

Studentská vědecká a odborná činnost 2016

Strojírenství

30. květen 2016

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



Recenzent: Maroš Tunák

Editor: Veronika Tunáková

© Technická univerzita v Liberci – 2016

ISBN 978-80-7494-279-2

Obsah

STROJÍRENSTVÍ – bakalářský a navazující studijní program

Petr ČEČÁK		
	Ergonomické studie pracoviště	6
Tomáš DRAHORÁD		
	Analýza Branemarkova můstku pomocí metody konečných prvků	14
Martin DVORÁK		
	Návrh skladovacího zařízení ve firmě DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.	24
Diana GREGOROVÁ		
	Demonstrační předmět k výuce dynamiky	34
Jitka KULIFAY		
	Posouzení možnosti výroby skleněných nanovláken	43
Josef PROKOP		
	Výpočet napětí a deformace tenkostěnné tlakové nádoby s plochými dny	52
Jana SVOBODOVÁ		
	Analýza magnetických akumulátorů kinetické energie	62
Vladimír TOMAN		
	Inovace bezpečnostního prvku u pedálového ústrojí	72
Josef VAŠATA		
	Konstrukce a výroba zařízení pro extrudaci ABS a jiných materiálů pro 3D tiskárny	82

STROJÍRENSTVÍ – doktorský studijní program

Ondřej BAŤKA		
	Analýza a optimalizace elektrody pro výrobu nanovláken pomocí AC - elektro-spinningu	94
Miloš ČADEK		
	Konstrukce studentské formule TUL	104
Ondřej MATÚŠEK		
	Zařízení pro detekci vadných dílů textilních disků	114
Thang NGUYEN VO		
	Simulační program pro technologii vstřikování plastů	120
Jan PRŮŠEK		
	Hodnocení biodegradability PLA kompozitů s přírodními vláknými plnivými	130
Michal STRNAD		
	Konstrukce základního ústrojí plstícího stroje	140

Martin ŠVEC	Vliv tepelného zpracování a vysokoteplotní deformace na strukturu a koeficient teplotní roztažnosti aluminidů železa legovaných niobem	150
Jan VÁCHA	Vodivé termoplastické nanokompozity z uhlíkových nanotrubic a jejich možné využití	160
Zdeněk VÍT	Rekonstrukce rámu robotu ROBOTUL® zámkovým systémem	165
Lukáš ZUZÁNEK	Náchylnost vysokopevnostních ocelí na vodíkové křehnutí	175

STROJÍRENSTVÍ

bakalářský a navazující studijní program

ERGONOMICKÉ STUDIE PRACOVIŠTĚ

Čečák Petr

Sekce - Strojírenství,
Fakulta strojní, 1. ročník
Magisterský studijní program – VÝROBNÍ SYSTÉMY A PROCESY

Abstrakt Cílem této práce je seznámit čtenáře s problematikou využívání ergonomického programu. Koncepce této práce vychází z metody DMAIC. Tato práce řeší propojení programu Tecnomatix Jack 8.2 s Microsoft Kinectem pro Xbox 360 a možnostmi rychlejšího pozicování pracovníka do pracovních poloh. V práci jsou porovnávány délky tvoreb scény a hodnoty výstupních analýz pro obě možnosti a různé náročnosti scén. Dále je zde rozvedena myšlenka o nutnosti postprocessingu u náročnějších scén

Klíčová slova: Ergonomie, Simulace, Jack, Kinect, Siemens

1 Úvod

V dnešní době již nestačí stále zvyšovat produktivitu pracovišť a kvalitu vyráběných produktů. Při zvyšujícím se vytížení pracovníků je velice nutné se zaměřit i na pracoviště jako takové. Stále více firem si tento fakt uvědomuje. Proto firmy stále více a více se zaměřují na ergonomické studie pracoviště. Finanční prostředky které takto vynaloží se vrací na ušetřených prostředcích za nemocnost pracovníků, která se těmito studii výrazně snižuje.

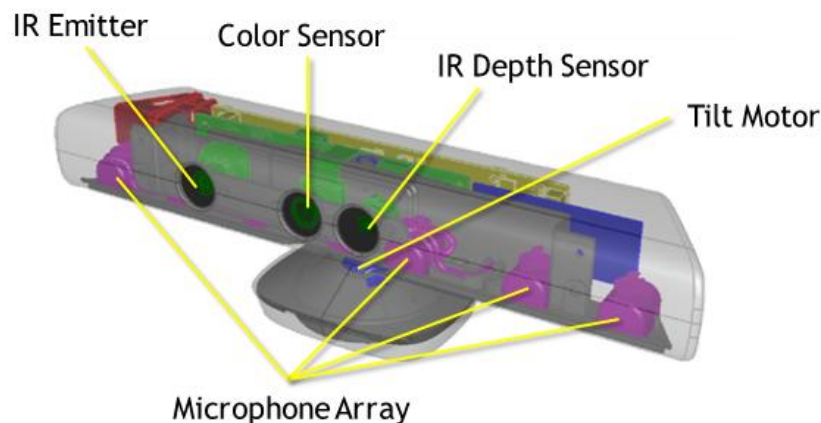
Pro tyto účely se firmy zaměřily na vývoje nejrůznějších metod na sledování pracovišť. Když firmy zjistili že je nutné takto sledovat i pracoviště v rámci projektové přípravy přišly firmy s 3D programy ve kterých lze naprogramovat celé pracoviště. Se svým řešením přišla i firma Siemens, která ve své produktové řadě Digitální továrna nabízí program Tecnomatix Jack který je přímo zaměřen na ergonomické studie pracoviště. V rámci těchto optimalizací se začalo zkoumat i možnost propojení s různými skenovacími zařízeními aby tato příprava byla co nejrychlejší a nejpřesnější díky sledování reálných pohybů pracovníka po pracovišti. Pro tyto účely se využívají dva hlavní systémy ke sledování pracovníkových pohybů a to Motion Capture a Microsoft Kinect. A právě tento článek se věnuje dále studii využití Microsoft Kinectu pro vybraný pracovní úkon.

1.1 Systém Motion Capture

Systém Motion Capture doplněný o rukavice je alternativou ke Kinectu. Pro využívání systému Motion Capture je nutné aby pracovník byl oblečen do speciálního obleku, nebo aby měl na svém pracovním oděvu umístěné referenční body. Hlavní nevýhodou tohoto systému je, že je nutné aby na pracovníka mířilo více kamer. Výhodou systému Motion Capture je oproti Kinectu že je pracovník sledován kontinuálně a ne jen v určitých pracovních pozicích.

1.2 Microsoft Kinect

V době, kdy přišli vývojáři ze společnosti Microsoft s doplňkem k herní konzoli pro zlepšení dojmu z hraní jistě netušili jakou revoluci tím odstartují. Určitě vývojáři netušili, že tato kamera se bude využívat i pro ergonomické studie pracovišť. Kinect se dá využít pro snímání celé postavy nebo pro snímání jednotlivých částí těla jako ruka nebo obličej. Při využití snímání jednotlivých částí nelze ale využít snímání celého těla.



Obrázek 1 - Kinect - rozbor [1]

Na Obrázku 1 je vidět rozbor Kinectu. Kinect je vybaven RGB kamerou, která je schopna snímat video o rozlišení 1280x960. IR emitor vyzařuje infračervené paprsky, které se po odrazu od předmětu navrátí do IR Depth sensor a změří se tím vzdálenost mezi snímačem a předmětem. Tímto se zachycuje hloubka snímaného předmětu. Kinect je schopen rozeznávat barvy snímaného předmětu za pomoci Color Sensor. Kinect má v sobě zabudovaný mikrofony díky kterým je schopen rozeznávat pozici zdroje oproti pozici snímače. Kinect je schopen se naklánět v rozsahu $\pm 27^\circ$. V tabulce 1 jsou uvedeny další parametry zařízení. [1]

Tabulka 1 - Parametry Kinectu [1]

Parametr	Hodnota
Úhel pohledu	43° vertikálně a 57° horizontálně
Posun úhlu pohledu	$\pm 27^\circ$
Rychlost snímání	30 snímků za sekundu (30 FPS)
Formát zvuku	16 kHz, 24 bit pulse code modulatin (PCM)
Charakteristika vstupu zvuku	Čtyři mikrofony s 24 bit analogově digitálním převodníkem (ADC), odstraňování ozvěny a redukce šumu
Charakteristika akcelerometru	2G/4G/8G akcelerometr konfigurován pro 2G s přesností 1°

Jak bylo již zmíněno, Kinect snímá pracovníka a převádí jej do PC modelu, ale nepřejímá jej jako objemový model nýbrž jej převádí na drátový model (Obr. 2). Toto je problém, protože je nutné upravovat úchopy aby nezasahoval přenášený model do těla pracovníka (Obr. 3). Tento problém s drátovým modelem lze odstranit pouhou úpravou pracovníkova postoje.

V další kapitole bude proto provedena vstupní rešerše možností využití senzoru Kinect.

2 Možnosti využití Kinectu

Krátce poté co Microsoft uvolnil zdrojový kód pro tvorbu vlastních aplikací na využití Kinectu se strhla lavina s různými využitími tohoto dříve ryze herního doplňku. Kinect se začal využívat. Vědci z celého světa

Vědci z University of North Carolina at Chapel Hill využívají Kinect v telekomunikaci kde pomocí Kinectu který snímá volající a v reálném čase je schopen zobrazovat 3D obraz bez nutnosti využití speciálních brýlí. (viz [5]). Toto řešení nalézá uplatnění při volání doplněném o webkamery, protože

Microsoft Kinect nalézá uplatnění i ve skenování nejrůznějších předmětů umístěných v zorném úhlu zařízení kterými je postupně pomalu otáčeno. Po úplném naskenování předmětu se sken uloží do běžných formátů (.obj, .stl) se kterými lze následně pracovat ve všech 3D modelačních programech jako s běžně vymodelovaným objektem. Na tomto řešení pracují vývojáři z Microsoft Research ve spolupráci s různými univerzitami na světě. Toto řešení může výrazně zlevnit ceny skenování. (viz.[2] [3]).

Dále se dá Kinect využívat i v robotice kde zařízení doplněné o Kinect se pohybuje po předem definované trase a rozeznává možné překážky v jeho cestě (viz.[4]).

Kinect nalézá uplatnění i v oblasti medicíny. Například se vědci z firmy KineMed zabývají tvorbou rozhraní aby se lékaři nemuseli dotýkat radiologických snímků. Dále se Kinect dá využívat pro zefektivnění rehabilitačního procesu kde se při rehabilitačním cvičení snímá pohyb cvičence a programy analyzují efektivnost těchto pohybů a navrhují zlepšení aby se docílilo maximálních zlepšení během cvičení.

Firma Siemens (podobně jako Dassault systems) nabízí ucelenou řadu produktů pod názvem Tecnomatix (Digitální továrna /DF/). Na ergonomické studii je zaměřen SW Tecnomatix Jack. Hlavní výhodou tohoto programu je možnost přesného nastavení antropometrických údajů daného pracovníka do programu a tím získáme přesnější výsledky.

Tento program nabízí i přímé propojení s oblekem typu Moton Capture (včetně rukavic) i zařízením Kinect. Toto propojení umožňuje ovládat pracovníka ve virtuální realitě pomocí pohybů, gest a polohování pracovníka před kamerou.

V tomto článku bude pozornost věnována zejména propojení Jack-Kinect, konkrétně bude diskutována náročnost tvorby scény (pracovních pozic). Hlavním důvodem je, že je toto řešení investičně nenáročné a může být proto pro mnoho firem zajímavé a inspirativní

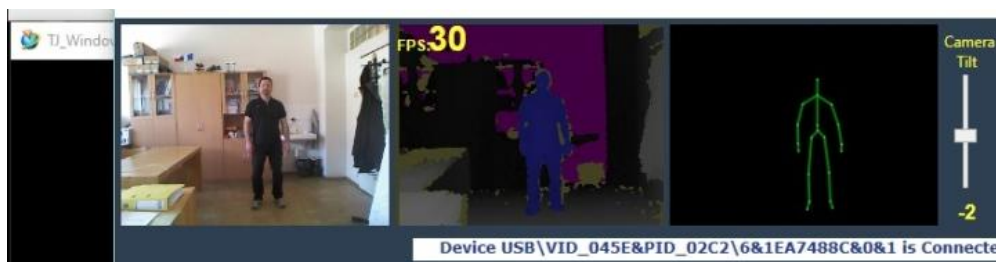
Tecnomatix Jack lze využít v předvýrobní fázi návrhu pracovišť, kde lze tento program využít na testování pracovních pozic pracovníka a tím ušetřit náklady na přestavbu nebo náklady na nemocnost pracovníků.

Uplatnění tento program nalézá i při analýze již existujících pracovišť s využitím Kinectu lze nasnímat pracovní pozice pracovníka v reálném provozu. Po nasnímání těchto pozic lze provést analýzy pracoviště a na jejich základě provést případné inovace aby bylo sníženo ergonomické zatížení pracovníka.

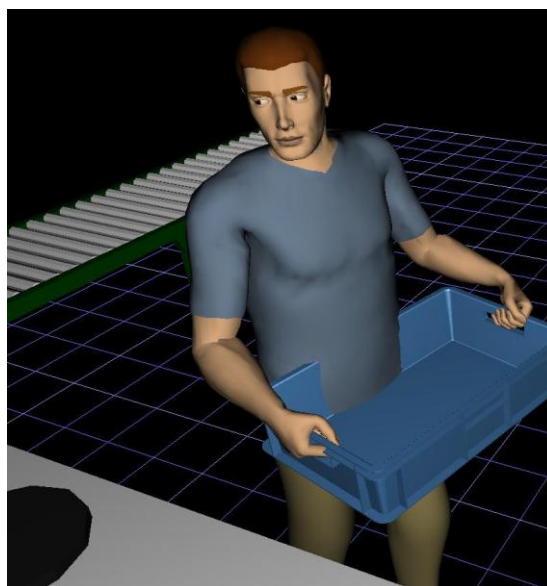
3 Případová studie

V této části se vytvoří dva typy scény s různou náročností. První pracovní scéna bude klasické zvednutí těžkého břemene z podložky zde budeme za podložku považovat standardní EUR paletu. Za těžké břemeno budeme považovat obyčejnou papírovou krabici. Druhá pracovní scéna bude podobné zvedání ale papírovou krabici nahradíme KLT boxem. V této scéně bude již náročnější postprocessing. K vyhodnocení pracovních úkonů byla využita metoda NIOSH. Tato metoda je přímo vyvinuta ke sledování zvedacích a pouštěcích úkonů.

Jak bylo již zmíněno, Kinect snímá pracovníka a převádí jej do PC modelu, ale nepřejímá jej program jako objemový model nýbrž jej převádí na drátový model (Obr. 2). Toto je problém, protože je nutné upravovat úchopy aby nezasahoval přenášený model do těla pracovníka (Obr. 3). Tento problém s drátovým modelem lze odstranit pouhou úpravou pracovníkova postroje.



Obrázek 2 - Drátový model



Obrázek 3 - Zásah do těla

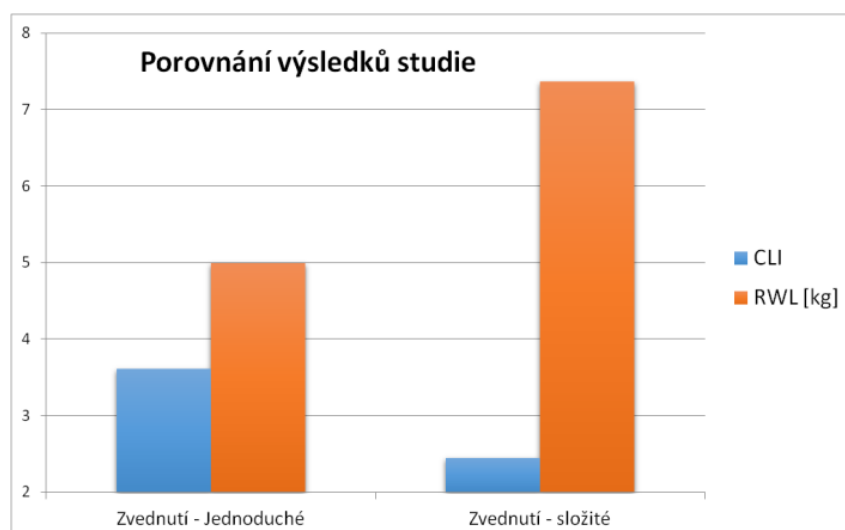
Jak bylo již zmíněno byly vytvořeny dva typy scény. Při využívání pouze programu bez Kinectu vše šlo vytvořit vcelku rychle a bez závažnějších problémů a výsledky jsou prezentovány v následující tabulce.

Tabulka 2 - Hodnoty studie

	Zvednutí - Jednoduché	Zvednutí - složitě
Délka tvorby [min]	5	25
Zatížení [kg]	18	18
HM	0.57	0.50
VM	0.80	0.80
DM	0.88	0.88
Dist [cm]	72,236	72.071
CLI	3,61	2,44
RWL [kg]	4,99	7,37

Jak je patrné z této tabulky když se věnuje tvorbě scény o 20 minut déle tak se to projeví na výsledcích ergonomické studie (NIOSH). Nejvíce patrné je zlepšení v parametrech CLI a RWL kde získáváme zvýšení hodnoty RWL o 2,38kg a snížení hodnoty CLI o 1,17. Takto věnovaný čas tvorbě scény může rozhodovat o tom, zda li se takto nasimulované pracoviště vytvoří i v reálném provozu nebo jestli budou vyžadovány určité optimalizace ke snížení zatížení pracovníka.

V následujícím grafu je nárůst respektivě pokles těchto hodnot ještě lépe vidět. U hodnoty RWL máme rapidní nárůst a u CLI nastal pokles.



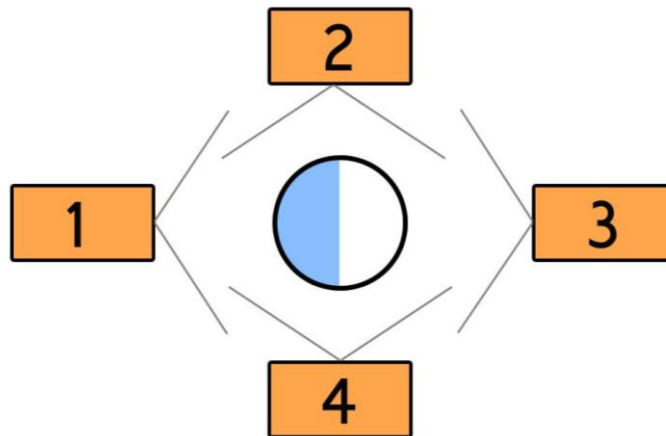
Graf 1 - Porovnání výsledků studie

Při doplnění programu o Kinect přineslo menší problémy. Při snímání pracovníka který stál čelem ke snímacímu zařízení docházelo k zakrytí končetin rukama a tím pádem se počítačový model ztrácel informace o poloze končetin. Při ztrátě informací o takto zakrytých

končetinách je program začal umisťovat do pozic nevyužitelných pro další použití v programu.

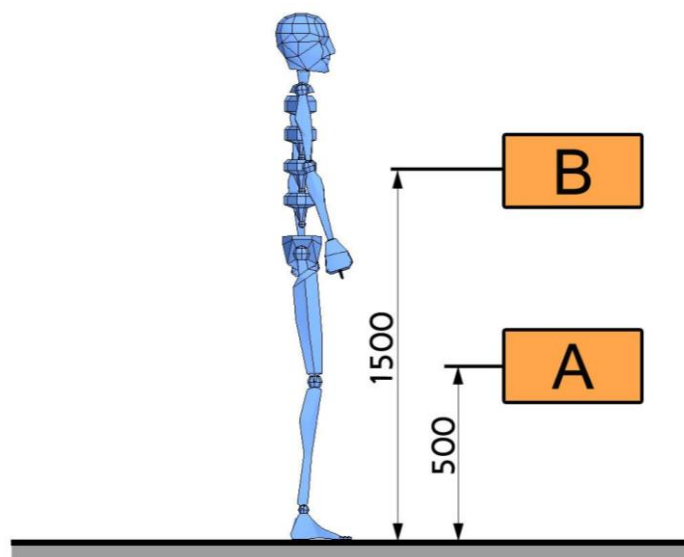
Z tohoto nevyužitelného umístění byl proveden výzkum pozic snímače pro nejefektivnější nasnímání pracovníka. Pracovník byl snímán ze čtyř základních pozic a navíc byla zkoušena i různá výška senzoru.

Na následujícím obrázku je toto rozložení snímacích poloh názornější. Polohy snímače se vždy měnili o 90° a výška umístění snímače se v každé poloze měnili z 0,5m na 1,5m.



Obrázek 4 - Schéma rozložení snímače

Pro lepší názornost byly tyto pozice očíslovány od 1 do 4 a v každé poloze snímače rozlišujeme ještě pozici A a B. V pozici A je snímač ve výšce 0,5m a v pozici B je ve výšce 1,5m. Takže například když je pracovník čelem ke snímači a snímač je ve výšce 1,5m tak se jedná o pozici 1B.



Obrázek 3 - Schéma výškových poloh snímače

Po provedení výzkumu se jako nejméně nevhodná pozice pro takto vytvořenou scénu jeví pozice 1. V této pozici již není tak veliký rozdíl mezi polohou A a B, ale mírně lepší se jeví poloha B. V polohách 2 a 4 snímač nemohl naskenovat druhou polovinu těla kterou měl v zákrytu. V těchto polohách nebyl rozdíl mezi polohou A a B. Jako naprosto nevhodná se ukázala poloha 3 kde program nebyl schopen rozeznat pracovníka a model byl naprosto nevyužitelný. Zde nebyl žádný rozdíl mezi polohou snímače A a B.

Zde jsou rozvedeny v tabulce hlavní výhody a nevýhody využívání Kinectu v praxi. Hlavní výhody jsou uvedeny v následující tabulce. Hlavní výhodou je rychlost snímání.

Tabulka 3 - Výhody Kinectu

+
Rychlost
Efektivnost
Možnost snímání reálných pracovníků
Reálné pracovní pozice

Hlavní nevýhody Kinectu jsou uvedeny zde. Hlavní nevýhodou Kinectu je, že snímač musí "vidět" na celé tělo pracovníka.

Tabulka 4 - Nevýhody Kinectu

-
Musí vidět na celé tělo
Jen 1 kamera
Nutnost postprocessingu
Složité ukládání pracovních pozic
Nelze využít v pracovním procesu

Tento problém s nasnímáním pracovníka lze řešit pomocí přidáním snímače. Druhý snímač by se mohl umístit do polohy 4 pokud by první snímač byl v poloze 2 a tím by se dalo zajistit kompletní nasnímání pracovníka. Toto řešení ale originálně program nepodporuje a proto by se musel vyvinout program, který by dokázal takto dva umístěné snímače propojit a předat model programu. Toto řešení ale již velice zabíhá do systému Motion Capture, které právě snímá pracovníka na více kamer a předává jej do počítače již jako model. Takto dva propojené snímače by ale měly značnou výhodu v tom, že nevyžadují aby snímáný pracovník měl na sobě buď speciální oblek nebo jeho pracovní oděv byl doplněn o snímací body.

4 Závěr

Z této studie je patrné, že využití Kinectu na tento typ zvedacích operací je nevhodné i s přihlédnutím k času tvorby scény v programu samotném. Takovýto systém tvorby scény kdy se nasnímají všechny pracovníkové pozice je vhodný při předvýrobní fázi projektování pracoviště. Když se firma rozhodne využít Kinect i ve výrobní fázi pracoviště tak je vhodné jej využívat v operacích kde je na snímání objekt vidět a model v programu bude využitelný pro další zpracování jako jsou například montáže, umístování věcí do regálů, podávání, přenášení.

Přínosem této práce je prozkoumání možných využití Kinectu nejen pro ergonomické studie ale i pro další části moderního podniku jako je například skenování. Tato práce ale byla primárně zaměřena na ergonomii. V práci byly nastíněny možnosti využití v ergonomických studiích a jedna z nich byla zkoumána podrobněji a její výsledky jsou v práci uvedeny.

Literatura

- [1] <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/jj131033.aspx> [online]. [cit. 2016-03-25]
- [2] Izadi, S., Davison, A., Fitzgibbon, A., Kim, D., Hilliges, O., Molyneaux, D., et al. KinectFusion. <http://doi.org/10.1145/2047196.2047270>
- [3] Newcombe, R. A., Davison, A. J., Izadi, S., Kohli, P., Hilliges, O., Shotton, J., et al. KinectFusion: Real-time dense surface mapping and tracking. <http://doi.org/10.1109/ISMAR.2011.6092378>
- [4] BOUFFARD, Patrick: Quadrotor Autonomous Flight and Obstacle Avoidance with Kinect Sensor. [online]. 2010 [cit. 2012-05-12], dostupné z WWW
- [5] A. Maimone and H. Fuchs., A first look at a telepresence system with room-sized real-time 3d capture and large tracked display. In *Proc. of ICAT2011*, New York, NY, USA, 2011. ACM Press.

ANALÝZA BRÁNEMARKOVA MŮSTKU POMOCÍ METODY KONEČNÝCH PRVKŮ

Drahorád Tomáš

Sekce - STROJIRENSTVI,
Ústav zdravotnických studií, 2. ročník
Navazující studijní program – Biomedicínské inženýrství

Abstrakt: Diplomová práce si klade za cíl stanovit rozložení napětí a deformace po zatížení mandibulárního můstku, který je ukotven do spodní bezzubé čelisti za pomoci čtyř až pěti dentálních implantátů. Počet ukotvení se liší délkou interforaminální oblasti tj. morfologickými dispozicemi jedince. Z klinické praxe je známo, že při působení vyšší skusové síly může dojít k lomu můstku. Hlavním parametrem při numerické analýze je způsob ukotvení můstku a rozložení zatížení na něm.

Klíčová slova: Bránemarkův můstek, MKP, pevnostní analýza, cyklické zatížení, virtuální mandibula, rozložení implantátů

1 Úvod

V dnešní době je pro nás samozřejmostí, že máme dokonalejší metody a postupy, inteligentní materiály a chytré aplikace, které si razí cestu k dalšímu využití v jiných oborech lidské činnosti. Nové metody i postupy daly prostor pro vznik nových mezioborových věd jako je např. biokybernetika, bioinformatika, ale také biomedicínské inženýrství a biomechanika. Tento trend se nevyhnul ani dentální implantologii, která se zabývá zavedením implantátů tj. náhrad zubů a můstků do horní a dolní čelisti.

Na jedné straně výzkum a vývoje je směřován do oblasti materiálového inženýrství, tj. nové biokompatibilních slitin pro protetické náhrady. Nicméně na straně druhé se otevírá široký prostor pro simulační medicínu, a to zejména pro testování náhrady pomocí propracovaných a složitých simulací. Ty mohou napodobovat reálné zatížení, jemuž jsou podrobeny v reálné situace, s kterými se klinici setkávají ve své odborné praxi. Můžeme předem analyzovat konkrétní náhradu, popřípadě ji přizpůsobit a předejít tak komplikacím, které by mohly nastat. Účelem je minimalizovat negativními dopady na další vývoj zdraví pacienta a tím i snižovat ekonomickou náročnost možných komplikací.

Předkládaná práce se zabývá použitím výpočetní metody konečných prvků pro analýzu dentální protetické náhrady Bránemarkova můstku. I přes vysokou úspěšnost (98 %) těchto můstků jsou známy případy selhání této náhrady vlivem materiálového lomu. Z klinické praxe známo, že k těmto lomům nedochází ihned po zavedení, nýbrž v určitém čase. Z tohoto důvodu je možné se domnívat, že se jedná o únavový efekt materiálu.

Bránemarkův můstek je protetická náhrada, která je vždy fixní, respektive podmíněně snímatelná, kotvená k dentálním implantátům fixačními šrouby. Indikací je výhradně totální defekt chrupu v dolní čelisti. Bránemarkův můstek je charakterizován zavedením čtyř až šesti (ale obvykle pěti) válcových implantátů do interforaminální oblasti (tj. mezi foramina mentalia). Zbývá část můstku za implantáty se nazývá cantilever – viz obr. 1. Díky principu fixačních šroubů zajišťujících kotvení do vnitřního závitu dentálních implantátů lze náhradu přesto kdykoliv sejmout, upravit, opravit nebo vyčistit. Nevýhodou je ne plně anatomický tvar. Materiálem pro výrobu Bránemarkových můstků, CAD/CAM technologií, je titanová slitina Ti-6Al-7Nb. [1]

Pro biomechanickou analýzu můstku je klíčové stanovit rozložení napětí a deformace na kosti a protéze. Dále také stanovit rozložení působícího tlaku na umístění dentální implantáty.



Obrázek 1: Bránemarkův můstek s umělými zuby [2]

2. Materiál a metodika

2.1 Silové zatížení

Faktor ovlivňující sílu skusu je výkon žvýkacích svalů a její maximální hodnota může být objektivně měřena. Přesným stanovením působící síly při kusu se zabývala studie, kterou provedl Ikebe a kol v Osace [3]. Cílem bylo kvantitativně zjistit maximální skusovou sílu bilaterálně u osob starších 60 let. Měření bylo prováděno pomocí tlakově citlivých štítků s tloušťkou 97 mikrometrů. Štítky byly umístěné na zubní oblouk horní a k dolní čelisti. Výsledky jsou uvedeny v tab. 1. Na protetickém oddělení Stomatologické kliniky LF UK a FN v Hradci Králové bylo v rozmezí od roku 2010 až 2014 ošetřeno definitivním BM celkem 143 pacientů z toho lom nastal u 3 z nich.

Tabulka č. 2: Zobrazuje závislost kousací síly na pohlaví a věku [3]

Pohlaví	n	\bar{x} [N]	S_x [N]	\tilde{x} [N]
Muž	444	511,7	15,1	468,5
žena	376	442,4	14,2	382,0

Věk	n	\bar{x} [N]	S_x [N]	\tilde{x} [N]
60–64	295	549,1	18,2	515,0
65–69	326	470,9	16,2	418,5
70+	199	392,2	18,7	333,0

Tvorba geometrie

Pro vytváření modelu byl použit pryskyřicový model můstku naskenový pomocí laserového skeneru od firmy Next engine 3D scanner HD model 2020. Objekt byl dále zpracován a upraven program Geomagic Studio 2014. V programu Autodesk Inventor Professional 2015 byly přidány do modelu implantáty, které byly bez šroubového závitu. Toto zjednodušení bylo dovoleno z důvodu, že implantáty jsou plně oseintegrované s kostí, tudíž je možné předpokládat pevné spojení a nedochází ke kontaktu.

Rozložení implantátů bylo provedeno dle rozpětí inetrforaminální viz níže. Byla celá sestava importována do programu Femap with XN Nastran, pro vygenerování konečně prvkové sítě.. Celková síť složená z čtyřstěnnů byla exportována do programu Marc Mentat 2015.0.0.

2.3 Materiálové vlastnosti

Pro napodobení přesného chování pro naši simulaci, jako je tomu při reální skusu, bylo nezbytné vytvořit virtuální model kosti. K tomu se nejlépe hodí nativní CT data. Nativní CT data byla získána ze Stomatologické kliniky, Protetického oddělení UK, LF v HK. Jednalo se o anonymní CBCT snímky ve formátu DICOM. Z poskytnutých snímků bylo nutné vybrat pouze oblast, kde se nachází pro nás podstatná mandibulární kost, tj. provést tzv. segmentaci. K tomu bylo využito programu ITK-SNAP verze 3.4.0. Konečné úpravy v podobě odstranění vybraného pozadí scény či označení segmentované oblasti, bylo provedeno ručně. V tomto kroku je znalost anatomické struktury výhodou. Přebytečná kost na alveolárním výběžku byla odstraněna. Vysegmentovaná geometrie kosti byla uložena do formátu vtk a následně otevřena v programu ParaView 5.0.0. Zde byla vytvořena binární maska z naskenované geometrie. Kalibrace byla provedena výběrem nejnižší a nejvyšší hodnotu v souboru. V našem případě to pro nás byl vzduch a kompaktní kost. V původních jednotkách byla intenzita pro vzduch -10 390 a pro kompaktní 2 899 (za předpokladu, že závislost mezi absorpcí Rentgenova záření vyjádřenou v HU je lineární k hustotě tkáně). Pomocí lineární regrese jsme přepočítali jednotky do kladných hodnot. Po úpravě odpovídala hodnota vzduchu 0 a kompakty 1 940 HU. K těm byly později dopočteny dle vzorce (1 a 2) materiálové vlastni je jako hustota v suchém prostředí a Youngův modul pružnosti [4].

$$\rho_{ash} = \frac{ash\ mass}{total\ specimen\ volume} \quad (1)$$

kde *ash mass* je objem suchého vzorku a *total specimen volume* je celková hmotnost vzorků včetně kostní dřevě. V našem případě je to hodnota v každém voxelu přepočítaná na jednotlivé kalibrované HU a vynásobená konstantou 0,6 [5]. Poté mohly být hodnoty dosazeny do vzorečku (3) a mohl být vypočten Youngův modul pružnosti pro jednotlivé pixely [GPa].

$$E = 10,5\rho_{ash}^{2,57} \quad (2)$$

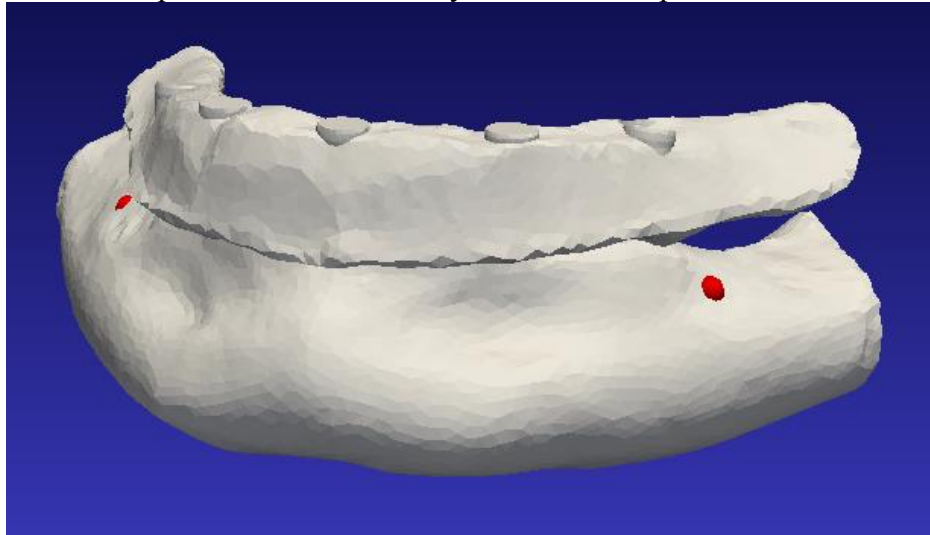
Celý výpočet pro jednotlivé prvky vysegmentované oblasti byl realizován v programu Matmap, jehož tvůrcem je pan Ing. Petrem Henyšem, Ph.D.

Kost je anizotropní materiál. Výpočet byl proveden jako lineární pro izotropní materiál. Anizotropním se stane tím, že pro každou hodnotu voxelu je hodnota útlumu rentgenového záření různá, a tím i výsledná hustota.

2.4 Vytvoření sestavy můstek kost

Aby byl model kompletní, bylo nezbytné k modelu kosti připojit model BM s implantáty. Před samotným osazením bylo nutné detekovat ve interforaminální oblasti obě foramen mentale. Na palpačním modelu jsou označeny červenými body viz obr. 2. Tato detekce byla nezbytná z důvodu dodržení implantologického postupu. Při prvních pokusech ustavení BM na kost se vyskytly kolize v geometrii kosti a můstku. Postavení implantátů neodpovídalo struktuře kosti. Implantáty nebyly dostatečně zahlobeny v kosti. Zároveň postavení můstku na mandibule bylo nevyhovující. Z toho důvodu byl model můstku upraven tak, že implantáty byly více zahlobeny do můstku a krajní dva implantáty byly mírně zkoseny pod úhlem 3°. Dále byla zanedbána mezera pro gingivu a můstek byl přímo nasazen na alveolární výběžek v interforaminální oblasti. Tím bylo zabezpečeno, že styk povrchu implantátu s kostí byl dostatečný a mohly jsme jej později prohlásit za pevné spojení. Nutno podotknout, že model

můstku nedopovídal anatomické struktuře mandibuly. Chyběla informace o mezičelistních vztazích, tudíž postavení můstku na mandibule je pouze orientační a umístěné na střed. Jakmile bylo polohování dokončeno jednoduchými funkcemi, posuv rotace v programu Paraview byl dále upraven v programu Matmap. Můstek byl odečten od kosti, tak aby nám vznikly otvory, do kterých jsme následně můstek vložili. Program také umožňuje vyexportovat konečně prvkovou síť s následným otevřením v prostředí Marc Menat.



Obrázek 2: Palpační model sestavy kost BM. Červené body označují foramen mentale

2.5 Simulace zatížení pomocí metody konečných prvků

U všech simulací pro BM byla zvolena materiálová slitina titanu, hliníku a niobu s označením Ti-6Al-7Nb s Youngovým modulem pružnosti $E = 108\,210$ MPa a relativním prodloužením $\mu = 0,36$. Mez pružnosti se pohybuje od 895 do 905 MPa a pevnost v tahu v rozmezí 995-1005 MPa. Poslední údaj se vztahuje k cyklické únavě, kdy materiál má mez únavy 559 až 564 MPa [4]. Dále u každé simulace byly zvoleny okrajové podmínky, zatěžovací stav a počet iterací byl zvolen 20. U všech modelů byl zkoumán posuv, redukované napětí, maximální a minimální hlavní napětí. Velikost působící síly byla zvolena na 500 N. Tato hodnota koreluje s mediánem z výzkumu provedeného v Osace. Zatížení bylo zvoleno statické. Působící síla působila kolmo proti směru osy z.

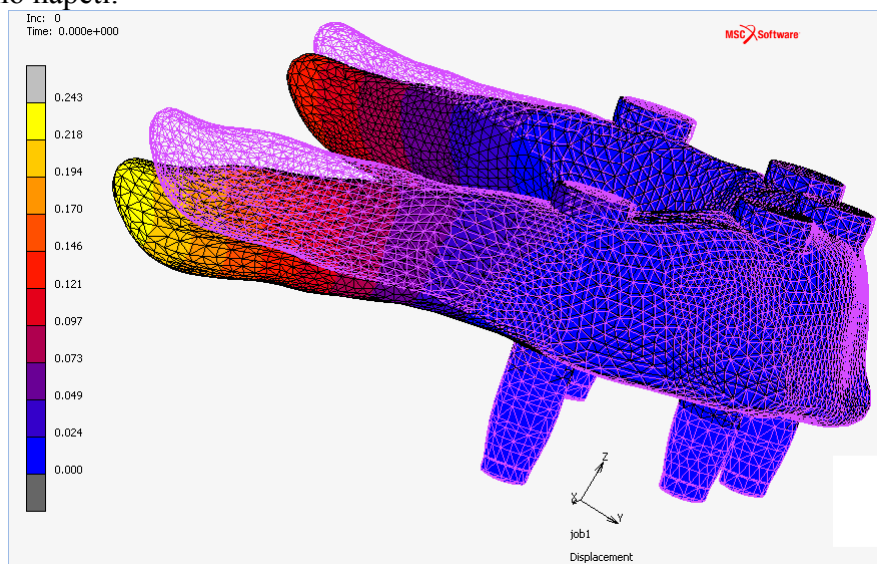
Jako poslední byly zvoleny adaptivní techniky pro zjemňování sítě, které nám pomohly snížit diskretizační chybu. Byly zvoleny oblasti okolo posledních implantátů jak z linguální, tak bukální strany. Vycházeli jsme z předpokladu, že místo tažné síly zde bude největší a zde může docházet k lomu. Podmínka byla nastavena parametrem pro počet rozdělení sítě a maximální dosažení síly, při které má nastat zjemnění. V našem případě to bylo za podmínky 300 MPa a síť se dělila dvakrát.

2.5.1 Plošné zatížení modelu můstku bez kosti

Nejprve byly na modelu BM nastaveny okrajové podmínky garantující, že na model nebude působit posuv a rotace ve všech osách, kde je implantát ve styku s kostí. Tím se rozumí celý povrch implantátu od spodní strany BM a zároveň při definování okrajových podmínek bylo dbáno, aby vznikla mezera mezi konstrukcí a vybranou oblastí, která je v praxi vyplněna gingivou. Druhá okrajová podmínka se týkala zatížení v oblasti obou cantileverů. Následně musel být proveden přepočít pro celkový počet vybraných uzlů.

Simulace, při které byl zkoumán posuv modelu při zátěži nám jasně prokázala, že dochází k celkovému průhybu v oblasti působící síly v desetinách milimetrů. Pro představu tloušťka zdravé gingivy je okolo 1 mm [6]. Velikost vektorů posuvu průhyb není stejný na

obou stranách. Tato odlišnost je zapříčiněna různou geometrií na obou stranách cantileveru. Na obr. 3 je v barevných izoplochách zobrazen deformovaný síťový model (fialově) původní a konturovaný deformovaný. Dochází také k nepatrnému posuvu v oblasti implantátů o 0,024 mm reprezentující vektor posuvu. Výpočet redukovaného napětí odhalil, kde dochází ke kumulaci napětí v oblasti styku krajního implantátů a cantileveru. Zejména ve spodní linguální oblasti. Pokud se podíváme na výsledky maximálního hlavního napětí, objevuje se zřetelná oblast tahového napětí v již zmíněných lokacích okolo posledních implantátů ve vrchních částech. Tahové napětí dosahuje přes 300 MPa. Zatímco minimální hlavní napětí nám popisuje nejvyšší tlakové napětí, které se nalézá ve spodní oblasti již zmíněného redukovaného napětí.



Obrázek 3: Porovnání původního modelu (růžový drátový model) a deformovaný model (barevné izoplochy)

2.5.2 Bodové zatížení modelu můstku bez kosti

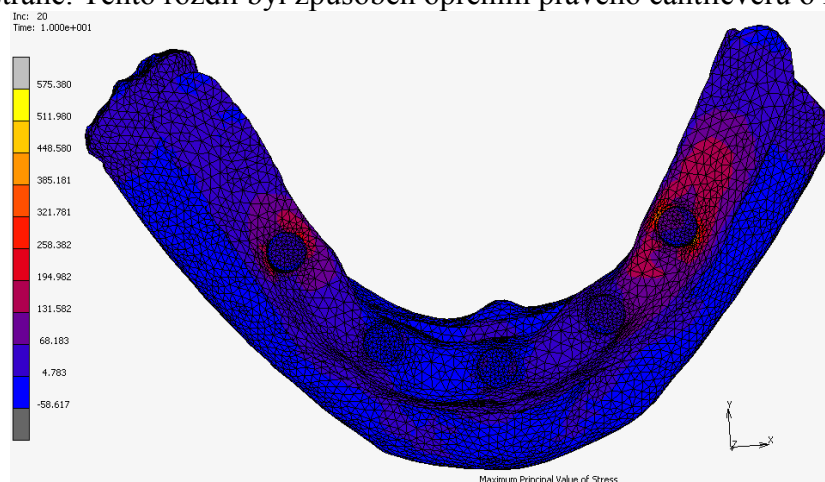
V této simulaci bylo přistoupeno k silovému působení na cantilever skrze řídicí uzel a následně pomocí spojnic (RBE prvků) do jednotlivých uzlů. Výhoda v tomto zatížení je, že nemusí být proveden přepočet pro celkový počet vybraných uzlů. Zatížení bylo navoleno na obě strany můstku přes body, které byly přibližně umístěny ve stejné vzdálenosti od cantileveru. Okrajová podmínka proti posuvu a rotaci zůstala stejná jako u předchozí simulace. Vektor posuvu byl porovnán, s předchozí simulací, bylo patrné, že posuv nedosáhl stejných výsledků jako u předchozí simulace. Také v oblasti implantátu byl posuv nižší. Neshodu lze vysvětlit rozdílným vektorem působící statické síly.

Z výsledků pro maximální hlavní napětí je patrná podobná kumulace takového napětí u posledních implantátů, která dosahuje přibližně stejného maxima jako u předešlé simulace. U pravého implantátu se kumuluje tahové napětí spíše na horní faciální straně. Maximální tlakové napětí bylo naměřeno ve spodní části posledních fixtur pod cantileverem, na obou stranách z faciální strany. Zejména na levé straně byla významnější. Redukované napětí nám poskytlo podobnou představu o kumulaci napětí. Je zřejmé, že nejslabší místo na modelu BM se jeví jako místo styku cantileveru a posledního implantátu, kde vychází nejvyšší ohybový moment. Na druhou stranu v simulaci nebyla překročena mez pevnosti. Z toho by vyplývalo, že při statickém zatížení nemůže dojít k lomu můstku. Pravděpodobně půjde o únavu materiálu způsobenou cyklickým zatížením.

2.5.3 Plošné zatížení modelu můstku s kostí

Stejně jako u předchozích simulací byly jako první vybrány okrajové podmínky. Zde proti rotaci a posuvu byly zvoleny uzly v koncových bodech mandibulárního oblouku na obou stranách. Působící síla byla zvolena stejná jako při první simulaci. Dále byl zvolen kontakt, a to mezi můstkem a kostí. Bylo to z důvodu nedodržení mezery pro gingivu. Naopak pro implantáty s kostí bylo zvoleno pevného spojení z důvodu 3 měsíční oseintegrace.

Pokud porovnáme vektory posuvu s první simulací, dojdeme k závěru, že vektor posuvu dosáhl vyšších hodnot než u předchozích simulací. Při hodnocení maximálního taženého napětí, viz obr. 4, je patrná stejná kumulace napětí u posledních implantátů u horního okraje můstku jak u linguální, tak u bukální strany. Tažné napětí dosáhlo nejvyšší hodnoty ze všech předešlých simulací, a to přes 400 MPa. Došlo k použití adaptivních technik. Maximální tlakové napětí se vyskytlo na levé straně ze spodní linguální strany můstku. Na pravé straně došlo k podobné kumulaci. V porovnání byla tlaková napětí na levé straně dvojnásobně vyšší než na pravé straně. Tento rozdíl byl způsoben opřením pravého cantileveru o kost.



Obrázek 4: Transversální pohled na rozložení taženého napětí [MPa] v barevných izoplochách

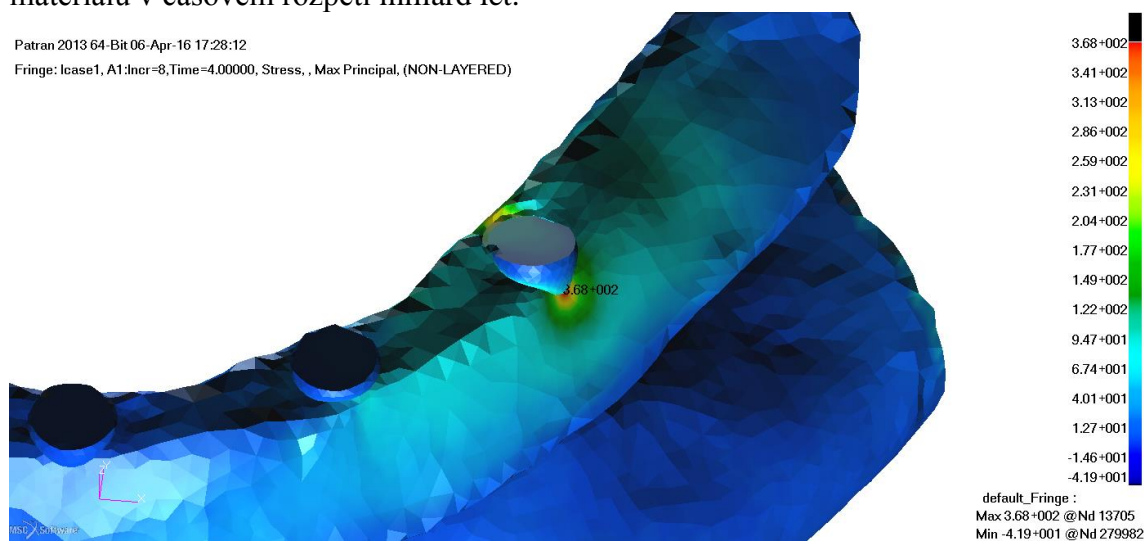
2.6 Simulace cyklické únavy na modelu s kostí

Z předchozích simulací, které proběhly při statickém zatížení, vyplývá, že pro náš daný případ nebyla překročena mez pevnosti. Při posouzení taženého napětí u předešlé simulace jsme se dostali ke kritickým hodnotám přibližně 600 MPa. Hodnota tahového napětí z předešlé simulace s kostí se blíže přibližuje k mezí únavy, která je udávána od 559 do 564 MPa [4]. Zároveň pokud výsledek porovnáme s S-N křivkou, která porovnává amplitudu napětí k počtu cyklů pro bod a [7], nám naznačuje, že hodnoty by mohly být signifikantní z pohledu únavného zatížení. Proto bylo přistoupeno k simulaci cyklické únavy. Pro výpočet se využilo metody stékání deště.

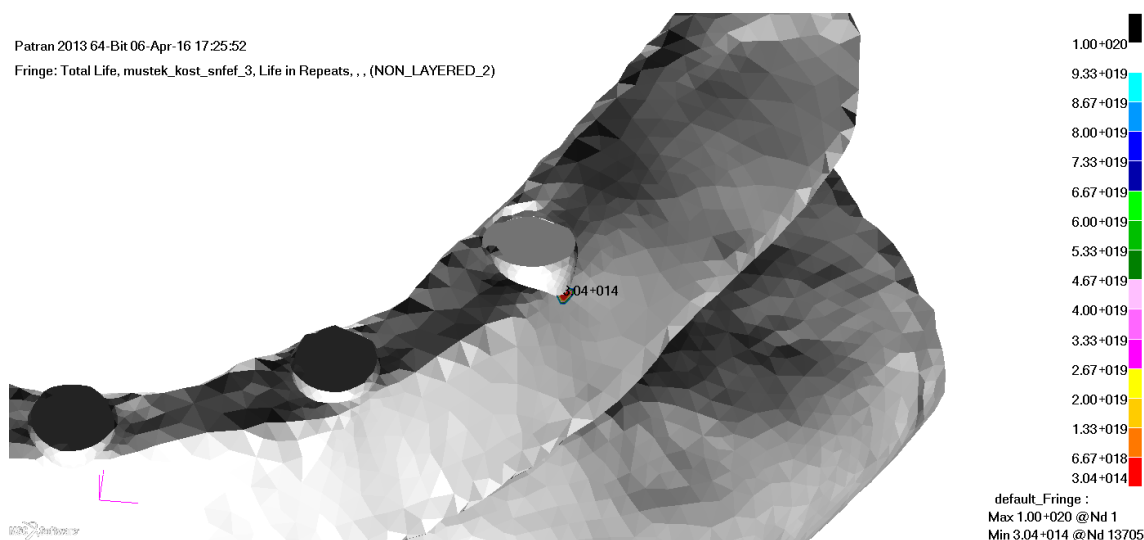
Vstupem pro nás byla již zmíněná S-N křivka a dalším parametrem pro simulování únavy je cyklické působení síly při skusu z hodnot JIS70, které dosahovaly nevyšší naměřené síly [8]. Argumentem pro jejich zvolení bylo to, že vyššího napětí dosáhneme při vyšší okluzní síle. Z důvodu zadávání hodnot pro výpočet cyklické únavy a lepší konvergence výpočtů byly zmíněné křivky zjednodušeny. Z grafu pro cyklické kousání byly vybrány maximální hodnoty při jednotlivých skusech a s příslušnými body na časové ose byly proloženy lineární spojnicí trendu. Pro data S-N křivky byly vybrány všechny body a byly proloženy i spojnicemi trendu. Výsledné rovnice byly zadány do výpočetního programu, kde se provedlo výsledné proložení. Posledními vstupními parametry pro materiál byly vybrány maximální hodnoty pro mez únavy 564 MPa, pevnost v tlaku 1 084 MPa a mez pružnosti 905 MPa [4]. Výpočet byl realizován ve specializovaném programu MSC Fatigue 2013. Simulace

byla provedena na modelu BM s kostí, která dosahovala nejvyšších tažných napětí při zatěžování 500 N. Únavová křivka pro kost nebyla zohledněna. Z důvodu její robustnosti a možnosti její remodelace byla jako ideální brána kost mandibulární.

Vypočtená simulace nám poskytla informace o tom, že při statickém zatížení při skusu, které se přibližuje k fyziologickým hodnotám, nedochází ke vzniku napětí, které by dosahovalo meze pevnosti. Maximální ekvivalentní napětí v místě poslední fixtury na levé straně dosáhlo 368 MPa (viz obr. 5) a počet cyklických opakování dosahuje hodnot okolo $304 \cdot 10^{12}$ (viz obr. 6). Uvažujeme, že jedinec má 3 epizody žvýkání za den, přičemž každá v trvání 15 minut, kde 1 min odpovídá 60 cyklům. Je k tomu ekvivalent 2 700 kousacích cyklů za den, za rok se dostáváme na 10^6 cyklů [9]. Aplikovali jsme stejný počet epizod na námi použitý kousací cyklus, výsledek byl 3 553 kousacích cyklů za den. V tomto případě se jedná o výdrž materiálu v časovém rozpětí miliard let.



Obrázek 5: Detail maximálního napětí [MPa] v oblasti levého krajního implantátu

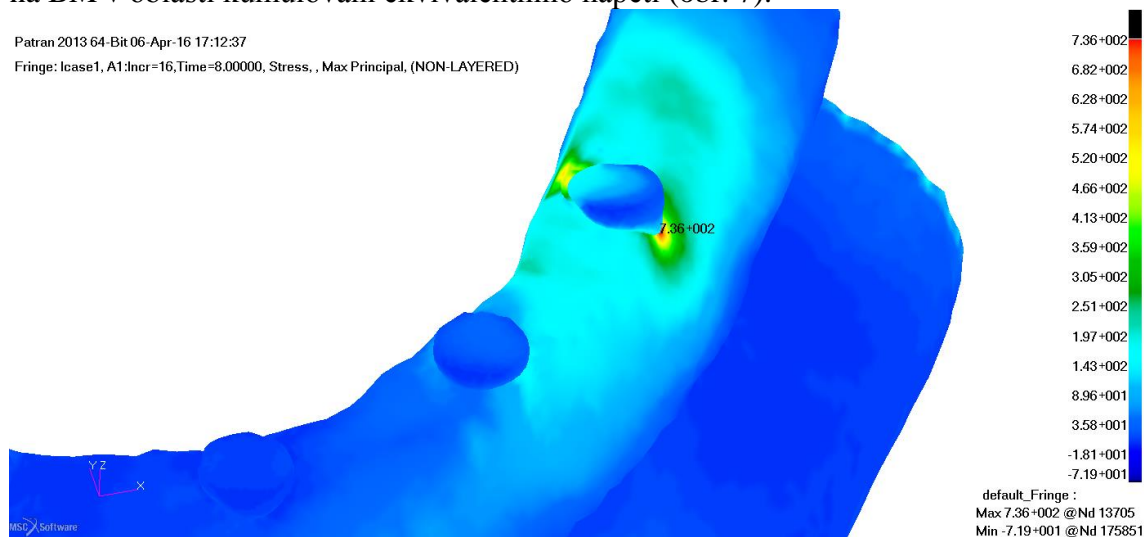


Obrázek 6: Detail počet kousacích cyklů v oblasti levého krajního implantátu

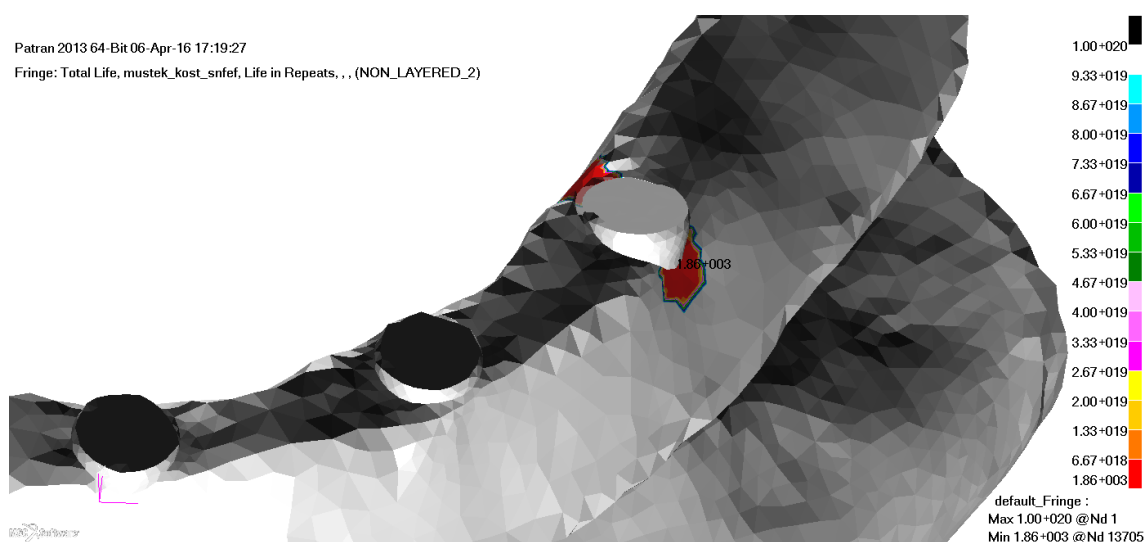
2.7 Zatěžování na mez pevnosti

Simulace byla provedena na modelu BM s kostí. Všechny parametry byly zachovány jako u předchozích simulací. Pouze působící maximální statická síla byla změněna na 1 280 N. K této hodnotě jsme dospěli postupným zvyšováním statické síly do té doby, než byla překročena mez únavy. Statické zatížení vyvolá ve struktuře ekvivalentní napětí přes 700 MPa

(viz obr. 7), v oblasti krajního implantátu na levé straně. Na pravé straně není ložisko tak významné, jak již bylo zmíněno, a to z důvodu opory cantileveru o kost. Podle výpočtu vydrží můstek 1 863 kousacích cyklů (viz obr. 8), což ekvivalentně odpovídá necelému jednomu dni. Pokud bychom provedli připodobnění k člověku, který by dokázal vyvinout okluzní sílu 1 280 N a dokázal by s ní kousat na BM po dobu necelých 45 minut, lze tvrdit, že by došlo k lomu na BM v oblasti kumulování ekvivalentního napětí (obr. 7).



Obrázek 7: Detail maximálního napětí [MPa] v oblasti levého krajního implantátu



Obrázek 8: Detail počet kousacích cyklů v oblasti levého krajního implantátu

3 Závěr

Tato studie se zabývala analýzou protetické náhrady Bránemarkova můstku, která nahrazuje funkci chrupu v dolní čelisti. Můstek je s mandibulární kostí pevně spojen dentálními implantáty. Vhodnou metodou, jak provést analýzu, bylo použít metodou konečných prvků. Tato metoda byla nanejvýš žádoucí z důvodu provedení simulací na virtuálních modelech. Výpočty mohly být opakovány nebo případně poupraveny.

Před provedením simulace bylo evidentní, že nejslabší místo protézy je oblast tzv. cantileveru. Tedy část můstku dlouhá přibližně do 20 mm za posledními implantáty na pravé a levé straně v oblouku distálního směru. Na tuto oblast působí síla při okluzi, která je dána mezičelistními vztahy. Tato síla byla kvantitativně měřena ve studiích [3], [10], [11]. V nich byla průměrná hodnota statické síly při skusu okolo 500 N. V simulacích provedených,

jak na samotném můstku, tak i na jeho spojení s kostí, výsledky neprokázaly vliv statické síly na lom můstku. Nicméně se objevily kumulace napětí v bukálních a linguálních oblastech okolo posledních dentálních implantátů (viz obr. 4, 5, 7).

Na základě tohoto zjištění byla provedena simulace na cyklické zatížení. Výsledky byly porovnávány s S-N křivkou z knihy [7], která potvrdila stejné výsledky jako u předchozích simulací. Dále bylo zkoumáno, při jakém zatížení dojde k lomu u cyklického namáhání. Při simulaci došlo ke kumulaci napětí v již zmíněných oblastech. Avšak působící statická síla, jež by byla nutná ke vzniku únavového lomu, by byla na hranici možnosti lidského skusu. Nelze však vyloučit, že takový případ by nemohl nastat.

Také byl proveden analytický výpočet vzhledem k oblasti cantileveru, který jsme se snažili z pohledu mechaniky připodobnit k nosníku, který je kolmo vetknut pouze z jedné strany. Uvažovaný nosník byl tvaru kvádrů, kdy jeho výška, šířka a délka byly brány jako maximální hodnoty naměřené na cantileverech. Výpočet byl proveden pro průhyb a maximální ohybový moment. Vypočtené hodnoty se nejvíce přibližovaly výsledku ze simulace pro plošné zatížení můstku bez kosti. K celkové shodě výsledků nemůže nikdy dojít, a to z důvodu organického tvaru náhrady.

Možnosti dalšího výzkumu v oblasti dentální implantologie a v implantologii obecně jsou dosti široké. V našem případě by bylo vhodné provést simulace, jak interaguje kost společně s implantáty. Na modelech byla fixace můstku v kosti zjednodušena tím, že se předpokládalo pevné spojení mezi můstkem a kostí, tudíž závit implantátu byl odstraněn. Simulace prokázaly, že implantáty se nepatrně hýbou ve směru kolmém k působící síle na cantilever. V místech styku závitů implantátů s mandibulární kostí by mohly vznikat špičky kompresního napětí, které by měly negativní dopad na remodelaci kosti. Takto by mohly být postiženy zejména poslední implantáty, u nichž by mohlo docházet k periimplantitidě, která se léčí speciálními zákroky pro doplnění kosti.

Dále jsme zanedbali prostor mezi alveolární kostí a můstkem, který je vymezen pro gingivu. I zde by bylo vhodné celou simulaci pro daný případ opakovat, popřípadě provést kazuistiku u vybraných můstků k daným mandibulárním kostem. Posledním faktorem, který by mohl mít vliv, je sklopení posledních dentálních implantátů, s jehož pomocí by mohla být zkrácena délka cantileveru a mohlo by být lépe rozloženo působící statické napětí. V neposlední řadě bylo mohla brát v potaz různé organizování implantátů a to z hlediska počtu a jejich vzdálenosti mezi nimi.

Literatura

- [1] ŠIMŮNEK, Antonín. *Dentální implantologie*. 2., přeprac. a dopl. vyd. Hradec Králové: Nucleus HK, 2008, ISBN 978-808-7009-307.
- [2] Obrázky byly poskytnuty z archivu Stomatologické kliniky FN HK
- [3] IKEBE, Kazunori, NOKUBI T., MORII K., KASHIWAGI J. FURUYA T., *Association of bite force with ageing and occlusal support in older adults*. Journal of Dentistry. 2005, **33**(2), DOI: 10.1016/j.jdent.2004.09.002, ISSN 03005712. [vid. 16.2 2016] Dostupné z [online]: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0300571204001484>
- [4] Properties: Titanium Alloys - Ti6Al7Nb Properties and Applications. *An AzoNetwork Site*. 2016 [vid. 23.2. 2016]. Dostupné z [online]: <http://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=2064>
- [5] HELGASON, Benedikt, PERILLI, E., SCHILEO, E., TADDEI, F., BRYNJÓLFSSON, S. a VICECONTI, M.,. *Mathematical relationships between bone density and mechanical properties: A literature review*. Clinical Biomechanics, 2008, **23**(2), [vid. 13.3. 2016]. DOI:

- 10.1016/j.clinbiomech.2007.08.024, ISSN 02680033. Dostupné z [online]: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0268003307001866>
- [6] KAN JY, Morimoto T, RUNGCHARASSAENG K, ROE P, SMITH DH. *Gingival biotype assessment in the estetic zone: visual versus direct measurement*. Int J Periodontics Restorative Dent.2010; 30: 237-243. [vid. 17.3.2016] Dostupné z [online]: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20386780>
- [7] NIINOMI, Mitsuo. *Metals for biomedical devices*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2010, s.135. ISBN 9781845699246.
- [8] BOOTHROYD, Peter a PHAM, X. N., *Socioeconomic renovation in Viet Nam: the origin, evolution, and impact of doi moi*. Archives of Oral Biology. 2004, **49**(10), [vid. 14.3.2016]. DOI: doi:10.1016/j.archoralbio.2004.04.006. Dostupné z [online]: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003996904000846>
- [9] VERPLANCKE, K., DE WAELE, W. a DE BRUYN, H., *Dental implants, what should be known before starting an in vitro study*. [vid. 6.1.2016] Dostupné z [online]: http://www.scad.ugent.be/journal/2011/SCAD_2011_2_3_360.pdf
- [10] RAADSHEER, M. C., VAN EIJDEN T. M. G. J., VAN GINKEL F. C. a PRAHL-ANDERSEN B., *Human jaw muscle strength and size in relation to limb muscle strength and size*. European Journal of Oral Sciences 2004, **112**(5), [vid. 16.2.2016]. DOI: 10.1111/j.1600-0722.2004.00154.x. ISSN 0909-8836. Dostupné z [online]: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1600-0722.2004.00154.x>
- [11] RAADSHEER, M.C., T.M.G.J. VAN EIJDEN, F.C. VAN GINKEL a B. PRAHL-ANDERSEN. *Contribution of Jaw Muscle Size and Craniofacial Morphology to Human Bite Force Magnitude*. Journal of Dental Research. 1999, **78**(1), [vid. 16.2.2016]. DOI: 10.1177/00220345990780010301. ISSN 0022-0345. Dostupné z [online]: <http://jdr.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/00220345990780010301>

NÁVRH SKLADOVACÍHO ZAŘÍZENÍ VE FIRMĚ DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.

Bc. Dvořák Martin

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,
Fakulta STROJNÍ, 2. ročník

Navazující magisterský studijní program – INOVAČNÍ INŽENÝRSTVÍ

Abstrakt: Tato diplomová práce se zabývá nalezením optimálního konstrukčního řešení gravitačního skladovacího zařízení pro skladování plastových dílů ve vozících ve firmě DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o. Toto zařízení je mechanického charakteru a jako jediný zdroj energie využívá hmotnost člověka tedy je energeticky šetrné k životnímu prostředí. Implementací tohoto zařízení dojde k úspoře deseti zavážečů při investici 2 234 000 Kč. Tato diplomová práce poslouží jako podklad pro výrobu skladovacího zařízení

Klíčová slova: Skladovací zařízení, MTM-1, inovace

1.1 Technické zadání a cíl diplomové práce

Navrhněte skladovací zařízení pro manipulaci s vozíky o rozměru 1x1x1,5m (š, h, v.). Tyto vozíky jsou zhotoveny z trubkové konstrukce SUS, spodní plocha je opatřena podlážkou z kartón-plastu. Maximální hmotnost vozíku s díly činí 40 kg. Skladovací zařízení se bude skládat ze tří částí: zdvihací zařízení, skluz, uvolňovací zařízení.

Zdvihací zařízení bude zdvihát vozíky do výšky skluzu. Maximální síla na pedál bude 500 [N]. Zařízení bude mechanické bez elektrického, pneumatického, popřípadě jiného pohonu. Zařízení je možno v krajním případě zapustit 30[cm] do země. Bezpečnost hlavních částí zařízení bude s koeficientem $k=5$.

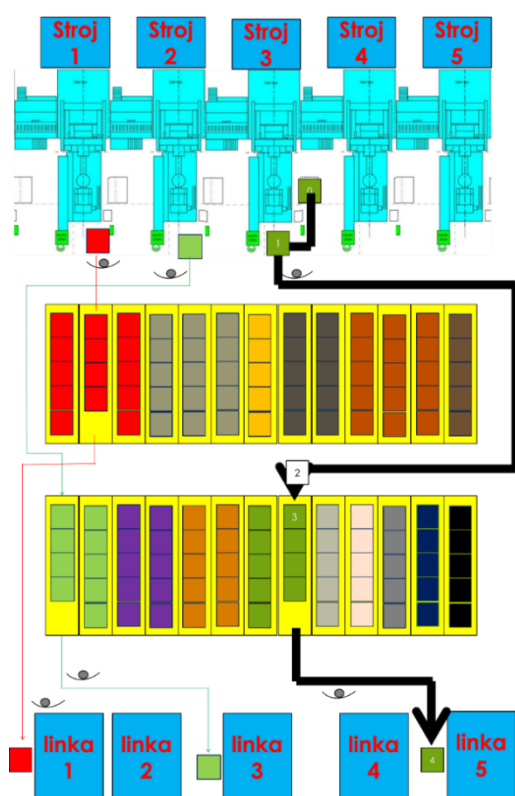
Uvolňovací zařízení bude mechanického charakteru, může obsahovat oddělovač.

Celková délka zařízení bude 10 m. Minimální uskladněný počet vozíků bude 9, jeden vozík smí být uskladněn na zdvihacím zařízení.

1.2 Analýza původního stavu

V této práci se budu zabývat největším meziprocesním skladem v DMCZ, a tím je sklad mezi procesy HVAC a Molding. Na procesu HVAC se provádí finální montáž klimatizačních jednotek a rovnání do stillidge a na procesu Molding, který je složený ze 17 vstříkolisů, se provádí výroby plastových částí klimatizace. Tyto plastové díly jsou charakteristické velkým uskladňovacím objemem, ale nízkou hmotností.

Tento sklad je obsluhován 2 až 8 zavážeči a je v něm uskladněna 2 hodinová až celodenní zásoba dílů pro proces HVAC. Tento sklad je rozdělen do 4 zhruba stejně velkých ploch, kde jsou díly uskladněny ve vozících. Na následujícím obrázku je vidět schéma jedné takové plochy. Na obrázku jsou barevně odlišeny jednotlivé druhy výrobků dle aktuálního rozložení a nastíněna vybraná trajektorie zaskandování vozíku na danou lokaci. Na obrázku v pravo lze vidět foto vozíku pro skladování plastových dílů.



Obrázek 1: Layout skladu



Obrázek 2: foto vozíku na plastové díly

Jednotlivé časy byly zjištěny metodou MTM-1 jako příklad uvádím trajektorii z pozice 1 na pozici 2.

Tabulka 1: tabulka času potřebných k přemístění vozíků z pozice 1 na pozici 2

#	LEFT HAND	LEFT HAND Description for Left Hand	L HAND code	L HAND TMU	L HAND Q x	TOTAL TMU	R HAND N x	R HAND TMU	R HAND code	RIGHT HAND Description for	RIGHT HAND
		zík k tělu, změna směru				150,0	10	15	W-P	střední cesta k vozíku (mezi pracovišti)	5,4
0,6		sáhnout na vozík	R40B	15,6	1	15,6	1	15,6	R40B	sáhnout na vozík	0,6
0,1		uchopit vozík	G1A	2	1	2,0	1	2	G1A	uchopit vozík	0,1
0,3		vliv hmotnosti vozíku	SC10/2	7,3	1	7,3	1	7,3	SC10/2	vliv hmotnosti vozíku	0,3
0,6		přítáhnout vozík	M30B10/2	15,49	1	15,5	1	15,49	M30B10/2	přítáhnout vozík	0,6
						18,6	1	18,6	TBC 1	otočení o 45°	0,7
		cesta s vozíkem				2550,0	150	17	W-PO	převést vozík k uličce	91,8
0,2		doumstit vozík	M10B	6,8	1	6,8	1	6,8	M10B	doumstit vozík	0,2
0,1		pustit vozík	RL1	2	1	2,0	1	2	RL1	pustit vozík	0,1
						37,2	1	37,2	TBC 2	otčit se o 180°	1,3
						1800,0	120	15	W-P	cesta zpět na pracovní pozici	64,8
		basic time in TMU		49		4 605		152			
		basic time in second		1,8		165,8		5,5			

Z tabulky lze vidět, že součet času potřebného k přemístění vozíku z uličky na pozici. Součet všech manimulačních časů lze vidět níže.

Součet všech časů

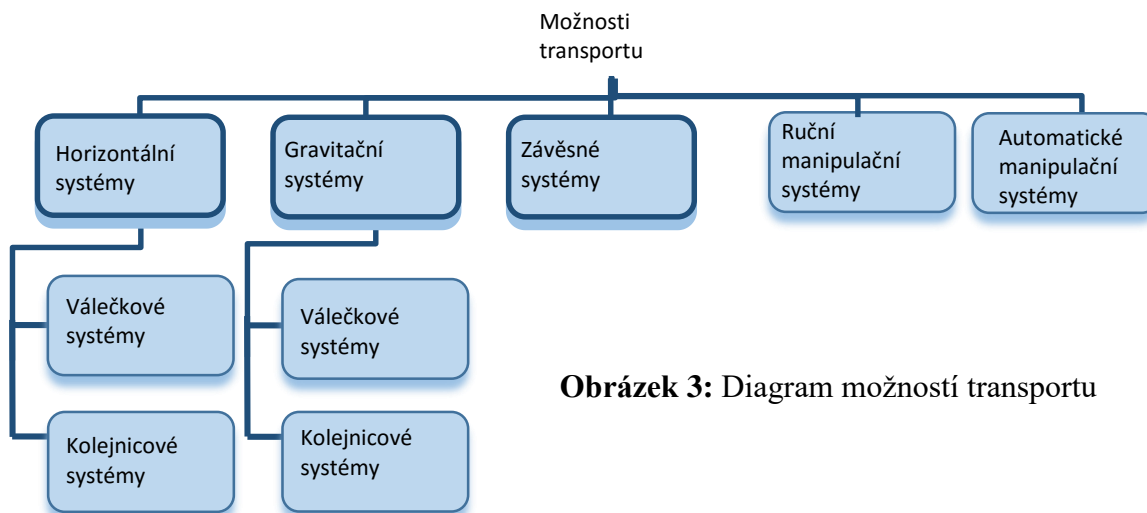
- transport 1 – 12,6s
- transport 2 – 165,8s
- transport 3 – 8,8s
- transport 4 – 18,0s
- suma:205,2s**

Závěr

Celkové časové náklady na transport s vozíky jsou rovny součtu dílčích časů, které byly detailně popsány výše. Celkové časy potřebné k manipulaci s vozíky jsou 205 s.

1.3 Průzkum trhu

Po detailním prozkoumání internetu, literatury a dalších zdrojů zabývajících se transportními zařízeními a po kontaktování prodejců specializujících se na danou problematiku bylo vytvořeno následující rozdělení možností pro transportování dílů mezi procesy molding a HVAC.



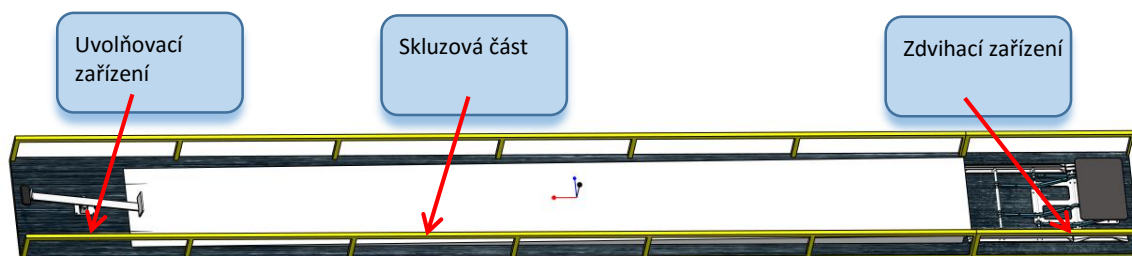
Obrázek 3: Diagram možností transportu

Jak lze pozorovat, rozdělení je platné pouze pro mechanické pole. Přes zjevné výhody vyšších polí a vzhledem ke stupni dokonalosti jako je pole akustické, tepelné, chemické, elektrické, biomechanické a další, jsou náklady na aplikaci těchto polí vyšší, proto bylo uvažováno čistě s mechanickým polem, které je v současné době pro tuto aplikaci pravděpodobně nejlevnější a nejdostupnější.

1.4 Konstrukční návrh skladovacího zařízení

V této kapitole bude představeno celé skladovací zařízení. V první fázi bude zařízení představeno jako celek a následně budou představeny dílčí části včetně výpočtu.

Na následujícím obrázku lze vidět koncept skladovacího zařízení, jehož délka je 10m a šířka 1m. Toto zařízení se skládá ze třech částí a to z uvolňovacího zařízení s oddělovačem, ze skluzu a ze zdvihacího zařízení.

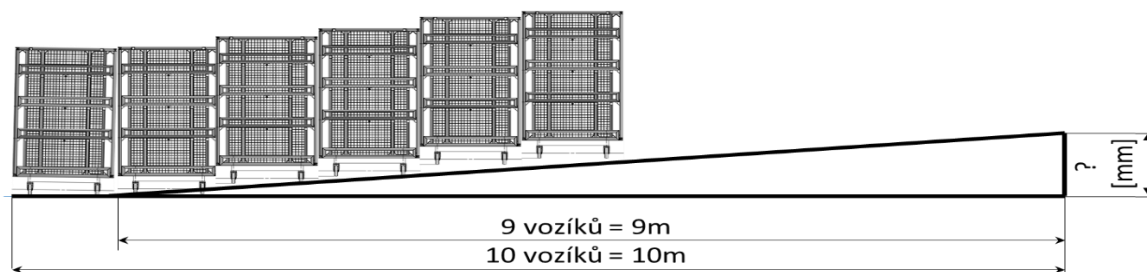


Obrázek 4: Podrobný konstrukční návrh zavážecího zařízením

Skluzová část

Test byl proveden na 6m dlouhé dráze, kde rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším místem byl 7,1 [cm]. 7,1 [cm] je hodnota zjištěná z podobnosti trojúhelníku, kde je délka 1 odvěsny 10 [m] a délka druhé odvěsny 119 [mm] Pro test bylo použito 10 původních vozíků bez úprav.

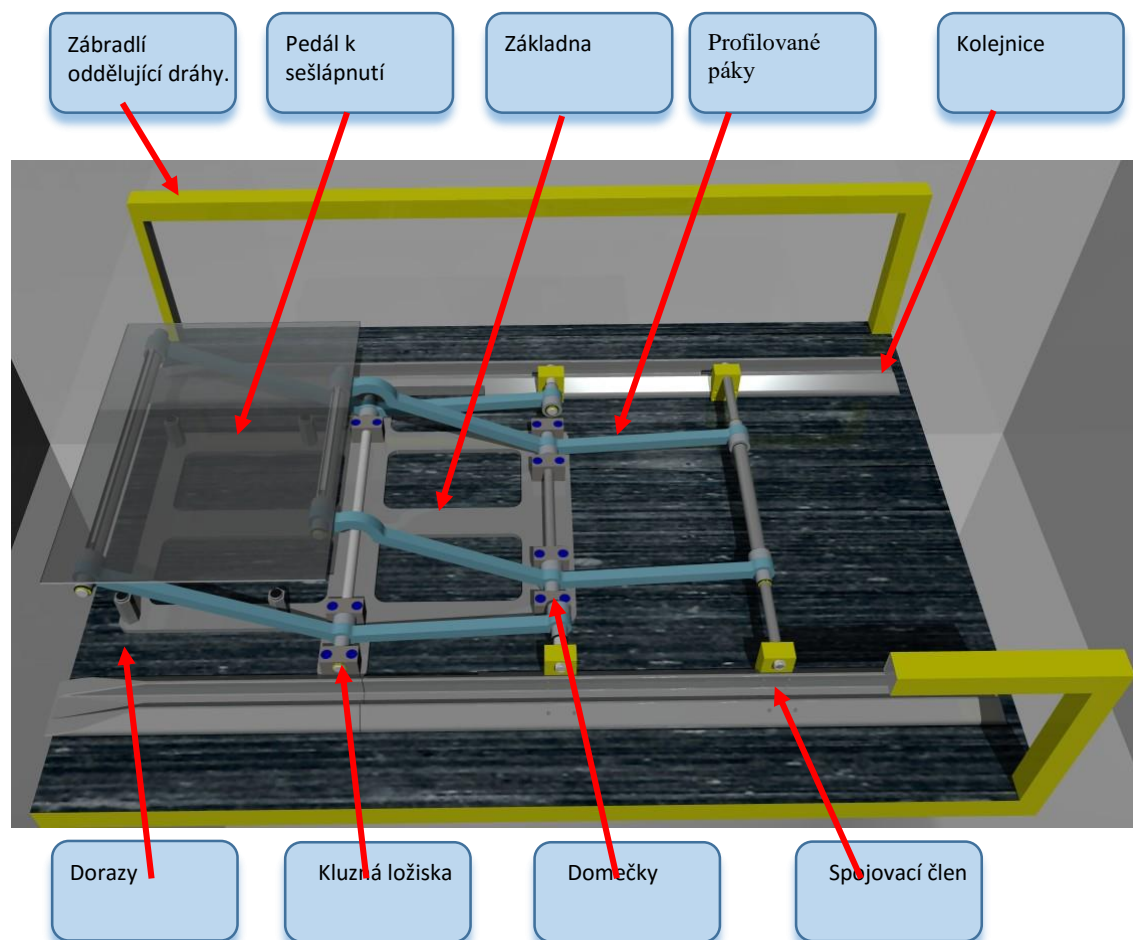
Hmotnost vozíku byla 45 ± 5 [kg]. Důvodem testování bylo ověřit rozjezd v libovolném místě dráhy směrem dolů, tedy ověřit, že nebude docházet k zasekávání vozíků na nakloněné rovině. Test byl prováděn tak, že každý vozík byl zastaven v 5 náhodných místech na skluzu viz obr.5 a následně puštěn a bylo sledováno, zda se vozík uvede do pohybu. Dále bylo provedeno několik nárazů vozíků do sebe. Tímto testem bylo zjištěno, že vozíky se viditelně nedeformují.



Obrázek 5: skluzová část

1.5 Zdvihací zařízení

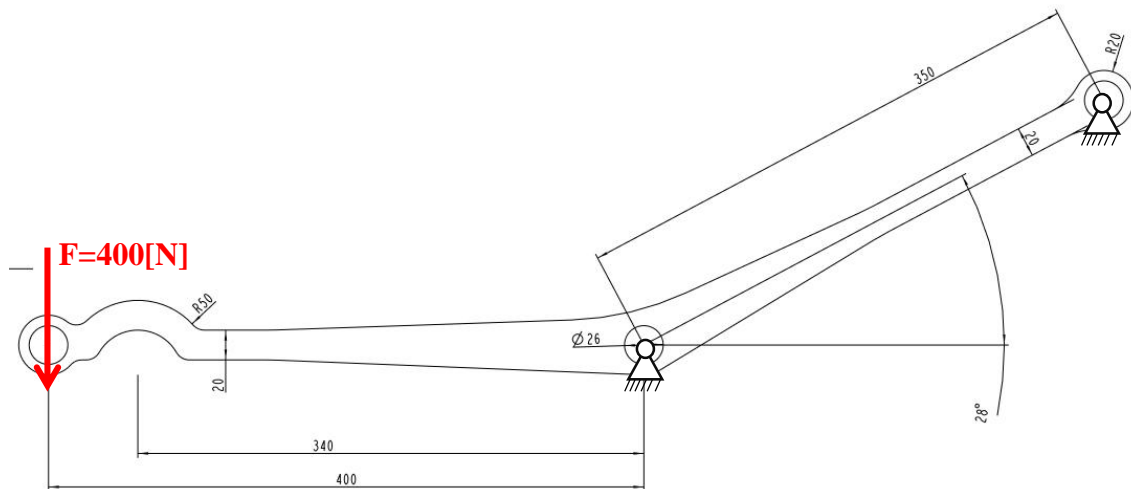
Zdvihací zařízení slouží primárně ke zdvihání vozíků mezi procesy Molding a HVAC, na toto zařízení jsou kladeny konstrukční a bezpečnostní požadavky a také musí vyhovovat níže specifikovaným parametrům. Zdvihací zařízení vychází ze zadaných parametrů daných firmou, normou a předchozích výsledků. Níže bude provedeno shrnutí požadavků.



Obrázek 6: Zdvihací zařízení

Kontrola ramene na ohyb.

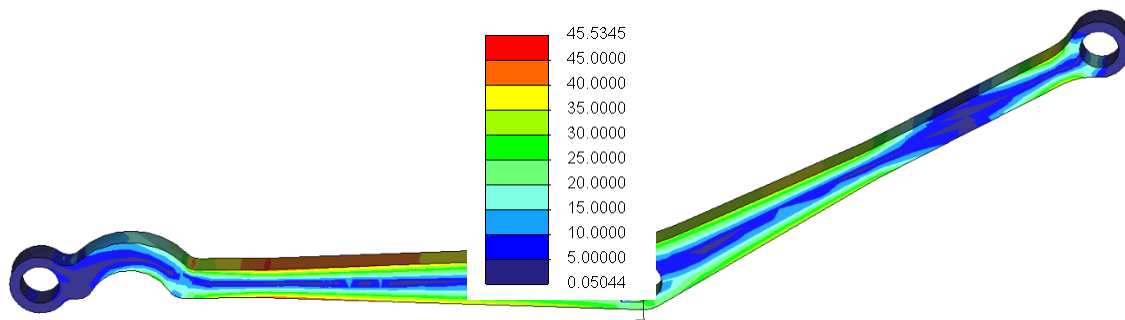
V celé soustavě jsou celkem 2 páry ramen, pro naši kontrolu použijí tvarově složitější rameno, jehož skica je na obrázku 34.



Obrázek 7: skica zatěžovaného ramene

Napětí v rameni

Na následujícím obrázku lze vidět zatížení ramene v MPa, jelikož je v kritických částech rameno rozšířené a zaoblené, přenesla se nám pozice největšího napětí do středné pozice a jeho velikost je 45,5 MPa.



Obrázek 8: výsledné zatížení ramene [MPa]

Jelikož se zdvihacím zařízením budou pracovat lidé, volím bezpečnostní koeficient = 5.

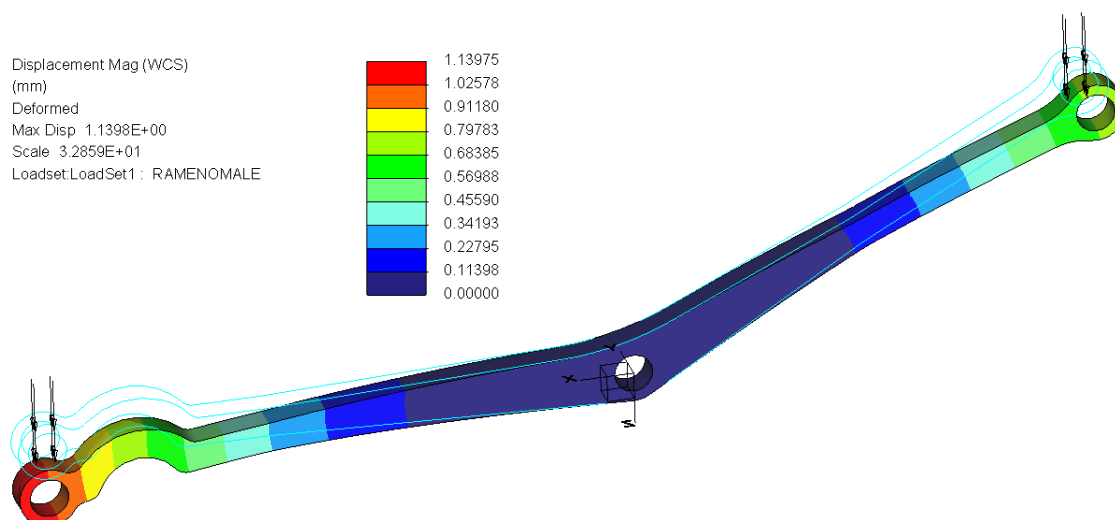
Volba materiálu

$$\sigma_{pt} = \sigma_{skut} \cdot k = 45,5 \cdot 5 = 227 \text{ MPa}$$

Volím ocel 11 373 s $\sigma_{pt} = 370 \text{ MPa}$ se zaručenou svařitelností

Deformace ramene

Na následujícím obrázku lze vidět průběh deformace ramene. Z obrázku je patrné, že maximální deformace bude 1,14 mm, a to na konci tvarově složitějšího ramene.

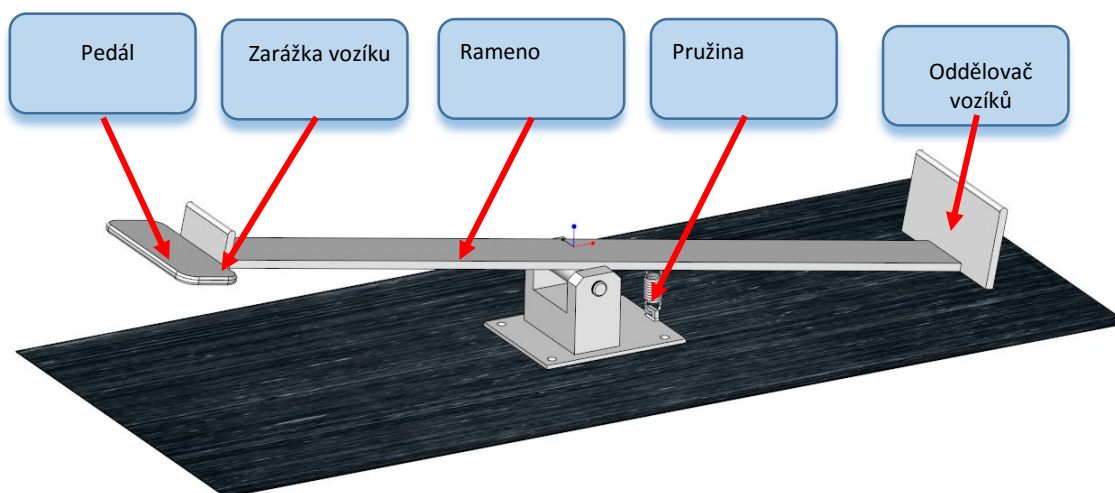


Obrázek 9: Deformace ramene [mm]

Závěr: Deformace vzniklá zatížením při nejhorším možném druhu zatížení je 1,14 mm což je z hlediska funkčnosti a konstrukčního provedení zařízení zanedbatelné a nemělo by to mít vliv na funkčnost zařízení.

1.6 Uvolňovací zařízení

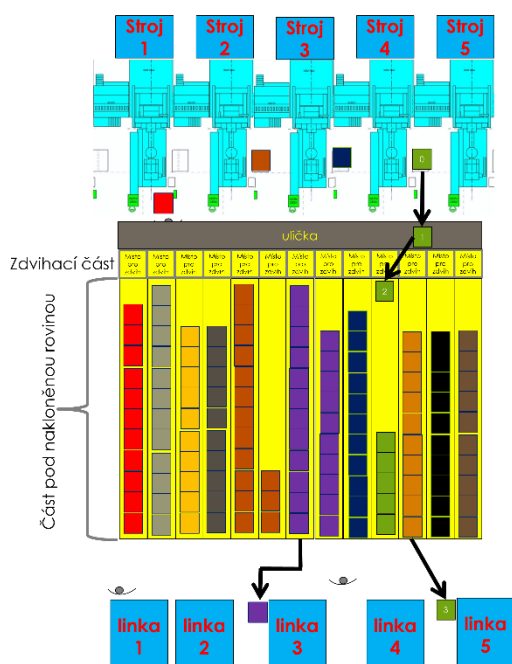
Toto zařízení slouží k postupnému uvolňování vozíků ze skluzu. Inspirace proběhla na základě již funkčního a již aplikovaného řešení ve firmě Denso a velikostně upraveno pro naše potřeby. Zařízení pracuje na principu, kdy se o zarážku zastaví vždy nejnižší postavený vozík – tedy vozík na konci. Páku v této poloze udržuje pružina. Pro uvolnění je nutno sešlápnout pedál v přední části. Následně se vozík uvolní a lze ho vytáhnout. Při tomto procesu oddělovač vozíků přidrží vozík za tímto vozíkem. Následně zavážeč vozík vytáhne. Zarážka vozíku při vytahování klouže po dně vytahovaného vozíku a zachytí vozík za ním jedoucí.



Obrázek 10: uvolňovací zařízení

Závěr: Toto zařízení je konstrukčně jednoduché a v určitých modifikacích v praxi již využívané, tedy zde nejsou očekávány žádné problémy.

1.7 Hodnocení výsledného řešení



Obrázek 11 :Nový dílčí layout

V následující tabulce lze vidět předpokládaný čas změnového úseku manipulace s vozíkem, jehož časová náročnost bude 20,7 s.

Tabulka 2: MTM-1 analýza změnového bodu zavážení

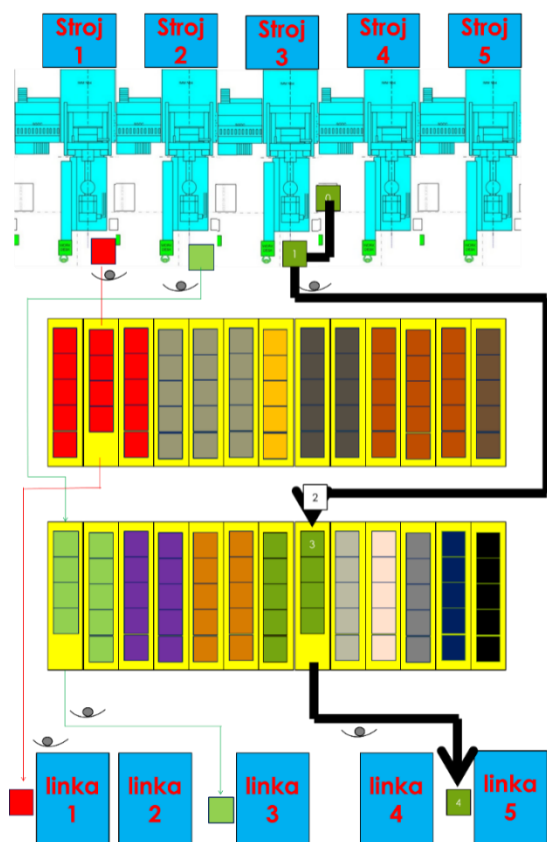
#	LEFT HAND	LEFT HAND Description for Left Hand	L HAND code	L HAND TMU	L HAND Q x	TOTAL TMU	R HAND N x	R HAND TMU	R HAND code	RIGHT HAND Description for	RIGHT HAND
		cesta pro vozík a zpět				150,0	10	15	W-P	cesta z předchozí pozice k vozíku	5,4
0,6		sáhnout na vozík	R40B	15,6	1	15,6	1	15,6	R40B	sáhnout na vozík	0,6
0,1		uchopit vozík	G1A	2	1	2,0	1	2	G1A	uchopit vozík	0,1
0,3		vliv hmotnosti vozíku	SC10/2	7,3	1	7,3	1	7,3	SC10/2	vliv hmotnosti vozíku	0,3
0,6		přítáhnout vozík	M30B10/2	15,49	1	15,5	1	15,49	M30B10/2	přítáhnout vozík	0,6
						18,6	1	18,6	TBC 1	otočení o 45°	0,7
						170,0	10	17	W-PO	převést vozík k dané lokaci	6,1
								7,9	M10C	umístit vozík do kolejnice	
						14,7	1	14,7	P1SSD	doumístit vozík do nájezdu	0,5
						25,2	1	25,2	M80B	přesunout vozík na zdvihací plošinu	0,9
						17,0	1	17	W-PO	krok na pedál	0,6
						40,0	1	40		čekání na zdvihnutí plošiny	
						25,2	1	25,2	M80B	odstrčení vozíku z plošiny na skluz	0,9
						2,0	1	2	RL1	pustit vozík	0,1
						15,0	1	15	W-P	sestoupit z pedálu	0,5
						18,6	1	18,6	TBC 1	otočení o 45°	0,7
						37,2	1	37,2	TBC 2	dootočít se	1,3
		basic time in TMU		40		574		294			
		basic time in second		1,5		20,7		10,6			

Celkový čas potřebný k manipulaci získáme součtem všech dílčích časových úseků. Součet časů

transport 1 – 12,6s – z pracovní pozice do uličky
 transport 2 – 20,7s – z uličky do skladu
 transport 3 – 18,0s – ze skladu na pozici
Suma:51,3s

1.8 Porovnání řešení vzhledem k původnímu stavu

Na následujícím obrázku č. 48 (nalevo) lze vidět původní koncept zavážení a Layout a na obrázku č. 49 (napravo) lze vidět plánovaný koncept zavážení a Layout.



Obrázek 12: původní dílčí Layout

Norma spotřeby času MTM-1:205,2 s

Potřebný počet operátorů

v 1. směně:8

v 2. směně: 5

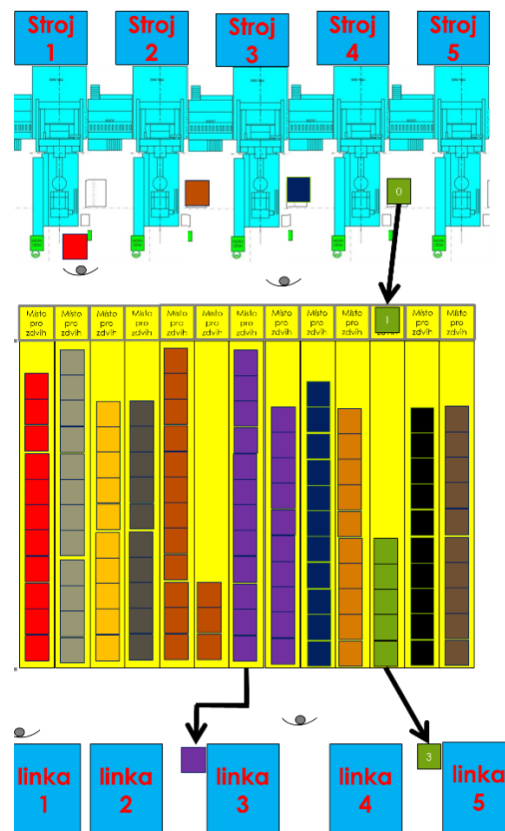
v 3. směně: 2

v celém dni:15

FIFO: Ne: v rámci dávky

měsíční náklady na zavážecí:450 000Kč

(náklady na 1 zavážecí = 30 000Kč)



Obrázek 13: nový dílčí Layout

Norma spotřeby času MTM-1:51,3 s

Potřebný počet operátorů

v 1. směně:2 (75%)

v 2. směně:2 (60%)

v 3. směně:1 (50%)

v celém dni:5 (66,7%)

FIFO: Ano: v rámci dávky

měsíční náklady na zavážecí:150 000Kč

Na následujícím grafu lze vidět bilance nákladů na zavážeče za dobu 1 měsíce před a po realizaci zavážecího zařízení v rámci směn.



Graf 1: bilance nákladů na operátory ve směnách

Z výše uvedených informací a z grafu je patrné, že po přestavbě stávající skladové plochy na transportní zařízení v počtu 40 ks dojde k měsíční úspoře 10 zavážeců tedy 300 000Kč na nákladech na operátory.

Na následujícím obrázku lze vidět cenovou nabídku skladovacího zařízení od dodavatelské firmy.

Detail nabídky dodavatelské firmy:

- | | |
|-----------------|-----------------------|
| 1. Kus | 95 000Kč |
| 2. 2-40 kus | 51 000Kč |
| 3. Implementace | 120 000Kč |
| 4. Roční údržba | 5% z ceny = 180 000Kč |

Suma = 95 000* 1+ 51 000* 39+120 000+ 180 000 = 2 234 000

Suma=2 234 000Kč

Návratnost investice

$$T = \frac{2\,234\,000}{300} = 7,4 \text{ měsíců}$$

Závěr: Návratnost po implementování zavážecího zařízení je 7,4 měsíců.

1.9 Závěr

V této diplomové práci bylo navrženo skladovací zařízení pro manipulaci s vozíky o rozměru 1x1x1,5m (š, v, h). Toto zařízení bylo konstruováno pro manipulaci s vozíky z materiálu SUS o maximální hmotnosti vozíku 40 kg s bezpečností $k=5$. Dále byly uvažovány všechny parametry vozíků dle zadání.

Navržené skladovací zařízení se skládá ze třech částí. Ve skluzové části byla ověřena výška skluzu, bylo testováno rozjetí vozíků v 5 místech na skluzu a náraz dvou vozíků do sebe. Dále se tato práce skluzem nezabývala. Zdvihací zařízení bylo navrženo pro zdvih do výšky skluzu s možností nastavení výšky zdvihu, za pomoci dorazů. Zařízení leží na zemi a není nutno ho zapouštět do země. Za klíčovou část byla považována páka, která byla navržena s bezpečností $k=5$. Zařízení je plně mechanické a bez pohonu, jediná hnací síla je síla vyvozená hmotností člověka. Uvolňovací zařízení je mechanického charakteru a obsahuje oddělovač vozíků. Úspora aplikací zařízení byla ověřena metodou MTM-1 a byla vypočtena návratnost při koupi 40 těchto zařízení na 7 měsíců a to na základě úspory 10 zavážeců denně při měsíčních nákladech na zavážecce 30 000Kč a při investici do zavážecího zařízení o velikosti 2 234 000 Kč.

Dále byla v této diplomové práci představena problematika skladování ve firmě DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o. mezi procesy Molding a Hvac. Následně byla provedena analýza současného stavu, kde jednotlivé časové úseky byly analyzovány metodou MTM-1. Bylo provedeno kritické hodnocení stávajícího stavu, identifikace inovačních příležitostí a seznam inovačních příležitostí. Dále byl proveden průzkum trhu vzhledem k možnostem transportu. Byly představeny trendy v oblasti manipulace a jednotlivé možnosti transportu zařízení. Následně bylo vyhotoveno 7 konceptů, které byly pomocí SWOT analýzy, hrubé a jemné rozhodovací matice porovnány a byla vybrána jedna varianta, která byla zpracována v detailní konstrukční řešení včetně výkresové dokumentace. Nejvíce zatěžované díly byly zkontrolovány pomocí MKP metody v programu Creo2. Následně byla provedena MTM-1 analýza finálního konceptu zavážení, pomocí které byla vypočtena velikost předpokládané úspory. V poslední kapitole byla vypočtena návratnost investice.

1.10 Seznam použité literatury

- [1] – MAŠÍN Ivan. *Inovační inženýrství, plánování a návrh inovovaného výrobku*, Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012. 168 s. ISBN: 978-80-7372-852-6
- [2] – LEPŠÍK Petr. *Plánování a řízení společných projektů*, Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012. 124s. ISBN: 987-80-7372-920-2
- [3] – MAŠÍN Ivan, JIRMAN Pavel, *Metody systematické kreativity*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012. 132s. ISBN: 978-80-7372-853-3
- [4] – LIKER, J. *Tak to dělá Toyota*. 1. vyd. Praha: Management Press, 2007. 390 s. ISBN 978-80-7261-173-7.
- [5] SHINGLEY, J., MISCHKE, C., BUDYNAS, R. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. Brno: NAKLADATELSTVÍ VUTIUM, 2010. 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0
- [6] KUBÍČKOVÁ, L., RAIS, K. *Řízení změn ve firmách a jiných organizacích*. 1. vyd. Praha: GRADA PUBLISHING, 2012. 136 s. ISBN 978-80-247-4564-0.

DEMONSTRAČNÍ PŘEDMĚT K VÝUCE DYNAMIKY

Gregorová Diana

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

Abstrakt: Obsahem této práce je řešení problému dynamiky soustavy těles. Jako demonstrační předmět bylo použito těleso s rotujícím nevyvážkem. K řešení dynamiky byly sestaveny rovnice rovnováhy, specifikace sil a kinematické rovnice. Samotný výpočet byl proveden pomocí softwaru Maple. V závěru byly výpočty porovnány s praktickým pokusem.

Klíčová slova: dynamika, soustava těles, nevyvážek, Maple

1 Úvod

Vybrala jsem si odbornou práci na téma dynamika soustavy těles. Tato práce spočívá v samotném fyzickém vytvoření soustavy těles, sestavením příslušných dynamických rovnic, vypočtením doplňkových hodnot, samotné řešení dynamiky pohybu v softwaru Maple a vyhodnocení výsledků. Samotný model byl sestaven ze stavebnice Lego Mindstorm. Excentr s nevyvážkem byly zadány do výroby na základě předem vytvořených výkresů.

2 Dynamika soustavy

Demonstrační předmět je popsán ve třech systémech. Základní rám 1 je popsán souřadnicovým systémem x_1, y_1 . Samotný předmět se pak skládá z tělesa 2 a tělesa 3, popsanými souřadnicovými systémy x_2, y_2 a x_3, y_3 . Těleso 2 je hlavní část demonstračního předmětu, ve kterém se nachází motor a dotýká se základního rámu nožičkami v bodech A a B. Je popsáno hmotností m_2 , polohou těžiště T_2 , které je potřeba určit, a celkovými rozměry. Těleso 3 představuje excentr s nevyvážkem. Je popsáno hmotností m_3 a celkovými rozměry. Polohu těžiště T_3 , polohu středu otáčení (bod C) a moment setrvačnosti J_s je třeba určit. V neposlední řadě je také potřeba určit koeficient tření f mezi demonstračním předmětem a základním rámem (podložkou).

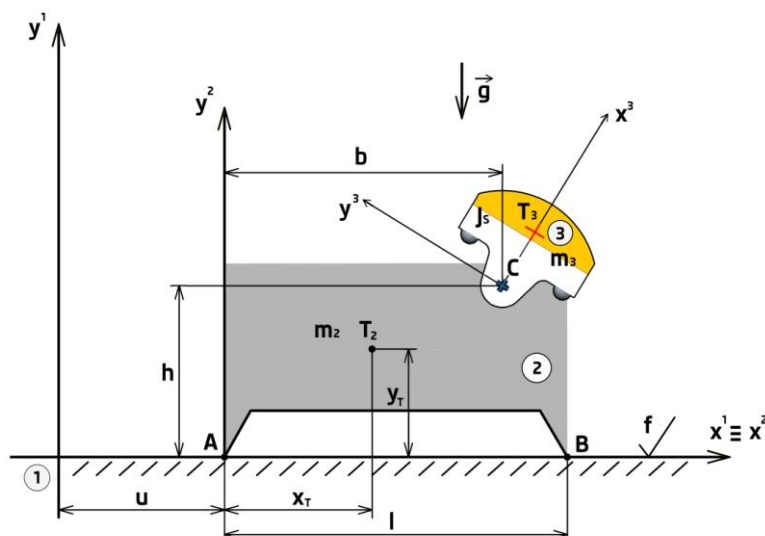


Schéma 1 : Dynamické schéma soustavy

2.1 Kinematické schéma

2.1.1 Kinematické schéma tělesa 2

Kinematika tělesa 2 se skládá pouze z posuvného pohybu ve směru osy x , kdy se těleso pohybuje rychlostí v se zrychlením a . Okamžitá poloha je pak dána vektorem u .

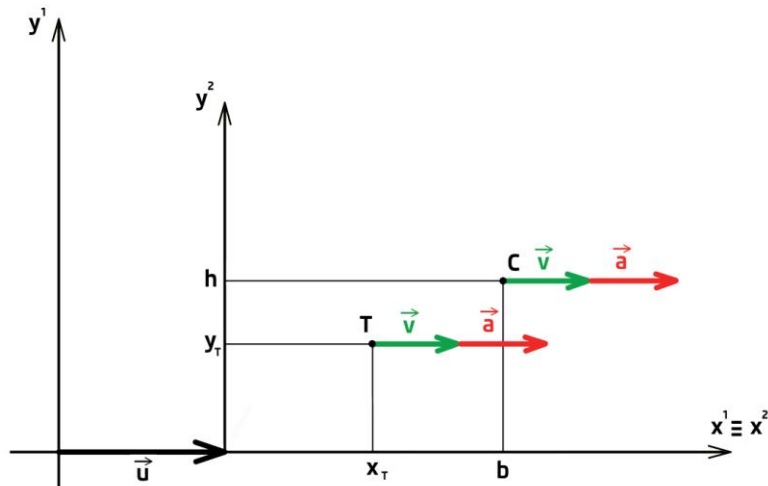


Schéma 2 : Kinematické schéma tělesa 2

2.1.2 Kinematické schéma tělesa 3

Kinematika tohoto tělesa je složena z rotačního a posuvného pohybu. Nevývažek rotuje okolo bodu C s okamžitou výchylkou φ s úhlovou rychlostí ω a s úhlovým zrychlením α . Zároveň se těleso posouvá ve směru osy x rychlostí v a se zrychlením a .

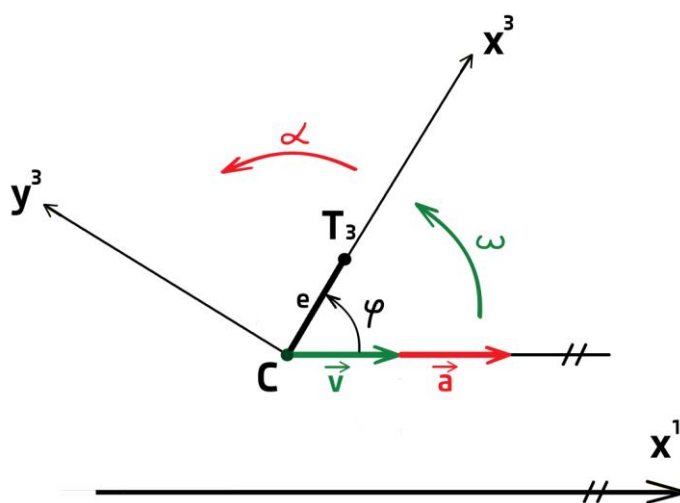


Schéma 3 : Kinematické schéma tělesa 3

2.2 Silové schéma

2.2.1 Uvolnění tělesa 2

Těleso 2 se dotýká základního rámu v bodech A a B , kde na něj působí třecí síly T_A , T_B a normálové síly N_A , N_B . V těžišti T_2 působí gravitační síla G_2 a síla dynamická D_2 . V bodě C je těleso 2 spojeno s tělesem 3, kde působí reakce R_x , R_y a hnací moment M_h .

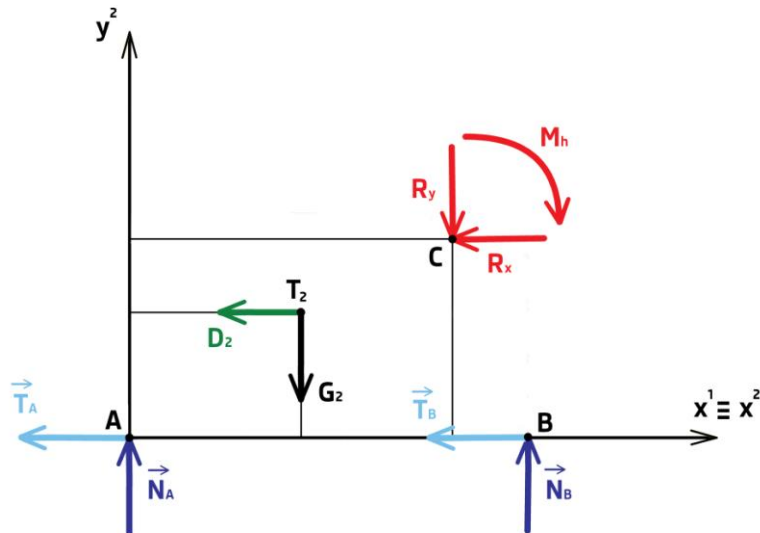


Schéma 4 : Silové schéma tělesa 2

2.2.2 Uvolnění tělesa 3

Těleso 3 je excentr s nevývažkem. Ve středu otáčení C působí reakce od tělesa 2 R_x a R_y . V těžišti T_3 dále pak působí gravitační síla G_3 , dynamická síla D_3 , odstředivá síla O a tečná síla dynamická T . Na těleso 3 působí ještě hnací moment M_h a moment dynamický M_D .

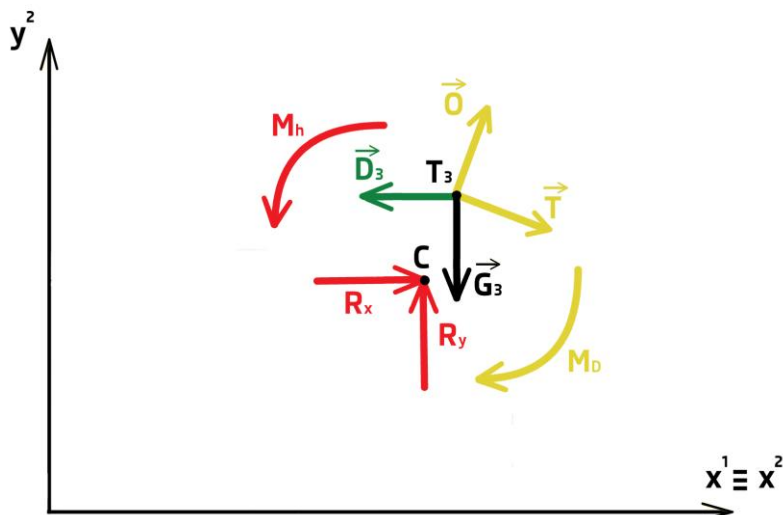


Schéma 5 : Silové schéma tělesa 3

2.3 Rovnice dynamické rovnováhy

Po zkreslení kinematických a silových schémat obou těles můžeme přistoupit k sestavení samotných rovnic rovnováhy zvlášť pro těleso 2 a zvlášť pro těleso 3.

2.3.1 Rovnice dynamické rovnováhy tělesa 2

Rovnice rovnováhy pro těleso 2 jsou vztaheny k souřadnicovému systému x_2, y_2 . První rovnice je sestavena ze složek sil ve směru osy x , druhá rovnice je sestavena ze složek sil ve směru osy y a poslední rovnice je momentová, která je vztahena k těžišti tělesa (k bodu T_2).

$$\begin{aligned} -R_x - T_A - T_B - D_2 &= 0 \\ -G_2 - R_y + N_A + N_B &= 0 \end{aligned}$$

$$Mh + (h - y_T) * R_x + (x_T - b) * R_y - x_T * N_A + (l - x_T) * N_B - y_T * (T_A + T_B) = 0$$

2.3.2 Rovnice dynamické rovnováhy tělesa 3

Rovnice rovnováhy pro těleso 3 jsou vztaheny k souřadnicovému systému x_1, y_1 , neboť potřebujeme znát okamžitou polohu neváhy vzhledem k základnímu rámu. Stejně tak, jako u tělesa 2, je první rovnice sestavena ze složek sil ve směru osy x , druhá rovnice je sestavena ze složek sil ve směru osy y a poslední rovnice je momentová, která je vztahena k těžišti tělesa (k bodu T_3).

$$\begin{aligned} R_x - D_3 + O * \cos \varphi + T * \sin \varphi &= 0 \\ -G_3 + R_y + O * \sin \varphi - T * \cos \varphi &= 0 \\ M_h + e * (R_x * \sin \varphi - R_y * \cos \varphi) - M_D &= 0 \end{aligned}$$

2.4 Specifikace sil

Dalším důležitým krokem je potřeba specifikovat některé síly jako jsou síly gravitační, dynamické (doplňkové) síly, odstředivá síla, tečná síla dynamická, dynamický moment a síly třecí.

$$\begin{aligned} G_2 &= m_2 * g \\ G_3 &= m_3 * g \\ D_2 &= m_2 * a(\varphi) \\ D_3 &= m_3 * a(\varphi) \\ O &= m * e * \omega^2 \\ T &= m * e * \alpha \\ M_D &= J_s * \alpha \\ T_A &= \text{sgn}(v(\varphi)) * f * N_A \\ T_B &= \text{sgn}(v(\varphi)) * f * N_B \end{aligned}$$

2.5 Kinematika

Kinematika popisuje pohyby těles, které jsou vyjádřeny následujícími rovnicemi.

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d\varphi}{d\varphi} * \frac{dv}{dt} = \omega * \frac{dv}{d\varphi}$$

$$v = \frac{du}{dt} = \frac{d\varphi}{d\varphi} * \frac{du}{dt} = \omega * \frac{du}{d\varphi}$$

2.6 Řešení

Posledním a zároveň možná nejdůležitějším bodem je samotné řešení soustavy. To zahrnuje měření základních veličin (rozměry a hmotnost), získání doplňkových hodnot a simulace pomocí softwaru Maple.

2.6.1 Doplňkové hodnoty

Koeficient tření – Tuto hodnotu jsem získala pomocí přístroje na měření tření, tribometru.

Těžiště tělesa 2 – Těžiště tělesa 2 jsem získala pomocí vážení, kdy jsem vždy jednu stranu předmětu položila na váhu a druhou podepřela tak, aby celé těleso zůstalo v rovnováze.

Těžiště tělesa 3, excentricita a moment setrvačnosti – Těleso 3 jsem celé vymodelovala v softwaru Creo, pomocí něhož jsem získala moment setrvačnosti, polohu těžiště T_3 , tudíž i excentricitu.

2.6.2 Řešení pomocí softwaru Maple

Celkový pohyb demonstračního tělesa je natolik složitý, že jsem přistoupila k řešení pomocí matematického softwaru Maple. Do tohoto softwaru jsem zadala všechny rovnice rovnováhy, specifikace sil, kinematiku pohybu. Rovnice jsem postupně upravovala v softwaru tak, abych získala všechny neznámé.

Samotné řešení v softwaru Maple:

```
> with(plots):
with(plottools):
with(linalg):
```

Rovnice dynamicke rovnovahy

Teleso 2

```
> r1:= -Rx-Ta-Tb-D2=0;
r2:= -G2-Ry+Na+Nb=0;
r3:= -Mh+(h-yt)*Rx+(xt-b)*Ry-xt*Na+(1-xt)*Nb-yt*(Ta+Tb)=0;
```

$$r1 := -Rx - Ta - Tb - D2 = 0$$

$$r2 := -G2 - Ry + Na + Nb = 0$$

$$r3 := -Mh + (h - yt) Rx + (xt - b) Ry - xt Na + (1 - xt) Nb - yt (Ta + Tb) = 0$$

Teleso 3

```

> r4:=Rx-D3+Od*cos(phi)+T*sin(phi)=0;
r5:=-G3+Ry+Od*sin(phi)-T*cos(phi)=0;
r6:=Mh+e*(Rx*sin(phi)-Ry*cos(phi))-Md=0;
      r4 := Rx - D3 + Od cos(phi) + T sin(phi) = 0
      r5 := -G3 + Ry + Od sin(phi) - T cos(phi) = 0
      r6 := Mh + e (Rx sin(phi) - Ry cos(phi)) - Md = 0

```

Specifikace sil

```

> G2:=m2*g;
D2:=m2*a;
G3:=m3*g;
D3:=m3*a;
Od:=m3*e*omega^2;
T:=m3*e*alpha;
Md:=Js*alpha;
Ta:=signum(v(phi))*f*Na;
Tb:=signum(v(phi))*f*Nb;
      G2 := m2 g
      D2 := m2 a
      G3 := m3 g
      D3 := m3 a
      Od := m3 e ω2
      T := m3 e α
      Md := Js α
      Ta := signum(v(φ)) fNa
      Tb := signum(v(φ)) fNb

```

Kinematika

Teleso 3

```

> alpha:=0;
      α := 0

```

Teleso 2

```

> #v:=phi->omega*diff(u(phi),phi);
#a:=phi->omega*diff(v(phi),phi);

```

Reseni

Vyjadreni Rx a Ry z rovnice r4 a r5

```

> Rx:=solve(r4,Rx);
Ry:=solve(r5,Ry);
      Rx := m3 a - m3 e ω2 cos(φ)
      Ry := m3 g - m3 e ω2 sin(φ)

```

Dosazeni do rovnice r1, r2 a r3

```

> r1;r2;r3;
      -m3 a + m3 e ω2 cos(φ) - signum(v(φ)) fNa - signum(v(φ)) fNb
      - m2 a = 0
      -m2 g - m3 g + m3 e ω2 sin(φ) + Na + Nb = 0

```

$$\begin{aligned}
 & -Mh + (h - yt) (m_3 a - m_3 e \omega^2 \cos(\phi)) + (xt - b) (m_3 g \\
 & \quad - m_3 e \omega^2 \sin(\phi)) - xt Na + (l - xt) Nb \\
 & \quad - yt (\text{signum}(v(\phi)) f Na + \text{signum}(v(\phi)) f Nb) = 0
 \end{aligned}$$

Reseni soustavy rovnic r2 a r3 pro Na a Nb

```

> solve({r2,r3},{Na,Nb}):
assign(%);
> Na;Nb;

```

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{l} (-m_2 g l - m_3 g l + m_3 e \omega^2 \sin(\phi) l + Mh - h m_3 a \\
 & \quad + h m_3 e \omega^2 \cos(\phi) + yt m_3 a - yt m_3 e \omega^2 \cos(\phi) + b m_3 g \\
 & \quad - b m_3 e \omega^2 \sin(\phi) + xt m_2 g + yt \text{signum}(v(\phi)) f m_2 g \\
 & \quad + yt \text{signum}(v(\phi)) f m_3 g - yt \text{signum}(v(\phi)) f m_3 e \omega^2 \sin(\phi)) \\
 & \frac{1}{l} (Mh - h m_3 a + h m_3 e \omega^2 \cos(\phi) + yt m_3 a - yt m_3 e \omega^2 \cos(\phi) \\
 & \quad + b m_3 g - b m_3 e \omega^2 \sin(\phi) + xt m_2 g + yt \text{signum}(v(\phi)) f m_2 g \\
 & \quad + yt \text{signum}(v(\phi)) f m_3 g - yt \text{signum}(v(\phi)) f m_3 e \omega^2 \sin(\phi))
 \end{aligned}$$

Vyjadreni Mh z rovnice r6

```

> Mh:=solve(r6,Mh);

```

$$Mh := -e m_3 (\sin(\phi) a - \cos(\phi) g)$$

Rovnice r1 a nasledne osamostatneni zrychleni a

```

> r1;
a:=solve(r1,a);

```

$$\begin{aligned}
 & -m_3 a + m_3 e \omega^2 \cos(\phi) + \frac{1}{l} (\text{signum}(v(\phi)) f (-m_2 g l - m_3 g l \\
 & \quad + m_3 e \omega^2 \sin(\phi) l - e m_3 (\sin(\phi) a - \cos(\phi) g) - h m_3 a \\
 & \quad + h m_3 e \omega^2 \cos(\phi) + yt m_3 a - yt m_3 e \omega^2 \cos(\phi) + b m_3 g \\
 & \quad - b m_3 e \omega^2 \sin(\phi) + xt m_2 g + yt \text{signum}(v(\phi)) f m_2 g \\
 & \quad + yt \text{signum}(v(\phi)) f m_3 g - yt \text{signum}(v(\phi)) f m_3 e \omega^2 \sin(\phi)) \\
 & \quad - \frac{1}{l} (\text{signum}(v(\phi)) f (-e m_3 (\sin(\phi) a - \cos(\phi) g) \\
 & \quad - h m_3 a + h m_3 e \omega^2 \cos(\phi) + yt m_3 a - yt m_3 e \omega^2 \cos(\phi) \\
 & \quad + b m_3 g - b m_3 e \omega^2 \sin(\phi) + xt m_2 g + yt \text{signum}(v(\phi)) f m_2 g \\
 & \quad + yt \text{signum}(v(\phi)) f m_3 g - yt \text{signum}(v(\phi)) f m_3 e \omega^2 \sin(\phi)) \\
 & \quad - m_2 a = 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a := & \frac{1}{m_3 + m_2} (m_3 e \omega^2 \cos(\phi) - \text{signum}(v(\phi)) f m_2 g \\
 & \quad - \text{signum}(v(\phi)) f m_3 g + \text{signum}(v(\phi)) f m_3 e \omega^2 \sin(\phi))
 \end{aligned}$$

Sestaveni soustavy diferencialnich rovnic

```

> dr1:=diff(v(phi),phi)=a/omega;
dr2:=diff(u(phi),phi)=v(phi)/omega;

```


$$dr1 := \frac{d}{d\phi} v(\phi) = \frac{1}{(m3 + m2) \omega} (m3 e \omega^2 \cos(\phi) - \text{signum}(v(\phi)) f m2 g - \text{signum}(v(\phi)) f m3 g + \text{signum}(v(\phi)) f m3 e \omega^2 \sin(\phi))$$

$$dr2 := \frac{d}{d\phi} u(\phi) = \frac{v(\phi)}{\omega}$$

Zadani konkrétních hodnot

```
> m2:=0.106; # g
m3:=0.049; # g
l:=0.128; # mm
xt:=0.05519; # mm
yt:=0.04018; # mm
b:=0.104; # mm
h:=0.068; # mm
e:=0.023; # mm
g:=9.81; # mm/s
f:=0.28; # 1
omega:=30; # 1/s2
```

```
m2 := 0.106
m3 := 0.049
l := 0.128
xt := 0.05519
yt := 0.04018
b := 0.104
h := 0.068
e := 0.023
g := 9.81
f := 0.28
omega := 30
```

Zobrazení soustavy dif. rovnic s konkrétními hodnotami

```
> dr1;dr2;
```

$$\frac{d}{d\phi} v(\phi) = 0.2181290322 \cos(\phi) - 0.09155999998 \text{signum}(v(\phi)) + 0.06107612902 \text{signum}(v(\phi)) \sin(\phi)$$

$$\frac{d}{d\phi} u(\phi) = \frac{1}{30} v(\phi)$$

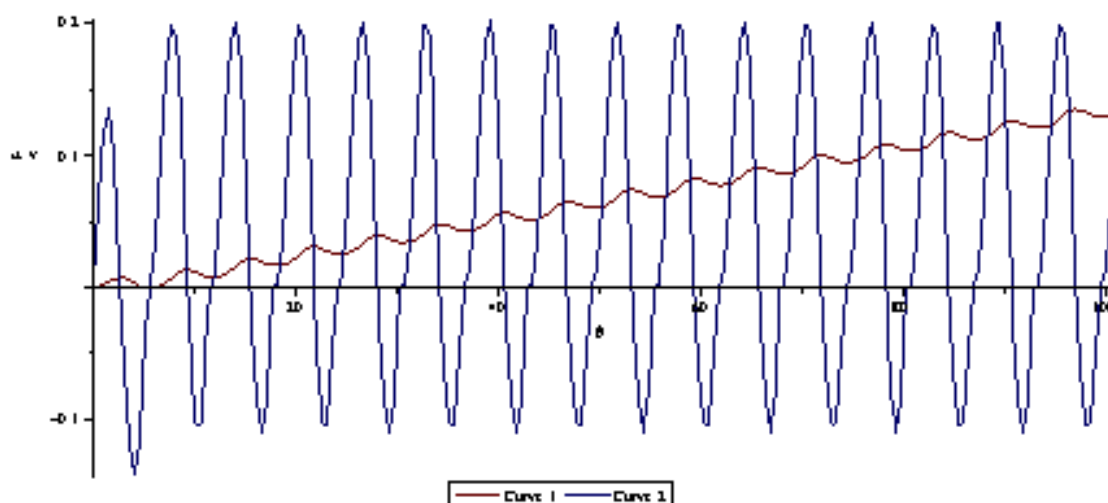
Řešení soustavy diferenciálních rovnic

```
> res:=dsolve({dr1,dr2,v(0)=0,u(0)=0},numeric,maxfun=5000000);
res := proc(x_rkf45) ... end proc
```

2.7 Výsledky

Konečný výsledek v softwaru je řešení soustavy diferenciálních rovnic. Vstupním parametrem pro řešení je hodnota φ (poloha nevyvážku). Výstupním parametrem je okamžitá poloha a rychlost celého demonstračního tělesa. Jako vedlejší výstupy mohou dále být hodnoty všech ostatních veličin (např.: třecí síly, normálové síly, reakce atd.).

Pro konkrétní zadané hodnoty: $m_2 = 0.106$ kg, $m_3 = 0.049$ kg, $l = 0.128$ m, $x_T = 0.05519$ m, $y_T = 0.04018$ m, $b = 0.104$ m, $h = 0.068$ m, $e = 0.023$ m, $g = 9.81$ m/s, $f = 0.28$, $\omega = 30$ 1/s2 mi vyšly následující výsledky:



Graf 1 : Graf závislosti okamžité polohy a rychlosti na φ

3 Závěr

Práce na téma dynamiky soustavy těles byla velmi zajímavá. Byla o to zajímavější, že k teoretickému výzkumu, sestavení rovnic rovnováhy, modelování dat nevyvážku, zjišťování těžiště, koeficientu tření a dalších výpočtů jsem vše mohla porovnat s praktickým pokusem a reálným pohybem opravdového fyzického modelu. Toto byl pro mne obrovský přínos, zda jsem postupovala správně a zda má teoretická práce vypovídající hodnotu v praktické situaci. Vypočtené výsledky se nakonec velmi přibližovaly těm naměřeným. V tomto vidím i přínos pro společnost. Podle mého názoru je přínosné pracovat v teoretické rovině řešení problémů spjaté s dynamikou soustavy těles a ušetřit tím nemalé prostředky a čas.

Práce, na které jsem pracovala má potenciál dalšího rozvoje. Už jen, že jsem pracovala s konstantní hodnotou omega. Bylo by zajímavé sledovat a řešit celou situaci s proměnnou hodnotou omega. A celé vše doplnit sérií pokusů na fyzickém modelu.

Literatura

- [1] BRADSKÝ, VRZALA: *Mechanika III – Dynamika*; skripta VŠST Liberec, 1986.

POSOUZENÍ MOŽNOSTI VÝROBY SKLENĚNÝCH NANOVLÁKEN

Bc. Jitka Kulifay

Sekce – STROJÍRENSTVÍ,

Fakulta strojní, 2. ročník

Magisterský studijní program – INOVAČNÍ INŽENÝRSTVÍ

Abstrakt: Diplomová práce se zaměřuje na problematiku zvláknování skelného materiálu vlivem vysokých hodnot viskozity a povrchového napětí, zmapování stávajícího stavu tvorby skleněných filamentů, včetně rozboru problematiky samostatných technologií.

Defekty dnešních zvláknovacích metod vykazují nedostatky v oblasti zachování průměru a velikost vlákna, délky filamentu a zástavbových prostor celého zařízení.

Vzhledem k zastaralým procesům zvláknění doprovázející vysoké hodnoty vlákněného průměru bylo nutné přistoupit k novému řešení opírající se o technologii polymerního elektrostatického zvláknování - elektrospinningu.

Klíčová slova: skelné vlákno, zvláknování, sklovina, elektrostatické zvláknění, sklářské vypalovací barvy

1 Úvod

Historie skleněných vláken je datována již roku 1800 př. n. l. kdy staří Egypťané využívali širší vlákna (průměr 3 – 5 mm), kterými vytvářeli svá proslulá balsamária neboli malé lahvičky obsahující vonné oleje, aromatické masti a parfémy (obr. 1). Technika tvorby dutých výrobků spočívala v postupném navíjení sklovitých vláken (vytahování z dávky skloviny z náběru) na hliněné jádro, [1].

Od 13. století n. l. (16. století rozkvět) benátská sklářská zahrnovali do svého rozmanitého umění skleněné tenké tyčinky (max. 3 mm průměr), viz obr. 2, vyráběných ručním vytahováním skloviny (sklářská píšťala, vytahovací kleště) z náběru upraveného barevným sklovitým vrstvením (přejímané sklo). Také přímé aplikace skleněného pramene (tvarování, lepení, protahování, lisování aj.) na výrobek plnily funkci nám tolik známé plastické dekorace (obr. 3). Výsledné optické a dekorativní efekty dodávaly sklu svůj věhlas, eleganci a unikát (vázy, číše, lustry), [2, 3].

A. D. Elbers (r. 1876) inicioval zvláknění skloviny (minerální materiál) v podobě vytékajícího proudu látky na rotující kolo opatřené lopatkami pro zajištění „rozstříku“ (kinetická energie, tříštění materiálu), [4].

Hermann Hammesfahr, nazýván jako "dědeček vláknové optiky" a sklolaminátu, roku 1880 patentoval vlastní vynález skleněného vlákna. Na světové výstavě v Chicagu roku 1892 byl představen výstřelek oděvnícké módy, šaty ze skleněného hedvábí (firma Libbey Glass Company). Základním nosným materiálem (osnova) bylo hedvábí a útek v podobě skelného vlákna, [5, 6, 7].



Obr. 1: Egyptská skleněná lahvička tvaru ryby



Obr. 2: Benátské sklo, optická dekorace obalováním tyčinkami



Obr. 3: Benátské sklo, ručně tvarované dekorace v oblasti nožky číše

2 Současný stav - zvláknování skelného materiálu

Rozkvět v oblasti technologického vývoje zvláknování ve sklářském odvětví datujeme od druhé poloviny 20. století.

Zvláknění rozdělujeme dle technologického procesu:

- a) Odstředivé tažení (rozvláknování) - v horizontální ose
- ve vertikální ose
- b) Tažení plynným médiem
- c) Mechanické tažení - volný výtok

Mechanické tažení - Volný výtok

Proces mechanického zvláknování (obr 4) spočívá ve využití hydrostatického tlaku pro samovolný výtok skloviny ze speciálních trysek definujících skelný monofil. Tato technika zvláknění je kontinuálním procesem průmyslově vyráběných skelných vláken již od roku 1966 pány Jeromem Burgmanem a , Lesterem L Margasonem, [8, 9].

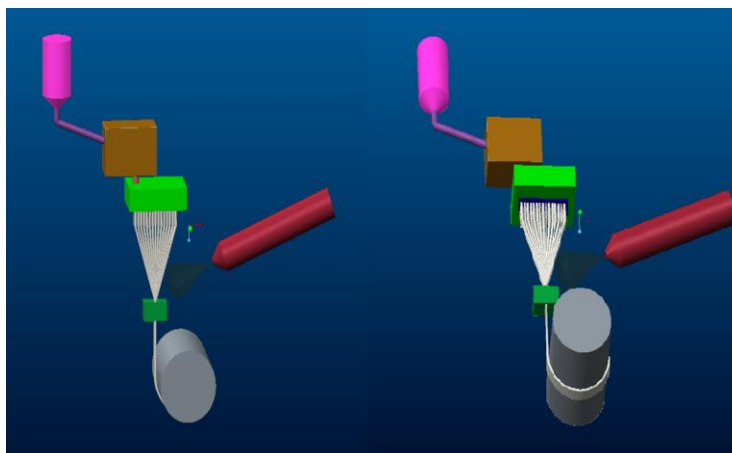
Postup zvlákňování

Utavená sklovina je pomocí nátokového žlabu svedena do pícky ze slitiny platiny a rhodia obsahující v její spodní části soustavu výtokových trysek. Pomocí hydrostatického tlaku je žhavá sklovina vytlačována jednotlivými tryskami a zvlákněna. Počet trysek ve dně pícky může nabývat až 2000. Vytékající sklovina z trysek samovolně nebo regulovaně tuhne v pevné sklo (chladicí zóna), které je dále zpracováno lubrikací (lubrikační zóna) a splétáním do pramenců. Koncovou fází celého procesu završuje navíjení pramenů vlákna na cívku o požadovaných rozměrech, [7].

Produkty ze skelného materiálu nabývají podob tkanin, rohoží, rovingů, desek, sendvičových desek, tak i multiaxiální tkaniny atd.

Výrobci: Saint – Gobain Adfors CZ s.r.o. ČR, BTTO s.r.o aj.

Produkty vytvořené touto technologií: tkaniny, rohože, rovingy



Obr. 4: Mechanické tažení (gravitační)

3 Elektrostatické zvlákňování – elektrospinning

Tato zvlákňovací technologie využívající polymerní tekutiny či tavenin, které pomocí elektrostatické energie (elektrospinningu) vytváří dlouhá vlákna o průměru od 2 μm až v řádech mikrometrů. Hlavními výhodami této technologie je kontinuální produkce nanovláken s relativně širokým výběrem výrobního materiálu.

První poznatky byly zaznamenány již v 16. století lékařem, filozofem a fyzikem Williamem Gilbertem (studie magnetických a elektrostatických jevů). Elektrostatický objev popsal na chování vodní kapky kulového tvaru na nesmáčivé ploše, která vykazovala tvarové změny (kuželovitost) při přiblížení třením nabitého jantarového předmětu.

Další zmínky o této metodě pocházejí z roku 1934, kdy vědec Anthon Formhal patentoval svůj proces elektrického zvlákňování mezi dvěma elektrodami, včetně celého zařízení. Vysloužil si tak uznání jako „otec moderního elektrostatického zvlákňování“.

Technická univerzita v Liberci není ovšem s vývojem polymerních vláken pozadu. V roce 2005 byl publikován patent bezjehlového průmyslového zařízení na výrobu

polymerních nanovláken pomocí elektrostatického zvlákňování. Vědecký tým složený ze členů pedagogického sboru pod vedením prof. Oldřicha Jirsáka, Bc. Filipa Sanetníka, prof. Davida Lukáše a kol. (patent světový WO2005024101, český patent CZ294274 (B6)), [10, 11].

Podrobný popis elektrostatického zvlákňování – elektrospinning

Princip elektrostatického zvlákňování spočívá ve využití vysokého elektrického napětí (sběrná elektroda, kolektor), které iniciuje polymerní roztok nebo taveninu (základní tekutina, emitor) k vytvoření proudu elektricky nabitých částic dané látky (zvlákňování). Jde tedy o působení vysokého elektrického napětí na povrch tekutiny (kapky) vykazující její deformační projevy povrchového napětí (zakulacení, zaoblenost, hladkost) vznikem špiček (paprsků). Samotné zvlákňování nastává v přechodu od deformačních špiček (paprsků) přecházejících v kónický tvar (Taylorův kužel) pohybujícího se roztoku (proud látky) až ke kolektoru. Velikost proudu a vzdálenost elektrod od sebe ovlivňuje rychlost tažení tedy i průměr vlákna. Při samotném tažení dochází k doprovodným procesům projevujícím se jako odpařování aditivních látek (ředitel, nosič) ale také k chladnutí vláken (okolní prostředí). Výsledný vláknenný produkt je zachycen na samotném kolektoru nebo na náhradním nosiči (textilní materiál) umístěným těsně před kolektorem. Vlákna jsou nahodile orientována na povrchu nosiče o určitém zhuštění.

Zvlákňovací technologie pomocí válce - Nanospider

Základy této metody se objevují již v roce 2001 v laboratořích Technické univerzity v Liberci pod vedením prof. Jirsáka, prof. Lukáše a dalších členů výzkumného týmu (obr. 5). Elektroda (kladně nabitá) u tohoto zařízení má tvar válce smáčeného za rotačního pohybu v roztoku polymeru. Válec umožňuje transport materiálu v podobě tenké rovnoměrně nanosené vrstvy na svém povrchu k opačně nabitě elektrodě. Přitažlivé síly působící na tenkou vrstvu iniciují samovolný vznik více skupin Taylorových kuželů (oproti kapilárnímu



Obr. 5: Nanospider

zvláknování). Procesy zvláknění, ulpění vytvořeného materiálu na sběrnici a jiné pochody jsou totožné s předešlou výrobní technikou, [12].

4 Realizace testovacího procesu

Tavení skleněného materiálu pomocí odporového média typu A. Výběr skleněného materiálu (obr. 6) k testování byl určen na základě několika důležitých kritérií (snadná tavitelnost, velikost materiálu, obsah přídatných složek, nízká viskozita, nízké povrchové napětí atd.).

Materiálové složení skla určeného k utavení

(zvláknění):

- a) Olovnaté sklo
- b) Sklářské vypalovací barvy
- c) Keramické vypalovací barvy

Hrubost tavného materiálu:

- a) Prachové částičky
- b) Jemná střepáž
- c) Prachová střepáž (drť)

Tavení skelné drtě pomocí odporového drátu:

- a) V neizolovaném prostředí
- b) V izolovaném prostředí

Tvar tavicího odporového média:

- a) Odporový drát
- b) Odporový pásek

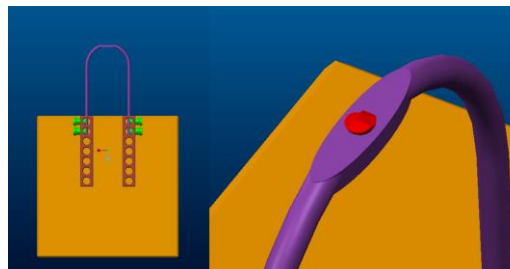


Obr. 6.: a) prach, b) jemná střepáž, c) prachová střepáž

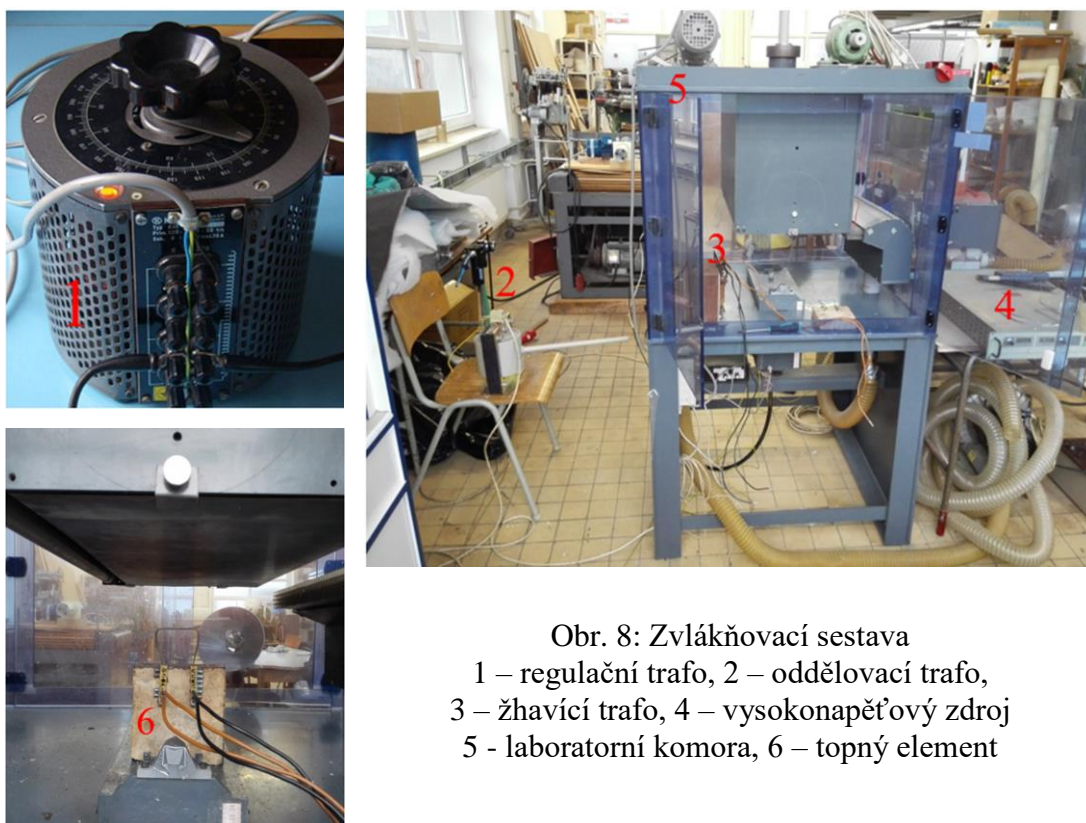
Testování v izolovaném prostředí

Izolované prostředí bylo zajištěno laboratorním boxem z plastového průhledného materiálu, dříve využívaného pro zvláknování polymerních látek ve vysokém napětí. Komora (označení „Lab“) obsahuje dva hlavní vstupy - dvířka (přední, zadní), malé boční vstupy (průchody textilního materiálu), odsávání, regulátor teploty i vestavěnou elektrodu (uzemněná elektroda). Při průchodu vysokého elektrického napětí je nutné podotknout, že v prostorách „Labu“ dochází k bezkontaktnímu proudění ionizovaných částic (iontový vítr) ovlivňujících teplotní klima i hodnoty el. napětí. Vnitřní vybavení laboratorního boxu zahrnovalo

(3 – 10) V transformátor připojený na vysoké napětí (katoda), voltmetr a ampérmetr AVOMET II - METRA Blansko [AM], deskový kolektor (anoda) vestavěný ve stropní část boxu, nosný přípravek (cihla), odporový drát (kanthal typu A), skelný preparát a černá čtvrtka sloužící jako záchytný materiál pro vytvořená vlákna (obr. 7, obr. 8).



Obr. 7. drát: Model úpravy kanthalového drátu

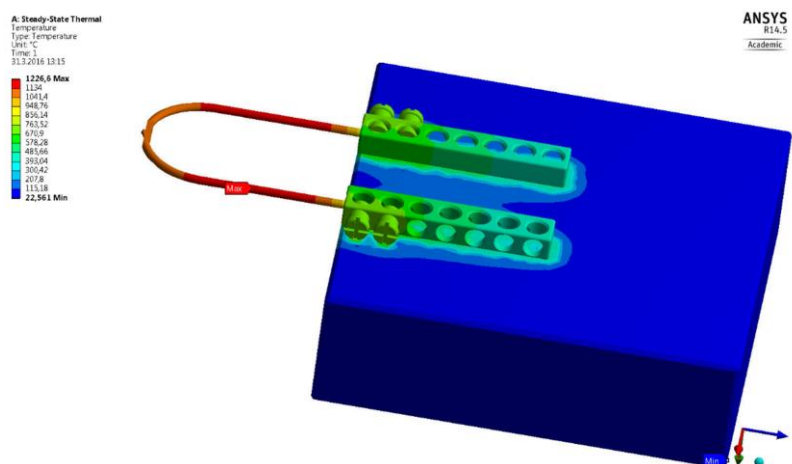


Obr. 8: Zvlákňovací sestava
1 – regulační trafo, 2 – oddělovací trafo,
3 – žhavicí trafo, 4 – vysokonapěťový zdroj
5 - laboratorní komora, 6 – topný element

Zhodnocení testování v izolovaném prostředí

Na základě pořízených dat (fotografie, teplotní záznamy, hodnoty napětí i proudu, vpichové zkoušky, optické hodnocení vzniku Taylorových kuželů, obr. 9 aj.) jasně vyplývá, že sklářské vypalovací barvy (prachy) jako jediné z testovaných prvků odpovídají možnostem tvorby vlákna technologií elektrospinningu. Po natavení skleněného prachu dochází k adekvátnímu rozlití skloviny (cca 700 °C) bez obsahu bublinek. Vlivem působení vysokého napětí (rázové spuštění) se aktivuje povrch látky k projevu Taylorových kuželů (zvlákňení). Záchytný prvek pro vzniklá vlákna (na černé čtvrtce) umístěný před kolektorem po podrobném zkoumání (analýza mikroskopem) neobsahoval žádné filamenty, pouze tmavší zvýrazněnou oblast

(narušení olejovými parami - součást sklářských vypalovacích barev). Tabulka 1, heslovitě vyjadřuje důležité poznatky objevující se při zvláknovacím procesu.



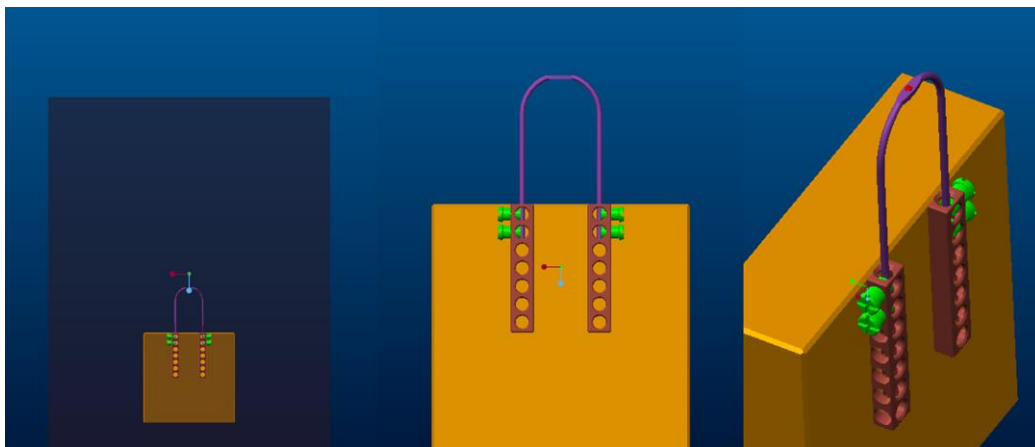
Obr. 9: Simulace teplotního rozpětí na kanthalovém drátu typu A při maximálním zahřátí na 1230°C (simulační software Ansys)

Tabulka 1: Popis základního testování v izol. prostředí s rázovou aktivací v. n.

Odporové médium	Materiálové složení	Poznámky	Poznámky	Hodnoty vysokého napětí [kV]
Kanthalový drát typu A, kruhový průřez	Sklářské vypalovací barvy	Nízká teplota nátavu	Cca 700°C	Do 46 kV
		Minimum doprovodných plynů		
		Dobrá sklovitá hladina bez obsahu bublinek		
		Dobré rozlití skloviny		
		Nedochází ke stažení natavené skloviny		
		Dobry projev Taylorových kuželů	3-7	
		Možnost projevu Taylor. kuželů vlivem úniku plynů (puchýře s kuželi)		
		Nízká hodnota viskozity	Měkký med	
		Nízká hodnota povrchového napětí		

5 Konstrukční řešení zvláknovacího zařízení

Testovací zařízení bylo sestaveno z jednotlivých komponentů, viz výše, a zároveň odzkoušeno jak v neizolovaném, tak izolovaném prostředí (obr. 10). Také vlivy vysokého napětí či jeho absence byly detekovány a zaznamenány (tab. 1).



Obr. 10: Konstrukční řešení vybrané varianty – Kanthalový drát typu A v izolovaném prostředí

Komponenty nacházející se v tomto modelu:

- | | |
|-------------------|--|
| ● Laboratorní box | ● Kanthalový drát typu A obsahující speciální úpravu |
| ● Nosná cihla | ● Dávka skla |
| ● Svorky | |
| ● Šrouby | |

6 Závěr

Cílem této práce bylo zmapování současného stavu, včetně popisů rozdílných technologií a jejich vzájemnému porovnání a zhodnocení. Dále navrhnout nové řešení s lepšími výstupními hodnotami (velikost vlákna nano, průměrová stálost vlákna, zvýšení rychlosti výroby, nové materiálové aplikace).

Řešením problematických bodů objevujících se u skelných zvláknovacích metod bylo nahrazení jinou technologií shodující se v důležitých aspektech (viskozita, povrchové napětí).

Volba nového technického řešení spočívala ve využití vysokého elektrického napětí, tedy principu polymerního zvláknění (elektrospinning). Testování obsahovalo rozdílné skleněné produkty (Pb střepáž, Pb drť, sklářské vypalovací barvy, keramické vypalovací barvy) určené k vytažení, kdy sklářské vypalovací barvy jako jediné splnily základní podmínky tvorby vlákna (nízká viskozita, nízké povrchové napětí, nízká teplota tavení, vznik Taylorových kuželů).

Literatura

- [1] Balsamaria [online], [cit 2. 3. 2016], <<https://traveltoeat.com/egyptian-and-persian-glass-getty-villa-pacific-palisades-california/>>
- [2] Benátské sklo[online], [cit 2. 3. 2016] <<http://www.zemesveta.cz/archiv/rocnik-2007/benatky-10-2007/521-3/benatske-sklo/>>
- [3] Benátské číše [online], [cit 2. 3. 2016], <<http://museovetro.visitmuve.it/it/il-museo/percorsi-e-collezioni/vetro-xix-secolo/>>
- [4] A. D. Elbers: Improvement in processes of disintegrating molten scoriaceous substances, US180470 A, 1. srpen 1876 (patent)
- [5] Hermann Hammesfahr [online],[cit 2. 3. 2016], <https://en.wikipedia.org/wiki/Hermann_Hammesfahr/>
- [6] A Glass Dress [online], [cit 2. 3. 2016], <<http://onthisdayinfashion.com/?p=3348/>>
- [7] Sant Gobain [online], [cit 2. 3. 2016], <<http://www.saint-gobain.cz/>>
- [8] J. A. Burgman, L. L. Margason: Method and apparatus for forming hollow glass fibers, US3268313 A, 23. srpen 1966 (patent)
- [9] J. A. Burgman, L. L. Margason: Method and apparatus for producing an intermittently hollow glass filament, US3421873, 14. leden 1969 (patent)
- [10] O. Jirsak, F.Sanetrnik, D. Lukas, V. Kotek, L. Martinova, J. Chaloupek: A method of nanofibres production from a polymer solution using electrostatic spinning and a device for carrying out the method, WO2005024101, 17. březen 2005 (patent)
- [11] O. Jirsak, F.Sanetrnik, D. Lukas,V.Kotek, L. Martinova, J. Chaloupek: Process for producing nanofibers from polymeric solution by electrostatic spinning and apparatus for making the same, CZ294274 (B6), 11. října 2004 (patent)
- [12] Elmarco [online], [cit 2. 3. 2016], <www.elmarco.com/>

VÝPOČET NAPĚTÍ A DEFORMACE TENKOSTĚNNÉ TLAKOVÉ NÁDOBY S PLOCHÝMI DNY

Prokop Josef

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,

Fakulta strojní, 3. ročník

Bakalářský studijní program – STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

Abstrakt: Tlakové nádoby jsou nedílnou součástí různých odvětví dnešního průmyslu. Tyto konstrukce musí splňovat vysokou bezpečnost a spolehlivost. Tato práce je zaměřena na výpočetní ověření konstrukce tlakové nádoby z hlediska napětí a deformace. Tato tlaková nádoba byla vyrobena pro potřeby výuky experimentálních metod na Katedře mechaniky pružnosti a pevnosti.

Stanovení napětí a deformací je provedeno:

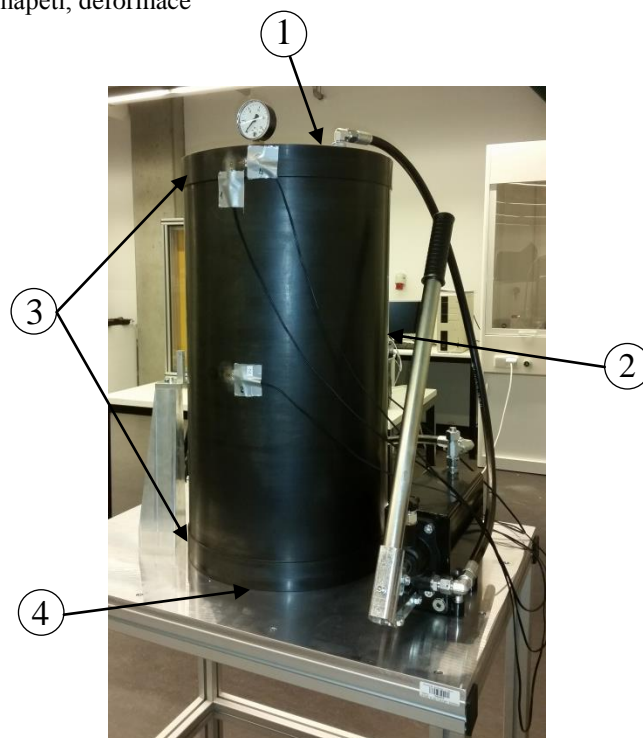
1. analyticky pomocí základní teorie tenkých skořepin a desek, numerické výpočty jsou provedeny v programu Matlab
2. numerickou simulací pomocí metody konečných prvků v programu Autodesk Simulation Mechanical 2015.

Klíčová slova: tlaková nádoba, tenká skořepina, tenké desky, napětí, deformace

1 Tlaková nádoba

Tlaková nádoba se skládá z (viz Obr. 1.1):

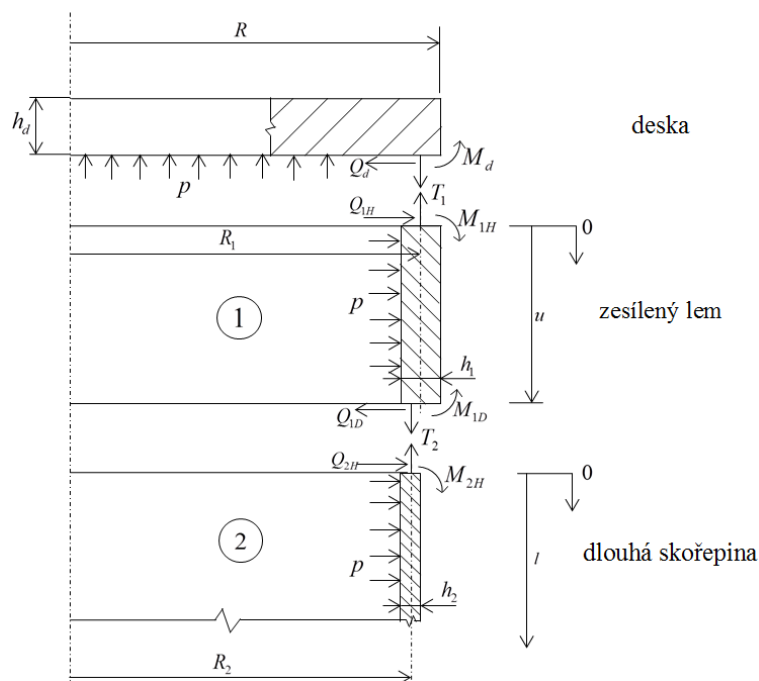
1. horního dna s otvory pro tlakové hadice
2. dlouhé válcové části
3. zesílených lemů na koncích
4. spodního dna, které je přišroubované k tlusté desce podstavce



Obr. 1.1: Tlaková nádoba

2 Výpočet vrchní části tlakové nádoby

Vzhledem k tomu, že deska tvořící horní dno nádoby není omezena ve svém průhybu na rozdíl od dolního dna, je třeba napětí a deformace počítat zvlášť pro horní a dolní část nádoby. Ve výpočtu vrchní části je zahrnuta tenká rotační deska, zesílený lem (krátká, tenká skořepina) a střední část tlakové nádoby, kterou lze považovat za dlouhou tenkou skořepinu.



Obr. 2.1: Vnitřní účinky vrchní části

2.1 Vrchní dno

Výpočet desky (dna) vychází z funkce sklonu průhybové plochy $\mathcal{G}(r) = C_1 \cdot r + C_2 \cdot \frac{1}{r} + \mathcal{G}_p(r)$.

Integrační konstanta C_2 je rovna 0 a partikulární řešení $\mathcal{G}_p(r)$ závisí na zatěžujícím tlaku a tuhosti desky

$$\mathcal{G}(r) = C_1 \cdot r + \frac{1}{16} \frac{pr^3}{D_d}. \quad (2.1)$$

Integrací sklonu získáme průhyb desky $w_d = -\int \mathcal{G} dr + C_3$

$$w_d = -\frac{1}{2} C_1 r^2 - \frac{1}{64} \frac{p}{D_d} r^4 + C_3. \quad (2.2)$$

Dále radiální napětí $\sigma_r = \pm \frac{6M_r}{h_d^2}$ a tečné napětí v desce $\sigma_t = \pm \frac{6M_t}{h_d^2}$, kde M_r je radiální moment a M_t je tečný moment.

2.2 Zesílený lem (1) pod horním okrajem nádoby

Horní lem nádoby považujeme za krátkou skořepinu, a tedy její průhyb je dán funkcí

$$w_1(x) = e^{-\beta_1 x} (A_1 \sin \beta_1 x + A_2 \cos \beta_1 x) + e^{\beta_1 x} (A_3 \sin \beta_1 x - A_4 \cos \beta_1 x) + w_{part.1}(x). \quad (2.3)$$

kde, β_1 zahrnuje vliv rozměrů a materiálu skořepiny a A_1, A_2, A_3, A_4 jsou integrační konstanty, které určíme z okrajových podmínek a $w_{part.1}(x)$ je partikulární řešení.

V plášti skořepiny se sčítají membránová napětí (axiální: $\sigma_{am} = \frac{pR_1}{2h_1}$, tečné:

$$\sigma_{tm} = 2\sigma_a = \frac{pR_1}{h_1}) \text{ a ohybová napětí (axiální: } \sigma_{ao} = \pm \frac{6M_x}{h_1^2}, \text{ tečné } \sigma_{to} = \pm \frac{6M_t}{h_1^2}).$$

2.3 Dlouhá skořepina (2)

V této části nádoby platí pouze ta část vztahu pro průhyb $w(x)$, která vymizí se zvětšující se souřadnicí x . Proto konstanty u funkce $e^{\beta x}$ musí být nulové:

$$w_2(x) = e^{-\beta_2 x} (A_5 \sin \beta_2 x + A_6 \cos \beta_2 x) + w_{part.2}(x), \quad (2.4)$$

kde konstanty A_5 a A_6 určíme z okrajových podmínek a $w_{part.2}(x)$ je partikulární řešení, β_2 je konstanta a tuhost skořepiny je D_2 .

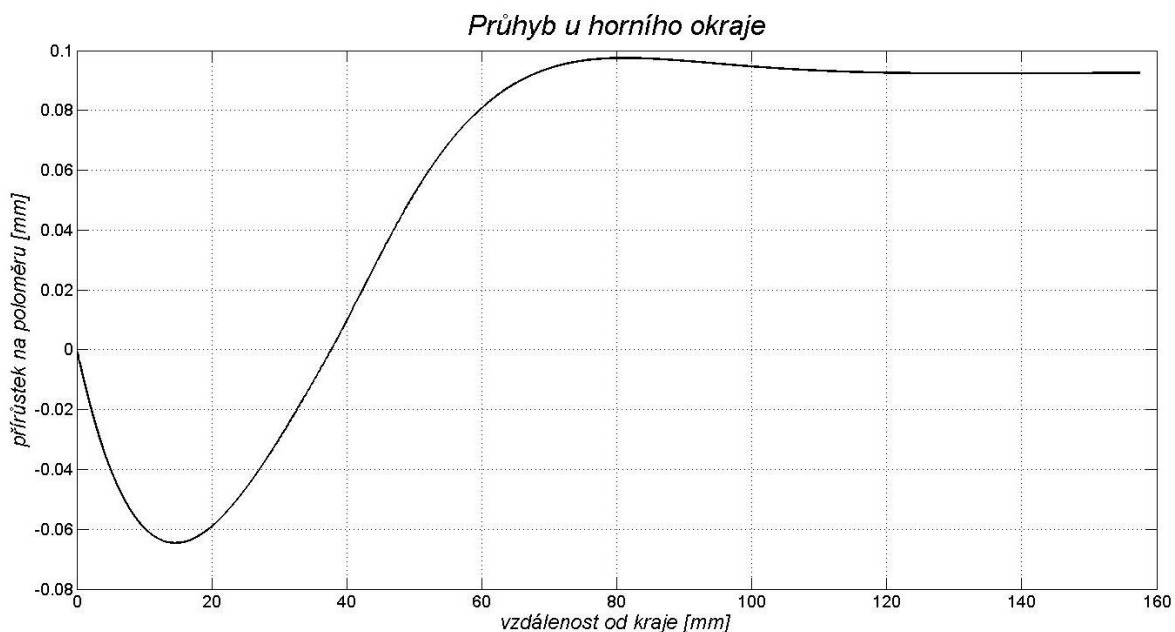
Osm rovnic, které potřebujeme pro určení integračních konstant, získáme z osmi okrajových podmínek, (viz Obr. 2.1).

Okrajové podmínky pro vrchní část nádoby jsou:

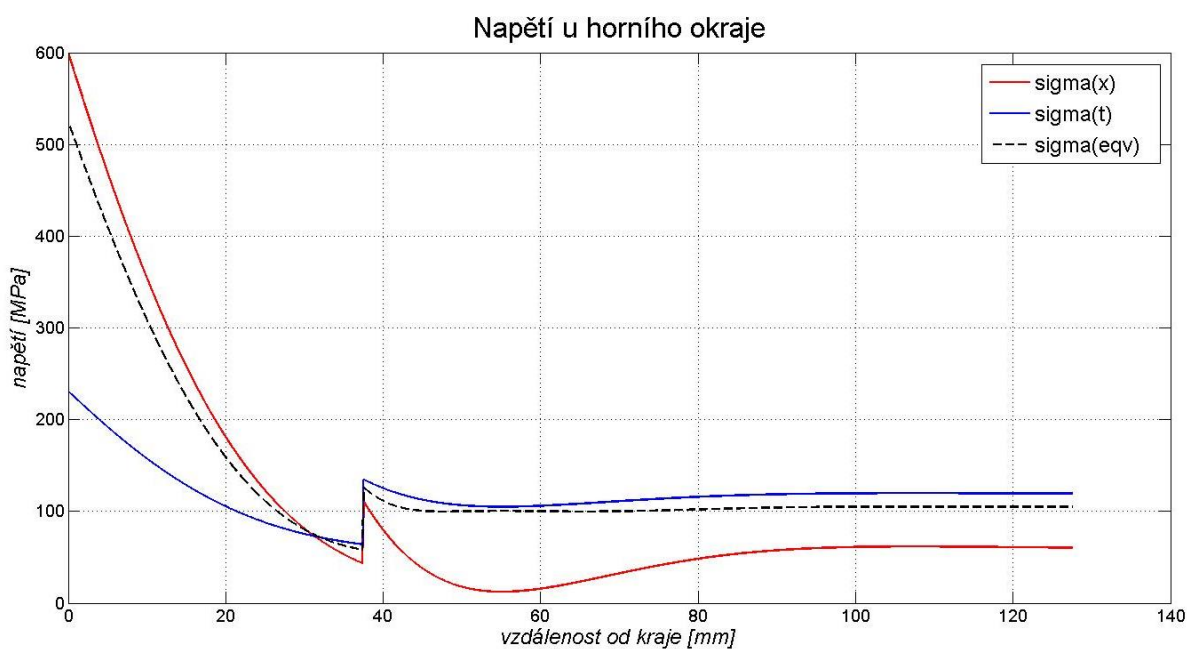
$$\begin{aligned} w_{1H(0)} &= 0 & \mathcal{G}_d &= -\mathcal{G}_{1H(0)} \\ M_d &= M_{1H(0)} & M_{1D(u)} &= M_{2L(0)} \\ Q_{1D(u)} &= Q_{2H(0)} & \mathcal{G}_{1D(u)} &= \mathcal{G}_{2H(0)} \\ w_{1D(u)} &= w_{2H(0)} & w_{D(R_1)} &= 0 \end{aligned}$$

Tuto soustavu rovnic o osmi neznámých vyřešíme po sestavení skriptu pomocí funkcí symbolického toolboxu v programu Matlab.

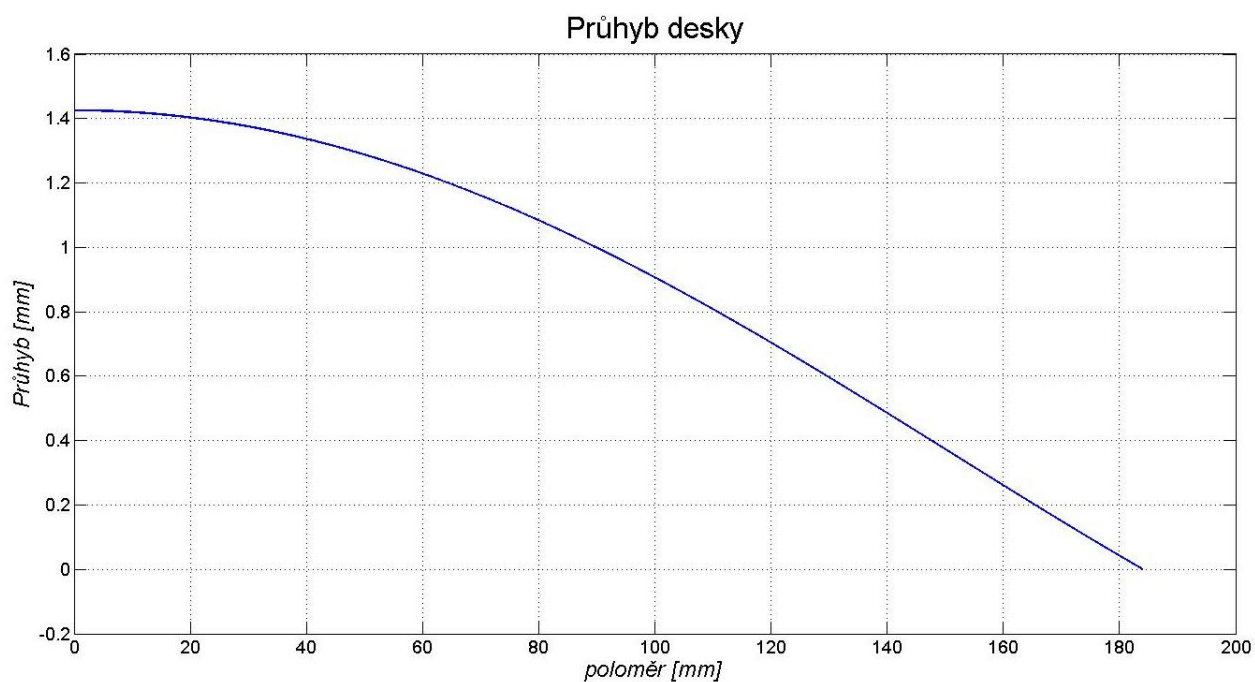
2.4 Grafy z Matlabu



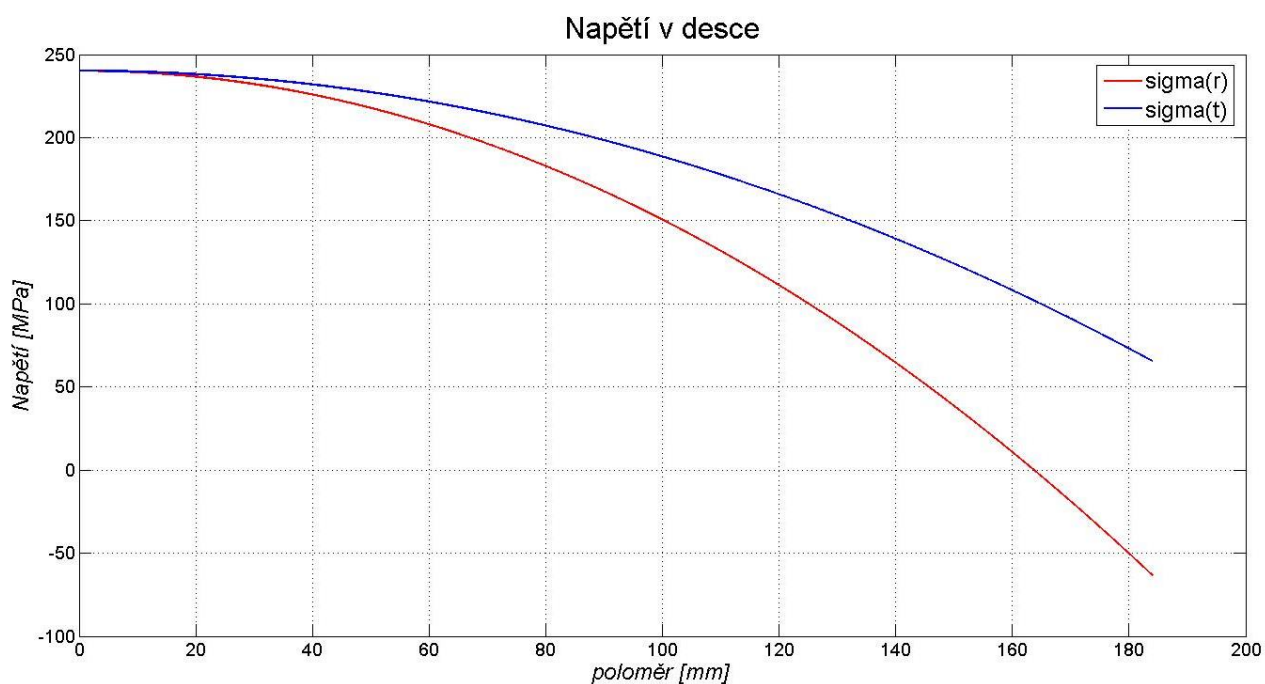
Obr. 2.1: Průhyb u horního okraje. Skořepina se nejprve prohne dovnitř o hodnotu $-0,065$ mm na vzdálenosti přibližně 14 mm. To je způsobeno momentovým působením desky. Maximální průhyb je $0,098$ mm ve vzdálenosti 81,5 mm.



Obr. 2.2: Napětí u horního okraje. Prudký skok napětí ve vzdálenosti 37,5 mm je způsoben změnou tloušťky stěny. Ohybová napětí působí přibližně do vzdálenosti 97 mm, dále už působí jen membránové napětí. Maximální hodnota osového napětí je 600 MPa, obvodového 231 MPa a ekvivalentního podle HMM 525 MPa.



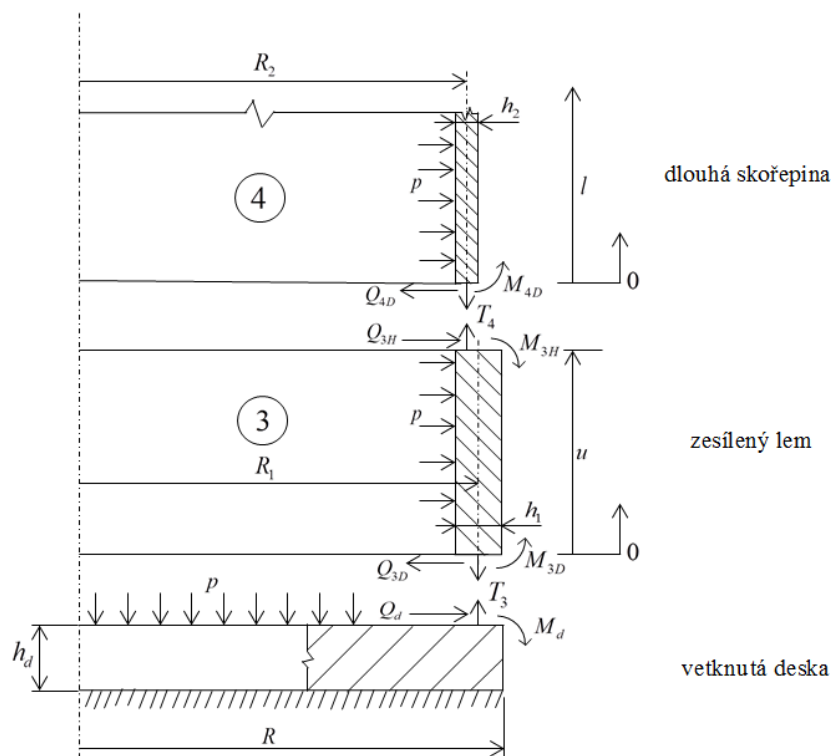
Obr. 2.3: Průhyb desky. Podle předpokladu je maximální hodnota průhybu 1,43 mm. Na kraji desky je průhyb nulový.



Obr. 2.4: Napětí v desce. Radiální i tečné napětí je uprostřed desky stejné, 240 MPa. Na kraji desky má radiální napětí hodnotu -63 MPa a tečné napětí je 65 MPa.

3 Výpočet tlakové nádoby u vetknutí

Dolní část nádoby považujeme za vetknutou skořepinu. Výpočty lemu a dlouhé skořepiny jsou velmi podobné předchozím výpočtům, rozdíl je v okrajové podmínce pro sklon průhybové čáry skořepiny, který je ve vetknutí nulový.



Obr. 3.1: Vnitřní účinky u vetknutí

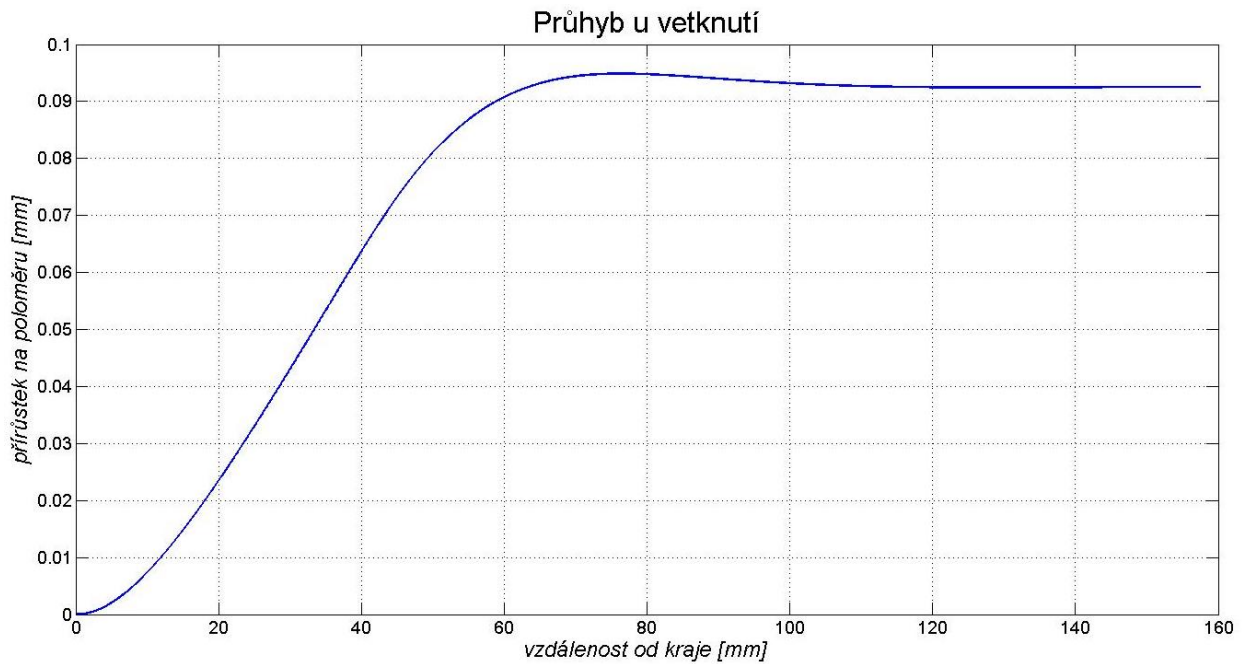
Indexy označují jednotlivé části nádoby (viz Obr. 3.1). Průhyb zesíleného lemu je $w_3(x)$, průhyb dlouhé skořepiny je $w_4(x)$.

Okrajové podmínky:

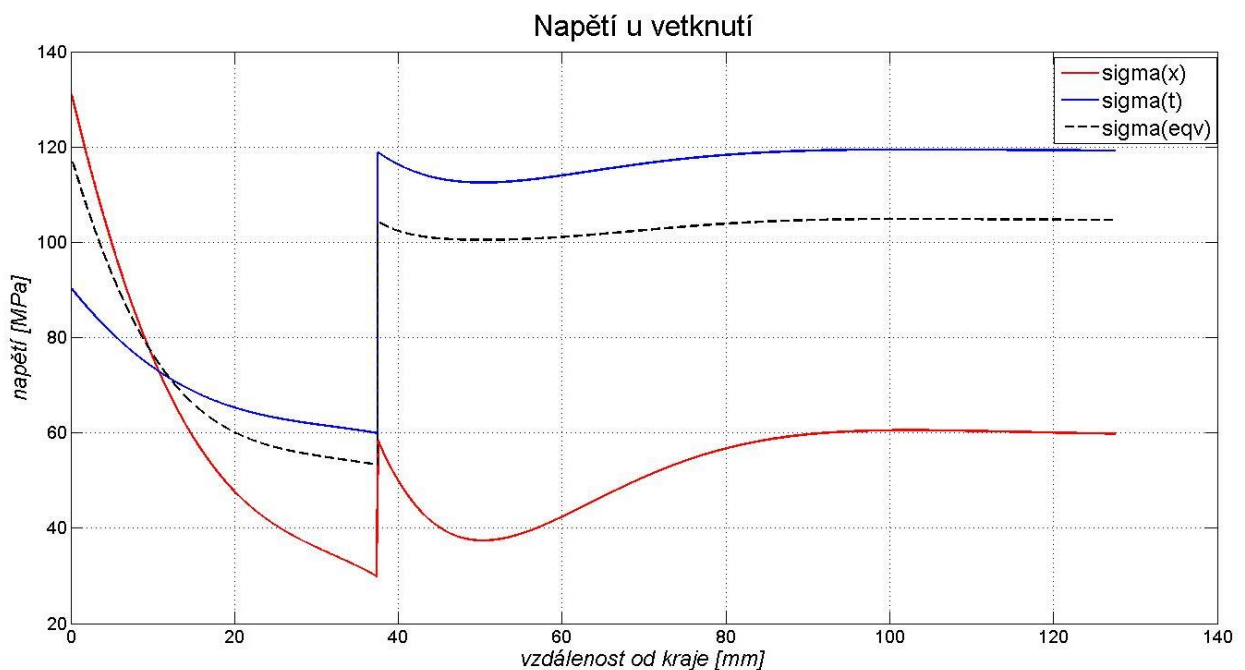
$$\begin{aligned} w_{3D(0)} &= 0 & \mathcal{G}_{3D(0)} &= 0 \\ M_{4D(0)} &= M_{3H(u)} & w_{3H(u)} &= w_{4D(0)} \\ Q_{3H(u)} &= Q_{4D(0)} & \mathcal{G}_{3H(u)} &= \mathcal{G}_{4D(0)} \end{aligned}$$

Soustava rovnic o šesti neznámých byla řešena pomocí symbolického toolboxu v programu Matlab.

3.1 Grafy z Matlabu



Obr. 3.2: Průhyb u vetknutí. Kvůli vetknutí se skořepina prohýbá jen v jednom směru. Maximální hodnota je 0,095 mm ve vzdálenosti 76 mm.



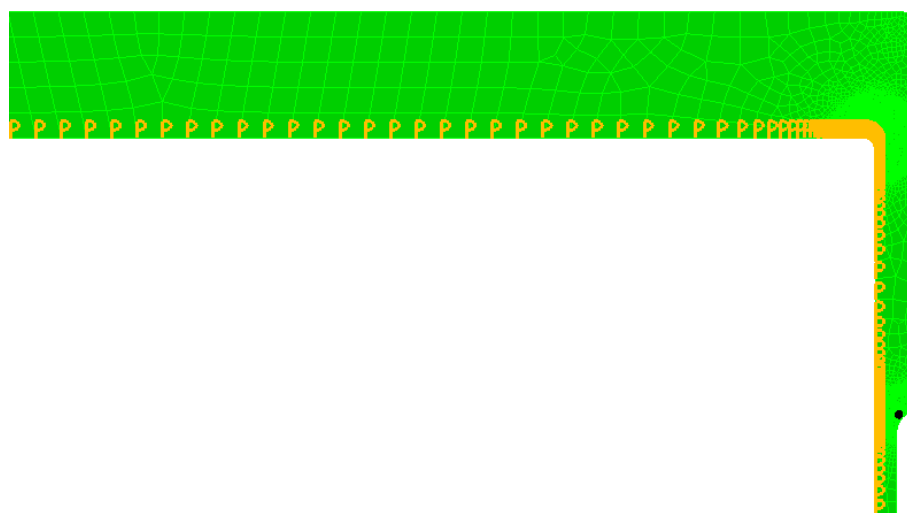
Obr. 3.3: Napětí u vetknutí. Skok napětí ve vzdálenosti 37,5 mm je způsoben změnou tloušťky stěny skořepiny. Ohybová napětí vymizí přibližně ve vzdálenosti 110 mm od kraje, poté ve skořepině působí jen membránové napětí. Maximální hodnota osového napětí je 132 MPa, ekvivalentního podle HMM 118 MPa. Obvodové napětí má největší hodnotu 119 MPa ve vzdálenosti 95 mm, z větší části je tvořeno membránovým napětím.

4 Pevnostní analýza v programu Autodesk Simulation Mechanical 2015

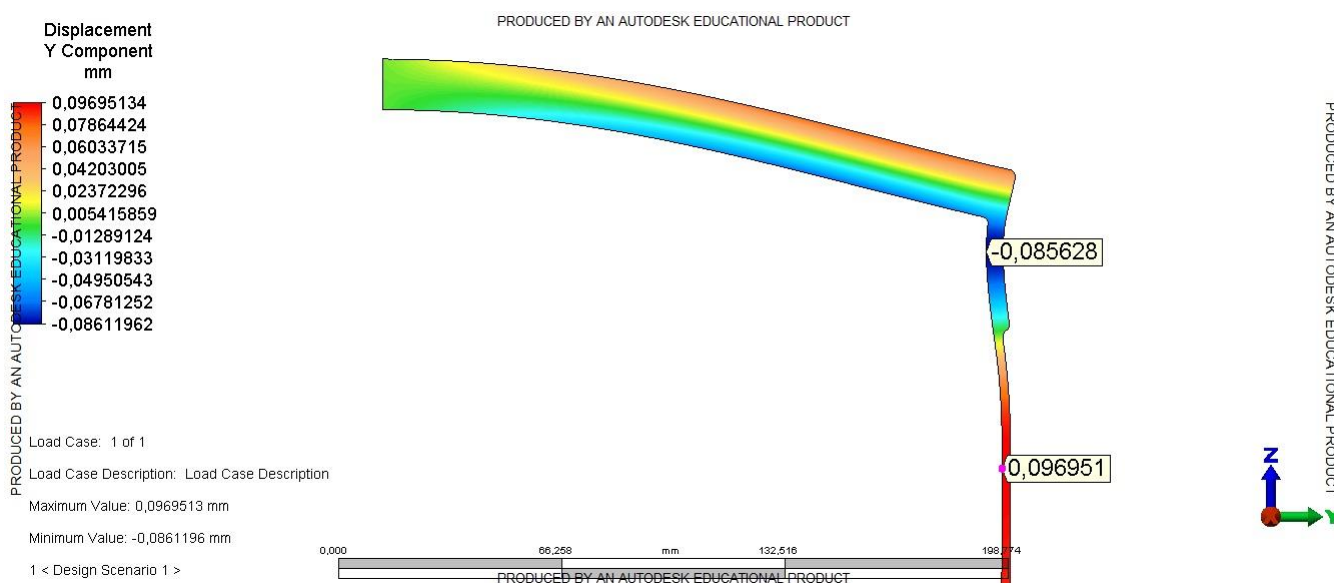
V programu jsem nastavil 2-D rotační symetrickou úlohu (element type < 2-D >). V materiálových konstantách jsem zadal modul pružnosti $E = 200\,000$ MPa a Poissonovu konstantu 0,3.

Na Obr. 4.1 je detail horní hrany tlakové nádoby. Velikost prvků jsem volil 3 mm a v místech předpokládané koncentrace napětí jsem zmenšil velikosti prvků v okolí 5 mm na 0,1 mm. Tvar prvků jsem volil smíšený. Oranžové praporky znázorňují vnitřní přetlak.

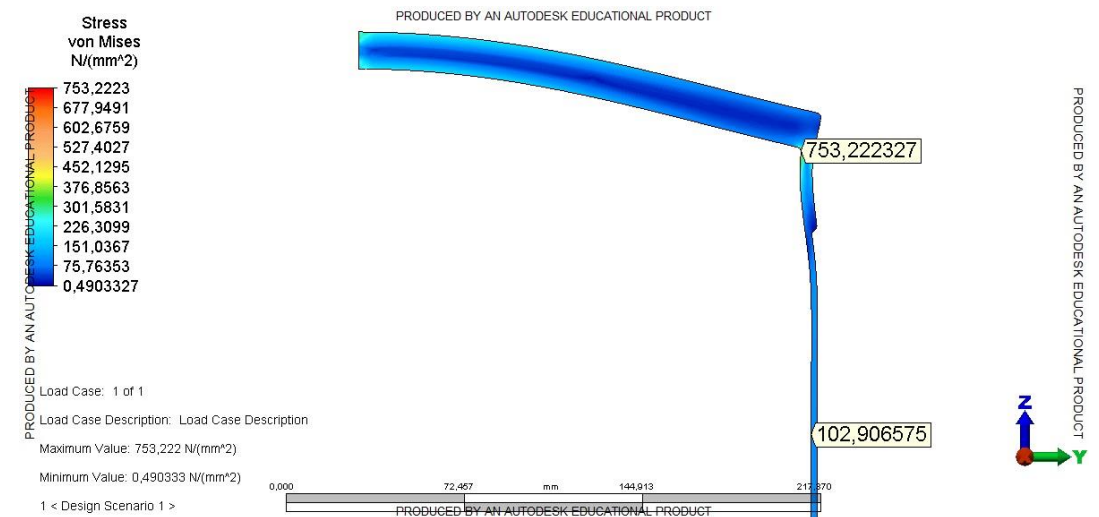
U vetknutí je zasíťování obdobné, spodní dno je vetknuté a zahuštění sítě stejné jako na Obr. 4.1.



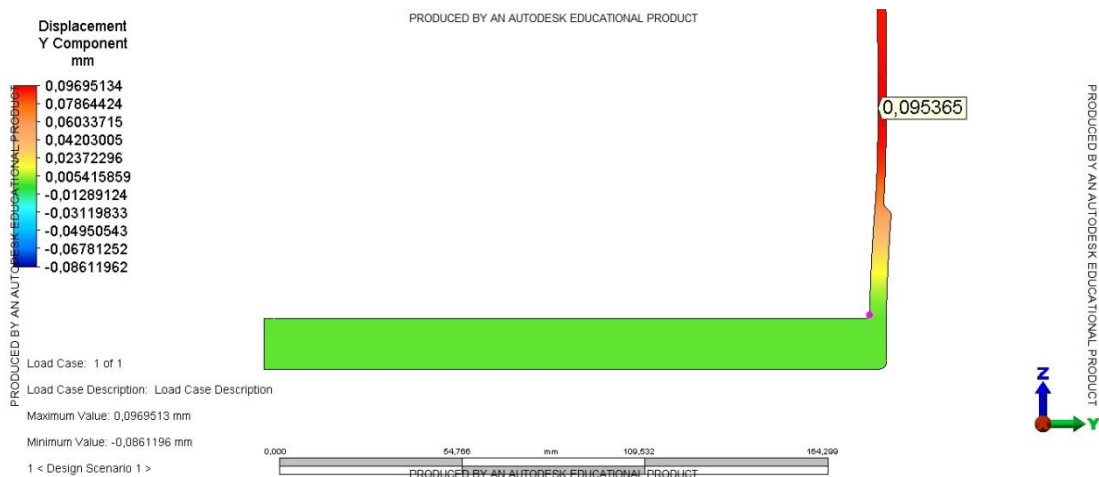
Obr. 4.1: Detail zasíťování tlakové nádoby.



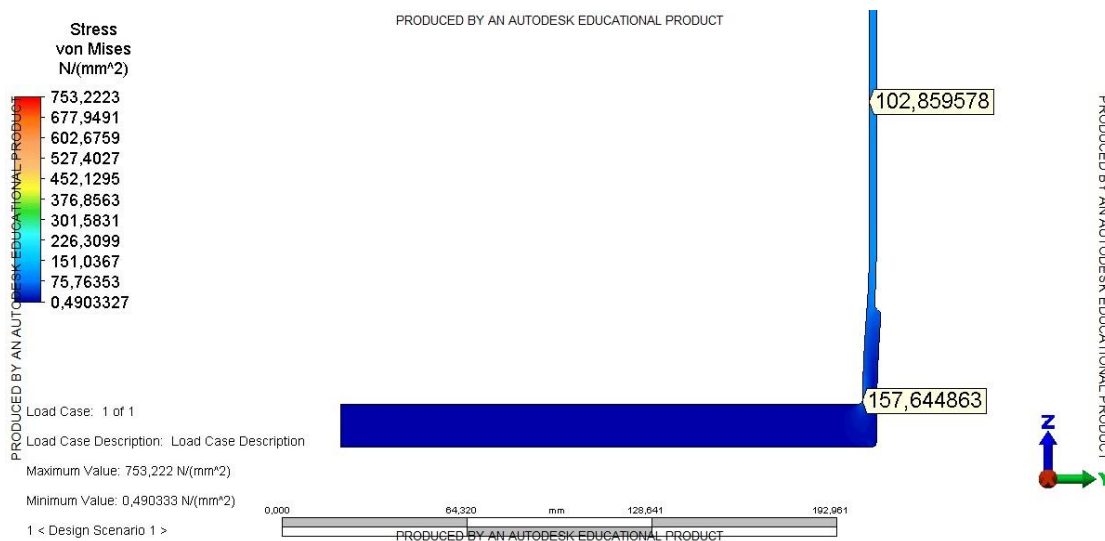
Obr. 4.2: Průhyb u horního okraje ve směru osy Y. Průhyb se oproti analytickému řešení liší řádově o tisícinu milimetru. Na tomto obrázku je vidět záporný průhyb skořepiny v důsledku průhybu desky.



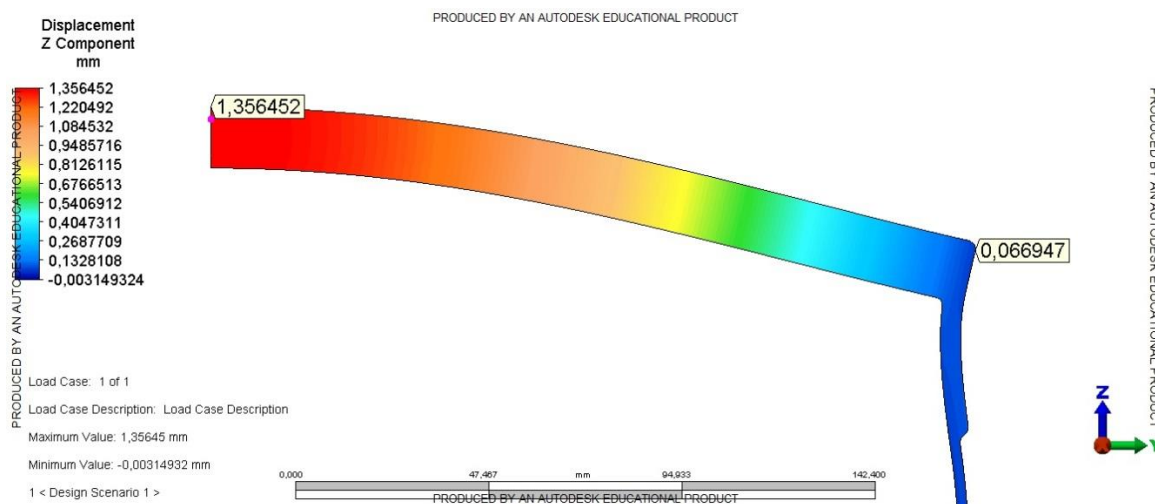
Obr. 4.3: Napětí u horního okraje podle von Misses. Na obrázku je vidět že se v místech změny tvaru koncentruje napětí.



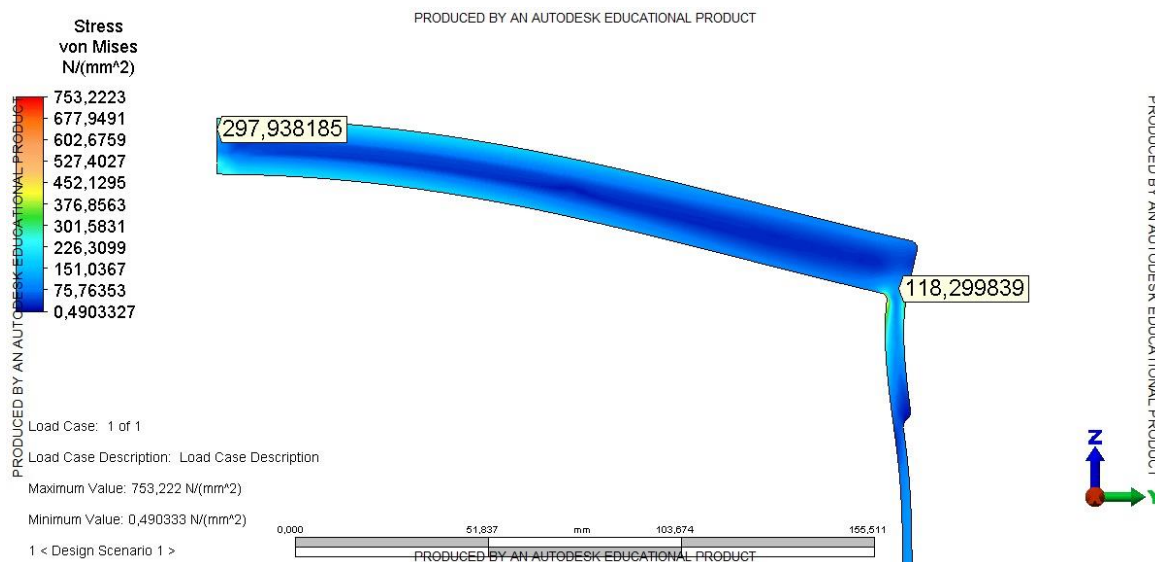
Obr. 4.4: Průhyb u vetknutí ve směru osy Y. Vetknutí nedovoluje průhyb desky v opačném směru jak jako u horního okraje.



Obr. 4.5: Napětí u vetknutí podle von Misses. Napětí se koncentruje tam, kde se mění tvar součásti.



Obr. 4.6: Průhyb desky ve směru osy Z. Průhyb na kraji desky je přibližně 0,067 mm v analytickém výpočtu jsme tento průhyb zanedbali.



Obr. 4.7: Napětí v desce podle von Misses. Maximální hodnota podle MKP je přibližně o 58 MPa větší než výsledek z analytického výpočtu.

5 Závěr

V první části jsou odvozeny obecné vztahy pro výpočet rotační tenké desky a tenkých skořepin, které jsem použil v analytickém výpočtu v Matlabu. V grafech jsou znázorněny průběhy průhybů a napětí skořepin a desky. Pro porovnání obou metod jsem v obrázcích z MKP vyznačil polohy význačných bodů, které se vyskytují v grafech analytického výpočtu. Výsledky se přibližně shodují.

6 Použitá literatura

STŘÍŽ, Bohuslav. *Pružnost a pevnost*. sv. 2. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1980.

ANALÝZA MAGNETICKÝCH AKUMULÁTORŮ KINETICKÉ ENERGIE

Svobodová Jana

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

Abstrakt: Tato práce je zaměřena na analýzu magnetického akumulátoru rotorových dopřádacích strojů. Hlavním cílem bylo vytvořit model v programu FEMM, ve kterém byla prováděna statická analýza a v programu Ansys Maxwell dynamická analýza pro ověření vlivu vířivých proudů při rozváděcím pohybu. Výsledky ze simulací bylo nutno ověřit pomocí měření.

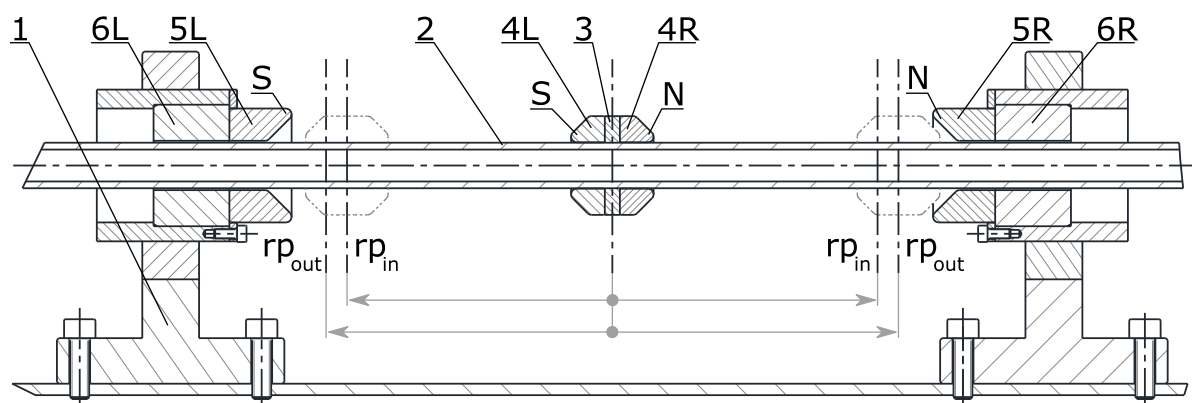
Klíčová slova: magnetický akumulátor, rotorový dopřádací stroj, rozváděcí tyč, pólový nástavec, magnetická síla

1 Magnetický akumulátor

Magnetický akumulátor kinetické energie byl vyvinut pro rozváděcí systém dopřádacího stroje, který vykonává přímočarý vratný pohyb s proměnným zdvihem (obrázek 1). Stroj se stává ze sekcí, které se spojují do série. Stroj je pak sestavován spojením daného počtu sekcí do série dle požadavků zákazníka, přičemž veškeré pohony jsou situovány ve skříni pohonů umístěné na jednom konci stroje. Magnetický akumulátor akumuluje kinetickou energii v koncových polohách rozváděcího pohybu.

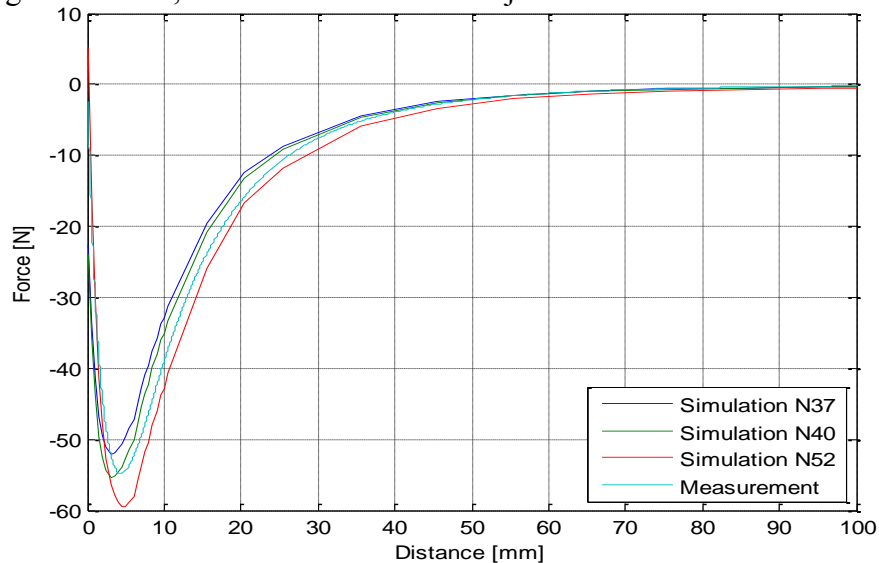
Na rozváděcí tyči 2 jsou pevně umístěny dva magnety tyče 4L a 4R, které jsou k sobě orientovány opačnými póly. Mezi nimi se nachází ocelová upínka 3, která zajišťuje připevnění magnetů v požadované pozici na rozváděcí tyči.

Při rozvádění příze se pohybuje rozváděcí tyč přímočarým vratným pohybem se zdvihem např. 148 mm rychlostí přes 1 m/s. V obou úvratích rozváděcího pohybu se nachází magnet rámu 5L/5R a pólový nástavec 6L/6R. Rozváděcí tyč 2 s magnety tyče 4L a 4R jsou umístěny souose posuvně vůči magnetům rámu 5L/5R.



Obrázek 1: Schéma magnetického akumulátoru kinetické energie

Na obrázku 2 je zobrazen průběh magnetické odpudivé síly při přibližování magnetů tyče 4L a 4R k magnetu rámu 5L/5R. V první fázi pohybu magnetická odpudivá síla exponenciálně roste až do určitého maxima, které je dále nazýváno maximální silou. Ve druhé fázi síla klesá až do okamžiku, než dojde ke kontaktu magnetů tyče s magnetem rámu, tento stav se dále označuje kontaktem.



Obrázek 2: Průběh odpudivé magnetické síly při různých materiálech magnetických prvků

Na obrázku 2 je ukázka průběhu magnetické síly při použití různých materiálových tříd neodymových magnetů NdFeB. Neodymový magnet s označením N52 má největší hustotu energie (BH max) z uvedených materiálů v legendě. Díky tomu je dosaženo vyšší magnetické síle oproti ostatním uvedeným magnetům. Na velikosti maxima má vliv také materiál a tvar pólového nástavce.

2 Matematický model magnetického akumulátoru

Pro získání výsledků z analýzy stacionárního a nestacionárního magnetického pole s možností editace materiálových vlastností, byl vytvořen matematický model magnetického akumulátoru. Statická analýza byla provedena za účelem návržení nového pólového nástavce a dynamická za účelem ověření vlivu vířivých proudů na magnetický akumulátor. Při návrhu bylo cílem navýšit maximální sílu, a také zajistit bezpečnou vzdálenost maxima od kontaktu. Podmínkou bylo ponechat stávající magnety, které byly na stroji testovány a jsou k dispozici pro další měření. Cílem bylo navrhnout nový pólový nástavec, který byl omezen maximálními rozměry akumulátoru. Ty neměly překročit vnější průměr 40 mm a délku 55 mm. Dále bylo požadováno zakrytí magnetického systému z důvodu ochrany před úrazem při provozu. Pro statickou analýzu byl zvolen model magnetického systému vytvořený v programu FEMM 4.2. Tento program byl volen z důvodu snadné úpravy modelu, která pomohla k návrhu nového pólového nástavce. V programu FEMM byla prováděna kvazistatická analýza, která řeší v každém kroku (změně vzdálenosti magnetů) statickou úlohu. Výsledkem analýzy je celkový průběh magnetické odpudivé síly magnetického akumulátoru.

Pro dynamickou analýzu byl zvolen model magnetického systému vytvořený v programu Ansys Maxwell. Tento model byl vytvořen z důvodu ověření vlivu vířivých proudů při průchodu duralové rozváděcí tyče. Tento vliv se zjišťuje při magneto-dynamické analýze.

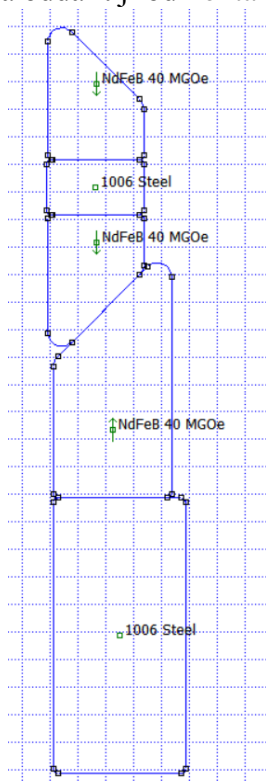
3 Citlivostní analýza rozměrů pólového nástavce

Cílem citlivostní analýzy bylo pokusit se navýšit maximum síly na co nejvyšší hodnotu. Upravovat bylo možno tvar upínky a pólového nástavce. Analýza byla prováděna v programu FEMM jako statická úloha.

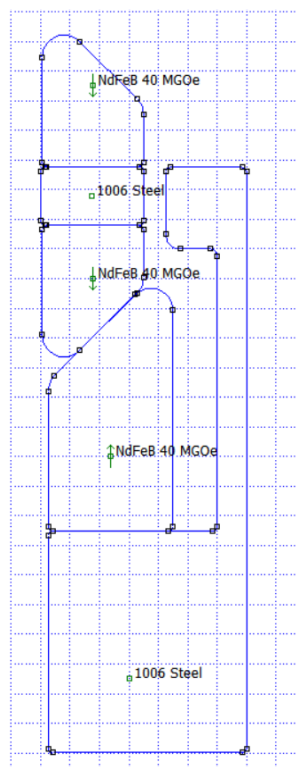
Původní varianta magnetického akumulátoru, zobrazena na obrázku 3, obsahovala upínku s rozměry: výška 4 mm, vnitřní průměr 12 mm a vnější průměr 26 mm a pólový nástavec s rozměry: výška 20 mm, vnitřní průměr 13 mm a vnější průměr 32 mm. Původní varianta dosahuje maximální síly 55,2 N a vzdálenosti od kontaktu 3 mm.

Z důvodu konstrukce bylo možno měnit pouze výšku upínky. Minimální rozměr jsou 4 mm, který je dán z důvodu upevnění šroubů. Při zvětšování výšky upínky maximum síly klesalo. Proto bylo rozhodnuto ponechat stávající variantu upínky.

Návrhů na změnu tvaru pólového nástavce bylo mnoho. Z analyzovaných variant dosahoval nejlepších výsledků na základě kritérií maxima a vzdálenosti od kontaktu návrh zobrazený na obrázku 4. Mezera mezi magnetem a pólovým nástavcem byla zvolena 3 mm, protože při větší mezeře je síla větší. Na zubu se nachází radiusy 0,5 mm a 1 mm, které pomáhají navýšit sílu a oddálit ji od kontaktu.

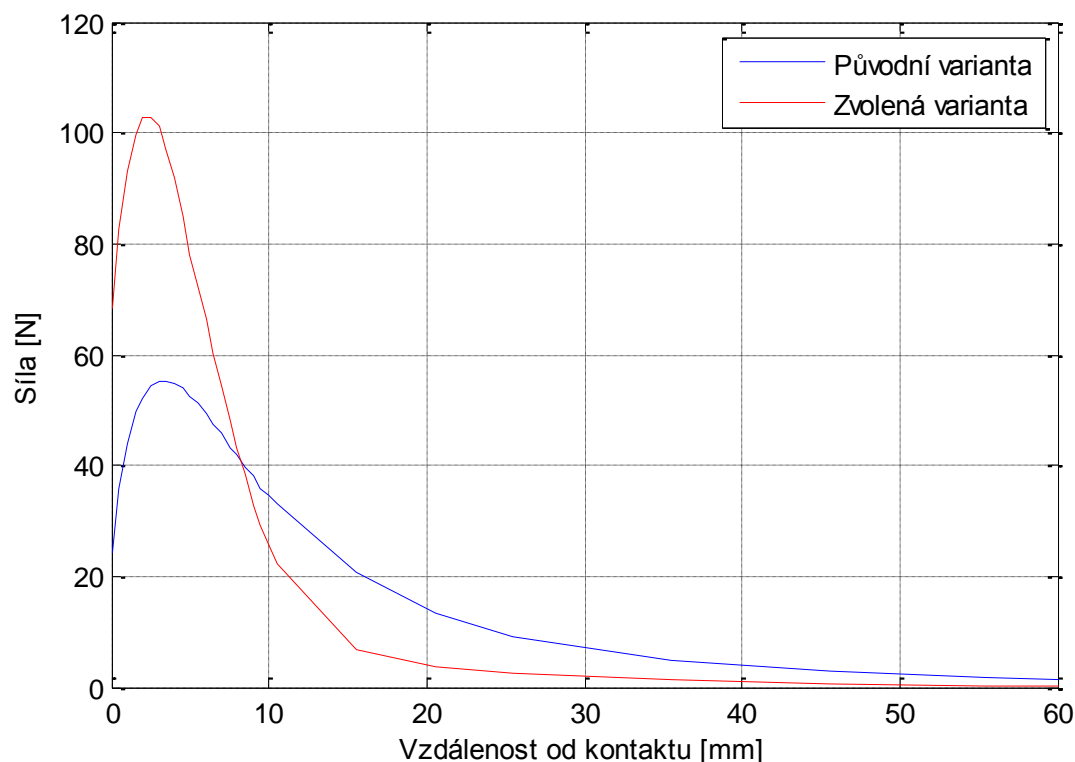


Obrázek 3: Původní varianta pólového nástavce



Obrázek 4: Výsledná varianta pólového nástavce

Původní varianta dosahuje maximální síly 55,2 N a vzdálenosti od kontaktu 3 mm. U výsledné varianty dochází k maximální síle 103 N ve vzdálenosti 2 mm od kontaktu. Síla byla navýšena o 47,8 N, což odpovídá nárůstu o 46%. Průběh síly u původní a výsledné varianty je zobrazen na obrázku 5.



Obrázek 5: Průběh síly u původní a výsledné varianty pólového nástavce

4 Magneto-dynamická analýza akumulátoru při průchodu duralové tyče

Cílem magneto-dynamické analýzy bylo prověřit vliv vířivých proudů při průchodu duralové rozváděcí tyče magnety rámu a pólovým nástavcem při rozváděcím přímočarém vratném pohybu. K rozváděcímu mechanismu, který zajišťuje rozváděcí zdvih 148 mm s konstantní rychlostí 1 m/s, je připojena rozváděcí tyč. Při průchodu rozváděcí tyče magnetickým akumulátorem, se na tyči vytváří proudy, které vytvoří takové magnetické pole, které svými účinky působí proti poli, které ho vytvořilo. Toto pole pak silově působí proti smyslu rozváděcího pohybu. Tyto jevy by se mohli dále využít např. pro snížení podélného kmitání rozváděcí tyče.

V původním návrhu je rozváděcí tyč z duralu s vnitřním průměrem 9 mm a vnějším 12 mm. S původním pólovým nástavcem je velikost vířivých proudů 0,45 N a s výsledným pólovým nástavcem 0,31 N.

Byly provedeny analýzy tyče s menším vnitřním průměrem, kdy rozdíl mezi plnou trubkou a trubkou s tloušťkou stěny 1,5 mm je přibližně 0,2 N. Analýzy s menším vnitřním průměrem nepřinesly výrazný vliv na změnu velikosti síly. Další práce se zabývala analýzou magnetického systému s duralovým pláštěm, který slouží jako kryt pro posuvné magnety tyče. Rozměry trubky byly zvoleny: vnější průměr 40 mm a vnitřní průměr 30 mm. Při takto zvolené variantě je vyvozena síla o velikosti 5,86 N. Kdybychom vliv vířivých proudů chtěli dále ještě navýšit, daly by prvky z duralu vyrobit z materiálu s lepší elektrickou vodivostí. Například kdyby se místo duralu použila měď, síla by se navýšila z 5,86 N na 8,81 N. Navýšení síly je přibližně o 35 %.

5 Měření

Cílem měření bylo ověřit správnost výsledků simulací. K měření bylo použito zařízení ElectroPuls E1000 od firmy Instron dostupné na pracovišti Katedry mechaniky, pružnosti a pevnosti Fakulty strojní Technické univerzity v Liberci. Bylo měřeno dvěma způsoby, nejprve staticky a následně dynamicky. Prověřovány byly magnetické akumulátory s dvěma různými pólovými nastavci, s původním a nově navrženým. K měření byly navrženy přípravky pro upevnění magnetů k měřicímu přístroji.



Obrázek 6: Měřicí zařízení ElectroPuls E1000 od firmy Instron

5.1 Experimentální ověření statické analýzy

Měřicí přístroj umožňuje měření při zdvihu do 60 mm. Bylo snahou využít celý tento rozsah, protože ve vzdálenosti 60 mm od kontaktu ještě není hodnota síly nulová.

Při statickém měření se pomalu přibližovaly magnety tyče od vzdálenosti cca 57 mm až ke kontaktu magnetů tyče s magnetem rámu. Následně se magnety tyče opět oddalovaly do původní vzdálenosti. Tento měřený cyklus probíhal třikrát po sobě. Síla byla měřena při přibližování i oddalování magnetů. Rychlost pohybu byla volena dostatečně pomalá tak, abychom eliminovali dynamické jevy. Proto byla určena rychlost 2 mm/s.

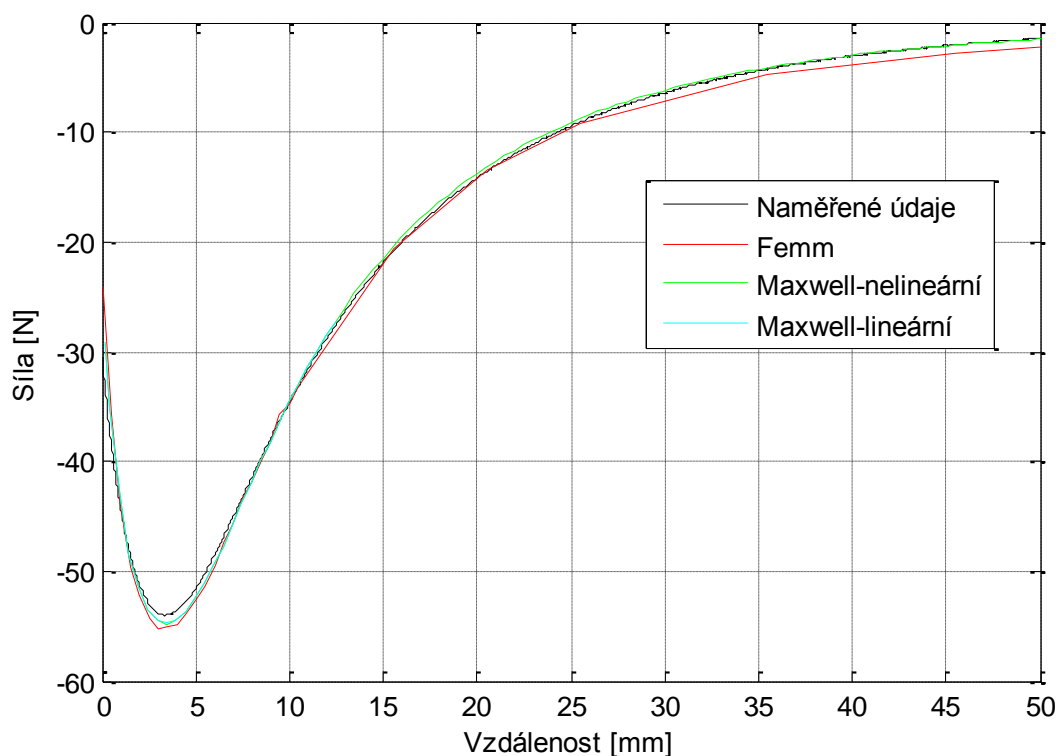
5.1.1 Původní varianta

Při měření původní varianty byl k měřicí hlavě, která je ve spodní části stroje, připevněn polyamidový přípravek s magnetem rámu a původním pólovým nastavcem. Do vrchní pohyblivé části byly připevněny pomocí upínky magnety tyče.

Při měření byla měřena a zaznamenána síla při přibližování i oddalování magnetů. Z výsledků vyplývá, že na výslednou sílu ale směr pohybu nemá vliv. Cyklus přibližování a oddalování byl proveden třikrát. Při těchto cyklech byl průběh síly stále stejný a neměnil se.

Na obrázku 7 jsou vidět různé průběhy síly z různých druhů zdrojů. Průběh síly z měření je zobrazen černou křivkou. Z programu Ansys Maxwell jsou zobrazeny dvě křivky. Zelená křivka je pro ocel s nelineární a světle modře je pro ocel s lineární charakteristikou relativní permeability. Tyto dvě křivky mají shodný průběh a v obrázku se překrývají. Z programu FEMM jsou získaná data zobrazena červenou křivkou. Tento průběh se liší nejvíce z uvedených simulací od hodnot z měření. Rozdíl průběhu síly měření oproti simulaci může být způsobeno nepřesným upnutím přípravku do měřicího stroje, nepřesnou výrobou konstrukčních prvků nebo ovlivněním od upínacích prvků (šrouby).

Z měření bylo získáno maximum magnetické odpudivé síly 54 N ve vzdálenosti 3,4 mm od kontaktu. Tyto hodnoty se shodují s výsledky ze simulace a potvrdily tak správnost modelu.

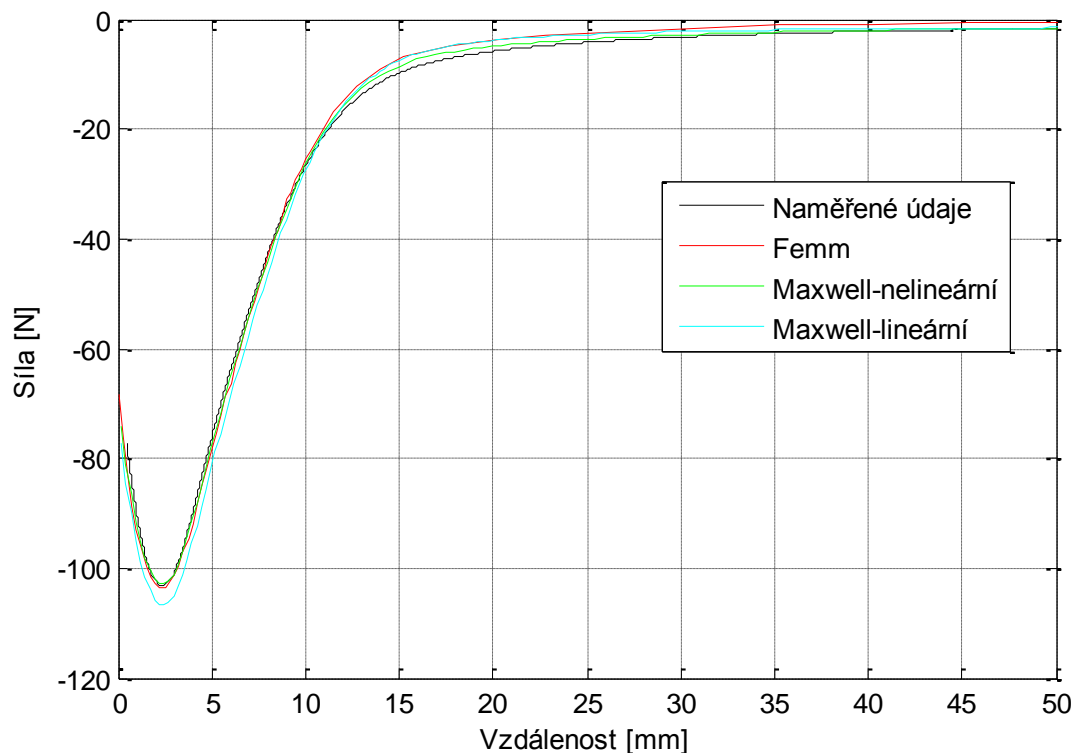


Obrázek 7: Průběh síly z různých zdrojů s původním pólovým nastavcem

5.1.2 Výsledná varianta

Statické měření výsledné varianty probíhalo stejně jako u měření původní varianty. Rozdíl spočíval v tom, že k měřicí hlavě byl upnut polyamidový přípravek s výsledným pólovým nastavcem. Při měření výsledné varianty taktéž nebyl rozdíl v průběhu síly při přibližování a oddalování magnetů ani při opakovaném cyklu měření.

Na obrázku 8 jsou vidět různé průběhy síly z různých druhů zdrojů. Průběh síly je zobrazen černou křivkou. Z programu Ansys Maxwell jsou zobrazeny dvě křivky. Zelená křivka je pro ocel s nelineární a světle modře je pro ocel s lineární charakteristikou relativní permeability. V tomto případě se už ale tyto dvě křivky neshodují. Rozdíl v průběhu magnetické odpudivé síly mezi lineární a nelineární ocelí se projevil až při vyšší magnetické síle. Z programu FEMM jsou získaná data zobrazena červenou křivkou. K naměřeným hodnotám se nejvíce přibližují hodnoty ze simulace Ansys Maxwell pro nelineární ocel. Z měření bylo získáno maximální magnetické odpudivé síly 103,2 N ve vzdálenosti 2,4 mm od kontaktu.



Obrázek 8: Průběh síly z různých zdrojů s výsledným pólovým nastavcem

5.2 Experimentální ověření silových účinků vířivých proudů

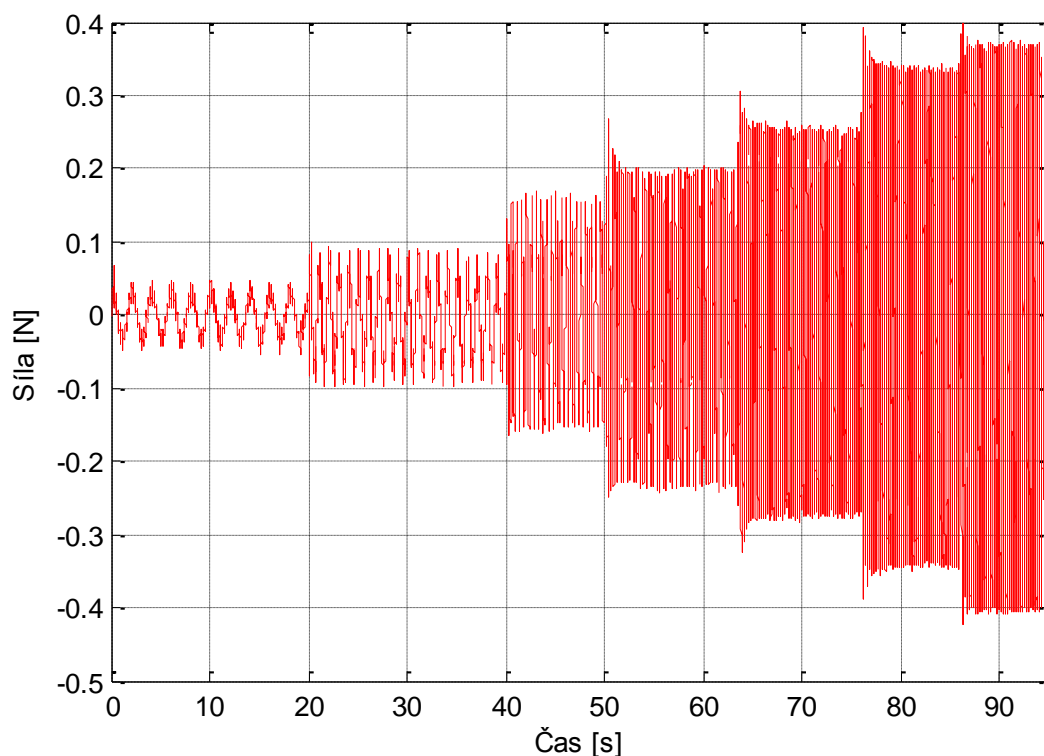
Při měření bylo snahou se co nejvíce přiblížit provozní rychlosti rozváděcí tyče 1 m/s s frekvencí 3 Hz. Budící rychlost byla funkcí \cos , pro kterou bylo nutno zadat amplitudu pohybu a frekvenci. S ohledem na konstrukci měřících přípravků byla zvolena amplituda 20 mm. K tomu byla přiřazena frekvence pohybu v krocích 0,5, 1, 2, 3, 4, 5 a 6 Hz. Větší frekvenci už měřicí přístroj nedokázal uskutečnit. S amplitudou 20 mm a frekvencí 3 Hz bylo dosaženo maximální rychlosti 0,377 m/s.

Při měření síly vzniklé účinky vířivých proudů byly získány hodnoty sil do 5 N. Naměřená data byla zašuměná, a pro další zpracování byl proto šum odfiltrován s filtrem okna o velikosti 20.

5.2.1 Původní varianta

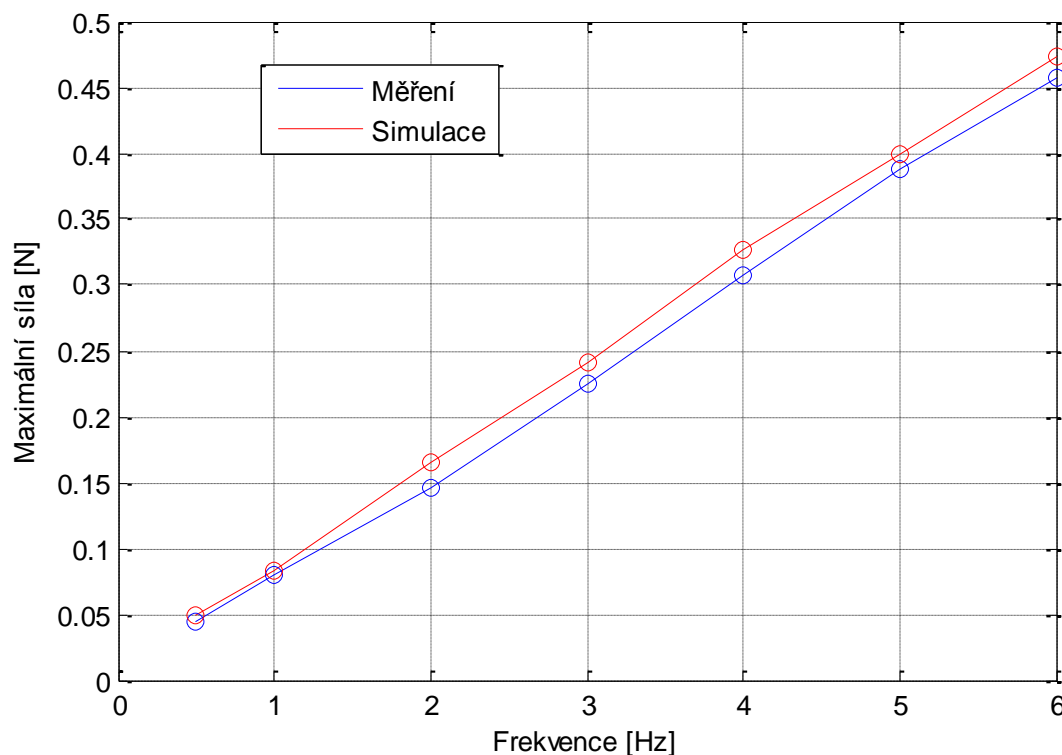
K měřicí hlavě byl připevněn polyamidový přípravek s magnetem a původním pólovým nástavcem. K vrchní pohyblivé části byla upevněna rozváděcí tyč pomocí spojky.

Na obrázku 9 je zobrazen průběh síly v závislosti na různých frekvencích. Při zvětšování frekvence dochází ke zvětšování rychlosti, což má za následek zvětšování silových účinků od vířivých proudů. To znamená, že velikost vířivých proudů je závislá na rychlosti rozváděcího pohybu. Dále je vidět, že na začátku každého cyklu dochází k prudkému nárůstu síly, která se postupně ustaluje na určité hodnotě. Tento jev je způsoben měřicím přístrojem, který nedokáže zcela dodržet velikost amplitudy při změně frekvence.



Obrázek 9: Průběh vířivých proudů při původní variantě pólového nástavce

Na obrázku 10 je zobrazena závislost maximálních sil při různých frekvencích u původní varianty. Červeně jsou znázorněny výsledky ze simulace Ansys Maxwell a modře hodnoty z měření. Závislost maximální síly na frekvenci je téměř lineární. Maximální odchylka simulace od měření činí 0,02 N. Tuto hodnotu můžeme považovat za zanedbatelnou.

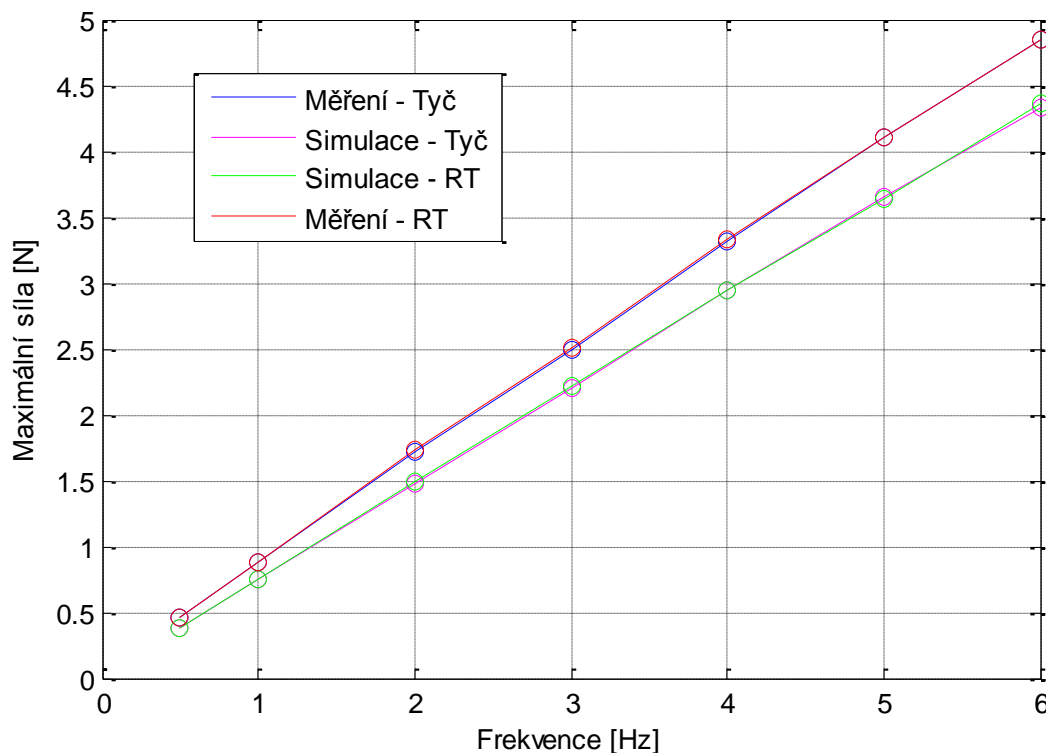


Obrázek 10: Závislost maximální síly od vířivých proudů při různých frekvencích u původní varianty pólového nástavce

5.2.2 Varianta s ochrannou trubkou

V tomto případě nebyl umístěn k měřicí hlavě polyamidový přípravek s pólovým nástavcem a magnetem, ale je zde upnuta duralová trubka s vnitřním průměrem 30 mm a vnějším 40 mm. Předpokládá se, že tato trubka by sloužila jako zakrytování rozváděcí tyče a magnetického akumulátoru. K vrchní pohyblivé části byla v prvním kroku měření připevněna pomocí spojky duralová tyč s průměrem 12 mm. V druhém měření byla nahrazena duralová tyč rozváděcí tyčí s vnitřním průměrem 9 mm a vnějším průměrem 12 mm. K nim byly připevněny pomocí upínky magnety tyče.

Hodnoty maximálních sil při daných frekvencích jsou zobrazeny na obrázku 11. Modře jsou znázorněny výsledné hodnoty z měření s duralovou tyčí a červeně s rozváděcí tyčí. K tomu jsou uvedeny výsledky ze simulace Ansys Maxwell, růžově s duralovou a zeleně s rozváděcí tyčí. Hodnoty z měření duralové a rozváděcí tyče se shodují, totéž můžeme říct i o simulaci. S rostoucí frekvencí rostou maximální silové účinky od vířivých proudů téměř lineárně. Rozdíl mezi naměřenými hodnotami a hodnotami ze simulace roste také lineárně. Tento rozdíl může být způsoben nepřesným výpočtem simulace, chybou měření nebo nepřesným zadáním materiálových vlastností do programu. Dále je z grafu vidět, že na velikost síly od vířivých proudů nemá vliv, zda je pro rozvádění použita trubka nebo tyč.



Obrázek 11: Závislost maximální síly od vířivých proudů při různých frekvencích u varianty s ochrannou trubkou

6 Závěr

Hlavním cílem bylo vytvořit model a provést analýzy. Výsledky ze simulací ověřit s měřením a navrhnout nový pólový nástavec, který přispívá k dosažení vyšší magnetické odpudivé síly magnetického akumulátoru a bude splňovat rozměrové parametry. S původním pólovým nástavcem bylo dosaženo maximální síly 54 N a vzdálenosti 3,4 mm od kontaktu. U nově navrženého pólového nástavce dochází k maximální síle 103,2 N ve vzdálenosti 2,4 mm od kontaktu. Došlo k nárůstu síly o přibližně 48 %. Při nárůstu magnetické odpudivé síly o přibližně 48 % se dá říci, že počet magnetických akumulátorů na doprředacím stroji může být poloviční.

Při použití varianty s ochrannou trubkou vznikají silové účinky způsobené vířivými proudy do 5 N. Velikost síly je lineárně závislá na rychlosti, což může být využito např. při tlumení podélného kmitání rozváděcí tyče na doprředacím stroji.

Literatura

- [1] VALTERA, J., *Optimalizace systému rozváděcí tyče rotorových doprředacích strojů*. Liberec, 2013. 170s. Disertační práce na Strojní fakultě Technické univerzity v Liberci na Katedře textilních a jednoúčelových strojů
- [2] VALTERA, J., *Magnetický akumulátor kinetické energie v koncových polohách rozváděcího pohybu*. V Liberci 29.07.2013, ISSN TUL - MPO17260 -- 13/15/CZ -- CZ + Doprředací stroje

INOVACE BEZPEČNOSTNÍHO PRVKU U PEDÁLOVÉHO ÚSTROJÍ

Bc. Toman Vladimír

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

Abstrakt: Diplomová práce se zabývá inovací bezpečnostního prvku u pedálového ústrojí ve firmě BRANO a.s. Práce shrnuje základní poznatky o pasivních ochranných prvcích na pedálovém ústrojí. Analyzuje a popisuje současný stav řešení v benchmarkovém průzkumu. Součástí práce je i patentový průzkum ochrany zdraví dolních končetin řidiče vozidla. Na základě tohoto průzkumu vzniklo pět nových variant řešení. Tyto varianty jsou detailně popsány a zhodnoceny pomocí zvolených kritérií výběru finální varianty. V rámci této práce je vytvořen detailní konstrukční návrh vybrané varianty, včetně výrobní dokumentace a ekonomického zhodnocení.

Klíčová slova: Inovace, benchmark, pedálové ústrojí, pasivní bezpečnostní prvky, patentový průzkum, MKP, VA/VE, nárazový mechanismus

1 Úvod

Diplomová práce se zabývá inovací bezpečnostního prvku na pedálovém ústrojí. K tomu, aby bylo možné pochopit tuto problematiku, je zde vysvětlena bezpečnost vozidel a její dělení na aktivní a pasivní prvky. V současné době, je vývoj těchto bezpečnostních prvků na prvním místě ve vývoji automobilů. Zabývá se jím spousta firem, nejen automobilek, kde hlavní pokrok nastává zejména v oblasti aktivních prvků bezpečnosti. Mezi ně patří například ABS, ESP a jiné. Jde o elektronické zabránění nehodě vozidla. Důležitá je ovšem i pasivní ochrana, která se naopak zabývá chráněním posádky vozidla během nehody. Mezi takové prvky patří například airbag, bezpečnostní pásy apod. Tento trend vývoje v automobilovém průmyslu je dán jak samotnými automobilkami, tak i legislativou ze strany EU a zbytku světa. K tomuto účelu slouží například nezávislé zkoušky EuroNCAP, které tyto bezpečnostní opatření zkouší a posouvají tak vývoj těchto prvků kupředu.

Tato práce se zaměřuje pouze na pasivní prvky, a to konkrétně u pedálového ústrojí, které ochrání dolní končetiny v případě čelního nárazu vozidla. Děje se tak většinou tím, že pedál je odpojen od posilovače brzd, nebo je pedál vysunut z nosné konzole.

2 Cíle práce

Cílem diplomové práce je inovovat bezpečnostní prvek u pedálového ústrojí. K vypracování pěti variant inovace bezpečnostního prvku, bude sloužit benchmarkový průzkum několika řešení ochrany dolních končetin u PÚ. Tento průzkum ukáže, jaký je současný stav řešení bezpečnostního prvku, a dále jakým principem funguje. Dále bude proveden patentový průzkum na danou problematiku. Z patentové rešerše a benchmarkového průzkumu vznikne inovační záměr. K vybrání finální varianty bude vytvořena rozhodovací matice, ve které budou tato hodnotící kritéria: počet komponent, objemnost řešení, hmotnost, složitost montáže, složitost výroby, rizikovitost bezpečnostního prvku, využitelnost materiálů na bezpečnostní prvek, adaptabilita na různá řešení PÚ a jednoduchost konstrukce.

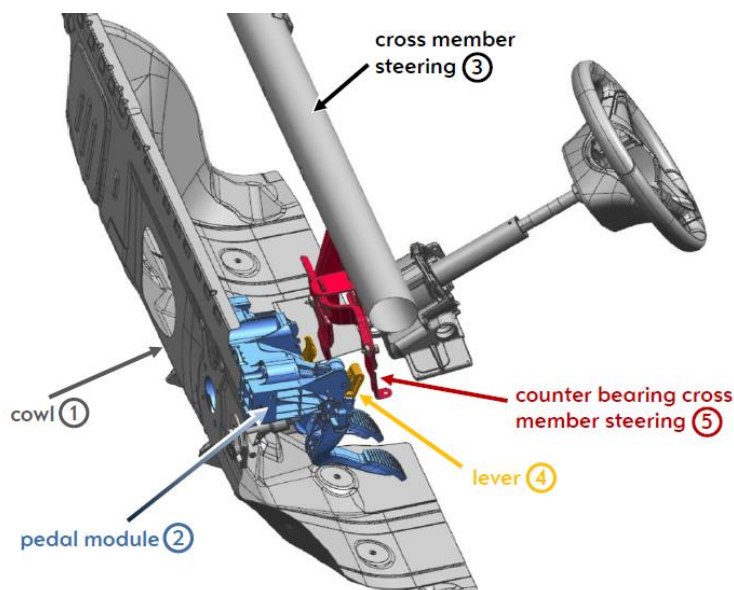
Z těchto kritérií výběru finální varianty vzejde jedna, na kterou bude vytvořen detailní

konstrukční návrh včetně výpočtu silového rozboru na pedálu. Tedy síla na šlapku pedálu při běžném používání cca 120[N], a jaká bude silová odezva na posilovači a jaká na bezpečnostním prvku, kde se může tato síla projevit či nikoliv. Dále musí být uveden výpočet statiky pedálu v sestavě, nejprve se zatížením na šlapku pedálu z „frontálního“ směru 1600 [N] a poté 400[N], působící z boku na šlapku pedálu. Tyto výpočty budou provedeny pomocí metody konečných prvků.

Bezpečnostní prvek musí splňovat zejména následující kritéria. Minimální spouštěcí síla pro aktivaci zařízení musí být 1000[N] a naopak maximální povolená spouštěcí síla mechanismu musí být do 6000[N]. Zároveň musí bezpečnostní prvek být aktivovaný při posunu „firewallu“ nad 2[mm], méně by nebylo vhodné, například kvůli vibracím vozidla (v extrémním případě), ale maximální přípustný posun „firewallu“ do aktivace musí být 15 [mm]. V automobilovém průmyslu, je „firewall“ součástí karoserie, která odděluje motor od řidiče a cestujících. Jedná se o plech o různém tvaru a velikosti. Diplomová práce by měla obsahovat také testování prototypového vzorku, na kterém by bylo možné otestovat tyto hodnoty popsané výše. Zkoušení prototypového vzorku by mělo být řízeno dle běžných zkušebních požadavků automobilek. Zároveň je nutné otestovat na prototypovém vzorku, závislost spouštěcí síly bezpečnostního prvku, v závislosti na síle působící na šlapku pedálu. Tyto síly na šlapku pedálu budou působit v „frontálním směru“ a budou to síly 0[N], 50[N], 200[N], 400[N], 600[N] a 800[N].

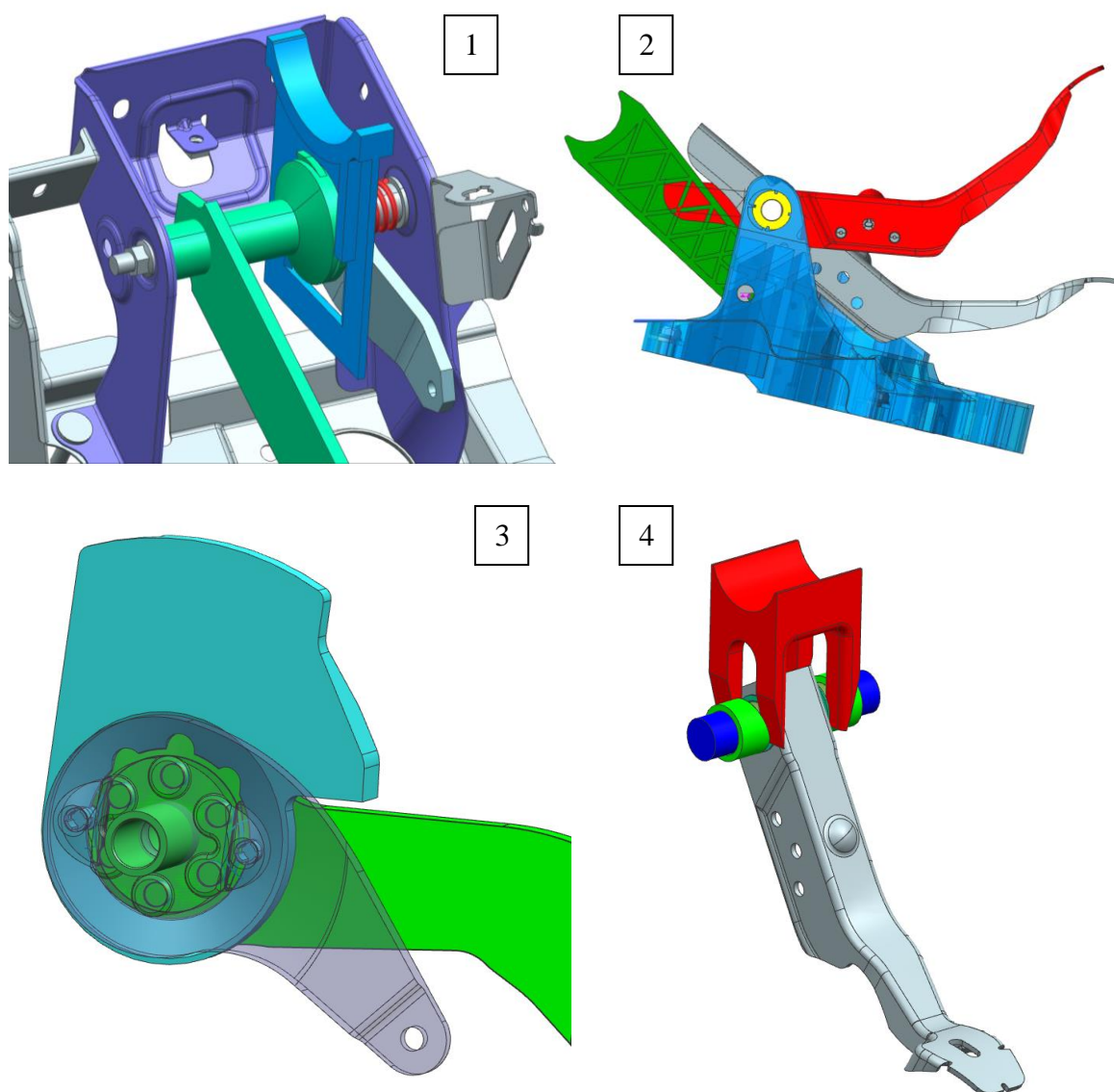
3 Benchmark

Společnost Opel/Vauxhall využívá svůj vlastní systém bezpečnosti u PÚ, který se nazývá PRS. Celý mechanismus je nejlépe vidět na obrázku 1, kde jsou popsány důležité prvky, které do PRS vstupují. Obsahuje tyto části: první je cowl, což je v našem řešení nazýváno jako „firewall“, pak část dva, což je sestava pedálového ústrojí. Část tři je tyč, na které drží přístrojová deska vozidla a je také v této práci uváděno jako modulový nosič. Čtvrtý díl je mechanismus, který zajistí rozpojení pedálu od centrální osy. Poslední pátý díl je výztuha připevněná k tyči palubní desky, která v případě nárazu zachovává svoji pozici a pedálové ústrojí jde proti této výztuze. Na obrázku 1 je zobrazen první typ využívající systém PRS. Tento typ funguje přes „zámek“ centrální osy. Při nárazu je zámek přes výztuhu odpojen a pedál je uvolněn z osy.



Obr. 1 - PRS systém ochrany dolních končetin

4 Varianty řešení



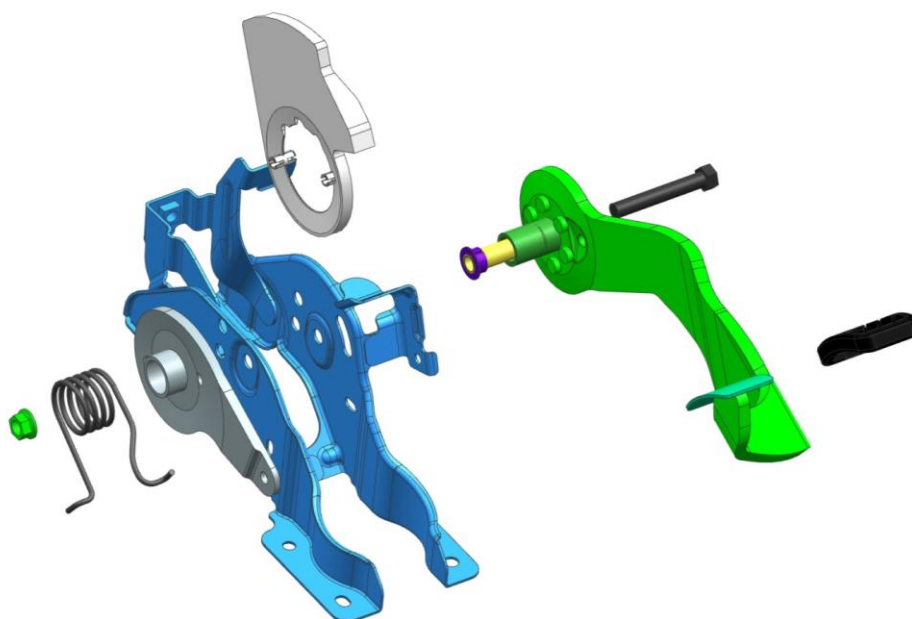
Obr. 2 - Varianty řešení

Jako vítězné řešení inovace bezpečnostního prvku je vybrána **varianta** číslo **tři**. Tato varianta obstála nejlépe ze všech ostatních řešení a **získala nejvíce bodů**. Řešení je založené na principu zubové spojky, je jednoduché a také velmi adaptabilní na různé druhy pedálových ústrojí, jelikož každá automobilová značka využívá jiný typ PÚ, například plastové konzole, nebo dávají přednost plastovým pedálům. Ale jsou i automobilky, které se drží „klasiky“ a stále do svých vozů volí ocelové konzole a pedály, například nákladní vozy stále dávají přednost masivním profilům pedálu, a právě na toto se může hodit tento bezpečnostní prvek. Dále se jedná o velice jednoduchou výrobu v podobě lisování a svařování, nástroje jsou také jednoduché a nebude u nich docházet k rychlému opotřebení, jako například u plastových forem.

5 Finální varianta

Na dalším obrázku číslo 3 je zobrazena celková sestava v zobrazení rozpadu. Spojení mezi ramenem a pedálem by dodržela pružina a zuby zubové spojky. Vyrážecí klín by byl opřený o

modulový nosič, ten by zajistil rozepnutí mechanismu, pokud by došlo ke srážce. Zeleně je označen pedál brzdy, včetně navažené šlapky a středící osově trubky. Na šlapku pedálu přijde ještě gumová obložka (černě). Modře je zobrazena konzola PÚ, která je připevněna šrouby k „firewallu“ vozidla. V tomto případě je připevněna pěti šrouby M8. Šedě je zobrazeno rameno posilovače, což je zároveň protikus zubové spojky, opět se středící trubičkou v ose. Černě je středový šroub M10 a zabezpečující pružina, která byla navržena dle výpočtu v kap. 6.1. Tato pružina má zajistit stálý přítlak mezi oběma díly zubové spojky. Bíle je zobrazen vyrážecí klín, který je z plastu PA6 - GF50. A je směřovaný šikmými plochami obou kusů zubové spojky a zároveň je jištěn dvěma malými plastovými kolíky. Dále je zde žlutě osová trubička, která chrání závit. Na tuto trubičku jsou, nasazeny dvě plastová kluzná ložiska, která slouží k lepšímu pohybu celé sestavy. Nakonec je zde zobrazena zeleně zajišťovací matice M10.



Obr. 3 - Rozpad sestavy PÚ s crashovým mechanismem

Parametry zubové spojky:

Počet zubů: 6 [-]

Roztečná kružnice zubů: 40 [mm]

Výška zubů: 4 [mm]

Průměr zubů: 10 [mm]

Sklon náběhu pro klín: 15 [°]

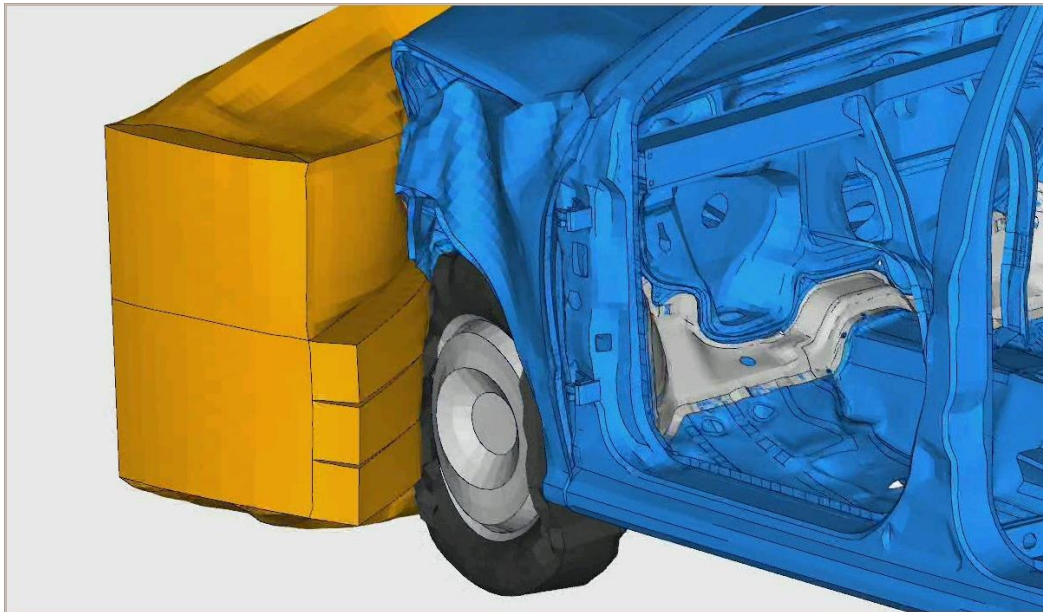
Rozpojení mechanismu v posunutí klínu: 4 [mm]

6 Konstrukční návrh

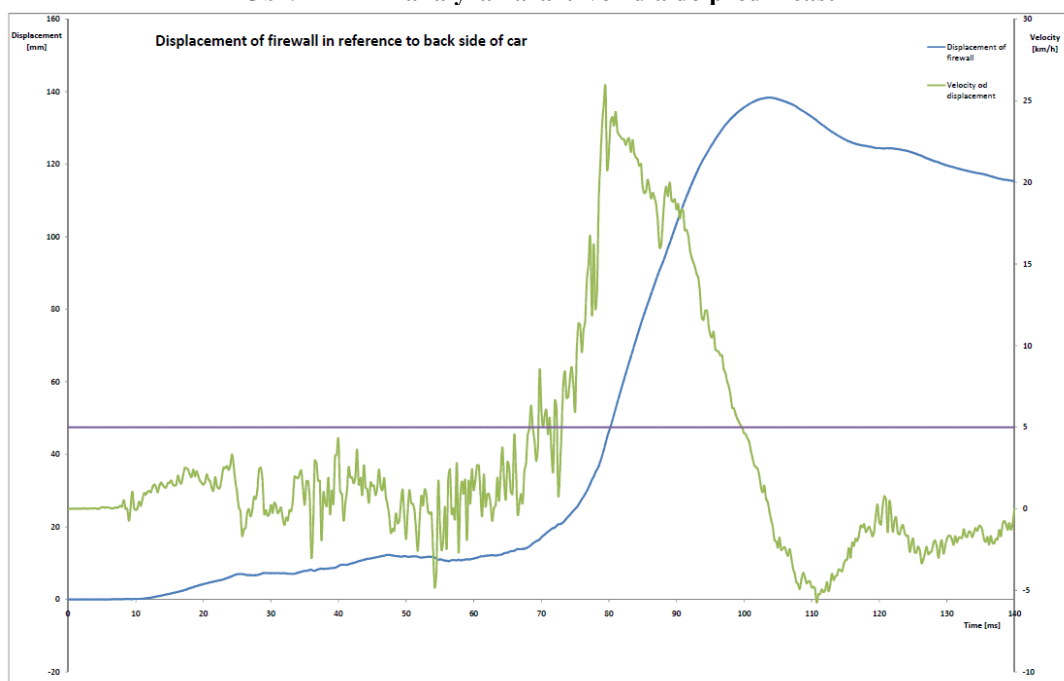
Pro návržení a kontrolu mechanismu je nezbytné provést MKP analýzu pro simulaci nárazového testu vozidla u firmy MECAS ESI s.r.o. Předmětem zkoumání bylo zjistit, jaké je maximální posunutí „firewallu“ a jaké jsou rychlosti tohoto posunutí v závislosti na čase. Tyto parametry jsou nezbytné, aby bylo možné zjistit, jak rychle reaguje zvolený koncept a jaké posunutí „firewallu“ je zapotřebí k tomu, aby „crashový“ mechanismus fungoval.

Z grafu 1 je možné vyhodnocení kinematického prostředí pohybu PÚ při destrukci vozu. Z dodaných dat vyplývá, že maximální posuv „firewallu“ je cca 140 [mm] a dochází k tomuto posuvu v čase 100 [ms], maximální rychlost posuvu je cca 7 [m/s] (25km/h). Ve zvolené

konceptu je zapotřebí posuv maximálně 4 [mm], aby došlo k úplnému rozpojení pedálu. Z uvedených výsledků a požadavků je zřejmé, že k rozpojení pedálu dojde v čase cca 30 [ms].



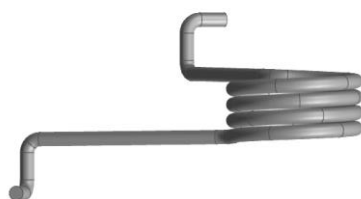
Obr. 4 - FEM analýza nárazu vozidla do přední části



Graf 1 - Kinematické poměry na vozidle při srážce

6.1 Návrh pružiny

Pro vybranou variantu je nutné navrhnout pružinu, která bude plnit následující funkce. Nejprve musí pružina zajistit přítlak na rameno posilovače. Síla, kterou by měla pružina vykonat, by se měla pohybovat okolo 100[N]. Dále by pružina měla plnit funkci takovou, že bude navracet pedál do výchozí pozice, tedy do horní úvrati. Pro lepší představu tvaru pružiny je vygenerován obrázek 5. Materiál byl zvolen 60SiCr7, je to za tepla válcovaná ocel určená pro pružiny, její mez pevnosti je 1550 [Mpa]. [11]



Obr. 5 - Zkrutně - tlačná pružina

Zadání: $F_8=100[\text{N}]$; $s_8= 11[\text{mm}]$; $F_1=50[\text{N}]$; $D=33,5[\text{mm}]$; $\tau_{Dm}=0,5 \cdot R_m=0,5 \cdot 1550=775[\text{MPa}]$, materiál pružiny: 1.7108; $F=F_8=100[\text{N}]$

Výpočet průměru drátu:

$$d = \sqrt[3]{\frac{8 \cdot F \cdot D}{\pi \cdot \tau_{Dm}}} = \sqrt[3]{\frac{8 \cdot 100 \cdot 33,5}{\pi \cdot 775}} = 2,22[\text{mm}] \Rightarrow \text{voleno } d = 3,5[\text{mm}] \quad (1)$$

Výpočet činných závitů:

$$n = \frac{G \cdot d^4 \cdot s_8}{8 \cdot F \cdot D^3} = \frac{80500 \cdot 3,5^4 \cdot 11}{8 \cdot 100 \cdot 33,5^3} = 4,42 \Rightarrow \text{voleno } n = 4,5 \quad (2)$$

Výpočet celkového počtu závitů:

$$n_c = n + n_z = 4,5 + 2 = 6,5 \quad (3)$$

Výpočet tuhosti pružiny:

$$c = \frac{F}{s_8} = \frac{100}{11} = 9,09 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}} \right] \quad (4)$$

Výpočet poměru vinutí:

$$i = \frac{D}{d} = \frac{33,5}{3,5} = 9,6 \quad (5)$$

Pevnostní výpočet:

$$\tau_8 = \frac{8 \cdot F_8 \cdot D}{\pi \cdot d^3} = \frac{8 \cdot 100 \cdot 33,5}{\pi \cdot 3,5^3} = 198,97[\text{MPa}] \quad (6)$$

$$\tau_8 = 198,97[\text{MPa}] < \tau_{Dm} = 775[\text{MPa}] \Rightarrow \text{VYHOVUJE} \quad (7)$$

Navržená pružina vyhovuje pevnostní podmínce dle rovnice (7) a pružina má tedy tyto parametry: celkový počet závitů n je 6,5 a průměr drátu d byl zvolen 3,5[mm]

Zkrutná část: dle obrázku 35 byla navržena zkrutná pružina.

Zadání: $F_{8zkr} = 65[\text{N}]$, $F_{1zkr} = 45[\text{N}]$; $\varphi_1 = 64[^\circ]$, $\varphi_8 = 84[^\circ]$; $d = 3,5[\text{mm}]$; $D = 33,5[\text{mm}]$; $n = 6,5$; $R_p = 63[\text{mm}]$, $R_m = 1550 [\text{MPa}]$

Výpočet dovoleného napětí:

Pro výpočet dovoleného napětí u zkrutné pružiny platí, když $i > 8$, pak pro zušlechťený drát nebo žíhaný drát ze slitinové oceli Si-Cr platí.[16]

$$\sigma_{D0} = 0,7 \cdot R_m = 0,7 \cdot 1550 = 1085[\text{MPa}] \quad (8)$$

Výpočet momentů M_{k8} a M_{k1} :

$$M_{k8} = F_{8zkr} \cdot R_p = 65 \cdot 63 = 4095[\text{N} \cdot \text{mm}] \quad (9)$$

$$M_{k1} = F_{1zkr} \cdot R_p = 45 \cdot 63 = 2835[\text{N} \cdot \text{mm}] \quad (10)$$

Výpočet zkrutné tuhosti:

$$c_\varphi = \frac{M_{k8}}{\varphi_8} = \frac{4095}{84} = 48,75 \left[\frac{\text{N} \cdot \text{mm}}{^\circ} \right] \quad (11)$$

Výpočet korekčního součinitele:

$$K_0 = \frac{i}{i-0,75} = \frac{9,6}{9,6-0,75} = 1,08 \quad (12)$$

Pevnostní výpočet:

$$\sigma_o = \frac{K_0 \cdot M k_g}{W_o} \leq \sigma_{Do} \quad (13)$$

$$\sigma_o = \frac{K_0 \cdot M k_g}{\frac{\pi \cdot d^3}{32}} \leq \sigma_{Do} \quad (14)$$

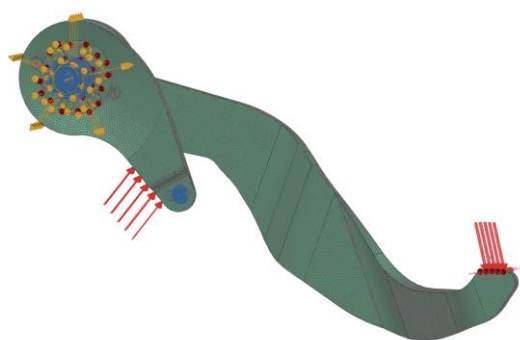
$$\sigma_o = \frac{1,08 \cdot 4095}{\frac{\pi \cdot 3,5^3}{32}} = 1050,7 [MPa] \quad (15)$$

$$\sigma_o = 1050,7 [MPa] < \sigma_{Do} = 1085 [MPa] \Rightarrow \underline{\text{VYHOVUJE}} \quad (16)$$

6.2 FEM

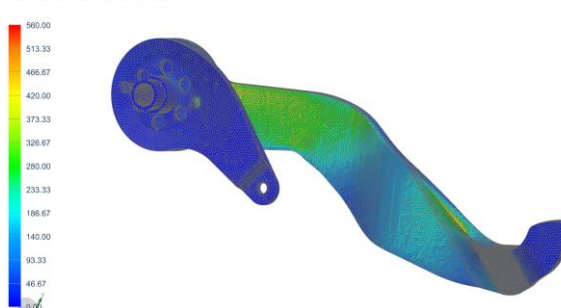
Tato kapitola je věnována výpočtům pomocí metody MKP, konkrétně byla počítána statika pedálu v sestavě se zubovou spojkou. Zatížení pedálu odpovídalo běžným zkušebním předpisům automobilky Suzuki. Při zatížení frontální silou $F_p = 1600$ [N] na šlapku pedálu nesmí napětí (von Mises) nikde na pedálu přesáhnout hodnotu 560 [MPa], což je mez pevnosti pro materiál S275JR. Síť byla převážně generována pomocí funkce 3D tetramesh, kde velikost elementů byla závislá na velikosti komponentu, velikost elementu na pedálu je 1 [mm], a na rameni 2 [mm]. Trubky na pedálu a na posilovači mají velikost elementu 2 [mm]. K vysíťování je použit element CTETRA se čtyřmi uzly. Následovalo zadání okrajových podmínek, kde se použily pevné vazby v otvorech pro šroub, což je v centrální ose. Dále pak v otvoru pro čep od posilovače. Následovalo zadávání sil – síla působící na šlapku v čelním směru byla stanovena 1600 [N] dále síla od pružiny, působící na rameno posilovače 100 [N] a momentové zatížení od zkrutné pružiny. Její síla působí na spodní plochu ramene posilovače, síla má hodnotu 65 [N]. Zadané okrajové podmínky jsou vidět na obrázku 41. Červeně jsou značeny síly, žlutě jsou vyznačeny kontakty ploch „surface to surface“ s koeficientem tření 0,2 a modře jsou vyznačeny pevné fixní vazby.

Dle zjištěných výpočtů by měl pedál obstát u zkoušek ze statiky pedálu dle specifikace Suzuki, pedál nikde nepřesáhl napětí 560 [MPa] a nikde nebylo zjištěna totální deformace větší než 20 [mm]. Dále bylo zjištěno, že největší napětí na zubech nesou první 4 zuby (viz obrázek 45). V tomto obrázku je maximální hodnota napětí 158,75 [MPa]. V další fázi vývoje by tedy bylo možné tento počet zubů ještě zredukovat. Jelikož se ale jedná o bezpečnostní díl, je dobré zvážit, zda počet zubů zanechat. Další obr. 46 nám ukazuje, že maximální tlak v zubech zubové spojky je 58,3 [MPa].



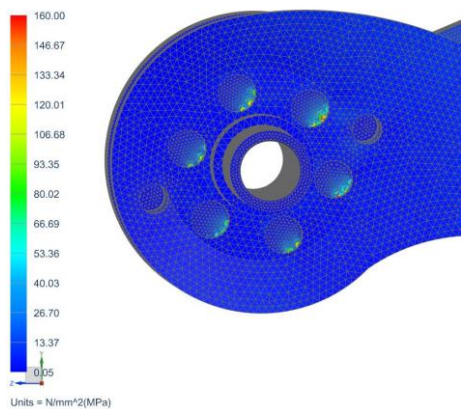
Obr. 6 - Okrajové podmínky

Pedal_nov_sestava_PART_asm1 - 1600 frontal Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Stress - Element, Von-Mises
Min: 0.00, Max: 509.16, Units = N/mm^2(MPa)
Deformation - Displacement - Nodal Magnitude



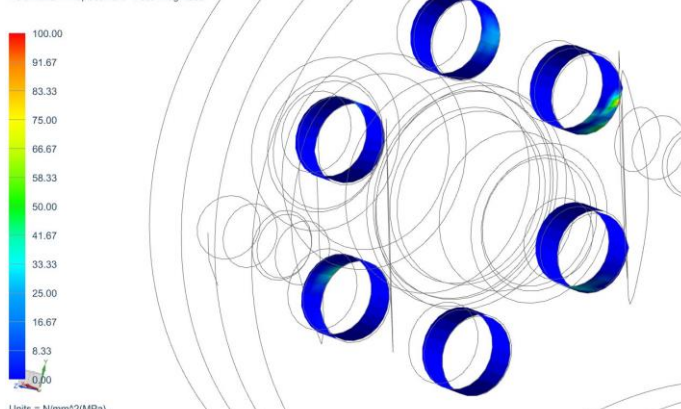
Obr. 7 - Napětí deformace von Mises při zatížení 1600[N]

Pedal_nov_sestava_PART_sim1 : 1600 frontal Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Stress - Elemental, Von-Mises
Min : 0.05, Max : 158.75, Units = N/mm²(MPa)
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Obr. 8 - Napětí na zubech zubové spojky

Pedal_nov_sestava_PART_sim1 : 1600 frontal Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Contact Pressure - Nodal, Scalar
Min : 0.00, Max : 58.33, Units = N/mm²(MPa)
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Obr. 9 - Tlak na zubech zubové spojky

7 Testování

Na zkušebnu byl dodán prototypový vzorek zubové spojky a poté následovalo ustavení na testovací zařízení SHIMADZU. Konzola pedálu byla připevněna šrouby k hliníkové podložce, která byla ustavena k otočnému přípravku. Rameno pedálu bylo pevně zajištěno ocelovou vidlicí, rovněž připevněnou k hliníkové podložce. Na šlapku pedálu působí síla F_p , která je dle zadání v prvním případě nulová, to zjišťuje na přípravku připevněný tenzometrický snímač. Na zařízení SHIMADZU byl připevněn k tenzometru kolík, který měl simulovat pevnou modulovou tyč, která drží palubní desku, a která se nikam neposouvá během nárazu – na rozdíl od „firewallu“ vozidla. Tento kolík, který představoval sílu F_v působil kolmo na plochu plastového klínu a kolmo na centrální osu pedálu. Celé toto nastavení je zobrazeno na obrázku 10. Naměřené hodnoty jsou zaneseny v tabulce 1.

Dále na dodaném prototypovém vzorku byla provedena životnostní zkouška, viz obrázek 11. Pedálová sestava se připevnila k životnostnímu stavu a na šlapku pedálu byl připevněn přípravek, na který působil pneumatický válec. Zdvih pedálu byl stanoven na 111 [mm], což je maximální zdvih dle výkresu (viz příloha). Při této zkoušce bylo vykonáno 960 000 zdvihů bez přerušení. Tato zkouška probíhala za normální teploty, tlaku a vlhkosti okolí. Zkouška proběhla bez poškození a bez viditelné deformace pružiny.



Obr. 10 - Testování prototyp



Obr. 11 - Testování životnosti pružiny

Tabulka 1- Naměřené hodnoty testování

PÚ se zubovou spojkou		
Zatížení pedálu F_p [N]	Vyrážecí síla F_v [N]	Délka dráhy pro rozpojení mechanismu L_v [mm]
0	1396	3,51
50	1430	2,30
200	1470	2,36
400	2225	3,15
600	2520	3,36
800	2180	2,94

8 Závěr

Výsledkem diplomové práce je inovovaný bezpečnostní prvek u pedálového ústrojí, konkrétně šlo o implementaci inovace do řešení PÚ Suzuki. Tento bezpečnostní prvek slouží k ochraně dolních končetin řidiče. K úspěšnému splnění cílů diplomové práce byly využity principy a znalosti z oblasti inovačního inženýrství. Dále bylo nezbytné využití prostředků firmy BRANO a.s. a jejich běžných postupů při navrhování inovace PÚ.

V této práci byl proveden benchmarkový a patentový průzkum, bez něhož by nebylo možné pokračovat, vzhledem k tomu, že nebylo přesně jasné, jaké bezpečnostní prvky využívá konkurence BRANA, a co používají automobilky ve světě. Tato rešerše dopomohla k pěti novým variantám řešení inovace. Aby bylo možné vybrat správnou variantu, bylo zde určeno mnoho výběracích kritérií, která jsou v této práci detailně popsána. Samotné bodové ohodnocení variant je uvedeno i s komentářem a odůvodněním.

Vítěznou variantou, na které byl následně proveden detailní konstrukční návrh, se stala varianta číslo 3. Koncept založený na principu zubové spojky. Toto řešení lze jednoduše implementovat do plastových, ocelových, ale i konzol vyrobených z lehkých kovů. Výhodou tohoto řešení je jednoduchost, využití tváření pomocí lisů, jednoduchá montáž i demontáž, nízká míra rizika v podobě nefunkčnosti brzdového pedálu a je zde i možnost opakovaného použití, pokud by nedošlo k velké deformaci PÚ. Další výhodou je nízký počet komponent a malá objemnost. Jistou nevýhodou v této variantě je větší hmotnost. Ve výsledku ale nehraje příliš velký rozdíl s konkurencí, jelikož bezpečnostní prvky vždy hmotnost PÚ zvyšují. Toto řešení může být také implementováno do nákladních vozidel, což rozšiřuje potenciální trh.

Na této finální variantě bylo provedeno několik kontrolních výpočtů, například výpočet potřebné síly k rozpojení mechanismu, dále kontrolní výpočet ke kontrole zubů zubové spojky. Následoval výpočet na kontrolu otlacení a kontrola na smyk. V rámci tohoto řešení bylo nutné navrhnout zkrutně tlačnou pružinu, která zajišťovala přítlak ramene posilovače k pedálu. Ta zároveň vracela pedál do horní úvratí. Dále byl u této varianty proveden ověřovací výpočet pomocí MKP metody, kde se kontrolovalo statické zatížení silou na šlapku o hodnotě 1600 [N] ve „frontálním“ směru a v bočním směru silou 400 [N], kde nejdříve působí síla zleva a poté zprava. Obě tyto síly působí zvlášť. Tento výpočet ukázal, že dané navržené zubové spojky a pedálu vyhovuje specifikacím daným automobilkou Suzuki a při reálných testech by toto spojení mělo vydržet – to znamená, že nikde nebylo dosaženo totální deformace větší než 20 [mm]. A dále nikde nebyla překročena mez pevnosti pro materiál S275JR, která činí $R_m = 560$ [MPa].

Celý tento MKP výpočet dokazují i reálné testy na prototypovém vzorku PÚ s bezpečnostním prvkem, vyrobeném ve firmě BRANO a.s. Při reálném testování bylo požadavkům automobilky Suzuki vyhověno. Měřila se závislost síly potřebné k rozpojení mechanismu v závislosti na síle na šlapce pedálu. Maximální síla potřebná k rozpojení je v hodnotě 2520 [N], které bylo dosaženo při síle na šlapce pedálu 600 [N]. Dále největší dráha posunutí klínu, potřebná k rozpojení, byla naměřena při nulovém zatížení na šlapce pedálu a tato dráha byla dlouhá 3,51 [mm]. Síla potřebná k rozpojení byla v tu chvíli na hodnotě 1396 [N]. Tyto hodnoty vyhovují cílům diplomové práce, které byly kladeny na bezpečnostní prvek. To je maximální možný posun 15[mm] – u tohoto řešení bylo maximální posunutí do aktivace 3,51[mm]. Zároveň splnilo toto řešení i druhou podmínku, že se nesmí aktivovat dříve než, se posune „firewall“ o 2 [mm]. Naměřená hodnota byla 2,3 [mm], což vyhovuje zadání. Dalším požadavkem na bezpečnostní prvek bylo, aby síla pro aktivaci nebyla větší než 6000 [N], u tohoto řešení bylo naměřeno 2520 [N], což je vyhovující a navíc s velkou rezervou. Naopak stanovenou dolní hranicí pro aktivaci byla síla 1000 [N], nejmenší naměřenou hodnotou pro aktivaci bylo 1396 [N].

Literatura

- [1] Aktivní prvky bezpečnosti. Dostupné z: <http://www.ibesip.cz/cz/ridic/bezpecne-vozidlo/moderni-technologie-vozidel/aktivni-bezpecnost-prvky-aktivni-bezpecnosti>
- [2] Pasivní prvky bezpečnosti. Dostupné z: <http://www.ibesip.cz/cz/ridic/bezpecne-vozidlo/moderni-technologie-vozidel/pasivni-bezpecnost-prvky-pasivni-bezpecnosti>
- [3] VOSTREJŽ, J., *Vliv moderních prvků pasivní bezpečnosti na ochranu posádky vozidla*, [Diplomová práce]. Brno, VUT v Brně, 2012. 95 s.
- [4] Pedal release system. *IFZ-Berlin* [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: http://www.ifz-berlin.de/crash_pdf/english_crash_pedal_release.pdf
- [5] Patent. *Wikipedie* [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Patent>
- [6] Rešerše. *Wikipedie* [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Re%C5%A1er%C5%A1e>
- [7] PEŠÍK, L., *Části strojů – stručný přehled 1*, 4. vydání, doplněné. Liberec: TUL, 2010, 226s., ISBN:978-80-7372-573-0
- [8] PEŠÍK, L., *Části strojů – stručný přehled 2*, 4. vydání, doplněné. Liberec: TUL, 2010, 236s. ISBN:978-80-7372-574-7
- [9] BENEŠ, M., *Inovace ohříváče vody*, [Diplomová práce]. Liberec, TUL v Liberci, 2015. 66 s.
- [10] MAŠÍN, Ivan. *Inovační inženýrství: plánování a návrh inovovaného výrobku*. Liberec: ReproArt, 2012. ISBN:978-80-7372-852-6
- [11] LEINVEBER J., VÁVRA P., *Strojnické tabulky*, 3. vydání., Praha: ALBRA, 2006, 914s., ISBN:80-7361-033-7
- [12] Šroubové pružiny, pryžové pružiny. [online]. Opava, 2012 [cit. 2016-02-26]. Dostupné z: Http://www.strojka.opava.cz/UserFiles/File/_sablony/SPS_II/VY_32_INOVACE_C-07-13.pdf
- [13] *Operating pedal support structure*. US. US20070234841 A1. Přihlášeno 5. 4. 2007.
- [14] *Pedal with an anti-collision safety mechanism*. ES. EP1557330 B1. Přihlášeno 21. 9. 2004.
- [15] *Collapsible pedal box*. US. US7516683 B2. Přihlášeno 31. 3. 2003.
- [16] ČSN 02 6008. *Šroubovitě pružiny válcové zkrutné z drátu a tyčí kruhového průřezu tvářené za studena.: Základní pojmy, výpočet a směrnice pro konstrukci*. 1979.

KONSTRUKCE A VÝROBA ZAŘÍZENÍ PRO EXTRUDACI ABS A JINÝCH MATERIÁLŮ PRO 3D TISKÁRNY

Vašata Josef

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,

Fakulta strojní, 2. ročník

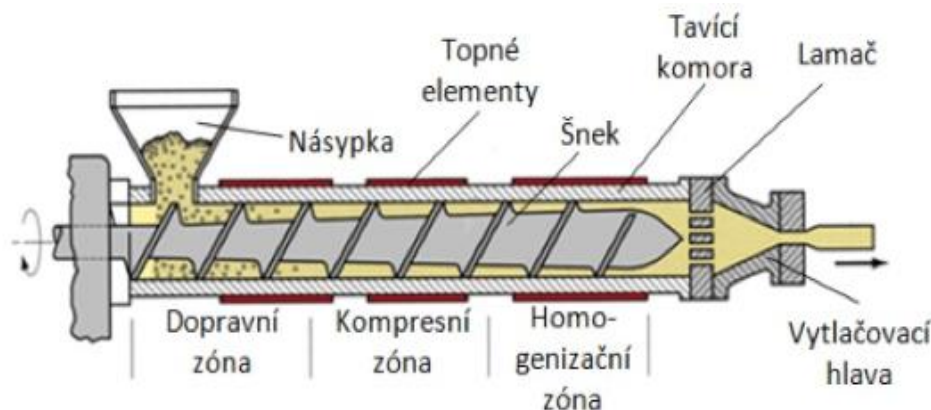
Magisterský studijní program – VÝROBNÍ SYSTÉMY

Abstrakt: Cílem práce bylo navrhnout a zkonstruovat stroj pro výrobu vlákna z termoplastického materiálu pro 3D tiskárny. Bylo provedené odzkoušení vhodnosti konstrukce pro různé typy termoplastických materiálů a různé teplotní nastavení. Tento stroj disponuje snadným ovládáním a především snadným čištěním při výměně termoplastického granulátu.

Klíčová slova: rerap, extruder, vlákno, termoplastický materiál, konstrukce, granulát

1 Úvod

Tato práce je zaměřena na výrobu vlákna pro 3D tiskárnu typu RepRap, která zpracovává termoplastické materiály ve formě vlákna. Problematika vlákna spočívá nejenom v jeho ceně, která je někdy i 10x vyšší, než cena granulátu, ale zároveň dostupnost speciálních materiálů, či jejich barevných kombinací. Tento problém by mohl vyřešit stroj pro vytlačování vlákna - extruder, který můžeme vidět na obrázku 1. Tento stroj dokáže zpracovávat jakýkoliv termoplastický materiál ve formě granulí a následně z něho vytvořit vlákno, které se použije při 3D tisku. Design extruderu, který je popsán v této práci, bude obdobný, jako u extruderů, které se již vyrábí pro tyto aplikace a které vycházejí z větších průmyslových extruderů tak, jak je známe. Díky tomuto stroji se budou moci vyrábět vlákna dle různých specifikací a zkusit nové druhy materiálů a kompozitů, například materiál s příměsí přírodního, či syntetického vlákna. Další výhodou, po stránce designu, je možnost vytvoření různě barevného vlákna - výrobku.



Obrázek 1: Schéma šnekového stroje [1]

2 Technická řešení extruderu

Veškeré rotující části jsou v jedné ose: motor, převodovka, spojka a šnek. Šnek, jakožto nejdůležitější část stroje, byl použit hadovitý vrták zkrácený na příslušnou délku. Extruder disponuje třemi topnými tělesy pro lepší rozložení teploty ve válci a přesnější nastavování provozní teploty. Násypka byla vyrobena pomocí 3D tisku a je připevněna k extruzní komoře. Tato extruzní komora je svařena k ocelové přírubě. Plastová příruba slouží jako těsnící člen a zároveň jako kluzné ložisko pro šnek. Další součástí stroje je „break plate“, takzvaný lamač, který má za účel lepší homogenizaci materiálu a snížení výskytu bublin v tavenině. Dávkovací hlava má na obou stranách vnitřní závity s jemným stoupáním pro lepší utěsnění spoje a má za úkol shromažďovat homogenní taveninu před vstupem do trysky. Samotná tryska je koncipovaná pro daný průměr vlákna.

Vlákno, které je vytlačováno z trysky, je následně chlazeno vzduchem za pomoci ventilátoru, který je umístěn v nerezové skříni, na které je připevněn celý extruder. Tato skříň disponuje otvory pro ovládací a informační techniku, jakou jsou například hlavní vypínač, regulátor teploty, regulátor otáček a další.

1.2 Volba a konstrukce komponentů

Při volbě komponentů a konstrukci byl kladen důraz na kvalitu a jednoduchost v případě nějakých závad a také cena byla jedním z důležitých elementů při výběru jednotlivých dílů. Komponenty byly poptány u tuzemských dodavatelů, anebo vyrobeny přímo na TUL.

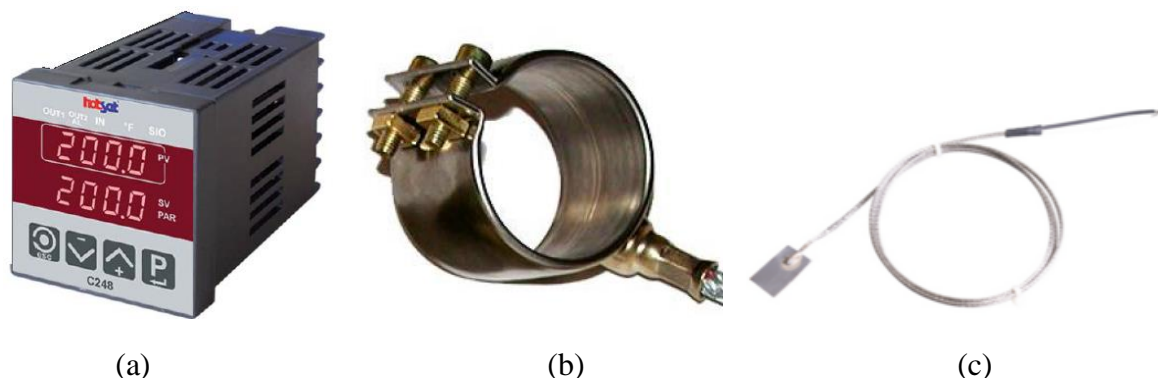
Stejnoseměrný kartáčový motor, planetová převodovka: Na základě poptávky motoru s převodovkou, byla vybrána firma Raveo. Motor je stejnosměrný kartáčový o výkonu 180W–250 W s krouticím momentem 0,57 Nm – 0,8 Nm dle režimu provozu. Motor je připojen k 3-stupňové planetové převodovce s převodovým poměrem $i=78,71$ a s přípustným výstupním momentem 50 Nm. Dále bylo objednáno řízení DC motoru.



Obrázek 2: (a) Stejnoseměrný motor, (b) planetová převodovka – Raveo [2]

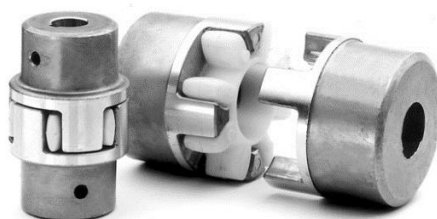
Regulátor teploty, topný pásek, termočlánek: Pro ohřev extruzní komory a její regulace byly převzaty zkušenosti od různých výrobců menších extruderů. Nejvhodnější ohřev komory, pro toto zařízení, je pomocí topných pásek, které fungují na principu ohřevu pomocí elektrického odporu. Snímání teploty na topných páscích zajišťují termočlánky. Tyto komponenty by však nefungovaly bez regulátoru a řízení. Proto byla poptávána firma Hotset, která nabídla celkové funkční řešení pro celou sestavu. Firma vytypovala regulátor teploty a následně i jednofázové polovodičové spínací relé. Regulátor a polovodičové relé bylo nutno objednat po dvou kusech jelikož extruzní komora bude vytápěna na dvě teplotní pásma. V praxi to znamená, že první

regulátor bude pracovat se dvěma topnými pásky a druhý regulátor bude pracovat se třetím topným páskem.



Obrázek 3: (a) Regulator teploty , (b) Topný pásek ,(c) Plochý termočlánek typ J [3]

Pružná spojka: Pružná spojka splňuje důležitou úlohu při spojování dvou sousedních hřídelí. Jejich přednosti jsou částečná kompenzace nesouososti a radiální vůle, dále tlumí rezonance a přenos vibrací od hnaného člena zpět do motoru a šetří tím životnost součástí. Spojka se skládá ze dvou nábojů ze slitiny hliníku a věnce, který je z termoplastu s tvrdostí 94° shore a odolá nominálnímu krouticímu momentu 35 Nm.



Obr. č. 4: Pružná spojka – T.E.A. Technik [4]

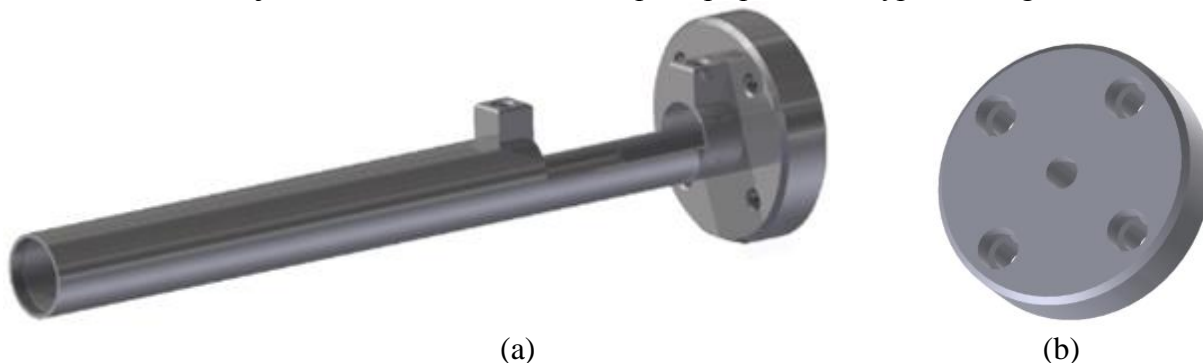
Extruzní šnek: Při výběru designu šneku bylo postupováno na základě recenzí z podomácku vyrobených extruderů, kde byl použit hadovitý vrták pro svoji cenu i dobrou schopnost dopravovat granulovaný materiál uvnitř tavicí komory. Délka vrtáku byla zvolena tak, aby se na opláštění komory vhodně rozmístily tři topná tělesa pro rovnoměrnější ohřev. Materiál vrtáku je HCS (high carbon steel).



Obrázek 5: Hadovitý vrták – Vrtáky Vrbovský [5]

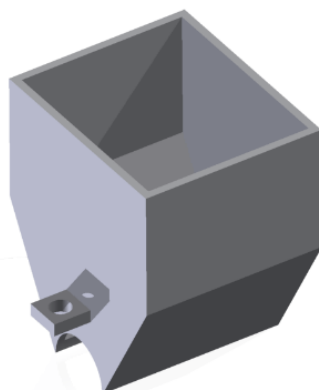
Extruzní komora s přírubou a držáky pro násypku: Extruzní komora je vyrobená z nerezové bežešvé trubky s rozměry $\text{Ø}30 \times 318$ se světlostí 2 mm. Na jednom z konců byl vytvořen vnitřní závit M27x0,75 pro montáž dávkovací hlavy, zatímco druhý konec byl ponechán beze změny pro zavaření spolu s přírubou. Na trubce je vyfrézována drážka pro usazení násypky a na krajích drážky jsou přivařeny ocelové kostky se závity, které slouží pro uchycení násypky za pomoci šroubů. Příruha je rovněž z oceli s rozměry $\text{Ø}20 \times 80$ a se čtyřmi otvory se závity, pomocí nichž bude svařená sestava spojena s plastovou přírubou. Příruha má vrtaný otvor o průměru shodném s vnějším průměrem trubky pro nasazení a svaření.

Plastová příruba: Plastová příruba rozměrově vychází z příruby ocelové. Má také rozměry $\text{Ø}20 \times 80$ se čtyřmi otvory a zhloubeními pro šrouby. Při výrobě příruby byl použit materiál silon pro jeho dobré mechanické vlastnosti, jako jsou například vysoká mechanická pevnost, houževnatost a nízký koeficient tření, díky čemuž můžeme tento díl využít jako kluzné ložisko pro extruzní šnek. Vyvrtaný otvor uprostřed má stejný průměr jako výstupní část vrtáku, tudíž slouží jako kluzné ložisko a těsnění proti případnému vypadávání granulátu.



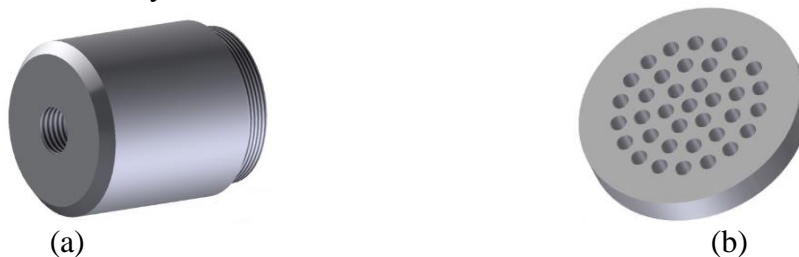
Obrázek 6: (a) Extruzní komora s přírubou a držáky pro násypku, (b) Plastová příruba

Násypka: Násypka je vytvořena pomocí 3D tisku z polykarbonátu. Násypka má na bocích výstupky s otvory pro šrouby, které je připevňují ke svařené extruzní komoře. Násypka pojme cca 0,35 kg ABS materiálu, ze kterého zařízení následně dokáže vytlačit vlákno o délce cca 140 metrů o průměru 1,75 mm.



Obrázek 7: Násypka

Dávkovací hlava s lamačem: Dávkovací hlava je mezičlen mezi extruzní komorou a tryskou a je vyrobena z oceli. Vnitřní otvor jde kónicky od většího vnitřního průměru extruzní komory až po menší vnitřní průměr trysky. Uvnitř dávkovací hlavy je dále prostor pro lamač a vnitřní zápch pro vnitřní segrovu pojistku, která zajišťuje správnou polohu lamače. Účel dávkovací hlavy je nashromáždit homogenní taveninu. Funkce lamače je zbavení se taveniny bublin a lepší homogenizace taveniny.



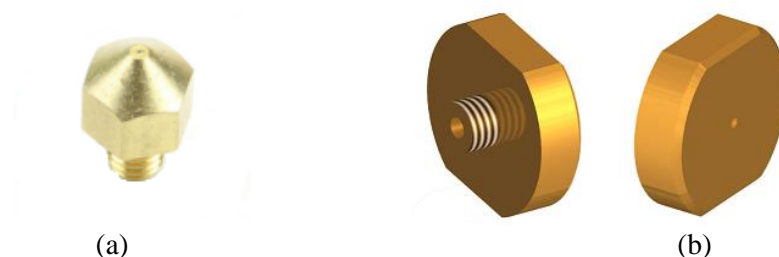
Obrázek 8: (a) Dávkovací hlava, (b) Lamač

Podpěry extruderu: Podpěry pro extruzní komoru, převodovku a motor jsou vyrobeny z oceli o tloušťce 3 mm. Po vyříznutí na laseru byly následně ohnuty do 90°. Podpěry mají za úkol pevně upevnit celý stroj bez přenášení vibrací a zajistit souosost všech rotujících elementů.



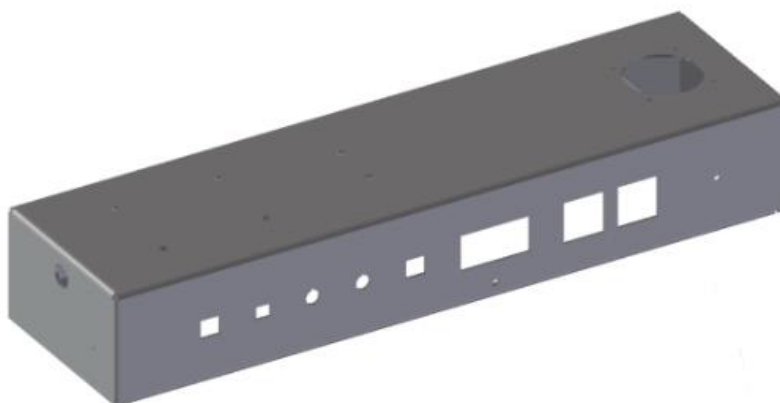
Obrázek 9: (a) Podpěra extruzní komory, (b) Podpěra převodovky a motoru

Tryska: Při návrhu trysky byla nejprve odzkoušena průmyslově vyráběná tryska pro 3D tiskárny typu RepRap. Nicméně tato tryska není vhodná pro extruzi vlákna jelikož vlákno nedosahovalo konstantního průměru z důvodu malé délky ústního otvoru. To mělo za následek expanzi vlákna za tryskou a destabilizaci průměru. Byl tedy navrhnut nový design trysky, která je vyrobená z mosazi pro lepší distribuci tepla z topných těles. Vnitřní průměr přechází z kónického tvaru do konstantního průměru 1,7 mm.



Obrázek 10) (a) Nakupovaná tryska [6], (b) Navrhnutá tryska

Základna extruderu: Nosnou část celého stroje tvoří základna z ohýbaného nerezového plechu o tloušťce 2 mm. Plech byl vyroben na TUL pomocí laserového řezání. Do základny byly taktéž vyřezány otvory pro šrouby držící samotný stroj, otvory pro kabely spojené s elektronickými komponenty uvnitř základny, pro ventilátor a otvory pro ovládací komponenty stroje, které jsou umístěny na jejím boku.



Obrázek 11: Základna extruderu

Naviják vlákna: Pro lepší stabilitu průměru vlákna, byl zapůjčen motor s regulací otáček na který byl připevněn unašeč cívky pro vlákno. Otáčky motoru byly regulovány tak, aby se vlákno z extruderu odvíjelo rovnoměrně.



Obrázek 12: Naviják vlákna s cívkou

1.2 Konstrukce a montáž

Hlavním požadavkem pro konstrukci stroje má být jeho snadné čištění při výměně granulovaného materiálu za jiný. To znamená, že komponenty jako jsou extruzní šnek, lamač, dávkovací hlava a tryska musí být snadno a rychle demontovatelné, jelikož se v těchto částech budou usazovat zbytky taveniny. Dalším požadavkem je tuhost stroje i při vyšším krouticím momentu, který bude vznikat v závislosti na použitém granulátu a pracovní teploty stroje. Materiál nelze roztavit na nízko viskózní hmotu, která by sice kladla menší odpor uvnitř extruzní komory nicméně její vlákno by mělo nestabilní rozměry a místo vytlačování by teklo.

Montáž elektrických a ovládacích komponentů: Prvním krokem je zabudování elektrických a ovládacích komponentů dovnitř do základny extruderu. Vnitřní prostor stroje je osazen elektrickým zdrojem o napětí 220 V, PLC pro řízení motoru, svorky připevněné na DIN liště a ostatní komponenty, které slouží pro regulaci topných pásků. Ovládacích a informačních komponenty na boku stroje jsou zabudovány tlačítko na vypnutí a zapnutí celého zařízení, pojistky topných těles, jistič motoru, tlačítko pro nastavení směru otáček motoru, display ukazující napětí motoru, display regulátorů teploty a potenciometr pro změny rychlosti otáčení ventilátoru. Dále je montáž ventilátoru a připojení k potenciometru, který bude regulovat otáčky ventilátoru. Z hlediska bezpečnosti bude ventilátor opatřen krycí mřížkou.

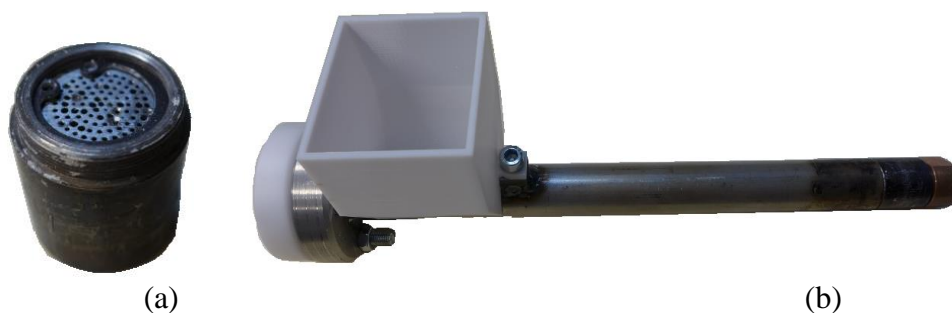


Obr. č. 13: Elektrické a ovládací komponenty uvnitř základny extruderu



Obr. č. 14: Ovládací komponenty na boku základny extruderu

Montáž extruzní komory s ostatními komponenty: Nejdříve se namontují držáky pro extruder a motor s převodovkou. Dále montáž extruzní komory spolu s plastovou přírubou. Dalším krokem je připevnění násypky pomocí šroubů k extruzní komoře, vložení šneku do extruzní komory a montáž jedné z částí pružné spojky na konec šneku. Při montování druhé strany extruzní komory se nejdříve vloží lamač do dávkovací hlavy a zajistí vnitřní segrovou pojistkou. Nyní se může celý set připevnit k extruzní komoře. Dalším krokem je našroubování trysky na dávkovací hlavu a utahení pomocí kleští. Poslední krok je montáž motoru s převodovkou a zasazení do příslušných držáků.



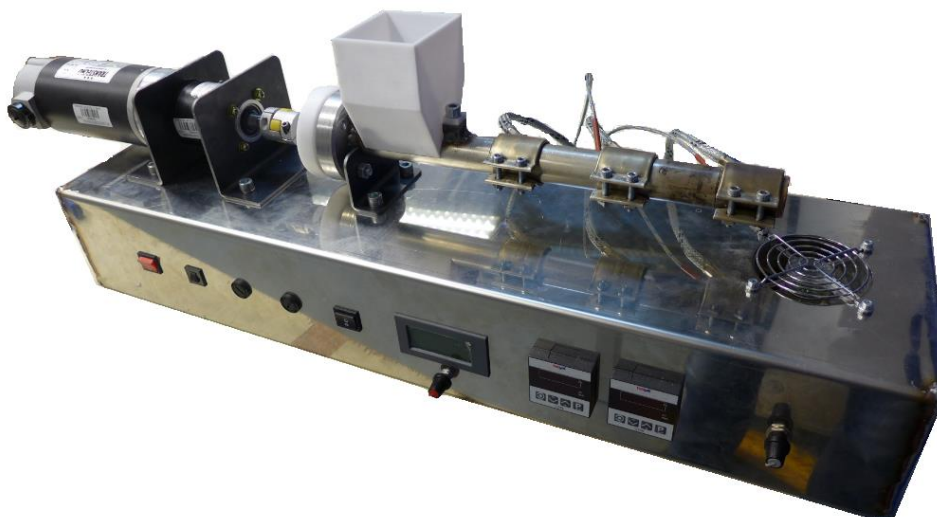
Obrázek 15: (a) Lamač zasazen do dávkovací hlavy, (b) Extruzní komora s komponenty

Sestavení extruderu: Nyní jsou připraveny tři podsestavy pro kompletní sestavení extruderu: základna s držáky extruderu, tělo extruderu a sestava motoru s převodovkou. Vše složíme dohromady a převodovku s extruzním šnekem spojíme pomocí pružné spojky. V případě nesouososti celé stavy lze tento problém korigovat povolením šroubů mezi držáky a skříní extruderu a celou sestavu vycentrovat.

Montáž topných těles s termočlánky: Finální stroj zbývá osadit topným setem. Dvě topné tělesa blíže k násypce budou zapojeny na jeden regulátor a poslední topné těleso bude mít svůj vlastní. Přední topné těleso bude namontován na trysku tak, aby plocha trysky lícovala s hranou topného tělesa. Ostatní topné tělesa budou od sebe vzdálena 30-35 mm. Takto složený extruder je připraven pro první zkoušky výroby vlákna.



Obrázek 16: Montáž topného tělesa s termočlánkem



Obrázek 17: Finální extruder

3 Extruze vlákna

Při extruzi vlákna je několik proměnných, které nám výrazně mohou měnit výsledky nezávislosti na konstrukci stroje.

Tyto elementy jsou:

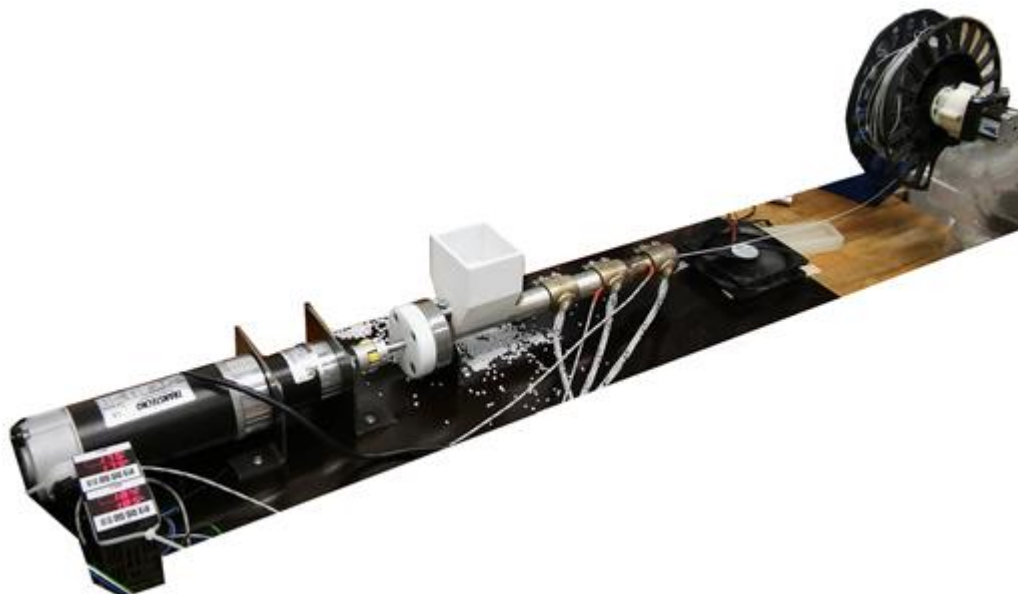
- Otáčky extruderu, kdy při vyšších otáčkách se vlákno nestačí ochladit a je těžké zachovat konstantní průměr. Při nižších otáčkách má vlákno nestabilní vytlačování a expanduje při vytlačení z trysky.
- Nastavení teploty u topných těles, jelikož při nižší teplotě sice vlákno má stabilnější průměr ale stroj je mnohem více zatěžován větším krouticím momentem a větším namáháním z důsledky většího odporu taveniny uvnitř extruzní komory. Zatímco vyšší teplota topných těles má za důsledek táhnutí vlákna a nestabilní průměr.
- Nastavení rychlosti návinu vlákna v souvislosti s rychlostí vytlačování vlákna. Tento problém způsobuje, při vyšší rychlosti navíjení, natahování vlákna a zmenšování jeho průměru. Při nízké rychlosti je problém velkého prověšení vlákna a jeho kroucení.

První testy probíhaly s materiálem ABS na průmyslově vyráběné trysce a při teplotách 175°C na prvních dvou topných těles a 185°C na topném tělesu u trysky. Otáčky motoru byly okolo 6 ot/min.



Obrázek 18: Extruze vlákna s průmyslovou tryskou o průměru 1,5 mm

Další testy již s novou tryskou s průměrem 1,7 mm probíhaly s lepšími výsledky, co se týče dodržování přesnosti průměru vlákna i kvalitou vlákna samotného. Parametry stroje zůstaly zachované z předchozích testů.

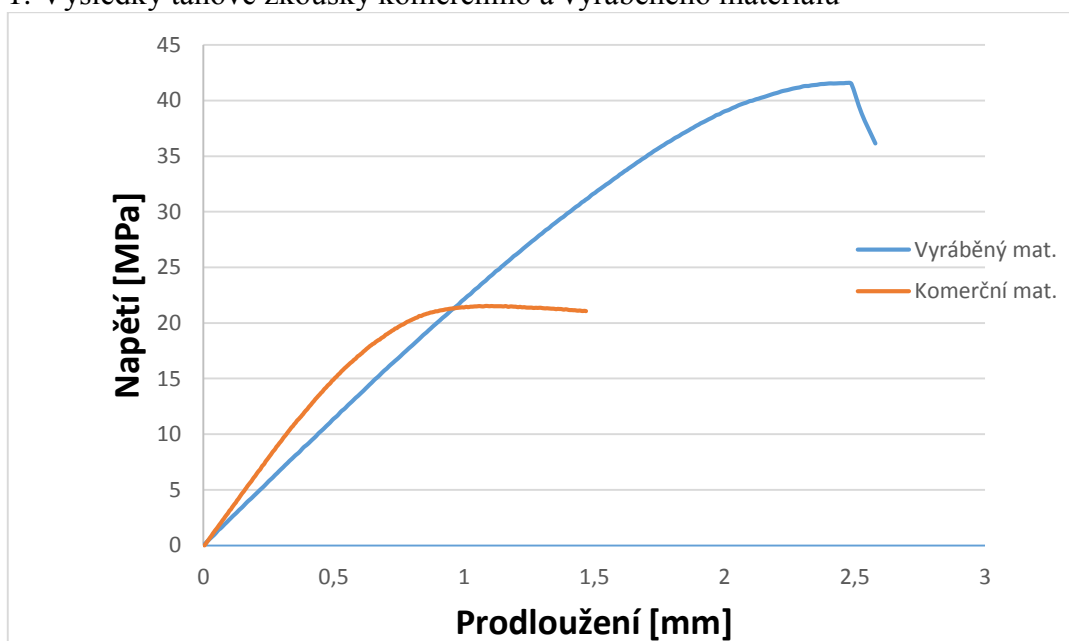


Obrázek 19: Extruze vlákna s vyrobenou tryskou o průměru 1,7 mm

4 Použití vlákna pro 3D tisk a výsledky 3D tisku

Vlákno, vyrobené pomocí sestaveného extruderu, bylo následně odzkoušeno na 3D tiskárně RepRap 3D factories. Vytisknuté vzorky s obdélníkovým průřezem byly poté odzkoušeny na trhacím stroji k porovnání s komerčně vyráběným materiálem vytisknutým na komerční 3D tiskárně Stratasys Dimension sst768. Na grafu 1 jsou vidět závislosti napětí na prodloužení obou testovaných materiálů. Na grafu můžeme také vidět, že vyráběný materiál disponuje vyšší mezí pevnosti než materiál komerční.

Graf 1: Výsledky tahové zkoušky komerčního a vyráběného materiálu



5 Závěr

Tento stroj disponuje snadným ovládním a především snadným čištěním při výměně termoplastického granulátu. Navrhovaná konstrukce stroje (zařízení) vychází z několika již dostupných extruderů, které se dají zakoupit na trhu. Zařízení je schopno vyrábět vlákna z různých termoplastických materiálů, které mohou být následně použity při 3D tisku. Díky tomuto stroji jsme schopni nejen vyrábět vlákno z ABS materiálu i 10x levněji v porovnání s komerčním materiálem, ale dokonce dosahujeme i lepších výsledků po stránce pevnosti v tahu při stejné kvalitě vlákna. Neméně významným výsledkem je také možnost vyrábět vlastní typ vláken pro 3D tisk – kompozity, které nelze na komerčních strojích zpracovávat.

Dalším velkým přínosem tohoto stroje může být proniknutí do světa designu, díky možnostem kombinací materiálů a jejich barevných odstínů.

Vyrobené vlákno může být tedy použito při tisknutí různorodých výrobků ať už funkčních, vývojových, či designových.

Hodnoty strojního zařízení:

Cena nakupovaných součástí: 23 000 Kč

Výroba: 4-5 metrů vlákna za minutu

Literatura

- [1] [HTTP://PUBLI.CZ/BOOKS/181/14.HTML/](http://publi.cz/books/181/14.html) Vytlačování (extruze) a vytlačovací stroje (extrudery)
- [2] [HTTP://WWW.RAVEO.CZ/](http://www.raveo.cz/) Elektromotory a převodovky
- [3] [HTTP://WWW.HOTSET.CZ/TOPNE-ELEMENTY/](http://www.hotset.cz/topne-elementy/) Topné elementy, měření a regulace teploty
- [4] [HTTP:// WWW.TEATECHNIK. CZ/](http://www.teatechnik.cz/) Pružné spojky
- [5] [HTTP://VRTAKY-VRBOVSKY. CZ/](http://vrtaky-vrbovsky.cz/) Vrtáky do dřeva – hadovitý vrták
- [6] [HTTP:// WWW.JPRINT3D. CZ/](http://www.jprint3d.cz/) Tryska pro 3D tiskárny RepRap

STROJÍRENSTVÍ

doktorský studijní program

Analýza a optimalizace elektrody pro výrobu nanovláken pomocí AC-elektrospinningu

Ondřej Bařka

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,
Fakulta strojní, 1. ročník
Doktorský studijní program – Konstrukce strojů a zařízení

Abstrakt: práce se zabývá analýzou stávající zvlákňovací elektrody, která je důležitou částí ústrojí na výrobu nanovláken. Pomocí programu Autodesk Simulation Mechanical byly analyzovány vlivy různých konstrukčních rozměrů elektrody na rozložení intenzity elektrického pole. Za účelem zvýšení produktivity výroby nanovláken byl navržen nový tvar zvlákňovací elektrody, jejíž geometrie byla optimalizována z hlediska optimálního rozložení intenzity elektrického pole. V závěru bylo provedeno měření produktivity na původní a optimalizované elektrodě při procesu zvlákňování. Porovnání výsledků měření prokázalo zvýšení produktivity nově navržené zvlákňovací elektrody.

Klíčová slova: elektroda, intenzita elektrického pole, elektrické napětí

1 Úvod

V současné době je v mnoha vědních i společenských oborech stále více využíváno nanovláknenných materiálů, proto vývoj těchto struktur a strojů na jejich výrobu zaznamenal velký rozmach. Nanovláknna jsou využívána zejména v medicínských aplikacích zvláště pak v bioinženýrství, dále k filtrování tekutin, v oděvnictví, elektrotechnice a také ve stavebnictví či strojírenství, například jako plniva kompozitních materiálů. Jejich přednost spočívá především v malých rozměrech samotného vlákna a jeho vysokého měrného povrchu.

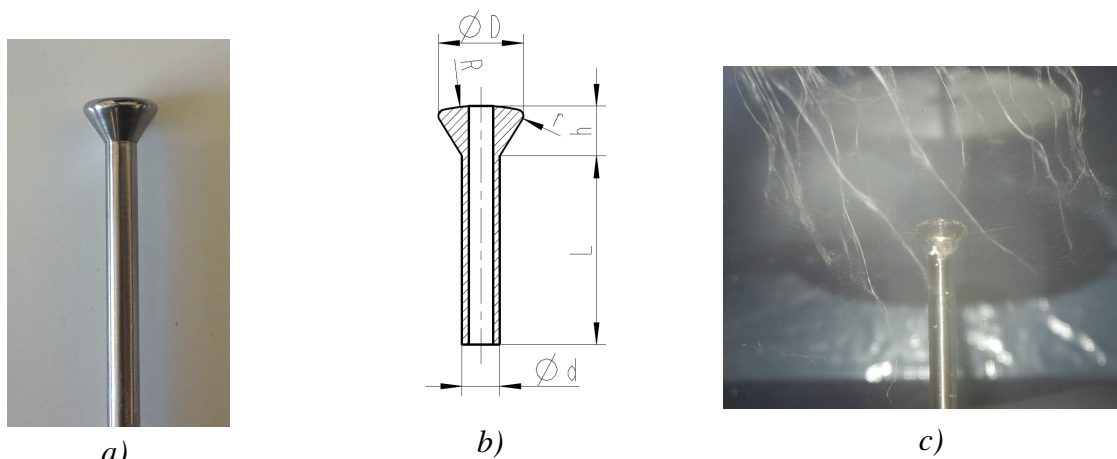
Snahou současného vývoje technologie výroby nanovláken je zvyšování produktivity a tím zrychlování výroby výsledného produktu, což je důležité pro průmyslovou výrobu. Práce se proto zabývá analýzou zvlákňovací elektrody pro výrobu nanovláken pomocí metody AC-elektrospinningu, která byla vyvinuta na Technické univerzitě v Liberci. [1] Optimalizací jejího tvaru z hlediska rovnoměrného rozložení intenzity elektrického pole tvaru a zvýšení její produktivity. Výsledkem práce by tedy měl být nový tvar elektrody zajišťující vyšší výrobnost nanovláken při rovnoměrném rozložení intenzity elektrického pole.

2 Stávající elektroda

Na obrázku 2.1 a) je fotografie stávající elektrody používané pro zvlákňování. Hlava elektrody, která je její nejpodstatnější částí, připomíná tvar kužele, od toho je tedy nazývána „Kuželová elektroda“. Zvlákňovaný polymer proudí odspoda vnitřkem elektrody až na její povrch a dochází k přelavování hlavy elektrody. Nezvlákněný polymer stéká vnějším trubičky do sběrné nádoby.

Na obrázku 2.2 jsou vyznačeny konstrukční rozměry Kuželové elektrody, z nichž některé byly ve výpočtovém modelu měněny a pomocí výpočtového programu bylo analyzováno, jaký mají vliv na velikost intenzity elektrického pole. Obrázek 2.1 c) zachycuje proces výroby nanovláken na kuželové elektrodě. Rozložení intenzity elektrického pole bylo

analyzováno pomocí metody konečných prvků v softwaru Autodesk Simulation Mechanical v modulu, který slouží pro výpočty elektrického pole.



Obr. 2.1 a) Stávající elektroda b) Obecné rozměry elektrody, c) Záznam zvlákňování na kuželové elektrodě

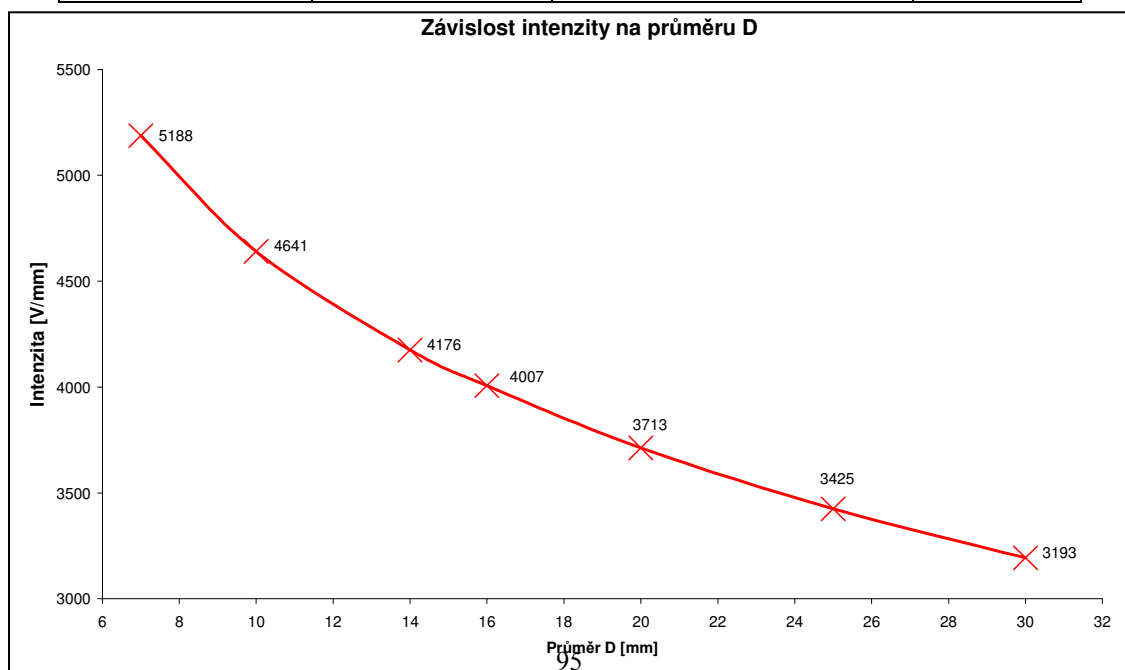
2.1 Analýza stávající elektrody

Na modelu stávající elektrody bylo provedeno několik analýz, které slouží pro pochopení chování elektrického pole na základě změny určitých parametrů elektrody či okrajových podmínek. Tyto charakteristiky byly důležitým vodítkem pro následnou optimalizaci tvaru elektrody. Díky těmto závislostem bylo možné do jisté míry predikovat chování elektrického pole při různě nastavených konstrukčních parametrech. Pro každou provedenou analýzu byly vždy použité konstrukční parametry uvedeny v tabulce nad příslušným grafem a odpovídají rozměrům vyznačeným v obrázku 2.1 b).

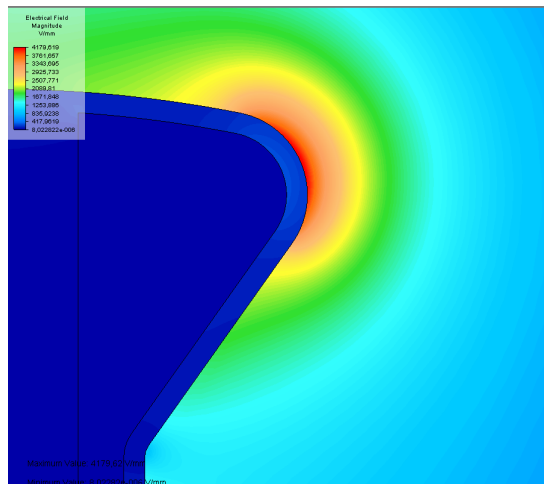
Graf na obr 2.2 ukazuje závislost intenzity elektrického pole na velikosti průměru hlavy elektrody. Je patrné, že intenzita s rostoucím průměrem nelineárně klesá. Je to způsobeno tím, že vlivem zvyšování průměru dochází ke zmenšování celkové křivosti na okraji elektrody. Intenzita elektrického pole je funkcí křivosti a se zvyšující se křivostí intenzita nelineárně narůstá. Parametry modelu v tabulce 2.1.

tab. 2.1 Parametry pro analýzu závislosti intenzity na průměru D

průměr D [mm]	proměnný	napětí [V]	25000
poloměr r [mm]	1.5	délka tyče L [mm]	50
poloměr R [mm]	30	výška hlavy h [mm]	8



obr 2.2 Závislost intenzity na průměru D

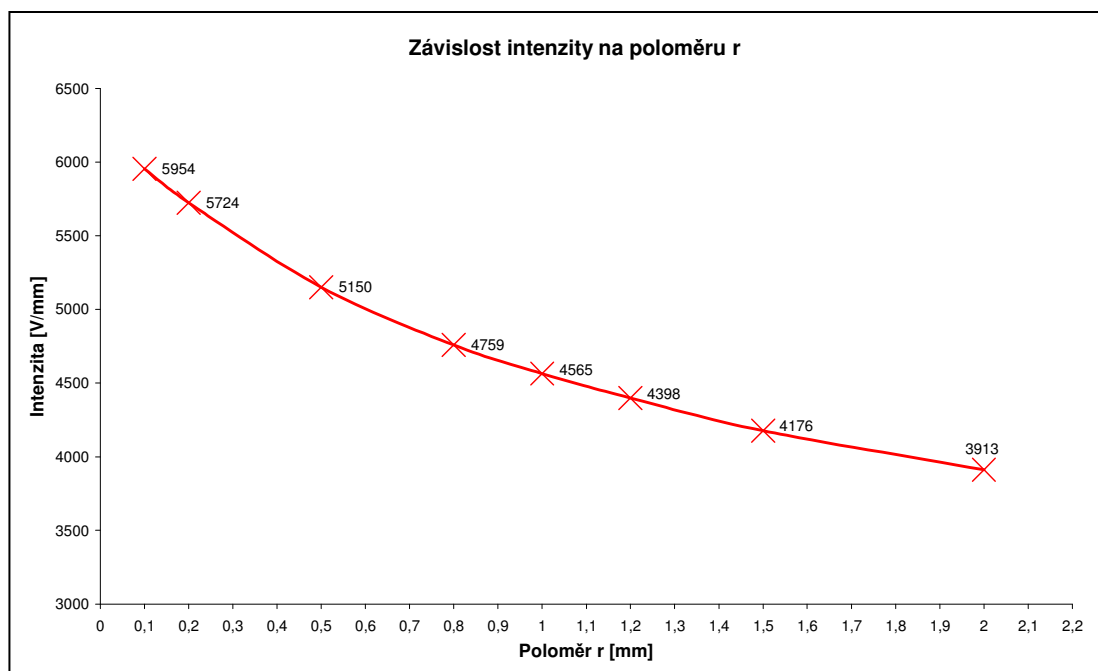


obr. 2.3 rozložení intenzity elektrického pole a kuželové elektrodě

Dále byla provedena analýza vlivu poloměru zaoblení okraje hlavy elektrody r , jejíž výsledek je znázorněn v grafu na obr. 2.4. Z grafu vyplývá, že s rostoucím poloměrem zaoblení intenzita elektrického pole klesá. Je to opět dáno zmenšující se součtovou křivostí na okraji elektrody. Parametry modelu popsány v tabulce 2.2.

tab. 2.2 Parametry pro analýzu závislosti intenzity na poloměru r

průměr D [mm]	14	napětí [V]	25000
poloměr r [mm]	proměnný	délka tyče L [mm]	50
poloměr R [mm]	30	výška hlavy h [mm]	8

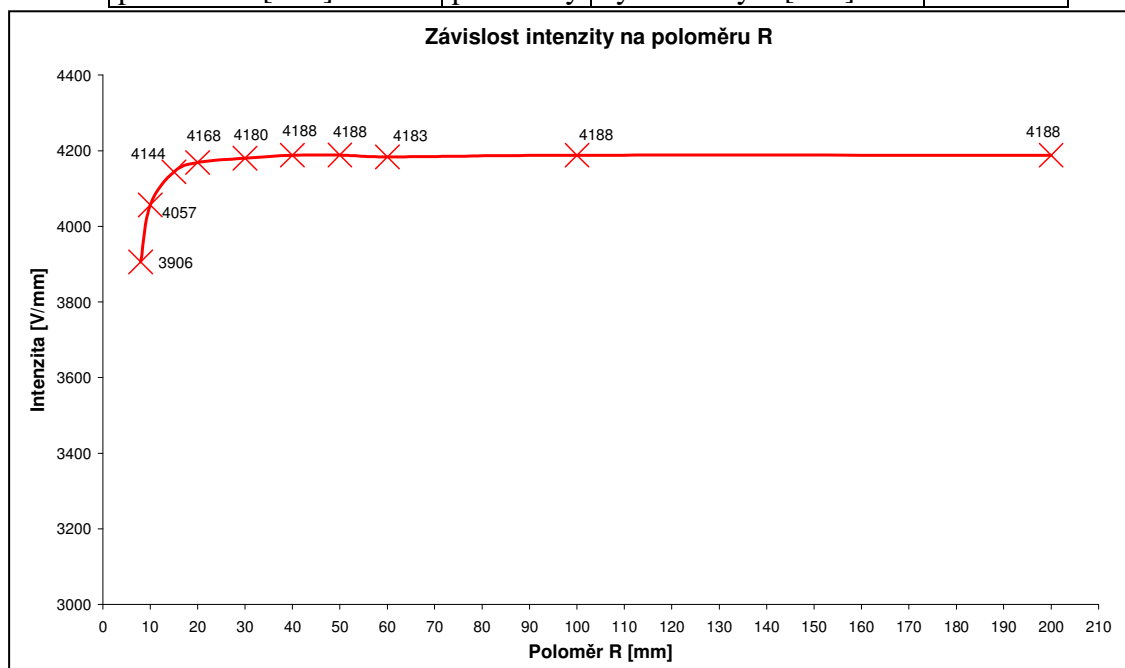


obr. 2.4 Závislost intenzity na poloměru r

V grafu na obr. 2.5 na následující stránce je zobrazena závislost intenzity na poloměru vršku hlavy elektrody. Z grafu vyplývá zajímavá skutečnost, že od poloměru o velikosti 30 milimetrů již nemá zvětšování poloměru na změnu intenzity prakticky žádný vliv. Důležitý poznatek také je, že menší poloměry než 30 milimetrů intenzitu výrazně zmenšují. Parametry modelu v tabulce 2.3.

tab. 2.3 Parametry pro analýzu závislosti intenzity na poloměru R

průměr D [mm]	14	napětí [V]	25000
poloměr r [mm]	1,5	délka tyče L [mm]	50
poloměr R [mm]	proměnný	výška hlavy h [mm]	8



obr 2.5 Závislost intenzity na poloměru R

Ze všech zmíněných analýz stávající zvláknovací elektrody lze usoudit, jakým způsobem je možné zvýšit intenzitu elektrického pole a zvýšit tím výrobnost elektrody. Nabízí se zejména zmenšení poloměru zaoblení elektrody, případně zmenšení jejího průměru. Toto s sebou však přináší negativní důsledek v tom, že dochází také ke zmenšení plochy pro zvláknování. Tudíž na menší ploše by tak docházelo k nižší produkci nanovláken, což je nežádoucí, jestliže požadavek je, zvýšit produktivitu výroby. Změna intenzity také ovlivňuje proces výroby z hlediska výsledné struktury. Ukazuje se, že při různých hodnotách intenzity má výsledná struktura různé vlastnosti a to zejména ve výsledné jemnosti [2]. Při testování bylo pozorováno, že v případech, kdy byla křivost na elektrodě a potažmo intenzita velmi vysoká, již dochází k vytrhávání proudů nezvlákněného polymeru, což je nežádoucí a dochází k degradaci výsledné struktury.

Vzhledem k požadavku zachování stejných parametrů pro zvláknování byl pro zvýšení produktivity elektrody zvolen vhodnější přístup, jemuž se věnuje následující kapitola.

3 Návrh nové elektrody

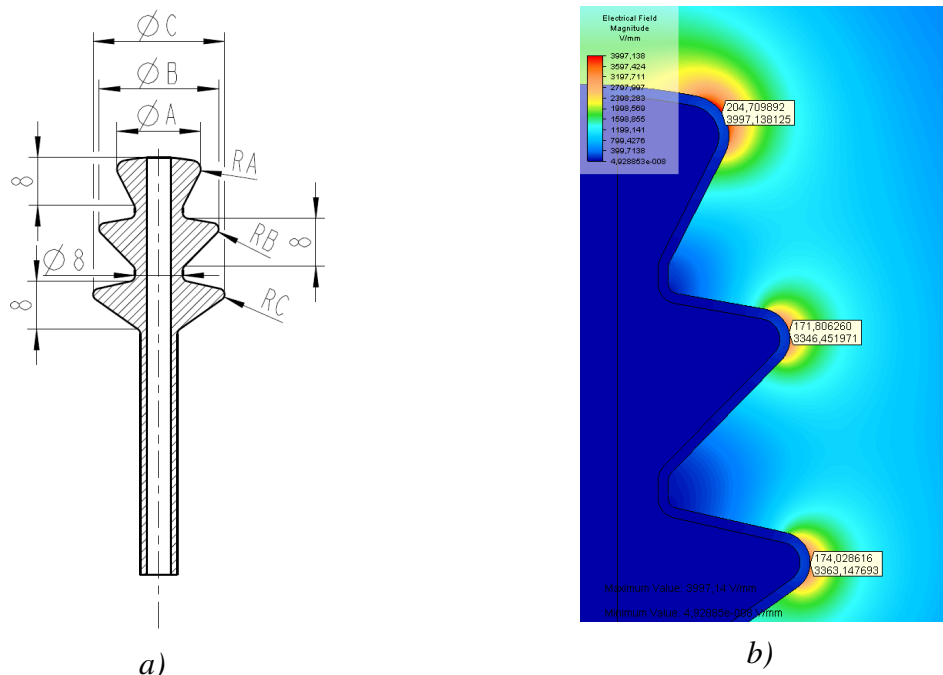
Tato kapitola se věnuje optimalizaci nově navrženého tvaru elektrody z pohledu optimálního rozložení intenzity elektrického pole. Na obrázku 3.1 a) je znázorněn tvar nově navržené elektrody a jsou zde popsány důležité rozměry. Z obrázku je patrné, že elektroda byla navržena jako třístupeňová. První stupeň má shodné rozměry jako elektroda stávající, další dva stupně jsou v některých rozměrech odlišné. Nová elektroda svým tvarem připomíná strom, proto jí byl dán pracovní název „Stromečková elektroda“, jenž bude dále v práci používán.

Navržená elektroda by měla nabízet větší produktivitu zvlákňování, neboť oproti stávající elektrodě dochází k nejintenzivnějšímu zvlákňování na třech přeplavovacích místech elektrody. Teoreticky by tedy měla být výrobnost vláken třikrát větší. Avšak jak bylo popsáno dříve, záleží také velikost zvlákňovací plochy. Proto bude nárůst produktivity záviset na povrchu elektrody vzniklém po optimalizaci jejího tvaru. Aby byly parametry ve všech třech místech stejné a docházelo tak k tvorbě shodné struktury vláken, je nutné, aby na těchto místech byla srovnatelně velká hodnota intenzity elektrického pole. Za srovnatelné hodnoty byly považovány hodnoty s odchylkou do 100 V/mm.

Na obrázku 3.2 b) je zobrazen prvotní výpočet Stromečkové elektrody o rozměrech dle tabulky 3.1.

tab. 3.1 Parametry pro prvotní analýzu stromečkové elektrody

průměr A [mm]	14	RA [mm]	1,5
průměr B [mm]	20	RB [mm]	1
průměr C [mm]	22	RC [mm]	1
napětí [V]	30000		

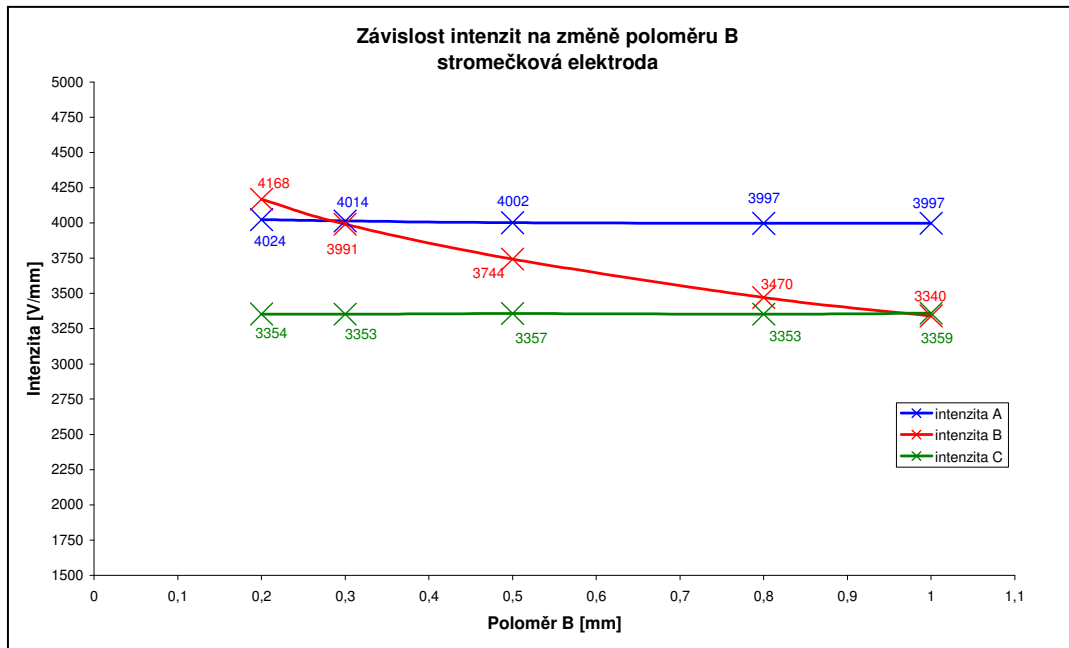


obr. 3.1 a) tvar stromečkové elektrody, b) prvotní analýza

Z obrázku 3.1 b) vyplývá, že intenzita na elektrodě o těchto rozměrech není optimálně rozdělena na všechna tři zvlákňovací místa. Proto byla elektroda podrobena optimalizaci, kdy byly měněny velikosti poloměrů zaoblení B a C. Nejprve byla sledována velikost intenzity na všech třech místech v závislosti na změně poloměru B. Výsledné závislosti jsou zobrazeny v grafu na obr. 3.2. V tabulce 3.2 jsou uvedeny jednotlivé rozměry elektrody.

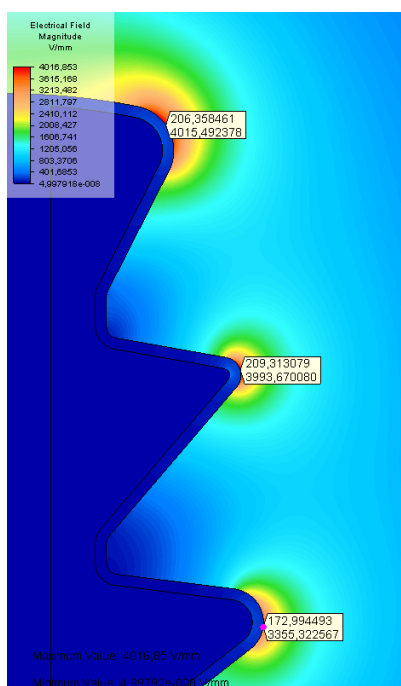
tab. 3.2 Parametry pro analýzu vlivu poloměru B

průměr A [mm]	14	RA [mm]	1,5
průměr B [mm]	20	RB [mm]	proměnný
průměr C [mm]	22	RC [mm]	1
napětí [V]			30000



obr. 3.2 Závislost intenzit na změně poloměru B

Z grafu je patrné, že ve zkoumaném rozsahu poloměru B, má jeho velikost velmi malý vliv na změnu intenzity v místech A a C. Podstatné však je, že intenzita v místě B se v závislosti na velikosti poloměru B mění a lze nalézt průsečík závislostí intenzit v místě A a B. Z toho je patrné, že při této kombinaci rozměrů bude v místech A a B srovnatelná intenzita. Na obrázku 3.3 je zobrazen výsledek analýzy, kdy byla za poloměr B zvolena právě hodnota, která odpovídá průsečíku závislostí. Konkrétně je to hodnota 0,3 milimetru. Z obrázku 3.3 je patrné, že intenzity v místech A a B jsou skutečně srovnatelné. V tabulce 3.3 jsou rozměry elektrody blíže popsány.



obr. 3.3 rozložení intenzity při optimalizovaném poloměru B

tab. 3.3 Rozměry elektrody při optimalizovaném poloměru B

průměr A [mm]	14
průměr B [mm]	20
průměr C [mm]	22
RA [mm]	1,5
RB [mm]	0,3
RC [mm]	1
napětí [V]	30000

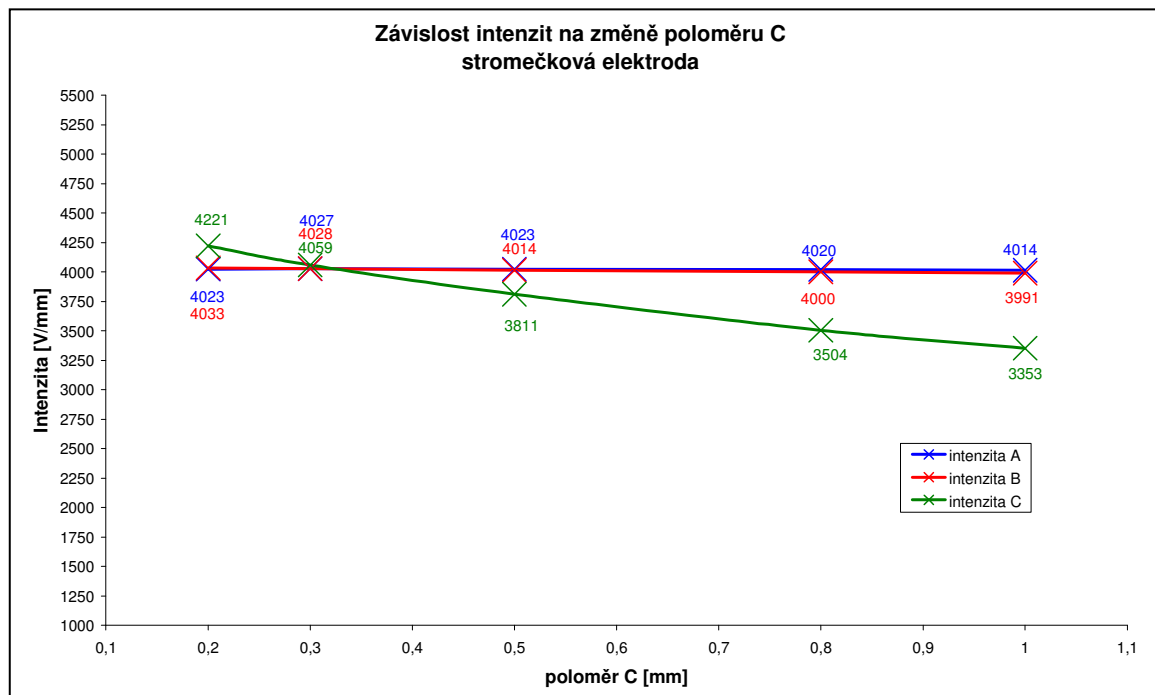
Takto částečně optimalizovaný tvar elektrody byl podroben další fázi optimalizace, kdy poloměr B byl zvolen na hodnotu, která vyšla z předchozí optimalizace, tedy 0,3 milimetru a poloměr C byl měněn. Graf na obr. 3.4 na stránce znázorňuje výslednou závislost rozložení intenzity na změně poloměru C . Z grafu je patrné, že hodnoty intenzit v místě A a B se ve zkoumaném rozsahu prakticky neměnily a zůstávaly na srovnatelné úrovni s hodnotami z předchozí analýzy. Dále z grafu vyplývá, že lze opět nalézt průsečík závislostí intenzit, což odpovídá srovnatelné hodnotě intenzity ve všech třech místech. Při volbě velikosti poloměru C , která odpovídá nalezenému průsečíku, tedy na Stromečkové elektrodě dojde k optimalizaci rozložení intenzity elektrického pole.

Lze tedy říci, že byl nalezen optimální tvar elektrody a to takový, že na všech třech místech, kde dochází k nejintenzivnějšímu zvlákňování, je srovnatelná intenzita elektrického pole. V těchto místech by tedy mělo docházet k produkci nanovláken se stejnými parametry zvlákňovacího procesu z hlediska intenzity, která má na procesu tvorby nanovláknů významný podíl. Na obrázku 3.5 a) je zobrazeno rozložení intenzity elektrického pole na optimalizované Stromečkové elektrodě. Z obrázku je patrné, že hodnoty intenzit jsou srovnatelné.

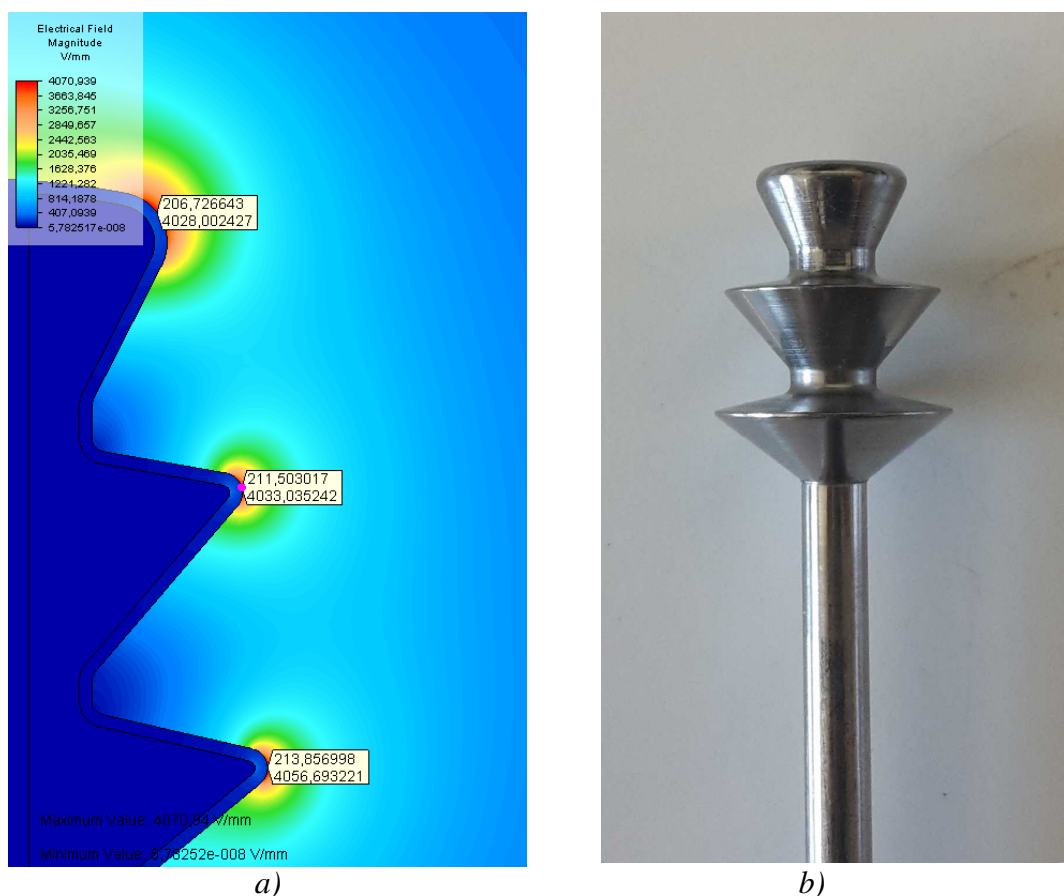
Zvlákňovací plocha optimalizované elektrody je bezmála dvakrát vyšší oproti původní elektrodě, zjištěno pomocí 3D modelovacího software Creo Parametric. Produktivita výroby nanovláken by tak měla být přibližně dvakrát vyšší oproti elektrodě stávající. Pro potvrzení této hypotézy byla optimalizovaná elektroda vyrobena a podrobena testování a měření, o kterém pojednává následující kapitola. Na obrázku 3.5 b) je fotografie vyrobené elektrody.

tab. 3.4 Parametry pro analýzu vlivu poloměru C

průměr A [mm]	14	RA [mm]	1,5
průměr B [mm]	20	RB [mm]	0,3
průměr C [mm]	22	RC [mm]	proměnný
napětí [V]			30000



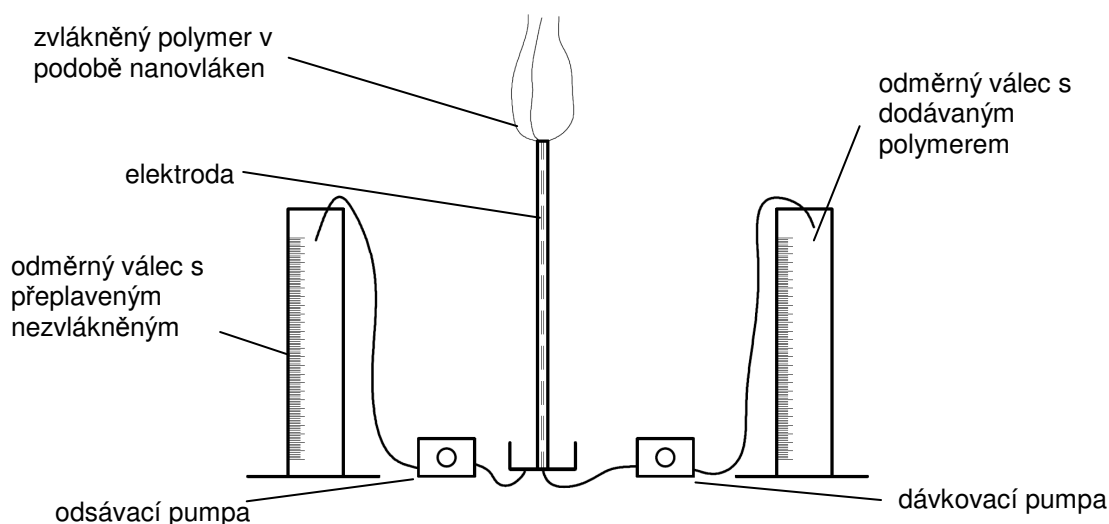
obr. 3.4 Závislost intenzit na změně poloměru C



obr. 3.5 a) rozložení intenzity na optimalizované elektrodě, b) Stromečková elektroda

4 Měření produktivity

Nově navržená Stromečková elektroda byla podle optimalizovaných konstrukčních parametrů vyrobena a podrobena sérii testů. Zejména však bylo provedeno měření produktivity obou zvláknovacích elektrod za účelem zjištění, jaký má nově navržená Stromečková elektroda přínos ke zvýšení produktivity vzhledem k elektrodě kuželové. Na obrázku 4.1 je znázorněno zjednodušené schéma měřicí soustavy. Odměrné válce byly naplněny roztokem polymeru a byly odečteny hodnoty objemů před zvláknováním. Po celou dobu zvláknování byl stopkami měřen čas. Po dokončení zvláknování byly opět odečteny objemy v odměrných válcích. Toto měření bylo provedeno zvláště pro každou elektrodu, vždy se stejným typem roztoku polymeru a stejným průtokem nastaveným na dávkovací pumpě. Pro zvláknování byl použit desetiprocentní roztok polyvinylbutyralu v ethanolu. Aby byla měření porovnatelná bylo nutné zajistit takové elektrické napětí na obou elektrodách, aby na každé byla shodná intenzita. Pro stromečkovou elektrodu vychází napětí o 20 % vyšší než na kuželové. Je to proto, že stromečková elektroda je větší než kuželová a musí tedy při stejném napětí intenzita klesnout, jelikož se náboj rozkládá na větší ploše. Zjištění potřebného napětí vychází ze závislosti intenzity na napětí, která je lineární, takže bylo jednoduše přepočtené pomocí přímé úměry.



obr. 4.1 schéma měřicí soustavy

V tabulce 4.1 jsou všechny naměřené a vypočtené hodnoty, vyplývající z měření produktivity obou elektrod. Z tabulky je patrné, že Stromečková elektroda nabízí produktivitu zvláknování bezmála dvakrát větší, tudíž výsledný produkt bude obsahovat dvakrát více nanovláken, než při zvláknování s elektrodou kuželovou, a to při srovnatelné struktuře výsledných nanovláken. Na obr. 4.2 je znázorněn záznam zvláknovacího procesu při použití nové elektrody.

tab. 4.1 Hodnoty naměřené při zvláknování

	Kuželová	Stromečková
Napětí [kV]	25	30
Doba měření [s]	1166	1180
Doba měření [min]	19,43	19,67
Objem v dodávacím válci před měřením [ml]	220,00	242,00
Objem v dodávacím po měření [ml]	22,00	40,00
Objem dodaný [ml]	198,00	202,00
Průtok [ml/min]	10,19	10,27
Objem v přepadovém válci před měřením [ml]	30,00	42,00
Objem v přepadovém válci po měření [ml]	198,00	186,00
Objem přeplavený [ml]	168,00	144,00
Objem zvlákněný [ml]	30,00	58,00
Produktivita elektrody [ml/min]	1,54	2,95
Nárůst produktivity [1]	1,91	
Chyba objem dodaný [ml]	± 1,41	± 1,41
Chyba objem zbylý [ml]	± 1,41	± 1,41
Chyba objem zvlákněný [ml]	± 1,99	± 1,99
Chyba čas [min]	± 0,005	
Chyba produktivita [ml/min]	± 0,10	± 0,10
Chyba produktivita [%]	± 6,6	± 3,4

Pozn.: Chyby měření byly vypočteny na základě teorie chyb dle literatury [3]. Nejmenší dílek na stupnici odměrného válce nabýval hodnoty 2 ml a nejmenší odečítaná hodnota času byla jedna sekunda.



obr.4.2 Záznam zvlákňování na stromečkové elektrodě, napětí 30kV, produktivita $2,95 \pm 0,1$ ml/min

5 Závěr

Práce byla zaměřena na analýzu stávající zvlákňovací elektrody a návrh nového tvaru, který byl následně podroben analýze a optimalizován z hlediska rozložení intenzity elektrického pole. Byla navržena takzvaná „Stromečková elektroda“, která má oproti stávající elektrodě více zvlákňovacích stupňů a umožňuje zvýšit produktivitu zvlákňování polymeru při stejné stejných podmínkách pro zvlákňování a tedy i shodné struktury vyrobených nanovláken.

V závěru práce byla provedena měření přímo při procesu zvlákňování, která potvrdila zvýšení produktivity výroby nanovláken. Produktivita na nově navržené Stromečkové elektrodě byla naměřena dvakrát vyšší, než na elektrodě stávající.

Lze tedy konstatovat, že Stromečková elektroda má značný přínos do procesu výroby nanovlákných struktur; plošných či lineárních. Přináší možnost výrazného (dvojnásobného) zvýšení objemu nanovláken na výsledném produktu, nebo možnost zvýšení výrobní rychlosti při zachování stejného zaplnění produktu nanovláknem a to při 20% zvýšení hodnoty potřebného elektrického napětí.

Literatura

- [1] Způsob výroby polymerních nanovláken zvlákňováním roztoku nebo taveniny polymeru v elektrickém poli a lineární útvar z polymerních nanovláken vytvořený tímto způsobem. *Patentový spis CZ 304173 B6* [online] URL:<<http://upv.cz>>, [cit. 13.5.2016]
- [2] Preparation of Cellulose-based Nanofibers Using Electrospinning *Odborný článek* [online] URL: <<http://www.intechopen.com/books/nanofibers/preparation-of-cellulose-based-nanofibers-using-electrospinning>>, [cit. 13.5.2016]
- [3] Chyby měření, *skripta ZČU* [online] URL:<http://www.kfy.zcu.cz/dokumenty/FP1/chyby_mereni.pdf>,[cit. 13.5.2016]

Konstrukce studentské formule TUL

Čadek Miloš

Sekce - Strojírenství,
Fakulta strojní, 1. ročník
Doktorský studijní program – KONSTRUKCE STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

Abstrakt: Tato publikace obsahuje informace o stavu návrhu první studentské formule TUL ve fázi před zahájením výroby svařovacího přípravku pro rám formule, některých součástí podvozku a samotného rámu. Jsou zde uvedeny výsledky a kritéria návrhu konstrukce rámu, podvozku a řízení. První kapitola uvádí do parametrů a požadavků závodních disciplín. Druhá kapitola je věnována konstrukci rámu formule a některým konstrukčním požadavkům pravidel soutěže. Třetí kapitola ukazuje některé kinematické vlastnosti návrhu podvozku, na které byl při vývoji kladen největší důraz. V závěru je zobrazen CAD model vrcholové sestavy formule.

Klíčová slova: formule student, rám, podvozek, řízení, kinematika, nápravy

1 Studentská formule

Formule Student (EU) neboli Formule SAE (USA) je projekt určený pro studenty technicky zaměřených univerzit. Studenti, kteří se do projektu zapojí mají za úkol navrhnout vozidlo s hnací zadní nápravou se spalovacím motorem do objemu 600 ccm, které dále splňuje veškerá kritéria a předpisy dané pravidly soutěže FORMULA SAE ® RULES. V současné době se projektu studentské formule se spalovacím motorem účastní více než 500 univerzitních týmů z celého světa. Z českých je na tom nejlépe tým CTU CarTech (ČVUT), který v době psaní této publikace je na 25 místě v celosvětovém žebříčku.

1.1 Přehled závodních disciplín

Týmy soutěží v několika disciplínách, které lze rozdělit do tří hlavních kategorií, statické, dynamické a vstupní testy nutné pro vstup do dynamických disciplín:

Statické disciplíny:

Konstrukční návrh (Engineering design report – 150 bodů): komisaři hodnotí vůz z hlediska použitých konstrukčních řešení a vyspělosti návrhu. Řešení je třeba doložit výpočty a simulacemi.

Analýza nákladů (Cost report – 100 bodů): hodnotí se cena vozu a správná kalkulace jeho výrobní ceny v případné reálné sériové výrobě.

Marketingový plán (Business plan – 75 bodů): před zástupci fiktivní firmy je potřeba obhájit plán na sériovou výrobu našeho prototypového vozu.[2]

Vstupní testy pro vstup do dynamické části závodu :

Technical & Safety Scrutineering (Technika a bezpečnost)

Tilt Test (Náklonová zkouška)

Brake & Noise Test (Zkouška brzd a hluku) [2]

Dynamické disciplíny :

Akcelerace (75 bodů): zrychlení vozu na trati dlouhé 75m s pevným startem.

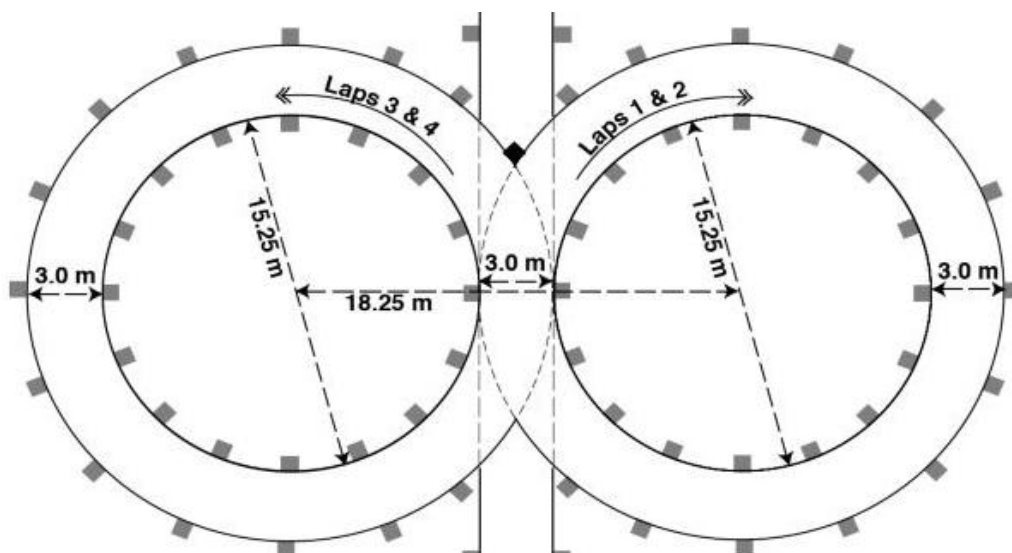
Jízda v osmičce (Skid-pad – 50 bodů): jízda na trati ve tvaru osmičky, kde se hodnotí čas průjezdu, pro zhodnocení kvalit podvozku. (obr. 1)

Autokros (Autocross – 150 bodů): jízda na úzké technické trati pro hodnocení zrychlení, brždění a ovladatelnosti. Slouží zároveň jako kvalifikace do Endurance.

Endurance & Fuel economy (350 + 50 bodů): vytrvalostní závod ověřující všechny systémy vozu při okruhovém závodě na 22km (obr. 2) s povinnou výměnou jezdců v polovině ujeté vzdálenosti. Hodnotí se též spotřeba paliva.[2]

Tabulka 1 : Souhrn dynamických disciplín.

	Autocross:	Vytrvalost:	Akcelerace
Min. šíře tratě [m]	3,5	4,5	4,9
Min. vnější průměr vlásenkové zatáčky [m]	9	9	-
Vnější průměry ostatních zatáček	23 až 45	30 až 54	-
Max. délka rovinky s vlásenkovou zatáčkou na obou koncích [m]	60	77	-
Max. délka rovinky [m]	45	61	75
Rozteč kuželů slalomu [m]	7,62 až 12,19	9 až 15	-
Délka jednoho kola [km]	0,8	22	-
Počet kol	-	1	-
Průměrně dosahovaná rychlost [km/h]	48	48 až 57	-
Max. rychlost [km/h]	-	105	100



Obrázek 1: FSAE skid-pad layout. [1]



Obrázek 2: Layout vytrvalostního závodu.(FSG 2015)[3]

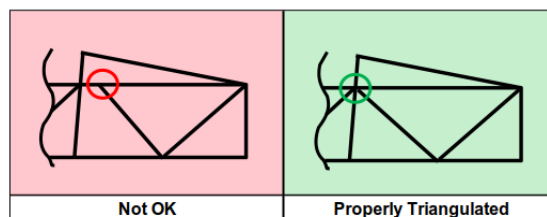
2 Návrh rámu formule

Jedním z hlavních předpokladů návrhu každého úspěšného závodního vozu je tuhý a lehký rám. Rám studentské formule TUL je tvořen svařovanou, ocelovou, trubkovou konstrukcí s motorem v zadní části vozu, za pilotem. Formule má lichoběžníkové nápravy s minimálním povoleným rozvorem vozu 1600 mm. Vozidlo musí být tzv. „open wheel“ a „open cockpit“ kategorie a jak již bylo zmíněno musí splňovat předepsaná pravidla soutěže.

Na rám formule je kladeno mnoho požadavků. Tyto požadavky mohou být rozděleny do dvou skupin na specifické konstrukční nebo na obecné, předpokládané vlastnosti. Mezi specifické konstrukční požadavky patří například připojovací úchyty motoru a dalších dílů, konkrétní bezpečnostní prvky, umístění úchytných pro nápravy nebo i ergonomie kokpitu a jiné konkrétní požadavky, které udávají pravidla soutěže. Mezi obecné, předpokládané vlastnosti patří vysoká tuhost, nízké těžiště vozu, bezpečnost, nízká hmotnost, předpokládané rozložení hmotnosti formule, dostatečná světlá výška vozu atd.

2.1 Vývoj rámu formule TUL

Návrh rámu proběhl v několika iteracích. Nejprve bylo nutné určit rozložení všech komponent vozu a navrhnout layout formule spolu se základními vlastnostmi vozidla (tab.2), tento prvotní návrh bylo poté nutné upravit dle pravidel, mezi které patří například požadavek na trojúhelníkovou boční strukturu (obr. 3), velikosti bezpečnostních oblouků, předepsané průřezy trubek atd.

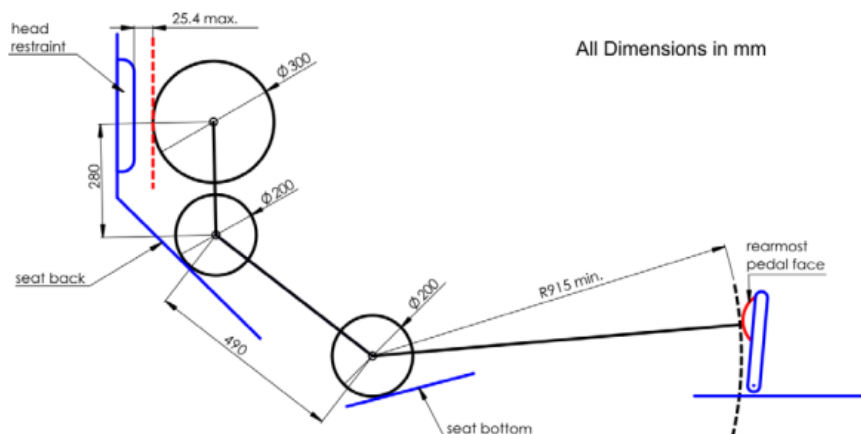


Obrázek 3: Ukázka správné triangulace rámu. [1]

Následně byl tedy dle pravidel proveden návrh prvotní triangulace rámu, do kterého musejí být zahrnuty například předepsané boční nárazové struktury. Dalším omezujícím požadavkem pro

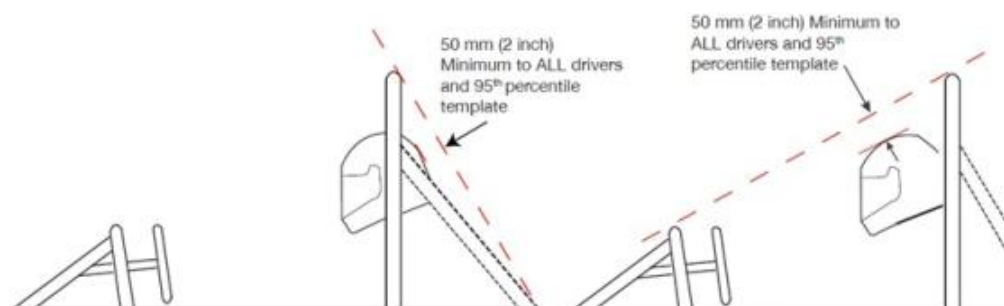
konstrukci rámu jsou rozměry šablon, které je nutné bez obtíží a způsobem daným pravidly vložit do kokpitu, jako kontrola jeho vnitřních rozměrů. (obr. 6)

S konstrukcí přední části rámu souvisí nepochybně další směrnice pravidel, podle které musí být možné do kokpitu vložit předepsanou šablonu, tzv. „95th percentile male template“, která klade další požadavky na vnitřní prostor kokpitu. (obr. 4)



Obrázek 4: 95th percentile male template. [1]

Další předpisy z oficiálního soupisu pravidel soutěže blíže specifikují rozměry bezpečnostních oblouků nebo i volný prostor nad helmou pilota. (obr. 5)

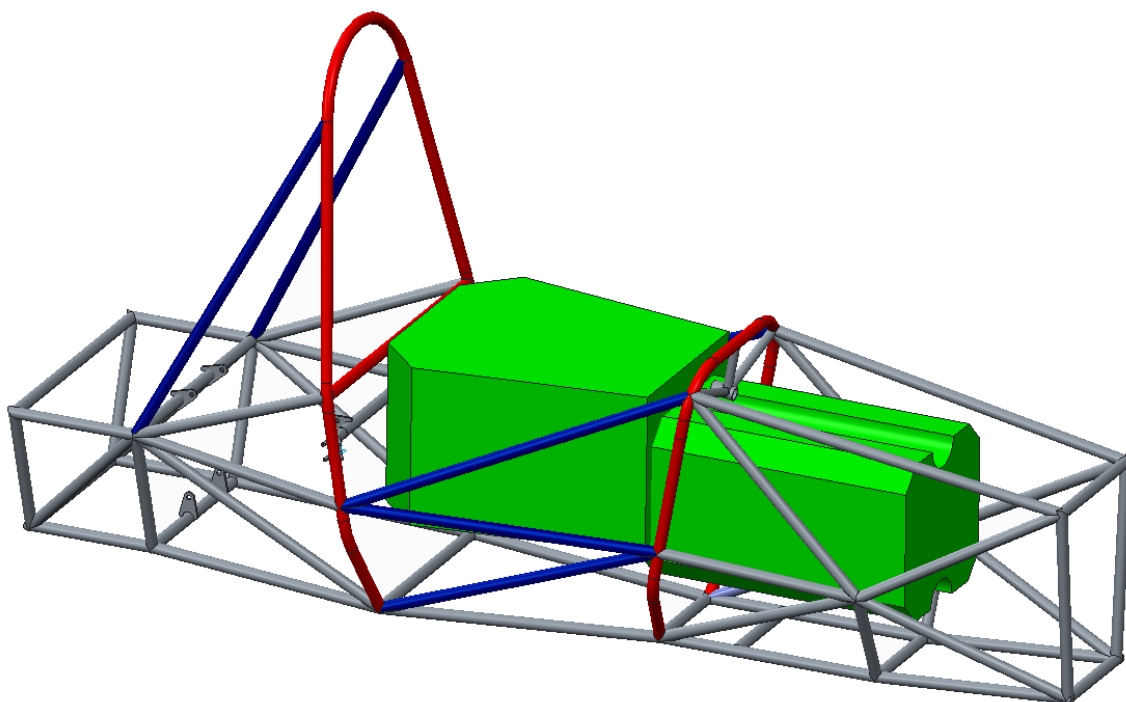


Obrázek 5: Helmet clearance. [1]

Pravidel, které se nějakým způsobem týkají konstrukce rámu je daleko více a v této publikaci není prostor je všechny popsat. Další informace ohledně předpisů, které musí rám studentské formule splňovat lze dohledat v [1].

Je dobré poznamenat, že kromě konstrukčních požadavků od pravidel a všech dalších součástí vozidla, která jsou k rámu připojena se v této fázi do návrhu také promítají první návrhy konstrukce podvozku, jeho kinematiky, řízení, uložení tlumičů atd.

Úpravy, tedy jednotlivé iterace vývoje CAD modelu rámu jsou pak většinou reakcí buď na změnu v konstrukci podvozku nebo na změnu triangulace rámu, která je postupně zjednodušována tak, aby konstrukce byla lehčí a tužší. Skutečnost, že sebemenší úprava rámu vyžaduje opětovnou a úplnou kontrolu pravidel, celý proces návrhu rámu značně komplikuje. Kontrola správnosti rámové konstrukce byla většinou prováděna vizuálně v CAD softwaru, veškerá pomocná geometrie, tedy patřičné šablony, bylo také nutné nejprve vymodelovat. Výjimkou byla kontrola správnosti ergonomie, kvůli které byl vytvořen zjednodušený, dřevěný model v měřítku 1:1. Rám prošel před svou nynější podobou přibližně osmi iteracemi. Konečné řešení konstrukce rámu první studentské formule TUL je zobrazeno na obr. 6.



Obrázek 6: Navržený rám formule a kontrolní šablony.

3 Návrh podvozku

Seriály závodů univerzitních studentských formulí probíhají v USA již od roku 1981, v Evropě se uskutečnil první závod v roce 1998. Díky relativně bohaté historii tvorby soutěžních vozů mohl být před samotným návrhem proveden důkladný průzkum mnoha již postavených závodních vozů zahraničních i českých univerzit a jejich parametrů, z kterých pak byly stanoveny základní návrhové vlastnosti a rozměry vozidla. Aktuální podoba těchto parametrů první studentské formule TUL udává tabulka 2, 3 a obr. 7, 8.

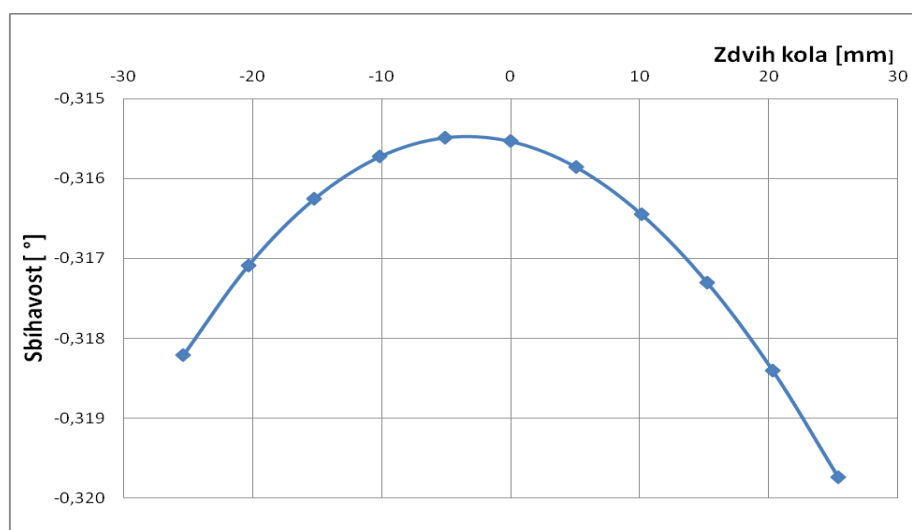
Vzhledem k malému rozsahu této publikace, zde nejsou uvedeny výpočty ani detailní postup návrhu nebo průběhy všech kinematických veličin v závislosti na zdvihu tlumiče, úhlu klopení rámu formule nebo úhlech natočení kol přední nápravy při zatáčení. Uvedena je pouze změna sbíhavosti zadní nápravy při propružení.(obr. 7)

Tabulka 2: Charakteristické vlastnosti vozidla.

Rozvor [mm]	1600	
Předpokládaná výška těžiště [mm]	350 až 400	
Předpokládané rozložení hmotnosti	40:60	
Předpokládaná hmotnost s pilotem	do 400 kg	
Světlá výška vozu [mm]	40	
	Přední náprava	Zadní náprava
Rozchod [mm]	1283	1237
Velikost kol [“]	13	13
Označení pneumatik	6.2/20.0-13	7.2/20.0-13
Průměry pneumatik	522	521
Zdvih tlumiče [mm]	50,8	50,8
Délka tlumiče [mm]	200	200
Statická poloha zdvihu tlumiče [mm]	25,4	25,4

3.1 Kinematika

Po průzkumu byly stanoveny rozsahy, v kterých se jednotlivé veličiny pohybují, například rozvor: 1525 – 1920 mm, rozchod: 1000 – 1360 mm. Ze simulace vlivu velikosti rozvoru na rychlosti projetí virtuální trati v [4] byl stanoven výsledný rozvor 1600 mm, jehož velikost byla zkontrolována i z pohledu návrhu řízení, aby se vůz vytočil i ve vlásenkových zatáčkách. Při návrhu kinematiky podvozku byl kladen důraz na minimální změnu všech navržených parametrů, maximální výšku středu klopení rámu a maximální kladné hodnoty tzv. anti charakteristik. Navržený podvozek má tak například minimální změnu odklonu a sbíhavosti kol při propružení. Důležitý parametr, který zde není uveden je pákový poměr, resp. převod mezi vertikálním pohybem kola a kompresí tlumiče. Dle pravidel musí vůz splňovat podmínku, při které má i se započítanou hmotností řidiče poloviční propad zdvihu tlumičů.



Obrázek 7: Diagram změny sbíhavosti zadní nápravy při propružení (nulový zdvih označuje polohu, při které je vůz v klidu a je započítána hmotnost pilota).

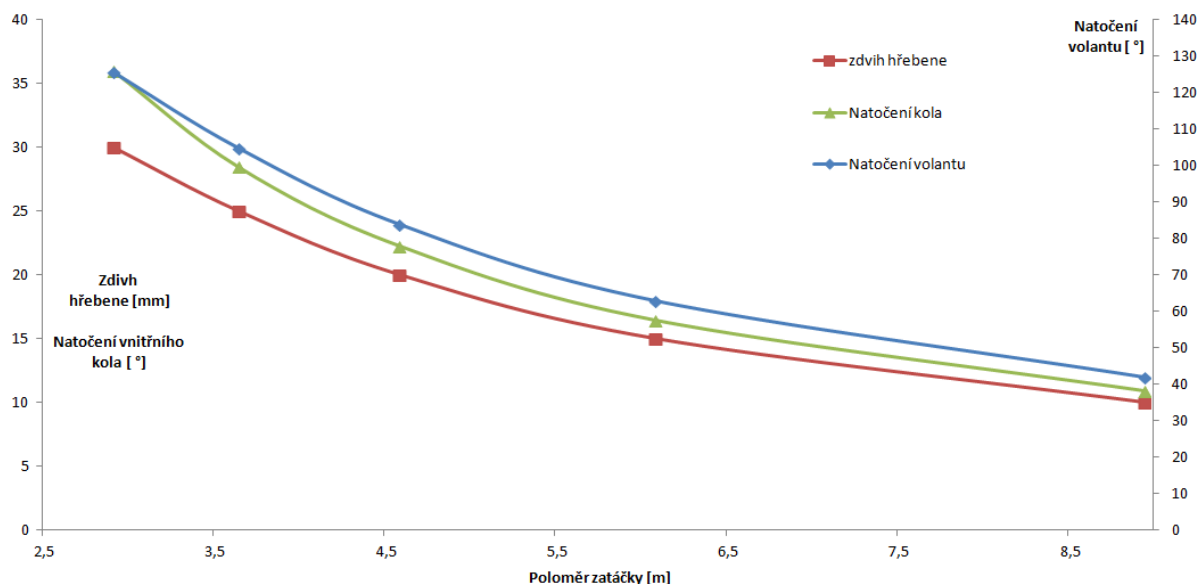
Tabulka 3: Některé kinematické vlastnosti podvozku.

	Přední náprava	Zadní náprava
Výška středu klopení [mm]	40	43
Odklony kol [°]	-2	-2
Max. změna ½ rozchodu napříč zdvihu tlumiče [mm]	2,3	2,7
Anti-Squat [%]	-	29
Anti-Dive [%]	20	-
Statická poloha zdvihu tlumiče [mm]	25,4	25,4

3.2 Návrh řízení

Geometrie řízení je navržena dle parametrů tratě (tab. 1). Typy geometrie řízení lze rozdělit dle vzájemného rozdílu úhlu natočení předních kol při zatáčení. Pokud je tento úhel nulový, pak hovoříme o paralelním řízení, pokud má vnitřní kolo větší úhel než vnější hovoříme o Ackermanově geometrii, opačnou konfiguraci pak označujeme jako anti-Ackermanovu geometrii. Vzhledem k tomu, že se jedná o relativně malé poloměry zatáček a nižší rychlosti je použita Ackermanova geometrie, při které je tedy obecně při zatáčení vnitřní kolo pod větším úhlem než kolo vnější. Řízení bylo navrženo primárně pro disciplínu skid-pad a její poloměr zatáčky. Pro tento poloměr byly tedy určeny ideální úhly kol a poté byla provedena

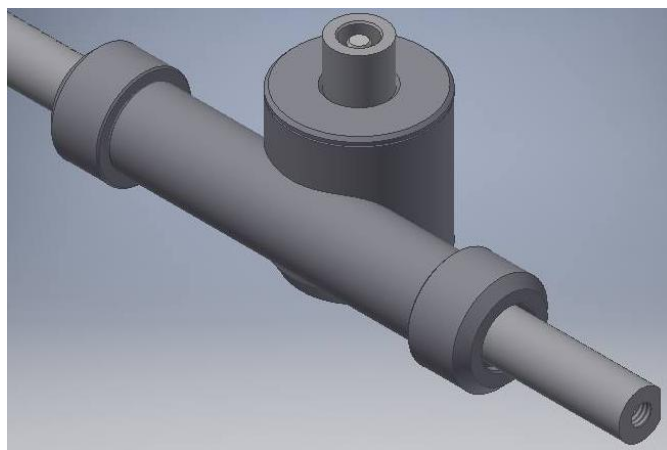
korekce polohy hřebene a čepů řízení tak, aby se kola při určitém natočení volantu této ideální konfiguraci blížila a zároveň aby nedocházelo ke kolizi v modelu (kolize prvků zavěšení, čepu řízení a disku kola, převodky řízení a prostoru pro pilota, prvků zavěšení a konstrukce rámu). Je také nutné, aby hodnoty anti-divu zůstaly v pokud možno co nejvyšších a kladných hodnotách.



Obrázek 8: Závislost zdvihu hřebene, natočení kola, natočení volantu na poloměru zatáčky.

Navržené řízení má maximální natočení vnitřního kola $28,5^\circ$ a vnějšího kola $24,8^\circ$. Tato konfigurace platí při posuvu hřebene na doraz (25,1 mm), min. poloměr zatáčky vozu je 3,6 m. Je zřejmé, že řízení bylo nutné navrhnout s převodem, který zajišťuje nepříliš velké překřížení rukou pilota na volantu, při maximálním rejdu, proto je maximální možné natočení volantu 105° . (obr. 8)

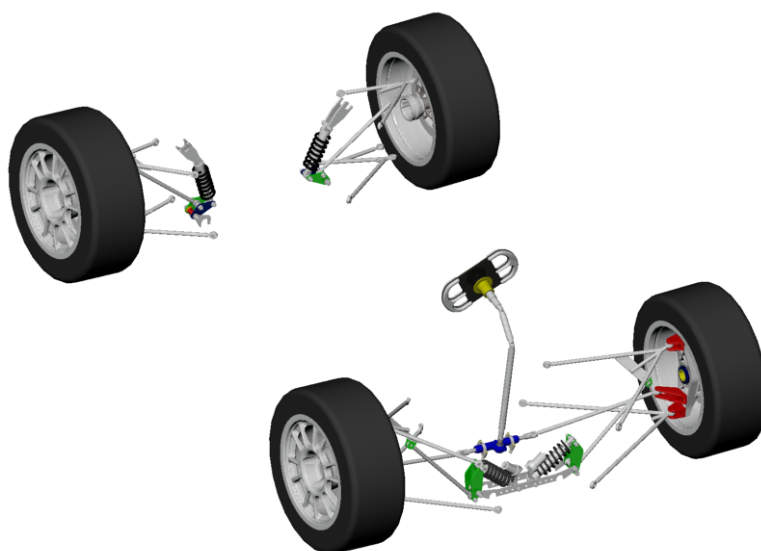
Patříčný převod a přenos kroutícího momentu od volantu na kola zajišťuje skrze tyč řízení převodka řízení. Převodka řízení byla také kompletně navržena, obsahuje svařovanou skříň, plastová kluzná pouzdra a pastorek s hřebenem, s přímým ozubením o modulu $m=1,5$. (obr. 9) Převodka bude k rámu formule přišroubována přes dva svěrné spoje.



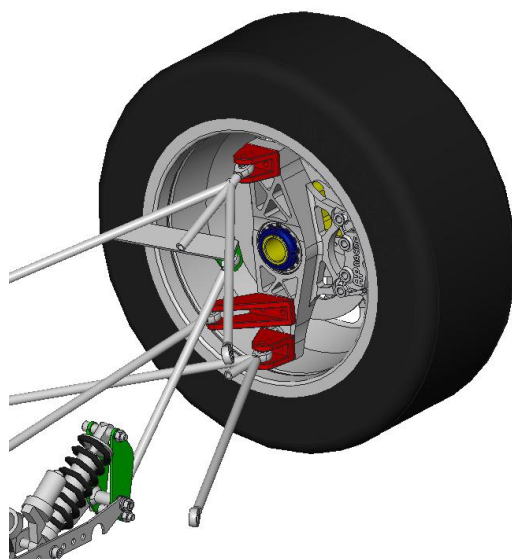
Obrázek 9: CAD model převodky řízení.

3.3 Konstrukční řešení a CAD model podvozku

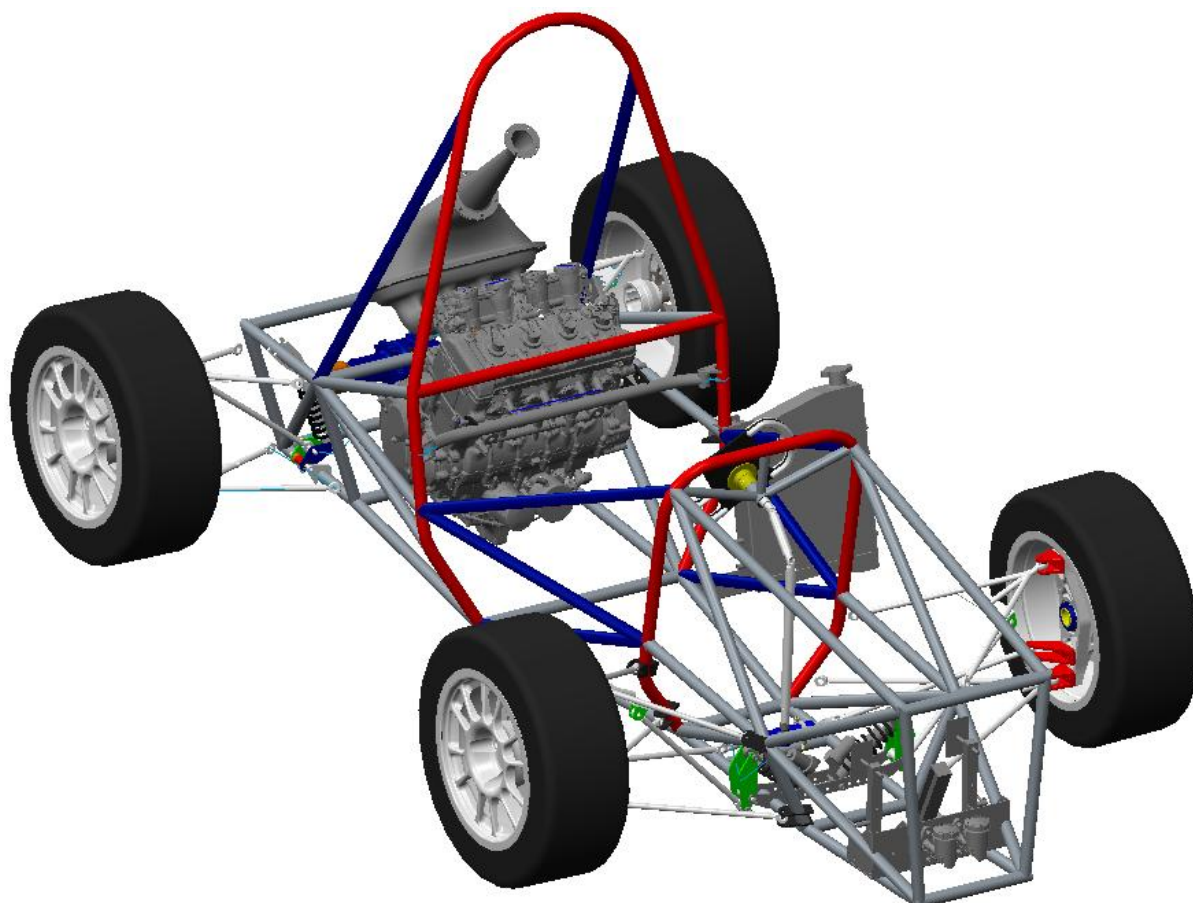
Studentská formule využívá lichoběžníkové zavěšení. Konstrukce ramen zavěšení je navržena z ocelových trubek. Na obr. 10 a 11 je zobrazeno konstrukční řešení podvozku s detailem na zavěšení předního kola a jeho uložení. Uložení zadního kola je momentálně řešeno v diplomové práci týmového kolegy. Obě těhlice jsou řešeny obdobně, pro výrobu frézováním, úchyty náprav jsou šroubované a těhlice mají frézované trojúhelníkové odlehčení. Těhlice i náboje jsou z hliníkové slitiny Certal. Přední náboj je uložen ve dvou kuličkových ložiskách a je axiálně zajištěn KM maticí. Obě těhlice mají osazení pro čtyřpístkové brzdiče AP Racing, určené pro motocyklové kotouče. Ramena zavěšení mají na svých koncích ocelová kloubová oka o velikosti M8. Tato konstrukce ramen je určena prozatím pouze pro testování, jelikož tímto způsobem dochází k namáhání ohybem kloubových ok a i samotných prutů, konstrukce je proto předimenzovaná. V konstrukci ramen pro závodní účely k namáhání ohybem docházet již nebude a ramena budou navíc částečně z kompozitu. Kompozitní materiály a duralové součásti zajistí nízkou neodpruženou hmotnost, konstrukce navíc počítá i s hořčíkovými disky.



Obrázek 10: CAD model podvozku.



Obrázek 11: Detail zavěšení předního kola.



Obrázek 12: Vrcholová sestava studentské formule TUL.

4 Závěr

Publikace ukazuje výsledné návrhy rámu a podvozku studentské formule TUL. Je zde uveden především souhrn požadavků, na které bylo nutné při návrhu dbát.

Vývoj rámu formule probíhal do značné míry paralelně s návrhem podvozku. Tato skutečnost umožnila sice navrhnout dobré kinematické vlastnosti podvozku, zároveň ale celý proces vývoje prodloužila. Delší doba vývoje byla také dána skutečností, že se jedná o konstrukci první formule. Vrcholová sestava rámu, podvozku a některých dalších součástí je vyobrazena na obr.12.

Vzhledem k povolenému rozsahu publikace není detailně uveden postup návrhu. Návrhy se opírají o důkladný průzkum konstrukcí vozů a výsledků řešených problémů ostatních týmů v historii soutěže. Kinematika podvozku byla také několikrát konzultována s odborníky z průmyslové praxe nebo zkušenými jezdci dakarské rallye.

Projekt je nyní ve fázi výroby svařovacího přípravku pro rám. Zároveň je prováděno měření motoru na brzdě. Proces výroby formule bude pokračovat výrobou rámu a podvozku. Fyzické testování jízdních vlastností formule je plánováno na září/říjen 2016. Ještě v témže roce je v plánu také navrhnout ramena zavěšení z uhlíkových vláken a bude zde prostor i na realizaci dalších optimalizací, jako například přepřínování motoru. V létě 2017 je v plánu účast na závodech formule student.

Tento projekt pomáhá studentům v další seberealizaci, umožňuje jak aplikaci teoretických znalostí do průmyslové praxe, tak rozvíjení tzv. měkkých schopností jako je spolupráce v teamu, jednání s průmyslovými partnery, či zlepšování prezentačních schopností. Mezinárodní úroveň závodů studentské formule a obhajoby konstrukce vozu u kontroly vstupní přejímky navíc klade požadavky na jazykové dovednosti studentů. Tím se zvyšuje možnost uplatnění studentů na trhu práce.

Dalším přínosem projektu je propagace Technické Univerzity v Liberci mezi potenciálními studenty a širokou veřejností.

Poděkování

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže Technické univerzity v Liberci č. SGS 21128/115, využívající účelové podpory na specifický vysokoškolský výzkum a je financovaná Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Literatura

- [1] 2015 - 2016 FORMULA SAE ® RULES.
- [2] Formula Student. *Formula Student CTU CarTech* [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://cartech.cvut.cz/formula-student/>
- [3] *Formula Student Germany Magazine 2015* [online]., 1-124 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: https://www.formulastudent.de/uploads/media/FSG2015_magazin_v20150714_HQ.pdf
- [4] BREVIK, Vegard A. *Design, Analysis and Simulation of the Suspension System in the FS Team UiS Race Car*. University of Stavanger, Norway, 2013. MASTER'S THESIS. University of Stavanger, faculty of Science and Technology. Vedoucí práce Hirpa G. Lemu.

DETEKCE VADNÝCH DÍLŮ TEXTILNÍCH DISKŮ

Matúšek Ondřej

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,
Fakulta strojní, 4. ročník
Doktorský studijní program – STROJE A ZAŘÍZENÍ

Abstrakt: Cílem práce bylo nalézt spolehlivé řešení detekce přilnavosti plastu na textilních discích pomocí automatické kontroly strojového vidění. Výsledkem je hardwarové i softwarové řešení problematiky, nicméně důraz je v této práci kladen právě na část zabývající se zpracováním obrazu.

Klíčová slova: Detekce vad, textilní disk, objektivní metodika hodnocení.

Úvod

Tato práce vznikla ve spolupráci s průmyslovým partnerem, který se zabývá výrobou náhradních dílů do textilních strojů. Úkolem bylo automatizovat proces testování adheze materiálu navulkanizovaného na duralovém kotouči.

1 Řešená problematika

1.1. Dosavadní kontrola

Kontrola kvality spojení dvou materiálů textilního disku byla doposud prováděna manuálně. Disk je operátorem vložen do zařízení s pneumatickým lisem (obr. 2). Na disk je na 10 místech po obvodu působeno tlakem silou 1 000 N, případně 700 N, dle typu kotouče. Operátor sleduje působení pístu a vyhodnocuje deformace kotouče, konkrétně zda se oddělí vulkanizovaný potah od základního duralového tělesa. Protože firma vyžaduje 100% kontrolu, jedná se o únavnou činnost. Navíc hrozí, že vada bude přehlédnuta. Nevýhodou je i fakt, že u každého lisu musí být jedna osoba.

1.2. Testované díly

Testovány byly 4 typy disků. Každý z disků obsahuje základní duralové tělo a vulkanizovanou vrstvu (Obr. 1). Kontrolované bylo právě spojení těchto dvou materiálů. Celkový průměr kotouče je pro všechny typy stejný a je to 80 mm, mění se pouze výška a poměr průměrů dvou zmiňovaných částí disku.



Obrázek 1 Testované kotouče

1.3. Cíl práce

Cílem tohoto projektu bylo nahradit popisovanou subjektivní manuální kontrolu objektivním systémem s kamerovou kontrolou a automatickým vyhodnocením. Benefitem bude zároveň ušetření pracovní síly, je uvažováno, že jeden operátor zvládne obsluhovat dva lisy naráz.

Řešení bylo rozděleno do několika kroků:

- vývoj metodiky detekce vad (nalezení optimálního algoritmu pro rozpoznání vad),
- experimentální ověření metodiky na pracovišti zadavatele,
- vývoj software pro detekci vad,
- návrh použitého hardware s ohledem na minimalizaci nákladů,
- návrh konstrukčních změn zařízení.

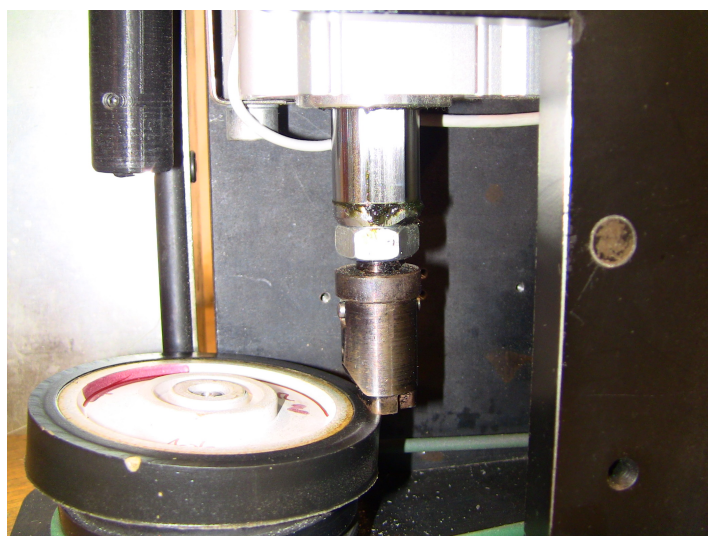
Jelikož se jedná o problém velice komplexní, je v této práci nadále podrobněji rozebírána pouze část zpracování obrazu, nutné konstrukční úpravy budou pouze zmíněny a nebudou dále rozebírány.

2 Automatická kontrola

Vhodnějším barevným formátem pro danou problematiku je obraz v šedé škále. Obraz je přesnější, není zatížen následnou interpolací (která je u barevného formátu dána používanými bayerovskými filtry pro barevný obraz), práce s obrazem v šedé škále je jednodušší a rychlejší (neboť analýza pracuje pouze s jednou maticí), ztráta informace o barevnosti snímané scény není pro dané zpracování obrazu potřebná.

Nebezpečím pro správné vyhodnocení vady je nestabilita disku v průběhu sjíždění třmenu. Na původním testovacím zařízení docházelo při stlačení pneumatickým pístem k náklonu disku v uložení. Testovaná část kotouče se tak pohybovala ve vertikálním směru v řádu několika milimetrů (obr. 2).

Tato nestabilita není velkým problémem při hodnocení operátorem, jehož oči a mozek dokážou tento problém řešit. V případě automatické kontroly je to ale problém. V takovém případě je analýza vcelku komplikovaná a je nutné zahrnout mnoho stavů, které se mohou jevit dvojznačně (jako vada i jako bezvadný test).



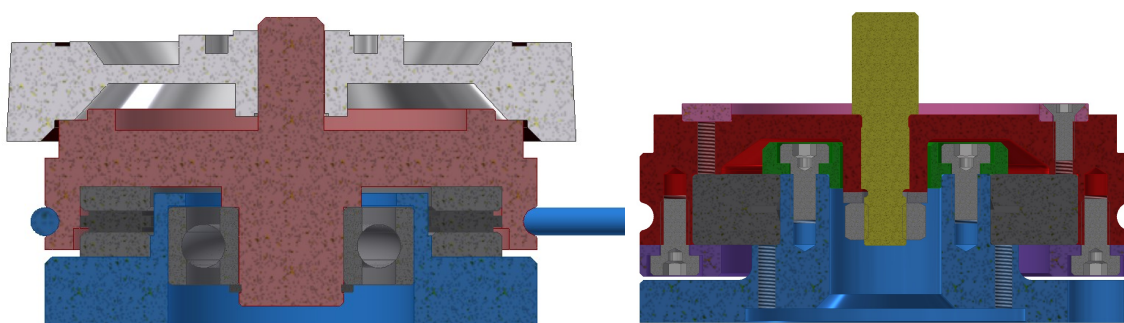
Obrázek 2 Testovací mechanismus

2.1. Zajištění stabilních podmínek

Pro robustní obrazovou analýzu je vždy nezbytné nastavit stabilní okrajové podmínky. Pro naši aplikaci je myšleno zajistit dostatečně intenzivní stabilní osvětlení a omezit proměnlivost polohy (náklon) disku při jeho testování. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k návrhu a provedení konstrukčních změn zařízení.

Bylo navrženo intenzivní plošné LED osvětlení. Směr svícení byl volen horizontálně a světlo bylo umístěno dostatečně nízko nad kotouč, aby se vada odchlípnutí při snímání jevila jako stín.

Dále byla provedena změna uložení disku. S ohledem na problém nestability stávajícího systému uložení disku s jedním radiálním a axiálním ložiskem byl navržen nový systém s ložiskem se zkříženými válečky (obr. 3). Nové uložení je možné zaměnit za staré bez požadavku na jakékoli konstrukční úpravy zařízení.



Obrázek 3 Řez původním a novým uložením disku

Pokud by změna uložení nepostačovala pro dlouhodobé testování, bude nutné do zařízení integrovat přídatný přítlačný systém. Ten by realizoval přítlak shora na disk a to prostřednictvím hlavice s axiálním ložiskem. Hlavice je uvažována ve dvou alternativách – velká hlavice realizující přítlak na čelní plochu disku nebo malá hlavice, která se opírá o čelní osazení disku. Větší opěrná plocha na větším průměru přináší lepší stabilitu, ale rovněž problém v podobě omezení výhledu kamery, přístupu osvětlení, případně možnost poškození pohledové plochy disku.

2.2. Algoritmus pro detekci vad

Jednou z velkých výhod použití počítačového zpracování obrazu je možnost post-processingu (následného zpracování) snímaného obrazu. Obraz je v digitální fotografii snímán jako matice pixelů. Protože bylo použito černobílé kamery, bude obraz reprezentován jako matice hodnot šedi, tj. 0 - 255.

Byly analyzovány záznamy a zkoumáno, jak vadu rozpoznává člověk. Bylo zjištěno, že k rozpoznávání dochází jednak detekcí tmavého pole reprezentující vadu, ale také viditelnou změnou vulkanizované vrstvy v čase. Lidský mozek vyhodnocuje deformaci vrstvy kotouče v průběhu sjezdění třmene. Pokud je zde vada, pak se postupně otevírá a je tak operátorem detekována. Cílem bylo využít obou těchto poznatků. Z tohoto důvodu byly realizovány dva přístupy hodnocení:

- Metoda počítání nadprahových bodů;
- Metoda odčítání obrazů.

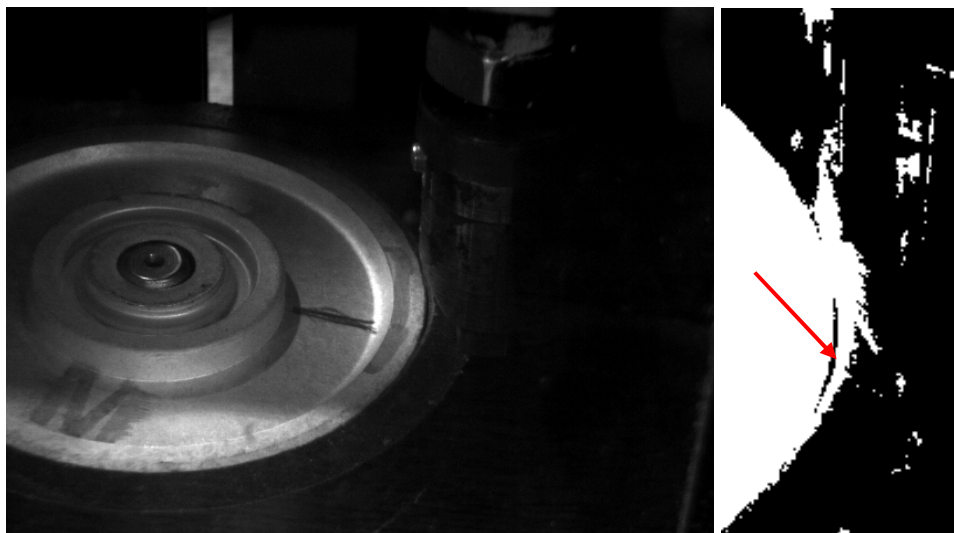
Metoda počítání nadprahových bodů

Jednodušší analýza detekce odchlípnutí pryže od hliníkového středu byla realizována pomocí metody prahování a následného sčítání bodů.

Prahování (angl. tresholding) je nejstarší nejjednodušší metoda segmentace obrazu. Tato metoda je i přes svou omezenou použitelnost velice oblíbená a široce používaná. Popularita spočívá právě v jednoduchosti této metody, ze které plyne snadná implementace a malá časová náročnost. Prahování je založeno na hodnocení jasu každého pixelu samostatně. Principem je nalezení takové hodnoty (prahu) v histogramu, pro kterou bude platit, že všechny hodnoty jasu nižší než práh odpovídají pozadí, zatímco všechny hodnoty vyšší než práh odpovídají popředí. Výsledek prahování tedy dostaneme po jediném průchodu obrazu. Nehomogenní obraz, obvykle obraz obsahující různě jasné úseky, neumožňuje určit přímo globální práh, je však možné využít metod adaptivního prahování. V případě, že se rozložení jasu pixelů popředí a pozadí výrazně překrývá, například protože obraz obsahuje výrazný podíl šumu, může být přímé použití prahování prakticky nemožné.

Pro tuto metodu procesování obrazu, potažmo pro kontrolu založenou na této metodě, bylo nutné tedy ve vymezeném úseku snímaného obrazu uvažovat dva parametry. Prvním úkolem bylo zvolit správně práh snímané šedé škály. Druhou proměnou představoval počet vyhodnocených bodů (bodů s vyšší hodnotou, než je hodnota prahu).

Tato metoda je použitelná i pro dynamickou scénu a díky své jednoduchosti je i poměrně dobře aplikovatelná na zmiňovaný problém. Program provede analýzu pro všech deset poloh kotouče, a pokud je alespoň v jedné pozici detekován nadlimitní počet černých bodů ve vyprahovaném obraze, je disk označen jako nevyhovující. Vedle analýzy obrazu je nutné provést i další opatření, které zajistí robustnost detekce vad. Ty byly zmíněny v kap. 2.1.



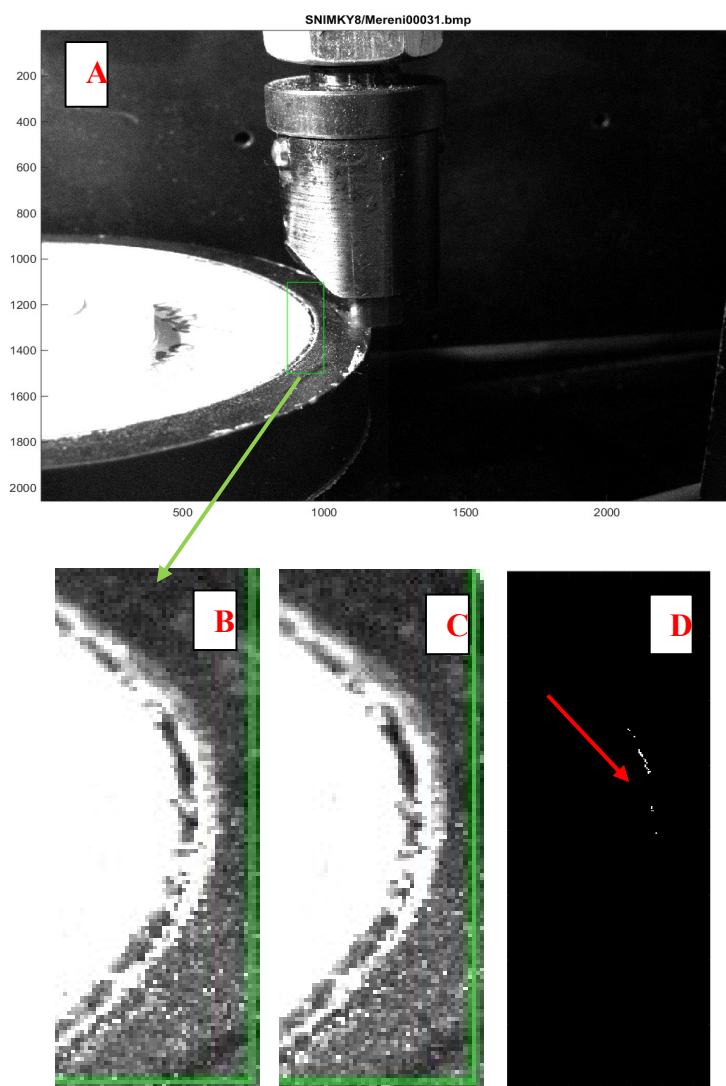
Obrázek 4 Metoda prahování

Metoda odčítání obrazů

Druhým přístupem je použití metody odčítání obrazu. Jedná se o jednu z nejpoužívanějších aritmetických operací při zpracování obrazu. Metoda funguje tak, že hodnota každého prvku první, původní matice (první snímek) se odečte od hodnoty odpovídajícího prvku druhé

matice (druhého snímku). Výsledkem je pak třetí matice (upravený obraz), která je výsledkem rozdílu předchozích dvou matic. To vše lze ale zrealizovat pouze za předpokladu, že obrazy jsou polohově srovnány (registrovány). Tato robustnější metodika, obecně zajišťuje vyšší spolehlivost.

Při aplikaci této metodiky je základem porovnání dvou obrazů pořízených na začátku a na konci sjíždění třmenu, Obr. 5, A. Během tohoto procesu dochází k otevření případné vady a tím ji lze v principu snadno detekovat. Jedná se o analýzu dynamické změny obrazu v čase. V oblasti zájmu obou obrazů (Obr. 5, B a C) jsou výřezy obrazů převedeny (vhodným prahem) na binární (obraz obsahující pouze dvě hodnoty 0 – černá a 1 – bílá). Binární obraz je definován maticí nul a jedniček, je tak vcelku snadné používat maticových operací.



Obrázek 5 Metoda odečítání obrazu

První získaný binární obraz je odečten od druhého. Ve výsledné matici po odečtení jsou použity kladné hodnoty. Následně je aplikována maska, která zajistí detekci změn pouze v oblasti zájmu (na rozhraní hliníkového disku a plastu). Po tom je provedena morfologická operace eroze (disk průměru 1 pixel), která odstraní osamělé body v obraze. Získá se obraz uvedený na Obr. 5, D. Následně je vypočten počet bílých pixelů v dané oblasti zájmu.

Program provede analýzu pro všech deset poloh kotouče, a pokud je alespoň v jedné pozici detekován nadlimitní počet bílých bodů v odečteném obraze, je disk označen jako nevyhovující. Vedle analýzy obrazu je nutné provést i další opatření, které zajistí robustnost detekce vad. Jak je běžné u reálných aplikací, je nutné zajistit intenzivní a stabilní osvětlení a minimalizovat změny (v tomto případě především změny v poloze kotouče v průběhu opotřebení částí zařízení).

3 Porovnání testovaných metod

Byla realizována řada experimentů, resp. zkušebních testů pro porovnání robustnosti obou zmiňovaných metod. Během těchto experimentů byly testovány kotouče, které byly dříve obsluhou identifikovány a označeny jako dobré a špatné. Na základě výsledků těchto provedených experimentů byla pro realizaci vybrána metoda počítání nadprahových bodů. Tato metoda je jednodušší, jak výpočetně pro hardware, tak pro realizaci a nastavení. Pohyblivost sledovaného pole, způsobená naklápěním kotouče v uložení byla ošetřena nastavením většího pole zájmu - aktivní části obrazu, která je uvažována pro analýzu.

Použití metody odčítání obrazu bylo limitováno právě změnou polohy (náklonu) kotouče. Bylo nutné uvažovat o registraci (ztotožnění) obou sejmutých obrazů. Navíc docházelo vlivem neidentického naklopení kotouče ke změně světelných podmínek. Tato metoda je výpočetně i uživatelsky náročnější, navíc i po odladění pro danou aplikaci méně robustní. Z tohoto důvodu byla použita první ze zmiňovaných metod a to metoda počítání nadprahových bodů.

4 Závěr

Předložený článek se zabývá problematikou zpracování obrazu, konkrétně v aplikaci strojového vidění pro automatickou kontrolu adheze textilních disků. Byly uvažovány dva přístupy řešení a to metoda počítání nadprahových bodů a metoda odečítání obrazu. Byla realizována řada experimentů, na jejichž základě byla pro finální aplikaci vybrána jednodušší metoda počítání nadprahových bodů. Testovací zařízení bylo po konstrukční úpravě vedoucí k zajištění stabilních podmínek snímání aplikováno a následně odladěno na průmyslové lince.

Poděkování

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže Technické univerzity v Liberci č. SGS 21128/115, využívající účelové podpory na specifický vysokoškolský výzkum a je financovaná Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Literatura

- [1] SONKA, M., HLAVÁČ, V., BOYLE, R. *Image Processing, Analysis, and Machine Vision*. Pacific Grove: Books/Cole Publishing Company, 1998.
- [2] MATUŠEK, O. Car rest-view mirror holder position determination by an industrial camera. *Grant Journal*. 2012, (1), 1-4. ISSN 1805-062X. Dostupné také z: <http://www.grantjournal.com/images/stories/0101matusek.pdf>
- [3] SMITH, S. M. and BRADY, J. M.: SUSAN - A new approach to low level image processing. *International Journal of Computer Vision*, 1997.
- [4] HOTAŘ V.: *Úvod do problematiky strojového vidění, část 1: Základní principy a hardware*, Technická univerzita v Liberci (2015).
- [5] HOTAŘ V.: *Úvod do problematiky strojového vidění, část 2: Základy zpracování obrazu*, Technická univerzita v Liberci (2015).

SIMULAČNÍ PROGRAM PRO TECHNOLOGII VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ

Thang Nguyen Vo

Sekce – STROJÍRENSTVÍ,

Fakulta strojní, 1. ročník

Doktorský studijní program – STROJÍRENSKÁ TECHNOLOGIE

Abstrakt: Tato práce se zabývá simulačním programem – Autodesk Moldflow Insight pro analýzu vstřikovacího procesu zvoleného dílu. Práce obsahuje stručný popis programu a následný popis CAD modelu. Dále je nastavení vstupních parametrů pro vstřikování podle příslušných procesních podmínek a zobrazení výsledků simulace při stejném nastavení parametrů simulovaného procesu u dvou druhů sítě.

Klíčová slova: simulační program, technologie vstřikování, moldflow insight

1 Úvod

Technologie vstřikování je nejrozšířenější technologií zpracování plastů. Výrobky zhotovené vstřikováním se vyznačují velmi dobrou rozměrovou i tvarovou přesností a vysokou reprodukovatelností mechanických a fyzikálních vlastností. Současným trendem je zvyšovat kvalitu vyráběných plastových dílů při současném zajištění všech na ně kladených nároků a požadavků, bez zvyšování výrobních nákladů. To vše závisí na několika faktorech a jedním z nejdůležitějších je používání simulačních programů, které slouží na analýzu vstřikování plastů před zahájením výroby. Mezi tyto programy patří Cadmould 3D-F a Autodesk Moldflow Insight, Moldex 3D, Solidworks Plastics apod. Provedení optimalizace vstřikovacího procesu prostřednictvím takových specializovaného programů vede k významným úsporám výrobních nákladů vyplývajících zejména ze snížení hmotnosti dílu a spotřeby polymeru, zkrácení času vstřikovacího cyklu a zvýšení kvality dílu, zejména deformace a smrštění. V této práci byla provedena simulace v programu Autodesk Moldflow Insight se sekvencí simulace : plnění + dotlak + deformace.

2 Popis a metoda výpočtu programu

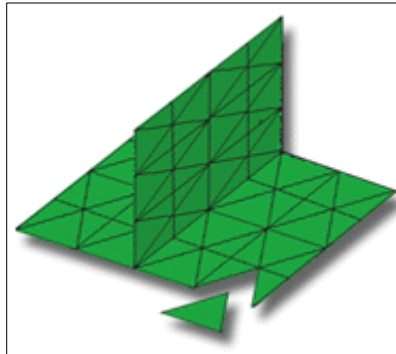
Autodesk Moldflow Insight (AMI) je komplexní software s nástroji pro simulaci, analýzu, optimalizaci a kontrolu při konstrukci plastových dílů a nástrojů. AMI poskytuje možnost hloubkově řešit, vyhodnocovat a optimalizovat plastový díl i vstřikovací formu a tím napomáhá ke studiu vstřikovacích procesů, užívaných v současné praxi. Funkce analýzy AMI simulují plnění, dotlak a chlazení u vstřikování termoplastů, termosetů a materiálů s plnivou a se skelnými vlákny. Kromě toho lze předpovědět následné efekty, např. deformaci dílu. Dále jsou k dispozici detailní informace o chladičích médiích, materiálech pro výrobu nástrojů a možnostech hlavních značek a modelů vstřikovacích strojů [1, 2].

Program AMI pracuje na principu FEM (Finite Element Method – Metoda konečných prvků). Metoda konečných prvků je numerická metoda pro analýzu struktur a těles. Zpravidla je možné řešit touto metodou problémy, které klasickými postupy nelze úspěšně řešit. FEM řeší problémy soustavou lineárních rovnic, jejichž konstrukce a řešení lze efektivně provádět za použití výpočetní techniky [2, 3].

Na začátku práce se Autodesk Moldflow Insight se provádí tzv. síťování modelu. Zde jsou na výběr tři možnosti – midplane mesh, dual domain mesh a 3D mesh.

a. Midplane mesh (Střednicová plocha)

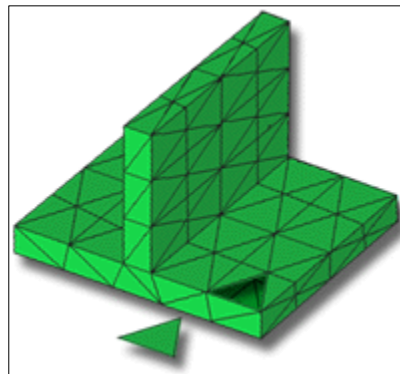
Sít' střednicové plochy (viz. obr. 1) představuje trojrozměrný model jako dvojrozměrný, s rovnými plochami, kterému se přidělí hodnota tloušťky. Konvenční tenkostěnné vstříkované díly lze nejlépe znázornit pomocí sítě střednicové plochy [1, 2].



Obr. 1: Midpane mesh

b. Dual domain mesh (Fusion)

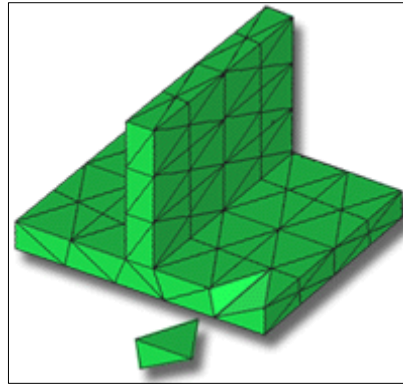
Fusion mesh (viz. obr. 2) je založena na patentované technologii Moldflow Dual Domain™. Ta znázorní trojrozměrný díl s trojúhelníkovými prvky na povrchu CAD modelu v běžném STL nebo IGES formátu. Tak lze trojrozměrné tenkostěnné CAD modely přímo analyzovat. Bez jakýchkoliv dalších úprav modelu lze poté analyzovat další varianty designu a provést hloubkové analýzy [1, 2].



Obr. 2: Dual domain mesh

c. 3D mesh

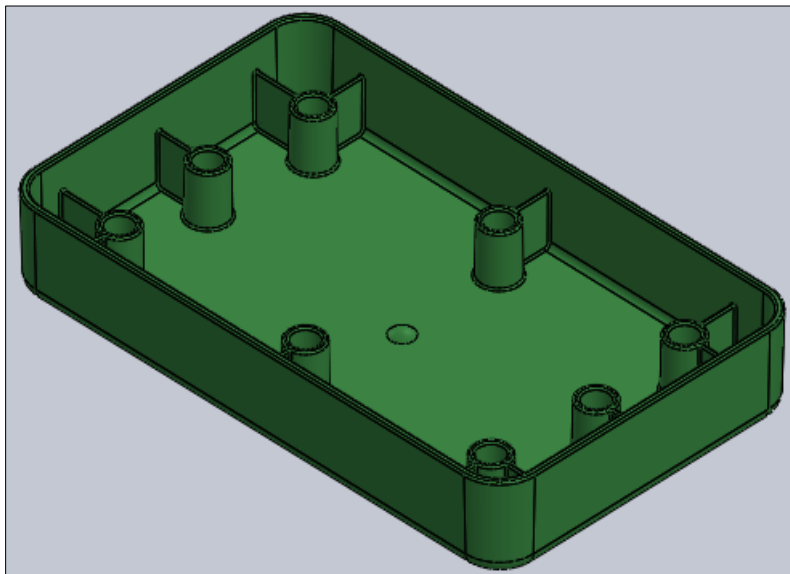
3D mesh (viz. obr. 3) síťuje model podobně jako síť Dual Domain, ale místo plošných trojúhelníků je model tvořen tetrahedrálními elementy. Díky osvědčené technice zasít'ovaných trojrozměrných modelů pomocí tetrahedrálních konečných prvků lze s programy AMI/3D provádět trojrozměrné simulace na dílech, které neodpovídají kritériím pro konvenční tenkostěnné konstrukce [1, 2].



Obr. 3: 3D mesh

3 Výchozí CAD model

Vstříkovaný díl (viz. obr. 4) se analyzoval v simulačním programu je ze semikrystalického materiálu – polypropylen (PP). Díl se kreslil v programu Solidworks a následně se převedl do formátu stl.. Základní rozměr dílu je 148 x 90 x 23 [mm] s tloušťkou stěny 2 [mm] a úhlem úkosu pro odformování 1,5 [°]. Objem dílu je 51,7 [cm³] a hmotnost je 47 [g].

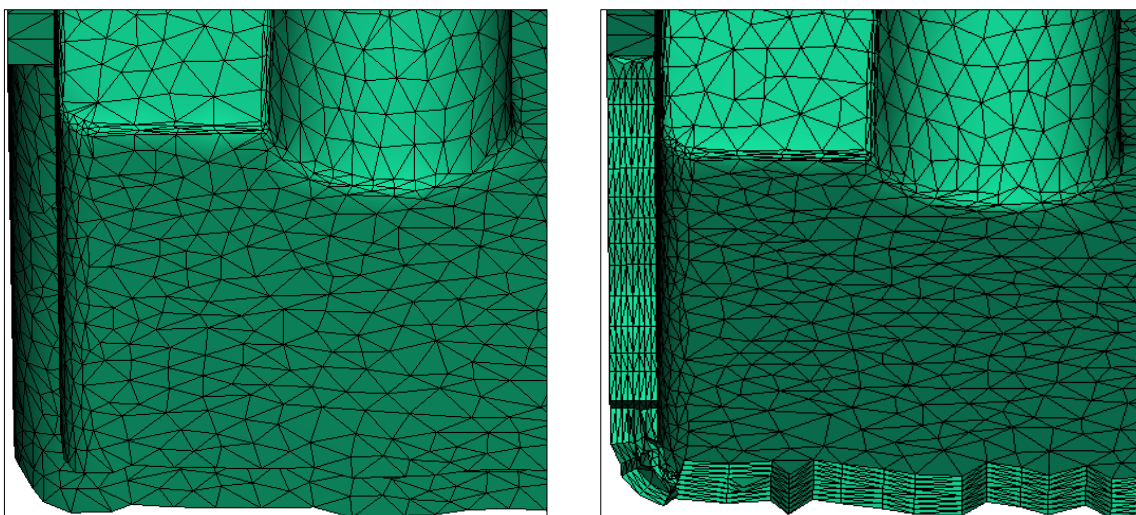


Obr. 4: Vstříkovaný díl

4 Nastavení vstupních parametrů pro simulační proces

4.1 Síťování modelu

CAD model byl síťován dle dvou různých způsobů – Dual Domain a Solid 3D s velikostí jednotlivých elementů 1,5 [mm], viz. obr. 5.



Obr. 5: Síťování modelu
Dual Domain (vlevo), Solid 3D (vpravo)

4.2 Parametry vstřikovacího procesu

Pro vstřikovaný díl z polypropylenu se zmíněným rozměrem jsou uvedeny vstupní parametry pro simulační proces v tabulce 1.

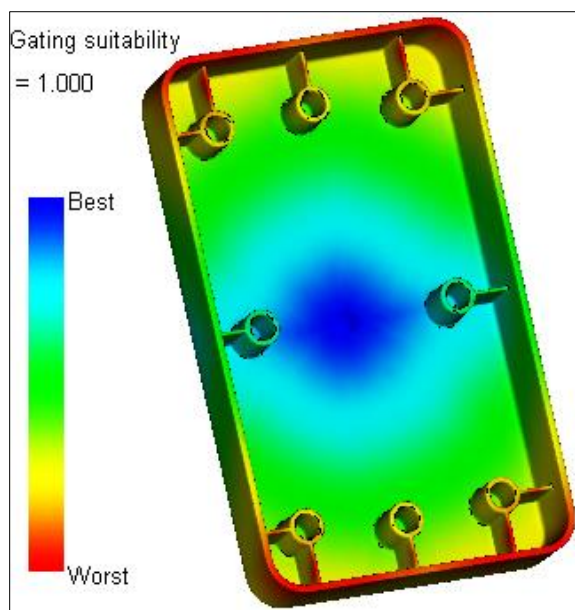
Tab. 1: Procesní podmínky

Teplota formy	50 [°C]	
Teplota taveniny	230 [°C]	
Kontrola plnění	Automaticky	
Rychlost/Tlak přepínání	Automaticky	
Doba chlazení	Automaticky	
Dotlak & čas	Trvání [s]	Dotlak [%]
	2	85
	4	85
	6	40
	8	40
10	40	
Materiál formy	Ocel P-20	

5 Výsledky

5.1 Umístění vtoku

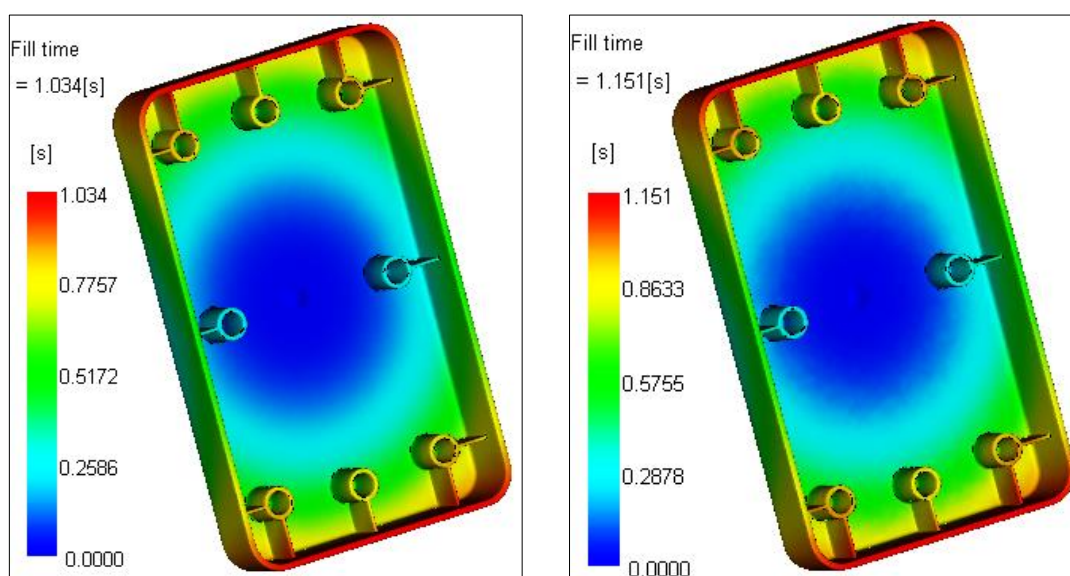
Program nabízí možnost odhadu doporučené polohy vtoku nebo více vtoků na základě poměrně rychlé analýzy geometrie dutiny metodou minimalizace délek tokových drah. Pro analyzovaný díl je toto doporučené umístění vtoku zobrazeno na obr. 6.



Obr. 6: Vhodnost umístění vtoku v Moldflow

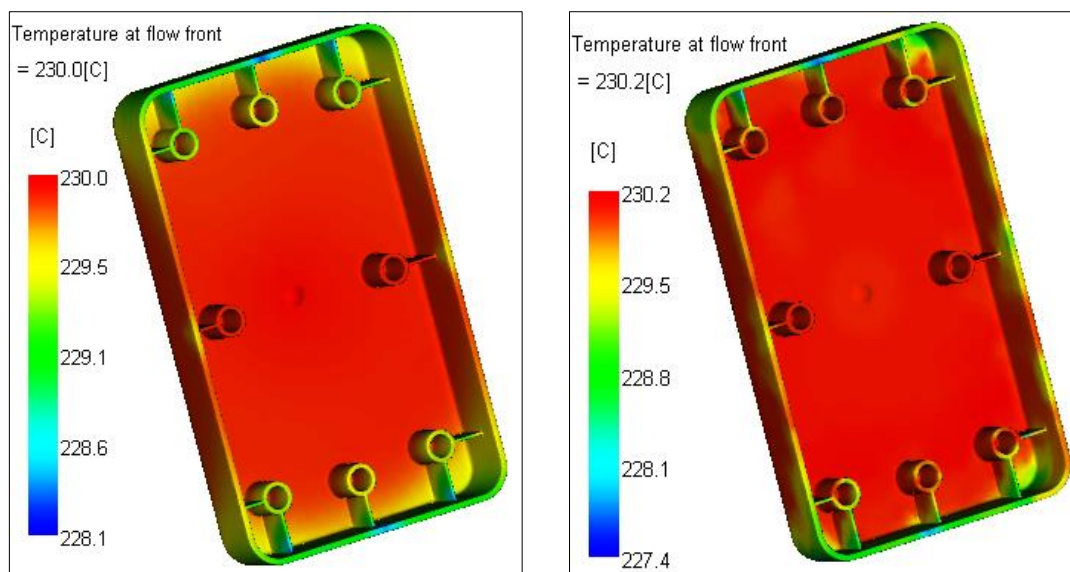
5.2 Doba plnění

Doba plnění je čas potřebný k zaplnění určitého místa v dutině formy. Celková doba potřebná k zaplnění dutiny je 1,034 [s] u sítě – Dual Domain a 1,151 [s] u sítě – Solid 3D, viz. obr. 7.

Obr. 7: Analýza doba plnění
Dual Domain (vlevo), Solid 3D (vpravo)

5.3 Teplota na čele taveniny

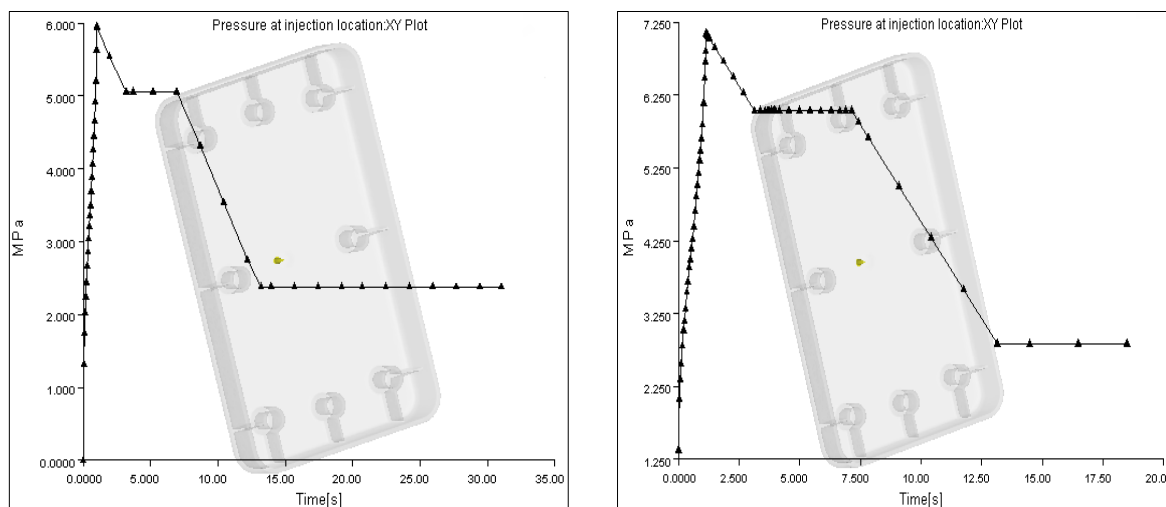
Teplota na čele taveniny nesmí přesáhnout maximální teplotu taveniny tedy 280 [°C]. V tomto případě je maximální teplota taveniny 230 [°C] u sítě – Dual Domain a 230,2 [°C] u sítě – Solid 3D (viz. obr. 8), což jsou hodnoty které nepřesahují maximální teplotu taveniny.



Obr. 8: Analýza teploty proudění
Dual Domain (vlevo), Solid 3D (vpravo)

5.4 Tlak v místě vstřikování

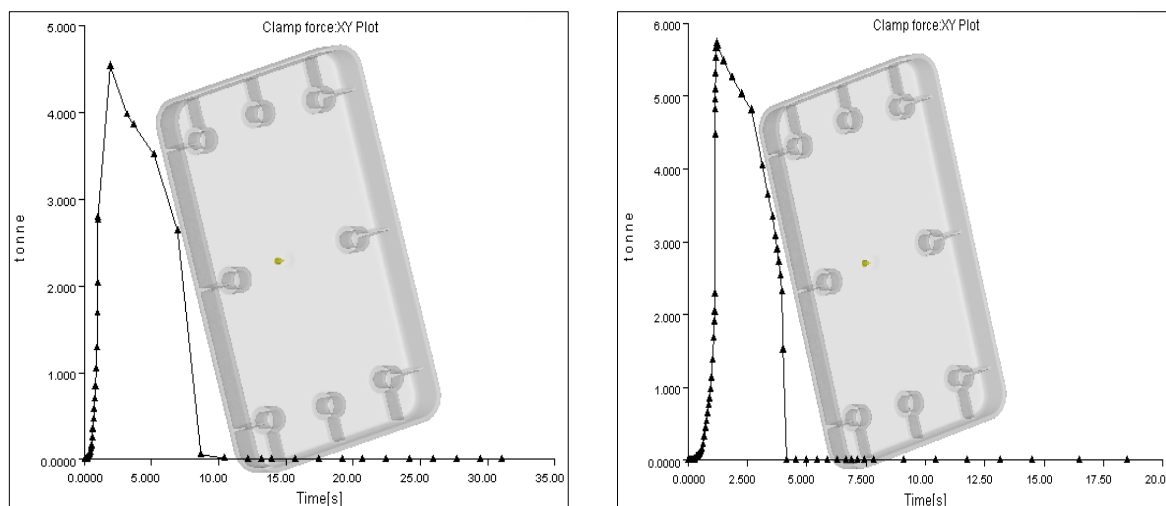
Tato analýza zobrazuje tlak v různých časech během fáze vstřikovacího cyklu. Nejvyšší hodnota tlaku v místě vstřikování je 5,949 [MPa] v 1,022 [s] u sítě – Dual Domain a 7,095 [MPa] v 1,14 [s], viz. obr. 9. Tato hodnota nesmí překročit hodnotu maximálního vstřikovacího tlaku stroje.



Obr. 9: Tlak v místě vstřikování
Dual Domain (vlevo), Solid 3D (vpravo)

5.5 Potřebná uzavírací síla

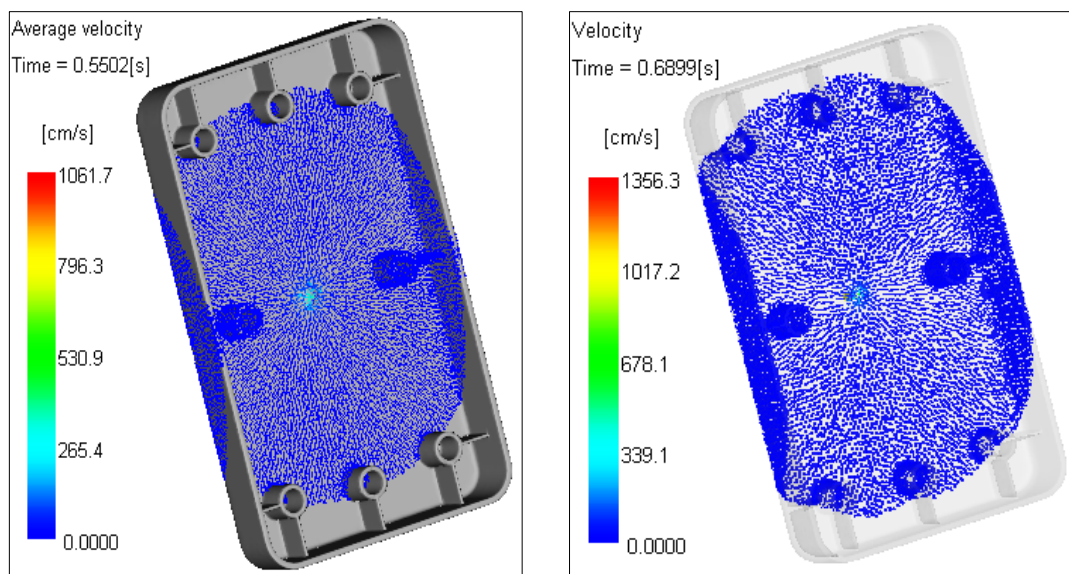
Tento graf nám udává, jaká je potřebná uzavírací síla v závislosti na čase. Maximální hodnota uzavírací síly je 4,53 [t] v 1,94 [s] u sítě – Dual Domain a 5,72 [t] v 1,21 [s] u sítě – Solid 3D, viz. obr. 11. Jelikož je analyzován jen jeden díl, ale forma je koncipována na dva díly je nutné tedy tuto uzavírací sílu zdvojnásobit.



Obr. 11: Uzavírací síla v čase
Dual Domain (vlevo), Solid 3D (vpravo)

5.6 Rychlost proudění taveniny

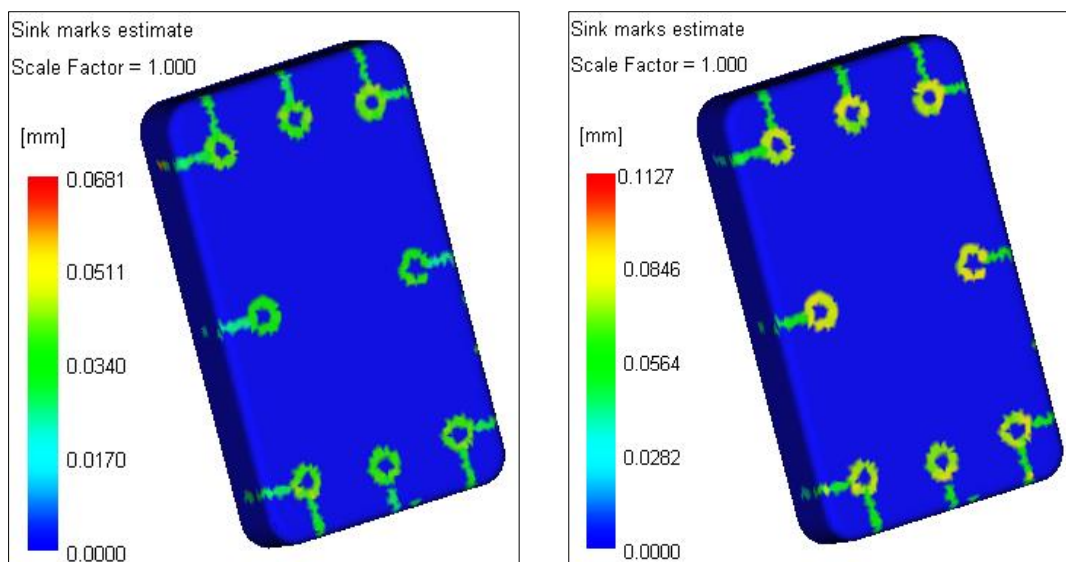
Rychlost proudění byla zjištěna v místě, kde dochází ke kontaktu horké vtokové trysky a studeného vtoku. Nejvyšší hodnota je 1061,7 [cm/s] u sítě – Dual Domain a 1356,3 [cm/s] u sítě – Solid 3D, viz. obr. 12.



Obr. 12: Rychlost proudění taveniny
Dual Domain (vlevo), Solid 3D (vpravo)

5.7 Propadliny

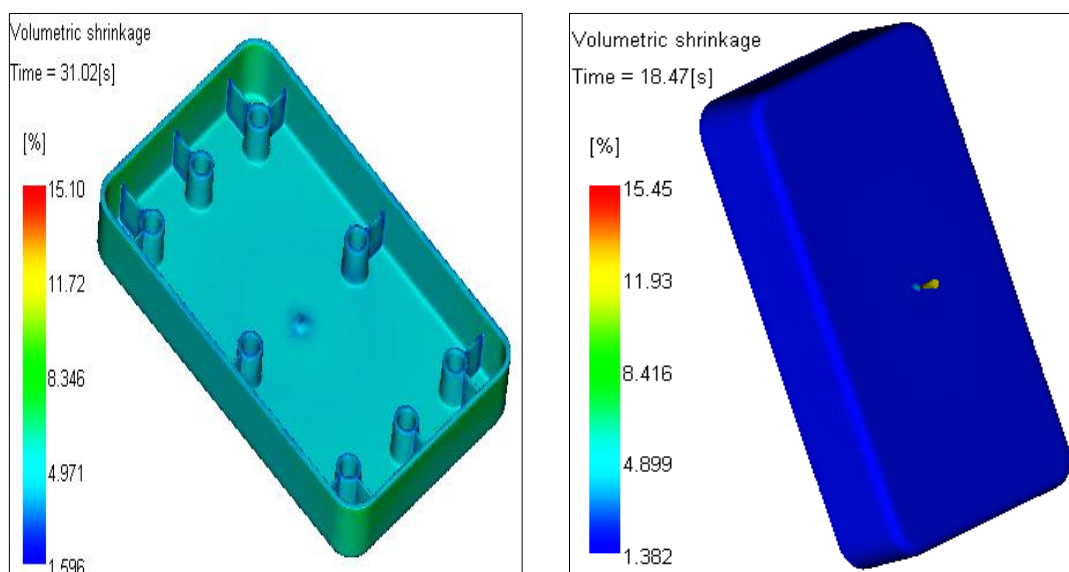
Propadliny se objevují, např. v oblasti nahromadění materiálu nebo v místech umístění žeber apod. jako důsledek nerovnoměrné termické kontrakce (smrštění) a nebo v důsledku příliš velkých tloušťek stěn. Nejvyšší hodnota propadliny 0,0681 [mm] u sítě – Dual Domain a 0,1127 [mm] u sítě – Solid 3D, viz. obr. 13.



Obr. 13: Propadliny
Dual Domain (vlevo), Solid 3D (vpravo)

5.8 Objemové smrštění

Je to objemová změna při tuhnutí polymerních tavenin, jejichž základní příčinou. Při procesu vstřikování nastává po zaplnění tvarové dutiny formy taveninou a ukončení dotlakové fáze objemové smrštění, které pokračuje i po vyhození výstřiku z formy a trvá až do úplného ochlazení výstřiku na teplotu okolí. Maximální průměrné objemové smrštění má hodnotu 15,10 [%] u sítě – Dual Domain a 15,45 [%] u sítě – Solid 3D, viz. obr. 14.

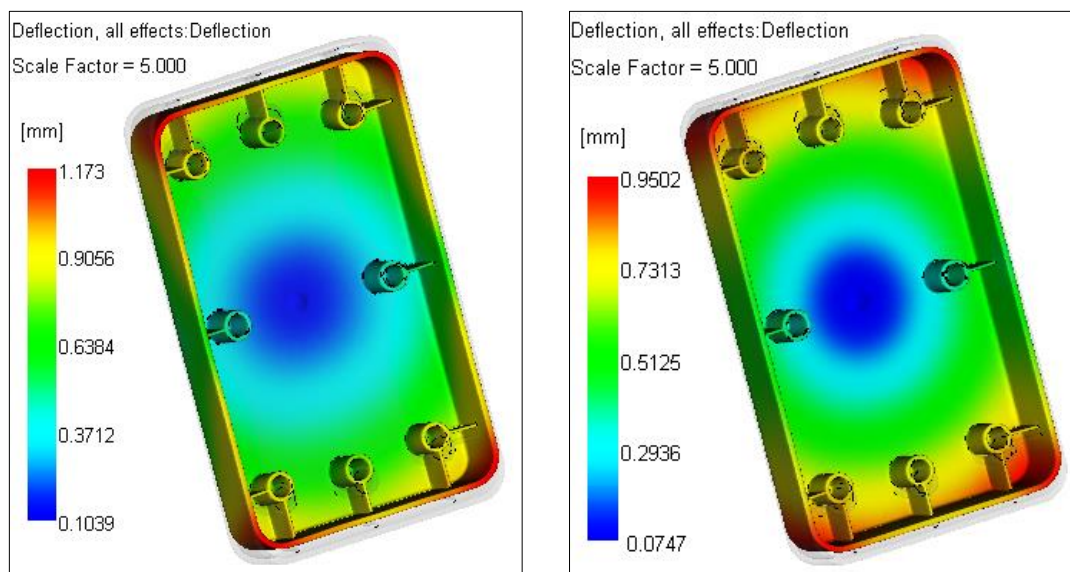


Obr. 14: Objemové smrštění
Dual Domain (vlevo), Solid 3D (vpravo)

5.9 Deformace

Deformace jsou důsledkem působících složek celkového smrštění, např. odlišné smrštění ve směru toku taveniny a v kolmém směru na tok taveniny; rozdílné smrštění v důsledku různé tloušťky stěn na výstřiku nebo místní smrštění v důsledku lokálních změn teploty formy. Hodnota největší celkové rozměrové odchylky ve všech směrech je 1,173 [mm] u sítě – Dual Domain a 0,9502 [mm] u sítě – Solid 3D, viz. obr. 15. V tabulce 2 jsou uvedeny maximální

hodnoty deformací ve směrech X, Y, Z. Aby odchylky byly patrné na obr. 15 bylo nastaveno měřítko 5:1.



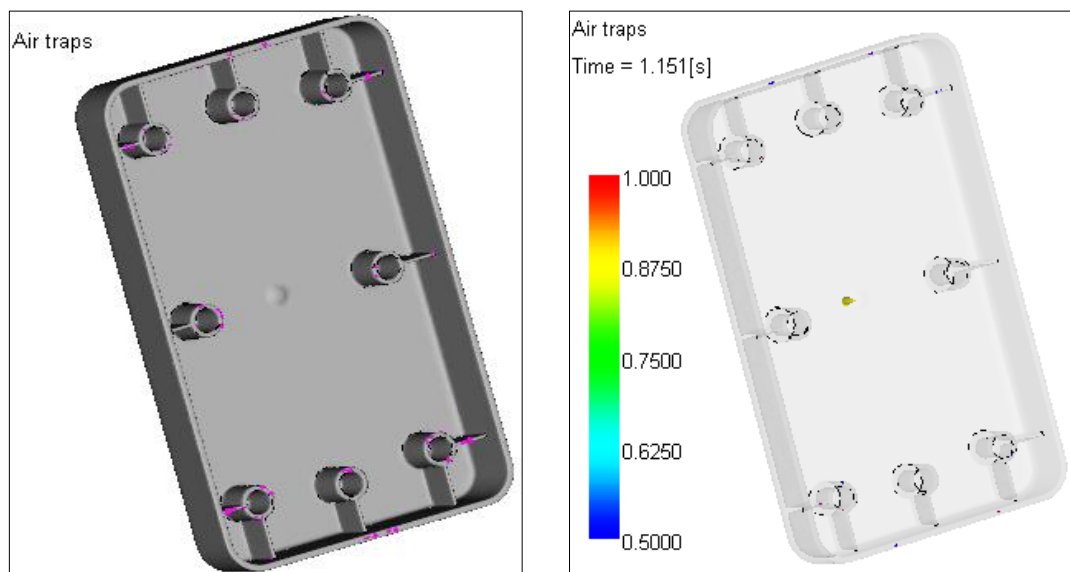
Obr. 15: Průběh deformace
Dual Domain (vlevo), Solid 3D (vpravo)

Tab. 2: Maximální hodnoty deformací ve směrech X, Y, Z

	Sítě – Dual Domain [mm]	Sítě – Solid 3D [mm]
X	0,9729	0,8464
Y	0,2938	0,2329
Z	0,8634	0,5377

5.10 Vzduchové kapsy

Vzduchová kapsa je uzavírání vzduchu během vstříknutí taveniny do dutiny formy. To může mít za následek nedoplnění tvaru nebo degradaci povrchu plastu vlivem, tzv. Diesel efektu (vzduch nestihne uniknout od vzdušňovacími kanály, vlivem vysokého tlaku se zahřívá a může způsobit až spálení plastu). Vzduchové kapsy se na obr. 16 objevují.

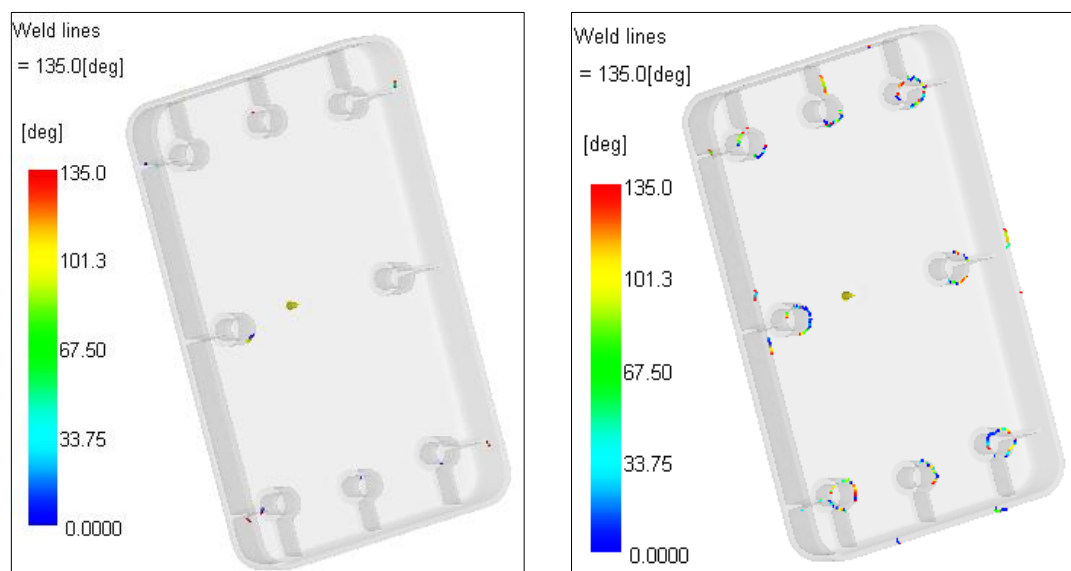


Obr. 16: Vzduchové kapsy

Dual Domain (vlevo), Solid 3D (vpravo)

5.11 Studené spoje

Studené spoje vznikají spojením dvou proudů taveniny. Většinou jde studený spoj kombinací s uzavřeným vzduchem. Tyto studené spoje způsobují nejen snížení mechanických vlastností dílů, ale i nežádoucí vzhledové vady. Pro analyzovaný díl se studené spoje zobrazují na obr. 17.



Obr. 17: Studené spoje
Dual Domain (vlevo), Solid 3D (vpravo)

6 Závěr

Sítě – Solid 3D jsou výhodné pro tlustostěnné, složité a samozřejmě i pro tenkostěnné díly. Použití síťování modelu – Solid 3D pro tenkostěnné díly generuje srovnatelné výsledky s použitím síťování modelu – Dual Domain, ale vyžaduje více výpočetních zdrojů a času pro spuštění a dokončení analýzy kvůli velkému množství elementů (až 1.018.283 elementů) a množství vrstev přes tloušťku dílu (v tomto případě 8 vrstev). Složitější proudění směrem ke konci plnění není předpovídáno u sítě – Dual Domain a analýza přes tloušťku dílu přesně předpovídá vytvoření, např. smrštění; deformace; studené spoje apod u sítě – Solid 3D kvůli vnitřní geometrii dílu, která je také popisována a analyzována. Z výsledků simulace je vidět, že tyto výsledkové hodnoty u sítě – Solid 3D jsou převážně větší než u sítě – Dual Domain. Takové hodnoty jsou blízko skutečných hodnot, a to znamená, že výsledky u sítě – Solid 3D jsou přesnější pro stejné díly.

Poděkování

Tato práce vzniká s podporou výzkumného projektu SGS 21122

Literatura

- [1] SMARTPLAST S.R.O. *Autodesk Simulation Moldflow Insight*. In: Smartplast.cz [online]. [cit. 2016-04-05]. Dostupné z: <http://www.smartplast.cz/ami.php>
- [2] SKÁLA, T. *Porovnání CAE aplikací pro analýzu vstřikovacího procesu* [online]. Zlín, 2009 [cit. 2016-04-05]. Dostupné z: <https://digilib.k.utb.cz>. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Štěpán Šanda.
- [3] HRUBÝ, J. *Metoda konečných prvků - panel 1* [online]. In: VŠB TU Ostrava, 2003 [cit. 2016-04-05]. Dostupné z: http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Vmt/MKP_panel1.pdf

Hodnocení biodegradability PLA kompozitů s přírodními vláknennými plnivými

Ing. Průšek Jan

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,
Fakulta STROJNÍ, 2. ročník
Doktorský studijní program – STROJÍRENSKÁ TECHNOLOGIE

Abstrakt: Tato práce se zabývá hodnocením biodegradability PLA kompozitů s přírodními vláknennými plnivými. Experiment se zabývá výrobou vzorků, aplikací rozdílných degradačních prostředí a hodnocení stupně degradace v závislosti na prostředí a typu vláken. Vzorky byly podrobeny vizuálnímu hodnocení a mikroskopickému hodnocení.

Klíčová slova: PLA, přírodní vlákna, biodegradace, biopolymer

1 ÚVOD

Čím dál tím více věcí vyrobených člověkem je z plastu. Plasty nahrazují dříve používané materiály, jako jsou dřevo, sklo, kovy, porcelán již dlouhá léta. Zatím jsme pro ně nenašli uplatnění všude, ale tam, kde se dalo, jsme je uplatnili. Vyrábí se z nich vše od těch nejmenších věcí (mikrosítka, cévní náhrady), přes větší výrobky (hračky, láhve, notebooky), po ty největší díly (palubní desky, nárazníky, bazény). Od nejjednodušších tvarů (desky, fólie), po ty tvarově nejsložitější díly (filtry, mřížky chladičů).

Plasty našly své uplatnění díky svým výhodným vlastnostem. Jsou lehké, relativně levné, mají elektroizolační vlastnosti, tlumí chvění a rázy, mají výbornou korozní odolnost a jsou snadno zpracovatelné řadou technologií.[1] Naučili jsme se je modifikovat a upravovat jejich vlastnosti, aby byly stabilnější a odolnější.

Ale co se stane s plastovými výrobky po skončení jejich životnosti nebo po splnění funkce, ke které byly vytvořeny? Stane se z nich odpad. Spoustu z nich je možné recyklovat, ale co zbytek? Spálit? Umístit na skládky, kde se tyto materiály budou rozpadat stovky let? Dnešní doba je dobou, kdy nabídka produktů na trhu několikanásobně převyšuje poptávku. Technologický vývoj letí kupředu. Člověk je nucen, ať už samotným technologickým vývojem nebo módními trendy, kupovat stále další a nové produkty a tím produkuje daleko více odpadu, než by bylo nezbytně nutné.

Největší procento plastového odpadu tvoří výrobky s krátkou životností a výrobky na jedno použití. Jedná se například o kelímky, plastové přístroje, obaly, fólie, krabičky. U těchto výrobků je především snaha o změnu materiálu. Přejít ze syntetických polymerů na tzv. biopolymery. Biopolymery jsou získané z přírodních obnovitelných zdrojů a mají nenahraditelnou vlastnost a to, že jsou biodegradovatelné. Biodegradovatelné znamená, že jsou schopny se rozložit za pomoci přírodních vlivů od několika měsíců po desítky let. Nikoliv stovky let, jako je tomu u syntetických polymerů.

Bohužel se zde jedná o konflikt ekonomický a ekologický. Syntetické plasty jsou levné, ale představují do budoucna ekologický problém. Navíc pocházejí z ropy a ropa není obnovitelný zdroj. Biodegradovatelné plasty jsou sice biologicky a ekologicky odbouratelné a pocházejí z obnovitelných zdrojů, ale jejich cena převyšuje cenu syntetických plastů.

Nejedná se pouze o náhradu syntetických polymerů u výrobků s krátkou dobou životnosti, ale i o náhradu syntetických polymerů u výrobků s dlouhou dobou životnosti.

Abychom s těmito polymery dosáhli vlastností syntetických polymerů pro běžné či průmyslové aplikace, je nutné je modifikovat či vyztužit, ale přitom zachovat jejich biodegradovatelnost.

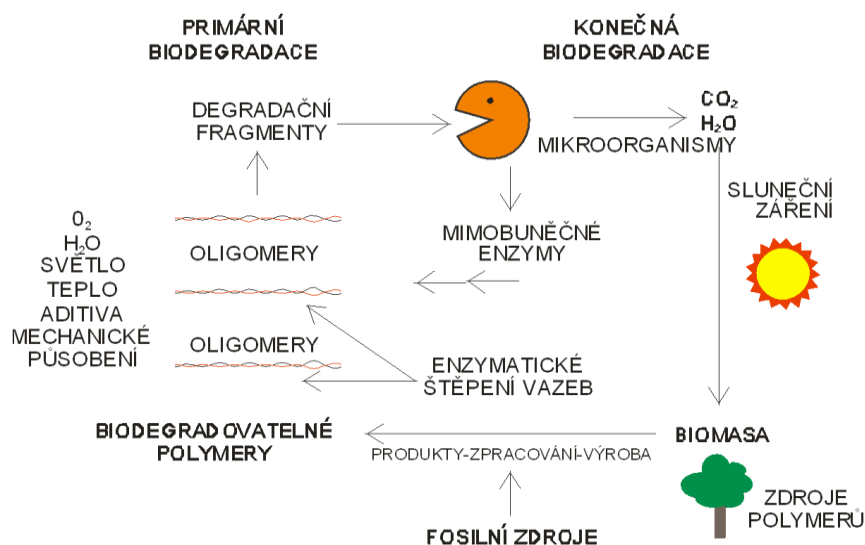
Jednou z nejpoužívanějších variant plastů pro aplikaci v průmyslu jsou kompozitní materiály. Jedná se o plasty vyztužené různými typy plniv. Může se jednat o plniva částicová (skleněné mikrokuličky, talek, koks, saze, práškové kovy aj.), vyztužující plniva (skelná vlákna, uhlíková vlákna, vlákna z nerezových ocelí, vláknité monokrystaly kovů, kysličníky kovů a karbidů, vlákna aromatických polyamidů atd.) nebo nanoplňiva (vrstvené jíly - montmorillonit).[2] Některé z těchto plniv, ale není možné použít u biodegradovatelných polymerů, pokud chceme zachovat jejich stoprocentní rozložitelnost.

Pro tyto účely zde můžeme využít celou škálu přírodních a tudíž biologicky odbouratelných vláken, ať už rostlinného či živočišného původu. Tato vlákna ve spojení s biodegradovatelným polymerem vytváří stoprocentně biologicky odbouratelný kompozitní materiál, který lze následně vhodně aplikovat.

Bioplasty hledají stále nová uplatnění v moderním světě. V závislosti na to byl určen cíl této diplomové práce. Cílem diplomové práce je hodnocení biodegradability PLA kompozitů s přírodními vláknými plnivými.

2 Biodegradace

Biodegradace je chemická degradace, při které dochází k rozkladu organické hmoty působením biologických organismů. Biodegradační proces se sestává ze dvou základních kroků. Prvním je depolymerizace či štěpení polymerního řetězce na kratší polymerní segmenty (oligomery) a druhým je mineralizace. Umístíme-li biodegradovatelné polymery do bioaktivního prostředí (do kompostu), působením mikroorganismů dojde k rozkladu na oxid uhličitý, vodu, případně organické zbytky (biomasu). Přeměna biomasy na plyny (oxid uhličitý, metan, sloučeniny dusíku), vodu, minerály a zbytkovou biomasu se nazývá mineralizace. Tento proces je dokončen, je-li všechen uhlík přeměněn na oxid uhličitý. Celková mineralizace znamená, že všechny vzniklé chemické prvky se začlení zpět do přírodního cyklu. [3], [4]



Obr. 1 Cyklus biodegradace [3]

Mikroorganismy podílející se na biodegradačním procesu jsou bakterie, houby, plísně, řasy apod. Tyto mikroorganismy obsahují molekuly bílkovin (enzymy), které způsobují

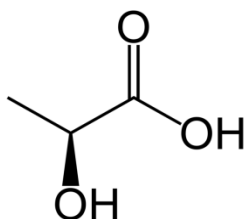
většinu degradačních procesů a urychlují chemické rozkladné reakce. Jsou to vysoce efektivní katalyzátory nezbytné pro živé organismy. Býložravci využívají tyto enzymy k rozložení rostlinné potravy při trávení. Tyto mikroorganismy vyžadují speciální podmínky pro vznik i pro jejich samotnou existenci. Jedná se o kombinaci prostředí, pH, živin, teploty, přítomnosti či nepřítomnosti kyslíku, přítomnost toxických látek, apod. Nejsou-li všechny tyto podmínky dodrženy, mikroorganismy odumírají a biodegradační proces se zpomaluje a může dojít i k jeho úplnému zastavení. [3], [4], [5]

Biodegradace může probíhat za přítomnosti kyslíku (aerobní degradace) a při absenci kyslíku (anaerobní degradace).

3 Kyselina polymléčná (PLA - polylactid acid)

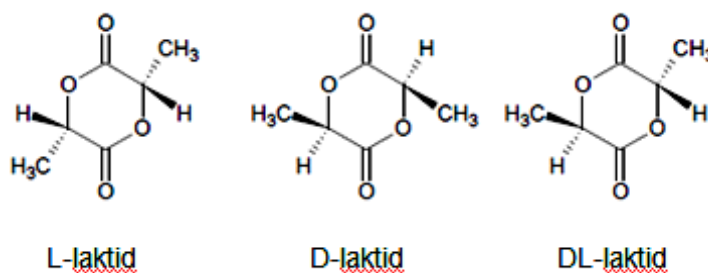
Polyaktidová (polymléčná) kyselina je alifatický polymer vyráběný z kyseliny mléčné. Chemický vzorec kyseliny mléčné je $C_3H_6O_3$. Při použití vhodného procesu výroby jsme schopni vyrobit jak vysokomolekulární polymer pro medicínské aplikace, tak polymer s molární hmotností 100000g/mol, který má srovnatelné vlastnosti s polymerem pro běžné aplikace.

PLA je vyráběna z kyseliny mléčné. Ta může být získána z přírodních zdrojů, nebo z ropných produktů. Z přírodních zdrojů se získává za pomoci enzymů nebo hydrolyzy cukrů například ze škrobů. Kvašením těchto jednoduchých sacharidů bakteriemi mléčného kvašení za anaerobních podmínek je konečně získána kyselina mléčná. Ideální podmínky pro kvašení jsou pH 5,4 až 6,4 a teplota mezi 38 a 42°C. [3], [5]



Obr. 2 Kyselina mléčná [4]

Kvašení může probíhat dvěma způsoby. Kontinuálně anebo dávkově v kvasných nádobách. K separaci kyseliny mléčné ze získaného kvasu je použita metoda destilace. Před samotnou polymerizací je kyselina mléčná ještě čištěna. Kyselinu mléčnou můžeme získat v několika formách. Pravotočivé formě (D), levotočivé formě (L) nebo ve variantě, kde poměr L:D je 50:50 (DL). Poměr těchto forem nám pak určuje konečné vlastnosti samotného polymeru. [5]



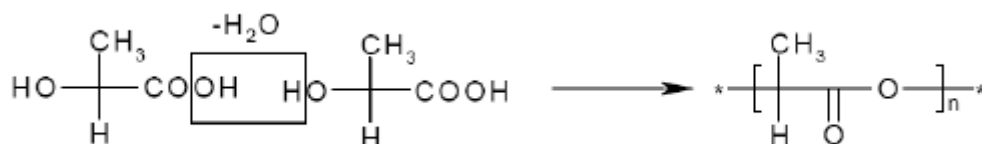
Obr. 3 Stereoisomery laktidů [10]

Jak je patrné z obrázku, isomery se liší prostorovým uspořádáním metylové skupiny. Nahodilé uspořádání metylové skupiny v polymeru se projeví poklesem krystalinity. Toto je patrné z hodnot získaných zkouškami mechanických vlastností polymeru. Při stejné hustotě obou polymerů (L-PLA a DL-PLA), která byla určena na 1,24 g/cm³ vykazuje L-PLA více jak 2,5 krát vyšší modul pružnosti než DL-PLA. Zato DL-PLA vykazuje až 2 krát větší mez pevnosti v tahu než L-PLA. Díky poklesu krystalinity vykazuje polymer DL-PLA charakter amorfního polymeru, zatím co L-PLA má vlastnosti semikrystalického polymeru. [3] [5] [12].

Z kyseliny mléčné je možné polymer (vysokomolekulární látku získanou polymerací) získat jednou ze dvou metod:

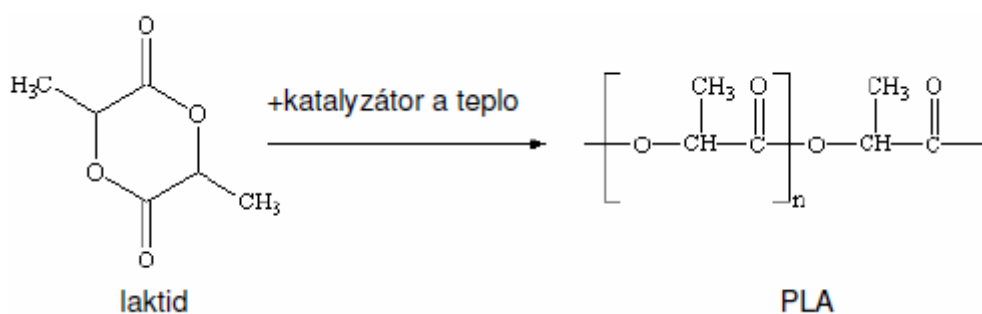
- Přímá metoda
- Nepřímá metoda

Při použití metody přímé se jedná o metodu výroby polymeru známou jako polykondenzace. Tato reakce probíhá reakcí hydroxilové skupiny jednoho monomeru s karboxylovou skupinou monomeru druhého. Pro průběh takovéto reakce jsou vyžadovány vysoké teploty, dlouhé reakční časy a stálý odvod vedlejšího produktu - kondenzátu (vody). Tento způsob výroby čistého PLA je značně nákladný vzhledem k užitým chemikáliím, vysokým teplotám nutných pro reakci a dlouhým časům výroby. [13]



Obr. 4 Mechanismus výroby PLA polykondenzací[4]

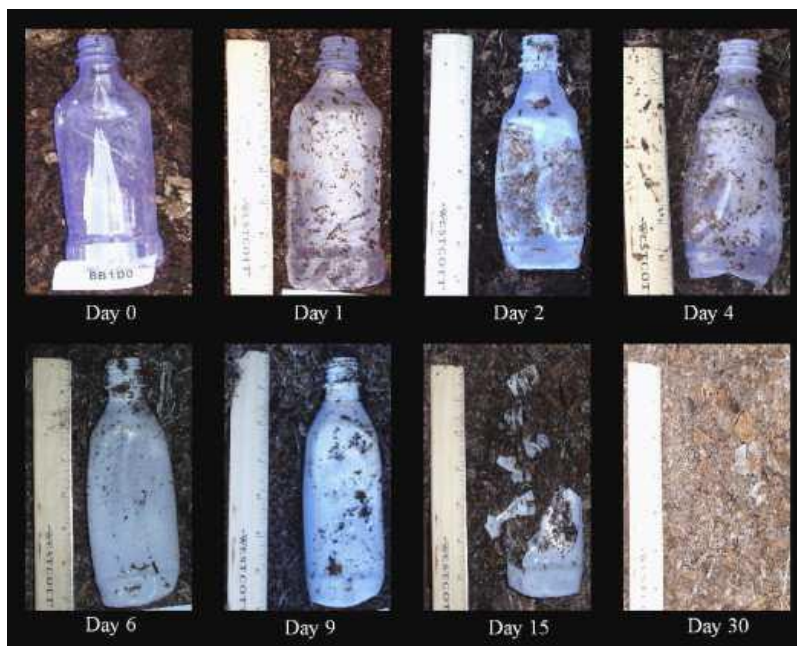
Nepřímá metoda výroby je zvláštním způsobem metody zvané polyadice. Je též nazývána „ring-opening“ polymerace. Polyreakce probíhá přes dimér kyseliny mléčné zvaný laktid. Reakce probíhá za teplot mezi 140 a 180°C, nevznikají žádné vedlejší produkty a vzniká polymerní látka s molární hmotností větší než 100000g/mol. Pro nastartování tohoto typu reakce je nutné použití katalyzátoru. Většinou se jedná o organokovový katalyzátor na bázi zinku. [3]



Obr. 5 Syntéza PLA z laktidu [4]

Polymer je nutné dále modifikovat, pokud chceme dosáhnout větší teplotní stability. U PLA je možné dosáhnout jak semikrystalické struktury, tak i struktury amorfní. Tento stav je silně závislý na rychlosti chlazení polymeru. Teplota krystalizace u PLA je mezi 80 a 100°C. Polymer je tuhý a křehký, ale přidáním plastifikačních činidel lze dosáhnout zvýšení houževnatosti a tažnosti. Mez pevnosti v tahu se pohybuje kolem 60MPa a tažnost kolem 8 %. Modifikováním polymeru můžeme dosáhnout hodnot pro tažnost až 300 % a snížení meze pevnosti v tahu na 40 MPa. [3], [4], [5]

PLA je plně biodegradovatelný polymer. Jeho biodegradace probíhá hydrolyzou esterových vazeb kyseliny mléčné. Ta je přeměňována mikroorganismy na vodu a oxid uhličitý. Biodegradace probíhá za normálních okolních teplot velice pomalu. Navýšíme-li však teplotu nad teplotu skelného přechodu plastu (pro PLA je teplota skelného přechodu kolem 50°C), zvýšíme tak i rychlost degradace polymeru. Jako příklad lze uvést kompostování za teplot mezi 60 a 70°C, kde dochází k rozložení na oxid uhličitý, vodu a biomasu během jednoho až dvou týdnů. Zbytek biomasy je pak rozložen do jednoho měsíce. [3], [4], [5].



Obr. 6 Biodegradace láhve vyrobené z PLA v kompostu[7]

PLA se dá zpracovávat konvenčními metodami pro zpracování plastů jako jsou vstřikování, vytlačování, lisování a vyfukování. Je však nutné nepřekračovat při jeho zpracování teplotu 200 °C, jinak by došlo k teplotní degradaci polymeru.

Vlastnosti PLA jsou srovnatelné s polymery pro běžné použití. Bohužel jeho cena je stále vyšší ve srovnání s cenou syntetických polymerů (PLA minimálně 2€/kg). Komerční výroba kyseliny mléčné se v dnešní době pohybuje kolem 100000 tun za rok. Tento polymer nachází uplatnění v mnoha různých odvětvích. V zemědělství se z něj vyrábějí kompostovatelné pytle a fólie. Díky svému lesku a průhlednosti je široce využíván v potravinářském průmyslu, kde se z něj vyrábějí obaly. Další využití našel při výrobě talířů, příborů či kelímků na jedno použití. Materiály na bázi PLA a jejích kopolymerů jsou využívány v medicínských aplikacích (zapouzdřování léčiv, pro výrobu speciálních kostních implantátů či šroubů). Tyto náhrady umožňují soudržnost při hojení a přitom jsou postupně vstřebávány organismem. Doba jejich degradace je závislá na jejich velikosti, ale průměrně se pohybuje kolem 2 let. PLA se používá i při výrobě kompozitních materiálů při použití přírodních vláken. [3], [4].

4 Experiment

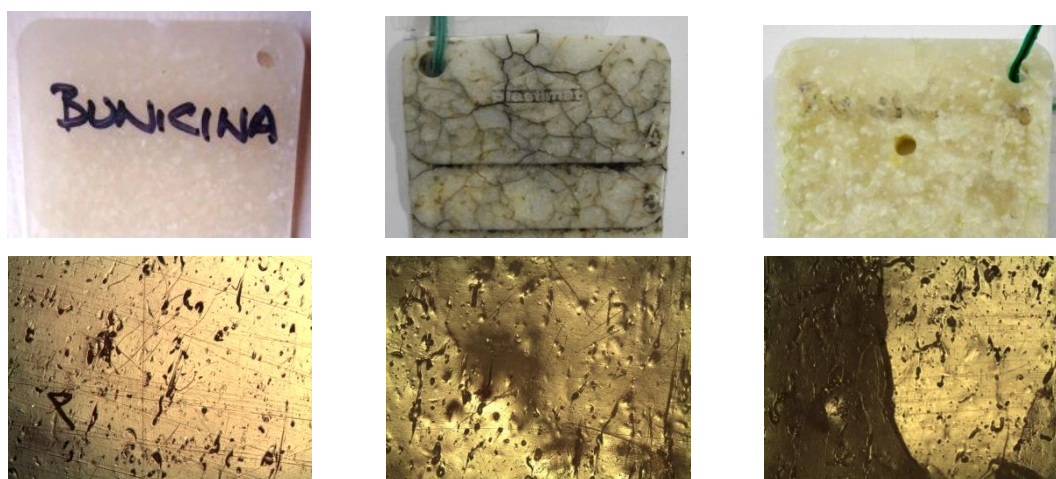
Jako materiál matrice byl pro účely experimentu zvolen biodegradovatelný polymer PLA (polylactid acid - kyselina polymléčná). Polymer byl ve formě granulátu od výrobce

NatureWorks LLC pod označením Ingeo Biopolymer 3052D. Jedná se o variantu biopolymeru PLA určenou a modifikovanou pro zpracování technologií vstřikování.

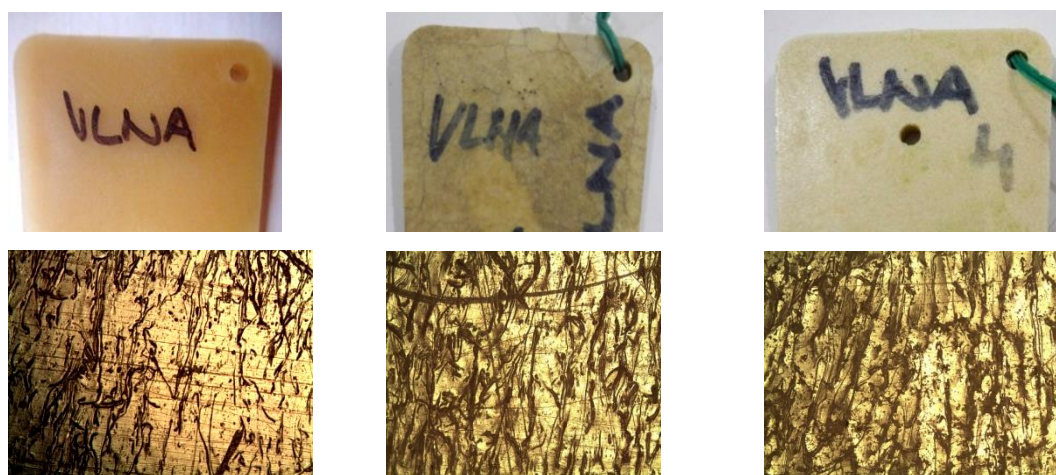
Jako plniva bylo vybráno 11 různých druhů vláken. Ve všech případech se jednalo o vlákna přírodního původu. V deseti z nich se pak jednalo o vlákna rostlinného původu a v jednom případě o vlákna zvířecího původu. Jedná se o vlákna bambusu, banánovníku, bavlny, buničiny, juty, kokosu, konopí, lnu, ovčí vlny, ramie, sóji a ovčí vlny.

Pro účely smísení vláknitého plniva s polymerní maticí byl použit dvoušnekový vytlačovací stroj a metoda granulace za studena. Pro tyto účely byla použita granulační linka od firmy ZAMAK.

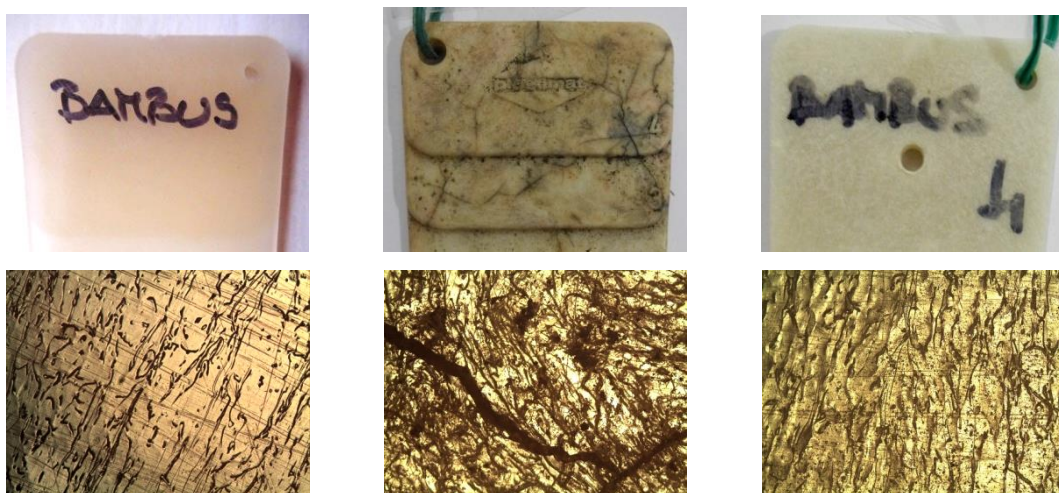
Cílem práce bylo hodnocení biodegradability PLA kompozitů s přírodními vláknennými plnivými v závislosti na použitém plnivu a na degradačním prostředí. Po výrobě vzorků bylo nutné zvolit několik typů degradačního prostředí. Biodegradace jako taková může probíhat jak v půdním prostředí, tak i ve vodním prostředí. Jako zástupce půdní biodegradace byla zvolena metoda domácího kompostování. Vodní degradační prostředí zde simulovaly tři roztoky obsahující bakterie pro biologický rozklad. Vzorky byly ponechány v degradačních prostředích po dobu 70 týdnů. Následně byly vzorky podrobeny analýze.



Obr. 7 Buničina - na začátku testu - vlevo, z kompostu - uprostřed, z roztoku - vpravo



Obr. 8 Vlna - na začátku testu - vlevo, z kompostu - uprostřed, z roztoku - vpravo



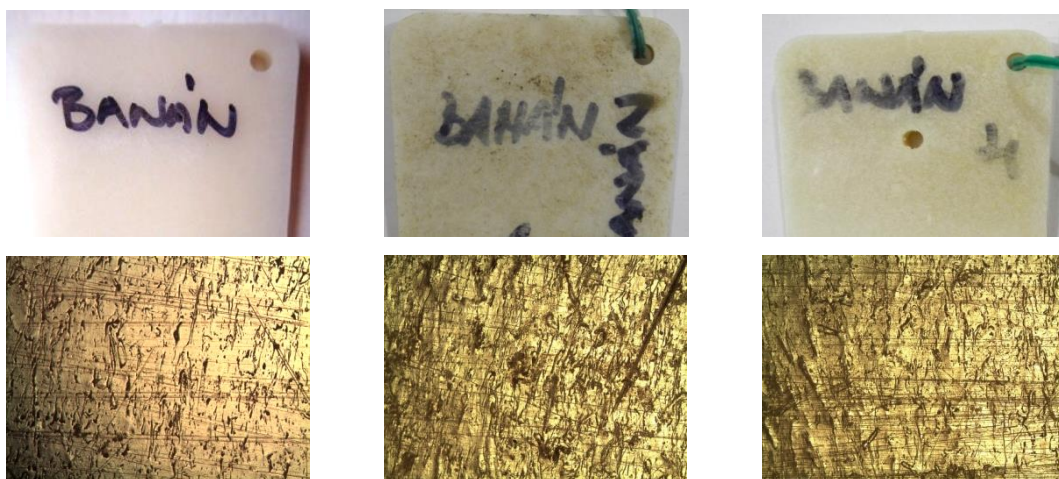
Obr. 9 Bambus - na začátku testu - vlevo, z kompostu - uprostřed, z roztoku - vpravo



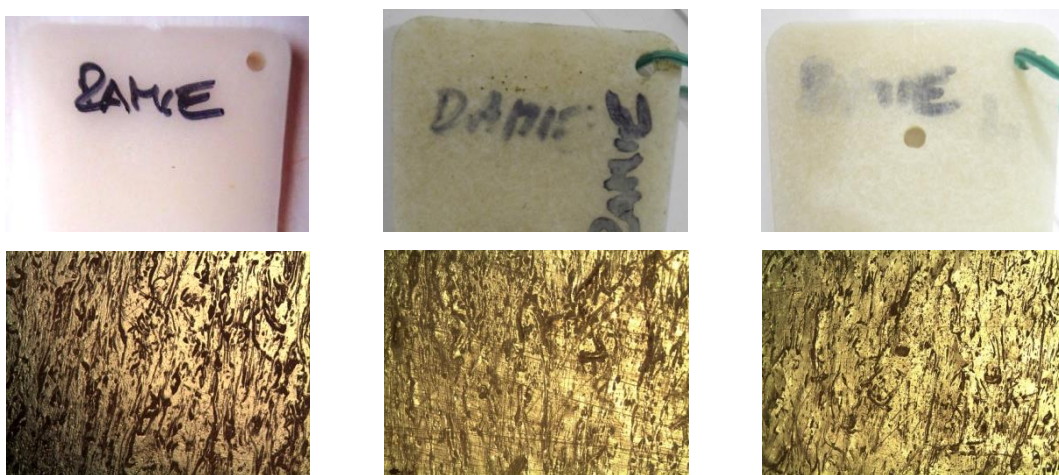
Obr. 10 Sója - na začátku testu - vlevo, z kompostu - uprostřed, z roztoku - vpravo



Obr. 11 Len - na začátku testu - vlevo, z kompostu - uprostřed, z roztoku - vpravo



Obr. 12 Banán - na začátku testu - vlevo, z kompostu - uprostřed, z roztoku - vpravo



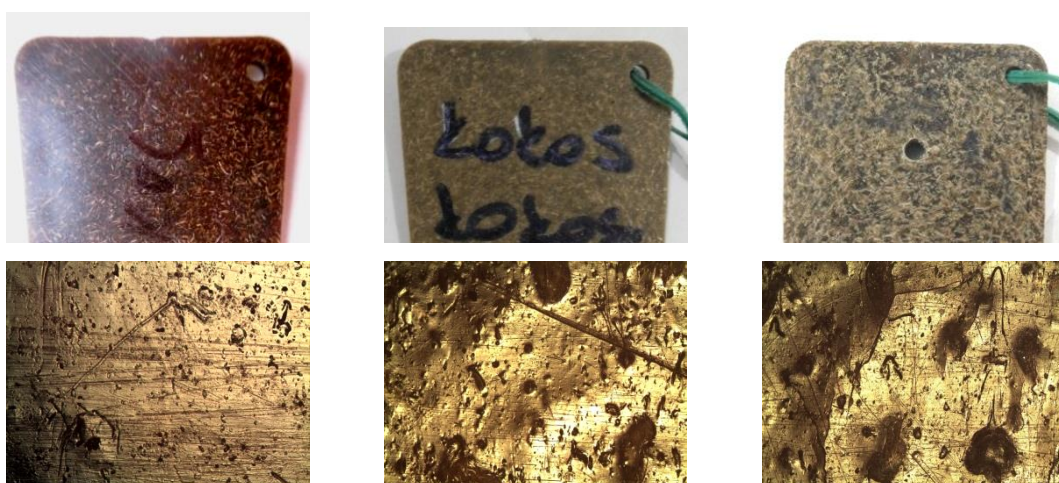
Obr. 13 Ramie - na začátku testu - vlevo, z kompostu - uprostřed, z roztoku - vpravo



Obr. 14 Konopí - na začátku testu - vlevo, z kompostu - uprostřed, z roztoku - vpravo



Obr. 15 Juta - na začátku testu - vlevo, z kompostu - uprostřed, z roztoku - vpravo



Obr. 16 Kokos - na začátku testu - vlevo, z kompostu - uprostřed, z roztoku - vpravo



Obr. 17 Bavlina - na začátku testu - vlevo, z kompostu - uprostřed, z roztoku – vpravo

5 Závěr

Cílem práce bylo hodnocení biodegradability PLA kompozitů s přírodními vláknennými plnivými v závislosti na použitém degradačním prostředí a typu použitých vláken. Na závěr experimentu bylo provedeno vyhodnocení. Z pozorování vyplývá toto:

1. Degradace vzorků v kompostu probíhá rychleji než v bakteriálních roztocích
2. Různé typy vláken jsou schopny ovlivnit rychlost degradace kompozitního materiálu (při použití stejné matrice)
3. Přírodní (nesimulovaná) degradace probíhá pomaleji, než laboratorní (simulovaná) degradace za srovnatelné období. Proto by bylo vhodné zvolit delší časový úsek, aby degradace měla šanci projevit se u všech zkoumaných vzorků ve větším měřítku

Biodegradabilní polymery jsou vzhledem k svým vlastnostem a vzhledem ke své podstatě výroby určitě krokem správným směrem, protože jejich vliv na environmentální aspekty je mnohem nižší, než u syntetických plastů. Proto zkoumání vlastností 100 % biodegradabilních kompozitů a jejich aplikací v průmyslu je velmi zajímavou oblastí nejenom v dnešní době, ale hlavně do budoucna.

Poděkování

Tento článek vznikl za podpory výzkumného projektu SGS 21005.

Literatura

- [1] LENFELD, P.: Technologie II - 2. část (Zpracování plastů). Technická univerzita v Liberci, 2006. ISBN 80-7372-037-X.
- [2] ZEMAN, L.: Vstříkování plastů. Nakladatelství BEN, 2009 ISBN 80-7300-026-1.
- [3] KROISOVÁ, D.: Biodegradovatelné polymery – úvod do problematiky. TU v Liberci, 2009. 78 s. ISBN 978-80-7372-468-9.
- [4] PETERA P., Studie vlastností biopolymeru HL 103 v souvislosti s fyzikálním stárnutím, Liberec, 2008, Diplomová práce, TU v Liberci.
- [5] FAŠNIOK J., Biologicky odbouratelné polymerní materiály. Liberec, 2010, Bakalářská práce, TU v Liberci.
- [6] Technomat: Nekomové materiály [online]. [cit. 3. 5. 2014]. Dostupný na <http://www.techno-mat.cz/kmt-nem/>
- [7] MELICHÁRKOVÁ P., Polymery s řízenou životností. Zlín, 2008, Bakalářská práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.

KONSTRUKCE ZÁKLADNÍHO ÚSTROJÍ PLSTÍCIHO STROJE

Ing. Michal Strnad

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,

Fakulta strojní, 1. ročník

Doktorský studijní program – Konstrukce strojů a zařízení

Abstrakt: Práce se zabývá problematikou konstrukčního návrhu nového ústrojí plstícího stroje na výrobu polotovarů klobouků z králičí srsti. Na základě provedené rešerše (není obsažena v textu) byly navrženy dva nové konstrukční návrhy plstícího ústrojí, které slouží jako funkční modely pro ověření a případnou optimalizaci plstící technologie. Oba návrhy sestávají z dvou řad pracovních válců řazených horizontálně za sebou, kdy jedna řada pracovních válců vždy vibruje na povrchu rouna. První návrh byl vytvořen pomocí navzájem propojených mechanismů poháněných dvěma asynchronními motory. Mechanismy umožňují optimalizaci změnou zdvihu pracovních válců, od kterých se odvíjí ostatní pohyby pracovních válců. Druhý návrh využívá servomotory s řídicími jednotkami, které umožňují rychlou změnu parametrů stroje. Oba nové návrhy vyhovují stanoveným požadavkům na plstící technologii, které byly získány z provedené rešerše dosavadních strojů.

Klíčová slova: plstění, valchování, rouno, klikový mechanismus, klikovahadlový mechanismus, pohon, servomotor, pohon,

1 Požadavky na základní ústrojí stroje

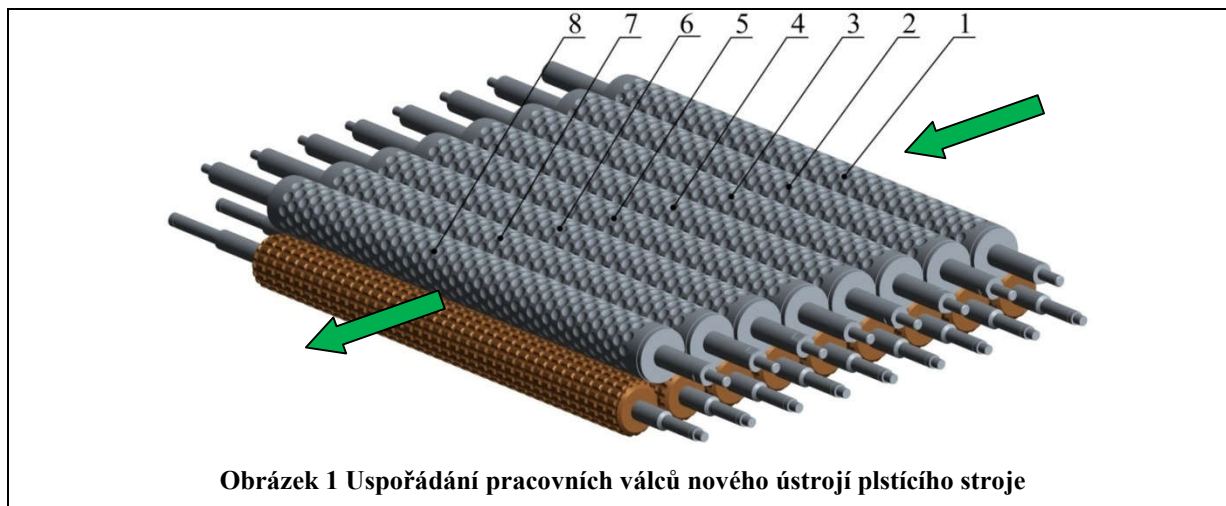
Z provedené rešerše bylo zjištěno, že náklady na provoz a údržbu stávajících plstících strojů jsou velké, vzniká požadavek na jejich minimalizaci. Vysoké náklady na údržbu jsou způsobeny výrazným opotřebáváním pryžových pracovních válců a jejich častější výměnou, než u strojů, které mají jednu řadu pracovních válců z nerezové oceli a druhou z Textitu. Tudíž je výhodné použít pro nové konstrukční řešení pracovní válců z nerezové oceli a Textitu. Další náklady na údržbu jsou způsobeny opotřebáváním převodů, které vzniká jejich nedokonalým mazáním a vyplavováním mazacího tuku při oplachování stroje. Z hlediska údržby je výhodnější, pokud jsou převody alespoň částečně zakryty. Dále bylo zjištěno, že valchovací proces je intenzivnější na stroji s nekonstantními otáčkami horních pracovních válců. Nabízí se možnost regulace jednotlivých pohybů pracovních válců (nekonstantní složka otáček horních pracovních válců a velikost axiálního pohybu) což může mít za následek zrychlení a zkvalitnění valchovacího procesu.

Požadavky na nové konstrukční ústrojí se dají realizovat těmito metodami:

- vačkové mechanismy,
- klikové mechanismy,
- spojením klikových mechanismů s klikovahadlovým mechanismem,
- nahrazením mechanismů lineárními nebo rotačními servomotory.

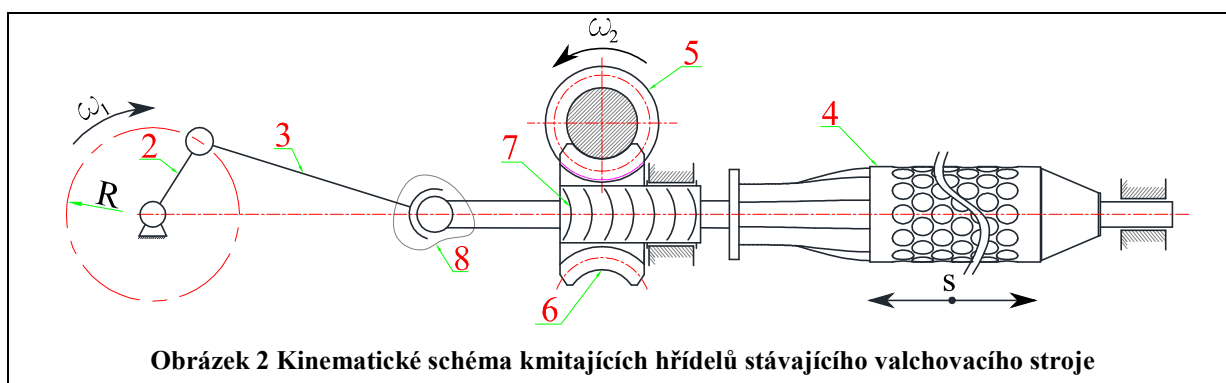
1.1 Pracovní válce nového základního ústrojí plstíciho stroje

Na obrázku 1 je zobrazeno uspořádání pracovních válců, které vychází z provedené rešerše. Horních pracovních válců (nerezových) je celkem 8 a spodních (Textitových) je 9. Zelená šipka naznačuje průchod roun strojem. Naváděcí horní pracovní válec 1 se axiálně nepohybuje a rotuje pouze s konstantními otáčkami. Válce 2 až 6 axiálně kmitají s navzájem posunutou fází 180°. To znamená, pokud se válec 2, 4 a 6 axiálně pohybuje jedním směrem, válce 3 a 5 konají opačný pohyb. Válce 7 a 8 mají fáze také navzájem posunuty o 180°, ale fáze válce 7 je posunuta o 90° vůči válci 6. Válce 2 až 6 mají nekonstantní otáčky.



Obrázek 1 Uspořádání pracovních válců nového ústrojí plstíciho stroje

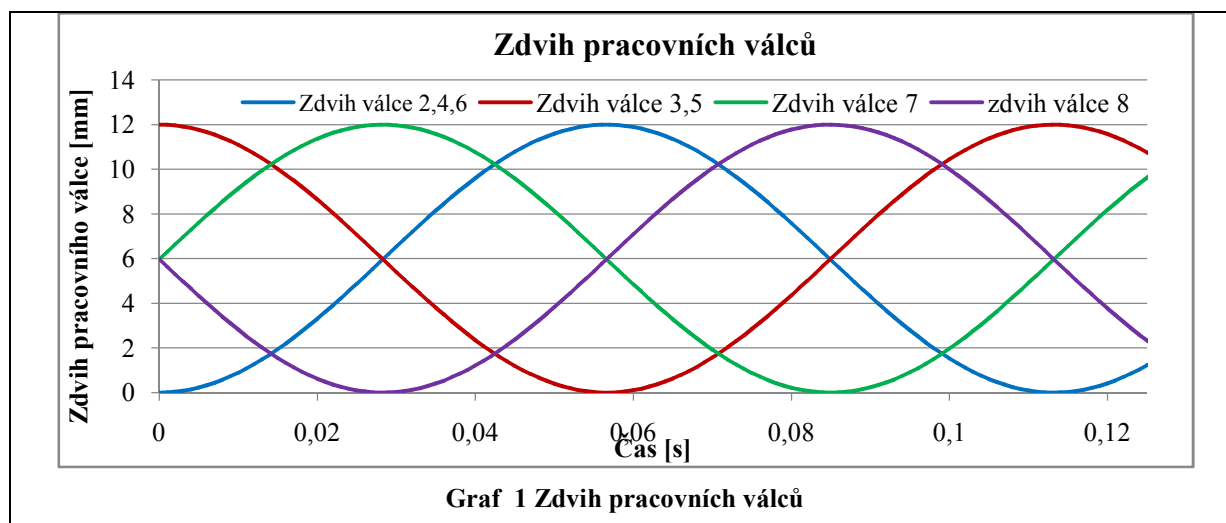
Na obrázku 2 je znázorněno kinematické schéma horních pracovních válců stávajícího valchovacího stroje. Lze si všimnout klikového mechanismu složeného z kliky 2, ojnice 3, a přes kulový čep 8 je napojen pracovní válec (křížák) 4. Rotační pohyb horních pracovních válců zajišťuje šnekové soukolí 5 a 6. K docílení nekonstantních otáček horních pracovních válců je do mechanismu přidána šroubová vazba 7, která při posouvání válce 4 s ním zároveň otáčí. Šroubová vazba je u stávajících strojů řešena čelním ozubením se šikmými zuby. Ocelový pastorek připevněný na hřídel pracovního válce se při pohybu klikového mechanismu zasouvá do bronzového pouzdra šnekového kola s vnitřním šikmým ozubením stejného typu.



Obrázek 2 Kinematické schéma kmitajících hřídelů stávajícího valchovacího stroje

1.1.1 Axiální pohyb horních pracovních válců

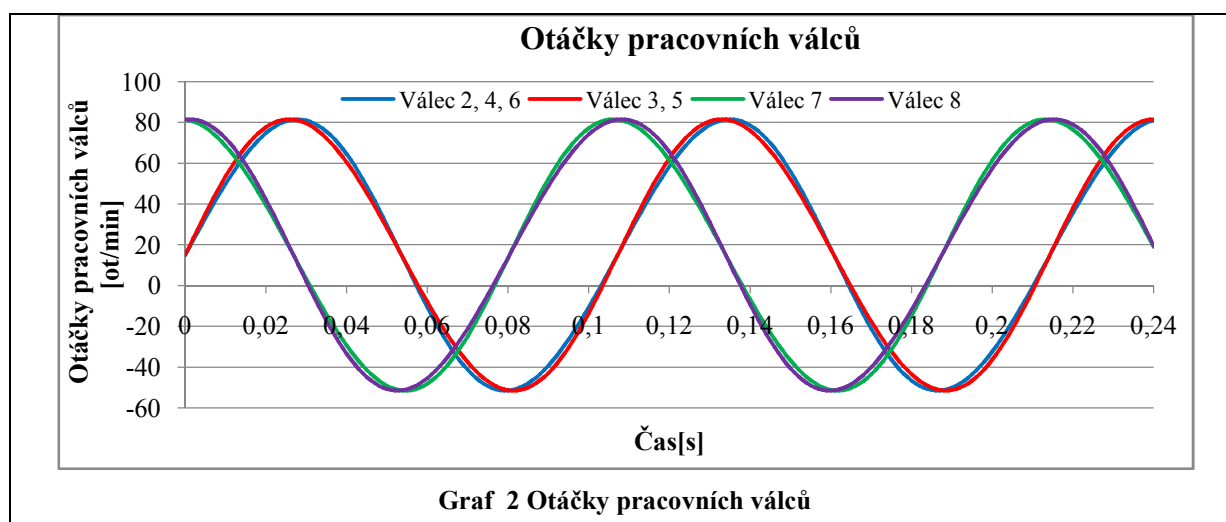
V grafu **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** je znázorněn průběh axiálních zdvihů pracovních válců v závislosti na čase, který byl odvozen z kinematiky stávajícího valchovacího stroje. Otáčky stroje jsou 530 ot/min to odpovídá frekvenci kmitů 8,83 $1/s$. délka jedné periody je 0,113 s.



1.1.2 Rotační pohyb pracovních válců

Šroubová vazba (obrázek 2) způsobuje nekonstantní úhlovou rychlost horních pracovních válců při axiálním posuvu. Výsledná úhlová rychlost horních pracovních válců se skládá ze dvou dílčích úhlových rychlostí. Z jedné konstantní složky vlivem šnekového převodu a nekonstantní složky vlivem šroubové vazby. Obě složky úhlových rychlostí se sčítají.

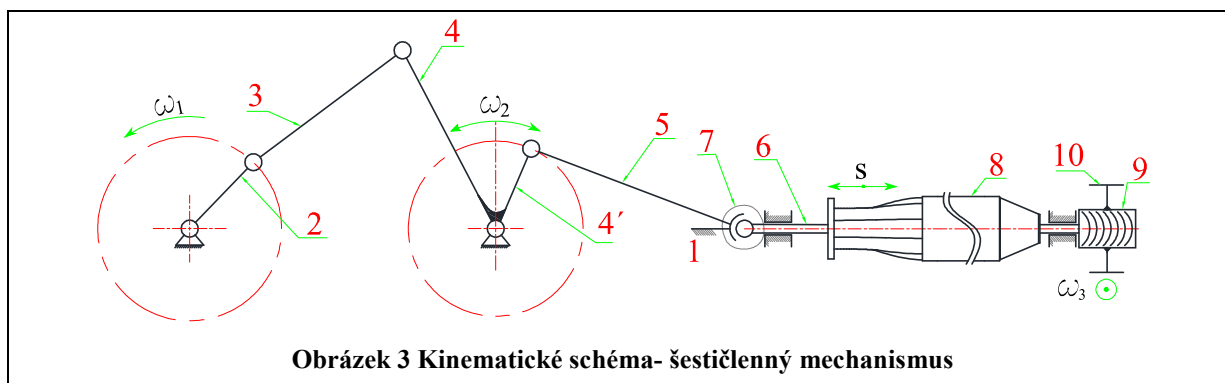
V grafu 2 jsou znázorněny výsledné otáčky horních pracovních válců, které je nutné dodržet při návrhu nového valchovacího stroje. Z grafu je patrné, že pracovní válce mění v průběhu valchování smysl otáčení a otáčky jsou opačné oproti spodním pracovním válcům. To má za následek intenzivnější valchování. Konstantní složka otáčení horních pracovních válců je 15 *ot/min*.



2 Návrh základního ústrojí valchovacího – Mechanický způsob

Mechanickým řešením se obecně myslí využití mechanismů pro axiální zdvih a rotaci pracovních válců bez využití programovatelných servomechanismů. U mechanického

způsobu řešení základního plastického ústrojí byly použity dva asynchronní motory. První pohon pro axiální zdvih pracovních válců a druhý pohon na jejich rotaci.



Obrázek 3 Kinematické schéma- šestičlenný mechanismus

Kinematické schéma návrhu valchovacího ústrojí je založeno na šestičlenném mechanismu, který je složený z KVM spojeným s KM (obr. 3). Šestičlenný mechanismus dovoluje jednoduše měnit velikost axiálního zdvihu válce 8 změnou délky kliky 2. Klika KVM 2 se otáčí s konstantní úhlovou rychlostí ω_1 a přivádí pomocí ojnice 3 rotační pohyb na kývavý vratný pohyb vahadla 4. Vahadlo 4 je pevně spojeno s klikou 4' KM a transformuje kývavý vratný pohyb prostřednictvím ojnice 5, na posuvný vratný pohyb horního pracovního válce 8. Na pravé straně mechanismu je umístěna šroubová vazba 9 pevně spojená s ozubeným kolem 10, které s pracovním válcem otáčí.

Výhody:

- možnost regulace axiálního zdvihu pracovních válců,
- fázové pootočení pracovních válců o 180° ,
- při použití vhodných ložisek se KVM a KM nemusejí mazat,
- možnost vysokých otáček stroje.

Nevýhody:

- šroubová vazba se musí mazat,
- nelze regulovat nekonstantní složku otáček horních pracovních válců,
- nelze fázi pracovních válců vůči sobě pootočit jinak, než o 180° - nutno řešit přídatným mechanismem.

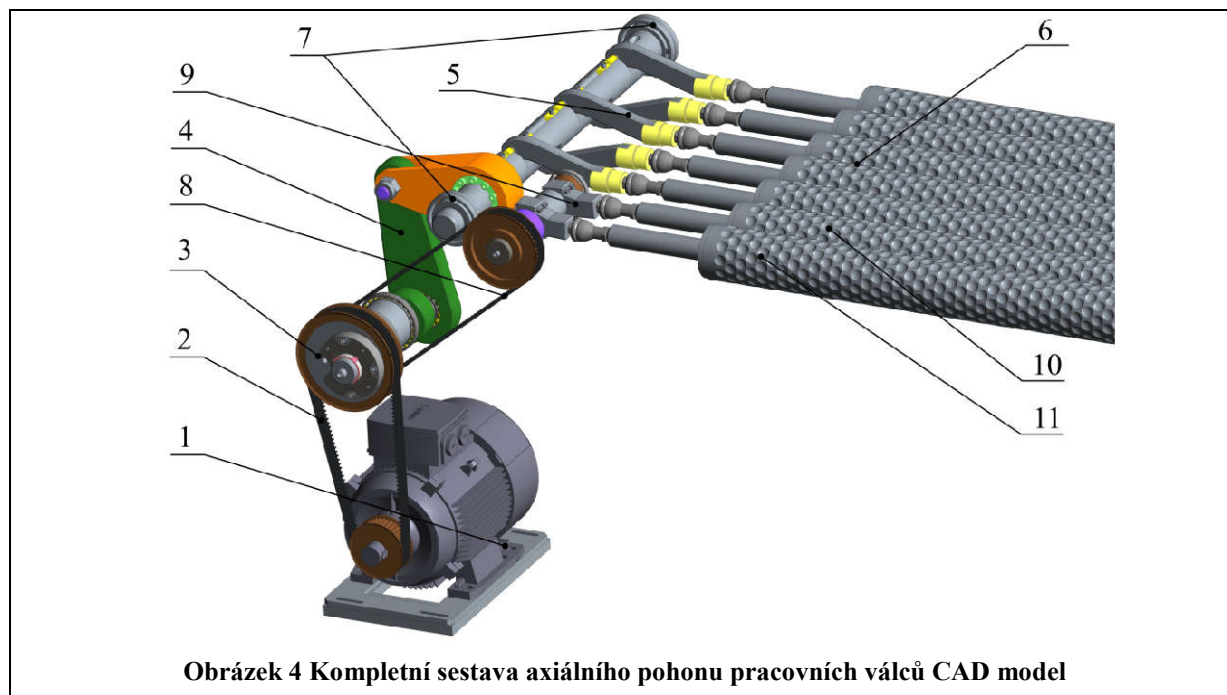
2.1 Řešení základního ústrojí

Šestičlenný mechanismus pro axiální zdvih sestává z KVM a KM. Délky jednotlivých členů mechanismů byly navrženy tak, aby splňovaly požadovaný zdvih. Proto byla provedena nejdříve syntéza KM, aby se zjistily délky kliky KM a její natočení. Natočení kliky KM bylo výchozí hodnotou při návrhu čtyřkloubového KVM. Syntézy mechanismů (KVM a KM) byly provedeny pro axiální zdvih pracovních válců $s = 14 \text{ mm}$. [1]

2.1.1 Návrh modelu valchovacího ústrojí – axiální zdvih

Varianta s šestičlenným mechanismem dovoluje měnit fázi pootočení pracovních válců pouze o 180° . Jiný fázový posuv je sice možný, ale takové pracovní válce nemají požadovaný zdvih ($\pm 7 \text{ mm}$). Proto pro výstupní válce stroje (7 a 8) byl navrhnout druhý mechanismus, který je klikový a změna velikosti zdvihu reprezentuje výměnu kliky. V novém ústrojí sice mohou být dva šestičlenné mechanismy s klikami vůči sobě pootočenými o 90° , ale takové řešení je nákladnější na výrobu a zástavbový prostor. KVM s regulací axiálního

zdvihu, na který je napojen KM, je výrobně složitější, než pouze krátký KM s různými rozměry kliky, která je jen dvakrát lomená.

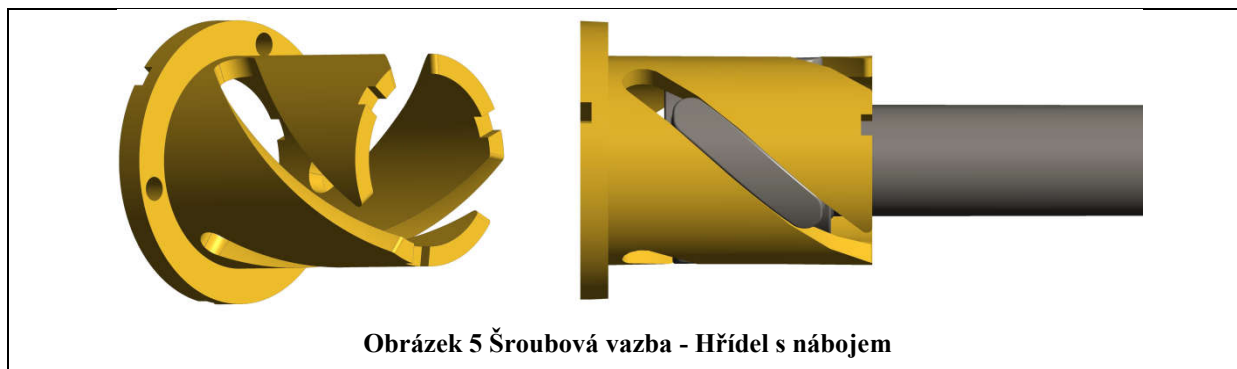


Obrázek 4 Kompletní sestava axiálního pohonu pracovních válců CAD model

Na obrázku 4 je zobrazen CAD model axiálního rozvádění první skupiny horních pracovních válců. Asynchronní 3fázový motor 1 přes řemenový převod 2 pohání nastavitelný excentr 3 klikovahadlového mechanismu 4, na který je napojena skupina klikových mechanismů 5 s pěti pracovními válci 6. Kliková hřídel klikového mechanismu je uložena ve dvou naklápěcích kuličkových ložiscích 7. Naklápěcí kuličková ložiska mají dvě řady kuliček zajišťující velkou únosnost a umožňují vyrovnávat nesouosost způsobenou průhybem klikové hřídele od působících vnějších sil a nesouosými náboji v rámu. Přes druhý řemenový převod 8 je na excentr napojený klikový mechanismus 9 s dvěma výstupními válci (10 a 11). Ozubený řemen je při správně nastaveném předpětí synchronní a nedochází při zátěži k prokluzu mezi řemenem a řemenicí. To je v této aplikaci výhodné, protože při nastavení fázového posuvu 90° mezi válcem 10 a 10 nebude docházet v průběhu valchování k rozfázování.

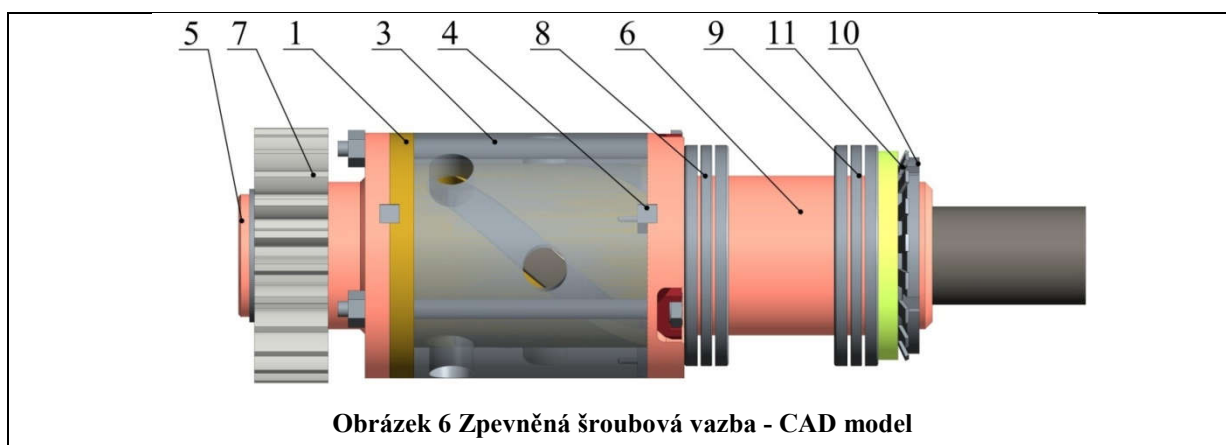
2.1.2 Návrh modelu valchovacího ústrojí – Rotační pohyb pracovních válců

Šroubová vazba stávajícího stroje, která mění otáčky pracovních válců, je realizována pomocí ozubeného soukolí se šikmými zuby. Tyto ozubená kola byla vyrobena sléváním a následně upravena do finální podoby. Jádro odlitku bylo ozubené kolo se šikmými zuby. Šroubová vazba přepracována s ohledem na jednodušší a levnější výrobu. Obrázek 5 zobrazuje drážkovaný náboj, ve kterém je vsazena hřídel. Pokud se hřídel šroubové vazby posouvá a drážkovaný náboj je zastaven, hřídel se otáčí. Jestliže se drážkovaný náboj otáčí, přičítá se úhlová rychlost náboje k úhlové rychlosti hřídele. Tato sestava splňuje zadané požadavky z hlediska úhlového natočení a úhlové rychlosti. Pevnost takto vytvořené šroubové vazby je nevyhovující, z toho důvodu byly provedeny úpravy a zpevnění tak, aby náboj vydržel náročný provoz. Samotný drážkový náboj z bronzu nemá dostatečnou pevnost a při působení krouticího momentu od pracovního válce se mohou volné konce pružně, nebo trvale deformovat a ovlivňovat pracovní proces.



Obrázek 5 Šroubová vazba - Hřídel s nábojem

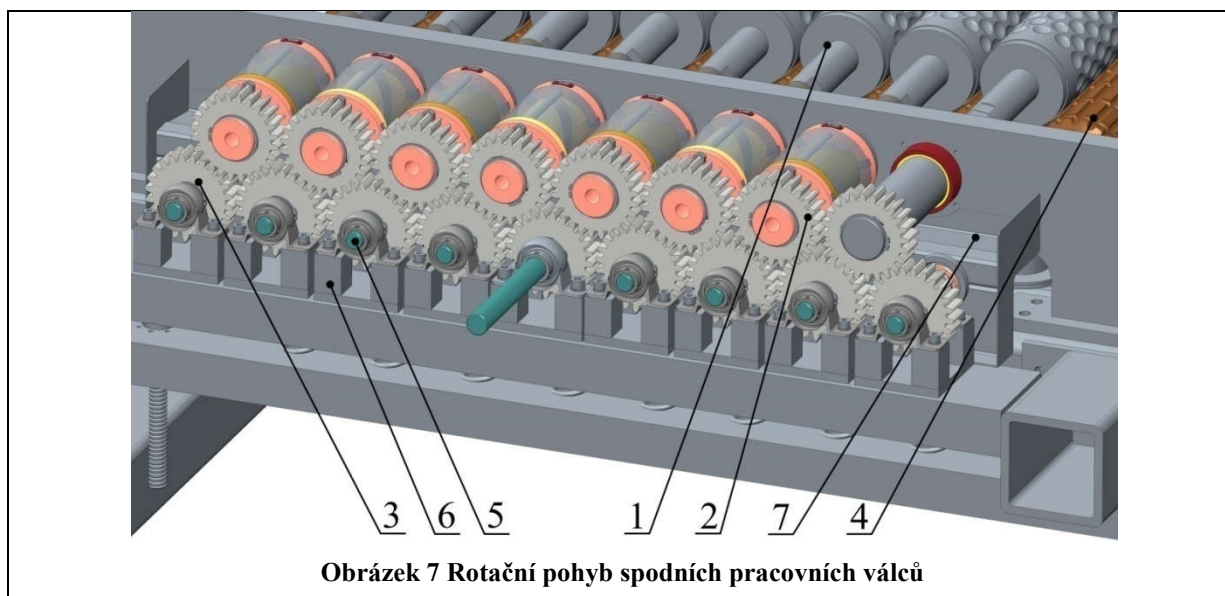
Na obrázku 6 je zobrazena již zpevněná šroubová vazba. Přes náboj šroubové vazby 1 je převlečena objímka 3. Objímka má po obvodu šest otvorů, které leží v místech drážek drážkovaného náboje. Otvory slouží pro mazání šroubové vazby olejem. Na jedné straně objímky 3 jsou vyfrézovány tři drážky, do kterých jsou přišroubovány klínky 4. Klínky 4, jež drží volné konce drážkovaného náboje 1 a zabraňují tak jejich deformaci. Celá sestava je stažena dvěma čely (5 a 6). Pravé čelo 6 je vyrobeno z kluzného bronzu a je uloženo do rámu stroje, kde se může volně otáčet. Na levém čele 5 je nasazeno ozubené kolo 7, kterým je celá sestava poháněna. Dvě axiální ložiska (8 a 9) zachytávají dynamické síly od šroubové vazby při axiálním posuvu. Ložiska jsou stažena do rámu pojistnou maticí 10 s MB podložkou 11.



Obrázek 6 Zpevněná šroubová vazba - CAD model

2.1.2.1 Rotace spodních i horních pracovních válců

Na obrázku 7 je zobrazen model návrhu rotačního pohonu všech pracovních válců. Horní nerezové pracovní válce 1 mají na výstupních hřídelích našroubovány šroubové vazby s ozubenými koly 2. Ozubená kola šroubových vazeb jsou vždy v záběru se dvěma ozubenými koly spodních válců 3. Uspořádání umožňuje horní řadě pracovních válců otáčet se s opačným smyslem otáčení, než má spodní řada pracovních válců. Hřídele ozubených kol spodních válců 5 jsou uloženy v ložiskových domcích 6 a přes kloubovou spojku připojena na spodní pracovní válec 4. Celá soustava ozubených kol je hnaná šnekovou převodovkou, která je napojená na hřídel 5. Šneková převodovka z důvodu přehlednosti není v modelu zobrazena. Šroubová vazba 2 musí být pro správný chod mazána, jinak bude docházet k značnému odírání ložiskového bronzu náboje šroubové vazby a výraznému zvětšování vůle. Mazací olej se nesmí z důvodu narušení technologie plstění dostat na pracovní válce, proto je pod šroubovými vazbami olejová vana 7, která zachytává odkapávající olej ze šroubových vazeb 2 a přivádí ho zpět do čerpadla.



3 Řešení základního plstícího ústrojí mechatronicky

Mechatronické řešení plstícího ústrojí má snahu nahradit jednotlivé mechanismy servomotory tak, aby se zjednodušila konstrukce a ústrojí mohlo, pokud je to možné, být variabilnější. Servomotor je regulační pohon sestávající z elektrického motoru, napájecího výkonového měniče a řídicích a regulačních obvodů. Zatímco běžný elektrický pohon pracuje v otevřené smyčce, tj. bez zpětné vazby, servomotor je vždy zapojen v uzavřené regulační smyčce se zpětnou rychlostní a většinou i polohovou vazbou. Dimenzování servomotorů vychází z výpočtu statických a dynamických momentů a jeho cílem je určit správnou velikost servomotorů, případně dané převodovky a k nim příslušné výkonové měniče [2]. Firem, nabízející servomotory je velké množství, ale ne všechny nabízejí servomotory do prostředí s výpary kyseliny sírové. Ze všech firem, které na českém trhu působí v oblasti servomotorů, byla vybrána firma Kollmorgen, která nabízí omyvatelné servomotory odolné v kyselých a zásaditých prostředí s hodnotou pH 2-12. Další firma, která na českém trhu nabízí takto odolné servomotory, je firma Harmonic Drive. Tato firma bohužel nemá odolné motory v katalogové nabídce, ale pouze na objednávku provádí dodatečné úpravy konstrukce a těsnění tak, aby motor vydržel náročné podmínky. Cena pohonů firmy Harmonic Drive a jejich úprav je relativně vysoká a překračuje cenu servomotorů firmy Kollmorgen.

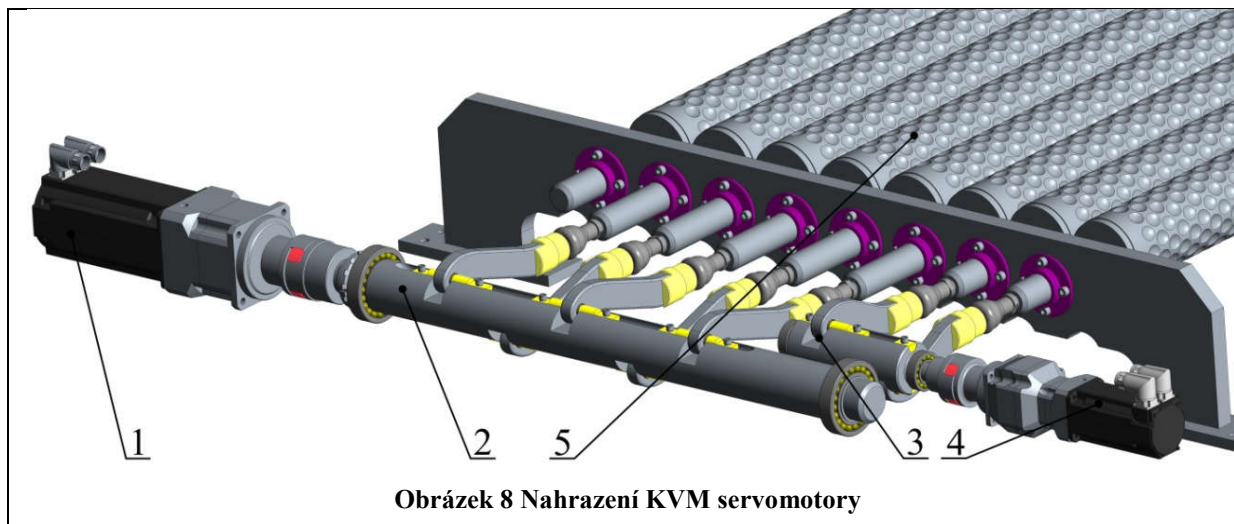
3.1 Nahrazení mechanismů základního plstícího ústrojí servomotory

Jelikož základní plstící ústrojí, řešené mechanickým způsobem v předešlé části není příliš nastavitelné, jeví se využití servomotorů ideální pro zdokonalení technologie valchování na víceválcových strojích. U mechanicky řešeného ústrojí lze měnit axiální zdvih pracovních válců, od kterého se odvíjí nekonstantní otáčky pracovních válců a rychlost otáčení spodních pracovních válců. Náhradou KVM a šroubové vazby u horních pracovních válců servomotory lze měnit rychlosti otáčení horních pracovních válců a velikost zdvihu pracovních válců.

3.1.1 Nahrazení klikovahadlového a klikového mechanismu servomotory

Nahrazení celého šestičlenného mechanismu a klikového mechanismu horních pracovních válců tak, aby se každý válec mohl samostatně axiálně pohybovat, by reprezentovalo sedm přímých servomotorů, nebo sedm rotačních servomotorů s mechanismem transformující rotační pohyb na přímočarý. Tato varianta by byla velmi

nákladná a z hlediska konstrukce a programování složitá. Jako jednodušší se nabízí odstranit pouze KVM a ponechat dva KM. Na obrázku 8 lze vidět nahrazení KVM servomotorem s planetovou převodovkou 1, který je napojen přímo na KM prvních pěti pracovních válců 2, a druhý KM 3 se servomotorem a planetovou převodovkou 4, který je založen na stejném principu, jen ve variantě pro dva pracovní válce 5.



Obrázek 8 Nahrazení KVM servomotory

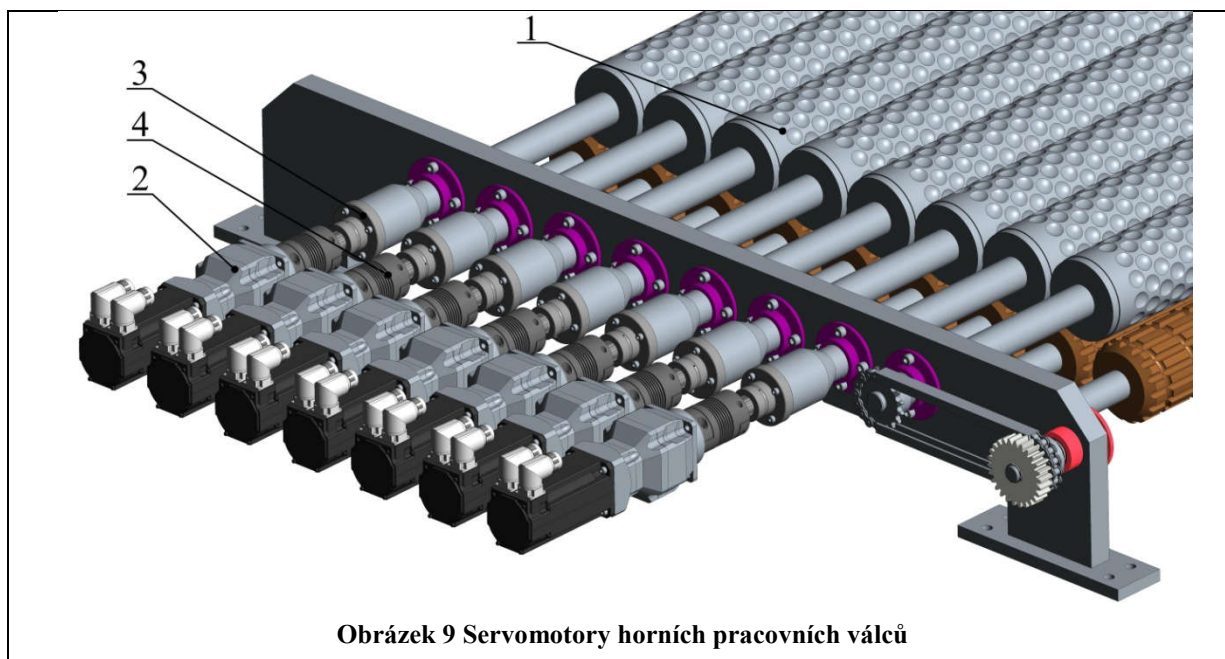
3.1.1.1 Dimenzování servomotorů pro rozkmit pracovních válců

Při návrhu servomotoru je nutné znát momenty setrvačnosti pohybujících se objektů, předepsané zrychlení a celkový pracovní režim, ve kterém bude servomotor pracovat. Od těchto hodnot se odvíjí parametry servomotorů a převodovek. Dle provedených výpočtů byl zvolen servomotor *Kollmorgen - AKM 54G - 3x400V* s planetovou převodovkou *APEX AE120 $i=10$* pro rozkmit pěti pracovních válců. Pro rozkmit dvou pracovních válců byl zvolen servomotor *Kollmorgen AKM 32D 3x400V* s převodovkou *APEX AF075* s převodovým poměrem $i = 25$. [3] a [4]

3.1.2 Nahrazení šroubové vazby servomotorem

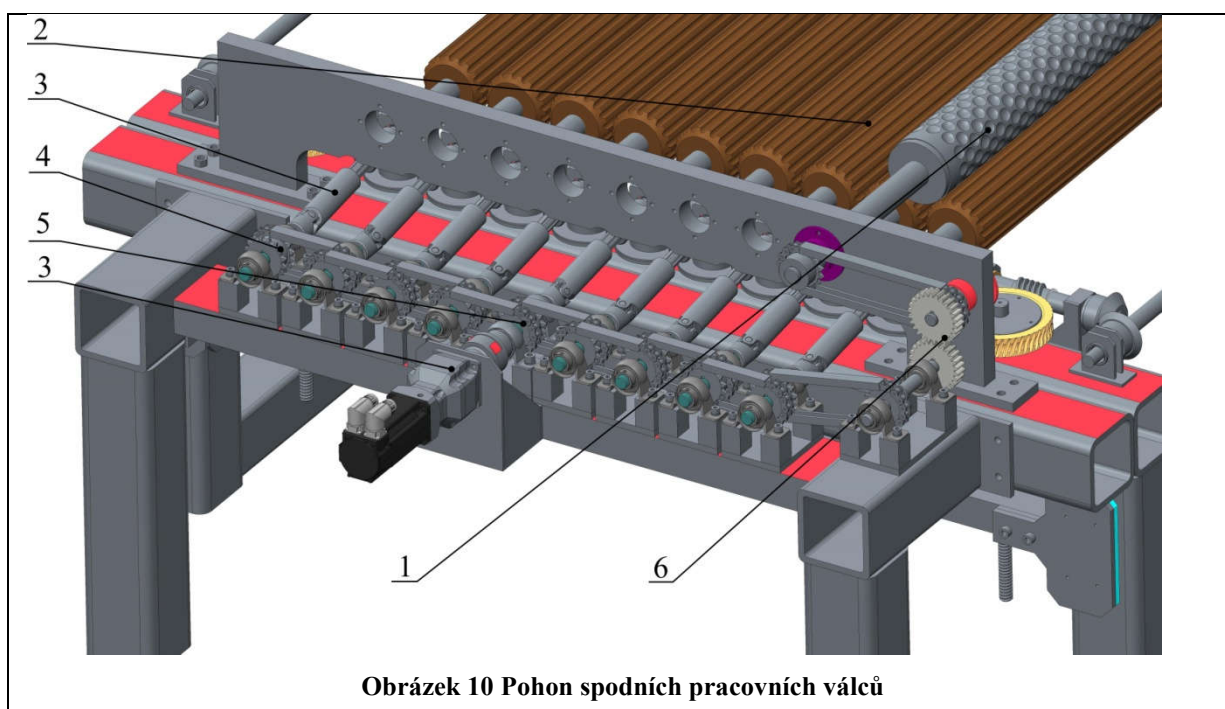
Šroubová vazba použitá v mechanické variantě byla nejsložitějším článkem celé sestavy, proto nahrazením servomotorem lze zjednodušit konstrukční řešení. Další výhodou nahrazení je možnost libovolné regulace otáček každého pracovního válce zvlášť, což ve variantě řešené mechanicky není možné. Nahrazení bylo provedeno pro sedm horních pracovních válců, které mají nekonstantní otáčky. První (naváděcí) pracovní válec s konstantní otáčkou nebyl nahrazen servomotorem, ale je poháněn od spodních pracovních válců.

Na obrázku 9 jsou zobrazeny horní pracovní válce 1 s napojenými pohony 2. Aby bylo umožněno rotačně pohánět pracovní válce a zároveň s nimi axiálně posouvat, jsou mezi pohony a pracovní válce vloženy speciální drážkované vodící hřídele s maticemi s kuličkovým vedením 3. Drážkované vodící hřídele jsou schopny přenášet krouticí moment během axiálního pohybu matice. Matice je pevně spojena s pracovním válcem prostřednictvím čtyř šroubů, se kterým se axiálně posouvá. Pro zajištění bezvúlového chodu a odolávání rázům jsou matice uloženy na drážkovaných hřídelích s malým předpětím [5]. Rotační vodící vedení THK-LBR25 je dodáváno firmou Hennlich. Spojení drážkované hřídele a výstupní hřídele převodovky servomotoru je prostřednictvím vlnovcové spojky 4, která umožňuje spojit dvě nesouosé hřídele.



3.1.3 Pohon spodních pracovních válců

Spodní pracovní válce konají pouze rotační pohyb s konstantními otáčkami. Všechny spodní válce a vstupní horní válec jsou poháněny jedním servomotorem s planetovou převodovkou. Princip vzájemného propojení spodních pracovních válců je znázorněn na obrázku 10. Spodní pracovní válce 2 jsou přes kloubové hřídele 3 napojeny na hřídele s ozubenými řetězovými koly 4. Servomotor s planetovou převodovkou a pružnou spojkou 3 pohání hřídel s dvouřadým řetězovým kolem 5, od kterého jsou pomocí řetězových převodů hnány ostatní spodní pracovní válce. Horní vstupní pracovní válec 1 má opačný smysl otáčení, než spodní válce, proto je do převodu zařazeno ozubené soukolí 6, které mění smysl otáčení.



4 Závěr

Cílem této práce byl rozbor problematiky plstícího stroje a návrh vhodného mechanismu pro pohon pracovních válců stroje. Celkem byly zpracovány čtyři návrhy nového ústrojí. Po zhodnocení výhod a nevýhod jednotlivých návrhů se z důvodu nepříliš vhodné konstrukce upustilo od dvou řešení. Zbývající dva návrhy byly podrobně zpracovány. U prvního řešení (mechanického) bylo v návrhu využito spřažení klikovahadlového a klikových mechanismů k realizaci axiálních zdvihů pracovních válců. Řešení využívá dva asynchronní motory pro axiální a rotační pohyby pracovních válců. V této variantě ústrojí byl využit princip přídavné šroubové vazby, která zajišťuje nekonstantní otáčky horních pracovních válců. Nekonstantní otáčky mají pozitivní vliv na dobu plstění. Výhodou mechanického řešení je provoz s menší náročností na údržbu, než u stávajících strojů.

U druhého řešení (mechatronického) byla provedena náhrada mechanismů servomotory. Tato varianta byla celkově zjednodušena oproti prvnímu řešení. Hlavní zjednodušení spočívá v použití servomotorů pro nahrazení klikovahadlového mechanismu, který umožňuje změnu axiálního zdvihu pracovních válců, spolu s přídavnou šroubovou vazbou. Nezanedbatelnou předností mechatronického řešení je možnost nezávislé regulace jednotlivých funkčních celků pomocí jednoduché změny parametrů řídicí jednotky a tím optimalizovat plstící proces. Jako nevýhodu lze považovat nutnost vyšších nároků na odolnost servomotorů a řízení vůči agresivnímu kyselému prostředí. Pro obě varianty řešení byly navrženy ideové koncepty rámu. Další velkou výhodou řešení je provoz s minimální údržbou.

Obě varianty jsou ve své podstatě srovnatelné. Jedno z možných doporučení je realizace mechatronické varianty pro výrobu prototypu, na kterém bude provedena optimalizace parametrů plstícího procesu. Následně dle výsledků vyrobit stroj s vhodně nastavenými parametry pracovních pohybů mechanické varianty.

5 Literatura

- [1] CHARVÁT J., Mechanika II - Teorie mechanismů, Skripta VŠST, Liberec 1980
- [2] SKALICKÝ J, CSc prof. Ing. Elektrické servopohony,. Vysoké učení technické v Brně - Fakulta mechatroniky a komunikačních technologií
- [3] CHARVÁT J, CSc. doc. Ing. Mechanika II (Dynamika) - - Vysoká škola strojní a textilní v Liberci -1982 Číslo publikace - 55-821-81
- [4] ČERNOCH, strojně technická příručka 13. vydání SNTL Nakladatelství technické literatury Praha 1977, L13-E1-IV-51/22355
- [5] Online katalog – Rotační vodící vedení Hennlich - <https://www.hennlich.cz/produkty/linearni-vedeni-valiva-motory-a-pohony-drazkovane-vodici-hridle-rotacni-vodici-vedeni-3005/typ-ltrltr-a.html> (22.5.2015)

VLIV TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ A VYSOKOTEPLTNÍ DEFORMACE NA STRUKTURU A KOEFICIENT TEPLTNÍ ROZTAŽNOSTI ALUMINIDŮ ŽELEZA LEGOVANÝCH NIOBEM

Švec Martin

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,
Fakulta strojní, 4. ročník
Doktorský studijní program – STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

Abstrakt: Aluminidy železa se řadí do skupiny intermetalických materiálů a vyznačují se celou řadou výhodných vlastností – např. odolností proti vysokoteplotní korozi nebo dobrou vysokoteplotní pevností. Vedle těchto pozitivních vlastností mají však také některá negativa – jako např. strmý pokles pevnosti při teplotách nad 600°C nebo zvýšenou křehkost při pokojových teplotách. Jednou z možností, jak uvedené nevýhody potlačit, je legování binární slitiny dalšími prvky.

V rámci práce byla studována struktura a fázové složení materiálu legovaného vyšším obsahem niobu. Slitina byla zkoumána v základním litém stavu a poté ve stavech po žihání při 1000°C po dobu 50ti hodin a při 1200°C po dobu 24ti hodin. Materiály v litém stavu a ve stavu po tepelném zpracování 1000°C/50h měly strukturu tvořenou maticí a hustou eutektickou sítí, u vzorku vyžihaného 1200°C/24h eutektická síť zanikla a byla nahrazena jednotlivými hrubnouchými precipitáty. Struktura v litém stavu byla dvoufázová, v případě žiháných vzorků čtyřfázová.

Studium vlivu vysokoteplotní deformace na strukturu ukázalo, že při deformaci při 600°C dochází ke zpevňování materiálu a rekrytalizace neprobíhá. Při 800°C jsou zpevňující a odpevňující pochody v rovnováze, rekrytalizace probíhá přednostně v matici materiálu mimo eutektické oblasti.

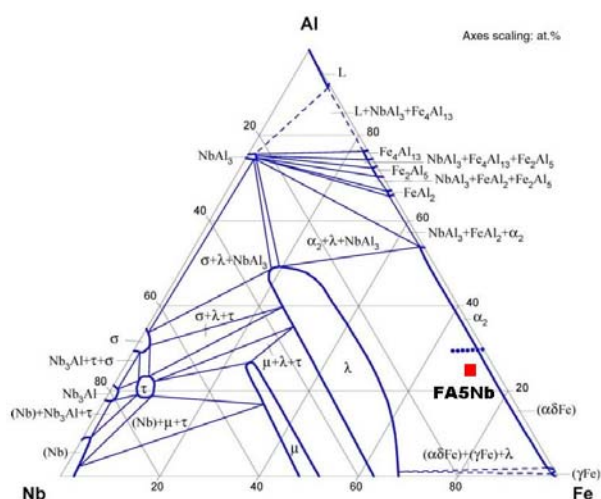
Klíčová slova: aluminidy železa typu Fe₃Al, legování niobem, struktura, koeficient teplotní roztažnosti, EBSD

1 Úvod

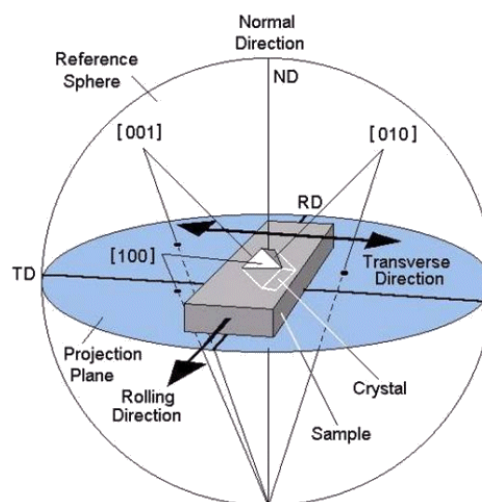
Slitiny železa a hliníku vytvářejí při některých poměrech atomových koncentrací přítomných prvků fáze se specifickými vlastnostmi. Tyto fáze, označované jako intermetalické, se vyznačují uspořádáním na dlouhé vzdálenosti, mají krystalografickou strukturu odlišnou od základních kovů a pouhou interpolací nelze jejich vlastnosti předpovědět. Mají přesné chemické složení, kterým jsou charakterizovány, jejich atomy jsou v krystalové mřížce pravidelně uspořádány a v dokonalé formě bez vad v mřížce mohou existovat pouze ve svém stechiometrickém poměru [1, 2].

Aluminidy železa se vyznačují širokou škálou užitných vlastností, které je předurčují jako možnou náhradu za vysoce legované ocele typu P91 a P92. Jedná se zejména o dobrou pevnost až do 600°C, výbornou korozní odolnost, nižší měrnou hmotnost v porovnání se stejně korozně odolnými ocelmi a v neposlední řadě o nízkou cenu vstupních surovin. Tento materiál má však také svá negativa – strmý pokles pevnosti při teplotách nad 600°C nebo nízkou tvárnost při pokojových teplotách, která zatím brání jeho hojnějšímu rozšíření v průmyslových aplikacích [1-3]. Jednou z možných cest, jak negativní vlastnosti aluminidů železa potlačit, je legování binární slitiny vhodnými prvky [4,5]. Předchozí výzkumy ukázaly, že vhodnou legurou může být tantal, zirkonium nebo niob [6-11].

Na obrázku 1 je zachycen rovnovážný ternární diagram Fe – Al – Nb při 1000°C s vyznačeným složením studovaných slitin. Z diagramu je patrné, že oblast tvorby stabilní zpevňující fáze λ (označované jako Lavesova fáze) existuje v širokém rozmezí koncentrací hliníku a niobu. Ve struktuře se však mohou vyskytnout také některé metastabilní fáze [12].



Obrázek 1: Řez ternárním diagramem Fe – Al – Nb při 1000°C s vyznačeným složením studovaných vzorků [6].



Obrázek 2: Princip stereografické projekce krystalografických směrů zrn materiálu a vznik pólových obrazců při měření pomocí EBSD [13].

Jednou z nejdůležitějších charakteristik aluminidů železa je jejich vysokoteplotní mez kluzu a pevnosti. Po tlakovém či tahovém namáhání za vysokých teplot však dochází ke změně struktury, která může ovlivnit další chování materiálu. Stav struktury a vnitřní napjatost materiálu po deformaci, které umožňují získat představu o pochodech probíhajících v materiálu během jeho namáhání, je možné studovat prostřednictvím pólových obrazců (PF) a inverzních pólových map (IPF) pořízených pomocí EBSD. Pólové obrazce slouží ke znázornění orientace vybraných os krystalů, a tím k určení krystalografické textury materiálu. Jedná se o stereografickou projekci krystalografických směrů zrn materiálu. Princip této projekce je zachycen na obrázku 2. Nevykazuje-li materiál texturu, osy krystalů jsou orientovány náhodně, oproti tomu v materiálu s texturou převládá některý z krystalografických směrů [13].

Před vlastní konstrukcí strojní součásti zhotovené z nového typu materiálu je třeba vedle vysokoteplotních mechanických vlastností znát také koeficient teplotní roztažnosti (CTE) daného materiálu. Znalost CTE je nezbytná pro správné nadimenzování strojních sestav. Existuje celá řada metod měření teplotní roztažnosti, dělících se do dvou základních skupin – na metody měření absolutní a relativní. Z absolutních metod měření dilatace jsou nejvyužívanější metoda měření přímá, rentgenografická metoda a interferenční metoda. Mezi relativní metody určování dilatace se řadí trubková metoda, interferenční a tensometrická metoda [14, 15]. Pro určení středního koeficientu lineární teplotní roztažnosti α_{med} (CTE) lze využít vztah (1) :

$$\alpha_{med} = \frac{l_T - l_0}{T - T_0} \cdot \frac{1}{l_0} \quad (1)$$

kde l_T – délka vzorku při dané teplotě
 l_0 – délka vzorku při pokojové teplotě (20°C)
 T – daná aplikovaná teplota
 T_0 – pokojová teplota (20°C)

2 Experimentální metody

Studované slitiny byly připraveny vakuovou indukční tavbou. Nominální chemické složení a značení jednotlivých vzorků je uvedeno v tabulce 1. Struktura byla studována skenovacím elektronovým mikroskopem (SEM) Tescan Vega XMU, vybaveným detektorem Bruker pro energiově – disperzní analýzu (EDX), a elektronovým mikroskopem Zeiss Ultra Plus vybaveným detektorem Oxford X-Max20 pro EDX. Fázová identifikace byla provedena pomocí EBSD Oxford NordlysNano na SEM Zeiss Ultra Plus. EBSD měření probíhalo při urychlovacím napětí 20 kV s 400 nm skenovacím krokem.

Vzorky pro měření teplotní roztažnosti měly tvar kvádrů s délkou cca 15 mm. Zkušební kvádry byly řezány na přesné pile Isomet 1000. Měření dilatace se provádělo na horizontálním dilatometru v teplotním rozmezí 25 – 1200°C dle parametrů daných tabulkou 2. Jako přenosový adaptér mezi vzorkem a senzorem byla použita safírová tyčka. Opakovaná dosahovaná odchylka měření se pohybovala od 5 do 7% v teplotním rozmezí 25 – 600°C, od 2 do 4% mezi 600 a 1000°C a od 0,5 do 1% v rozmezí 1000 – 1200°C.

Studium vlivu vysokoteplotní deformace na strukturu materiálu bylo zkoumáno na vzorcích v litém stavu a následně deformovaných při 600°C (vzorek FA5Nb D6) a 800°C (vzorek FA5Nb D8).

Tabulka 1 : Chemické složení studovaných slitin a značení jednotlivých vzorků.

vzorek	chemické složení [at.%]				stav slitiny
	Fe	Al	Nb	C	
FA5Nb as cast	bal.	27.3	4.8	0.05	litý stav
FA5Nb 1000_50	—"	—"	—"	—"	litý stav → žíháno při 1000°C po dobu 50 h
FA5Nb 1200_24	—"	—"	—"	—"	litý stav → žíháno při 1200°C po dobu 24 h

Tabulka 2: Teplotní cyklus při měření dilatace vzorků

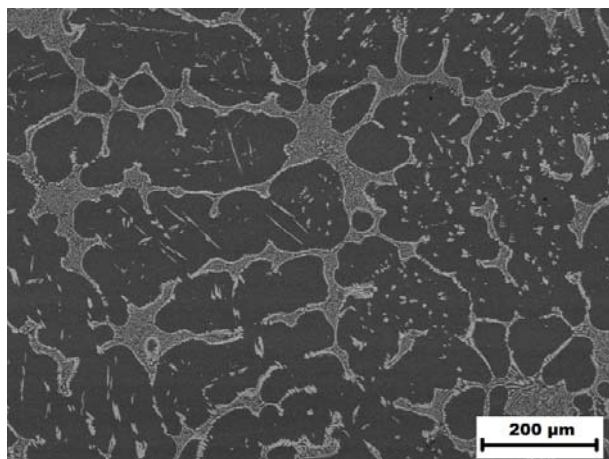
krok	teplotní rozmezí	podmínky
1	25 – 250°C	rychlost ohřevu 7 °C/min
2	250 – 1200°C	rychlost ohřevu 4 °C/min
3	1200°C	výdrž na teplotě 15 min
4	1200 – 700°C	rychlost ochlazování 4 °C/min
5	700 – 25°C	rychlost ochlazování nižší než 4 °C/min

3 Výsledky a diskuze

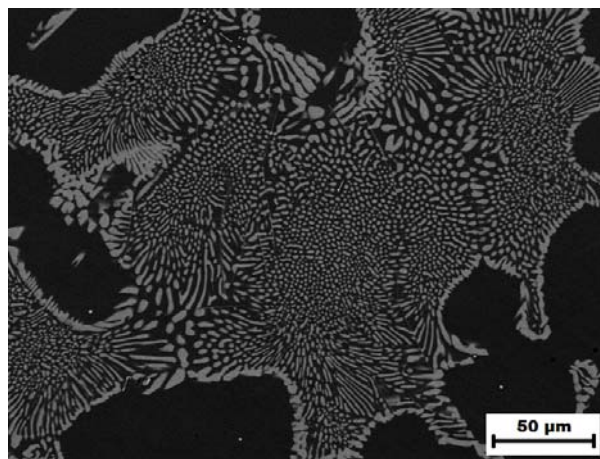
3.1 Struktura studovaných slitin v nedeformovaných stavech

V důsledku přidavku vysokého obsahu niobu vznikala ve struktuře vzorku FA5Nb as cast hustá eutektická síť, tvořená směsí α/γ Fe a Lavesovy fáze λ (viz obrázek 3). Lavesova fáze byla distribuována v klastrech, jednotlivé precipitáty měly rozměry v řádech jednotek mikrometrů. Jejich tvar byl uvnitř eutektických oblastí globulární a na okrajích eutektika oválný, jak je patrné z obrázku 4. Struktura s hustou eutektickou sítí je velmi slibná z hlediska vysokoteplotních mechanických vlastností, protože jednotlivé precipitáty mají podobný zpevňující efekt jako vyztužující složka v kompozitech.

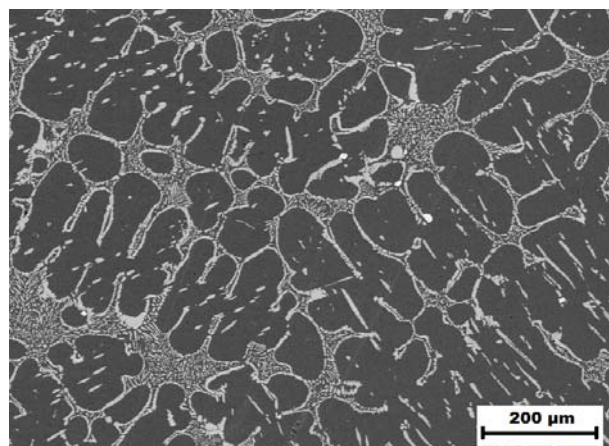
Po dlouhodobém žíhání při 1000°C po dobu 50ti hodin (vzorek FA5Nb 1000_50) se rozložení precipitátů ve struktuře nijak nelišilo od litého stavu (viz obrázek 5). Pouze na okrajích eutektických oblastí začaly precipitáty koagulovat, jak je zřejmé z detailu na obrázku



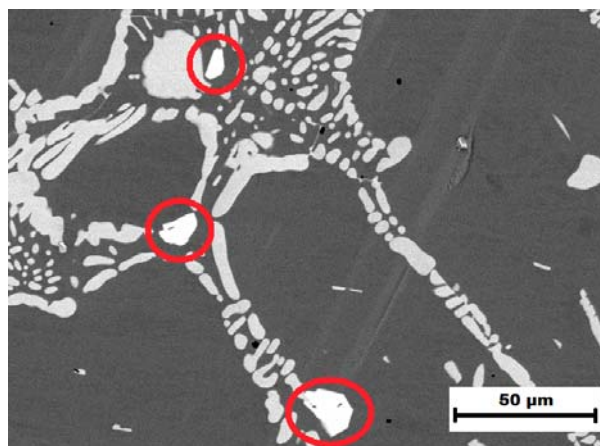
Obrázek 3: Struktura slitiny FA5Nb as cast (BSE detektor). Černá – matrice, světle šedá – Lavesova faze λ .



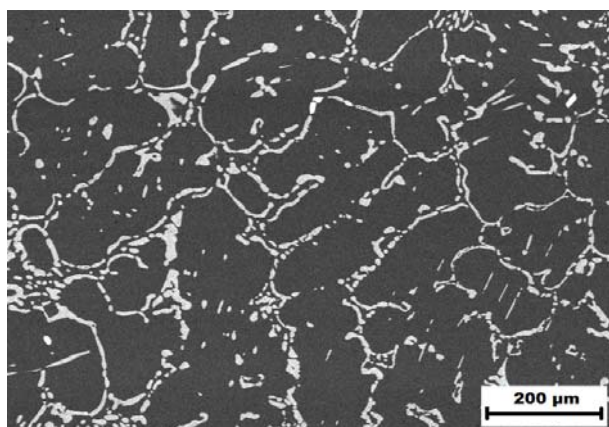
Obrázek 4: Detail eutektické oblasti ve struktuře materiálu FA5Nb as cast (BSE detektor). Černá – matrice, světle šedá – Lavesova faze λ .



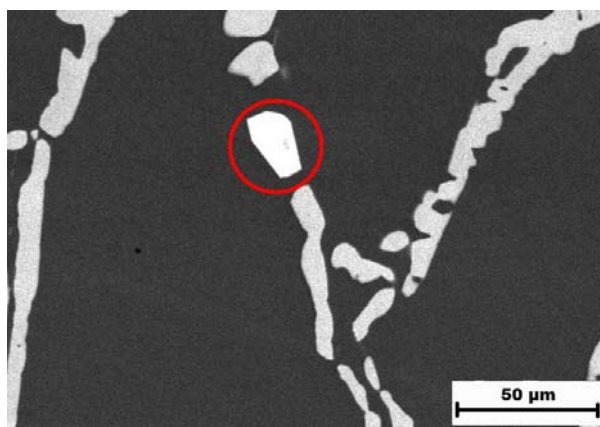
Obrázek 5: Struktura slitiny FA5Nb 1000_50 (BSE detektor). Tmavě šedá – matrice, světle šedá – Lavesova faze λ .



Obrázek 6: Detail struktury slitiny FA5Nb 1000_50 (zvýrazněné částice obsahují 50 at.% niobu) – BSE detektor. Tmavě šedá – matrice, světle šedá – Lavesova faze λ .



Obrázek 7: Struktura slitiny FA5Nb 1200_24 (BSE detektor). Tmavě šedá – matrice, světle šedá – Lavesova faze λ .



Obrázek 8: Detail struktury slitiny FA5Nb 1200_24 (zvýrazněné částice obsahují 50 at.% niobu) – BSE detektor. Tmavě šedá – matrice, světle šedá – Lavesova faze λ .

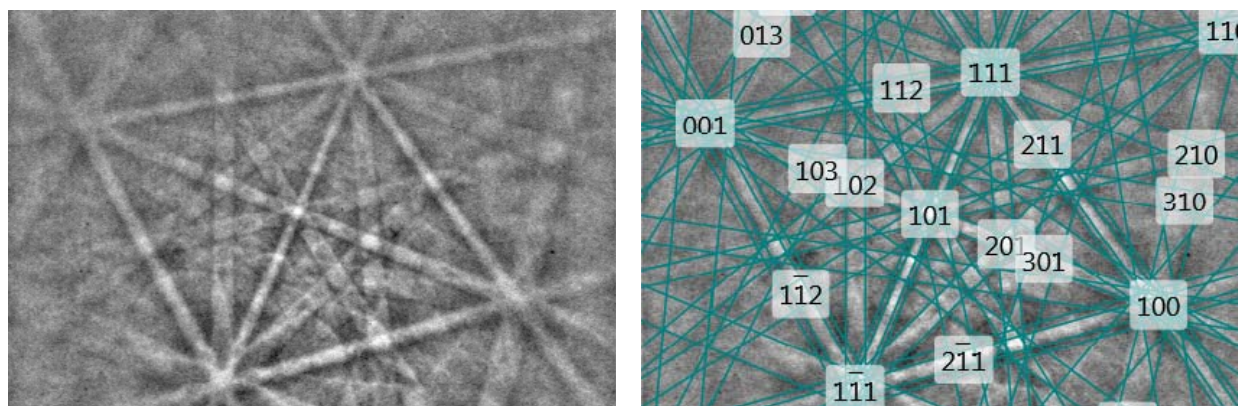
6. Po tepelném zpracování byly navíc ve struktuře pozorovány nové typy sekundárních částic, které byly odlišitelné od převažující většiny precipitátů při zobrazení pomocí BSE detektoru a jsou znázorněny na obrázku 6.

Po vysokoteplotním žihání při 1200°C po dobu 24ti hodin (vzorek FA5Nb 1200_24) eutektické oblasti z velké části zanikly a ve struktuře zůstaly pouze samostatné precipitáty, jak je možné vidět z obrázku 7. Částice byly distribuovány v řetězcích a rychle hrubly (viz detail na obrázku 8), což je z hlediska vysokoteplotních mechanických vlastností nežádoucí. I po tomto druhu tepelného zpracování byly ve struktuře obdobně jako v předchozím případě pozorovány nové typy částic – znázorněny v obrázku 8.

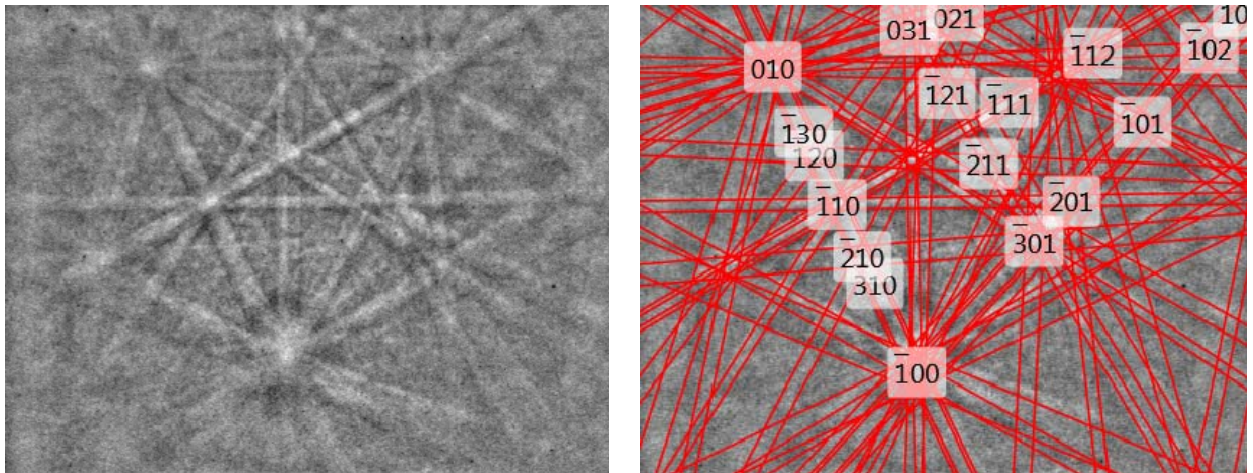
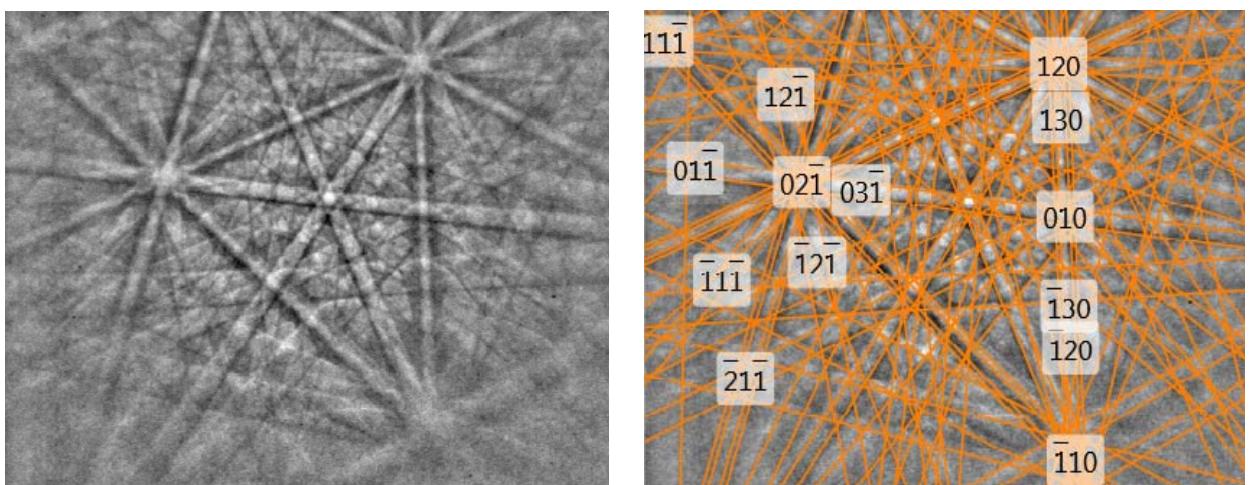
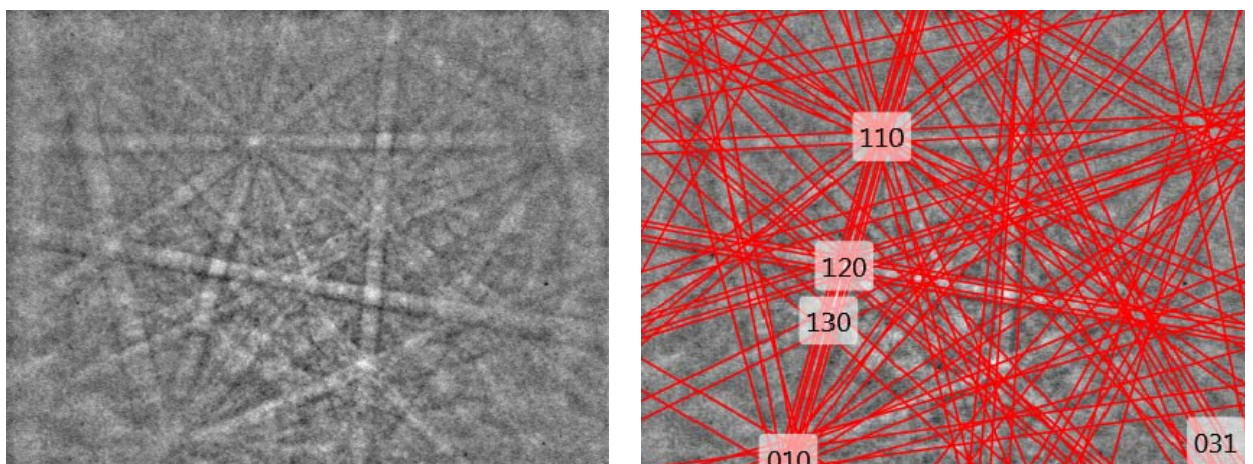
3.2 Identifikace fází ve zkoumaných vzorcích

V souladu s ternárním diagramem Fe – Al – Nb (viz obrázek 1) byla očekávána dvoufázová struktura materiálu. Tento předpoklad byl potvrzen u litého stavu (vzorek FA5Nb as cast). Materiál byl tvořen maticí typu Fe_3Al s chemickým složením Fe – (27,0±0,1) Al – (0,9±0,1) Nb (v atomových %) – určeno EDX analýzou. Pomocí EBSD byl stanoven typ krystalové mřížky matrice. Jednalo se o mřížku kubickou prostorově středěnou (BCC) s mřížkovými parametry $a = b = c = 0,579$ nm (identifikace pomocí Kikuchiho linií na obrázku 9). Veškeré precipitáty přítomné ve struktuře vzorku FA5Nb as cast byly Lavesovou fází $\lambda - (\text{Fe, Al})_2\text{Nb}$ s chemickým složením Fe – (18,5±1,6) Al – (25,1±1,1) Nb. Typ krystalové mřížky odpovídal šesterečné mřížce s mřížkovými parametry $a = b = 0,495$ nm, $c = 0,805$ nm (viz Kikuchiho linie na obrázku 10).

Po žihání při 1000°C po dobu 50ti hodin (vzorek FA5Nb 1000_50) zůstalo chemické složení i typ mřížky matrice a precipitátů Lavesovy fáze neměnné. Pomocí EDX a EBSD však byly ve struktuře pozorovány další dva nové typy částic. V prvním případě se jednalo o precipitáty složené výhradně z niobu a uhlíku, které byly identifikovány jako karbidy niobu Nb_6C_5 s trigonálním typem mřížky a mřížkovými parametry $a = b = 0,546$ nm, $c = 1,542$ nm (viz Kikuchiho linie na obrázku 11). Tyto karbidy vznikly ve struktuře díky malému množství uhlíku, který se do slitiny dostal ze surového železa. Železo používané pro strojní aplikace není nikdy zcela čisté (zbavené uhlíku), protože by pro běžné aplikace bylo velmi drahé. Čtvrtým typem částic, pozorovaným ve struktuře vzorku FA5Nb 1000_50, byly precipitáty s dvojnásobným obsahem niobu v porovnání s Lavesovou fází (některé z nich jsou zvýrazněny na obrázku 6). Prostřednictvím EBSD bylo dokázáno, že tyto částice s chemickým složením Fe – (24,1±0,9) Al – (50,1±1,2) Nb jsou μ – fází (se stechiometrickým složením $\text{Nb}_{19}(\text{Fe}_{1-x}\text{Al}_x)_{21}$) s trigonálním typem mřížky, charakterizovaným mřížkovými parametry $a = b = 0,476$ nm, $c = 2,584$ nm (viz Kikuchiho linie na obrázku 12). μ – fáze se sice



Obrázek 9: Kikuchiho linie matrice typu Fe_3Al .

Obrázek 10: Kikuchiho linie Lavesovy fáze λ .Obrázek 11: Kikuchiho linie karbidů niobu Nb_6C_5 .Obrázek 12: Kikuchiho linie μ – fáze.

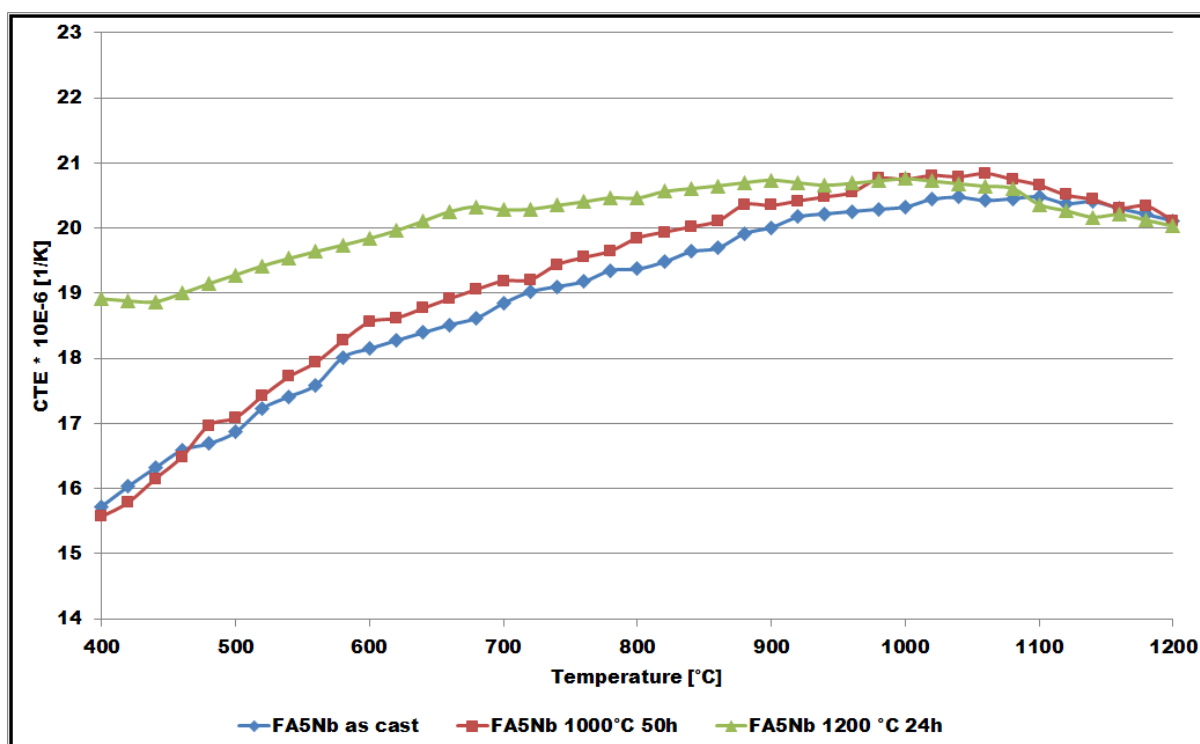
vyskytuje v ternárním diagramu v levé části v oblasti bohaté na niob (cca okolo 50ti at. %), ale je snadno stabilizovatelná nečistotami, zejména uhlíkem. Obsahuje-li tedy slitina uhlík, může dojít ke vzniku vícefázové struktury $\alpha/\gamma\text{Fe} + \lambda + \mu$ (metastabilní) + NbC i při nižším obsahu niobu, než kolik ho je potřeba ke tvorbě stabilní μ – fáze [12, 16 – 19].

Ve vzorcích vyžeháných při 1200°C po dobu 24ti hodin (FA5Nb 1200_24) byla obdobně jako v případě materiálu FA5Nb 1000_50 pozorována čtyřfázová struktura. V obou případech však bylo množství karbidů niobu a μ – fáze zanedbatelné a lze předpokládat, že sporadická přítomnost těchto fází nebude mít vliv na výsledné mechanické vlastnosti slitiny.

3.3 Koeficient teplotní roztažnosti (CTE) zkoumaných vzorků

CTE křivky pro všechny tři zkoumané stavy slitiny FA5Nb jsou uvedeny v grafu na obrázku 13. Hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti pro litý stav (FA5Nb as cast) jsou srovnatelné s CTE hodnotami vzorku FA5Nb 1000_50 po dlouhodobém žihání a do 900°C jsou podstatně nižší, než u vzorku FA5Nb 1200_24. Při teplotách nad 900°C tento rozdíl zaniká. Hodnoty CTE vzorků FA5Nb as cast a FA5Nb 1000_50 jsou výrazně nižší i v porovnání s jinými typy aluminidů železa, jak ukázaly předchozí výzkumy [20, 21]. Toto chování může být zapříčiněno přítomností husté eutektické sítě ve struktuře materiálu. Obdobné hodnoty CTE pro litý stav a stav po žihání při 1000°C po dobu 50ti hodin jsou opět dány strukturou materiálu, která se po tepelném zpracování žádným výrazným způsobem nezměnila.

Oproti tomu po žihání při 1200°C po dobu 24ti hodin (vzorek FA5Nb 1200_24) zanikla eutektická struktura materiálu a to se projevilo i na teplotním průběhu hodnot CTE. Z grafu je dobře patrné, že hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti jsou při teplotách do 900°C značně vyšší než u litého stavu. Na druhou stranu jsou však velmi stabilní v celém rozsahu měřených teplot. Hodnoty CTE vzorku FA5Nb 1200_24 se pohybují v úzkém rozmezí mezi $19 \cdot 10^{-6}$ a $21 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Takovéto chování materiálu je výhodné při návrhu strojních součástí, kde více než na nízký CTE je kladen důraz na jeho stabilní teplotní průběh.



Obrázek 13: Graf teplotní závislosti koeficientu teplotní roztažnosti pro studované stavy slitiny FA5Nb.

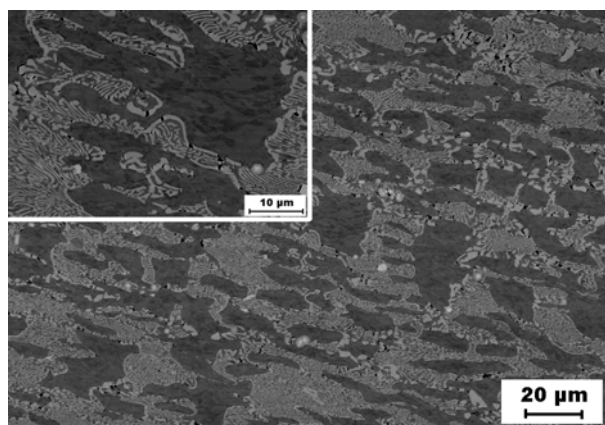
3.4 Vliv vysokoteplotní deformace na strukturu studovaných vzorků

Ukázka struktury po vysokoteplotní tlakové deformaci je zachycena na obrázku 14 (jedná se o vzorek deformovaný při 600°C – FA5Nb D6). Již ze SEM snímku je patrný vliv deformace na strukturu materiálu. Eutektická síť zůstala zachována, ale byla protažena a orientována ve směru kolmém na působící napětí. Z detailu na snímku 14 je rovněž dobře identifikovatelné zbytkové vnitřní pnutí v materiálu, které se projeví nepravidelným stínováním matrice na SEM snímku pořízeném pomocí AsB detektoru [22].

Obrázek 15 zachycuje EBSD IPF mapu vzorku FA5Nb as cast. Materiál v litém stavu byl značně hrubozrnný. Jednotlivá zrna měla rozměry v řádech stovek mikrometrů. Z toho důvodu snímek zobrazuje pouze dvě zrna (červená a žlutá barva) s několika subzrny.

EBSD IPF mapa na obrázku 16 znázorňuje vzorek FA5Nb D6 po tlakové deformaci při 600°C. Po deformaci došlo k výraznému zjemnění původně hrubozrnné struktury. IPF mapa rovněž potvrdila, že při 600°C nestačila v materiálu proběhnout rekrystalizace. Rozdílné barevné stínování v rámci jednotlivých zrn ukazuje (stejně jako detail na SEM obrázku 14 pořízeném AsB detektorem) na přítomnost vnitřního napětí. Lze tudíž konstatovat, že při 600°C nebude probíhat rekrystalizace, plasticita materiálu se během deformace vyčerpá a mohou začít vznikat nežádoucí trhliny.

Naopak při deformaci při 800°C (vzorek FA5Nb D8) budou zpevňující a odpevňující pochody v rovnováze, jak bylo zjištěno z EBSD IPF mapy na obrázku 17. Ze snímku je patrné, že při této teplotě dochází ke vzniku nových drobných zrn v důsledku rekrystalizace (barevné stínování jednotlivých zrn se zde neprojevilo, v materiálu tudíž není zbytkové vnitřní pnutí). Ve [23] bylo experimentálně zjištěno, že materiál s vyšším stupněm deformace rekrystalizuje snadněji, než méně deformovaný materiál. Ve shodě s tímto zjištěním bylo u vzorku FA5Nb D8 pozorováno, že matrice materiálu, v níž probíhala převážná většina deformačních pochodů, zrekrystalizovala přednostně. Oproti tomu Fe_3Al fáze v eutektických oblastech zůstala nerekrystalizovaná (černé regiony ¹), protože jednotlivé precipitáty Lavesovy fáze v eutektiku se téměř nedeformovaly, a eutektická síť tudíž vykazovala v porovnání s okolní matricí mnohem nižší hustotu dislokací.

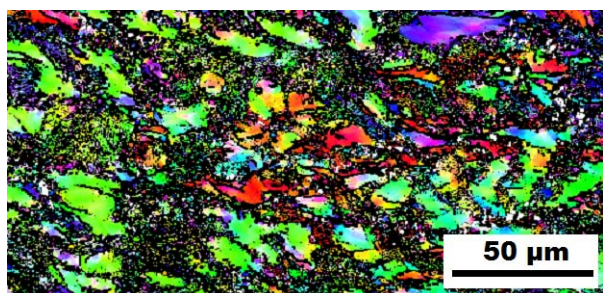


Obrázek 14: Struktura vzorku FA5Nb D6 (AsB detektor). Světle šedá – eutektická síť Fe_3Al + Lavesova fáze $(Fe, Al)_2Nb$, tmavě šedá – Fe_3Al matrice.

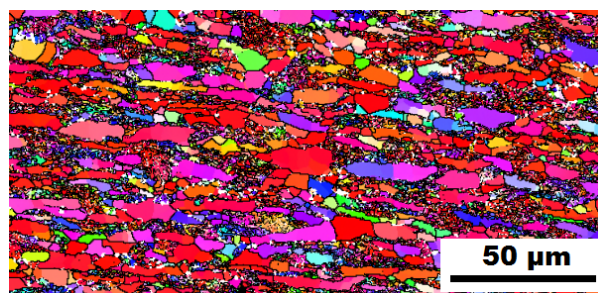


Obrázek 15: EBSD IPF X mapa vzorku FA5Nb as cast.

¹ Kvalita EBSD obrazců je silně závislá na hustotě dislokací, a proto při jejich vyšší hustotě dochází k poklesu úspěšnosti indexování a vzniku černých oblastí na EBSD IPF mapách [24]. V okamžiku, kdy matrice materiálu zrekrystalizovala, hustota dislokací v jejím objemu značně poklesla a eutektická síť se naopak stala oblastí se zvýšenou hustotou dislokací. Z toho důvodu byla úspěšnost indexace v eutektiku nízká.



Obrázek 16: EBSD IPF X mapa vzorku FA5Nb D6.



Obrázek 17: EBSD IPF X mapa vzorku FA5Nb D8.

4 Závěr

Struktura vzorku FA5Nb as cast byla tvořena Fe_3Al maticí, v níž se nacházela hustá eutektická síť Fe_3Al + Lavesovy fáze $(Fe, Al)_2Nb$. Po dlouhodobém žihání při $1000^\circ C$ (vzorek FA5Nb 1000_50) nebyly ve struktuře pozorovány žádné výrazné změny. Materiál s touto strukturou se zdá velmi slibný pro použití ve vysokoteplotních aplikacích, protože eutektická síť může mít obdobný zpevňující efekt jako disperzní částice v kompozitech. Po žihání při $1200^\circ C$ po dobu 24ti hodin došlo k zániku eutektických oblastí, ve struktuře zůstaly pouze samostatné precipitáty Lavesovy fáze, které však rychle hrubly.

Zkoumáním fázového složení materiálu bylo zjištěno, že slitina je tvořena:

- Lítý stav (FA5Nb as cast) – BCC matrice + hexagonální Lavesova fáze
- Stav po žihání při $1000^\circ C$ po dobu 50-ti hodin (FA5Nb 1000_50) a po žihání při $1200^\circ C$ po dobu 24ti hodin (FA5Nb 1200_24) – BCC matrice + hexagonální Lavesova fáze + trigonální Nb_6C_5 (ojedinělý výskyt) + trigonální μ – fáze (ojedinělý výskyt)

Množství přítomných karbidů niobu a μ – fáze bylo velmi malé. Nelze tedy očekávat, že by se tyto fáze významnějším způsobem podílely na ovlivňování vysokoteplotních mechanických vlastností.

Naměřené hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti (CTE) byly téměř totožné pro litý stav a pro stav po žihání při $1000^\circ C$. Je to zapříčiněno velmi podobnou mikrostrukturou. Hodnoty CTE pro vzorek FA5Nb 1200_24 byly v porovnání s předchozími stavy vyšší, ale byly mnohem stabilnější v širokém rozmezí teplot.

Přítomnost a míra zbytkového vnitřního napětí mohou být určeny prostřednictvím EBSD IPF map a ze SEM snímků pořízených AsB detektorem. Materiál v litém stavu byl velmi hrubozrnný. Při deformaci při $600^\circ C$ (FA5Nb D6) má dominantní vliv zpevňující mechanismus, rekystalizace neprobíhá. V matici zůstává vnitřní napětí a může dojít k porušení materiálu. Při deformaci při $800^\circ C$ (FA5Nb D8) dochází k úplné rekystalizaci matrice v neeutektických oblastech a vznikají nová jemná zrna. Fe_3Al fáze v eutektiku zůstává nerekrystalizovaná. Bylo potvrzeno, že materiál s vyšším stupněm deformace rekystalizuje snáze než materiál s menší deformací.

Literatura

- [1] MC KAMEY, C. G. Iron Aluminides. In *Physical Metallurgy and processing of Intermetallic Compounds*, eds. STOLOFF N. S. – SIKKA V. K., 1994, 351 – 391.
- [2] STOLOFF, N. S. Iron aluminides: present status and future prospects. In *Materials Science and Engineering A258* (1998). 1 – 14.
- [3] DEEVI, S. C., SIKKA, V. K. Nickel and iron aluminides: an overview on properties, processing and applications. In *Intermetallics 4* (1996). 357 – 375.

- [4] PALM, M. Concepts derived from phase diagram studies for the strengthening of Fe – Al-based alloys. In *Intermetallics 13* (2005). 1286 – 1295.
- [5] PALM, M., SCHNEIDER, A., STEIN, F., SAUTHOFF, G. Strengthening of iron aluminide alloys for high-temperature applications. In *Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 842*. 2005, S1.7.1 – S1.7.12.
- [6] PRYMAK, O., STEIN, F. Solidification and high-temperature phase equilibria in the Fe-Al-rich part of the Fe-Al-Nb system. In *Intermetallics 18* (2010). 1322 –1326.
- [7] MORRIS, D. G. A kol. Strengthening at high temperatures by precipitates in Fe-Al-Nb alloys. In *Intermetallics 14* (2006). 1204 – 1207.
- [8] MORRIS, D. G., REQUEJO, L. M., MUNOZ – MORRIS, M. A. A study of precipitation in $D0_3$ ordered Fe-Al-Nb alloy. In *Intermetallics 13* (2005). 862 – 871.
- [9] DIMIDUK, D. M., MENDIRATTA, M. G., BANERJEE, D., LIPSITT, H. A. A structural study of ordered precipitates in an ordered matrix within the Fe-Al-Nb system. In *Acta Metallurgica, Vol. 36, Issue 11*. 1988. 2947 – 2958.
- [10] PALM, M. Phase equilibria in the Fe corner of the Fe-Al-Nb system between 800 and 1150°C. In *Journal of Alloys and Compounds 475* (2009). 173 – 177.
- [11] EFFENBERG, G., ILYENKO, S. – Editors. *Ternary alloy systems*. Published by Springer: Berlin 2009. ISBN 978-3-540-88052-3.
- [12] PALM, M. Nепublikované výsledky.
- [13] *Pole figures and inverse pole figures*. [online].[cit. 2015-10-21]. Dostupné z: <http://www.ebsd.com/popup/polefigure.htm>
- [14] PIŠEK, F. *Nauka o materiálu II*. 2. edition. Československa akademie ved Publishing: Praha 1959.
- [15] Netsch. DIL 402 PC - Horizontal pushrod dilatometer - product brochures. Netsch.com [cit. 2012-10-30]. Available from: http://www.netzsch-thermal-analysis.com/uploads/tx_nxnetzschmedia/files/DIL_E_0313_10.pdf
- [16] EFFENBERG, G., ILYENKO, S. – Editors. *Ternary alloy systems*. Published by Springer: Berlin 2009. ISBN 978-3-540-88052-3.
- [17] ALONSO, P. R. a kol. Combined ab initio and experimental study of $A_2 + L_2$ coherent equilibria in the Fe-Al-X (X=Ti, Nb, V) systems. In *Intermetallics 19* (2001). 1157 – 1167.
- [18] VILLARS, P. a kol. *Handbook of ternary Alloy Phase Diagrams*. 1. vydání. Published by ASM International. Volume 3 (Ag-Al-As – Al-Ga-Gd). 1995. ISBN 0-87170-525-7.
- [19] RAGHAVAN, V. Al-Fe-Nb (Aluminium-Iron-Niobium). In *Journal of Phase Equilibria and Diffusion, Vol. 31, No. 2* (2010). 166 – 167.
- [20] ŠVEC, M., VODIČKOVÁ, V., HANUS, P. The effect of phase composition and distribution on coefficient thermal expansion of Fe_3Al based iron aluminides. Metal 2014. ISBN 978-80-87294-52-9.
- [21] ŠVEC, M., MACAJOVÁ, E. The coefficient of thermal expansion Fe_3Al and FeAl – type iron aluminides. Metal 2015. ISBN 978-80-87294-58-1.
- [22] JAKSCH, H. Strain related contrast mechanisms in crystalline materials. European microscopy conference 2008, Aachen – Germany.
- [23] UGUZ, A., MATRIN, J. W. Plastic zone size measurement techniques for metallic materials, *Materials Characterization* (1996) 105-118.
- [24] WRIGHT, S., NOWELL, M., FIELD, D. A review of strain analysis using electron backscatter diffraction, *Microscopy and Microanalysis* 17, 316-329, 2011.

Poděkování

Výzkum byl podpořen studentským grantem SGS „Studium a hodnocení struktur a vlastností materiálů“.

Vodivé termoplastické nanokompozity z uhlíkových nanotrubic a jejich možné využití

Jan Vácha

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

Abstrakt: Tato práce zkoumá elektrické vlastnosti nanokompozitů z termoplastické polymerní matrice a uhlíkových nanotrubic. Jako základní matrice byly použity polyoxymetylen (POM), polykarbonát (PC), polybutylene-tereftalát (PBT), ke kterým byly přidány nanočástice v daném hmotnostním procentuálním podílu. Jako plnivo byly použity více stěnné uhlíkové nanotrubičky. Zkoumané vzorky byly vyrobeny na vstřikovacím stroji Arburg. Pro vyhodnocení elektrických vlastností byl měřen měrný elektrický odpor konečných kompozitních materiálů s přidáním nanoplňiviny a bez něj.

Klíčová slova: nanokompozit, uhlíkové nanotrubičky, elektrická vodivost, vstřikování plastů

1 Úvod

Vstřikování je jednou z nejvýznamnějších technologií zpracování termoplastických polymerních kompozitů. Uhlíkové nanotrubičky (CNT) jsou nyní často používaná plniva v plastových nanokompozitech. Globální trh s elektro-vodivými polymerními sloučeninami by měl podle odhadu v roce 2014 dosáhnout výše 2,78 bil. dolarů, a kompozity s přidáním plnivy v současné době tvoří 84% celého segmentu. Roste použití těchto kompozitů v aplikacích využívajících elektrostatický výboj (ESD), v elektro-vodivých (EC) komponentech, v součástkách, kde je zapotřebí elektromagnetické rušení (EMI) a radiofrekvenční rušení (RFI). Pro průmyslovou výrobu kompozitů s vodivými plnivem dominuje technologie vstřikování plastů způsobená rychlým růstem poptávky po elektronických a automobilových komponentech [1]. Tato práce se zabývá vlastnostmi a aplikačními možnostmi využití těchto polymerních termoplastických kompozitů s uhlíkovými nanotrubicemi. Vícestěnné uhlíkové nanotrubičky mohou přenášet velmi vysoké elektrické proudové hustoty. Plnění plastů CNT poskytuje kompozitům dobrou elektrickou vodivost elektrostatického náboje a elektromagnetické interferenční stínící vlastnosti. Tyto vlastnosti vloženy do nízko hustotní polymerní matrice získávají novou alternativu pro vysokohustotní kovové části, nebo díly s pokovenou vrstvou. Vstřikování je nákladově jedno z neefektivnějších zpracování taveniny produkující velkého množství složitých trojrozměrných dílů, jako jsou pouzdra pro elektroniku. Dobrá zpracovatelnost termoplastické polymerní matrice se udržuje, protože je potřeba pouze nízký hmotnostní procentní podíl CNT, který je potřeba pro většinu aplikací, které vyžadují elektrickou vodivost. Jako uhlíková vodivá plniva se používá od mikroskopických uhlíkových vláken po jednoděnné uhlíkové nanotrubičky, zatímco základní matice jsou elektricky izolující termoplasty. Kritický obsah CNT nutný k překonání perkolační prahu a vytvoření vodivostní sítě závisí především na typu CNT (jednoděnné uhlíkové nanotrubičky SWCNT, nebo vícestěnné uhlíkové nanotrubičky MWCNT), skutečné kvalitě CNT (amorfní obsah uhlíku), poměru stran (L/d), morfologii, polymerní matrici a disperzi stavu. Polymerní matrice a vnitřní kvality CNT, disperzní stav a poměrem stran CNT byly uznány jako kritické faktory, kterými se řídí kompozitní vodivost. Elektrická vodivost těchto dílů je v důsledku trojrozměrné perkolační sítě CNT. Izotropní

CNT síť je stejně vodivá ve všech směrech [2, 3]. Jako plnivo jsou zde použity vícestěnné uhlíkové nanotrubic (MWCNT), které jsou přidávány v různém hmotnostním poměru do několika termoplastických matric. Tyto MWCNT jsou od firmy Nanocyl, která dodává na trh jedny z nejkvalitnějších, které mají velmi vysokou vodivost.

2 Materiál a experiment

Použitý materiál byl od firmy Nanocyl (Belgie) s názvem PLASTICYL™ ve formě granulátu. Polymerní matrice byly polykarbonát (PC) s 15 % hm. podílem MWCNT, polyoxymethylen (POM) s 10 % hm. podílem MWCNT a polybutylentereftalát (PBT) s 15 % hm. podílem. Vícestěnné uhlíkové nanotrubic jsou stejně jako masterbatch od firmy Nanocyl (Belgie) a mají obchodní název NT7000™. Předsměs byla použita jako základní polymerní matrice ze které se míchaly polymerní směsi. Bylo zvoleno 1, 2, 5 % zastoupení MWCNT pro všechny materiály.

2.1. Vstřikovací proces, parametry a formy

Pro vstřikování byl použit standardní vstřikovací stroj sloupové konstrukce ARBURG 270S 400-100. Doporučené technologické parametry pro vstřikování zkušebních těles musely zajistit jednak výrobu vzorků a jednak nesmělo dojít k degradaci struktury nanotrubic. Hlavně s ohledem na teplotní a smykové namáhání bylo rozhodující nastavit parametry plastikace a parametry vstřikování (viz tab. 1). Pro temperaci vstřikovací formy byl použit agregát TA3. Pro produkci zkušebních vzorků pro tahovou zkoušku z kompozitů s uhlíkovými nanotrubicemi byla použita vstřikovací forma s centrálním vyhazovačem, která má výměnné desky dle požadavků individuálních norem ISO. Pro výrobu vzorků pro měření odporu byl použit tvar desek o rozměrech 120x120x2 mm s kuželovým vtokem uprostřed. Obě formy mají chladicí okruhy na obou stranách desek. Forma byla chlazená na teplotu 80 °C pro obě poloviny vstřikovací formy.

Tabulka 1: Vstřikovací parametry

Druh materiálu	Teplota tavicí komory (°C)					Vstřikovací rychlost (cm ³ /s)	Dotlak bar	Teplota formy (°C)
	Zóna 5	Zóna 4	Zóna 3	Zóna 2	Zóna 1			
POM	210	205	205	200	190	40	700	90
PC	300	295	290	285	275	25	790	80
PBT	245	240	240	235	230	30	580	80

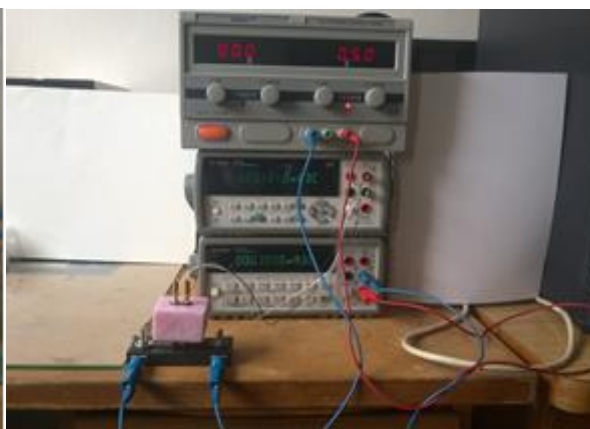
2.2. Objemová resistivita

Pro měření a zjištění, jak dobře je polymerní kompozit schopný vodit elektrický náboj, není bohužel na TUL zařízení. Proto jsem toto zařízení zhotovil přesně podle dané normy. Měření odporu bylo provedeno pomocí normy ČSN EN ISO 3915. Tato norma je vhodná pro měření odporu plastových dílů. Na zkušebních vzorcích byl měřen objemový odpor na zařízení sestávajícího z potenciometrických elektrod a upínacího zařízení, viz obr. 4, a měřícího zařízení. Tyto elektrody jsou vyrobeny z nerezové oceli a odpovídají dané normě. Upínací zařízení je vyrobené z materiálu s vysokým odporem a přenosových desek rovněž z nerezové oceli. Měřící zařízení se skládá z napájecího zdroje, voltmetru a ampérmetru, viz obr. 5. Jako zdroj napájení byl použit Hadex G855, jako voltmetr byl použit digitální multimetr Agilent

34411A a jako ampérmetr byl použit digitální multimetr Agilent 34401A. Vzdálenost mezi potenciometrickými elektrodami je dána normou a je 1 cm. Měření byla prováděna při napětí $U = 5 \text{ V}$ pro všechny vzorky. Teplota byla $22 \text{ }^\circ\text{C}$ a relativní vlhkost vzduchu v místnosti byla 55%. Měření bylo prováděno vždy na 10 vzorcích.



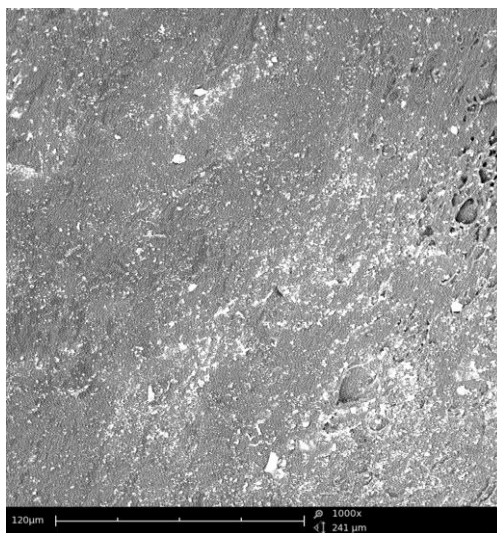
Obrázek 1: Dielektrické elektrody



Obrázek 2: Měřicí zařízení

3 Zhodnocení a diskuze

Po přípravě různých procentuálních směsí a výrobě zkušebních vzorků byl měřen povrchový odpor. Při zpracování kompozitu jsme předpokládali, že foliace uhlíkových nanotrubic je rovnoměrná tak, jak je uvedeno v [4 - 7]. Na snímku z elektronového mikroskopu (obr. 3) můžeme vidět zlom zkušebního vzorku s 5 % hm. podílem MWCNT po tahové zkoušce, kde je vidět rovnoměrné rozmístění uhlíkových nanotrubic.



Obrázek 3: Lom zkušebního vzorku po tahové zkoušce

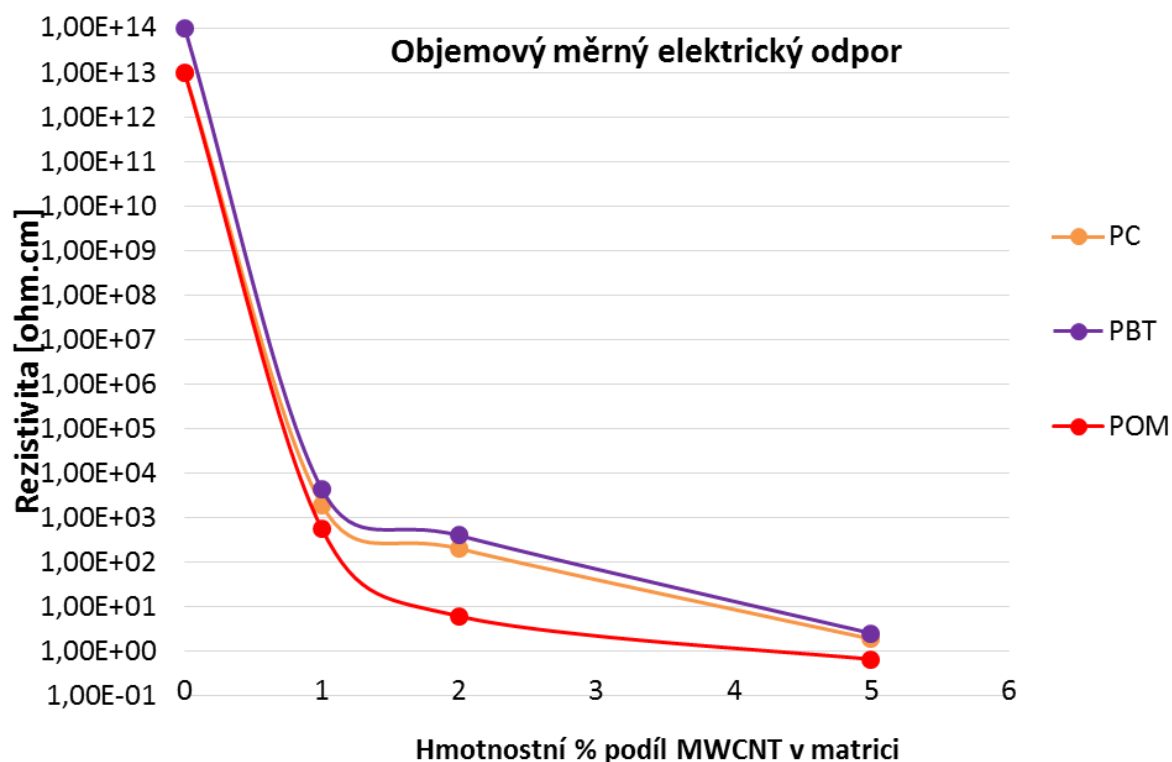
Vzhledem k tomu, že viskozita kompozitu v důsledku přidání uhlíkových nanotrubic byla mnohem vyšší, než viskozita PA6, byly tlakové parametry během procesu plnění a dotlaku pro nastavené standardní teplotní podmínky během vstřikování (viz tabulka 1) poměrně vysoké. Nastavené technologické parametry vstřikovaných těles byly odzkoušeny a vybrány z několika variant technologických parametrů. Vzhledem k vyšší viskozitě nanokompozitu bylo nutné zvýšit teplotu taveniny cca. $+20^\circ\text{C}$.

Na 1, 2, 5 % hm. poměru MWCNT v polymerních směsích vyrobených z předsměsi Plasticyl ABS1501 byl měřen měrný odpor. Měření objemového odporu nám ukázalo, jak dobrý materiál je vodič elektrického náboje. Měření byla prováděna na 10 vzorcích z každé polymerní směsi. Výsledné hodnoty měrného odporu můžeme vidět v tabulce 2.

Tabulka 2: Měrný elektrický odpor

Měrný elektrický odpor [ohm.cm] - ČSN EN ISO 3915				
	Čistý polymer	1 % hm. CNT	2 % hm. CNT	5 % hm. CNT
PC	1,00E+13	1,94E+03	2,13E+02	1,96
PBT	1,00E+14	4,85E+03	3,84E+02	2,74
POM	1,00E+13	5,12E+02	7,06	0,71

Jak můžeme vidět na obrázku 4, tyto kompozitní směsi jsou vodivé, a jsou to dobré vodiče elektrického a elektrostatického náboje. Již od 5 % hm. podílu MWCNT vykazují nanokompozity velmi dobré vodivé vlastnosti, které by mohli být využity pro součástky využívající elektromagnetické stínící vlastnosti (bude měřeno), či jiné elektronické aplikace. Dále by zde mohlo dojít k eliminování nutnosti plastové části dále pokovovat nanášením vodivých vrstev. Tyto výsledky také ukazují, že došlo za těchto technologických parametrů k překonání perkolačního prahu a vytvoření vodivostní sítě již od 2 % hm. podílu MWCNT. Výsledky bez přidání nanoplňiv nejsou na tomto zařízení zaznamenány, protože základní polymerní matrice má vyšší odpor, než je zařízení schopno měřit. Výsledné hodnoty jsou dány výrobcí polymerních matic.



Obrázek 4: Graf závislosti rezistivity na hmotnostním podílu MWCNT v polymerní matrici

4 Závěr

Výsledné vzorky směsí termoplastických matic a více stěnných uhlíkových nanotrubic ukazují velmi dobrý nárůst vodivosti se stoupajícím hmotnostním podílem CNT v matici. Tyto nanokompozity jsou již od 2% hm. podílu vodivé a jsou schopné vodit statický i elektrický náboj. Je také zřejmé, že okolo 2% hm. podílu je překonán perkolační práh a nanotrubičky jsou schopné vést elektrický náboj mezi sebou (vodivostní síť). Nejvhodnější hmotnostní podíl se jeví s ohledem na cenu a vodivost 3-4% hm. podíl MWCNT v polymerní matici, kdy kolem této hodnoty dosahují tyto nanokompozity nízký objemový měrný elektrický odpor. Tyto vlastnosti umožňují použít tyto kompozity k široké škále použití. Jako jsou například aplikace vyžadující dobrou elektrickou vodivost, nebo materiály s vysokou elektrostatickou vodivostí (ESD), což jsou plasty, které chrání elektrostaticky citlivá zařízení atd. Další použití jsou například elektro/tepelně vodivé součástky v automobilovém průmyslu, či v obalovém průmyslu. Dále také jako vnitřní součásti a manipulační zásobníky jednotek pevného disku. Mezi přednosti rozhodně vystupují možnosti použití těchto materiálů jako stínících zařízení v součástkách, kde je zapotřebí elektromagnetické rušení (EMI) a radiofrekvenční rušení (RFI), kde by odpadala nutnost nákladného pokovování a nanášení kovových vrstev. Vzhledem k neustále se snižujícím nákladům na výrobu CNT by se v budoucnu dalo uvažovat o použití těchto plniv pro zlepšení mechanických vlastností.

Literatura

- [1] Lew CY., Dewaghe C., Claes M., Injection moulding of polymer-carbon nanotube composites, *Polymer-Carbon Nanotube Composites- Preparation, Properties and Applications*. Chapter 6, Cambridge, 2011, ISBN: 978-1-84569-761-7
- [2] Tiusanen J., Vlasveld D., Vuorinen J., Review on the effects of injection moulding parameters on the electrical resistivity of carbon nanotube filled polymer parts, *Composites Science and Technology* 72, Elsevier, 2012, pp. 1741-1752, ISSN: 0266-3538
- [3] Pelíšková M., Sáha P., Vliv lehčené struktury na elektrické vlastnosti polymerních kompozitů s elektrovodivými plnivými, *Chemické listy* 106, 2012. s. 1104 – 1109, ISSN: 0009-2770
- [4] PÖTSCHKE, P. and coll., A novel strategy to incorporate carbon nanotubes into thermoplastic matrices. *Macromolecular rapid communication*, Weinheim, 2008, ISSN: 1521-3927
- [5] CHANDRA, A. and coll., Effect of injection molding parameters on the electrical conductivity of polycarbonate/carbon nanotube nanocomposites. *Antec 2007 Plastics: Annual Technical Conference Proceedings*, 2007, ISBN: 978-0-9753707-5-9
- [6] PRASHANTHA, K., SOULESTIN, J., Masterbatch-based multi-walled carbon nanotube filled polypropylene nanocomposites: Assessment of rheological and mechanical properties. *Composites science and technology* 69, 2007, ISSN: 0266-3538
- [7] SO, H.H, CHO J. W., SAHOO J.G., Effect of carbon nanotubes on mechanical and electrical properties of polyamide/carbon nanotubes nanocomposites. *European Polymer Journal* 43, 2007, ISSN: 0014-3057

REKONSTRUKCE RÁMU ROBOTU ROBOTUL[®] ZÁMKOVÝM SYSTÉMEM

VÍT Zdeněk

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,
Fakulta strojní, 1. ročník
Doktorský studijní program – STROJE A ZAŘÍZENÍ

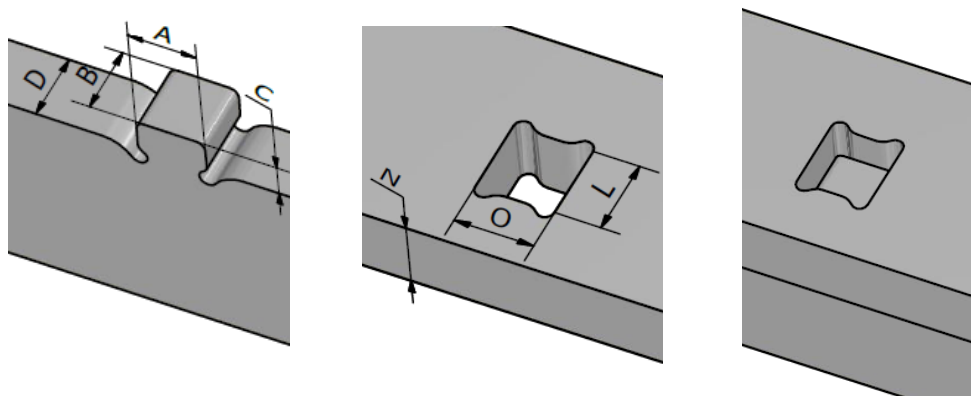
Abstrakt: Předložená publikace se zabývá novým konstrukčním návrhem rámu servisního a inspekčního robotu ROBOTUL[®]. Nosné rámy jsou konstrukčně navrženy systémem zámkových spojů. Práce se dělí do třech stěžejních kapitol. V úvodní kapitole je stručně popsán základní princip a výhody, které sebou zámkové konstrukce přinášejí. Druhá kapitola popisuje samotný návrh jednotlivých dílčích částí nosného rámu, včetně výsledků z numerické simulace. Závěrečná kapitola je věnována zhodnocení přínosu práce, jak z hlediska technického, tak ekonomického.

Klíčová slova: ROBOTUL, zámkový systém, numerická simulace

1 Úvod do zámkových systémů

Úvodem publikace je důležité nejprve vysvětlit princip zámkových konstrukcí, jejichž základními stavebními díly jsou výstupek zámku a otvor pro zámek. V následujícím textu je blíže popsán zámkový systém pro konstrukce z kovových materiálů. Výstupek zámku a otvor mají geometricky relativně složitý tvar, využívá se k jejich realizaci nekonvenční technologie obrábění materiálu, konkrétně se jedná o aplikaci laserového paprsku. Výpalky z plechů se vypalují na CNC laserovém řezacím centru, kde finální výrobek dosahuje velké přesnosti.

Pro tvorbu výstupků a otvorů existují zásady, které musí být dodrženy z důvodu výrobní technologie. Tam, kde by vznikaly ostré zlomy, musí být tyto hrany nahrazeny zaoblením, zápichem apod.



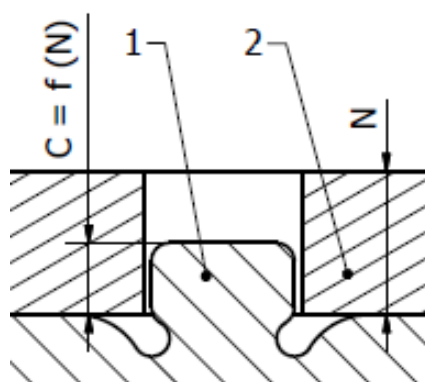
Obrázek 1 : Zámkový systém – výstupek, otvor a výsledné spojení

Přesná rozměrová specifikace výstupku zámku (obr. 1) je odvozena od tloušťky plechu (D). Hloubka výstupku zámku (B) odpovídá ze své podstaty tloušťce plechu ($B = D$). Optimální půdorysný pohled výstupku se předpokládá ve tvaru čtvercové základny, tedy šířka zámku odpovídá jeho hloubce ($A = B = D$). Velikost kóty C, tj. výška výstupku, je dána tloušťkou protilehlého dílu (N), přičemž daná hodnota se odvíjí od použitého materiálu na základě

praktických poznatků s danou technologií lokálního svařování ($C = f(N)$). Výstupek obsahuje zápichy pro styk kontaktních ploch.

Na obr. 1, kde je zobrazen otvor pro zámeček, lze dále vidět rozměry L a O , jejichž velikost je dána protikusem, přičemž se navyšují o přírůstek cca $+0,2$ mm ($L = B + 0,2$ mm a $O = A + 0,2$ mm). Hodnota přírůstku záleží především na přesnosti CNC laserové hlavy. Otvor pro zámeček obsahuje charakteristické zápichy, které při montáži musí být z důvodu rovinnosti plechu orientovány rovnoběžně s tloušťkou protilehlého plechu.

Obr. 2 dokumentuje řez samotným zámečkem, který naznačuje umístění výstupku zámečku (díl 1) do otvoru zámečku (díl 2) s náležitou vůlí. Tyto vůle jsou užitečné s ohledem na snadnou montáž a také pro možnost dodatečného působení teplotního pnutí. Při provaření spoje se materiál zahřívá a následným chladnutím dochází k teplotnímu efektu, jenž v důsledku teplotní dilatace vytváří požadovaný přítlak („dotáhnutí“) zámečkového spojení.



Obrázek 2: Řez zámečkovým spojením

Značná výhoda zámečkového systému spočívá v tom, že danou technologickou operací (lokálním svařováním) dochází pouze k minimálním teplotním deformacím konstrukce. Díky moderním způsobům dělení materiálu má výsledné konstrukční řešení poměrně přesnou rozměrovou geometrii (v řádu desetin mm) a proto ve většině případů není třeba aplikovat složité a drahé následné obrábění funkčních ploch. Další předností je relativně nízká hmotnost výsledné konstrukce v důsledku možnosti aplikace tvarového odlehčení při zachování dostatečně vysoké tuhosti. V neposlední řadě lze konstatovat, že zámečkové systémy dodávají konstrukci vysoký designový efekt, a to obzvláště při dodatečném zabroušení lokálních svarů, čímž finální konstrukce vypadá jednoduše.

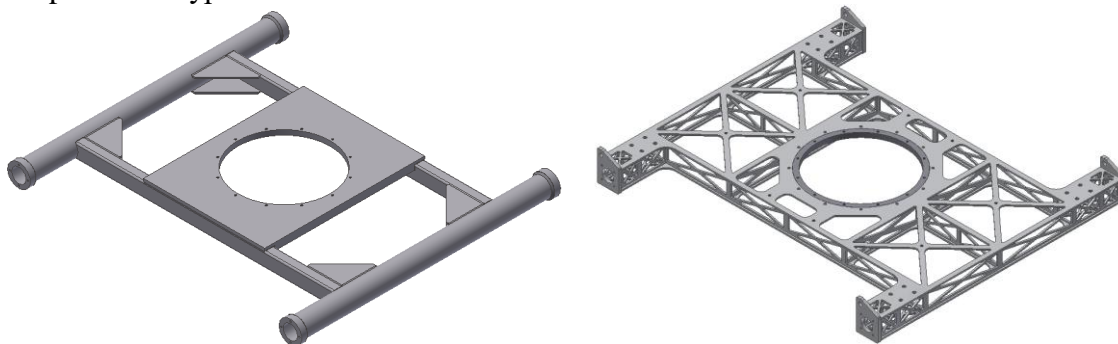
2 Konstrukční návrh nosného rámu ROBOTUL[®]

Následující kapitola prezentuje návrh praktické aplikace konstrukce zámečkovým systémem na stávající řešení servisního a inspekčního robotu ROBOTUL[®]. Rekonstrukce se sestává z návrhu nosných rámu, tj. horního rámu, spodního rámu a čtyř zrcadlových nohou.

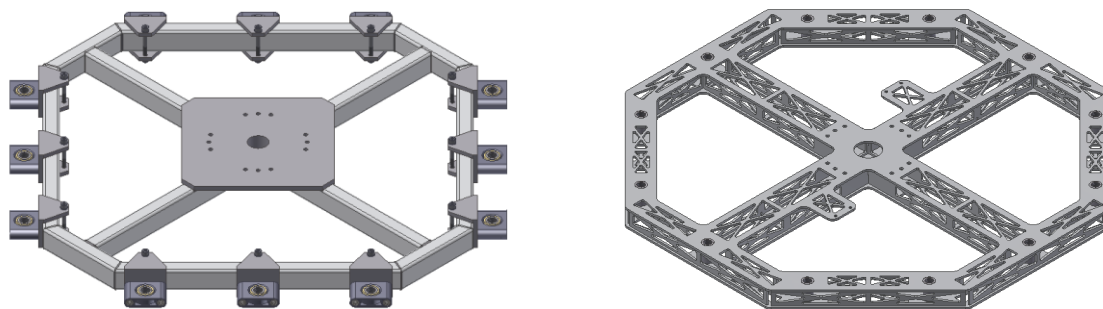
Cílem nového konstrukčního řešení rámu byla z technického pohledu minimalizace hmotnosti soustavy s ohledem na zachování, resp. optimalizaci, tuhosti rámu. Při realizaci nového řešení byl kladen důraz na možnost plnohodnotné záměny rámu, tj. zohlednění umístění veškerých připojovaných komponent bez požadavků na jejich dílčí konstrukční úpravy. Pro návrh nového nosného rámu uvažováno s použitím slitiny hliníku, konkrétně pak běžně skladem dostupného typu AlMg3 (EN 5754). Jelikož stávající rám je rovněž zhotoven ze slitiny hliníku, musí být při návrhu nové konstrukce kladen důraz především na tvarovou

optimalizaci rámu, která je umožněna daným konstrukčním systémem, a zároveň na razantní tvarová odlehčení jednotlivých dílů.

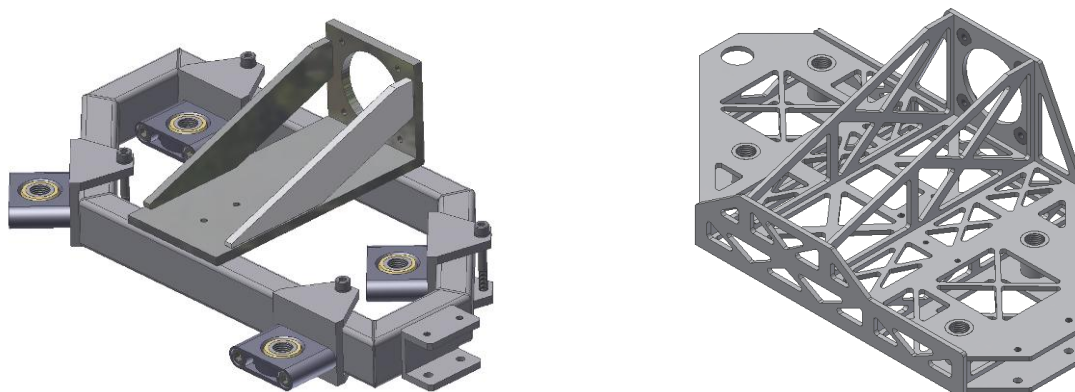
Porovnání původních a nových rámu dokumentují obr. 3, 4 a 5. Do uvažovaných částí stávajících rámu byly rozměrových a hmotnostních důvodů zahrnuty i držáky přísavek, jelikož představují součást daných celků, jenž v případě zámkové konstrukce byla eliminována pevně danou pozicí ve výpalcích rámu.



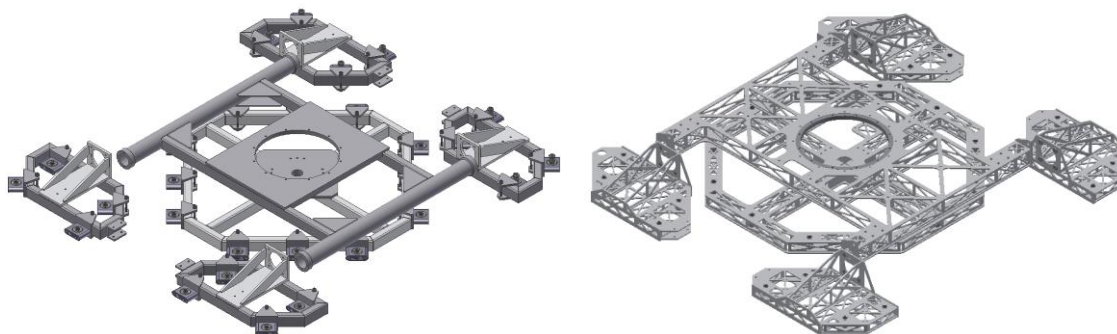
Obrázek 3: Vyobrazení 3D modelu původního a nového horního rámu



Obrázek 4: Vyobrazení 3D modelu původního a nového spodního rámu



Obrázek 5: Vyobrazení 3D modelu původního a nového rámu nohy



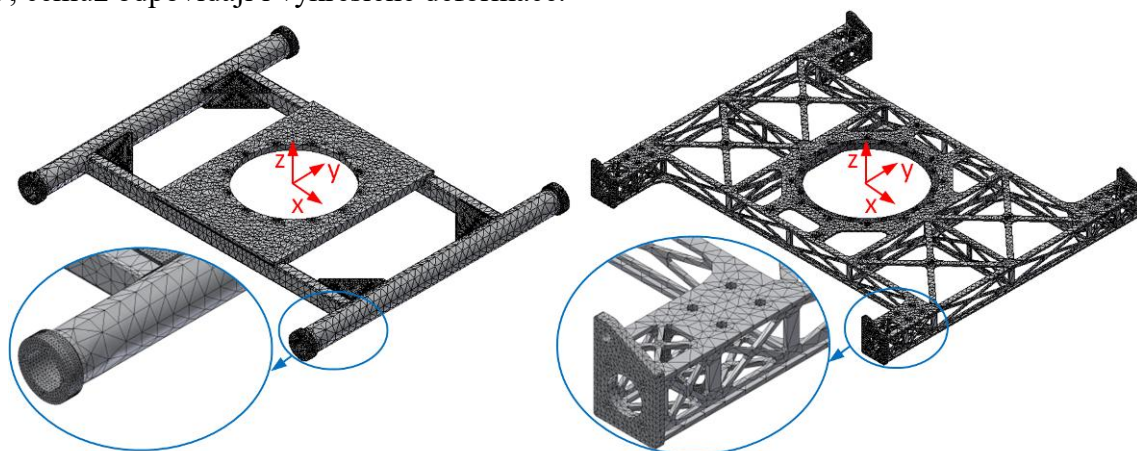
Obrázek 6: Vyobrazení 3D modelu původní a nové soustavy rámu robotu

V případě horního rámu bylo dosaženo cca 33% redukce hmotnosti (z 2,88 kg na 1,93 kg). U spodního rámu úspora činí zhruba 37 % (z 3,52 kg na 2,21 kg). U nohou bylo docíleno snížení přibližně 47 % (z 1,12 kg na 0,59 kg na jednu nohu), které je v případě nohou velmi podstatné, jelikož se v sestavě vyskytují v počtu čtyř kusů. Celkovou redukcí hmotnosti lze vyčíslit v řádu 40 % (z 10,9 kg na 6,5 kg), přičemž podoba výsledné sestavy rámu je doložena na obr. 6.

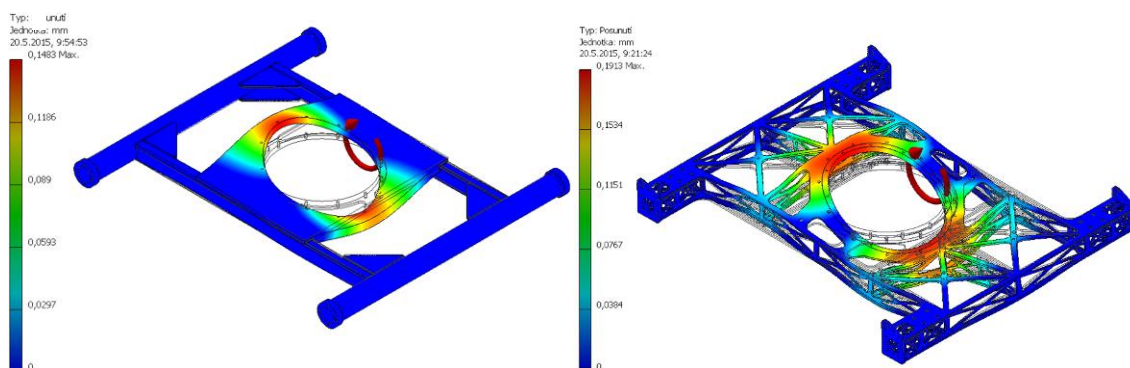
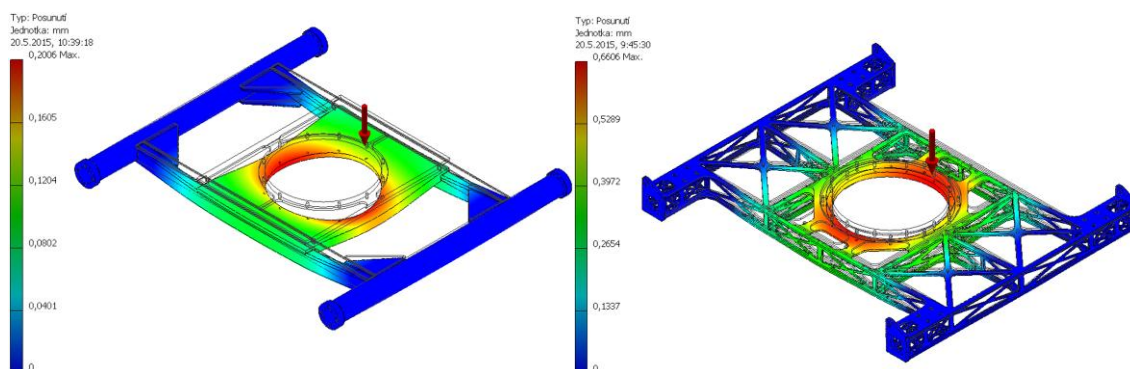
Jak již bylo zmíněno, konstrukční návrh nových rámu byl založen na principu optimalizace za pomoci výstupů z pevnostní analýzy a to jak v podobě sledování rozložení a výše napětí, tak ve formě maximálních deformací konstrukce pro zvolené druhy zatížení. Pro modely byla po základním odladění užitá síť s průměrnou velikostí prvku (vyjádřené jako zlomek velikosti ohraničujícího kvádra) 0,05. Konečnoprvková simulace byla realizována pro každý model ve všech základních osách a to jak pro síly, tak i momenty, tj. F_x , F_y , F_z a M_x , M_y , M_z . Pouze v případě spodního rámu bylo z důvodu jeho symetrie jako druhý směr zvoleno natočení o 45° namísto klasických 90° .

V modelu bylo uvažováno s ukotvením nohou, tj. v případě horního rámu přírubové uložení nohou a v dalších případech uložení přísavek, a aplikací zatížení na přírubu rámu. Silové zatížení bylo aplikováno ve zvolené výši 500 N, které zhruba odpovídá maximální hmotnosti sestaveného robotu, a momentové zatížení na úrovni 50 Nm, což odpovídá hodnotě aplikované v simulacích v DP zaměřené na návrh původního rámu [1]. Přestože dané zatížení aplikované ve všech osách plně nekoresponduje s reálným namáháním rámu, poskytuje základní představu pro srovnání tuhosti jednotlivých konstrukcí. Rovněž výsledné hodnoty v kontaktních místech s jinými díly je nezbytné brát se zřetelem na finální podobu osazeného robotu, jelikož například středová uložení jsou vyztužena přírubou motoru apod.

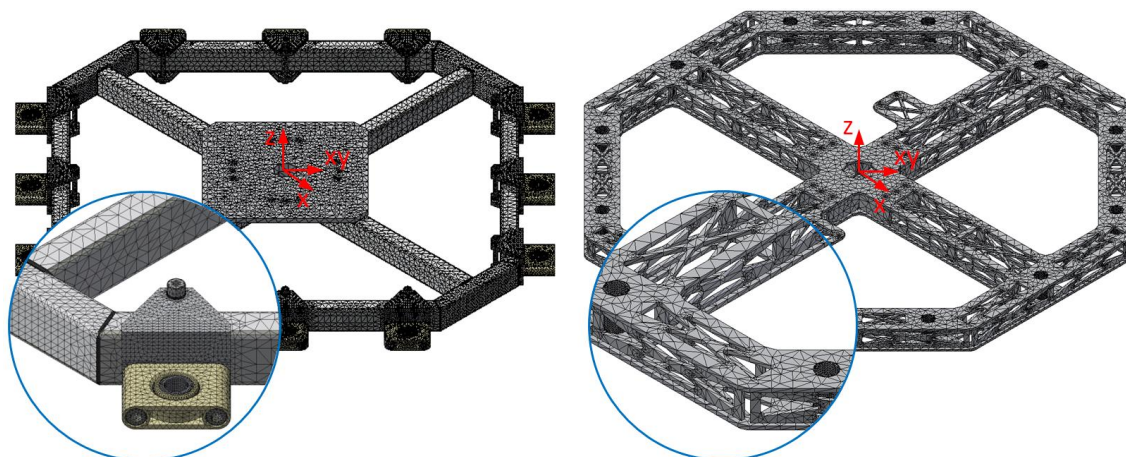
S ohledem na rozsah výsledků jsou grafické výstupy zobrazeny u každého rámu pouze pro dvě zatížení s nejvyšším výsledkem deformace, tj. pro maximální silovou a nejvyšší momentovou deformaci. Dále je vhodné poznamenat, že na obrázcích zobrazené pozice síly, příp. momentu, vyplývají ze systému zobrazování zatížení v použitém programu, přičemž jejich skutečná pozice je v, resp. kolem zvoleného souřadného systému, který dokumentují obr. 7, 8 a 9, čemuž odpovídají i vykreslené deformace.



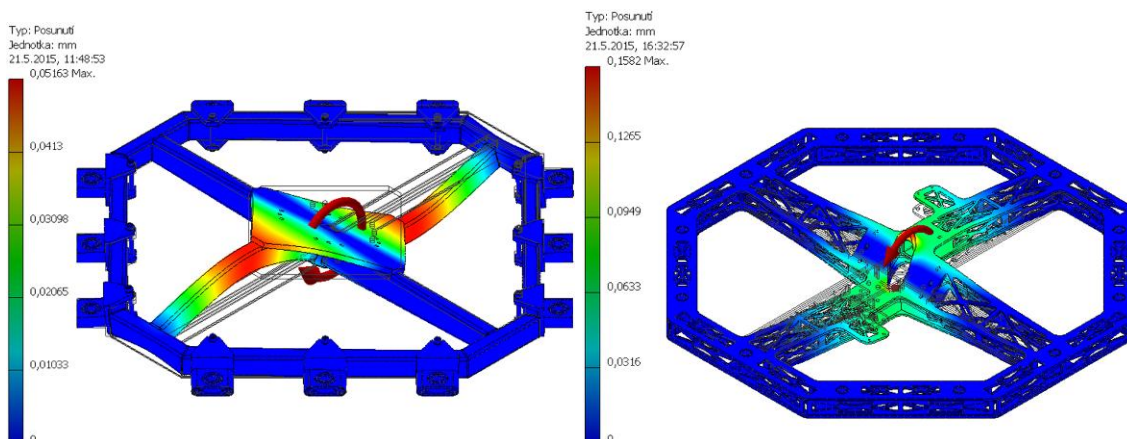
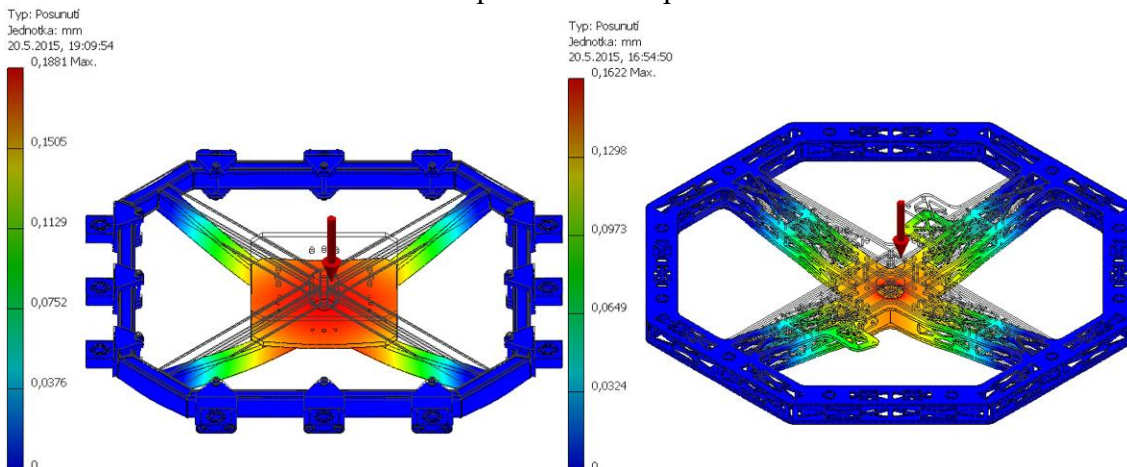
Obrázek 7: Síť konečnoprvkových modelů horního rámu

Obrázek 8: Deformace horního rámu při zatížení $M_y = 50 \text{ Nm}$ Obrázek 9: Deformace horního rámu při zatížení $F_z = -500 \text{ N}$

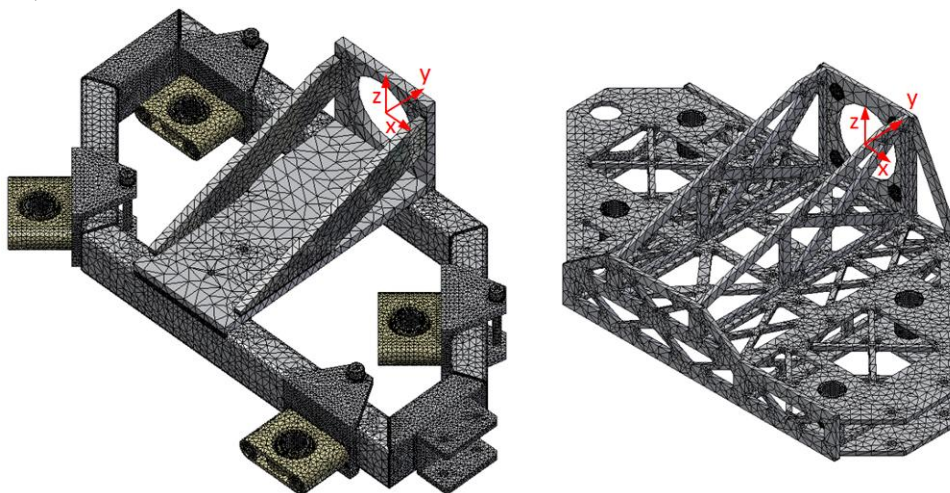
Poměr mezi deformací původního a nového horního rámu udává v případě momentového zatížení obr. 8 a v případě silového obr. 9. U zatížení momentem M_y došlo ke zhoršení deformace o 28 % (z maximální hodnoty 0,15 mm na 0,19 mm), což lze považovat za přijatelnou hodnotu. Za nejproblematictější je možné označit deformační chování rámu pod silovým zatížením F_z , kde došlo k více než trojnásobnému navýšení deformace oproti původnímu rámu, tj. z 0,20 mm na 0,66 mm. Pokud by byla požadována vyšší odolnost rámu proti danému zatížení, je možné redukovat tvarová odlehčení v postranních profilech, případně pro razantnější efekt postranní profily zesílit nebo zdvojit. Je však vhodné poznamenat, že v osazené sestavě bude daná deformace snížena přítomností středového uložení a rovněž horní nástavbou.



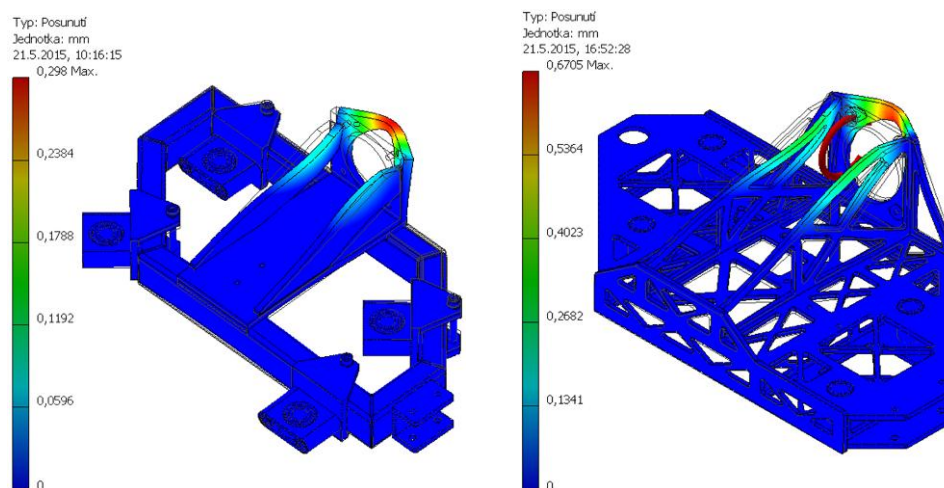
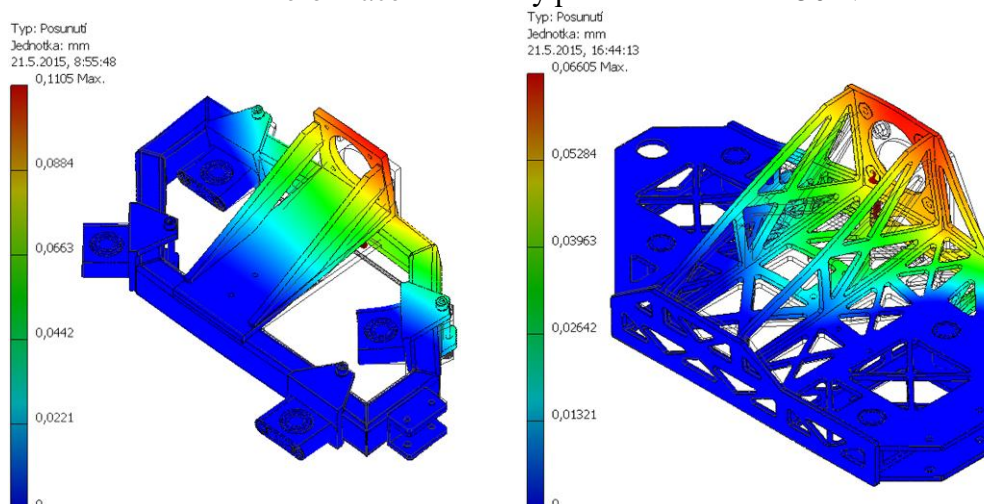
Obrázek 10: Síť konečnoprvkových modelů spodního rámu

Obrázek 11: Deformace spodního rámu při zatížení $M_x = -50 \text{ Nm}$ Obrázek 12: Deformace spodního rámu při zatížení $F_z = -500 \text{ N}$

Srovnání deformace spodního rámu při zatížení M_x dokládá obr. 11. V daném případě nemá smysl u zámkové konstrukce hodnotit nepodstatnou lokální deformaci lemu kruhového otvoru a je vhodnější srovnávat průhyb ramenou, kde vychází obdobné hodnoty, tj. 0,05 mm a cca 0,07 mm. Zde hraje podstatnou roli v původním rámu přítomnost přírubové desky, ale nutno poznamenat, že v osazené sestavě je střed rámu podepřen masivní přírubou středového uložení. Deformace spodního rámu při silovém zatížení F_z je uvedena na obr. 12, kde je možné pozorovat mírné (cca 14%) zlepšení tuhosti nové konstrukce oproti původní, tj. z 0,19 na 0,16 mm.



Obrázek 13: Síť konečnoprvkových modelů nohou

Obrázek 14: Deformace rámu nohy při zatížení $M_x = -50$ NmObrázek 15: Deformace rámu nohy při zatížení $F_z = 500$ N

Deformační chování rámu nohy pod momentovým zatížením M_x dokumentuje obr. 14. Přestože došlo k více než dvojnásobné místní deformaci (z původních 0,30 mm na 0,67 mm), není tato hodnota směrodatná, jelikož dané místo je v realitě podepřeno přírubou motoru. V daném případě byla sledována především deformace a rovněž napětí v celém rámu nohy, které jsou i při zvoleném abnormálním zatížení minimální. Obr. 15 dále dokládá navýšení tuhosti nového rámu nohy oproti původnímu při silovém zatížení F_z , kde naopak došlo ke 40% poklesu deformace (z 0,11 na necelých 0,07 mm).

3 Zhodnocení přínosu práce

Před závěrečným vyhodnocením nově navržené konstrukce je nezbytné shrnout základní fakta. Optimalizace konstrukce byla komplexní proces, monitorovaný řadou ukazatelů, a to jak v podobě napětí, tak deformací, při různých silových zatíženích, tj. nejen v práci uvedených. Pro přesné posouzení tuhosti finální konstrukce by bylo nezbytné do simulace zahrnout všechny hlavní díly robotu a hodnotit výslednou soustavu jako jeden celek. Předložená práce však měla za cíl zejména poukázat na možnosti, přínosy, ale i osvětlit problematické oblasti v návrhu nové konstrukce. Rovněž není plně objektivní srovnávat poměr tuhostí mezi optimalizovanou konstrukcí a původním v řadě míst předdimenzovaným rámem, jehož konstrukce je značně závislá na použitém systému, tj. způsobu spojování, tvaru profilů atp.

Lze konstatovat, že se novým systémem zámkové konstrukce podařilo docílit razantní úspory hmotnosti, při dosažení poměrně vysoké tuhosti soustavy. V porovnání s horním rámem lze označit ve smyslu tuhosti spodní rám a především nohy za předimenzované. Další redukce hmotnosti těchto rámu ale naráží na praktické možnosti návrhu dané konstrukce (minimální šířku odlehčených stěn ve vazbě na lokální svary atp.). Další výraznější úspora by byla možná jedině snížením tloušťky použitých plechů, což naráží na technologické hranice použitého zámkového systému. **Problematickým místem návrhu nové konstrukce je nesporně horní rám, kde je při vybraném zatížení jen třetinová tuhost konstrukce.** Zde byl díky jeho základnímu tvaru nejvyšší potenciál k tvarovým odlehčením, která se negativně projevila na výsledné tuhosti rámu a to především ve smyslu průhybu středového uložení. **Při plném osazení robotu a reálném zatížení však lze predikovat průhyb horního rámu na úrovni méně než 0,4 mm, což je možné označit pro danou konstrukci za přijatelné.** Relativně snadné zvýšení tuhosti rámu, bez razantního zásahu do podoby konstrukce, lze dosáhnout zdvojnásobením tloušťky obou postranních profilů (z 3 mm na 6 mm), což má za následek snížení průhybu pod silou F_z o 20 % (z 0,66 mm na 0,53 mm), při navýšení hmotnosti rámu o cca 140 g.

3.1 Technické zhodnocení

Konstrukčně navržený nosný rám inspekčního a servisního robotu ROBOTUL[®] zámkovým systémem se skládá z třech hlavních částí, které byly systematicky zachovány v souladu se stávající verzí robotu. Hlavní důraz byl kladen na maximální kompatibilitu rámu se stávající konstrukcí, tedy možnost záměny dílů bez dalších konstrukčních úprav použitých dílů.

Pro celou konstrukci rámu byl zvolen hliníkový materiál, konkrétně AlMg3, přičemž funkční plochy pro šroubové spoje byly osazeny ocelovými vložkami. Na základě mnohačetných numerických simulací ve vzájemné vazbě na úpravy 3D modelů bylo odladěno a optimalizováno navržené konstrukční řešení, včetně tvarových odlehčení jednotlivých plechových dílů s důrazem na zachování dostatečně velké tuhosti vzniklým výztužným žebrováním. V níže uvedeném odstavci je podrobněji proveden rozbor jednotlivých podsestav rámu.

První ústřední částí celé konstrukce je horní rám, na který navazují zbylé dvě části. Jelikož dolní rám (podvozek) a horní rám se vůči sobě natáčí, je v horním rámu upevněna ocelová příruba pro uchycení elektropohonu a jeho uložení. Do rámu se vkládají 4 ložisková pouzdra, která mohou být použita ze stávajícího robotu. Každé pouzdro je v místě příruby ustaveno prostřednictvím 4 šroubů a dále je zadní částí vloženo do výztužné přepážky rámu, čímž je tvarově podepřeno. Pro ustavení boxů s elektronikou jsou v rámu vytvořeny závitové díry, přičemž se předpokládá mírná změna pozice nosných sloupků boxů s ohledem na tvarová odlehčení rámu. Ustavení horní nástavby robotu na navržený rám je předpokládáno ve stávajících místech, ale namísto svěrného spoje se předpokládá spoj v podobě plošných přírub se 4 šrouby. To představuje nejzásadnější změnu v koncepci stávajícího řešení, která by jako jediná vyžadovala konstrukční úpravy stávajícího řešení (nástavby). Jako výhodnější řešení lze jednoznačně označit rozsáhlejší rekonstrukci horní části robotu, která by umožnila v ideálním případě eliminovat potřebu horní nástavby, která zajišťuje především uložení závěsného ramene.

Druhou částí sestavy je již zmíněný dolní rám (podvozek), který plní funkci změny orientace na vertikální stěně. Podvozek je osazen duralovými závitovými pouzdry pro umístění

podtlakových přísavek. Rovněž se na podvozku nacházení závitové díry pro ustavení ejektorů a rozvaděčů tlakového vzduchu.

Poslední částí nosného rámu inspekčního a servisního robotu jsou nohy, v kterých jsou opět vloženy tvarové ocelové vložky pro uchycení pohonů kliky, které zajišťující specifický pohyb robotu. Všechny čtyři nohy jsou řešeny z totožných polotovarů, pouze přední nohy mají jiné horní desky z důvodu uložení snímačů. Správné sestavení dané nohy je tedy jen předmětem naorientování použitých polotovarů.

Jako podstatnou výhodu daného řešení lze označit skutečnost, že je možné v rámci plošného tvaru navržených dílů volit relativně libovolnou pozici přísavek, tj. otvoru pro přísavky, což svávací řešení umožňovalo pouze minimálně a to v rámci posuvu držáku přísavky po daném profilu. Původní kloubové uložení přísavek (nohy, spodní rám) bylo nahrazeno pevným uložení, jelikož se ukázalo, že dané uložení nepřináší tížený efekt a naopak může způsobovat komplikace.

V tab. 1 jsou pro přehledné porovnání uvedeny hodnoty hmotnosti obou dvou nosných rámu, jak stávajícího, tak i nově realizovaného zámkovými spoji.

Tabulka 1: Hmotnosti částí nosného rámu

Konstrukční řešení	Hmotnost [kg]	
	Stávající sestava	Zámkový systém
Horní rám	2,88	1,93
Spodní rám (podvozek)	3,52	2,71
Noha (4x)	1,12	0,59
Celkem	10,9	6,5

Celková hmotnost existující verze nosného rámu, která je vytvořena svařovanou sestavou normalizovaných profilů z hliníkových slitin činí 10,9 kg (včetně držáků přísavek). **Nově vzniklé koncepční řešení metodou zámkových spojů docílilo razantní úspory hmotnosti o 40 %, při zachování dostatečně vysoké tuhosti rámu.**

3.2 Ekonomické zhodnocení

Konstrukční návrh nosného rámu zámkovými spoji není v době odevzdání této publikace ve výrobní fázi a tak nejsou skutečné finanční náklady na navržené řešení k dispozici. Pro orientační porovnání s náklady stávajícího rámu, které je doloženo v tab. 2, je finanční rozpočet řešení zámkovým systémem kvalifikovaně odhadnut na základě dosud realizovaných konstrukcí. Ceny stávajícího rámu byly aproximovány z nákupních cen v souladu s vývojem trhu.

Tabulka 2: Celkové náklady na nosný rám bez DPH

	KS	Cena [Kč]	
Konstrukční řešení		Stávající sestava	Zámkový systém
Horní rám	1	23 000	14 000
Spodní rám (podvozek)	1	17 000	15 000
Noha	4	4x 4500	4x 3500
Celkem	-	58 000	43 000

Předloženým konstrukčním řešením nosného rámu robotu lze řádově ušetřit 25 % finančních nákladů oproti původní verzi.

Poděkování

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže Technické univerzity v Liberci č. SGS 21128/115, využívající účelové podpory na specifický vysokoškolský výzkum a je financovaná Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Literatura

- [1] PLAVEC, M. Mobilní platforma servisního robotu pro pohyb na vertikální skleněné stěně. Liberec: TUL, 2011.

Náchylnost vysokopevnostních ocelí na vodíkové křehnutí

Zuzánek Lukáš

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,
Fakulta STROJNÍ, 4. ročník

Doktorský studijní program – STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Abstrakt: Příspěvek se zabývá vysokopevnostními materiály a jejich náchylností k vodíkovému zkřehnutí. Materiál se používá pro výztuhy karoserie vozu, kde se klade velký důraz na jejich pevnost a odolnost při havárii vozu. Z důvodu možného vzniku vodíkové křehkosti je velice důležité provést testovací měření, které slouží jako průvodní zkoušky před nasazením do sériové výroby.

Klíčová slova: vodíková křehkost, mechanické vlastnosti, mikrotvrdość

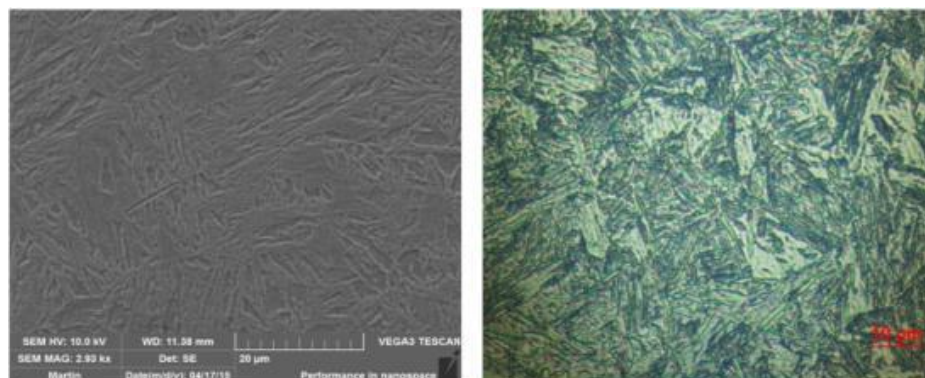
1. Úvod

Požadavky na moderní automobil jsou stále náročnější, vozidla mají být bezpečná a komfortní pro posádku, mají mít vysoký výkon a zároveň co nejnižší spotřebu pohonných hmot a nízké emise. Právě spotřeba paliva a přísné emisní normy mají přímý vliv na snahu o snižování hmotnosti. V souvislosti s tím se v posledních letech pro konstrukci karoserie častěji využívají vysokopevnostní oceli. Při konstrukci karoserie roste podíl využití ultra-pevnostních ocelí, které kvůli vysokým mechanickým vlastnostem nelze dělit standardní technologií stříhání. Díky tomu se dříve speciální technologie dělení materiálu laserem nebo vodním paprskem stávají běžnou součástí výrobních linek moderních strojírenských podniků, které spolupracují s automobilovým průmyslem. Nevýhoda ultra-pevnostních ocelí spočívá v jejich náchylnosti na vodíkovou křehkost, která je velice nebezpečná, protože způsobuje porušení materiálu mnohem dřív než je mez pevnosti.

2. Vysokopevnostní martenzitické oceli 22MnB5

Materiál 22MnB5 (mangan-bórová ocel) je vysoko-pevnostní materiál, který v základním stavu vykazuje feriticko-perlitickou strukturu s pevností (R_m 450—550 MPa) a tažností ($A_{80} = \min 20 \%$). Bórové oceli patří do kategorie ocelí vhodných pro kalení a popouštění. Nabízejí vynikající vlastnosti pro tváření za tepla a vysokou pevnost po tepelném zpracování – zakalení, které probíhá přímo v tvářecím nástroji. Tato vlastnost materiálu je daná přidávkou malého množství bóru a manganu, s cílem zlepšit prokalitelnost. Mikrostruktura bórových ocelí je po tepelném zpracování tvořena z velké části martenzitem a zbytkovým austenitem. Pro méně náročné aplikace je přípustný i dolní bainit. Již malé množství bóru postačuje k potlačení nukleace feritu na hranicích austenitických zrn a podporuje tvorbu martenzitu, nebo dolního bainitu. Výsledná struktura je charakteristická jemnou stavbou jehlic martenzitu (Fig.1). Aby došlo k projevu účinků bóru, je nutné zabránit reakci s jinými prvky např. dusíku, nebo kyslíku za pomoci legur titanu a hliníku [1]. Samotné zpracování materiálu pro výrobu konkrétních dílů spočívá v ohřevu na austenitickou teplotu cca. 950 °C a poté se materiál vloží do tvářecí zápusťky s vnitřním vodním chlazením. Zavřením nástroje dojde nejprve k tváření dílu a poté v uzavřeném nástroji k jeho zakalení. Podmínkou pro úplnou přeměnu na martenzit je nutnost ochlazení dílu vhodnou rychlostí tak, aby byla překročena kritická ochlazovací rychlost.

Testovaný materiál byl dodán od výrobce ve formě plátů (plechů) v tloušťce 1 mm, které již byly tepelně zpracovány, takže vykazují maximální hodnoty pevností. Z důvodu zabránění tvorby okují je na povrchu plechu ochranná vrstva z AlSi s rozložením 150g na ploše 1m².je na povrchu plechu ochranná vrstva z AlSi s rozložením 150g na ploše 1m².



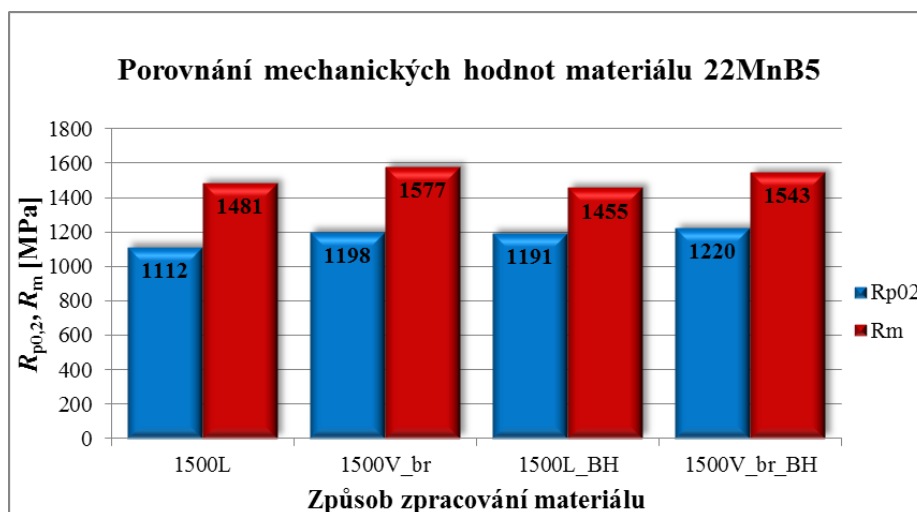
Obrázek 1. Mikrostruktura materiálu 22MnB5 , zvětšeno 1000x

3. Vliv technologie dělení na mechanické vlastnosti použitého materiálu

Důležitou informací pro testování materiálu na vodíkovou křehkost je vliv použité technologie výroby zkušebních vzorků na výsledné mechanické vlastnosti. Z důvodu vysoké pevnosti a tvrdosti materiálu jsou použitelné pouze nekonvenční metody dělení jako je řezání vodním a laserovým paprskem. Testovaný materiál se využívá v konstrukci karoserie automobilu a proto je nutné brát v úvahu vliv BH efektu na konečné vlastnosti. BH efekt se projevuje při lakování karoserie, kdy při vypalování laku je materiál vystaven teplotě 180 °C po dobu 20 minut.

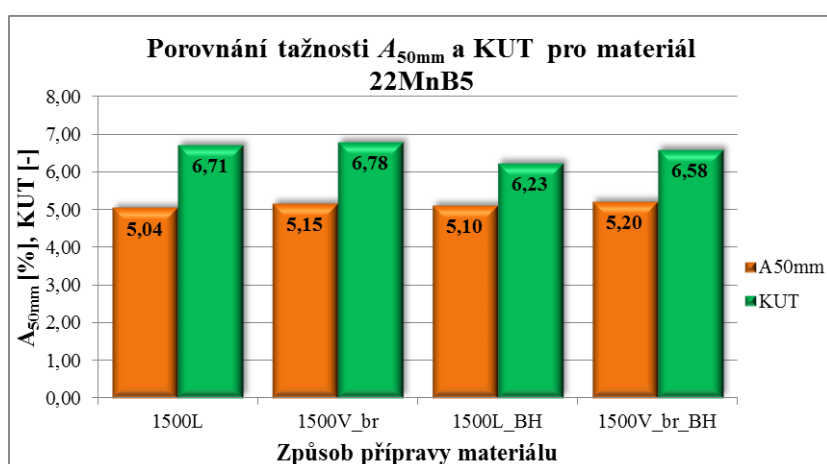
3.1. Analýza pevnosti a tažnosti pro konkrétní technologii dělení

Hodnoty byly naměřeny na zkušebním zařízení TIRAtest 2300 určeného pro zkouška tahem. Zkušební vzorky byly připraveny pomocí laserového paprsku (označen 1500L) a vodního paprsku s následným zabroušením řezných hran (označen 1500V_br). Materiál vystaven BH efektu je označen BH, kde k vyhřátí materiálu došlo v peci.



Obrázek 2. Porovnání meze kluzu a pevnosti v závislosti na technologii dělení

Z obrázku 1 je patrné, že při porovnání uvažovaných výrobních technologií dosahuje vyšších mechanických hodnot vzorek řezaný vodou s upravenou řeznou hranou. Mez kluzu u vodou řezaných vzorků s upravenou hranou je vyšší o 86 MPa (7,2 %) než u laseru. Po BH efektu je u vodou dělených vzorků s obrobenou hranou vyšší mez kluzu o 29 MPa (2,4 %). Obecně u uvažovaných technologií dochází vlivem BH efektu ke zvýšení $R_{p0,2}$. Z hlediska meze pevnosti dosahuje vyšších hodnot opět vodou dělený vzorek s upravenou hranou, rozdíl oproti laseru je 96 MPa (6,1 %). Po BH efektu dojde celkově k mírnému poklesu R_m , přesto rozdíl obou technologií je 88 MPa (5,7 %).

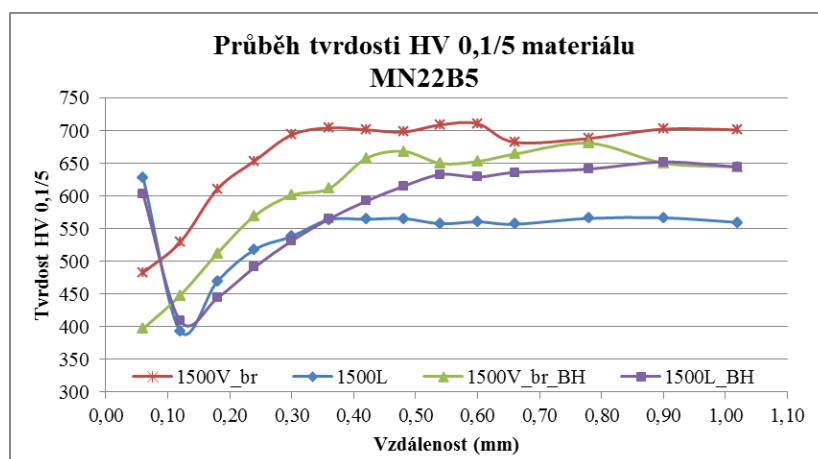


Obrázek 3. Porovnání tažnosti a KUT v závislosti na technologii dělení

U porovnávaných tažností je rozdíl minimální, protože se pohybují okolo 5 % (Obrázek 3.). Komplexní ukazatel tvařitelnosti pro testované materiály ukazuje, že z uvažovaných technologií vychází o trochu lépe materiál dělený vodním paprskem a následně mechanicky obrousit řezné hrany. Po BH efektu dojde u tohoto druhu dělení k mírnému poklesu KUT, ale i tak vychází tento ukazatel vyšší než u dělení laserem.

3.2. Analýza mikrotvrdosti pro konkrétní technologii dělení

Analýza mikrotvrdosti proběhla na mikrotvrdoměru Qness Q30A při zatížení HV0,1. Vzorky byly zalaty v dentakrylu a pomocí metalografické brusky obroušeny z důvodu odstranění nerovné povrchové vrstvy. Hlavním prvkem zkoumání byla změna mikrotvrdosti od řezné hrany dále do základního materiálu.



Obrázek 4. Průběh mikrotvrdosti v závislosti na technologii dělení

Na obrázku 4 je porovnání průběhu tvrdosti v závislosti na vzdálenosti od hrany děleného vzorku. Technologie řezání vodním paprskem nemá žádnou tepelně ovlivněnou oblast, vlivem broušení dochází v těsné blízkosti řezné hrany ke snížení tvrdosti. Vlivem BH efektu dochází k poklesu tvrdosti vzorků o cca 80 HV 0,1/5. U vzorků dělených laserem je na průběhu tvrdosti vidět významný vliv tepelně ovlivněné oblasti od působení laserového paprsku. Zde dochází k výraznému poklesu tvrdosti. Obecně u laseru dojde vlivem BH efektu k nárůstu tvrdosti se zvětšující se vzdáleností od řezné hrany.

4. Vodíková křehkost

Pod pojmem vodíková křehkost rozumíme pokles plastických vlastností materiálu způsobený přítomností vodíku. Na vodíkovou křehkost je možno pohlížet jako na vnitřní vodíkové zkřehnutí, které je způsobeno vodíkem pohlceným v materiálu při výrobě, tepelném zpracování nebo různých technologických operacích bez přítomnosti korozního prostředí. Dále lze vyčlenit ještě vnější vodíkové zkřehnutí vyvolané atomárním vodíkem, který je ve styku s povrchem kovu a okolním korozním prostředím. Vodíkovou křehkost lze také rozlišit na vratnou a nevratnou. Vratná vodíková křehkost je degradace materiálu, která se projevuje jen po dobu přítomnosti vodíku. Pokud zdroj vodíku přestane působit, dojde po jisté době a za určitých okolností k obnově původních vlastností materiálu vyžiháním, oproti tomu nevratná vodíková křehkost trvá, i když zdroj vodíku přestane působit a k obnově vlastností materiálu již nedojde[2].

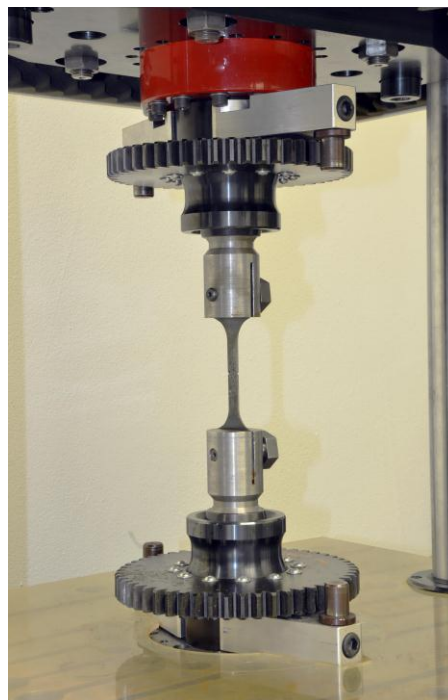
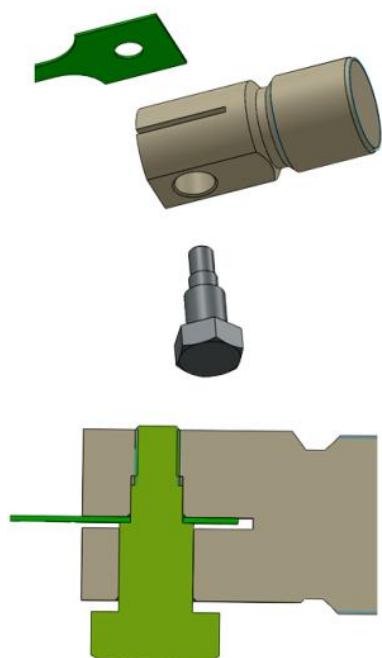
4.1. Zkoušky pro zjištění náchylnosti materiálu k vodíkovému křehnutí

Po prvním nástupu plastické deformace se křehkost začne rychle projevovat a po dosažení určitého stupně deformace v závislosti na obsahu vodíku v kovu nastává křehký lom. U vzorků s velkou pevností, které jsou bohatě nasyceny vodíkem, se na ploše lomu vytvoří tzv. rybí oka, tj. lesklá místa, na nichž je zřejmé, že porušení soudržnosti kovu vzniklo uvnitř vzorku dříve, než proběhl lom. Projevy vratné a nevratné vodíkové křehkosti se nejčastěji experimentálně studují technikami měření podmínek potřebných pro vznik předčasných lomů a technikami měření parametrů lomové houževnatosti za spolupůsobení vodíku[3]. Pro zjištění míry, do jaké kov zkřehl, jsou nejvhodnější běžné zkušební tyče pro zkoušení jednoosým tahem i speciálně upravené tyče např. s vrubem nebo jednoduché ocelové pásky pro zkoušení ohybem. Vyhodnocení vodíkové křehkosti se běžně provádí pomocí zkoušek mechanických vlastností, vizuálními zkouškami, analytickými metodami a především statickými zkouškami namáhání.

4.2. Návrh přípravku a metodiky pro zjištění vodíkového křehnutí

Pro testování materiálu bylo nutné navrhnout a vyrobit přípravek, který bude sloužit jako upínací čelisti při tahovém zatěžování. Hlavní požadavek byl na pevné zajištění zkušební tyče, aby nedocházelo vlivem zatěžující síly k prokluzu z čelistí. Další část se zabývá nalezením vhodné metodiky měření, která vychází především z normované zkoušky ČSN EN 2832 Norma určuje zkušební metodu ke stanovení vodíkové křehkosti ocelí během chemických nebo elektrolytických povrchových úprav zkouškou tahem na zkušebním tělese s vrubem. Zkušební tělesa musí být po dobu 200 hodin zatížena při okolní teplotě na hodnotu 75 % pevnosti v tahu tyče s vrubem bez povrchové úpravy. Do 200 hodin není přípustný žádný lom zkušební tyče. [4]

Na obrázku 5 vlevo je zobrazen návrh přípravku, kde uchycení zkušební vzorku je uskutečněno pomocí speciálního šroubu sloužící jednak jako čep a také zajišťuje přítlak ke stěně čelisti a stabilitu vzorku.



Obrázek 5. Návrh a umístění zkušebního přípravku

Samotná zkouška se provádí na zařízení od Zwick Roell Amsler 100 HFP 5100 sloužící pro dynamické zatěžování. Zkušební vzorek je uzpůsoben pro pevné uchycení pomocí speciálního šroubku, ve středu je opatřen vrubem pro přesně definované místo možného lomu.

5. Závěr

První část příspěvku se zabývá nalezením vhodné metody přípravy vzorků, které jsou určeny pro testy na vodíkovou křehkost. Na základě zjištění mechanických vlastností vyšla jako vhodná varianta použití dělení materiálu vodním paprskem s následným zabroušením řezných hran. Pro samotnou zkoušku byl vyroben přípravek sloužící jako čelisti pro pevné uchycení zkušební vzorku. Přednosti přípravku spočívají v jednoduchosti konstrukce a uchycení vzorku. Metodika testování byla stanovena na tahové zatížení o velikosti 90% meze pevnosti materiálu po dobu trvání 100 hodin. Vyhodnocení zkoušky spočívá v kontrole zkušební vzorku hlavně v okolí oblasti vrubu. Aby byl materiál hodnocen jako odolný proti vodíkové křehkosti nesmí dojít k přetržení, nebo tvorbě trhlin.

Literatura

- [1] NADERI, M. Hot Stamping of Ultra High Strength Steels, *Institut für Eisenhüttenkunde Dissertation RWTH Aachen 2007*
- [2] ŠINDELKA, V. 2011. *Vodíková křehkost spojovacích šroubů*. Brno. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [3] NAYAR, A. 2005. *Testing of metals*. India: Tata McGraw-Hill Publishing. ISBN 978-0-07-058164-7.
- [4] ČSN EN 2832. *Vodíková křehkost ocelí - zkouška tahem na zkušebním tělese s vrubem*. 1995. Praha: Český normalizační institut.

Článek vzniknul na základě podpory projektu studentské grantové soutěže SGS 21121

Název	Studentská vědecká a odborná činnost 2016 - Strojírenství
Autor	kolektiv autorů
Vydavatel	Technická univerzita v Liberci
Určeno pro	studenty
Schváleno	Rektorátem TUL dne 23.5.2016, čj. RE 14/16
Vyšlo	v květnu 2016
Vydání	1.
Počet stran	179
Tiskárna	Vysokoškolský podnik Liberec, spol. s r.o., Studentská 1402/2, Liberec
Číslo publikace	55-014-16

ISBN 978-80-7494-279-2