quality visualization.

4 Analysis of Manufacturing Accuracy

After scanning the models and converting file into .stl, the measurement of dimension was done with the help of GOM Inspect Professional V8. Basic geometrical elements (cylinders, spheres, planes, etc.) were calculated by interlacing the fitting elements with Gauss Best-fit for 3σ . Here some dimensions like spheres diameter, spacing between two spheres and inner cylinders, outer cylinder with cylindricity were measured (fig.5 & 6). It is illustrating that nominal means CAD data and actual dimension means scanned data with deviation.

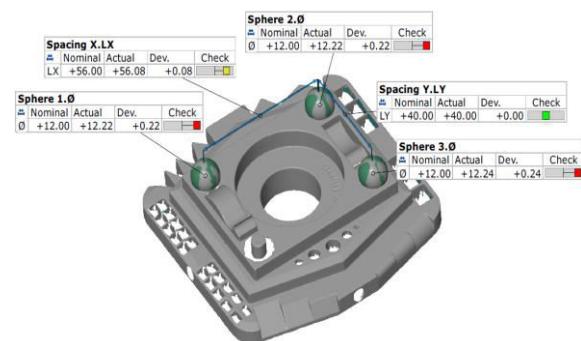


Figure 5: Inspection of spheres diameter and spacing between them.

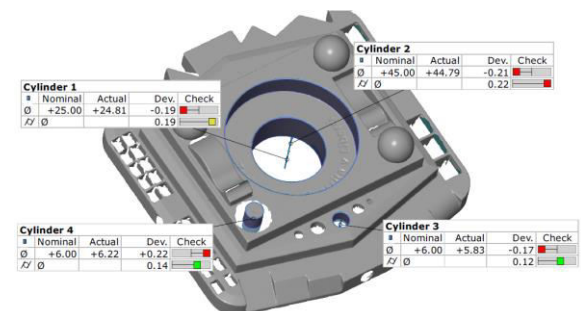


Figure 6: Inspection of inner cylinders diameter and outer cylinder diameter.

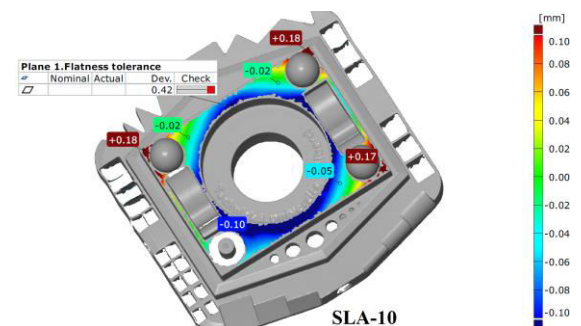


Figure 7: Inspection of surface flatness after a year with test-1 & 2

From fig.7 is showing about inspected the models after a year with test-1 & 2 of surface flatness by GOM Inspect Professional software. In SLA-10 there were more changed like +0.18 and -0.10 as shown in fig.7. Moreover, There were inspected horizontal and vertical dimensions same as previous.

In this research there are used 10 types of models manufactured by different technologies equally FDM, Polyjet, SLS and SLA with different structure of printing. Furthermore, This inspection was compared with the measured dimension CAD and first day of printing. Here the average deviation values were calculated and divided into two groups. From those values which one is less than 0.05 mm, it was considered as measurement errors and which values were more than 0.05 mm, it was considered as model's errors which means they don't have good dimensional stability during the time. Below mentioned results show the average deviations with duration of time after the part manufacturing such as 3 months, after a year and after a year with test-1 & 2.

Figure 8 represents the diameters of spheres and it is clearly defined from figure that in Polyjet-6, SLS-8 and SLA-10 there were good dimensional stability (less than 0.05 mm deviation) after a year but while testing with standard test-1 and test-2, there were seem some increment the deviations (more than 0.05 mm), which means no longer dimensional stability after a year. On the other side, the remaining models such as FDM Dimension-1 & 2, FDM Fortus-3 & 4, Polyjet-5, SLS-7 and SLA-9, there were good dimensional stability (less than 0.05 mm deviations) throughout all time.

The below figure 9 it can be seen that in Polyjet-6, SLA-9 there were no change in the deviations more than ± 0.05 mm up to a year it means good dimensional stability up to a year but after using standard test-1 & 2, there

were seem some sudden increase and decrease in the deviation of dimensions, which were more than ± 0.05 mm (no longer dimensional stability after a year with test-1 & 2). Additionally in SLA-10, there was good dimensional stability up to 3 months but after a year and after a year with test-1, the values of deviation were decreased, so that there were no good dimensional stability throughout the time. On the other hand, the remaining models such as FDM Dimension-1 & 2, FDM Fortus-3 & 4, Polyjet-5 and SLS-7 & 8 had good dimensional stability because the values of deviation was below ± 0.05 mm throughout the time.

From fig.10 it can be seen that FDM Fortus-4, Polyjet-6 and SLA-9 & 10, deviation values were more than ± 0.05 mm so that it could be considered as no longer dimensional stability throughout the time. In some cases the value of deviation was below ± 0.05 mm up to a year but after performing standard test-1 & 2 there were observed bad dimensional stability in the models. Apart from this the models such as FDM Dimension-1 & 2, FDM Fortus-3, Polyjet-5 and SLS-7 & 8 had no changed more than ± 0.05 mm deviations during all-time.

In fig.11 indicates some minor changed in outer cylinder or sometimes no any deviations up to a year but after using standard test-1 & 2 outer diameter of cylinder was increased or decreased. It is clear from fig.50 that deviation values were not more than ± 0.05 mm during all-time it means good dimensional stability throughout time in all models.

Figure 12 depicts the average deviation of cylindricity with duration of time such as 3 months, after a year and after a year with test-1 & 2 compared with the 1st day of printing. From this figure it can be seen that in all models, there were minor change (less than ± 0.02 mm deviations) and sometimes remained constant during all time.

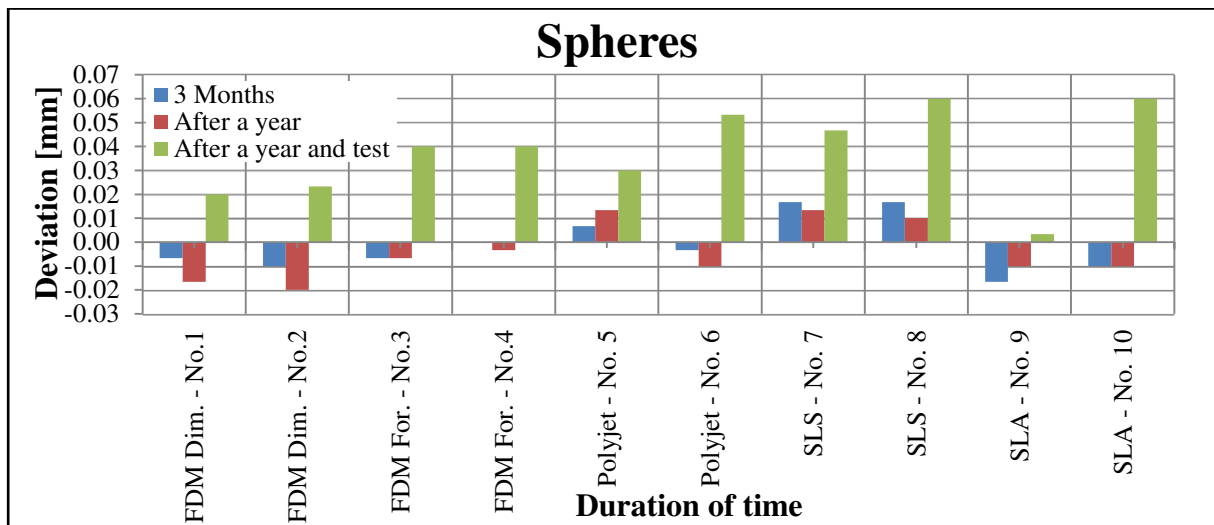


Figure 8: Average deviations of spheres with duration of time

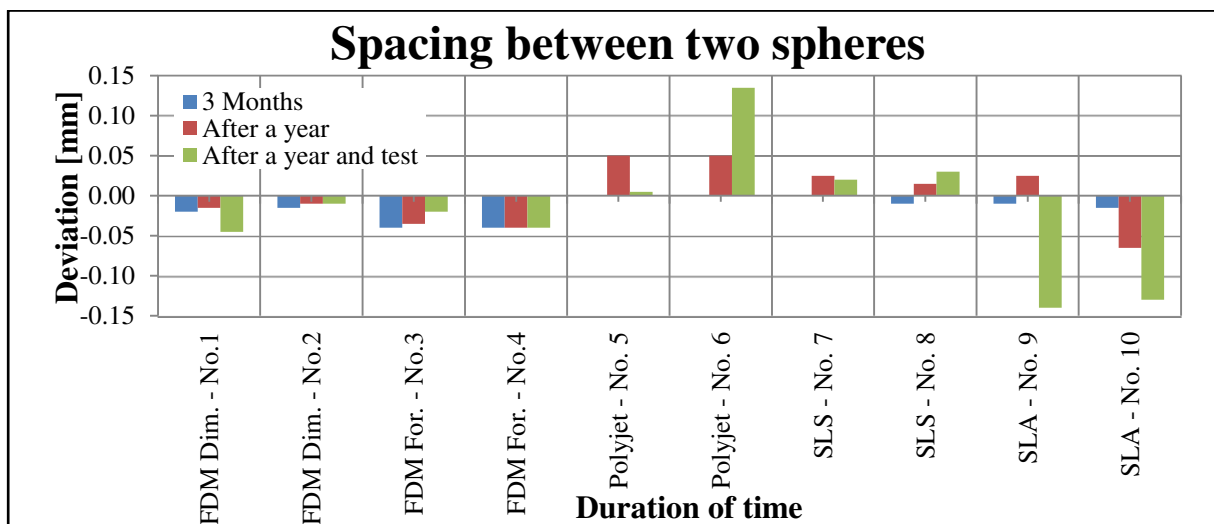


Figure 9: Average deviations of spacing between two spheres with duration of time

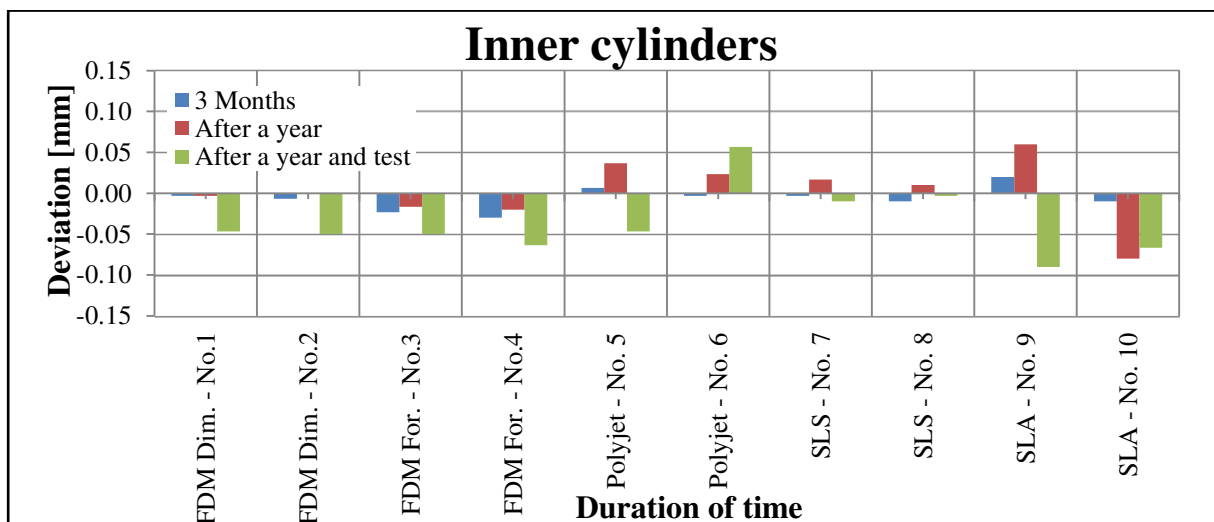


Figure 10: Average deviations of inner cylinders with duration of time

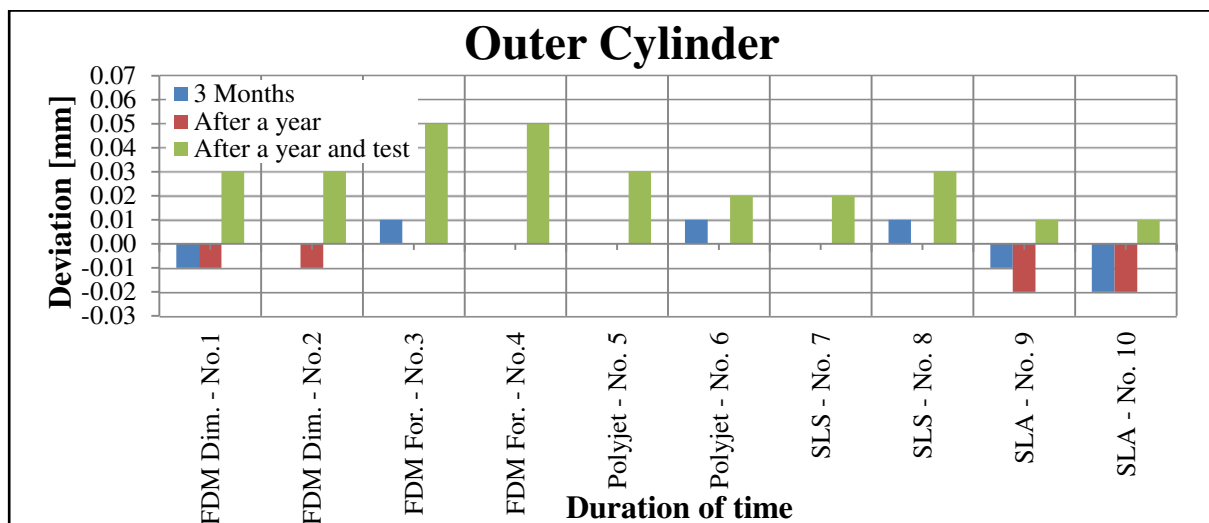


Figure 11: Average deviations of outer cylinder with duration of time

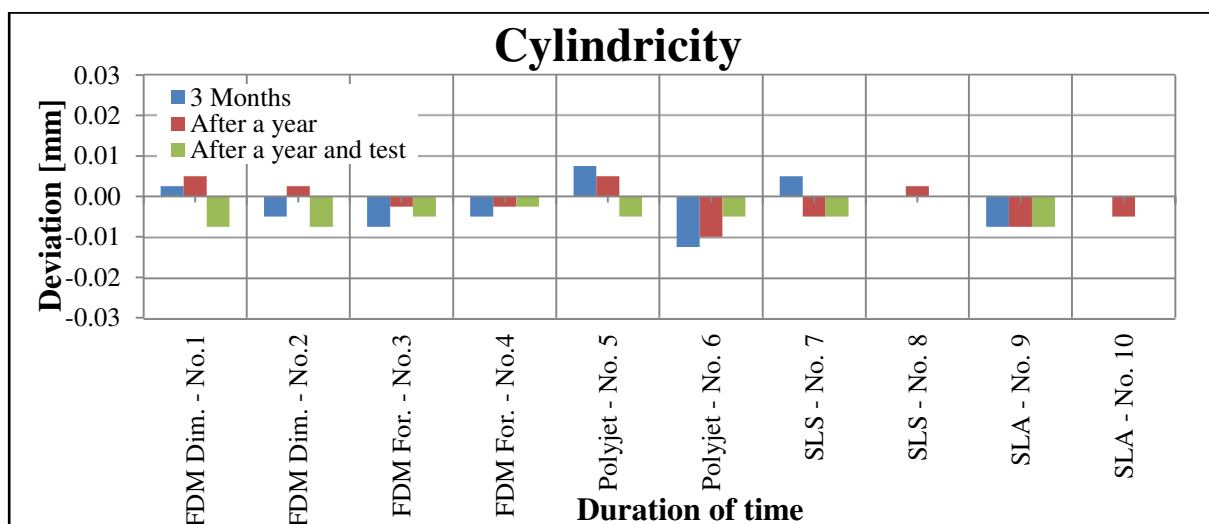


Figure 12: Average deviations of cylindricity with duration of time

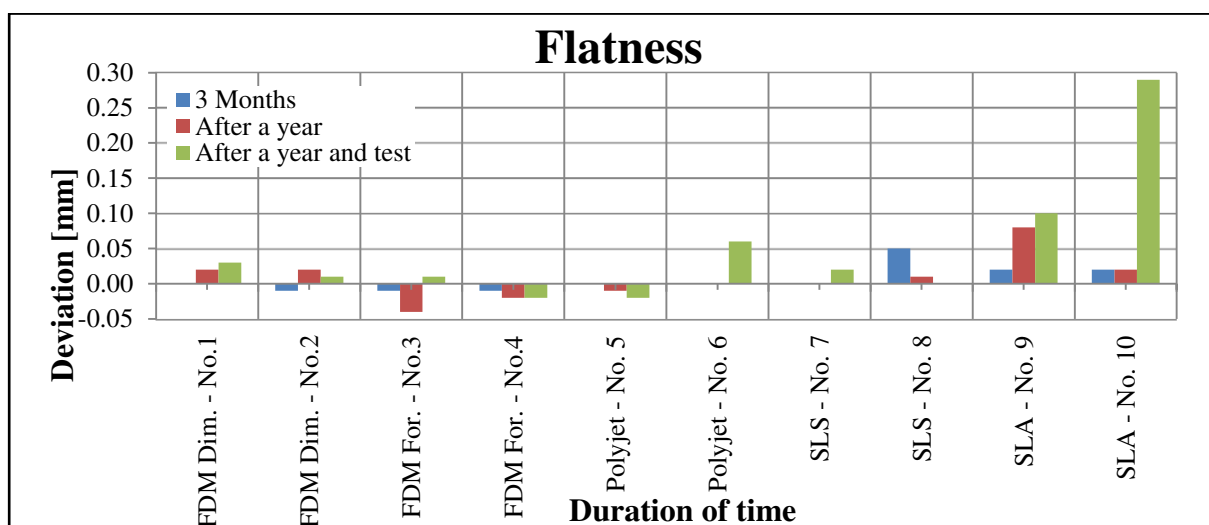


Figure 13: Average deviations of flatness with duration of time

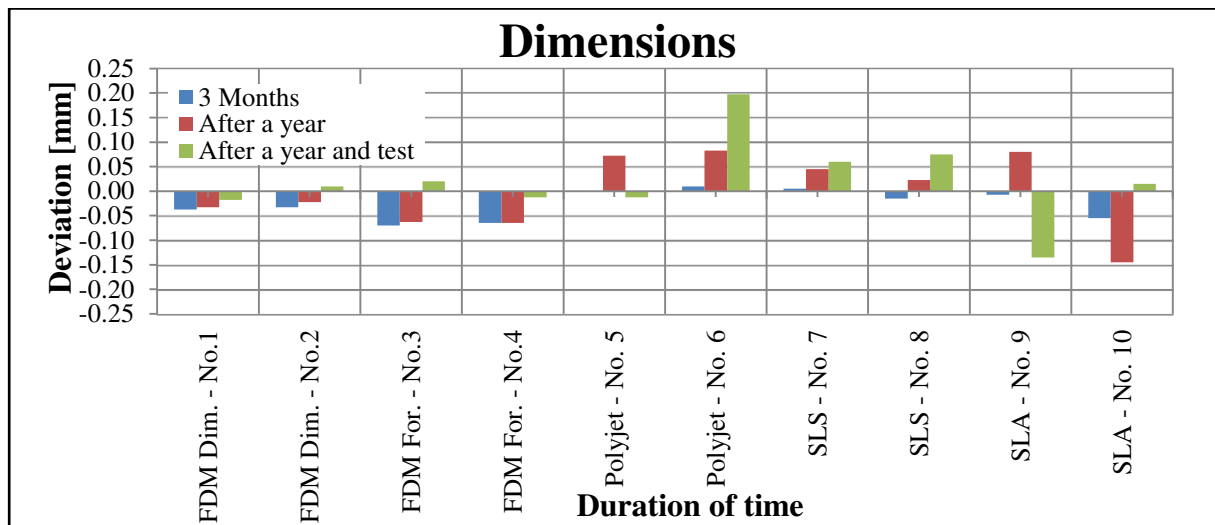


Figure 14: Average deviations of dimensions with duration of time

Figure 13 shows the average deviation values of the flatness with duration of time. In SLA-10, there were constant value of 0.02 mm deviation up to a year but once the standard test-1 was performed, there were observed the deviations (peak value 0.29 mm deviation). Based on this, it can be said that the dimensional stability was not good throughout the time. Furthermore in SLA-9, the value of deviation was increasing day by day up to 0.10 mm during the time like 3 months, after a year and after a year with test-2. In polyjet-6, there was not observed any deviation between 3 months and after a year but after conducting the standard test-1 the deviation was increased up to 0.06 mm. Thence, it could be said the models did not have good surface flatness stability during all time. On the contrary, the deviation values were not changed more than ± 0.05 mm for all the remaining models (good dimensional stability during the time like 3 months, after a year and after a year with test-1 & 2).

The value of deviation for Polyjet-6 and SLA-9 were changed up to 0.08 mm between 3 months and after a year (figure 14). However, the standard test-1 & 2 rapidly increased and decreased the deviation up to +0.20 and -0.14 mm respectively (no good dimensional stability in horizontal and vertical dimensions throughout the time). In addition, SLS-7 & 8 values of deviation were increasing day by day up to 0.07 & 0.08 mm

(no good horizontal and vertical dimensions stability during all-time). Furthermore, in FDM Dimension-3 & 4, Polyjet-5 and SLA-10, there were change in the deviation values i.e. more than ± 0.05 mm up to a year. After that, the standard test-1 & 2 were conducted, which showed sudden decrease in the deviation values (± 0.05 mm). This means there was no good dimensional stability during all-time. In the last remaining models like FDM Dimension-1 & 2, the values of deviation were under ± 0.05 mm (good dimensional stability throughout all time). In the end there was observed the result of model SLA No.10 after a year with test-1 as shown in fig.54. It is clear from fig.15 that after performing test-1 of temperature and humidity, the crack was generated (marked area).

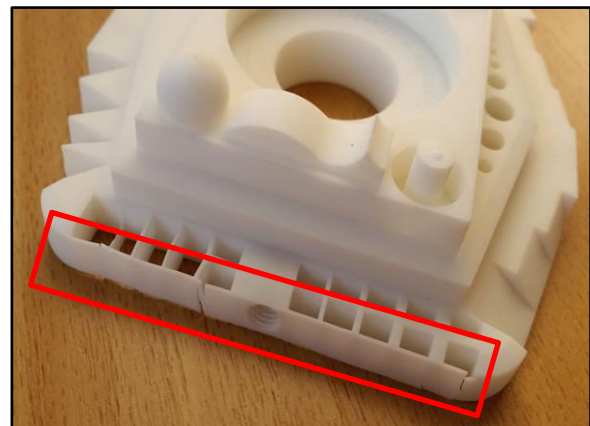


Figure 15: The result of model SLA No.10 after a year with test-1

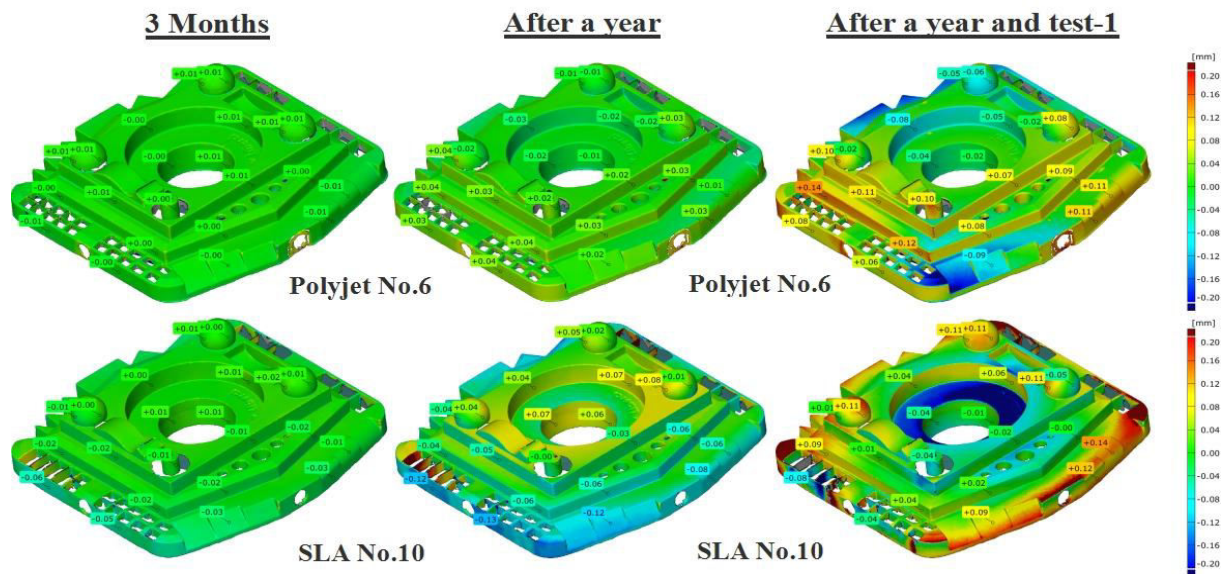


Figure 16 Color maps deviations comparison with first day of printing differentiate by test-1

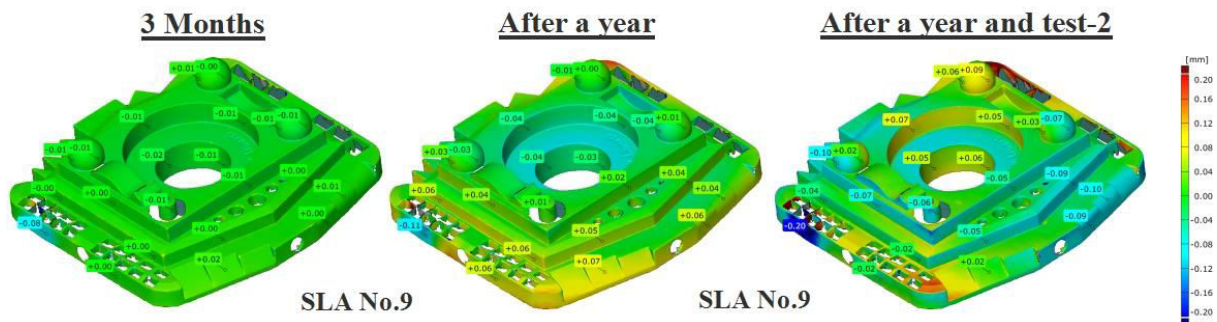


Figure 17 Color maps deviations comparison with first day of printing differentiate by test-2

Figure 16 and 17 show the color maps deviation comparison with first day of printing with performed the standard test-1 and 2. It is clearly seen that in Polyjet-6 was no changed up to a year but performed test-1 there was changed the deviation it is represented by different colors (Figure 16). In SLA-9 and 10 there were changed between 3 months and after a year but conducted standard tests-1 and 2 there were more changed in dimensions (Figure 16 & 17). Based on this color maps and analysis it could be said that there were no good dimensional stability in these parts.

5 Conclusion

The main theme of this article was to inspect the dimensional stability of models produced by additive technologies such as FDM, Polyjet, SLS and SLA with different structure of 3D printing. Models were

scanned and inspected by 3D contactless scanner ATOS II 400 and GOM Inspect Professional V8 respectively. These scanning and inspecting were performed with duration of time like 3 months, after a year and after a year with standard test-1 (Humidity and Temperature) and Standard test-2 (UV lighting). While the experiment and analysis, first fully scanned the models by scanner then there were measured the parameters as diameter of spheres, spacing between two spheres, diameter of inner and outer cylinders, cylindricity, surface flatness and horizontal & vertical dimensions by GOM Inspect Professional V8 with duration of time. Additionally, these measurement data were compared with the first day of printing. Additionally, these measurement data were compared with the first day of printing. Based on these comparison data the deviations divided into two groups as less

than 0.05 mm it could be considered as measurement errors, layer of spray painting and more than 0.05 mm it was recognized by there are no good dimensional stability with duration of time.

Overall, All the measured parameters were changed the deviation (more than 0.05 mm) in Polyjet-6 and SLA-10 so that there were no longer good dimensional stability with duration of time. Based on this analysis and theory, it could be said that some changed in material properties, weight loss, water absorption and shrinkage of surface material due to performed standard test-1 of humidity and temperature. In addition in SLA-9, all the measured parameters there were changed the values of deviation more than 0.05 mm. Based on this analysis and theory, it could be said that in SLA-9 there were no longer good dimensional stability during the time because change of material properties, reduced ductility, changed the surface color and cracking due to performed standard test-2 of UV lighting.

Apart from this remaining all models such as FDM Dimension-1 & 2, FDM Fortus-3 & 4, Polyjet-5 and SLS-7 & 8 there were no changed more than ± 0.05 mm deviation during all time. Based on this analysis, it could be said that there were good dimensional stability during all time.

Acknowledgement

This publication was written at the Technical university of Liberec as part of the project "Research and development in the field of 3D technology, manufacturing systems and automation" with the support of the specific University Research Grant, as provided by the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic in the year 2018.

References

- [1] Kannan T.R., *Recent Additive Manufacturing Trends* [online]. [feeling. 2018-02-02]. DOI: November 2014. Available from: https://www.researchgate.net/publication/269094900_Recent_Additive_Manufacturing_Trends
- [2] Andreas Gebhardt and Jan-Steffen Hötter. *Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing*. Munich 2016: Hanser Publications, Cincinnati. ISBN 978-1-56990-582-11.
- [3] M. N. ISLAM, Member, IAENG, Brian BOSWELL and A. PRAMANIK. An Investigation of Dimensional Accuracy of Parts Produced by Three-Dimensional Printing. ISSN 978-988-19251-0-7.
- [4] Wei Du, Qian Bai and Bi Zhang. A Novel Method for Additive / Subtractive Hybrid Manufacturing of Metallic Parts. *Procedial Manufacturing*. 2016.
- [5] Nannan GUO and Ming C. LEU. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *REVIEW ARTICLE*. Verlag Berlin Heidelberg, 2013, ISSN 11465-013-0248-8.
- [6] K.R. Bakshi and A.V. Mulay. A Review of Selective Laser Sintering: A Rapid Prototyping Technology. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSRJMCE)*. ISSN 2320-334X.
- [7] Daeil Kwon, Eunju Park, Sangho Ha and Namhun Kim. Effect of moisture changes on dimensional stability of 3D printed parts by selective laser sintering. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* Korean Society for Precision Engineering, 2017, DOI: <https://doi.org/10.1007/s12541-017-0150-0>. ISSN 2234-7593.
- [8] GOM MBH. ATOS Compact Scan: User manual- Hardware. Braunschweig, Germany, (2012).

The Effect of the Tool Wear on the Correlation of Forces on the Face and Flank Surfaces of the Cutting Tool

Sergei Babak
Sekce – STROJÍRENSTVÍ,
Fakulta strojní, 2 ročník
Doktorský studijní program – Strojírenská technologie

A new comparison method of the total forces for different contact areas has been published which allows increasing determination accuracy for cutting forces on flank surface. In this regard, on the basis of the new method the laboratory of the Department of Machining and Assembly of the Technical University of Liberec has carried out a study to determine the effect of tool wear on the correlation of forces on the face and flank surfaces of the cutting tool when cutting various materials.

Keywords: Machining, Cutting force, Wear

1 Introduction

When calculating the strength of a cutting tool to process shallow thickness of cut, such as in microcutting, it is recommended to consider not only the forces on the face surface but also the cutting forces on the flank surface [1-5].

Attention must be drawn to the fact that the wear of the cutting tool which usually occurs on the flank surface helps to increase cutting forces on the flank surface of the tool [6-9]. A survey of literature has revealed that no studies have been devoted to determining the effect of tool wear on the correlation of forces on the tool's face and flank surfaces. Therefore, there is no clarity in the question whether the effect of wear on the cutting forces of the tool's flank surface can be neglected while calculating the strength of the cutting tool.

A survey of literature has revealed that a new method has been published which allows increasing determination accuracy for cutting forces on the flank surface of the tool [10-14]. In this regard, the scientific interest includes the determination of the effect of tool wear on the correlation of forces on the face and flank surfaces when cutting various materials using the new method.

2 Experimental procedures

To determine the cutting forces on the flank surface, this study used the comparison method of the total forces for different contact areas [10] which is more accurate than the method comparing total forces at different flank levels of wear [1, 15]. Increasing the accuracy is based on the measurement of the real contact area between the flank surface of the tool and the processed material.

The measurement process was carried out during the orthogonal cutting (Fig.1). In order to determine the forces on the flank surfaces the expansion scheme of the total

force on the flank surface F_a was used. The scheme is presented in Fig 2. In the orthogonal cutting process the experiments were performed on a milling machine. The cutter was fixed on a vertical milling hand. The PRAMET TOOLS cutter CTCPN 2514 M16 with a cutting plate TPUN 160308 of hard alloy ISO P30 was used. In cutting, the face and flank angles were 5° and 6° , respectively (Fig.1). The cutting edge radius (r) of the new cutting plates was 0.03 mm (Fig.2). For processing the work pieces with dimensions of 100×6 mm, aluminum alloys Al99,5 (106 HB), AlCu6BiPb (99 HB), AlMgSi (113 HB), structural steels Fe37B3FN (117 HB), C45EC (220 HB), 16MnCr5(138 HB), 50CrV4 (193 HB) were used.

The experiments were performed at uncut chip thickness of 0.05 mm with cutting plates which had an artificially made flank surface wear of VB 0.03 mm (the cutting edge radius of the new cutting plates), 0.3 mm, and 0.5 mm (Fig. 2).

Determination of the real contact between the flank surface of the tool and the processed material was performed in accordance with the method set out in the study [9]. To this end, the flank surface of the tool was painted before cutting. The length of the real contact between the flank surface of the tool and the processed material was measured after cutting by a microscope with an accuracy of 0.01 mm. Every measurement of the real contact was repeated five times, and then the average force value was determined.

The work piece was fixed in the clamp, which in turn was fixed on the three-component piezo-electric KISTLER dynamometer, model 9265B-9441B, connected with a computer with special MathLab software for the force measurements. The measurement error of forces amounted to $\pm 2\%$. Dynamometer and the software was previously calibrated, using standard mechanical precision dynamometers in the range of 10N to 6000N.

The feed speed, amounting to 0.45 m/min, was provided by longitudinal travel of the milling machine table. Water was used as a coolant. The use of low cutting rates and water cooling is conditioned by the need to eliminate the influence of feed speed and temperature on the force values. The uncut chip thickness was set manually and controlled by an indicator at a scale of 0.002 mm.

The components of the chip forming force F_{Ch} (in the direction of cutting $F_{Ch,c}$, and in the feed direction $F_{Ch,f}$) determined as the difference between the forces in the direction of cutting F_c and in the feed direction F_f which were determined by direct measurements using the KISTLER dynamometer, and the components of the force F_{Pl} (in the direction of cutting $F_{Pl,c}$, and in the feed direction $F_{Pl,f}$) which were determined by calculations according to the method described in the study [10].

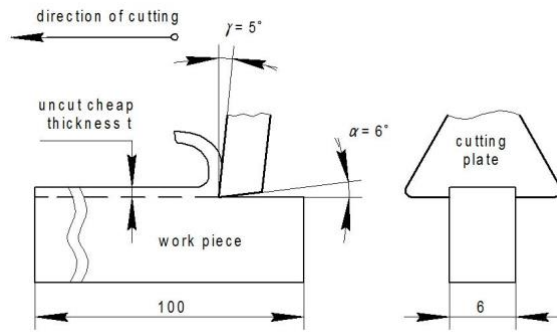


Fig. 1 Orthogonal cutting.

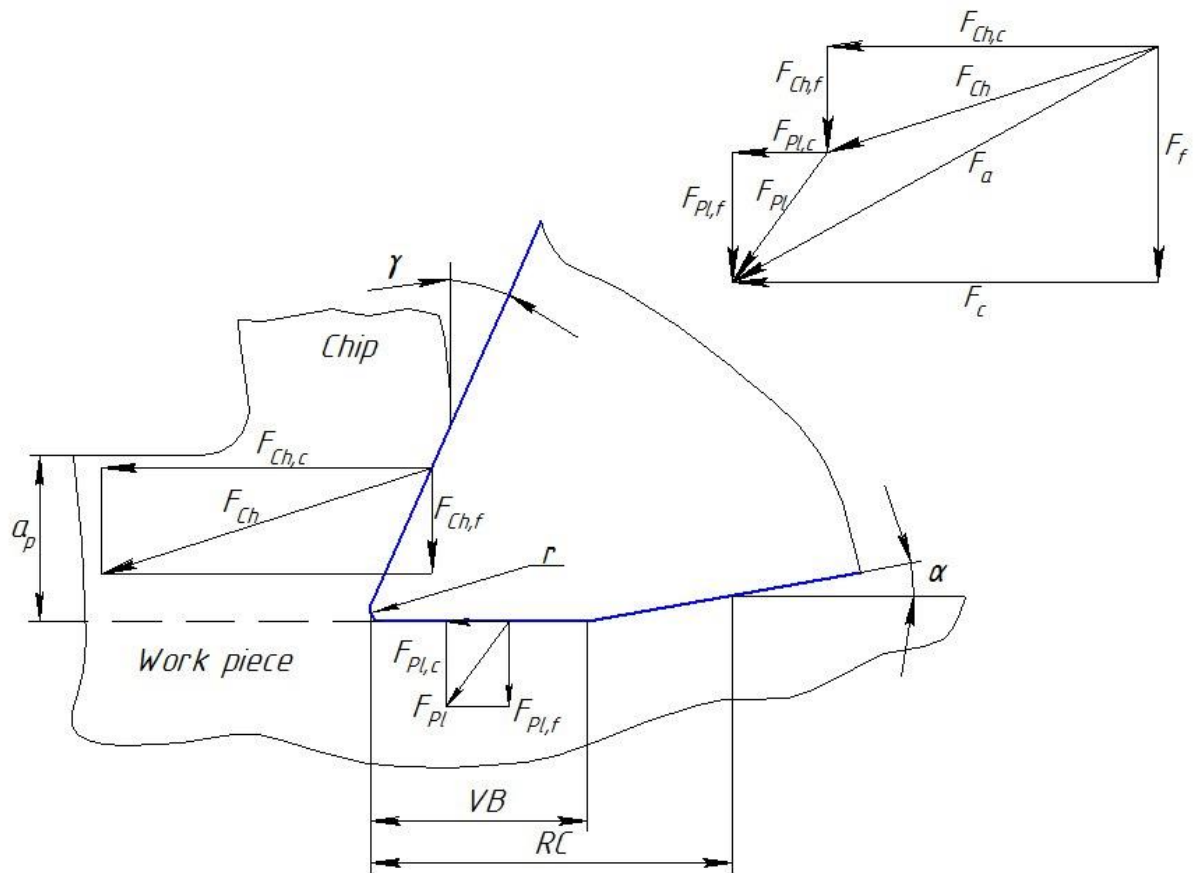
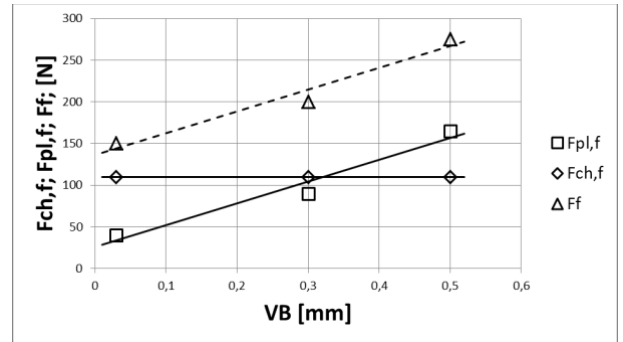
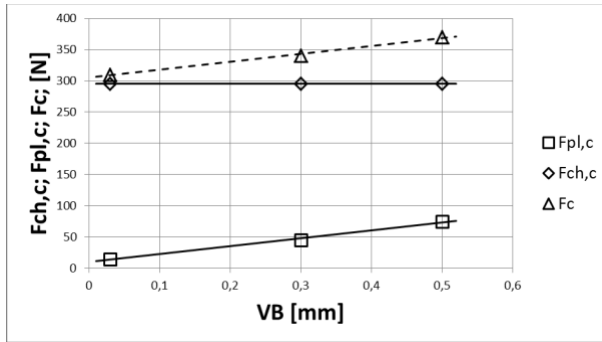
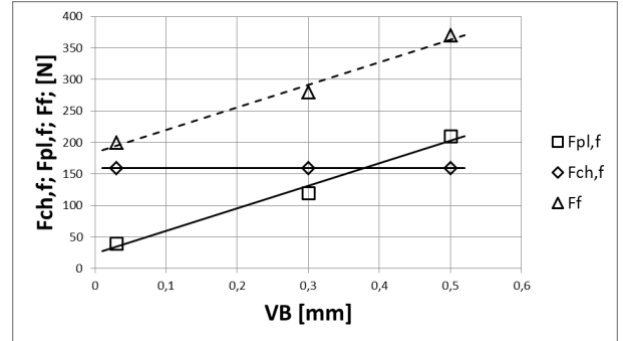
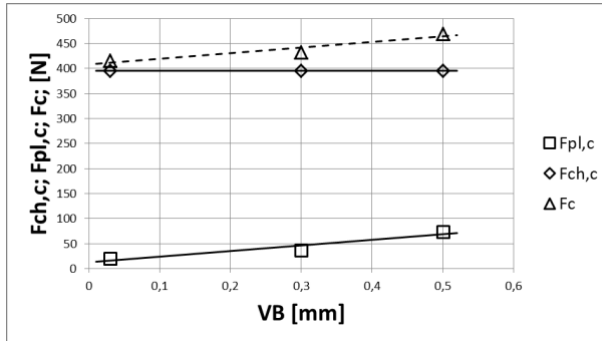


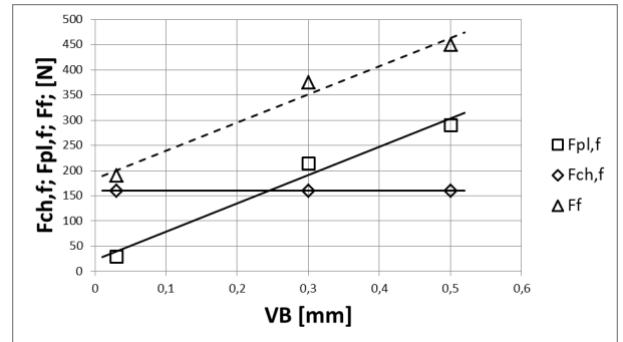
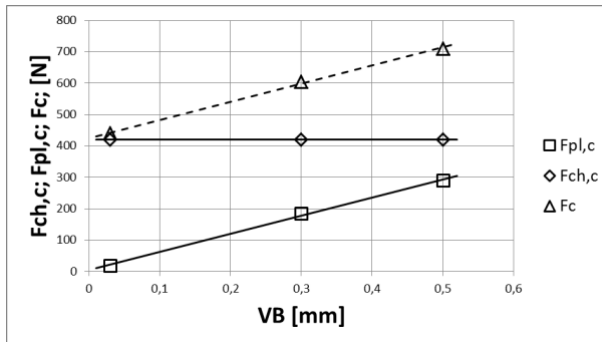
Fig. 2 Expansion of active force F_a into the chip forming force F_{ch} and forces on the flank surfaces F_{pl} and into the components in feed and cutting directions, according to [2, 10].



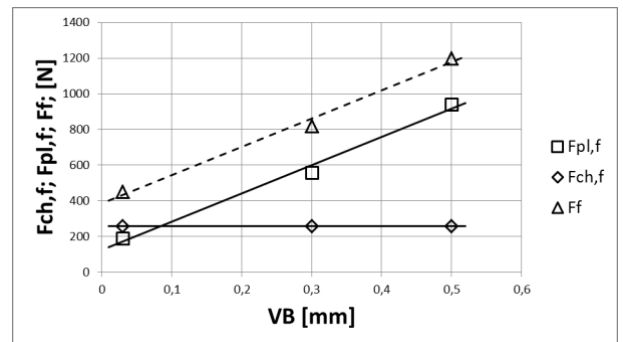
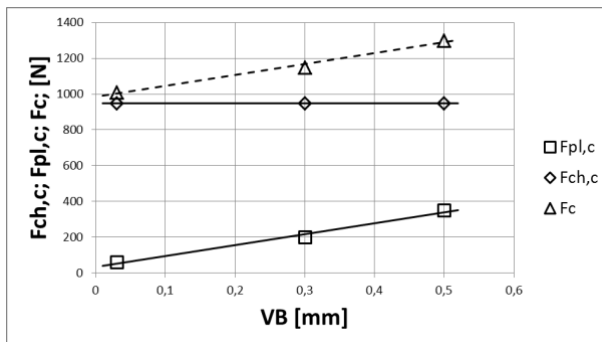
a) ALCU6BiPb



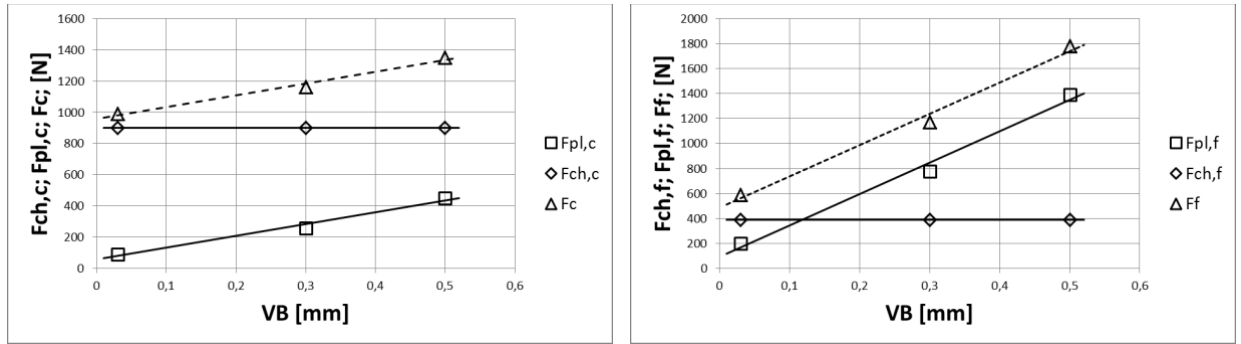
b) Al99.5



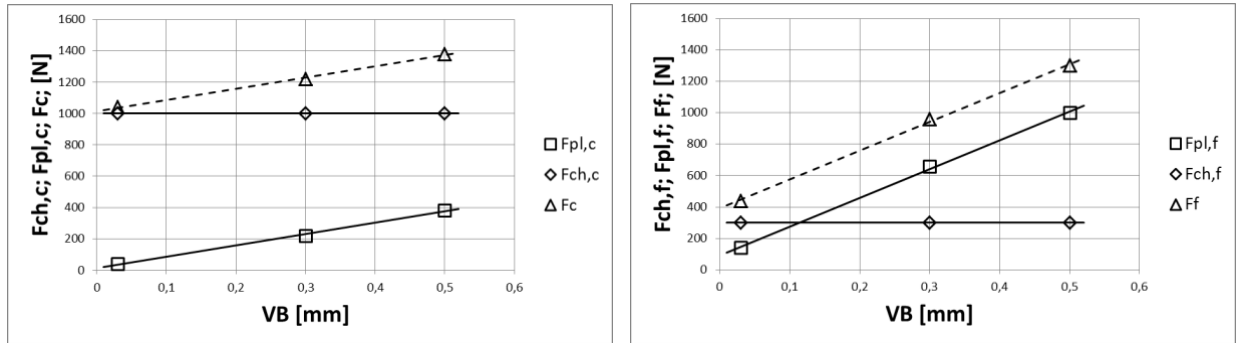
c) AlMgSi



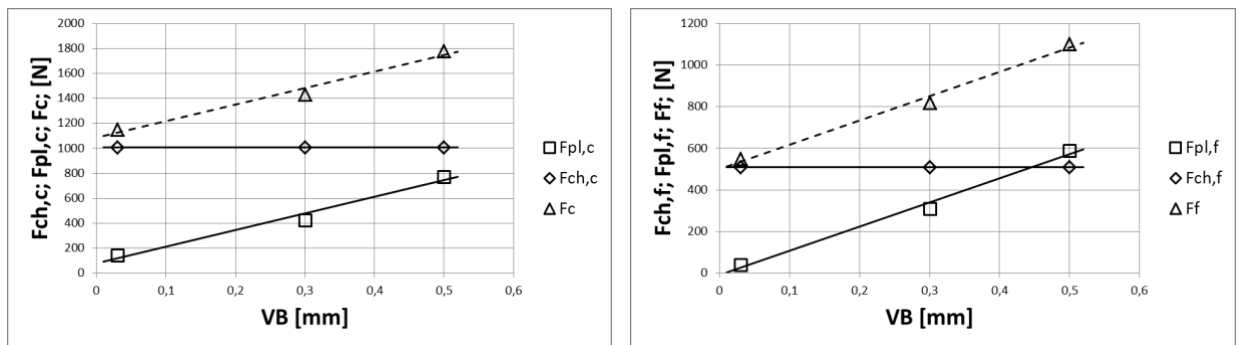
d) Fe37B3FN



e) C45EC



f) 16MnCr5



g) 50CrV4

Fig. 3 The dependence of components of the force on the face surface (in the direction of cutting $F_{Ch,c}$ and in the feed direction $F_{Ch,f}$) and the force on the flank surface (in the direction of cutting $F_{Pl,c}$ and in the feed direction $F_{Pl,f}$), cutting forces F_c and feed forces F_f on the flank wear VB .

The experiments have shown that the component of the force on the face surface $F_{Ch,c}$ (in the direction of cutting) is substantially greater than the component of the force on the flank surface $F_{Pl,c}$ (in the direction of cutting). For example, when the flank surface wear is $VB=0.1$ mm and the depth of cut is $a_p=0.05$ mm, the component of the force on the face surface $F_{Ch,c}$ is greater than the component of the force on the flank surface $F_{Pl,c}$ by 16 times when cutting Al99.5, by 13 times when cutting AlCu6BiPb, by 12 times when cutting 16MnCr5, by 10 times when cutting Fe37B3FN, by 7 times when cutting AlMgSi, by 5 times when cutting C45EC and 50CrV4 (Fig.3).

When the flank surface wear increases the difference between the component of the face surface $F_{Ch,c}$ (in the direction of cutting) and the component of the force on the

flank surface $F_{Pl,c}$ (in the direction of cutting) decreases. Thus, when the flank surface wear is $VB=0.5$ mm, the component of the force on the face surface $F_{Ch,c}$ is greater than the component of the force on the flank surface $F_{Pl,c}$ at a depth of $a_p = 0.05$ mm by 6 times when cutting Al99.5, by 4 times when cutting AlCu6BiPb, by 3 times when cutting Fe37B3FN and 16MnCr5, by 2 times when cutting C45EC, by 42% when cutting AlMgSi, and by 34% when cutting 50CrV4 (Fig. 3).

It has been established that the increase of the flank surface wear when cutting structural steel significantly alters the correlation of the force component on the face surface $F_{Ch,f}$ (in the feed direction) and the force component on the flank surface $F_{Pl,f}$ (in the feed direction). For example, when the flank surface wear is $VB=0.03$ mm and the depth of cut is $a_p= 0.05$ mm, the force component on the face surface $F_{Ch,f}$ is greater than the force component on the flank surface $F_{Pl,f}$ by 18 times when cutting 50CrV4, by 5 times when cutting Al99.5, by 4 times when cutting AlMgSi, by 3 times when cutting AlCu6BiPb, by 2 times when cutting 16MnCr5 and C45EC, by 50% when cutting Fe37B3FN (Fig.3).

When the flank surface wear increases the difference between the force component of the face surface $F_{Ch,f}$ (in the feed direction) and the force component on the flank surface $F_{Pl,f}$ (in the feed direction) changes radically. Thus, when cutting Fe37B3FN and C45EC with the cutting tool with the flank surface wear of $VB=0.5$ mm at a depth of $a_p = 0.05$ mm the force component on the flank surface $F_{Pl,f}$ is by 3.5 times greater than the force component on the face surface $F_{Ch,f}$, when cutting 16MnCr5 it is greater by 3 times, when cutting AlMgSi – by 2 times, when cutting AlCu6BiPb - by 40%, when cutting Al99.5 – by 28%, and when cutting 50CrV4 – by 11% (Fig.3).

3 Conclusion

Through the use of the method that allows to determine the cutting force on the flank surface with high accuracy, it has been found that the increase in tool wear significantly impacts the correlation of force components on the face and flank surfaces.

This is true as in machining with new cutting tool, the forces on the face surface are substantially higher than those on the flank surface, so that the latter are usually neglected. The forces on the flank surface grow substantially with increasing wear of the cutting tool and may be higher than those on the face surface.

Thus, when calculating the strength of the cutting tool which is in contact with shallow cut thickness, it is necessary to consider not only the cutting force on the face surface but also the effect of the tool wear on the cutting forces on the flank surface.

Acknowledgments

This article is related to the investigation on the Specific University Research Projects which are supported by the Ministry of Education (MSMT) of the Czech Republic.

References

- [1] ZOREV, N. (1966). Metal cutting mechanics. In: *Pergamon Press, Oxford*. Pp. 135-180.

- [2] WYEN, C., WEGENER, K., ZYUST, R. (2010). Influence of cutting edge radius on cutting forces in machining titanium. In: *Annals of the CIRP*. Vol. 59 (1), pp. 89-92.
- [3] WU, X., LI, L., HE, N., HAO, X., YAO, C., ZHONG, L. (2016). Investigation on the ploughing force in microcutting considering the cutting edge radius. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 86 (9-12), pp. 2441-2447.
- [4] WU, X., LI, L., HE, N., YAO, C., ZHAO, M. (2016). Influence of the cutting edge radius and the material grain size on the cutting force in micro cutting. In: *Precision Engineering*. Vol. 45, pp. 359-364.
- [5] PIMENOV, D.Y., GUZEEV, V.I. (2016). Mathematical model of plowing forces to account for flank wear using FME modeling for orthogonal cutting scheme. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Pp. 1-11.
- [6] GUZEEV, V.I., PIMENOV, D.Y. (2011). Cutting force in face milling with tool wear. In: *Russian Engineering Research*. Vol. 31 (10), pp. 989-993.
- [7] JERSAK, J., KAPLAN, F. (2015). Comparison of the influence of process fluids on tool life in face milling. In: *Manufacturing Technology*. Vol. 15 (6), pp. 977-984.
- [8] NAPRSTKOV, N., CAIS, J., STANCEKOVA, D. (2014). Influence of AlSi7Mg0.3 alloy modification by Sb on the tool wear. In: *Manufacturing Technology*. Vol. 14 (1), pp. 75-79.
- [9] VASILKO, K., MURČINKOVÁ, Z. (2016). Tool life extension methods for cut-off tools made of high-speed steel. In: *Procedia Engineering*. Vol. 149, pp. 520-525.
- [10] POPOV, A., DUGIN, A. (2014). Effect of uncut chip thickness on the ploughing force in orthogonal cutting. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 76 (9-12), pp. 1937-1945.
- [11] POPOV, A., DUGIN, A. (2014). Study of reasons of increased active force using coolant with uncut chip thickness. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 70 (9-12), pp. 1555-1562.
- [12] POPOV, A., DUGIN, A. (2013). Influence of lubricant and coolant fluid on the cutting force in small-increment planning. In: *Russian Engineering Research*. Vol. 33 (2), pp. 84-85.
- [13] DUGIN, A., POPOV, A. (2012). Effect of the processing materials on the ploughing force values. In: *Manufacturing Technology*. Vol. 12 (13), pp. 102-105.
- [14] POPOV, A., DUGIN, A. (2012). Experimental methods of determining the cutting forces at the tool's rear surface. In: *Russian Engineering Research*. Vol. 32 (1), pp. 68-69.

- [15] COLWELL, L. (1970). Methods for sensing the rate of tool wear. In: *Annals of the CIRP*. Vol. 19 (4), pp. 647-651.

IDENTIFIKACE DYNAMICKÝCH SYSTÉMŮ POMOCÍ BAYESOVSKÝCH SÍTÍ

Garan Maryna

Sekce – STROJIRENSTVÍ,
Fakulta strojní, 5. ročník
Doktorský studijní program – STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

Abstrakt: Hlavním cílem této práce je propojení klasické teorie automatického řízení s moderními algoritmy umělé inteligence. Bayesovské sítě jsou účinným nástrojem pro práci s náhodnými proměnnými, jejich flexibilita může být využita pro reprezentaci širokého spektra dynamických systémů. Adaptace učících se algoritmů pro účely identifikace rozšíří spektrum používaných metod o sadu účinných algoritmů schopných se efektivně vypořádat se stochastickými signály. Návrh modelů dynamických systémů na bázi Bayesovských sítí je důležitým krokem na cestě k tomuto cíli.

Klíčová slova: Bayesovské sítě; identifikace; diferenční rovnice; stavový popis.

1 Úvod

Identifikaci dynamických systémů se rozumí zjištění modelu popisujícího jejich chování [1]. Modely dynamických systémů se používají pro simulaci, návrh řídicích algoritmů, detekci chyb, kontrolu kvality apod. Jsou obzvláště využitelné pro systémy, s kterými se těžko zachází (z důvodu vysoké ceny experimentů nebo možnosti ohrožení, které mohou způsobit) [2].

Podrobný přehled existujících identifikačních metod může být nalezen například v [1, 3]. Moderní výrobní procesy však vyžadují návrh nových metod schopných se vypořádat s rostoucími nároky na flexibilitu a kvalitu konečných výrobků. Perspektivním nástrojem pro uspokojení těchto nároků jsou Bayesovské sítě. Tento nástroj se úspěšně používá zejména v medicínské diagnostice [4], bioinformatice [5] a genetice [6,7]. Použití těchto modelů v automatickém řízení technologických procesů je rozvíjejícím se trendem.

V tomto článku jsou představeny dva modely dynamických systémů na bázi Bayesovských sítí, které mohou být použité k identifikaci prostřednictvím učení Bayesovských sítí.

2 Bayesovské sítě

2.1 Základní definice

Bayesovská síť (Bayesian network, BN) je pravděpodobnostní grafický model (PGM) reprezentující vzájemné vztahy mezi náhodnými proměnnými pomocí acyklického orientovaného grafu. PGM je model reprezentující vícerozměrné rozdělení pravděpodobnosti náhodných veličin ve srozumitelné a kompaktní formě.

U pravděpodobnostních grafických modelů uzly odpovídají usuzovaným náhodným veličinám, vzájemné vazby mezi náhodnými veličinami se reprezentují pomocí hran. Podle druhu použitých hran se pravděpodobnostní grafické modely rozdělují na dva typy:

- Bayesovské sítě používající orientovaný acyklický graf
- Markovské sítě používající neorientovaný graf

U Bayesovských sítí jsou vzájemné vazby mezi náhodnými veličinami představeny pomocí orientovaných hran jejichž směr reprezentuje příčinný vztah, přičemž tyto hrany vždy spojují dvě odlišné náhodné proměnné (nedochází ke vzniku cyklu). Tyto charakteristiky jsou

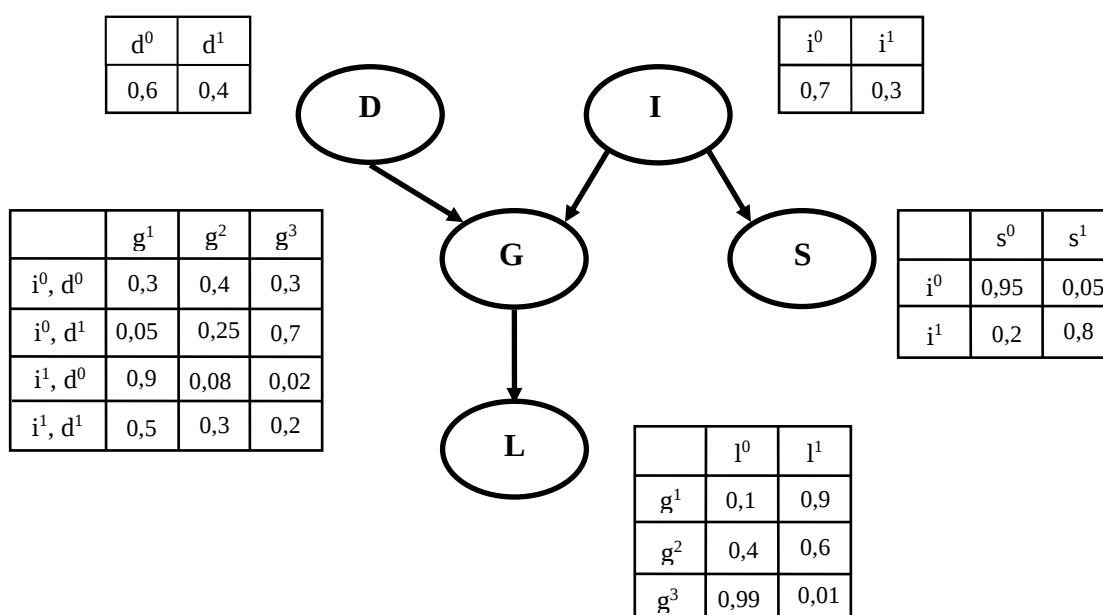
výhodou Bayesovských sítí oproti Markovským sítím pro modely, u kterých příčinně následné vztahy jsou relevantní.

Bayesovská síť reprezentuje sdružené rozdělení pravděpodobností náhodných proměnných představených jejími uzly. Vzhledem k tomu, že acyklický orientovaný graf reprezentuje veškeré nezávislosti mezi náhodnými proměnnými (včetně podmíněných nezávislosti), můžou se k popisu rozdělení pravděpodobnosti usuzovaných proměnných použít podmíněná rozdělení pravděpodobnosti. Sdružené rozdělení pravděpodobnosti je poté reprezentováno pomocí řetězcového pravidla pro Bayesovskou síť. Na rozdíl od klasického řetězcového pravidla jsou ve výpočtu zahrnuty jednotlivé nezávislosti náhodných proměnných, čímž dochází k výraznému zjednodušení oproti klasickému přístupu, obzvláště pro sítě s větším počtem uzlů.

2.2 Příklad Bayesovské sítě

Výhody použití Bayesovských sítí mohou být představeny na jednoduchém příkladu [8]. Na Obr. 1 je znázorněna Bayesovská síť obsahující 5 diskretních náhodných veličin. Pro zjednodušení jsou všechny náhodné veličiny kromě G považovány za binární:

- D (Difficulty) – složitost předmětu, $D = \{d^0(\text{jednoduchý}), d^1(\text{složitý})\}$;
- I (Intelligence) – inteligence studenta, $I = \{i^0(\text{nízká}), i^1(\text{vysoká})\}$;
- G (Grade) – známka z předmětu, $G = \{g^1(A), g^2(B), g^3(C)\}$;
- S (SAT) – známka studenta ze zkoušky SAT, $S = \{s^0(\text{nízká}), s^1(\text{vysoká})\}$;
- L (Letter) – kvalita doporučujícího dopisu, $L = \{l^0(\text{nízká}), l^1(\text{vysoká})\}$.



Obr. 1: Příklad Bayesovské sítě.

Pokud bychom chtěli popsat sdružené rozdělení pravděpodobnosti pro 5 náhodných veličin, které jsou v našem zájmu, měli bychom sestavit pravděpodobnostní tabulku obsahující $2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3 = 48$ řádků. Místo toho si vystačíme s pěti podmíněnými pravděpodobnostmi, které jsou zobrazeny na Obr. 1. Kromě toho orientovaný graf nám ukazuje příčinně následné vztahy mezi náhodnými veličinami. Můžeme konstatovat, že známka studenta G záleží na jeho inteligenci I a na složitosti předmětu D (říká se, že náhodné veličiny D a I jsou předky

náhodné veličiny G , a když to otočíme, tak proměnná G je potomkem proměnných D a I). Kvalita doporučujícího dopisu L pak záleží jenom na známce studenta z předmětu G . Znamka studenta ze zkoušky SAT S záleží jen na jeho inteligenci I a nemá přímý vztah se známkou G , složitostí kurzu D a kvalitou doporučujícího dopisu L , který student po ukončení předmětu obdrží. Náhodné veličiny D a I v tomto grafu nejsou závislé na žádné další náhodné veličině.

Další výhodou grafického zobrazení pravděpodobnostních grafických modelů je skutečnost, že podle grafu můžeme poznat, které z náhodných veličin jsou nezávislé. V případě Bayesovské sítě zobrazené na Obr.1 jsou nezávislé pouze náhodné veličiny D a I . Ostatní páry náhodných veličin se nemůžou počítat za nezávislé. V případě předků a potomků je tato závislost očividná, v ostatních případech jsou náhodné veličiny mezi sebou propojené přes přechodné proměnné. Jediný případ zaručující nezávislost v Bayesovské síti je spojení náhodných proměnných do tak zvané V -struktury, což v našem příkladu je struktura D - G - I .

Situace se však kardinálně mění, pokud některé z náhodných veličin jsou pozorovány. V tomto případě v grafu vznikají tak zvané podmíněné nezávislosti náhodných veličin, když proměnné jsou nezávislé za podmínky pozorování jiných proměnných. Například, pokud proměnná G je pozorována, proměnné L a D stávají podmíněně nezávislými. Stejně tak, pokud proměnná I je pozorována, proměnné G a S stávají podmíněně nezávislými. V případě V -struktury úvaha je opačná. Pokud proměnná G je pozorována, proměnné D a I stávají podmíněně závislými. Například, pokud jsme zjistili, že známka studenta z předmětu je C a zároveň víme, že inteligence studenta je vysoká, můžeme s velkou pravděpodobností tvrdit, že předmět je těžký. Pokud by proměnná G nebyla pozorována, ale byli bychom schopni upozorovat proměnnou L (která je potomkem proměnné G), rovněž by to vedlo k podmíněné závislosti proměnných D a I . Úvaha v tomto případě je následující. Pokud víme, že kvalita doporučujícího dopisu je nízká, můžeme s velkou pravděpodobností předpokládat, že známka studenta z tohoto předmětu byla C . Pokud zároveň víme, že inteligence studenta je vysoká, rovněž můžeme s velkou pravděpodobností (ale trochu nižší, než v přechodném případě) konstatovat, že předmět je těžký.

K výpočtu sdruženého rozdělení pravděpodobnosti se v klasické teorii pravděpodobnosti používá řetězcové pravidlo. Pro náš příklad můžeme ho použít následovně:

$$P(D, I, G, L, S) = P(D) \cdot P(I|D) \cdot P(G|D, I) \cdot P(L|D, I, G) \cdot P(S|D, I, G, L) \quad (1)$$

Jak již bylo zmíněno, řetězcové pravidlo pro Bayesovskou síť vede ke zjednodušenému výpočtu sdruženého rozdělení pravděpodobnosti, které může být odvozeno přímo z grafu. Je to součin n faktorů (n je počet náhodných veličin zahrnutých do Bayesovské sítě), každý z těchto faktorů reprezentuje podmíněné rozdělení pravděpodobnosti pro příslušnou proměnnou (podmíněnými proměnnými jsou v tomto případě všechny předky). Takový postup přihlíží na veškeré nezávislosti mezi náhodnými proměnnými, čímž se dosahuje zjednodušení ve výpočtu. Pro síť zobrazenou na Obr. 1 sdružené rozdělení pravděpodobnosti za použití řetězcového pravidla pro Bayesovskou síť vypadá následovně:

$$P(D, I, G, L, S) = P(D) \cdot P(I) \cdot P(G|D, I) \cdot P(L|G) \cdot P(S|I) \quad (2)$$

2.3 Druhy uzlů v Bayesovských sítích

Základní klasifikace uzlů používaných v Bayesovských sítích předpokládá dělení podle několika kritérií:

- podle druhů proměnných: diskrétní a spojitě,
- podle rozměrů proměnné: skalární a vektorové,
- podle pozorovatelnosti: skryté, pozorované, nepozorované.

Doposud jsme uvažovali o Bayesovské síti s výhradně diskrétními uzly. Takové síť byly historicky prvním druhem Bayesovských sítí, který se aktivně používá doteď. Jsou poměrně jednoduché k pochopení a manipulaci, avšak mohou být použité jen pro omezený počet úloh. Proto se postupem času začaly objevovat síť se spojitými uzly (výhradně nebo zčásti).

V případě diskrétních náhodných veličin každý uzel v síti je popsán pomocí tabulky podmíněného rozdělení pravděpodobnosti jejíž rozměr závisí na počtu proměnných-předků a na tom, kolika hodnot může každá z těchto proměnných nabývat. V případě spojitých proměnných již není možné sestavit tabulku reprezentující rozdělení pravděpodobnosti, protože počet možných hodnot je nespočetný. Pro reprezentaci spojitě náhodné veličiny se používá hustota rozdělení pravděpodobnosti. Druh použitého rozdělení závisí na expertovi navrhujícím Bayesovskou síť. Důležitými charakteristikami pravděpodobnostního rozdělení, které by pak měly být vypočteny v uzlech, jsou střední hodnota a rozptyl. Funkční závislost reprezentována hranami v síti určuje charakter vzájemného vztahu mezi náhodnými veličinami. Použité funkce mohou být lineární nebo nelineární.

Z výše uvedeného vyplývá, že Bayesovská síť se spojitými uzly není definována jednoznačně, jak tomu bylo v případě sítě s výhradně diskrétními uzly. Navíc k tomu, pro síť obsahující oba typy proměnných je zapotřebí matematicky nadefinovat nově vzniklé kauzální vztahy mezi diskrétní proměnnou-předkem a spojitou proměnnou-potomkem, případně vztahy mezi spojitou proměnnou-předkem a diskrétní proměnnou-potomkem.

Nejjednodušším a nejrozšířenějším typem lokálních pravděpodobnostních modelů pro Bayesovské síť se spojitými uzly je lineární Gaussův model. Tento model používá normální rozdělení pravděpodobnosti k popisu jednotlivých proměnných a lineární regresi k popisu vzájemných vazeb mezi nimi. Sdružené rozdělení pravděpodobnosti u sítí používajících tento model reprezentuje multivariabilní Gaussovo rozdělení pravděpodobnosti.

Použití vektorové proměnné místo skalární u Bayesovských sítí s diskrétními uzly nepřipadá v úvahu jako nadstavba, která by mohla vést ke zlepšení reprezentativních schopností modelu. Avšak u sítí se spojitými uzly, obzvláště při použití lineárního Gaussova modelu, má toto rozšíření velký význam. Při definici vektorové proměnné nahradíme střední hodnotu za vektor středních hodnot, a rozptyl za kovarianční matici. Taková reprezentace umožňuje zavést do modelu proměnné, mezi kterými existuje jiná než lineární závislost.

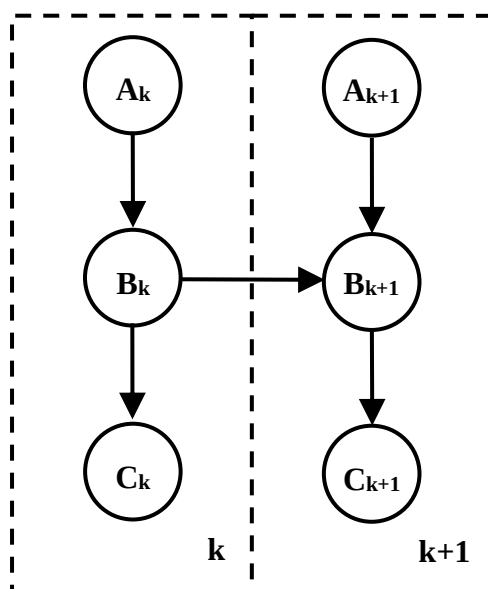
Poslední klasifikační kritérium je pozorovatelnost náhodných proměnných. Skryté uzly reprezentují proměnné jejichž hodnoty nemůžou být změřené, pozorované proměnné jsou proměnné jejichž hodnoty jsou známy, nepozorované proměnné jsou proměnné jejichž hodnoty nejsou známy (ale mohou teoreticky být zjištěné).

2.4 Dynamické Bayesovské sítě

Dynamická Bayesovská síť (Dynamic Bayesian Network, DBN) je model umožňující reprezentaci náhodných veličin, které se mění v čase. Přičemž mění se jenom hodnoty náhodných veličin, parametry jejich rozdělení pravděpodobností zůstávají stejné. Aby mohla být síť považována za dynamickou, musí existovat minimálně jedna hrana spojující náhodné proměnné v různých časových okamžicích.

Pokud proměnné v síti v každém okamžiku závisí na proměnných ve stejném a předchozím okamžiku, má taková síť název 2TDBN. Příklad takové sítě je znázorněn na Obr. 2. Většina vzájemných vazeb je ve stejném časovém okamžiku, je však přítomna v modelu hrana spojující proměnnou B v kroku k+1 a stejnou proměnnou v předchozím kroku.

V dynamické Bayesovské síti se stejná struktura “kopíruje” v každém časovém okamžiku. Můžeme tak síť rozvinout na libovolný počet okamžiků, tím se dynamická Bayesovská síť přemění na obyčejnou. Například, pro tři časové okamžiky může být síť z Obr. 1 rozvinuta na síť zobrazenou na Obr.3.



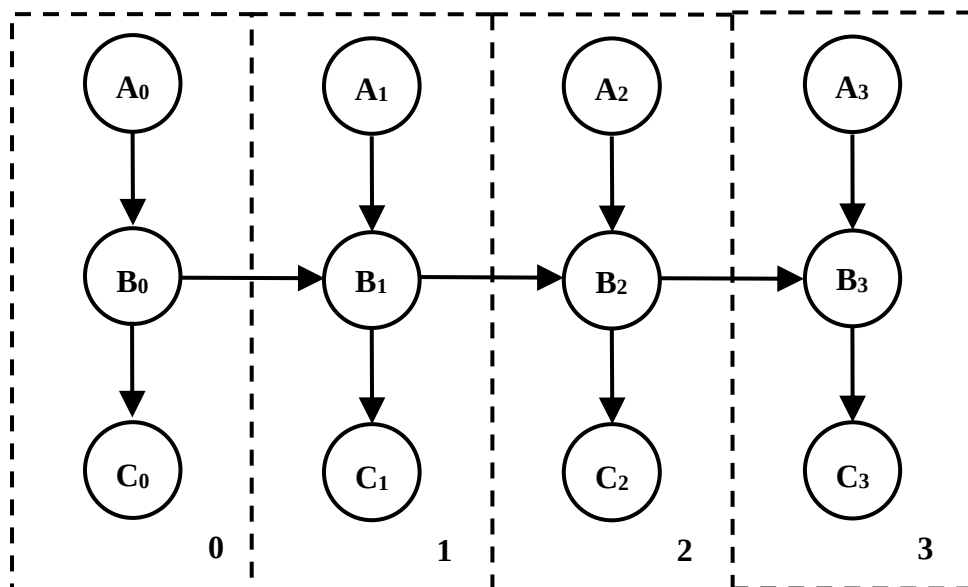
Obrázek 2: Příklad 2TDBN.

Tyto sítě můžeme použít pro modely splňující tak zvaný Markovův předpoklad nezávislosti:

$$(X^{(t+1)} \perp X^{(0:(t-1))} | X^{(t)}).. \quad (3)$$

Tento předpoklad nám říká, že hodnoty náhodných veličin v následujícím kroku jsou nezávislé na hodnotách v krocích předchozích, pokud je známá hodnota v současném kroku. Tomuto předpokladu se také říká předpoklad zapomínání. Splnění Markovového předpokladu nám umožňuje výrazně zjednodušit popis modelu, jelikož pro libovolný počet časových okamžiků si vystačíme s pravděpodobnostními vztahy jenom ve dvou sousedních krocích. K definici dynamické sítě 2TDBN je navíc k přechodnému modlu vyžadována znalost hodnot náhodných proměnných v nultém časovém okamžiku.

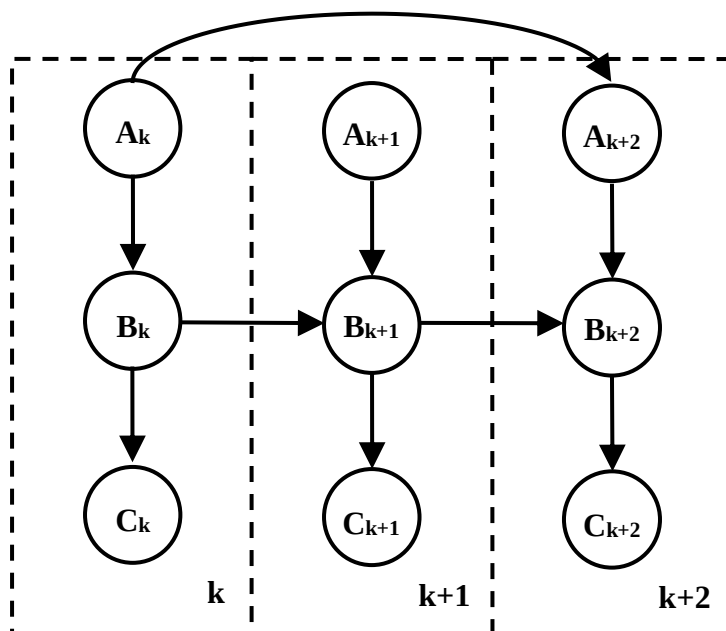
Přechodný model DBN může obsahovat víc než dva časové okamžiky. Na Obr. 4 je znázorněna síť, ve které hodnoty proměnných záleží nejenom na hodnotách proměnných v předchozím kroku, ale je tady také hrana spojující proměnnou A v současném kroku s hodnotou proměnné v předminulém kroku.



Obrázek 3: Rozvinutá na tři časové okamžiky 2TDBN.

Takové síti se říká 3TDBN a platí pro ni podobné úvahy jako pro 2TDBN, s výjimkou toho, že teď k definici potřebujeme strukturu síti ve třech po sobě jdoucích časových okamžicích a hodnoty proměnných ve dvou počátečních okamžicích. Podobně můžeme sestavit dynamickou Bayesovskou síť $(n+1)$ TDBN, kde n je libovolný počet po sobě jdoucích časových okamžiků. Sítě popsány pomocí tří a víc časových okamžiků již nesplňují Markovův předpoklad nezávislosti. Nezávislost v těchto sítích může být formulována následovně:

$$(X^{(t+n)} \perp X^{(0:(t-1))} | X^{(t)}). \quad (4)$$



Obrázek 4: Příklad 3TDBN.

3 Modely dynamických systémů na bázi Bayesovských sítí

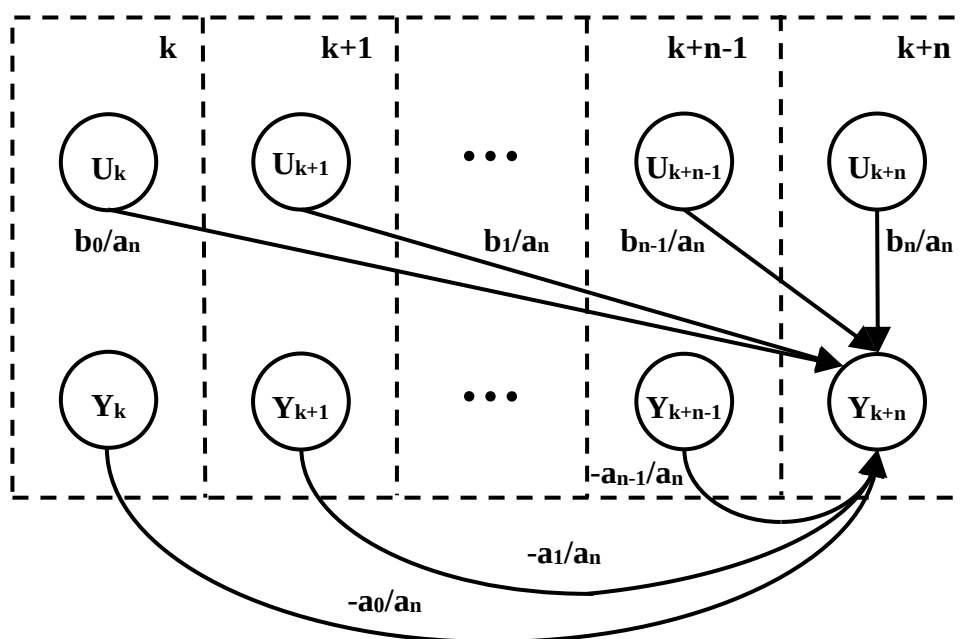
Matematické modely popisující chování lineárních dynamických systémů vyjadřují závislost výstupů dynamického systému na hodnotách jeho vstupu. Pokud používáme k popisu dynamického systému vnitřní popis, uvažujeme také vektor vnitřních proměnných, které často nejsou měřitelné. Veškeré závislosti a jejich směr je popsatelný pro všechny proměnné, které jsou v našem zájmu. Parametry systémů jsou považovány za neměnné v čase, ale hodnoty vstupu a výstupu se v čase mění. Z tohoto vyplývá, že Dynamická Bayesovská síť se spojitými uzly je vhodným nástrojem pro modelování chování lineárních dynamických systémů. Jako základ k modelování bylo použito dvou způsobů popisu dynamického systému:

- vnější popis (ve tvaru diferenční rovnice)
- vnitřní popis (ve tvaru stavového popisu)

Diferenční rovnice popisující dynamický systém může v obecném případě být zapsána následovně:

$$\begin{aligned} a_n y(k+n) + a_{n-1} y(k+n-1) + \dots + a_1 y(k+1) + a_0 y(k) = \\ = b_m u(k+m) + b_{m-1} u(k+m-1) + \dots + b_1 u(k+1) + b_0 u(k). \end{aligned} \quad (5)$$

Podle podmínky fyzikální realizovatelnosti dynamických systémů m je vždy menší nebo rovno n . Pro mezní případ $m=n$ můžeme sestavit dynamickou Bayesovskou síť uvedenou na Obr. 5. Pro systémy, pro které platí $m < n$, měli bychom odstranit odpovídající hrany v této síti, ale jinak struktura zůstává stejná.



Obrázek 5: Reprezentace diferenční rovnice pomocí $(n+1)$ TDBN.

Jak již bylo zmíněno, k definici této sítě musíme nadefinovat rozdělení pravděpodobnosti proměnných v n prvních časových okamžicích (počáteční podmínky systému):

$$\begin{aligned} U_i &\sim N(\mu_{U_i}, \sigma_{U_i}^2) \\ Y_i &\sim N(\mu_{Y_i}, \sigma_{Y_i}^2), \quad i = 0 \dots n-1. \end{aligned} \quad (6)$$

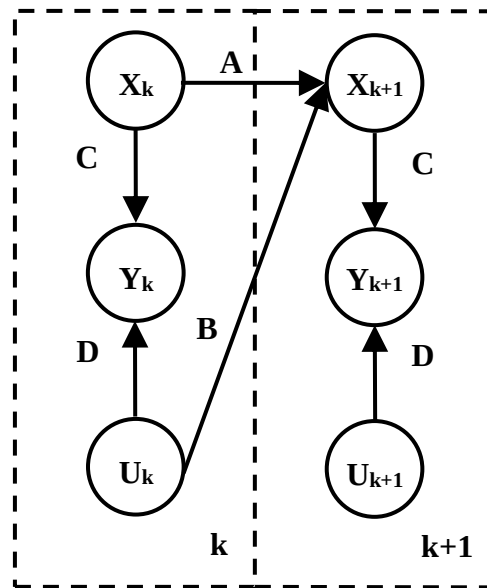
Pak se výstup v libovolném časovém okamžiku k popisuje pomocí následujícího rozdělení pravděpodobnosti:

$$Y_{k+n} \sim N \left(\mu_{Y_{k+n}} - \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{a_n} \cdot \mu_{Y_{k+n-i}} + \sum_{i=0}^n \frac{b_i}{a_n} \cdot \mu_{U_{k+n-i}}, \sigma_{Y_{k+n}}^2 \right). \quad (7)$$

Další model dynamického systému na bázi DBN je znázorněn na Obr. 6. Tento model pochází ze stavového popisu dynamických systémů. Diskrétní stavový popis je popsán pomocí následujících maticových rovnic:

$$\begin{aligned} X(k+1) &= A \cdot X(k) + B \cdot u(k); \\ y(k) &= C \cdot X(k) + D \cdot u(k). \end{aligned} \quad (8)$$

Stavový popis převádí diferenční rovnici řádu n na n diferenčních rovnic prvního řádu zavedením stavového vektoru reprezentujícího vnitřní stavové proměnné dynamického systému, které většinou nejsou měřitelné. Velikost stavového vektoru odpovídá řádu dynamického systému. V závislosti na volbě stavového vektoru, pro jeden systém může být sestaveno nekonečně mnoho stavových popisu, které však můžou být převedeny na diferenční rovnici jednoznačně popisující systém.



Obrázek 6: Reprezentace stavového popisu pomocí 2TDBN.

Výhodou použití stavového popisu je možnost jeho jednoduchého rozšíření pro systémy s více vstupy a více výstupy. Další výhodou je skutečnost, že stavový popis splňuje Markovův předpoklad nezávislosti, takže k popisu dynamického systému za použití stavového popisu si vystačíme s 2TDBN sítí. Nevýhodou stavového popisu je nutnost převodu na jednoznačný popis pro zjištění parametrů systému a nutnost přepočtu počátečních podmínek v případě že počáteční podmínky systému nejsou nulové [9].

K definici DBN na Obr. 6 musíme nadefinovat rozdělení pravděpodobnosti proměnných v nultém časovém okamžiku:

$$\begin{aligned} X_0 &\sim N(\mu_{X_0}, \sigma_{X_0}^2) \\ Y_0 &\sim N(\mu_{Y_0}, \sigma_{Y_0}^2) \\ U_0 &\sim N(\mu_{U_0}, \sigma_{U_0}^2) \end{aligned} \quad (9)$$

Pak se výstup v libovolném časovém okamžiku k popisuje pomocí následujícího rozdělení pravděpodobnosti:

$$\begin{aligned} X_{k+1} &\sim N(\mu_{X_{k+1}} + A \cdot \mu_{X_k} + B \cdot \mu_{U_k}, \Sigma_{X_{k+1}}) \\ Y_{k+1} &\sim N(\mu_{Y_{k+1}} + C \cdot \mu_{X_{k+1}} + D \cdot \mu_{U_{k+1}}, \sigma_{Y_{k+1}}^2) \\ U_{k+1} &\sim N(\mu_{U_{k+1}}, \sigma_{U_{k+1}}^2) \end{aligned} \quad (10)$$

4 Závěr

Dva modely dynamických systémů představené v tomto článku mohou být použité k simulaci za použití usuzovacích algoritmů a k identifikaci za použití učících se algoritmů.

Jednou z výhod navržených modelů je to, že jsou založeny na principu deklarativní reprezentace, což znamená že reprezentace, usuzování a učení jsou od sebe odděleny. Následně k manipulaci se stejným modelem můžou být použity různé algoritmy bez nutnosti změn v modelu. Proto se zachovává možnost rychlého použití nově vznikajících algoritmů na usuzování a učení Bayesovských sítí.

Další výhodou je možnost rozšíření modelů pro sofistikovanější dynamické systémy. Jednak mohou být jednoduše modifikovány pro popis systémů s více vstupy a více výstupy (změnou rozměrů příslušných náhodných proměnných a parametrů), také se může použít flexibilita reprezentace pomocí Bayesovských sítí (lineární regrese může být vyměněna za jinou, například nelineární funkci).

Poslední výhodou těchto modelů je jejich přímá vazba na již existující a dobře známé způsoby popisu dynamických systémů, což usnadňuje jejich pochopení, ověření a použití.

Literatura

- [1] LJUNG, L. *System Identification. Theory for the User*. Second Edition. New Jersey (USA): Prentice Hall PTR, 1999. 609 p. ISBN 0-13-656695-2
- [2] VAN OVERSCHEE, P.; DE MOOR, B. *Subspace Identification for linear systems: Theory-Implementation-Applications*. Kluwer Academic Publishers, 1996. 254 p.
- [3] SÖDERSTRÖM, T.; STOICA, P. *System identification*. Cambridge (Great Britain): Prentice Hall International (UK) Ltd., 1989. 612 p. ISBN 0-13-881236-5
- [4] HECKERMAN D. E., HORVITZ E. J., NATHWANI B. N. (1992). Toward Normative Expert Systems: Part I. The Pathfinder project. In *Methods of Information in Medicine* 31, pp. 90-105.
- [5] NEAPOLITAN R. *Probabilistic Methods for Bioinformatics*. Burlington, MA: Morgan Kaufmann, 2009. 406 p. ISBN 9780123704764.
- [6] FRIEDMAN N, LINIAL M, NACHMAN I, PE'ER D: Using Bayesian Networks to Analyze Expression Data. *Proceedings of the Fourth Annual International Conference on Computational Molecular Biology* 2005, 127-135.
- [7] FISHELSON M, GEIGER D: Exact Genetic Linkage Computations for General Pedigrees. In *Bioinformatics* 2002, 18(suppl 1):189-198.
- [8] KOLLER, D.; FRIEDMAN, N. *Probabilistic Graphical Models: Principles and Techniques*. Cambridge (USA): The MIT Press, 2009. 1233 p. ISBN 978-0-262-01319-2
- [9] ŠTECHA, J.; HAVLENA, V. *Teorie dynamických systémů*. Praha: Ediční středisko ČVUT, 2005. 247 p.

MODELOVÁNÍ TURBULENTNÍHO PŘENOSU TEPLA

Tomáš Kořínek

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

Abstrakt: Práce se zaměřuje na problematiku modelování turbulentního přenosu tepla. Jsou zde uvedeny možné způsoby řešení turbulence a to zejména přístupy Large Eddy Simulation (LES), Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) a Partially-Averaged Navier-Stokes (PANS). Uvedené způsoby jsou testovány na základní úloze mechaniky tekutin a to konkrétně na obtékání vyhřívaného válce. Pro porovnání slouží bezrozměrné Nusseltovo číslo, které kvantifikuje intenzitu přestupu tepla. V porovnání s výsledky z experimentu vyšla největší shoda s LES, přijatelné shody bylo dosaženo s přístupem PANS a metoda RANS se ukázala jako naprosto nevyhovující.

Klíčová slova: turbulence, přenos tepla, numerická simulace.

1 Úvod

Numerické simulace nabývají v průmyslové praxi na čím dál větším významu. To je zejména díky rozvoji v oblasti IT a dále v rozšíření softwarů schopných řešit širokou škálu aplikací od pevnostních výpočtů nosných rámců strojů až po modelování chemických reakcí během procesu spalování. Na rozdíl od výpočtů ve strukturální mechanice jsou simulace v oblasti mechaniky tekutin mnohem složitější a to z důvodu stále nevyřešeného problému jmenem turbulence.

V současné době existuje několik způsobů jak turbulenci v mechanice tekutin řešit. Tím nej přesnějším způsobem je přímá numerická simulace (DNS). Tento způsob je ovšem i výpočetně nejnáročnější a to vzhledem k tomu, že turbulentní proud je složen z široké škály měřítek a pro správné zachycení těchto měřítek je potřeba mít velmi jemnou výpočetní síť. Díky tomu se dají řešit jen základní úlohy v mechanice tekutin [1-3]. Další způsob je metoda Large Eddy Simulation (LES) [4], ta spočívá v modelování velkých vírů a simulování těch malých, které výpočetní síť není schopná zachytit. Simulování malých vírů obstarává tzv. sub-grid model. Sub-grid modely se dělí na modely založené na algebraických vztazích [5] a na složitější dynamické modely [6]. Oproti DNS je výpočetní náročnost menší ale i tak stále náročná na výpočetní výkon a kvalitu sítě. Jeden z nejrozšířenějších způsobů řešení turbulence je přístup Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS), tento způsob spočívá podle Reynoldse [7] v rozdělení okamžitých hodnot nestacionárních veličin na střední a flukтуаční část. Ústřední pohybové rovnice se pak řeší v tvaru pro střední hodnoty závisle proměnných. Touto úpravou se ale v rovních objevily nové členy, které je potřeba aproximovat. Tyto členy bývají označovány jako Reynoldsova turbulentní napětí. V současné době lze rozdělit dva způsoby aproximace těchto členů. První způsob vychází z Boussinesqovy hypotézy. Ta vychází z podobnosti molekulárního přenosu hybnosti s turbulentním přenosem. Druhá aproximace je založena na přímém modelování složek Reynoldsova napětí. Právě díky své jednoduchosti se první způsob pomocí Boussinesqovy hypotézy stal pro řešení komplexních úloh velice oblíbený. Velmi často používané dvou rovnice turbulentní modely $k-\epsilon$ [8] a $k-\omega$ [9] patří do skupiny modelů založených na Boussinesqově hypotéze. Právě správná volba turbulentního modelu je klíčová a zatím neexistuje univerzální RANS model, který by dokázal simulovat širokou škálu proudění. Zjednodušeně řečeno, každý turbulentní model RANS se hodí na jiný typ proudění. Nesporná výhoda RANS modelů oproti LES jsou nižší nároky na velikost výpočetní sítě. Právě díky tomu se tato metoda stala velice oblíbená v průmyslové praxi. Je

ovšem nutno poznamenat, že tato metoda má kromě výhod i nevýhody. Asi ta největší nevýhoda je špatná predikce odtržení mezní vrstvy pro případy, kdy odtržení není z důsledku ostrého přechodu zkoumané domény ale je z důsledků nestabilit v mezní vrstvě. Tento jev výrazně ovlivňuje například koeficient tření případně součinitel přestupu tepla.

Jak již bylo řečeno, každý jmenovaný způsob řešení turbulence má své výhody a nevýhody. Skloubení jednotlivých přístupů řešení turbulence bylo v minulosti i současné době objektem zkoumání mnoha vědců. Mezi ty nevýznamnější patří metoda Detached-Eddy Simulation (DES) [10], Limited Numerical Scales (LNS) [11], Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes (URANS) [12], Very Large Eddy Simulation (VLES) [13] a v neposlední řadě Partially Integrated Transport Model (PITM) [14] a Partially Averaged Navier-Stokes (PANS) [15].

Tato práce je zaměřena na porovnání různých způsobů řešení turbulence a jeho vlivu na přestup tepla. Konkrétně jsou porovnány přístupy LES, RANS a PANS. Porovnání bylo provedeno pro případ obtékání vyhřívaného válce při Reynoldsově číslu $Re=30000$ [16]. Kde $Re_b=U_b \cdot D/\nu$, U_b je vstupní rychlost, D je průměr obtékaného válce a ν je kinematická viskozita vzduchu.

2 Matematický model

Jak již bylo dříve zmíněno, tato práce se zaměřuje na porovnání jednotlivých přístupů. Níže jsou uvedeny ústřední pohybové rovnice pro jednotlivé přístupy. Jako první je zde uveden přístup LES, ten řeší filtrované Navier-Stokesovy rovnice. Subgridní model pro LES byl WALE [18], který byl již dříve ověřen pro turbulentní přenos tepla [19].

Filtrovaná rovnice zachování hybnosti

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_{sgs}) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] \quad (1)$$

A filtrovaná energetická rovnice ve tvaru

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_j \bar{T})}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu}{Pr} + \frac{\nu_{sgs}}{Pr_t} \right) \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right] \quad (2)$$

kde P je tlak, Pr je Prandtovo číslo, Pr_t je turbulentní Prandtlovo číslo, T je teplota, u je rychlost, ρ je hustota, ν je kinematická viskozita, ν_{sgs} je sub-gridní viskozita.

Subgridní viskozita pro WALE je vypočtena ze vztahu:

$$\nu_{sgs} = (C_\omega \Delta)^2 \frac{(s_{ij}^d s_{ij}^d)^{3/2}}{(\bar{s}_{ij} \bar{s}_{ij})^{5/2} + (s_{ij}^d s_{ij}^d)^{5/4}} \quad (3)$$

$$s_{ij}^d = \frac{1}{2} (\bar{g}_{ij}^2 + \bar{g}_{ij}^2), \bar{s}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right), \bar{g}_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (4)$$

kde modelová konstanta $C_\omega=0,325$ a Δ je průměrná velikost výpočetní buňky.

V případě metody RANS se řeší středované pohybové rovnice, kterou jsou uzavřeny pomocí transportních rovnic modelu turbulence [20]. Středované Navier-Stokes rovnice pak jsou ve tvaru:

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{U}_i \bar{U}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu) \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \bar{u_i' u_j'} \right] \quad (5)$$

kde U je středovaná rychlost. Člen reynoldsových napětí je pak pomocí Boussinesqovi hypotézy ve tvaru:

$$\overline{u_i' u_j'} = -\nu_t \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{U}_k}{\partial x_k} \right) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \overline{u_k' u_k'} \quad (6)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

kde modelová konstant $C_\mu=0.09$, k je turbulentní kinetická energie, ϵ je rychlost disipace.

Středovanou rovnici zachování energie lze psát ve zjednodušeném tvaru

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{U}_j \bar{T})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu}{Pr} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \overline{\theta u_j'} \right) \quad (8)$$

Poslední člen na pravé straně je potřeba vhodně aproximovat. V našem případě byla stejně jako pro LES použita zjednodušená gradientová hypotéza zavádějící turbulentní Prandtlovo číslo.

$$\overline{\theta u_i'} = \frac{-\nu_t}{Pr_t} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} \quad (9)$$

Modelové transportní rovnice pro turbulentní kinetickou energii a rychlost disipace [20] jsou:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{U}_j k)}{\partial x_j} = P_k - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (10)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{U}_j \epsilon)}{\partial x_j} = C_{1\epsilon} P_k \frac{\epsilon}{k} - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \quad (11)$$

kde modelové konstanty $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $\sigma_k = 1$, $\sigma_\epsilon = 1.3$, P_k je produkce turbulentní kinetické energie

Poslední přístup, který je v této práci řešen je metoda PANS. Ta vychází z předpokladu, že je určitá část turbulentní kinetické energie vypočtena přímo z Navier-Stokesových rovnic a zbývající část musí být simulována. Poměr mezi vyřešenou turbulentní kinetickou energií a celkovou turbulentní kinetickou energií je označen jako f_k a je roven:

$$f_k = \frac{k_u}{k} \quad (12)$$

Zavedení tohoto předpokladu lze Navier-Stokesovu rovnici pro přístup PANS psát ve tvaru

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \tau(v_i, v_j)}{\partial x_j} \quad (13)$$

kde u je filtrovaná/vyřešená rychlost, rozložená rychlost v je dána souštem filtrované/vyřešené rychlosti a její flukтуаční části $v=u+u'$, člen $\tau(v_i, v_j)$ je zobecněný druhý centrální moment a bývá označován jako subfilter scale (SFS) stress. Při zavedení Boussinesqovy hypotézy je pak roven:

$$\tau(v_i, v_j) = -\nu_u \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} k_u \delta_{ij} \nu_u = C_\mu \frac{k_u^2}{\epsilon_u} \quad (14)$$

kde modelová konstant $C_\mu = 0.09$, ν_u je vírová viskozita, k_u je nevyřešená turbulentní kinetická energie a ϵ_u je nevyřešená rychlost disipace. Transportní rovnice pro k_u a ϵ_u jsou ve tvaru:

$$\frac{\partial k_u}{\partial t} + \frac{\partial (u_j k_u)}{\partial x_j} = P_u - \epsilon_u + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_u}{\sigma_{k_u}} \frac{\partial k_u}{\partial x_j} \right) \quad (15)$$

$$\frac{\partial \epsilon_u}{\partial t} + \frac{\partial (u_j \epsilon_u)}{\partial x_j} = C_{1\epsilon_u} P_u \frac{\epsilon_u}{k_u} - C_{2\epsilon_u} \frac{\epsilon_u^2}{k_u} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_u}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon_u}{\partial x_j} \right) \quad (16)$$

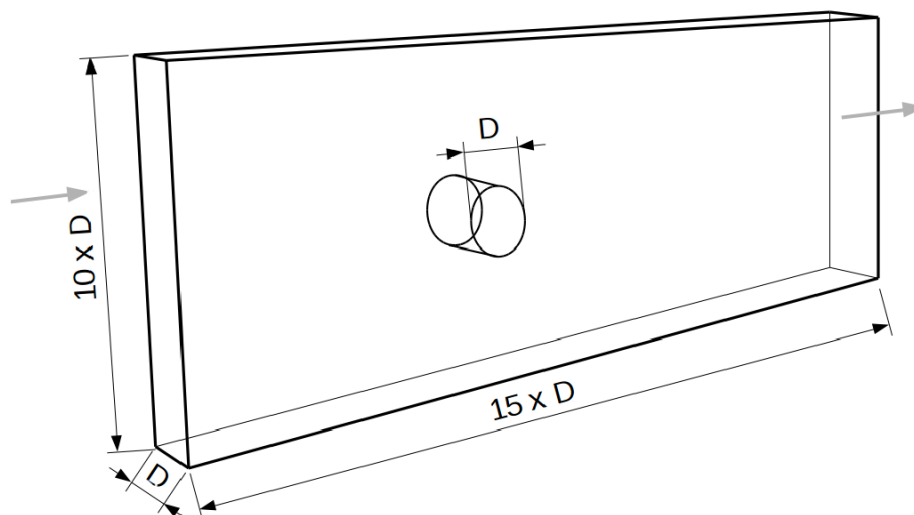
$$C_{2\epsilon_u} = C_{1\epsilon_u} + f_k (C_{2\epsilon_u} - C_{1\epsilon_u}) \quad (17)$$

kde modelové konstanty jsou $C_{1\epsilon_u}=1.44$, $C_{2\epsilon_u}=1.92$, $\sigma_{\epsilon_u}=1.3$, $\sigma_{k_u}=1$, P_u je produkce nevyřešené turbulentní kinetické energie a f_k je poměr mezi nevyřešenou a celkovou turbulentní kinetickou energií lze předem definovat jako konstantu v rozmezí od 0 do 1, případně nechat spočítat. Výpočet se provede pomocí určení celkové turbulentní kinetické energie z Taylorova měřítka.

$$f_k = \frac{1}{\sqrt{c_\mu}} \left(\frac{\Delta}{\Lambda} \right), \Lambda = \frac{k^{1.5}}{\epsilon} \quad (18)$$

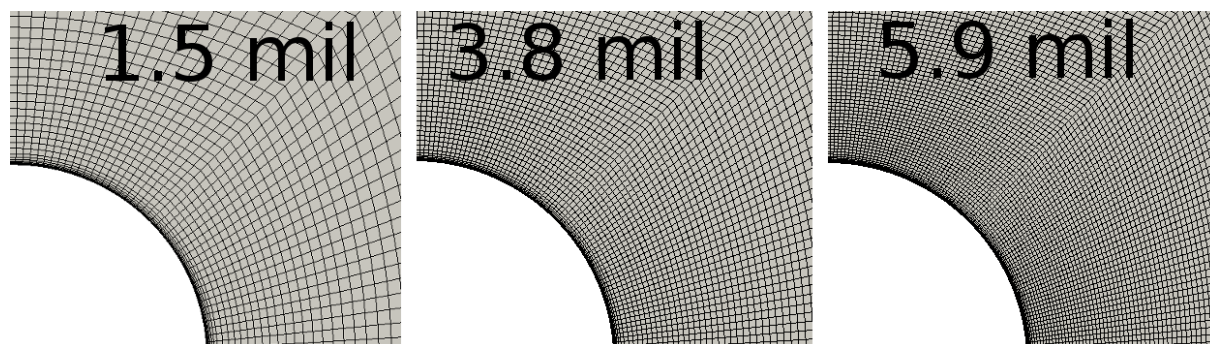
kde konstanta $c_\mu=0.23$.

Výpočetní doména byla parametrizována pomocí průměru vyhřívaného válce. Průměr válce byl na základě Reynoldsova čísla zvolen $D=0.078$ m. Doména je vyobrazena na obrázku 1. Šipka vlevo značí vstup tekutiny do domény a šipka vpravo značí výstupní podmínku z domény. Horní a spodní plocha byla nastavena jako adiabatická stěna. Na přední a zadní plochu byla aplikována periodická podmínka. Na samotný válec byla stěna o nastavené konstantní teplotě 350 K. Vstupní rychlost byla 5.7 m/s a teplota 300 K.



Obrázek 1: Zkoumaná výpočetní doména.

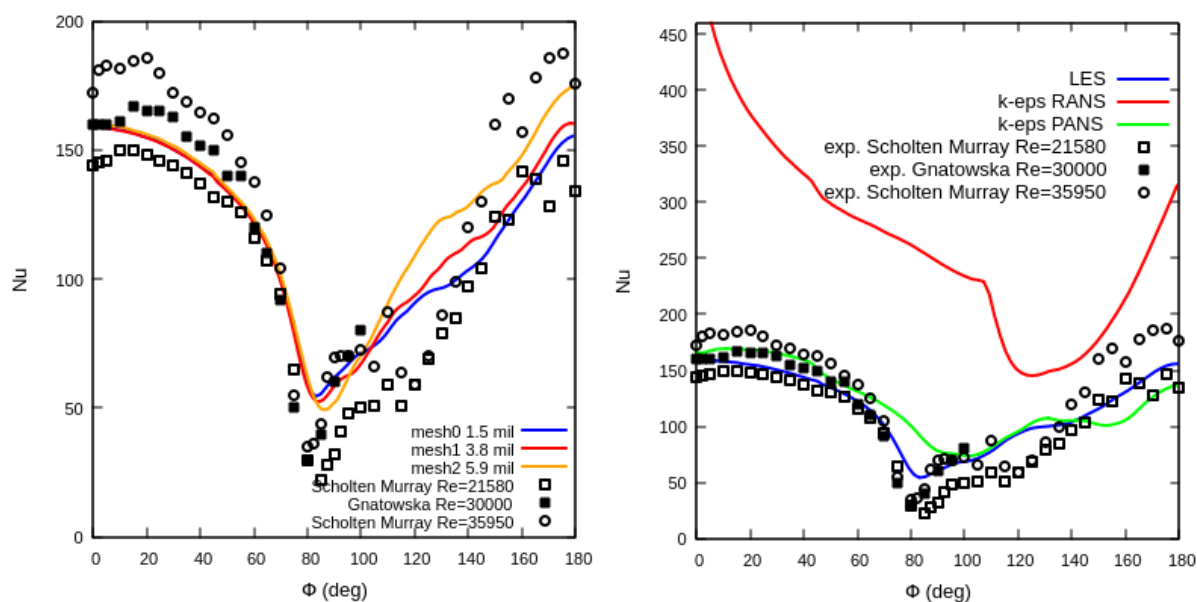
Pro přístup LES bylo nejprve potřeba provést test nezávislosti sítě na řešení. Z toho důvodu byly vytvořeny tři sítě o různé hustotě buněk. Sít s nejmenším počtem měla 1.5 milionů buněk, další měla 3.8 milionů buněk a nejjemnější síť měla 5.9 milionů buněk. Na obrázku 2 je vyobrazen detail sítě v blízkosti válce. U stěny nejsou použity žádné stěnové funkce, mezní vrstva je modelována. Zjemnění v blízkosti stěny je pro všechny sítě stejné.



Obrázek 2: Detaily výpočetní sítě v oblasti válce.

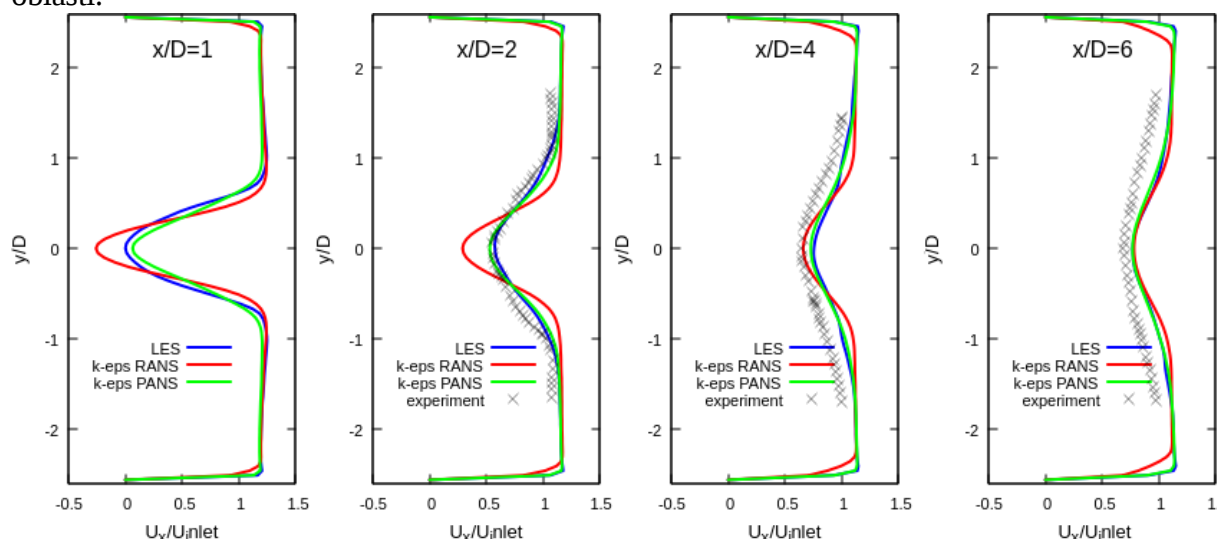
3 Výsledky

Jak ovlivnili jednotlivé přístupy přestup tepla z válce do proudící tekutiny lze pozorovat na obrázku 3, kde je graf průběhu Nusseltova čísla podél válce. Úhel 0° označuje místo vpředu na válci a úhel 180° je místo za válcem. Jak je patrné tak výsledky ze simulace pomocí RANS jsou nadhodnoceny, kdyžto výsledky dosažené pomocí LES jsou v dobré shodě s výsledky z experimentu. Zajímé jsou výsledky dosažené pomocí přístupu PANS, ty predikovali místo separace mezní vrstvy dále než tomu tak bylo v případě experimentu a LES. Ovšem i tak dosáhli velice dobré shody s výsledky z experimentu. Je potřeba zdůraznit, že základem modelu použitého pro PANS byl stejný dvourovnicový model $k-\epsilon$ jako pro RANS. To je také důsledek onoho opožděného odtržení mezní vrstvy, neboť tento model nedokáže tento fenomén zachytit. Když se podíváme na oblast separace pro LES, můžeme pozorovat, že poloha je prakticky shodná s experimentem. Oproti experimentu ale výsledky z LES predikují intenzivnější přestup tepla v tomto místě. Odpověď na tento nedostatek lze najít na stejném obrázku v grafu vlevo kde je zobrazen test nezávislosti sítě. S rostoucím počtem buněk se také posouvá oblast separace a zároveň dochází k mírnému snížení hodnoty Nusseltova čísla. To je způsobeno tím, že přístup LES je citlivý na kvalitu sítě a se zvyšujícím se počtem buněk jsme schopni modelovat rozměrově menší víry a tím snížit počet těch simulovaných. Otázkou ovšem je jak velká chyba je vnešena použitím jednoduché gradientové hypotézy pro turbulentní přestup tepla.



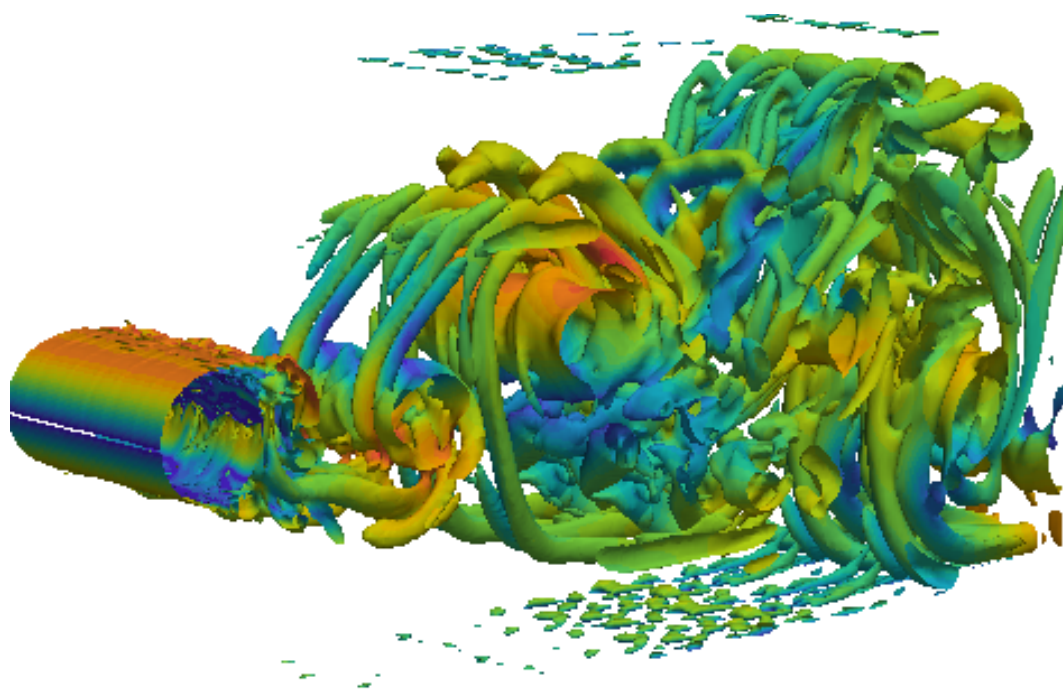
Obrázek 3: Graf průběhu Nusseltova čísla podél válce pro test nezávislosti sítě (vlevo) a porovnání přístupů řešení turbulence (vpravo).

Zajímavé je také porovnání toho co se děje v úplavu za obtékaným válcem. Na obrázku 4 jsou vyřesleny 4 grafy pro zprůměrovanou složku rychlosti ve směru x pro jednotlivé vzdálenosti od obtékaného válce. Jak je z grafů patrné tak přístup RANS predikoval mnohem menší rychlost v oblasti úplavu poblíž válce. Dokonce v místě v těsné blízkosti válce je predikovaná rychlost pomocí RANS záporná, kdyžto pro LES a PANS s rychlost u středu blíží nule. S rostoucí vzdáleností od válce se tato odchylka postupně eliminovala. Výsledky dosažené pomocí LES a PANS jsou v dobré shodě s experimentem i v těsné blízkosti válce. Největší odchylky je dosaženo v nejvzdálenějším zkoumaném místě. Zde mohlo dojít k ovlivnění z důsledku výstupní okrajové podmínky. Pro eliminaci, této odchylky by bylo potřeba prodloužit výpočetní doménu. Za zmínku stojí rychlostní profil v mezní vrstvě získaný pomocí RANS, ten předpokládal mnohem tlustší mezní vrstvu než predikal přístup LES a PANS. Bohužel v této oblasti chybí výsledky z experimentu a nelze tedy provést srovnání v této oblasti.



Obrázek 4: Grafy zprůměrovaných rychlostních profilů pro různé vzdálenosti od obtékaného válce.

Jedním ze způsobů jak pozorovat turbulentní proud jako celkem je pomocí druhého invariantu tensoru rychlost deformace, tyn bývá často označován jako Q kritérium. Na obrázku 5 jsou vyobrazeny Isoplochy Q kritéria pro $Q=1000$, na ně je aplikována barevná škála označující celkovou rychlost. Modře je označena nulová rychlost a červeně maximální rychlost. Díky tomuto zobrazení lze pozorovat místo odtěžení mezní vrstvy. Jedná se o oblast kdy z téměř hladké isoplochy se začnou objevovat malé nerovnosti. Dále lze díky tomu také vidět úplav, který vzniká za válcem. Je zde vidět jak docházelo k periodickému odtrhávání vírů a z postupně protahujících se vlásečnicových vírů vzniká ryze turbulentní proud. Povšimnout si také můžeme ovlivněné mezní vrstvy na spodní a vrchní stěně. Zde vlivem úplavu docházelo k rozrušení stabilní mezní vrstvy, což zapříčinilo její růst ve směru k jádru proudu. Tento fenomén se dal pozorovat i v grafech rychlostních profilů, kde se postupně rychlostní profil mírně zvedal při větší vzdálenosti od obtékaného válce.



Obrázek 5: Isoplochy Q kritéria pro $Q=1000$ při použití turbulentní vstupní podmínky.

4 Závěr

Tato práce ukázala, že průmyslově velmi často používaný RANS turbulentní model $k-\epsilon$ vede k chybné predikci přestupu tepla a je naprosto pro tento fenomén nevhodný. Ovšem největší přínos této práce je v odzkoušení metody PANS pro případ turbulentního přestupu tepla na případ obtékání vyhřívaného hladkého válce. Tato metoda se již dříve osvědčila v proudění bez přestupu tepla a tato práce potvrzuje, že její potenciál je i v řešení problematiky turbulentního přestupu. Zároveň ukázala, že i jednoduchý dvourovnicový turbulentní model dokáže dobře predikovat součinitel přestupu tepla při použití ve variantě PANS.

Poděkování

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže Technické univerzity v Liberci č. SGS 21227, využívající účelové podpory na specifický vysokoškolský výzkum a je financovaná Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Literatura

- [1] LE H., MOIN P. Direct numerical simulation of turbulent flow over a backward-facing step, *Stanford Univ., Center for Turbulence Research, Annual Research Briefs*, 1992, 161-173.
- [2] SCHALTER P., ORLU R., LI Q., BRETHOUWER G., FRANSSON J.H.M., JOHANSSON A.V., ALFREDSSON P.H., HENNINGSON D.S. A Turbulent boundary layers up to $Re_\theta=2500$ studied through simulation and experiment, *Physics of Fluids*, 2009, Vol. 21, No. 5.
- [3] VINUESA R., HOSSEINI S.M., HANIFI A., HENNINGSON D.S., SCHALTER P. Assesment of turbulent boundary layers on a NACA4412 wing section at moderate Re, *11th In. ERCOFTAC Symp. On Engineering Turbulence Modeling and Measurements (ETMM11)*, Palermo, September 21-23 2016.
- [4] DEARDORFF J. A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers, *J. Fluid Mech.*, 1970, Vol. 41, 453-480.
- [5] SMAGORINSKY J. General circulation experiments with the primitive equations, *Month. Weat. Rev.*, 1963, Vol. 91, 99-164.
- [6] GERMANO M., PIOMELLI U., MOIN P., CABOT W.H. A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model, *Physics of Fluids*, 1991, Vol. 3, No. 7.
- [7] REYNOLDS O. On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination

- of the criterion, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1895, 123-161.
- [8] LAUNDER B.E., SPALDING D.B. The numerical computation of turbulent flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1974, Vol. 3 269-289.
- [9] WILCOX D.C. Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models, *AIAA J.*, 1988, Vol. 26 1299-1310.
- [10] SPALART P.R. Trends in Turbulence Treatments, *Fluids 2000, Denver*, AIAA Paper No. 2000-2306, 2002.
- [11] BATTEN P., GOLDBERG U., CHAKRAVARTHY S. LNS-An approach towards Embedded LES, *AIAA Paper No. 2002-0427*, 2002.
- [12] KHORRAMI M.R., SINGER B., BERKMAN M.E. LNS Time-accurate simulations and acoustic analysis of Slat Free Shear Layer, *AIAA J.*, 2002, Vol. 40 1284-1291.
- [13] SPEZIALE C.G. Computing non-equilibrium flows with time-dependent RANS and VLES, *15th ICNMF*, 1996.
- [14] CHAOUAT B., SCHIESTEL R. A new Partially Integrated Transport Model for subgrid-scale stresses and dissipation rate for turbulent developing flows, *Physics of Fluids*, 2005, Vol. 17, 1-19.
- [15] GIRIMAJI S.S. Partially-Averaged Navier-Stokes model for turbulence: a Reynolds-Averaged Navier-Stokes to Direct Numerical Simulation bridging method, *Journal of Applied Mechanics*, 2006, Vol. 73 413-421.
- [16] SCHOLTEN J.W., MURRAY D.B. Unsteady heat transfer and velocity of a cylinder in cross flow-I. Low freestream turbulence, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1998, Vol. 41 1139-1148.
- [17] SCHOLTEN J.W., MURRAY D.B. Unsteady heat transfer and velocity of a cylinder in cross flow-I. High freestream turbulence, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1998, Vol. 41 1149-1156.
- [18] NICOUD F., DUCROS F. Subgrid scale stress modeling based on the square of the velocity gradient tensor, *Int. J. Flow Turbul. Combust.*, 1999, Vol. 62 183-200.
- [19] MIRZAEI M., SOHANKAR A., DAVIDSON L., INNINGS F. Large Eddy Simulation of the flow and heat transfer in a half-corrugated channel with various wave amplitudes, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2014, Vol. 76 432-446.
- [20] LAUNDER B.E., SPALDING D.B. The numerical computation of turbulent flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1974, Vol. 3 269-289.

Reducing labor intensity in the development of new universal cutting fluids for machining

Iuliia Krasnikova

Sekce – STROJÍRENSTVÍ,

Fakulta strojní, 2 ročník

Doktorský studijní program – Strojírenská technologie

The process of developing new universal cutting fluids is labor-intensive due to the requirement of conducting experiments to determine the impact of numerous additives on tool life during different technological operations. Finding the best cutting fluid, the use of which will result in the longest tool life, is a long and laborious process. To reduce labor intensity while creating new cutting fluids accelerated methods are applied first, such as the method of determining the tribometric properties of a new fluid. Subsequently wear tests are carried out, using only those cutting fluids which show the best tribological behavior. The aim of this study is to reduce labor intensity in developing new universal cutting fluids. For this purpose, a new accelerated method has been developed, which helps to determine the capability of the fluid to counteract the adhesion between the chips and the cutting tool. Furthermore, a new sequence of cutting fluid tests has been proposed which significantly reduces the amount of wear tests, resulting in considerable reduction of the overall labor intensity in the development of new cutting fluids.

Keywords: Adhesion, Cutting fluid, Machining, Wear

1 Introduction

Application of new cutting fluids is one of the principal methods aimed at improving machining effectiveness. Klocke and Eisenblatter [1] concluded that cutting fluids (CF) help to achieve specified results in terms of tool life, surface finish and accuracy-to-size. Jayal and Balaji [2] presented that, in turning operations, using CF increases the tool life of PVD coated tools in comparison with MQL and dry cutting. However, the process of developing new cutting fluids is time-consuming and laborious due to the requirement of testing a large number of different additives that may increase the tool life during cutting.

The determination of tool life by using different cutting fluids during various technological operations (such as milling and turning) is the most reliable yet most time-consuming way to determine the best cutting fluid. Different authors used tool life tests in their studies. Khan et al. [3] determined the growth of average auxiliary flank wear as a function of time under dry and wet conditions and using vegetable oil for MQL in turning. Thepsonthi et al. [4] investigated the application of minimal cutting fluid in high-speed milling. In addition, Axinte and De Chiffre [5] provide tool life tests for turning, milling and drilling for evaluating the performance of cutting fluids when machining aerospace materials. However, De Chiffre and Belluco [6] proved that tool life tests are the most expensive.

To reduce the labor intensity of cutting fluid development accelerated methods first were used in this investigation such as the method of determining the tribometric properties of a new fluid. Vengudusamy et al. [7] tested mineral and synthetic oils on different types of tribometers for comparison of frictional properties. Adhvaryu et al. [8] studied tribological properties of thermally and chemically modified vegetable oils as environmentally friendly lubricants by using equipment for measuring ball-on-disk friction. Deng et al. [9] used slide wear tests on the ball-on-disk tribometer to determine friction and wear behaviors of the carbide tools embedded with solid lubricants. Piekoszewski et al. [10] used modified four-ball testers to test lubricants under conditions of extreme pressure.

After determining the tribometric properties of all the cutting fluids, the CF are discarded which possess the lowest tribometric characteristics. The final wear tests are carried out only with the fluids which have high tribological properties. For example, Fig. 1 shows the results of determining tribometric properties in 11 different fluids (No.1, No.2, ..., No.11) using the Reichert wear test.

The used equipment was the Reichert Friction & Wear tester RM 2 from Anton Paar ProveTec GmbH. It is usually assumed that cutting fluids with better tribological properties will ensure greater tool life. The same principle was used by Sato et al. [11] who investigated the effect of water-based lubricants on wear of coated material, and Persson and Gählin [12] used Reichert friction and wear tests for tribological performance of DLC coatings in combination with water-based lubricants. Fig. 1 shows that six cutting fluids can be discarded since they possess significantly worse tribological properties, while wear tests continue with the five remaining best fluids (No.1, No.2, No.3, No.4, No.5). After that, the best cutting fluid with maximum resistance is selected from the five remaining ones. Its resistance is compared with the resistance of the conventional cutting fluids which are already used in industry. If tool life with the new cutting fluid proves to be longer than the one with conventional fluids, the new cutting fluid is recommended for industrial use. In case the new cutting fluid shows less resistance compared to the cutting fluids used in industry, the development of new cutting fluids will proceed until a new fluid is created which ensures better tool life compared with the fluids that are already industrially used. Thus, the use of two methods leads to a reduction of the overall labor

intensity in creating new cutting fluids.

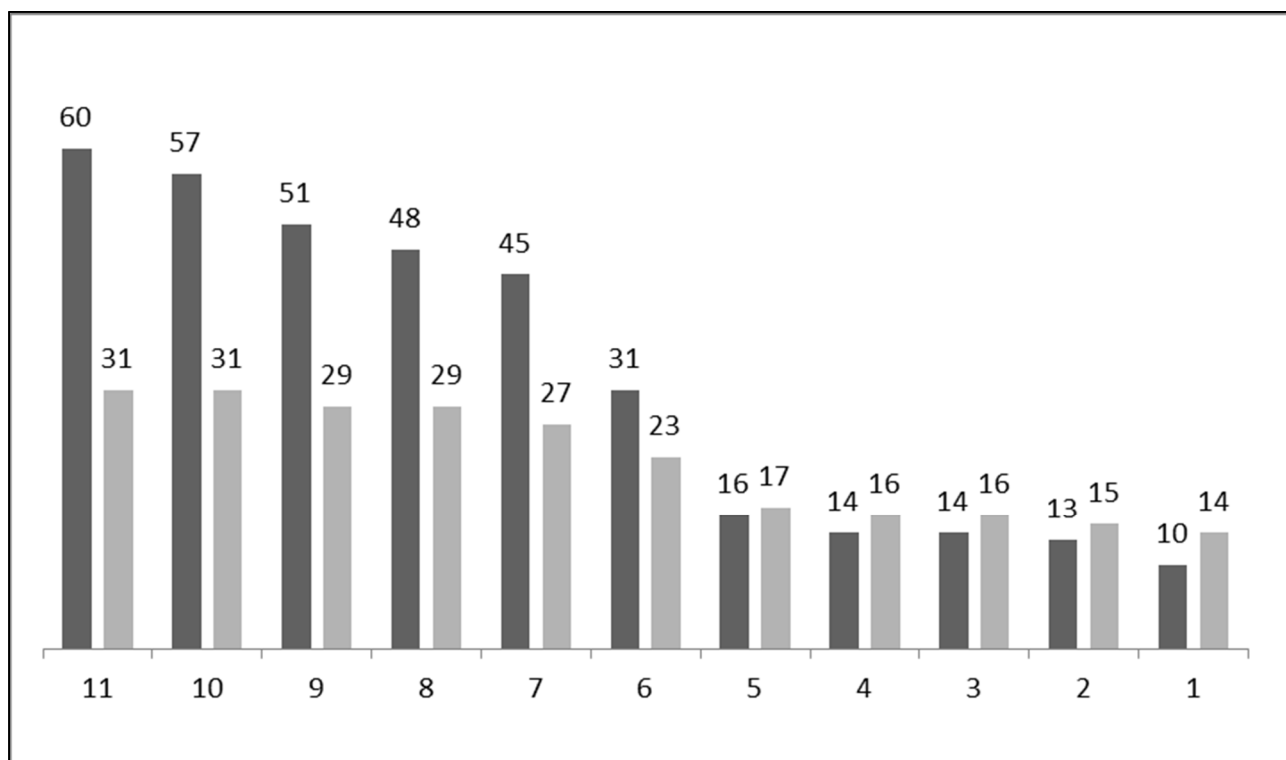


Fig. 1 Determining the tribometric properties of various cutting fluids using Reichert wear test;

■ - mass loss, mg; ■ - wear scar area, mm²

The purpose of this article is to show how to reduce the overall labor intensity in developing new cutting fluids for machining, based on working out accelerated methods and on the rational sequence of different methods use.

2 Experimental procedures

2.1 Method for determining the ability of a cutting fluid to counteract the adhesion between chips and cutting tool by Dugin et al. [13]

The tests for determining the ability of a cutting fluid to counteract the adhesion between chips and cutting tool were conducted during free rectangular cutting on a universal milling machine. The cutter was mounted fixedly on a vertical milling head. The PRAMET TOOLS cutter, type CTCPN 2514 M16 was used with the insert TPUN 160308 of hard alloy N10 (K15 -30), S30 (P 20-35) and S26 (P 15-30) (Fig. 2). A similar scheme of orthogonal cutting has been described by Dugin et al. [14] for determining the tribological properties of the cutting fluid and by Popov et al. [15] for studying the influence of lubricant and coolant fluid on the cutting force in small-increment planning. In order to save testing time austenitic stainless steel was used, which has a very strong adhesion effect on cutting; this was proved by Naveset et al. [16] in evaluating the effect of applying cutting fluid on tool wear during turning operation of AISI 316 austenitic stainless steel. The work piece made of stainless steel 20Cr13 (253 HB) was fastened in the vice. Cutting was carried out with a cutting thickness of 0.1 mm, a width of 6 mm and at cutting speeds of 0.3 m/min - 0.9 m/min. Diffusion wear is not typical at such low cutting speeds since they do not cause high temperatures, which was noted by Armarego [17], Trent and Met [18] and later confirmed by Loladze [19]. Low cutting speeds usually result in adhesive wear, which was demonstrated by Loladze [19]. Wear occurred on the front face of the cutting tool (Fig. 3, a).

The ability of cutting fluids to counteract the adhesion between the chips and the cutting tool was characterized by the wear area at the front surface of the cutting tool after the same number of cutting passes. 100 passes were performed under the same conditions, followed by determination of the wear area of the front surface S. In order to carry out this determination the front surface was photographed; the wear area was delineated as S (Fig. 3, b) and calculated using the special computer program. After the same number of passes, the use of different cutting fluids significantly affected the wear area of the front surface S. Thus, Fig. 4 shows the pictures of the front surface of the cutting tool after using the three different cutting fluids. The fluid after the use of which the wear area of the front surface of the tool is smaller (Fig. 4, a) possesses a greater ability to resist adhesion between the chips and the cutting tool. To determine the average size of the wear area of the front surface S each experiment was repeated 5 times.

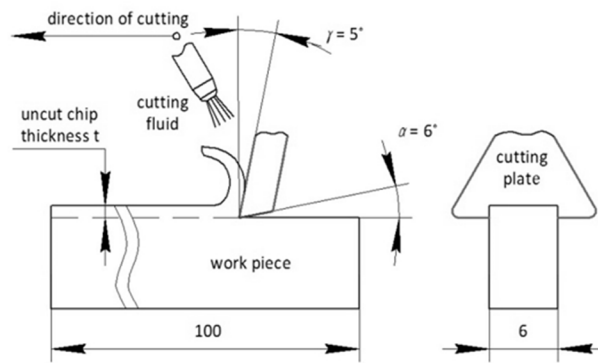
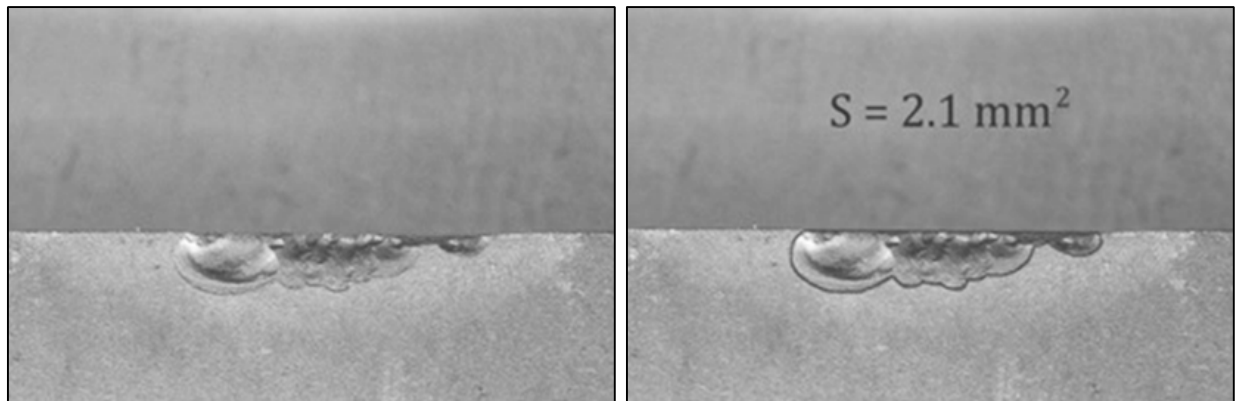


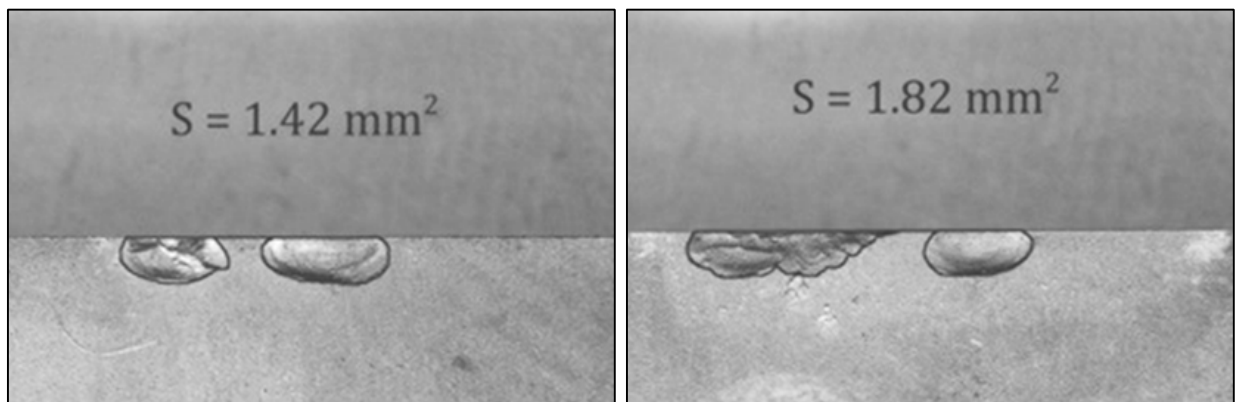
Fig. 2 Chipping scheme



a)

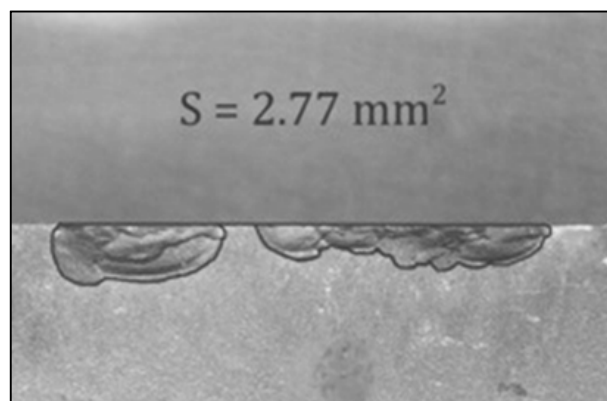
b)

Fig. 3 The wear of the front surface of the tool (a) and delineation of the wear area S of the tool (b)



a)

b)



c)

Fig. 4 The wear area of the front surface S of the cutting tool after using three different cutting fluids, after the same number of cutting passes (100 passes) and at the same cutting width (6 mm)

In order to speed up the tests to determine the ability of cutting fluid to counteract the adhesion between chips and cutting tool examinations were carried out on the effect of the cutting speed, the length of the work piece and the grade of cutting alloy on the wear area of the front surface S of the tool after 100 cutting passes. Only one cutting fluid was used during these experiments.

It was found that by increasing the cutting speed from 0.3 m/min to 0.9 m/min (Fig. 5, a), by increasing the length of the work piece from 10 mm to 60 mm (Fig. 5, b), and by using the cutting alloy intended for turning of structural steels (P) instead of the hard alloy intended for turning of stainless steels (K) (Fig. 5, c), and by reducing the strength of the hard alloy from P20 - P35 to P15 - P30 (Fig. 5, c), the wear area of the front surface S of the tool increases after 100 cutting passages.

Thus, to increase sensitivity and to reduce labor intensity of subsequent experiments to determine the ability of cutting fluids to counteract the adhesion between chips and cutting tool it is recommended to use a cutting speed of 0.9 m/min, a work piece length of 60 mm and the cutting alloy P15 - P30.

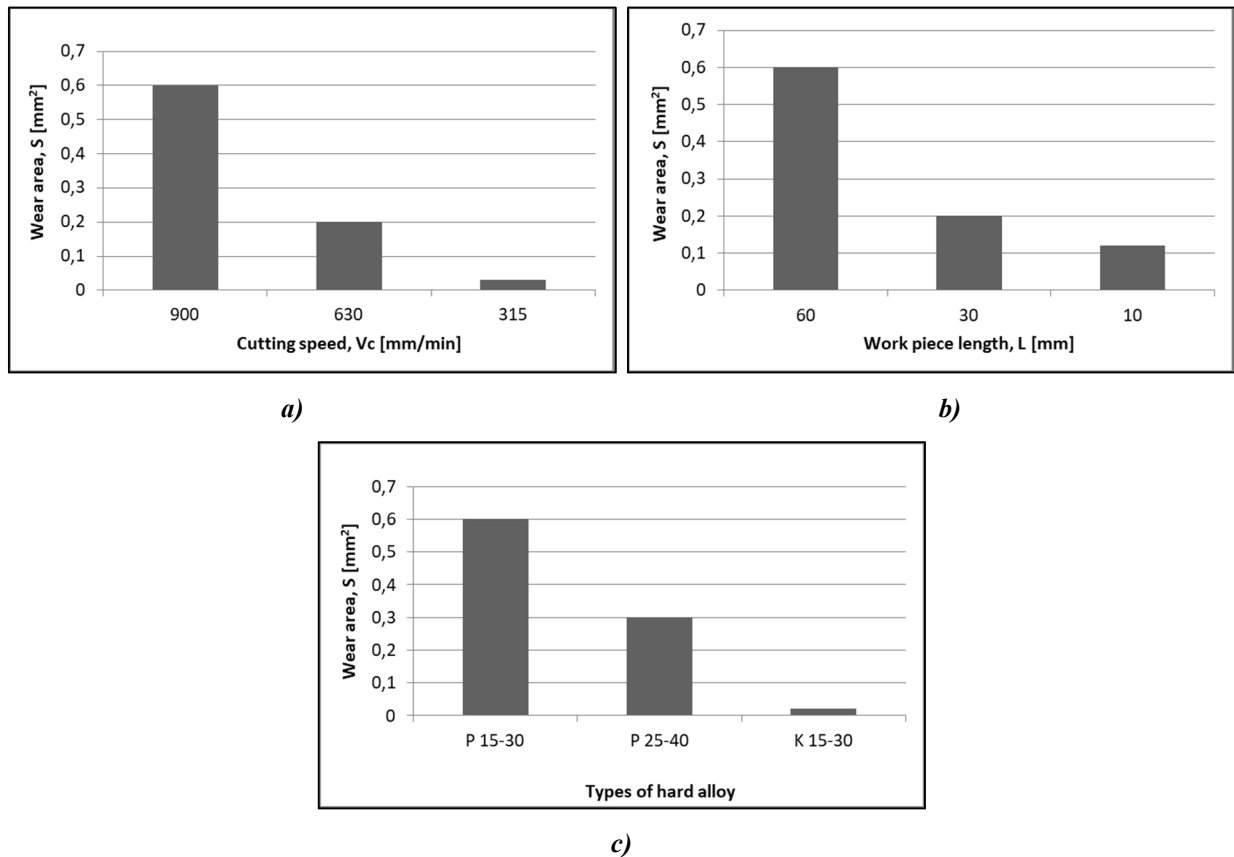


Fig. 5 Effect of cutting speed V_c (a), work piece length L (b) and hard alloy grade (c) on the wear area of the front surface S of the tool after 100 cutting passes

2.2 Cutting test and materials

In order to determine tool life when using different cutting fluids the experiments were carried out by milling on the milling machine FNG 32 with manual control and by turning on the CNC lathe CHEVALIER FCL- 2140. The cutter used for milling was a 63-diameter cutter by the company NAREX. Milling of the structural steel 16MnCr5 (138 HB) was performed with the cutting inserts SNUN 120412 of hard alloy S30 (P20 - P35) by the company Pramet Tools s. r. o., at a cutting speed of $V_c = 85 \text{ m/min}$, feed $f_z = 0.1 \text{ mm/tooth}$ and depth of cut $a_p = 1 \text{ mm}$. Milling of the stainless steel X6CrNiMoTi17- 12-2 (189 HB) was performed with the cutting inserts SNUN 120412 of hard alloy with the coating 8230 (M20 - M40) by the company Pramet Tools s. r. o., at the cutting speed $V_c = 47.5 \text{ m/min}$, feed $f_z = 0.1 \text{ mm/tooth}$ and depth of cut $a_p = 1 \text{ mm}$. The experiments were carried out with one insert fixed to the milling cutter.

The tool used for turning was CTAPR 20x20 K16 KT 834 by the company Pramet Tools s. r. o.. Turning of the structural steel 16MnCr5 (138 HB) was performed using cutting inserts TPUN 160304 of hard alloy S26 (P15 - P30) by the company Pramet Tools s. r. o. at a cutting speed of $V_c = 245 \text{ m/min}$, feed $f = 0.1 \text{ mm/rev}$ and depth of cut $a_p = 0.5 \text{ mm}$. Turning of the stainless steel X5CrNiTi18-10 (259 HB) was performed with cutting inserts TPUN 160304 of hard alloy with the coating 8230 (M20 - M40) by the company Pramet Tools s. r. o. at a cutting speed of $V_c = 160 \text{ m/min}$, feed $f = 0.1 \text{ mm/rev}$ and depth of cut $a_p = 0.5 \text{ mm}$. To determine the average resistance value each experiment was

repeated 5 times for milling and turning.

In all experiments, 11 cutting fluids were used which had the same concentration of 5%. These cutting fluids were made by the following manufacturers: Blaser Swisslube AG, Cimcool Industrial Products B.V., Houghton plc, Paramo a.s. The cutting fluid concentration was controlled by the refractometer Optech Brix RLC / ATC, characterized by concentration measurement at a range of 0-18% and accuracy of 0.1%. The desired value for each fluid was calculated by the refractometer K with the following formula: $K = 5/In$, with 5 being the required concentration of 5%, and In being the refraction index whose value was provided by the cutting fluid manufacturer.

3 Experimental results and analysis

The studies found that cutting fluid No.1 (CF1) possesses the best ability to resist adhesion between chips and cutting tool (Fig. 6). It also exhibits the best tribometric characteristics (Fig. 1). Cutting fluids No. 2, No. 3, No. 4 and No. 5, which showed good results in the Reichert testing (Fig. 1), have substantially poorer ability to counteract the adhesion between chips and cutting tool in comparison with CF1 (Fig. 6). It has been established that the use of CF1 helped reduce the wear area of the front surface by 21 times in comparison with the cutting fluid No. 7 (Fig. 6). This significant difference in the wear areas of the front surface S using different cutting fluids is indicative of the high sensitivity of the new method.

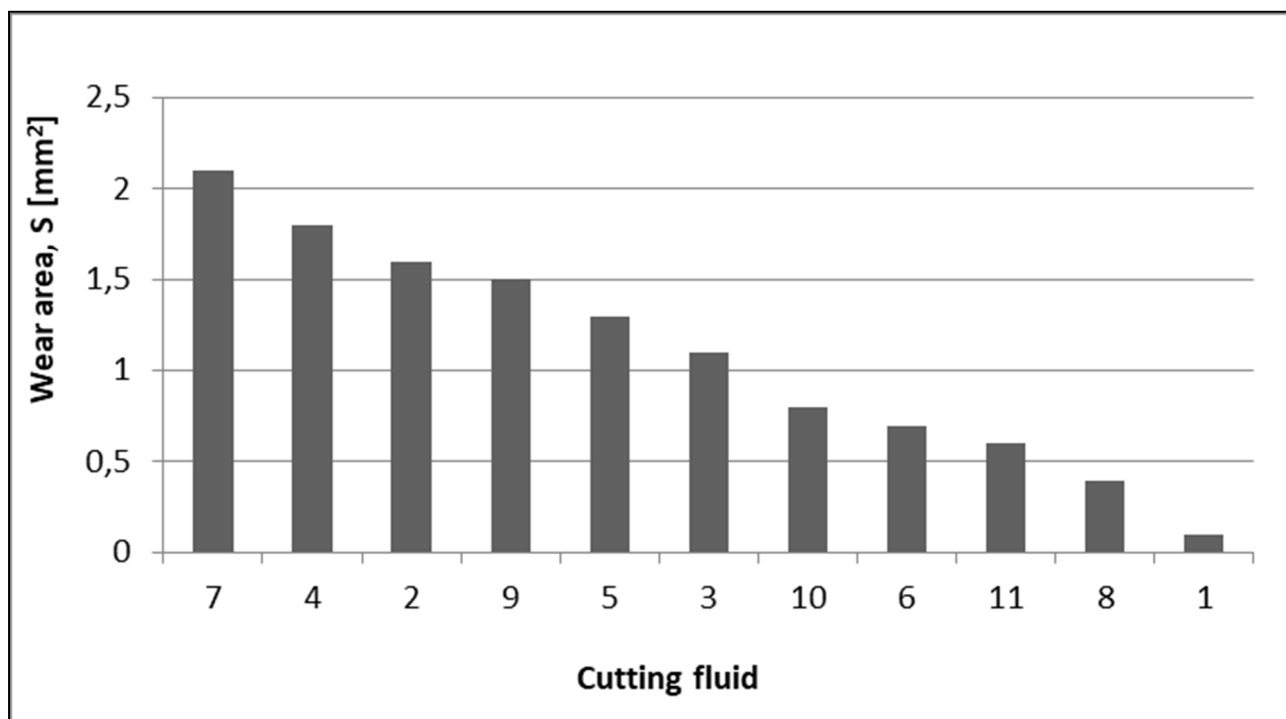


Fig. 6 Wear area of the front surface S of the cutting tool using different cutting fluids

As a result of these studies, it was found that when milling structural steel X16MnCr5 (Fig. 7, a) and stainless steel X6CrNiMoTi17-12-2 (Fig. 7, b), maximum tool life was achieved using CF1 (Fig. 7).

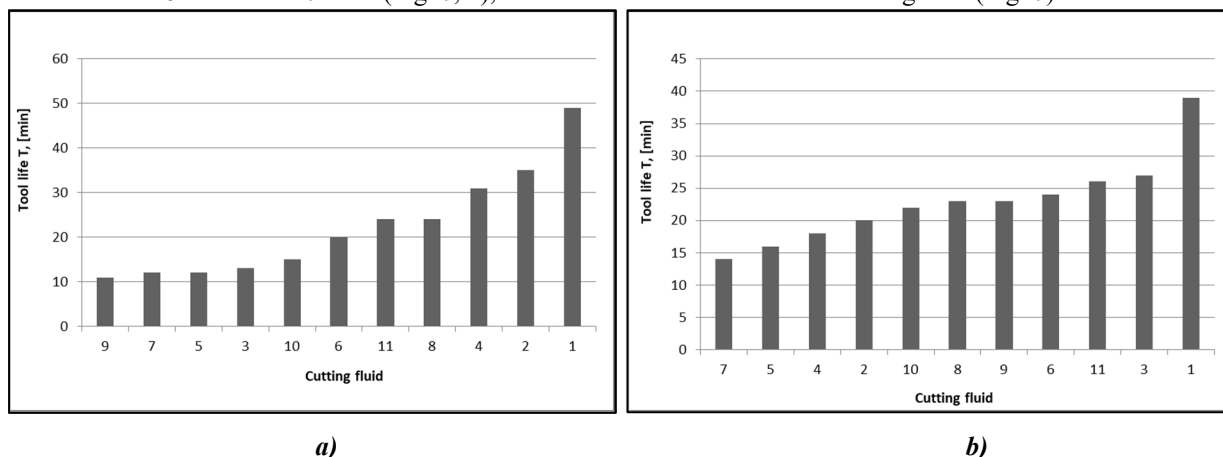


Fig. 7 Effect of cutting fluid on tool life when milling structural steel (a) and stainless steel (b)

While turning structural steel 16MnCr5, maximum tool life was achieved using cutting fluids No. 2 and No.4 (Fig. 8, a). CF1 showed the third result, but the difference between CF4 with the best resistance and CF1 was merely 16% (Fig. 8, a). While turning stainless steel X5CrNiTi18-10, the longest tool life was achieved using CF1 (Fig. 8,b).

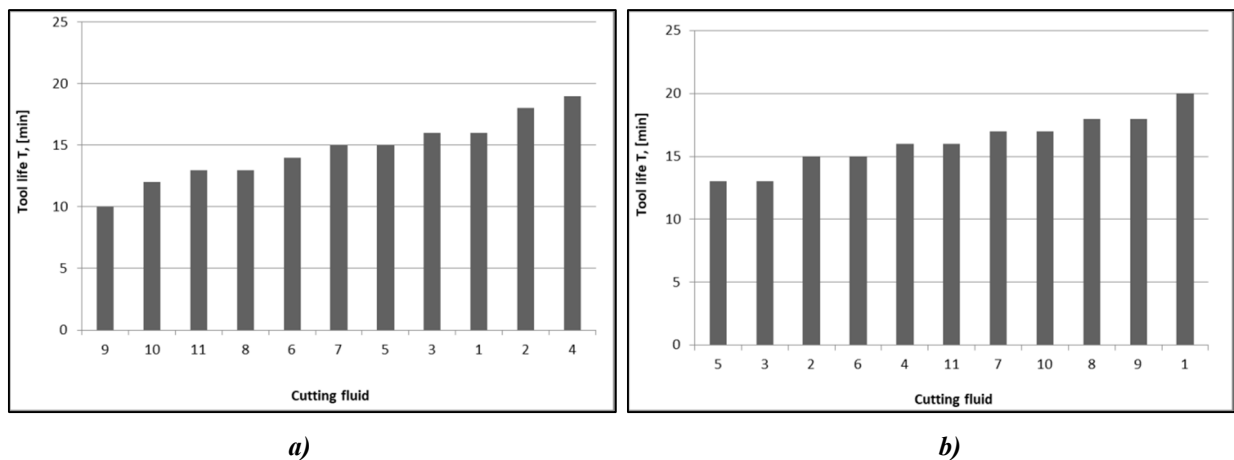


Fig. 8 Effect of cutting fluid on tool life when turning structural steel (a) and stainless steel (b)

The studies found that CF1 should be used as a universal cutting fluid for milling and turning of structural and stainless steel as it possesses the best tribometric characteristics (Fig. 1) as well as the best ability to resist the adhesion between chips and cutting tool (Fig. 6). In order to propose a new test sequence of cutting fluids on the basis of the studies that were carried out it is required to analyze the results of wear tests for CF2, CF3, CF4 and CF5.

In the Reichert testing, cutting fluid No. 2 has shown high tribometric properties which are close to the properties of CF1 (Fig. 1). However, CF2 demonstrates significantly poorer ability to resist adhesion between chips and cutting tool in comparison with CF1 (Fig. 6). Wear tests have revealed that CF2 showed high resistance while turning (Fig. 7, a) and milling (Fig. 8, a) of structural steel, and low resistance while turning (Fig. 7, b) and milling (Fig. 8, b) of stainless steel. Therefore, CF2 cannot be recommended as a universal cutting fluid for milling and turning of both structural and stainless steel. For the same reason, CF3, CF4 and CF5 cannot be used as universal cutting fluids. Of all the tested cutting fluids, it is reasonable to use only one as a universal cutting fluid for milling and turning of structural and stainless steel - CF1, which has the best tribometric properties (Fig. 1) and the greatest ability to resist the adhesion between chips and cutting tool (Fig. 6). Without finding a cutting fluid which will have the best tribometric properties and the best ability to counteract the adhesion between chips and cutting tool, it is impossible to create a new universal cutting fluid.

The following new test sequence is proposed based on experiments aimed at reducing labor intensity of creating new universal cutting fluids. In the beginning it is advisable to determine the tribometric properties of all new cutting fluids and to determine the ability of all new cutting fluids to resist adhesion between chips and cutting tool. It is required to find a cutting fluid which will have the best tribometric properties and the best ability to resist adhesion between chips and cutting tool. If such a fluid will not be found among the new cutting fluids, it is necessary to continue the development of new fluids by improving the cutting fluid composition. The development of new cutting fluids should continue until the fluid will be discovered which has the best tribometric characteristics and the best ability to counteract the adhesion between chips and cutting tool.

When carrying out the final and labor-intensive tests to determine the effect of cutting fluids on the tool life during different machining operations (milling, turning), it is proposed to use only those new cutting fluids which possess the best tribometric abilities and the best ability to counteract the adhesion between chips and cutting tool. During wear tests it is useful to compare the resistance of the new CFs with the resistance of the conventional CFs which are already used in industry. If the new cutting fluids provide greater tool life than the CFs that are already industrially used, it can be assumed that the goal is achieved, and new cutting fluids can be recommended for industrial use instead of the conventional ones. In case the new cutting fluids show less resistance compared with industrially used ones, it is required to continue the development of new CFs which will have the best tribometric properties and better ability to counteract the adhesion between chips and cutting tool until the new CFs guarantee greater tool life compared to the old CFs.

The proposed new CF test sequence, which involves using the methods of determining the ability of a cutting fluid to counteract the adhesion between chips and cutting tool, significantly reduces the amount of wear tests and, as a result, significantly reduces the overall labor intensity of the development of new cutting fluids.

4 Conclusion

The author's aim of this research was not to repeat the classic experiment of cutting fluid performance testing. The new method for determining the ability of a cutting fluid to counteract the adhesion between chips and the cutting tool has been presented as the intermediate method between tribological experiments and classic cutting fluid performance testing experiments.

That is why during the research, the ability of a cutting fluid to counteract adhesion was compared at cutting speeds much lower than usually used in experiments under which adhesive wear is dominant.

A new, highly sensitive and accelerated method has been developed to determine the ability of cutting fluids to counteract the adhesion between chips and cutting tool. When investigating a universal cutting fluid for milling and turning of structural and stainless steel, it has been found that it is appropriate to recommend the cutting fluid which has the greatest tribometric properties and the best ability to resist adhesion between chips and cutting tool.

In order to reduce labor intensity while creating a new universal CF the following sequence of cutting fluid tests is proposed. In the beginning it is advisable to determine the tribometric properties of all the new cutting fluids and to determine the ability of all the new CFs to resist adhesion between chips and cutting tool. After that the cutting fluid should be determined which has the best tribometric characteristics and the best ability to counteract the adhesion between chips and cutting tool. Next, it is necessary to confirm that this cutting fluid will provide greater tool life compared with the CFs which are already used in industry. If the new CF reveals less resistance compared with the cutting fluids which are already industrially used, it is required to continue the search for a new CF that will have the best tribometric properties and better ability to counteract the adhesion between chips and cutting tool and that can ensure greater tool life than the tool life provided by the CFs already used in industry.

The proposed new cutting fluid test sequence significantly reduces the amount of wear tests and, as a result, significantly reduces the overall labor intensity in the development of new universal cutting fluids.

Acknowledgement

This article is related to the investigation on the Specific University Research Projects which are supported by the Ministry of Education (MSMT) of the Czech Republic.

References

- [1] KLOCKE, F., EISENBLATTER, G. (1997). Dry Cutting, In: *Annals of the CIRP*. Vol. 46(2), pp. 519-526.
- [2] JAYAL, A. D., BALAJI, A. K. (2009). Effects of cutting fluid application on tool wear in machining: Interactions with tool-coatings and tool surface features. In: *Wear*. Vol. 267 (9-10), pp. 1723-1730.
- [3] KHAN, M.M.A., MITHU, M.A.H., DHAR, N.R. (2009). Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oil-based cutting fluid. In: *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 209 (15-16), pp. 5573-5583.
- [4] THEPSONTHI, T., HAMDI, M., MITSUI, K. (2009). Investigation into minimal-cutting-fluid application in high-speed milling of hardened steel using carbide mills. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol. 49 (2), pp. 156-162.
- [5] AXINTE, D. A., DE CHIFFRE, L. (2008). Effectiveness and resolution of tests for evaluating the performance of cutting fluids in machining aerospace alloys. In: *Annals of the CIRP*. Vol. 57 (1), pp. 129-132.
- [6] DE CHIFFRE, L., BELLUCO, W. (2000). Comparison of Methods for Cutting Fluid Performance Testing. In: *Annals of the CIRP*. Vol. 49 (1), pp. 57-60.
- [7] VENGUDUSAMY, B., GRAFL, A., NOVOTNY-FARKAS, F., SCHÖFMANN, W. (2013). Comparison of frictional properties of gear oils in boundary and mixed lubricated rolling-sliding and pure sliding contacts. In: *Tribology International*. Vol. 62, pp. 100-109.
- [8] ADHVARYU, A., ERHAN, S. Z., PEREZ J.M. (2004). Tribological studies of thermally and chemically modified vegetable oils for use as environmentally friendly lubricants. In: *Wear*. Vol. 257 (3-4), pp. 359-367.
- [9] DENG, J., SONG, W., ZHANG, H., YAN, P., LIU, A. (2011). Friction and wear behaviors of the carbide tools embedded with solid lubricants in sliding wear tests and in dry cutting processes. In: *Wear*. Vol. 270 (9-10), pp. 666 - 674.
- [10] PIEKOSZEWSKI, W., SZCZEREK, M., TUSZYNSKI, W. (2001). The action of lubricants under extreme pressure conditions in a modified four-ball tester. In: *Wear*. Vol. 249 (3-4), pp. 188-193.
- [11] SATO, T., BESSHI, T., SATO, D., TSUTSUI, I. (2001). Effect of water based lubricants on wear of coated material. In: *Wear*. Vol. 249 (1-2), pp. 50-50.
- [12] PERSSON, K., GÅHLIN, R. (2003). Tribological performance of a DLC coating in combination with water-based lubricants. In: *Tribology International*. Vol. 36 (11), pp. 851-855.

- [13] DUGIN, A., JERSAK, J., POPOV, A. (2014). Method for determining of the anti-adhesion ability of cutting fluids. In: *Manufacturing Technology*. Vol. 14 (2), pp. 145-149.
- [14] DUGIN, A., VOTOCEK, J., POPOV, A. (2014) Method for determining the tribological properties of the cutting fluid. In: *Manufacturing Technology*. Vol. 14 (2), pp. 149-153.
- [15] POPOV, A., DUGIN, A. (2013). Influence of lubricant and coolant fluid on the cutting force in small-increment planning. In: *Russian Engineering Research*. Vol. 33 (2), pp. 84-85.
- [16] NAVES, V.T.G., DA SILVA, M.B., DA SILVA, F.J. (2013). Evaluation of the effect of application of cutting fluid at high pressure on tool wear during turning operation of AISI 316 austenitic stainless steel. In: *Wear*. Vol. 302 (1-2), pp. 1201–1208.
- [17] ARMAREGO, E. J., BROWN, R., H. (1969). *The Machining of Metals*. Prentice-Hall, pp. 437.
- [18] TRENT, E.M., MET, D. (1977). *Metal Cutting*, Butterworths.
- [19] LOLADZE, T.N. (1981). Of the Theory of Diffusion. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. Vol. 30 (1), pp. 71-76.

APLIKACE POKROČILÝCH INŽENÝRSKÝCH METOD VE VÝROBĚ RÁMOVÝCH KONSTRUKCÍ NAVÍJENÝCH Z PRE-IMPREGNOVANÝCH UHLÍKOVÝCH VLÁKEN

Kulhavý Petr

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,
Fakulta strojní, 5. ročník
Doktorský studijní program – KONSTRUKCE STROJU

Abstrakt: Ačkoliv základní principy návrhu a výroby kompozitu jsou známy poměrně dlouho, výrazně se zefektivňují či automatizují výrobní postupy a efektivní návrh kompozitu je dnes již téměř nemyslitelný bez použití výpočetní techniky a optimalizačních algoritmů (FEM, parametrické optimalizace, kooperace robotů při výrobě). Jedním ze stěžejních bodů práce je oproti klasickým, tzv. mokrým vláknům, výroba dílů s využitím vláken předimpregnovaných (tzv. prepregů), kdy odpadá následná nutnost saturace pryskyřicí v nákladné formě a tvrzení dílu v autoklávu. Tato metoda vychází a je upravenou nadstavbou konceptu tzv. „centreless wheel“ navíjení postavené na bázi původního patentu TUL [1] užívaného pro ovíjení vláken kolem nenosných jader variabilních průřezů. V práci jsou popsány základní principy dané výroby a současně představeny možnosti cílené optimalizace vlastností na specifické okrajové podmínky. Za tímto účelem jsou metodou konečných prvků na mechanickém principu vrstveného shellu využity tzv. Genetické algoritmy a vše je experimentálně i numericky demonstrováno na příkladu ohybového testu.

Klíčová slova: kompozity, uhlíkový prepreg, navíjení, optimalizace, mechanické vlastnosti

1 Úvod

Vývoj v oblasti pokročilých materiálů a výrobních metod původně predikovaných především pro letectví a kosmonautiku [2] zažívá v současné době významný rozmach napříč všemi konstrukčními obory. Oproti základním principům dominuje v dnešní době míra využití CAE metod, požadavky na kvalitu, vývoj nových technologií či stupeň využití robotizace a automatizace. Při pohledu do historie je možné nalézt téměř v každém knižním díle např. Altsuler [3] první zmínky o kompozitních materiálech obvykle jako luky či chýše ze slámy, hlíny a klacíků či první hliněné cihle atd. Prvním, kdo ovšem ve své práci začal nad pojmem kompozit skutečně uvažovat (jednalo se ovšem spíše o složené těleso, bez synergického efektu, ale velmi významný směr nových úvah) byl – jak ve svých komentářích vtípnou formou poukázal Hawking [4], Sir Izak Newton ve svých dílech např. [5]. Ten, jak je dobře známo na základě výsledků z Galileových pokusů formuloval zákony sil a jejich interakce s tělesy. Zde ve svých úvahách došel až k tomu, co nazval jako “attraction of composite bodies” (my bychom to dnes patrně označili jinak, ovšem v 17. století byla tato idea jedním z významných milníků). Dle Fauknera [6] je na celé této ideje nejzajímavější její následná Newtonova aplikace do klasických rovnic vedoucí k prokázání zákona, že akcelerace tělesa při pádu nezáleží na jeho hmotě, což je od počáteční idey vzájemné interakce složených tělesech zajímavý závěr.

Pokročilé kompozitní materiály se oblasti automobilů vyskytovaly již dlouhá léta především však u prototypů a závodních speciálů. V současné době je možné se s uhlíkovými vlákny potkat již zcela běžně napříč spoustou odvětví od částí dílů karoserií vozidel až po cyklistiku či sportovní pomůcky. Současně také od původních laminátových skořepin jsou více využívány uzavřené tvarově stabilnější rámové prvky.

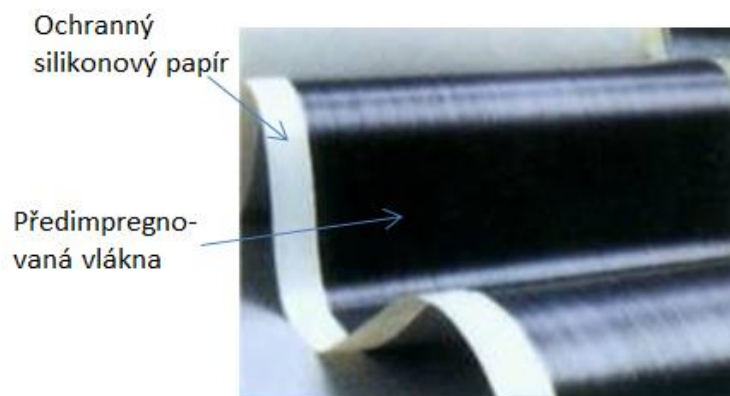
2 Použité metody a materiál

V dnešní době vývoj kompozitních materiálů, optimalizace jejich vlastností a výrobních procesů prostupuje téměř všechny průmyslové obory. Oproti konvenčním kovovým materiálům získáváme vzhledem k měrné hmotnosti několikanásobně vyšší měrnou pevnost. Vysocepevná uhlíková vlákna mají přibližně 2-3x vyšší modul pružnosti než nejlepší oceli a více než 5x oproti slitinám na bázi Ti používaných v aeronautice. Tyto vlastnosti vycházejí z rovinných vazeb, uspořádání hexagonálních sítí a uspořádání vrstev paralelně s osou.

Mezi nesporné výhody patří především schopnost vyztužených materiálů přizpůsobit vlastnosti konkrétním potřebám či aplikacím – výrazná anizotropie, přesněji ortotropie daných materiálů, například s ohledem na reálný směr zatížení. Jako kompozit, označujeme materiál složený z několika členů za předpokladu, že každý z nich stále zachovává svou vlastní autonomii. To znamená, že nikdy nejsou vzájemně sloučeny, i když na své okolí působí jako jeden nezávislý materiál [7]. Kompozit se skládá z části pojivové nazývané matrice (přírodní nebo syntetická), jenž zajišťuje tvar a rozměry kompozitu a ostatní části v matici zpravidla rozptýlené či rovnoměrně rozložené tzv. disperze. Vzájemnou kombinací, vhodným poměrem i tvarovým uspořádáním těchto materiálů je možné docílit výrazně synergického efektu, kdy výsledné vlastnosti jsou výrazně vyšší, než by odpovídalo prostému poměrnému sečtení. Obecně nejlepší uplatnění nachází kompozity z dlouhých vláken. Pro zaručení vysoké spolehlivosti výsledných dílů, musí být chování materiálu přesně předpovězeno, optimalizováno i monitorováno. A právě zde nastává menší rozpor mezi výrobní a vědeckou sférou, neboť jak poukazují např. Leisetur či Wang [8, 9] vlastnosti získané na vzorcích v laboratoři vykazují významné statistické odchylky od finálních dílů v sériové výrobě.

2.1 Před-impregnovaná uhlíková vlákna

Významným bodem na poli kompozitů, je snaha o zjednodušení a zefektivnění jejich výroby. Z toho důvodu se již delší dobu používají předem nasycené látky všeobecně známé pod názvem prepregy (Obr. 1). Předimpregnovaná vlákna mají nezastupitelnou pozici mezi dlouhovlákenými kompozity. Jedná se o textilie s jednosměrně orientovanými vlákny [10] určené jako výchozí materiál k výrobě laminátů. Jejich hlavní složkou je uhlíková výztuž předimpregnovaná částečně vytvrzenými pryskyřicemi. Hlavní výhodou prepregů je vysoký podíl vláknové výztuže (30 % vláken), stejnoměrnost a hladkost hotových dílů, které souvisí s předem definovatelným a přesným uložením výztuže. Všechny prepregové materiály musí být vytvrzovány postupem doporučeným od výrobce [11] jako definovaný tlak, teplota 72-115 °C, výdrž na teplotě 1-12 hodin a následně pozvolna ochlazovat až na 48°C.



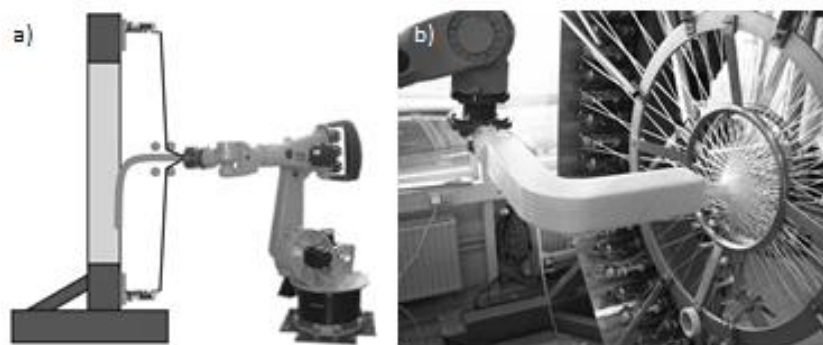
Obrázek 1: Prepregová folie jednosměrná

Hlavní výhodou využití prepregů namísto klasických filamentů je zjednodušení technologií jako syčení pryskyřicí a není nutné vytvrzování ve formě. Jako nevýhodou, je především výrazně vyšší cena základní suroviny a požadavek na vysoké ideálně konstantní předepnutí vláken během výroby kompozitu dané mimo jiné výraznou až extrémní lepivostí daného materiálu výrazně stoupajícího s teplotou. Vzhledem k tomu, je oproti běžným mokřým metodám nutné vyztuzit výrobní zařízení do axiálního směru.

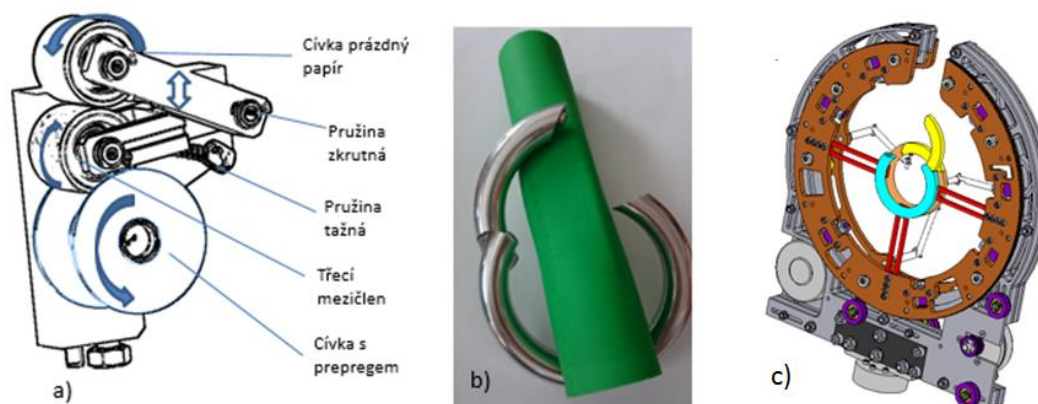
2.2 Princip výpočtu kompozitu

Důležitou částí výroby rámu je konstrukční návrh ovíjecího mechanismu optimalizovaného pro předimpregnovaná vlákna. Pro výrobu kompozitního rámu je nutné využít informace získané v předchozích kapitolách o používaných procesech, materiálech a možnostech ovlivnění jejich chování. Jako výchozí a nejvhodnější konstrukční řešení je v tomto případě využití tzv. centerless technologie (Obr. 2).

Navíjení je proces výroby kompozitů, jenž zachovává kontinuální vlákna vzájemně zarovnaná po celé délce vyráběné součásti. Touto metodou vyrobené kompozity jsou nazývány jako pokročilé [10, 12]. Koncept navíjecí hlavy (Obr. 3c) je modifikovaný prototyp původní patentované technologie, používané k navíjení vláken za účelem výroby rámu uzavřených tvarů. Použitým materiálem mohou být jak klasické suché filamenty, tak impregnovaná vlákna v tenkých páskách. V této práci, je páska šíře 5mm tažena z cívek umístěných na otočných kolech skrze tvarové kroužky na nenosné jádro variabilního průřezu.



Obrázek 2 : 3D navíjení nepřímých tvarů a) Schematický princip b) Reálný návin

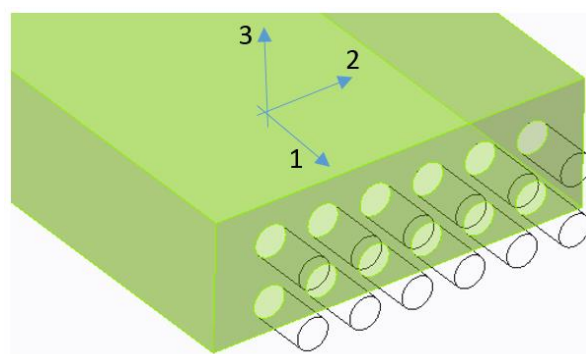


Obrázek 3: a) Konstrukční řešení držáku cívek s třecím mezičlánkem b) Otevíracího kroužek pro vložení uzavřených rámu c) Základní rám s oběžným kolem (oranžové)

Trajektorie, pohyb a naklápění hlavy jsou pomocí matematického algoritmu optimalizovány a řízeny na základě tvaru řídicí křivky geometrie vyráběného rámu [13]. Změnu navíjecího úhlu a s tím souvisejících parametrů kompozitu je možné přímo ovlivnit změnou poměru rychlosti posuvu hlavy a rotace oběžných kol. Problémem oproti navíjení samotných vláken je tzv. separační papír, který během skladování a výrobního procesu separuje jednotlivé vrstvy materiálu před vzájemným slepením. Z toho důvodu bylo nutné nalézt mechanismus navíjení cívek (Obr. 3a), který bude reagovat na neustále se měnící převodový poměr, ke kterému dochází vlivem postupného úbytku materiálu v zásobníku. Současně také z důvodu možnosti navíjení rámu uzavřených profilů, byl navržen otevírací kroužek (Obr. 3b).

2.3 Princip výpočtu kompozitu

Nejdůležitější úlohou, při výrobě a návrhu kompozitů je dle Lavalu [14] správné předpovězení rozložení napětí. Pokud dokážeme určit napětí působící ve vrstvách, je následně s využitím kritérií porušení možné stanovit i výslednou pevnost jednotlivých vrstev. Jako základní mechanická zkouška u konstrukčních materiálů je především z hlediska jednoznačnosti získaných dat jejich interpretace a možnosti porovnání využívána tahová či ohybová zkouška. Mezi její nevýhody [15] by se dal zmínit fakt, že se jedná o zkoušky destruktivní a při porovnání testování kompozitů s např. ocelmi také zkoušku složitou a značně nákladnější. Z toho důvodu, jsou proto celkem často využívány nedestruktivní zkoušky, jako například dynamicko mechanické analyzátoři, pracující jen v minimálním rozsahu deformace. Jak plyne z charakteristik kompozitu, jsou vlákna schopna přenášet především osově zatížení.



Obr. 4 Jednosměrně vyztužený kompozit a konvence značení jednotlivých os

Popis mechanického chování zatíženého kompozitního dílu, následně vychází z obecného tvaru Hookova zákona s rozlišením jednotlivých parametrů zatížení a deformací v dílčích směrech. Směrová konvence jednotlivých indexů je zobrazena na Obr. 4. Matice tuhosti je vyjádřena tenzorem o 81 prvcích, kdy ovšem pomocí symetrie a termomechanických úvah o zaměnitelnosti členů, pro případ používaných ortotropních vrstev dostaneme 9 proměnných. Ve zjednodušeném přepisu (1) tedy dostaneme matice tahové tuhosti, matice vazebné tuhosti a maticí ohybové tuhosti:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \left[\sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & \bar{C}_{16} \\ \bar{C}_{12} & \bar{C}_{22} & \bar{C}_{26} \\ \bar{C}_{16} & \bar{C}_{26} & \bar{C}_{66} \end{bmatrix} \int_{h_{k-1}}^{h_k} d_z \right] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \left[\sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & \bar{C}_{16} \\ \bar{C}_{12} & \bar{C}_{22} & \bar{C}_{26} \\ \bar{C}_{16} & \bar{C}_{26} & \bar{C}_{66} \end{bmatrix} \int_{h_{k-1}}^{h_k} z d_z \right] \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix}$$

(1)

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \left[\sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & \bar{C}_{16} \\ \bar{C}_{12} & \bar{C}_{22} & \bar{C}_{26} \\ \bar{C}_{16} & \bar{C}_{26} & \bar{C}_{66} \end{bmatrix} \int_{h_{k-1}}^{h_k} z d_z \right] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} + \left[\sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & \bar{C}_{16} \\ \bar{C}_{12} & \bar{C}_{22} & \bar{C}_{26} \\ \bar{C}_{16} & \bar{C}_{26} & \bar{C}_{66} \end{bmatrix} \int_{h_{k-1}}^{h_k} z^2 d_z \right] \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix}$$

Kde N_i vyjadřuje sílu [N], M_i moment [Nm], ε_i^0 vyjadřuje deformace střední roviny a k_i křivost střední roviny.

Přepis dílčí matice tuhosti do tvaru inženýrských konstant pro daný materiál je následně (2):

$$\bar{C}_i = \begin{bmatrix} E_1 & -\frac{E_1}{\mu_{12}} & -\frac{E_1}{\mu_{13}} & & & \\ -\frac{E_2}{\mu_{21}} & E_2 & -\frac{E_2}{\mu_{23}} & & & \\ -\frac{E_3}{\mu_{31}} & -\frac{E_3}{\mu_{32}} & E_3 & & & \\ & & & G_{23} & & \\ & & & & G_{31} & \\ & & & & & G_{12} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Jelikož podstatou laminátu je využít vlastnosti jednotlivých vrstev, jedná se často o kombinaci různých úhlů – v případě navíjení tzv. navíjecích úhlů. Je tedy nutné určit matici tuhosti každé vrstvy, transformovat (3) a následně jak je uvedeno v (1) dílčí matice sečíst.

$$\begin{aligned} \bar{C}_{11} &= \cos^4 \theta C_{11} + 2 \cos^2 \theta \sin^2 \theta (C_{12} + 2C_{66}) + \sin^4 \theta C_{22} \\ \bar{C}_{12} &= \cos^2 \theta \sin^2 \theta (C_{11} + C_{22} - 4C_{66}) + (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) C_{12} \\ \bar{C}_{13} &= \cos^2 \theta C_{13} + \sin^2 \theta C_{23} \\ \bar{C}_{16} &= \cos \theta \sin \theta [\cos^2 \theta (C_{11} - C_{12} - 2C_{66}) + \sin^2 \theta (C_{12} - C_{22} + 2C_{66})] \\ \bar{C}_{22} &= \sin^4 \theta C_{11} + 2 \cos^2 \theta \sin^2 \theta (C_{12} + 2C_{66}) + \cos^4 \theta C_{22} \\ \bar{C}_{23} &= \sin^2 \theta C_{13} + \cos^2 \theta C_{23} \\ \bar{C}_{26} &= \cos \theta \sin \theta [\sin^2 \theta (C_{11} - C_{12} - 2C_{66}) + \cos^2 \theta (C_{12} - C_{22} + 2C_{66})] \\ \bar{C}_{33} &= C_{33} \\ \bar{C}_{36} &= \sin \theta \cos \theta (C_{13} - C_{23}) \\ \bar{C}_{44} &= \cos^2 \theta C_{44} + \sin^2 \theta C_{55} \\ \bar{C}_{45} &= \sin \theta \cos \theta (C_{55} - C_{44}) \\ \bar{C}_{55} &= \sin^2 \theta C_{44} + \cos^2 \theta C_{55} \\ \bar{C}_{66} &= \cos^2 \theta \sin^2 \theta (C_{11} - 2C_{12} + C_{22}) + (\sin^2 \theta - \cos^2 \theta)^2 C_{66} \end{aligned} \quad (3)$$

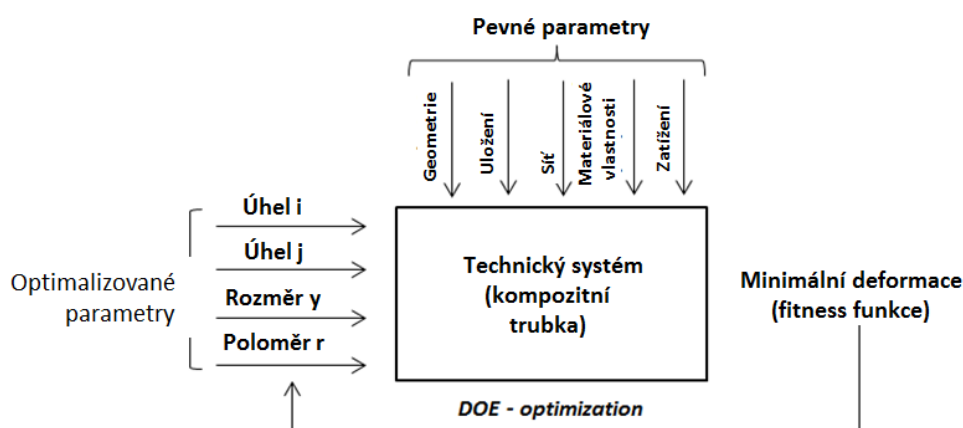
3 Úloha optimalizace kompozitního rámu

Cílem pro demonstraci návrhu optimalizovaného kompozitního dílu v této práci, je na principu klasického tří bodového ohybu (tzn. pro známé okrajové podmínky) ověřit možnost

lokálního zesílení navinutého dílu. Jednalo se o rovnou tyč kruhového průřezu, ovinutou 4 vrstvami s navíjecím úhlem 55/-55/55/-55.

Jelikož u kompozitních materiálů může vzhledem k počtu vrstev a možných úhlů existovat teoreticky bezpočet možných kombinací, experimentální testování je prakticky nemožné. Úloha se stává stále obtížnější počtem optimalizovaných parametrů jako u kompozitu například referenčními úhly jednotlivých vrstev, či jejich pořadím a tento úkol se stává analyticky téměř neřešitelný. Z tohoto důvodu je pro budoucnost důležité právě použití algoritmů pro negradientní vyhledávání optim kritériálních funkcí.

Design of Experiment (DOE) metoda řešená v SW Ansys, je technika, která v daném případě na základě pokročilých numerických algoritmů vede k určení optimálního řešení v dané úloze s pomocí odezvových ploch a vícekritériálních optimalizací. Cílem je co nejefektivnější cestou s co nejmenším počtem bodů nalézt vzorkovací body (sampling points) v celkovém prostoru možných řešení. Daný algoritmus vychází z principu genetického-evolučního algoritmu, kdy se jedná o negradientní metodu řešení zmíněné kritériální úlohy. Na rozdíl od gradientní funkce, jenž může lehce sklouznout do lokálního extrému, dané metody pracují se stále se křížící a mutující generací sampling points a pro jednotlivé iterace jsou vybíráni ti nejlepší kandidáti.



Obr. 5 Schéma možné optimalizační úlohy – optimální úhel vrstev a geometrie dílu

První krokem výpočtu je hledání korelačních závislostí mezi jednotlivými vstupními parametry a výstupním parametrem – fitness funkcí. Celkem byl vytvořen funkční vzorek o velikosti 100 sampling points ustanovujících de facto první generaci dle (4) a (5).

$$\text{Vzorek} = \{(type^1; Lo^1; Hi^1); (type^2; Lo^2; Hi^2) \dots (type^D; Lo^D; Hi^D)\} \quad (4)$$

$$Dp_{i,j} = Lo^j + rand(0,1)(Hi^j - Lo^j) \quad (5)$$

Kdy type znamená číselný formát (reálný, celočíselný, diskretní množina), Lo a Hi je nejnižší a nejvyšší možná hodnota (v našem případě úhel navíjení v dané vrstvě) index j značí pořadové číslo aktuálního design pointu v dané generaci.

Takto vygenerovaná generace jednotlivých bodů řešení, je podle daného přístupu dále mutována (6), (faktor mutace F).

$$v_{i,j} = Dp_{i1} + F_1(Dp_{i2} - Dp_{i3}) \quad (6)$$

A takto zmutovaná generace bodů je následně křížena (7), (koeficient CR).

$$u_{i,j} = \begin{cases} v_{i,j} & \text{if } rand_{i,j} = CR \\ Dp_{i,j} & \end{cases} \quad (7)$$

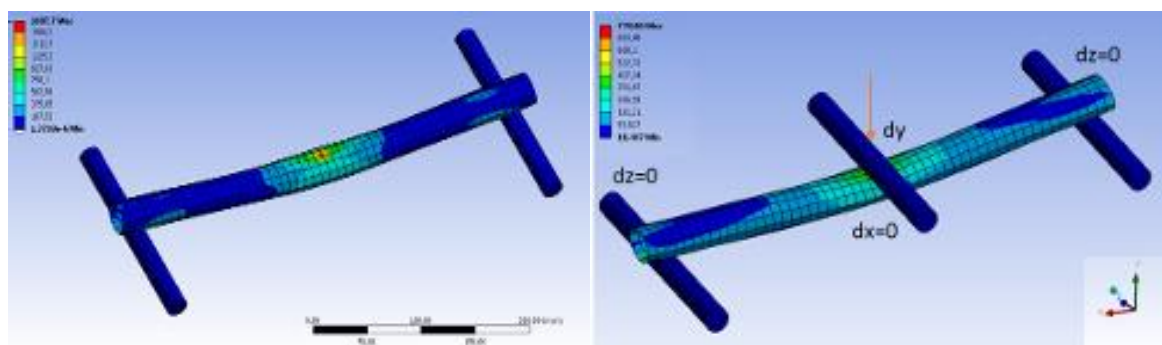
A posledním krokem výběru, je z takto vygenerované generace bodů x_{ij} , mutovaných do f_{ce} v_{ij} a zkřížených do u_{ij} výběr nejvhodnějších kandidátů na základě hodnoty dané fitness funkce kdy je posouzeno, zda je vhodnější původní vygenerovaný bod (5) či zmutovaný (6) a křížený jedinec (7) dle (8).

$$Dp_i^{k+1} = \begin{cases} Dp_i^k & \text{if } f(u_i^k) < f(Dp_i^k) \\ Dp_i^k & \end{cases} \quad (8)$$

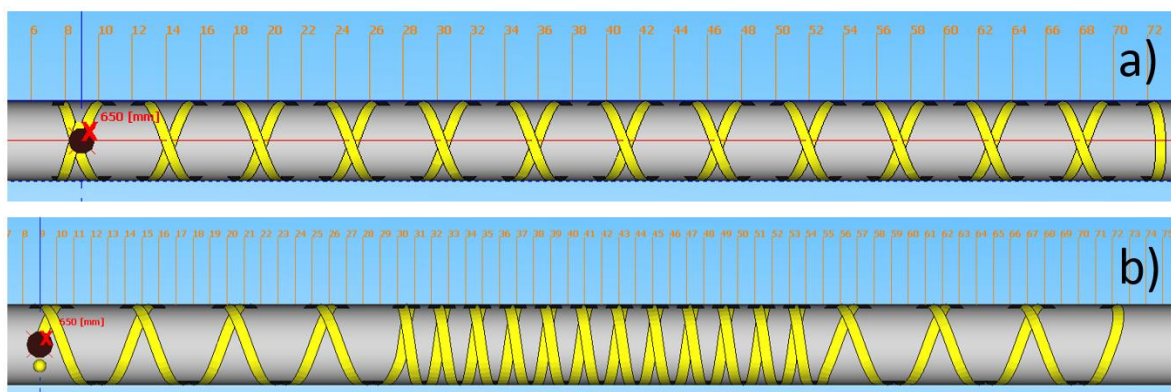
Mezní hodnoty úhlů musí být zvoleny podle výrobní technologie, která v daném případě neumožňuje použití úhlů blízkých 0° nebo 90° .

Po stanovení vlivu jednotlivých vstupních parametrů na hodnotu výstupní kritériální funkce lze nalézt optimální kombinaci parametrů. Možným způsobem pro stanovení např. maximální pevnosti dané struktury, je při konstantních okrajových podmínkách nalezení minimální hodnoty deformace. Nejlepší kandidáti byli vybráni z vygenerovaných 1000 bodů, které se přihodily k funkcím fitness v našem případě představované minimální celkovou deformací.

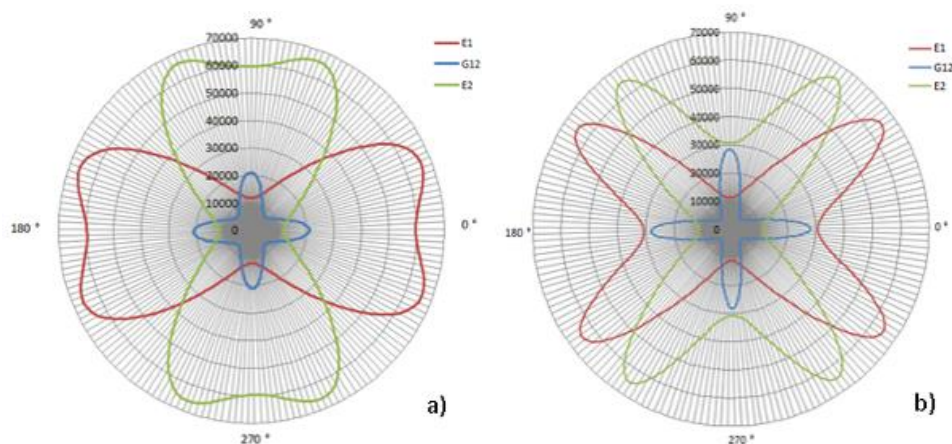
Na Obr. 6 níže je možné vidět výsledné napětí v původní a optimalizované navinuté tyči. Jak je možné vidět, lokálně zesílená tyč přenáší napětí v celé délce a tím je materiál mnohem lépe využit, také zvládne přenést mnohem větší síly či napětí.



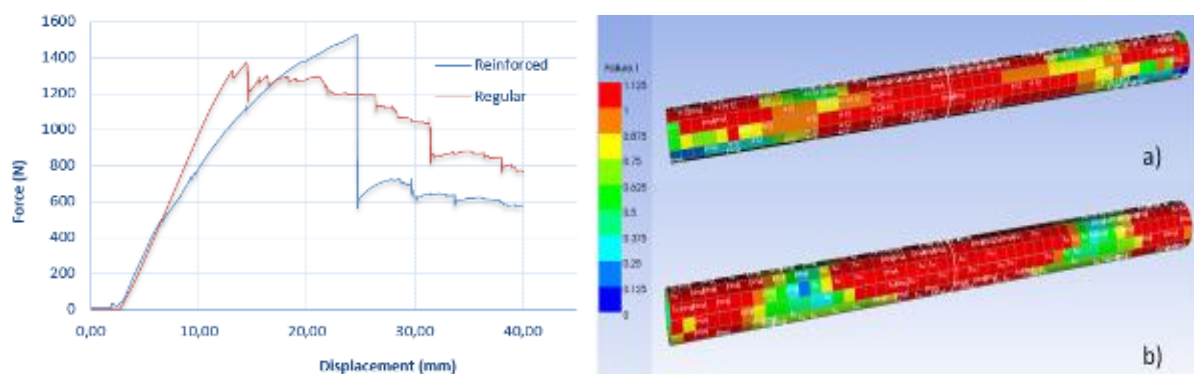
Obrázek 6: Simulace tříbodého ohybu, Výsledné napětí v a) Původní b) Optimalizované tyči



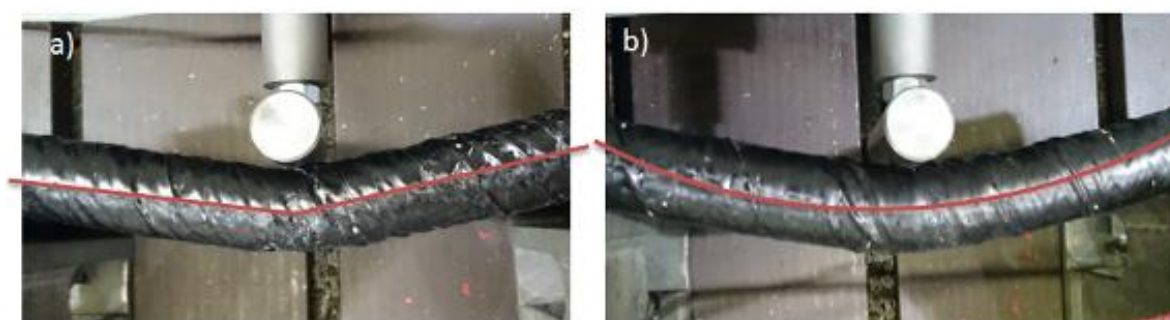
Obrázek 7: CAD model návinnu vláken z 1 cívky pro: a) původní konstantní b) optimalizovanou lokálně zahuštěnou tyč



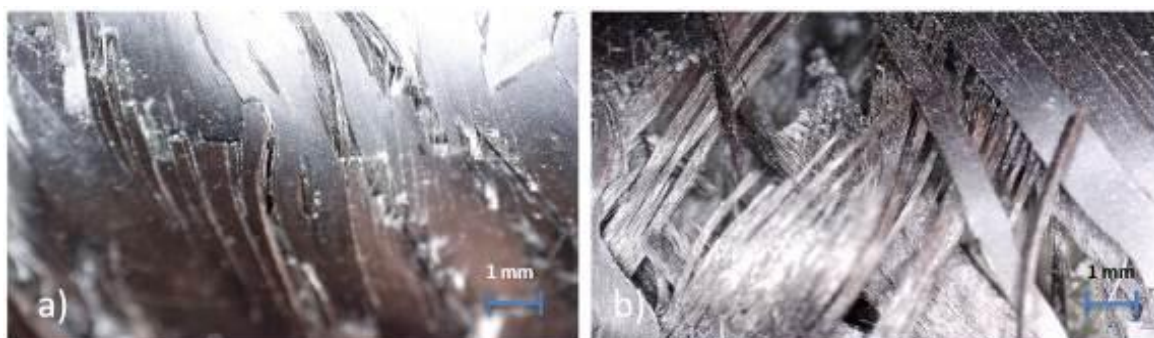
Obrázek 8: Inženýrské konstanty pro: a) původní rovnoměrný b) optimalizovaný návin



Obrázek 9: a) Graf experimentálních výsledků ohybové zkoušky pro pravidelnou a vyztuženou tyč b) Modelově stanovená kritéria porušení dle Tsai-Hill a Puck pro pravidelnou a optimalizovanou tyč



Obrázek 10: Tvar deformace vzorku během ohybové zkoušky: a) pravidelná b) lokálně vyztužená tyč



Obrázek 11: Mikro fotografie místa zlomu ve středu tyče: a) pravidelný b) nepravidelný úhel navíjení

4 Závěr

V práci byla představena inovovaná metoda použitelná pro navíjení předimpregnovaných uhlíkových vláken. Využitím tzv. prepregu, je možné při tvorbě prototypů výrazně ušetřit náklady a zrychlit proces výroby, díky odpadnutí nutnosti saturace ve formě a konsolidace v autoklávu. Proces ovšem nemá pouze benefity, daný materiál je dražší, náročný na skladování a samotná manipulace, včetně výrobního procesu navíjení je výrazně ovlivněna velkou lepkavostí daného materiálu. Z toho důvodu byla nutná výrazná úprava celé konstrukce navíjecího zařízení včetně držáků cívek, ukládačích odpadní separační fólie.

S využitím dané výrobní technologie, byla v práci představena pokročilá metoda lokální optimalizace navíjecího úhlu jednotlivých vrstev s využitím multikriteriální funkce. Tento příklad byl demonstrován na jednoduché úloze 3 bodového ohybu, kdy původní vinutá tyč 55/-55/55/-55 byla optimalizována pro nalezení co nejvyšší tuhosti. Pro ověření výsledků byla provedena simulace metodou konečných prvků za pomoci teorie vrstveného Shellu. Rozdílné chování obou konceptů je možné pozorovat na výsledcích modelu i pomocí kritérií porušení. Celý experiment byl také ověřen experimentálně, kdy rozdílný průběh deformace je možné pozorovat i na pouhém obrázku. Taktéž výsledná porušení obou tyčí jsou rozdílná, zatímco v jednom případě jsou výrazné nežádoucí delaminace, v optimalizovaném konceptu se jedná především o porušení vláken.

Disertační práce přináší unikátní výsledky z oblasti využití prepregů pro „multifilament“ navíjení uzavřených rámců, proměnlivých průřezů. Standardně se dají najít pouze technologie pro díly přímé, případně lineárně spojitě jako kužely. Dále byla sestavena a ověřena metoda využití negradientních algoritmů pro stanovení optimalizovaného návinu, parametricky propojená s FE modelářem. Aktuálním cílem práce je aplikace daných metod včetně výroby a experimentálního ověření vzorků se složitější – uzavřenou geometrií a reálnými okrajovými podmínkami, jako např. rám sedadla.

Poděkování

This publication was written at the Technical University of Liberec as part of the project "Innovation of technical systems structures with the use of composite materials" with the support of the Specific University Research Grant, as provided by the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic in the year 2018.

Literatura

- [1] SEVCIK, L., TUMA, P., PETRU, M., MARTINEC, T., KOVAR, R., 2013. *Composite reinforcement*, Patent Application no. 2013-1066.
- [2] CAWLEY P., R. ADAMS D. J., *Composite Materials*, 1978, Vol.12 p.336-347,
- [3] ALTSULLER, G.S, The Innovation Algorithm, *Technical Innovation Center*, 1999.
- [4] HAWKING, S. A Brief History of Time, 1998, Bantam Books, p.212.
- [5] NEWTON I., *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, 1687.
- [6] FAUKNER R., Moderní fyzika. Praha: Josef Hokr, 1947.
- [7] DADOUREK K., Kompozitní materiály - druhy a jejich užití. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, 114 s.
- [8] LESIEUTRE G. A., Modeling Frequency-Dependent Longitudinal Dynamic Behavior of Linear Viscoelastic Long Fiber Composites, *Journal of composite materials*, 1994, vol. 28 no. 18,
- [9] WANG W.T., KAM T.Y., Material characterization of laminated composite plates via static testing, *Composite Structures*, 2000, Elsevier, Vol. 50, Issue 4.
- [10] HARRY N. E., Clean filament winding: process optimisation. United Kingdom, The University of Birmingham, 2012.
- [11] KOUSHYAR H, et. Al. Effects of variation in autoclave pressure, temperature, and vacuum-application time on porosity and mechanical properties of a carbon fiber/epoxy composite, *Journal of Composite Materials* 2012; Vol. 46.
- [12] ALLEN, A. K., *A Method for Winding Advanced Composites of Unconventional Shapes using Continuous and Aligned Fibers*, Brigham Young University, 2004.
- [13] PETRU M, MLYNEK J, MARTINEC T, BRONCEK J. Mathematical modelling of fibre winding process for composite frames: *Komunikacie* 2016, Vol. 18, pp. 103-111.
- [14] LAVAL Ch., Composites design in the real world, *Reinforced Plastics*, Belgium, 11, 2003.
- [15] CHAND S., Carbon fibers for composites, *Journal of materials science*, 2000, Vol. 35.

AUTOMATICKÁ VÝROBA KOAXIÁLNÍCH NANOVLÁKENNÝCH STRUKTUR

Andrii Shynkarenko

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,

Fakulta strojní, 5. ročník

Doktorský studijní program – STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

Abstrakt: Cílem této práce je vývoj a sestavení stroje, který umožní provedení různých experimentů pro výrobu přesných nanovláknenných přízí, koaxiální přízí a také spojení dvou rozdílných technologií výroby nanovláken, kterými jsou elektrostatické zvlákňování a výroba vláken metodou tažení. Aplikační sféra zamýšleného stroje je především zdravotnictví. První etapou vývoje na konstruovaném stroji je výroba testovacích vzorků drenážního implantátu pro léčbu onemocnění takzvaného glaukomu. Další plánované využití je v oboru elektrotechniky, například pro vývoj miniaturních kondenzátorů ve tvaru příze. Ale, díky spojení dvou technologií tvorby nanovláken a unikátní konstrukci efektoru manipulátoru pro sběr a zákrut, stroj otevírá nové možnosti pro tvorbu a testování nových nanovláknenných vícevrstevných struktur. Hlavní částí této práce je přehled dosažených výsledků konstruování automatizované linky pro výrobu nanovláknenných přízí.

Klíčová slova: nanovláknena, elektrostatické zvlákňování, metoda tažení, koaxiální nanopříze, automatizace.

1 Úvod

Lidstvo se vždy snažilo poznávat svět, ve kterém žije. Vedení touto touhou se vědci ponořovali do studia věcí kolem nás stále hlouběji a s větším smyslem pro detail. Díky této důslednosti byl po mini a mikro světech objeven i nano svět. Oblast nanotechnologie obsahuje jevy techniky, zařízení nebo struktur, jejichž rozměry odpovídají velikosti nanometrů, tedy úrovni atomové a molekulární. Za nanotechnologie lze označit jen takové systémy a materiály, jejichž aplikace nebo způsoby tvorby mají alespoň jeden rozměr nebo svoji vnitřní strukturu v intervalu velikostí 1-1000 nm (0,001 – 1 μ m). Dále musí využívat fyzikálních nebo chemických vlastností na úrovni atomů a molekul tak, že mají neobvyklé charakteristiky v porovnání se stejným materiálem nebo systémem, který nemá složky s nanorozměry (*Růžičková [1]*).

Pojem nanotechnologie je v posledních letech jedním z nejvíce užívaných termínů řady vědních oborů. Nanotechnologie mají obrovský význam pro světovou ekonomiku a společnost na přelomu století zcela zřejmě v oboru polovodičů, informačních technologií a molekulárního inženýrství. Věda a výzkum v rozměrech nanometrů předkládá možnosti pro posun v materiálovém inženýrství, nanoelektronice, medicíně, energetice, biotechnologiích, informačních technologiích, atd. Je označována jako další průmyslová revoluce (*Bhushan [2]*).

Jedno z největších využití nanotechnologie je v medicíně. Léčba komplikované a těžko odhalitelné nemoci, jakou glaukom bezesporu je, neustále prochází progresivním vývojem. Přestože existuje nespočet kroků, které tuto chorobu mohou v raném stádiu vyléčit anebo později alespoň zastavit, jeví se nejprestižnější oblastí léčby drenážní implantáty, které se dají vyrobit s využitím nanotechnologie (*Quigley [3]*, *Gabelt [4]*, *Klapstova [5]*).

V úzké spolupráci s Katedrou netkaných textilií bylo rozhodnuto postavit dodnes neexistující stroj, který by umožňoval provedení různých experimentů pro výrobu přesných nanovláknenných přízí, výrobu vícevrstevných přízí a také spojení dvou rozdílných technologií výroby nanovláken, kterými jsou elektrostatické zvlákňování a výroba vláken metodou tažení.

2 Přehled současného stavu

K dosažení cíle bylo třeba vyvinout automatizovanou linku, která se skládá z několika zařízení. Linka je rozdělena do třech hlavních částí:

- výroba nanovláken pomocí elektrostatického zvlákňování,
- výroba nanovláken pomocí metody tažení,
- sběr nanovláken a jejich zpracování.

Vývoj zařízení byl rozdělen do několika fází:

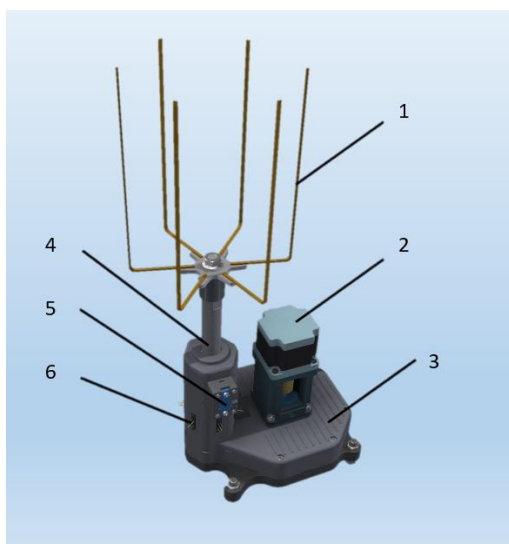
1. návrh a následná realizace konstrukce pro vlastní výrobu nanovláken pomocí elektrostatického zvlákňování,
2. návrh a realizace sběracího a zákrutového mechanismu nanovláken,
3. návrh a následná realizace konstrukce pro vlastní výrobu nanovláken pomocí metody tažení,
4. automatizace výrobního zařízení a stanovení optimálních technologických podmínek pro různé polymerní materiály (PVA, PVDF, PEO, PUR, apod.).

2.1 Zařízení na elektrostatické zvlákňování

V první fázi byl naším úkolem návrh části linky pro vlastní výrobu nanovláken a to rotujícího kolektoru. Na začátku byl vytvořen 3D model zařízení (obrázek 1). Požadavky na rotující kolektor byly následující:

- vodivost sběrných tyčí,
- rychlá výměna rotujících hlav s rozdílnými rozměry,
- možnost řízení rychlosti,
- přesnost polohování rotující hlavy, kvůli kompatibilitě s dalším sběracím zařízením.

Zařízení se dle obrázku 1 skládá z následujících základních součástí:



1. Navíjecí hlava
2. Krokový motor
3. Skříň s převodem
4. Mosazná hřídel
5. Konektor pro vysoké napětí
6. Snímače polohy

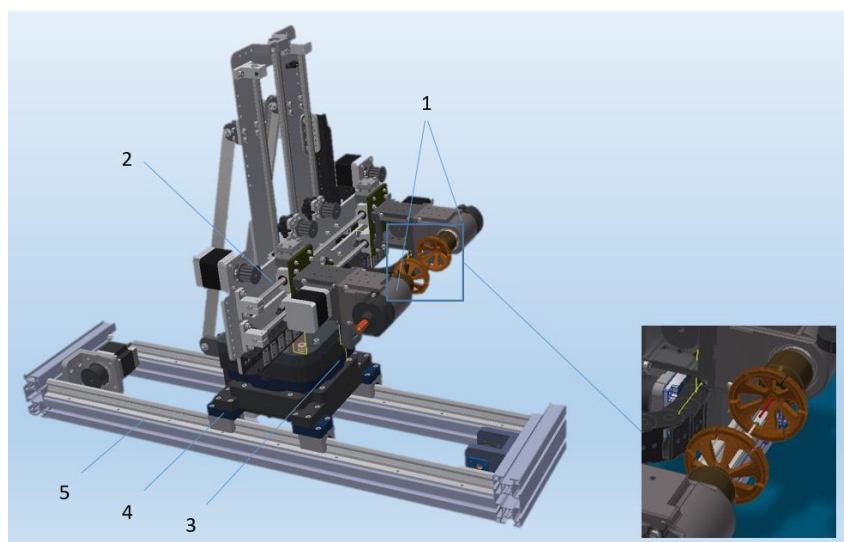
Obrázek 1: Rotující kolektor pro elektrické zvlákňování.

2.2 Sběr nanovláken a jejich zákrut

Další fáze je sběr nanovláken a jejich zákrut. Pro realizaci dané fáze byl navržen a realizován sběrací a zákrutový mechanismus (*Shynkarenko* [6]).

Vyvíjený manipulátor poskytuje veškeré manipulační pohyby a zahrnuje v sobě operace spojené s výrobou a formováním vícevrstvého nanovláčenného výrobku. Manipulátor je označován jako jednoúčelový stroj s třemi stupni volnosti a má co nejuniverzálnější možnou konstrukci, umožňující rozšíření a doplnění o potřebné prvky, čidla, kontrolní zařízení atd.

3D model manipulátoru se dle obrázku 2 skládá z následujících základních součástí:



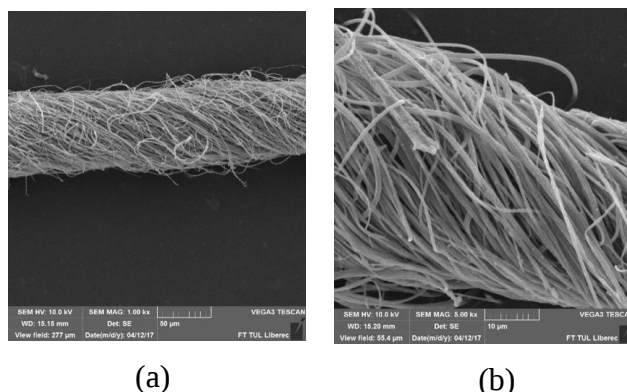
1. Efektor
2. Polohovací zařízení
3. Otočný stůl
4. Pojezd
5. Rám

Obrázek 2: 3D model manipulátoru.

Pracovní pohyb uvnitř efektoru obsahuje rotace kartáčů a translační pohyb pro nastavení vzdálenosti mezi kartáči. Konstrukce a pohon obou kartáčů jsou úplně stejné.

Funkčnost zařízení byla odzkoušena na Katedře netkaných textilií a nanovláčenných materiálů. Výsledky prokázaly, že zařízení je způsobilé tvorby nanovláčenné příze.

Topologie vytvořených nanovláčenných přízí byla studována pomocí elektronového mikroskopu (SEM, Tescan Vega 3SB EasyProbe). Vlákná byla pokryta povlakem 7 nm zlata. Hodnocení morfologie vláken bylo provedeno softwarovým programem NIS Elements AR 3.2. Vzorčky nanovláčenných vrstev jsou zobrazeny na obrázku 3. Průměr vlákna vyrobené příze je 980 ± 120 nm.

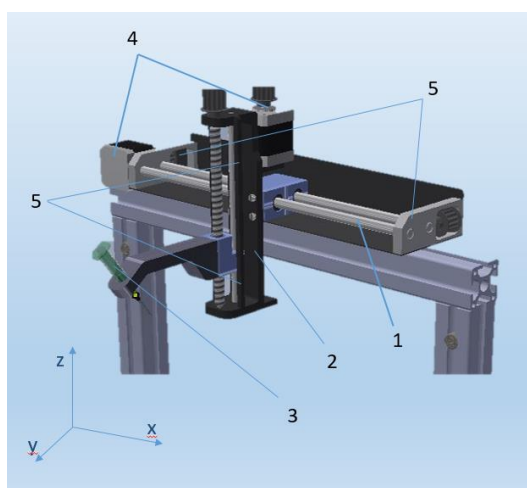


Obrázek 3: SEM mikroskopie vyrobené nanovláčenné příze vyrobené z PEO/PVDF: (a) 1.000x (b) 5.000x.

2.3 Výroba nanovláken pomocí metody tažení

Ve třetí fázi bylo zkonstruováno zařízení pro vlastní výrobu nanovláken pomocí metody tažení.

Zařízení je koncipováno jako dvouosý CNC stroj (obrázek 4), uspořádaný do X-Z. Osa X slouží primárně k dloužení vznikajícího vlákna. Osa Z je určena především pro potřeby manipulace, a to jak s již dokončeným vláknem, tak i pro jakékoliv technologické pojezdy v průběhu dloužení.



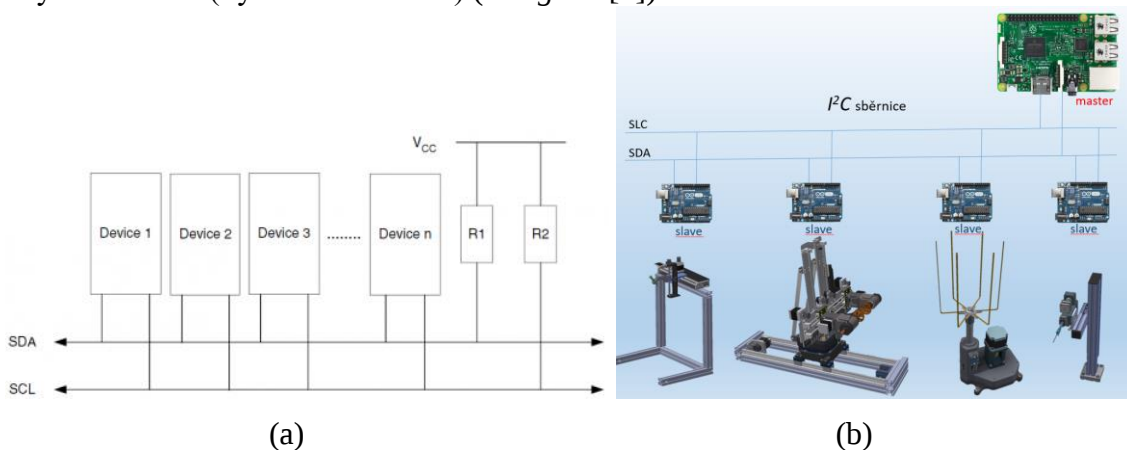
1. Pohon pro osu X
2. Pohon pro osu Z
3. Mikropipeta
4. Krokové motory
5. Koncové snímače

Obrázek 4: Zařízení pro vlastní výrobu nanovláken pomocí metody tažení.

Tento způsob výroby byl úspěšně otestován. Vlákna se nanášela mezi ukotvenými částmi efektoru manipulátoru, který byl postaven v předchozí fázi.

2.4 Automatizace výrobního zařízení

Dalším krokem je automatizace výrobního zařízení a stanovení optimálních technologických podmínek pro různé polymerní materiály. V této fázi je po úspěšném oživení každého stroje potřeba „naučit“ je mezi sebou komunikovat. Komunikaci a propojení strojů zajišťuje rozhraní I2C, které umožňuje spojení mezi jedním a více procesory nebo integrovanými obvody (obrázek 5). Rozhraní zvládá připojit až 128 různých zařízení pomocí dvou obousměrných vodičů, z nichž jeden je SLC (Synchronous Clock) - hodinový signál a druhý je datový kanál SDA (Synchronous Data) (Margolis [7]).



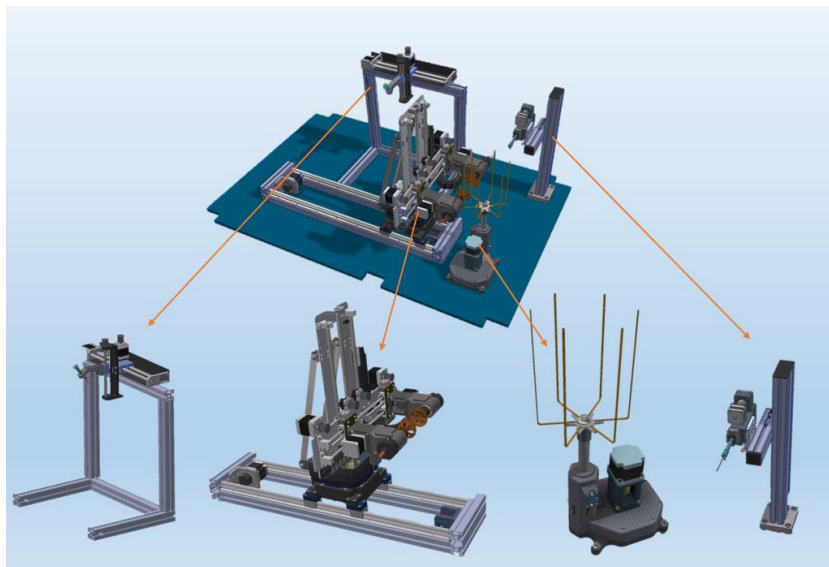
Obrázek 5: (a) Schéma I2C sběrnice, (b) aplikace I2C sběrnice v automatizované lince.

Každý stroj je v postavené lince řízen pomocí mikrokontroleru Arduino. Všechny stroje jsou propojeny a dostávají řídicí signál od jednodeskového počítače RaspberryPi. Pomocí počítače probíhá i komunikace mezi uživatelem a strojem. Pro ovládání hardwaru a softwaru není používáno žádné hotové softwarové řešení nebo firmware. Všechny programy, a to jak pro hardware, tak i pro software, jsou napsány samostatně. Na této fázi se momentálně pracuje.

3 Současný stav řešení

V současné době probíhá závěrečná etapa v osazování stroje elektronickými součástkami, zároveň je ale neustále vyvíjeno softwarové zabezpečení umožňující snadné ovládání zařízení. Tento projekt obdržel další finanční podporu z projektu SGS 21223: „Automatizace výrobní linky vícevrstvých nanovlákných tubulárních struktur“, Náplň nového projektu spočívá ve spojení již vyvinutých zařízení do jednoho celku pro dosažení vyššího stupně automatizace. Tento poslední krok je nezbytný pro dosažení výrazně větší přesnosti, homogenity a snadnějšího ovládání již tak komplikovaného procesu. Hlavním zaměřením projektu je testování stroje a stanovení optimálních technologických podmínek pro různé polymerní materiály. Byly prováděny zkoušky ve spolupráci z Clemson University v USA, která má patent na zařízení pro výrobu paralelních nanovláken. Také díky podpoře Katedry netkaných textilií na TU v Liberci je neustále zvyšována bezpečnost provozu zařízení. To například vedlo k nákupu materiálu pro zakrytování stroje a elektronických dílů, na jejichž montáži se také pracuje.

Na obrázku 6 je znázorněno umístění jednotlivých zařízení na pracovní ploše. Natočení manipulátoru je závislé na přístroji, se kterým je pracováno.



Obrázek 6: Umístění jednotlivých zařízení na pracovní ploše.

Po dokončení práce bude zhotovena multifunkční automatizovaná linka, která se bude skládat ze zařízení pro výrobu nanovláken pomocí technologie elektrostatického zvlákňování, zařízení pro výrobu nanovláken pomocí metody tažení a manipulátoru zajišťujícího sběr nanovláken z vedlejších strojů s jejich následným zpracováním. Postaveným strojem je plánováno vyprodukovat velké množství vzorků pro testování transportu kapalin v nanovlákných strukturách, což povede k pokroku ve vývoji drenážního implantátu pro léčbu onemocnění glaukomem. Využití stroje je možné nejenom v medicíně, ale i v elektrotechnice, kde může sloužit pro vývoj miniaturních kondenzátorů, v nano-elektronice (*Mcalpine* [8]) či pro výrobu optických senzorů: (*Wang* [9], *Fuxing* [10]. *Qing* [11]).

4 Závěr

Této práci byla strategicky rozdělena do několika fází. V první fázi byl postaven rotující kolektor pro elektrostatické zvlákňování. Součástí této fáze byla také výroba vyměnitelné hlavy pro kolektor. Zároveň byl proveden značný počet experimentů na zjištění efektivity různých typů hlav. V druhé fázi byl navržen a realizován sběrací a zákrutový mechanismus. Vyvíjený manipulátor disponuje veškerými požadovanými pohyby a provádí operace spojené s výrobou a formováním vícevrstvých nanovláknenných výrobků. Třetí fáze nám přinesla zařízení pro výrobu jednotlivých nanovláken a mikrovláken metodou tažení. Poslední fáze je zároveň současnou fází, ve které probíhá práce na automatizaci výrobního zařízení a stanovení optimálních technologických podmínek pro různé polymerní materiály. Veškerý software pro hardware i pro uživatelský interface je vlastní výroby.

Součásti výrobního zařízení byly prezentovány na Veletrhu vědy 2017 v Praze, na Mezinárodním strojírenském veletrhu v Brně v roce 2017, na setkání akademické, výzkumné a průmyslové sféry regionu Oberlausitz “CroBoPlast” a dalších, kde upoutali velkou pozornost. Také zařízení bylo zmíněno v pořadu Hyde Park Civilizace na ČT24 s profesorem Jirsákem.

Byly prováděny zkoušky ve spolupráci z Clemson University v USA, která má patent na zařízení pro výrobu paralelních nanovláken.

Zařízení se současně používá pro výrobu specifických nanovláknenných přízí pro glaukomové implantáty, které jsou díky této technologii jedinečné.

Díky spojení dvou technologií tvorby nanovláken a unikátní konstrukci efektoru manipulátoru pro sběr a zákrut, stroj otevírá nové možnosti pro tvorbu a testování nových nanovláknenných vícevrstvých struktur.

Poděkování

Výzkum prezentovaný v tomto článku byl podpořen účelovou podporou na specifický vysokoškolský výzkum v rámci studentské grantové soutěže TUL (SGS 21223 - Automatizace výrobní linky vícevrstvých nanovláknenných tubulárních struktur).

Literatura

- [1] RŮŽIČKOVÁ, J. *Elektrostatické zvlákňování nanovláken*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2004. ISBN 80-7083-867-1.
- [2] BHUSHAN, B. *Springer handbook of nanotechnology*. New York: Springer, c2004. ISBN 3-540-01218-4.
- [3] QUIGLEY, H. A. Glaucoma. *The Lancet* [online]. 2011, 377(9774), 1367-1377 [cit. 2017-07-18]. DOI: 10.1016/S0140-6736(10)61423-7. ISSN 01406736.
- [4] GABELT, B. T., KAUFMAN, P. L. Changes in aqueous humor dynamics with age and glaucoma. *Progress in Retinal and Eye Research* [online]. 2005, 24(5), 612-637 [cit. 2017-07-18]. DOI: 10.1016/j.preteyeres.2004.10.003. ISSN 13509462.
- [5] KLAPSTOVÁ, A., MIKES, P. Nanofiber Drain for Glaucoma Drainage Implants In: Proc. Int. Conf. NART, Liberec, Czech Republic: Technická Univerzita v Liberci, 2016.
- [6] SHYNKARENKO, A., KLÁPŠŤOVÁ, A., KROTOV, A., MOUČKA, M., LUKÁŠ, D. Production of yarns composed of oriented nanofibers for ophthalmological implants In: 17th AUTEX World Textile Conference 2017, Corfu, 29. – 31.05.2017. Greece.

- [7] MARGOLIS, M. *Arduino cookbook*. 2nd ed. Sebastopol, Calif.:O'Reilly,c2012.ISBN 978-1-449-31387-6.
- [8] MCALPINE, M. C., FRIEDMAN, R. S., JIN, S., LIN, K., WANG, W. U, LIEBER, C. M. High-Performance Nanowire Electronics and Photonics on Glass and Plastic Substrates. *Nano Letters* [online]. 2003, 3(11), 1531-1535 [cit. 2017-06-07]. DOI: 10.1021/nl0346427. ISSN 1530-6984.
- [9] WANG, X., DREW, C., SOO-HYOUNG, L., SENECA, K. J., KUMAR, J., SAMUELSON, L. A. Electrospun Nanofibrous Membranes for Highly Sensitive Optical Sensors. *Nano Letters* [online]. 2002, 2(11), 1273-1275 [cit. 2017-08-18]. DOI: 10.1021/nl020216u. ISSN 1530-6984.
- [10] FUXING, G, LEI, Z., XUEFENG, Y., LIMIN, T. Polymer Single-Nanowire Optical Sensors. *Nano Letters* [online]. 2008, 8(9), 2757-2761 [cit. 2017-08-18]. DOI: 10.1021/nl8012314. ISSN 1530-6984.
- [11] QING, Y., XIAOSHUN, J., FUXING, G., ZHE, M., JIANGYANG, Z., LIMIN, T. Polymer micro or nanofibers for optical device applications. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 2008, 110(2), 1080-1084 [cit. 2017-08-18]. DOI: 10.1002/app.28716. ISSN 00218995.

Název	Studentská vědecká a odborná činnost 2018 - Strojírenství
Autor	kolektiv autorů

Publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou.