

Návrh konstrukce a výroby kompozitních pružin

Petr Okál

Bakalářská práce
2017



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr Okál**
Osobní číslo: **T15128**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Návrh konstrukce a výroby kompozitních pružin**

Zásady pro vypracování:

1. Teoretická část
2. Konvenčně využívané řešení pro výrobu ocelových pružin.
3. Výpočet ocelových pružin.
4. Srovnání materiálů pro výrobu pružin.
5. Možnosti využití pružin.
6. Praktická část
7. Popis aktuálního stavu pro danou aplikaci dle doporučení vedoucího práce.
8. Technologie pro výrobu kompozitních pružin.
9. Návrh pro nahrazení ocelové vinuté pružiny kompozitním materiálem.
10. Shrnutí zadané problematiky a formulace závěru.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího bakalářské práce.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Lukáš Maňas

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

2. ledna 2017

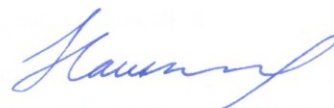
Termín odevzdání bakalářské práce:

19. května 2017

Ve Zlíně dne 26. ledna 2017



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: OKA¹ PETR

Obor: Technologická zařízení

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 19.5. 2017

..... Ouk

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlázení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³¹ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou pružin a jejich vlastností. Bakalářská práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části jsou popsány jednotlivé typy pružin, jejich výpočet a použití, dále pak základní složky kompozitních struktur, výztuže a matrice. Praktická část práce se více zaměřuje na kompozity, jejich výrobu, výpočet kompozitní šroubovitě pružiny a návrh formy pro vakuové formování kompozitové pružiny. Celá forma byla modelována v programu PTC Creo 2.0.

Klíčová slova: pružina, kompozit, ocel, síla, RTM

ABSTRACT

This thesis deals with the problematics of springs and their features. Bachelor thesis is divided into theoretical and practical part. In theoretical part are described individual types of springs, their calculation and usage, then basic constituents of composite structures, reinforcements and matrix. Practical part of the thesis focuses more on composites, their production, calculation of the composite helical spring and design of mold for vacuum shaping of composite spring. Whole mold was drawn in PTC Creo 2.0.

Keywords: spring, composite, steel, force, RTM

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Lukáši Maňasovi za poskytnuté rady a připomínky, které mi pomohly při tvorbě bakalářské práce.

Dále pak děkuji firmě MAGNETON a.s. za propůjčenou licenci PTC Creo 2.0 a PTC Mathcad.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovával samostatně. Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KONVENČNĚ VYUŽÍVANÉ ŘEŠENÍ PRO VÝROBU OCELOVÝCH PRUŽIN	12
1.1 ŠROUBOVITÁ PRUŽINA	12
1.1.1 Šroubovitá tlačná pružina.....	12
1.1.2 Šroubovitá tažná pružina.....	13
1.1.3 Výroba.....	13
1.2 TALÍŘOVÁ PRUŽINA.....	14
1.2.1 Popis.....	14
1.2.2 Výroba.....	14
1.3 LISTOVÁ PRUŽINA	15
1.3.1 Popis.....	15
1.3.2 Specifické vlastnosti.....	16
1.3.3 Výroba.....	17
1.4 PARABOLICKÁ PRUŽINA	17
1.4.1 Popis.....	17
1.4.2 Výroba.....	17
1.5 OSTATNÍ PRUŽINY	18
2 VÝPOČET PRUŽIN	19
2.1 ŠROUBOVITÁ PRUŽINA	20
2.2 TALÍŘOVÁ PRUŽINA.....	21
2.3 LISTOVÁ PRUŽINA	22
3 SROVNÁNÍ KONVENČNÍCH MATERIÁLŮ S KOMPOZITNÍMI	25
3.1 KOMPOZITY.....	25
3.1.1 Výztuže v kompozitech.....	25
3.1.1.1 Roving.....	26
3.1.1.2 Rohož.....	26
3.1.1.3 Tkanina	27
3.1.2 Matrice v kompozitech.....	28
3.1.2.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R).....	28
3.1.2.2 Vinylesterové (VE-R) nebo fenakrylátové (PFA-R) pryskyřice	28
3.1.2.3 Epoxidové pryskyřice (EP-R).....	28
3.1.2.4 Fenolické pryskyřice.....	28
3.1.2.5 Metakrylátové pryskyřice (MA-R).....	28
3.1.2.6 Izokyanátové pryskyřice	29
3.1.3 Výhody kompozitních materiálů.....	29
3.1.4 Nevýhody kompozitních materiálů	30
3.2 OCELI.....	31
3.3 OSTATNÍ MATERIÁLY	31
3.3.1 Slitiny mědi s obsahem beryllia	31
3.3.2 Slitiny mědi bez obsahu beryllia.....	32
3.3.3 Kaučuk	32
4 VYUŽITÍ JEDNOTLIVÝCH PRUŽIN	33

4.1	POUŽITÍ ŠROUBOVITÝCH PRUŽIN	33
4.2	POUŽITÍ TALÍŘOVÝCH PRUŽIN.....	33
4.3	POUŽITÍ LISTOVÝCH PRUŽIN	34
4.4	POUŽITÍ OSTATNÍCH PRUŽIN	35
II	PRAKTICKÁ ČÁST	36
5	POPIS AKTUÁLNÍHO STAVU PRO DANOU APLIKACI.....	37
5.1	ŠROUBOVITÁ PRUŽINA OD AUDI.....	37
5.2	LISTOVÁ PRUŽINA V NOVÉ GENERACI VOLVA	38
5.3	NAHRAZENÍ ŠROUBOVITÉ PRUŽINY ZA SÉRII KOMPOZITNÍCH TALÍŘOVÝCH	39
6	TECHNOLOGIE PRO VÝROBU KOMPOZITNÍCH PRUŽIN.....	40
6.1	NÁVRH TVARU A VOLBA TECHNOLOGIE	40
7	NÁVRH KOMPOZITNÍ PRUŽINY	42
7.1	VÝPOČET KOMPOZITNÍ PRUŽINY	42
	NÁVRH VÝROBY KOMPOZITNÍ PRUŽINY POUŽITÍM TECHNOLOGIE	
	LIGHT RTM.....	45
7.2	PŘEDLOHA.....	45
7.3	DĚLENÉ JÁDRO	46
7.4	SPODNÍ DĚLENÝ RÁM.....	47
7.5	VRCHNÍ DĚLENÝ RÁM.....	48
7.6	SLOŽENÍ FORMY	48
7.7	FINÁLNÍ MONTÁŽ	49
	ZÁVĚR	52
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	53
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	56
	SEZNAM OBRÁZKŮ	57
	SEZNAM TABULEK.....	59
	SEZNAM PŘÍLOH.....	60

ÚVOD

Kompozitní materiály jsou relativně nové materiály, které se využívají pro své vlastnosti čím dál častěji a to především v aplikacích, kde je kladen důraz na váhu či odolnost vůči vnějším vlivům. Může to být například automobilový, letecký, stavební či chemický průmysl.

Kompozit je definován jako materiál, který je složený ze dvou či více složek. Každá z těchto vstupujících složek má vlastnosti, které mají v součtu silnější účinek, než každá složka samostatně. Jedná se o tzv. synergický efekt. Kompozity svými vlastnostmi mohou v jistých směrech směle konkurovat konvenčním materiálům.

Celé toto odvětví se vyvíjí velmi rychle dopředu. Vyvíjí se nové materiály i výrobní postupy, což posouvá kvalitu a uplatnění výrobků ještě o něco dál.

Teoretická část práce rozebírá problematiku pružin obecně. Popisuje jednotlivé typy ocelových pružin, jejich výpočet i použití v běžném životě, ale i ve speciálních aplikacích. Poté i nastiňuje problematiku kompozitních materiálů, jejich výztuží a maticí.

Cílem této práce je návrh formy a technologie pro výrobu kompozitní pružiny technologií LRTM (Light Resin Transfer Moulding). Jedná se o modifikaci klasické RTM technologie, která přináší několik výhod.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KONVENČNĚ VYUŽÍVANÉ ŘEŠENÍ PRO VÝROBU OCELOVÝCH PRUŽIN

Pružiny jsou mechanické součásti, které dokáží pojmout mechanickou energii na základě pružné deformace materiálu. Průběh závislosti zatížení na deformaci závisí na daném materiálu a geometrii pružiny. U pružin s lineární charakteristikou je tuhost pružiny konstantní, kdežto u nelineárních pružin je tuhost proměnlivá. Například u progresivních pružin je tuhost závislá na stlačení, čím větší stlačení, tím větší tuhost. Mechanické pružiny lze rozdělit podle použitého materiálu na kovové či nekovové a podle druhu zatížení (tah, tlak, krut, ohyb, smyk). Pružiny lze také použít k vytvoření předepsané síly nebo momentu, k utlumení rázů nebo kmitání, k pružnému spojení dvou či více součástí. V různých případech tedy lze navrhnout vhodnou pružinu bez ztráty bezpečnosti.[1]

1.1 Šroubovitá pružina

1.1.1 Šroubovitá tlačná pružina

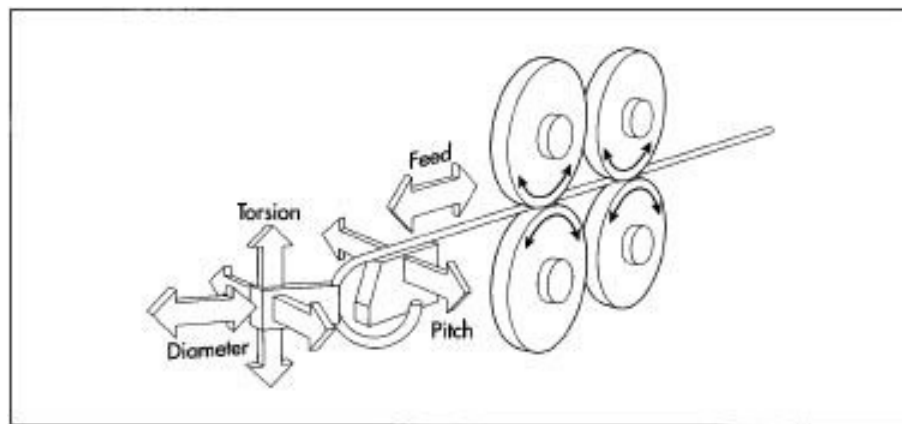
Pružiny ve tvaru válce tvořené šroubovitě vinutými dráty, se stálou vůlí mezi činnými závitky, schopné přijímat vnější síly působící proti sobě v jejich ose. Pružiny, které mají průměr drátu do 16 mm a jsou obvykle navíjeny za studena. Pro vysoce namáhané pružiny větších rozměrů s průměrem drátu nad 10 mm se používá formování za tepla. Tlačné pružiny se většinou vyrábějí z drátů a tyčí kruhového průřezu. U aplikace s vysokou zátěží a nízkou stavební výškou pružiny je možné použít drát s obdélníkovým průřezem (pružiny s $b > h$). [7]



Obr. 1. Příklady vinutých pružin [20]

1.1.2 Šroubovitá tažná pružina

Pružiny ve tvaru válce tvořené šroubovitě vinutými dráty, se stálou vůlí mezi činnými závitami, schopné přijímat vnější síly působící od sebe v jejich ose. Pružiny, které mají průměr drátu do 16 mm a jsou obvykle navíjeny za studena. Pro vysoce namáhané pružiny větších rozměrů s průměrem drátu nad 10 mm se používá formování za tepla. Obvykle jsou tažné pružiny vyráběny z drátů a tyčí kruhového průřezu. Pružiny s drátem obdélníkového průřezu se používají jen velmi málo. Vzhledem k tvaru se nedoporučuje používat tažné pružiny při únavovém (cyklickém) namáhání. [7]



Obr. 2. Princip výroby základní šroubovitě vinuté pružiny [21]

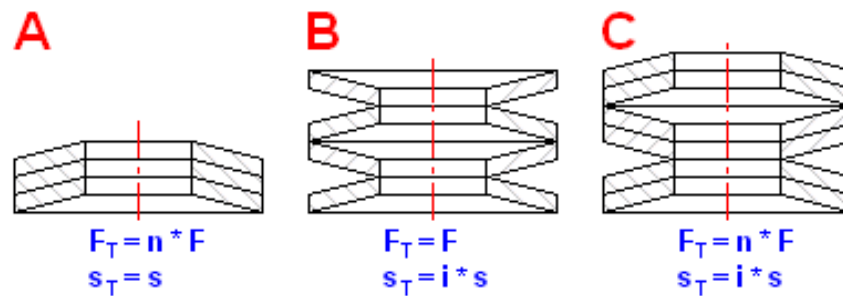
1.1.3 Výroba

Pro dráty do průměru asi 18 mm stačí podavač, který tlačí drát proti hlavě, která konec drátu formuje do požadovaného tvaru. Musí se počítat s pružnou deformací, která ohýbaný drát vrací o určitou část zpět, podle typu materiálu, ze kterého je pružina vyráběna. Nastavením hlavy a opěrného bloku se koriguje stoupání a vnější průměr pružiny. Po zhotovení pružiny se odsekne konec drátu za podavačem a pružina volně padá pryč. Pro silnější průměry drátu se musí nejdříve nahřát na požadovanou teplotu a potom až navinout na předem definovaný trn, ze kterého potom bude možné pružinu sesadit. Tento postup si však žádá chlazení v oleji a na závěr se ještě pružina temperuje kvůli křehkosti materiálu. Když je pružina vyrobená, obrousí se konce, pokud je to tedy žádáno a upraví povrch proti korozi, tím se předejde do jisté míry prasknutí. [38]

1.2 Talířová pružina

1.2.1 Popis

Mezikruhové prstence ve tvaru dutého komolého kužele, schopné přijímat vnější síly působící v jejich ose proti sobě. Průřez jednotlivého listu je zpravidla obdélníkový. Pružiny větších rozměrů ($t > 6$ mm) se někdy dělají s obrobenými plochami pro dosednutí. Talířové pružiny jsou určeny pro velká zatížení při malých deformacích. Užívají se jednotlivě nebo v sadách. Při použití pružin v sadě se musí vzít do úvahy vliv tření, které působí na každou vrstvu přibližně 3 až 5% zatížení, o tuto sílu se pak musí zvýšit pracovní zatížení nebo zmenšit tloušťka pružiny, pokud je tady předepsaná velikost zatížení. Napětí vznikající v talířové pružině je poměrně složité na popis. Maximální napětí (tlakové) vzniká ve vnitřním horním okraji, naopak na vnější spodní hraně vzniká napětí tahové. Maximální tlakové napětí slouží pro pevnostní kontrolu staticky zatížených pružin. U cyklicky namáhaných pružin se kontroluje průběh tahových napětí. [7]



Obr. 3. Uložení talířových pružin [7]

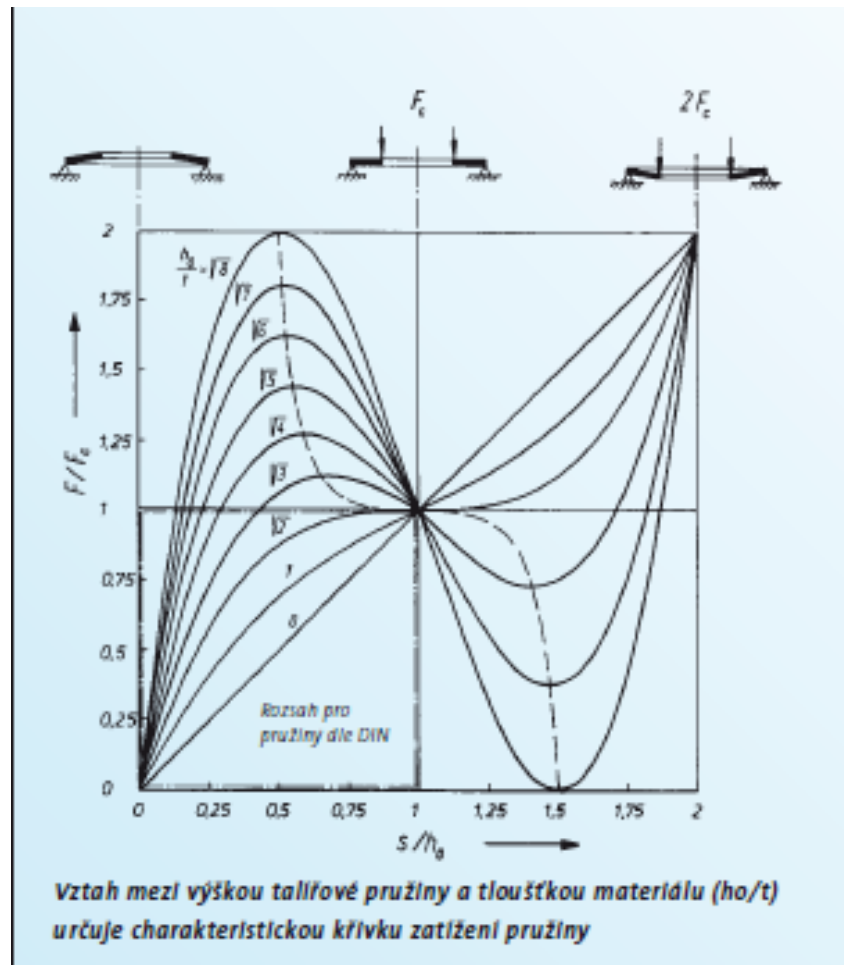
Paralelní uložení

Sériové uložení

Kombinované uložení

1.2.2 Výroba

Talířová pružina se vyrábí v jenom kroku, kdy speciální hydraulická hlava vystříhne z plechového polotovaru tvar pružiny a zároveň předem definovaný tvar hlavy nám polotovar promáčkne do požadovaného tvaru. Výhodou těchto pružin je, že se mohou skládat na sebe ať už sériově či paralelně. Výhodou je taktéž schopnost pracovat v malém rozmezí pohybu a přenos velké zatěžovací síly. [39]



Obr. 4. Vztah mezi výškou talířové pružiny a tloušťkou materiálu [22]

1.3 Listová pružina

1.3.1 Popis

Listové pružiny fungují na principu ohybem zatěžovaných dlouhých štíhlých nosníků obdélníkového průřezu. Používají se jednoramenné (vetknuté na jednom konci), nebo jako dvou-ramenné (podepřené na obou koncích). Listové pružiny lze využít samostatně, nebo v sadách (listové pružiny svazkové). [7]

Listové pružiny jsou vcelku jednoduché a vyznačují velkou únosností a vnitřním tlumením. Nevýhodami jsou velké rozměry, tudíž i hmotnost a poměrná náročnost na údržbu. Pracovní charakteristika této pružiny je téměř lineární. Různé progresivity pérování lze dosáhnout např. zkrácením délky hlavního listu a změnou počtu pružících listů. Nejčastějšími poruchami listových pružin bývá prasklý list nebo unavené listové pero.

1.3.2 Specifické vlastnosti

Samostatné pružiny

- vhodné pro malé a střední zatěžovací síly
- lineární pracovní charakteristika
- relativně nízká tuhost
- značné nároky na délku, jinak minimální potřebný prostor
- nízké výrobní náklady

Listové pružiny svazkové

- vhodné pro větší zatěžovací síly
- teoreticky lineární pracovní charakteristika (tření mezi listy způsobuje hysteretzní průběh pracovní křivky. Hystereze je označení pro takové chování dynamického systému, kdy výstupní veličina nezávisí jen na nezávisle proměnné vstupní veličině, ale i na předchozím stavu systému (tzv. „paměťový efekt“ systému.))
- relativně vyšší tuhost
- značné nároky na potřebný prostor
- náročné na údržbu (mazání a čistota) [7]



Obr. 5. Listová pružina [23]

1.3.3 Výroba

Listová pružina se vyrábí za tepla z ocelí 14 260, 15 260, 50CrV4, 51CrV4 nebo 54SiCr6. Výroba pružiny je založená na tvarování a rovnání za tepla v elektrických pecích, čímž se snižuje riziko oduhličení materiálu. Jednotlivé tvarovací úkony se provádějí v přípravcích či razidlech, v případě kusové výroby atypických tvarů ručně. Po ukončení tepelného zpracování jsou pružiny přerovnány a následně odzkoušeny dle zatěžující charakteristiky. Pružiny se vyrábějí v délce do 2000 mm. Stanovení tolerancí se uskutečňuje na základě dohody se zákazníkem. Listové pružiny k vozidlům se vyrábějí s větším počtem tenkých listů, neboť třením mezi listy se zvětšuje útlum kmitání pružiny. [6]

1.4 Parabolická pružina

1.4.1 Popis

Základní tvar je parabola s konečnou tloušťkou na koncích listů. Pokud je výpočtová šířka větší než předpokládaná stavební šířka, potom se volí pružina s více parabolicky tvarovanými listy uspořádaných na sobě. Jednotlivé listy se volí, jeden vůči druhému shodné a liší se jen ukončením. Na rozdíl od listové pružiny se listy dotýkají jen ve středu, kde jsou zafixovány a pak na koncích pružiny.

1.4.2 Výroba

Parabolická pružina se skládá ze stejných listů rozválcovaných do parabolického tvaru, který odpovídá jejich průběhu namáhání. Protože výchozí materiál má konstantní šířku a výšku, musí se průběh parabolického tvaru tloušťky provádět odpovídajícím válcováním. Při vrstvení listů se používají pozinkované vložky.

Standardní materiály pro výrobu parabolických pružin jsou: 15 260, 51CrV4, 52CrMoV4.



Obr. 6. Parabolická pružina [24]

1.5 Ostatní pružiny

- Pružiny namáhané krutem
- Pryžové pružiny (Bývají vyrobené z přírodní nebo syntetické pryže nebo pružného plastu. Dají se použít pro zatížení tlakem, smykem nebo krutem.
Bohužel mají omezenou životnost, protože trpí na degradaci vnějšími vlivy, například UV záření, také se lehce zahřívají nebo také stárnou samotným vymačkáním.)
- Pneumatické pružiny (využívají stlačitelnost plynů - pístnice, radiální a axiální měchy, hydropneumatická pružina)
- Speciální tvarové pružiny (například tvarová pružina na skákacích botách nebo protéze).



Obr. 7. Protéza s pružnou spodní částí [25]

2 VÝPOČET PRUŽIN

Pomocí výpočtů je možné relativně přesně popsat chování pružiny při zátěži, ve které bude pracovat, předejde se tím zbytečnému praskání a únavě pružin. Jedná se tedy o pevnostní a geometrický návrh, kdy pružina musí pracovat v oblasti pružné deformace materiálu. Funkce pružiny se posuzuje podle průběhu a velikosti její deformace v závislosti na působícím zatížení.



Obr. 8. Průběh deformace pružiny [7]

S ohledem na průběh deformace můžeme pružiny rozdělit do tří základních typů:

1. Pružiny s lineární charakteristikou

V grafickém vyjádření je to úsečka, jejíž sklon udává tuhost pružiny, což je konstanta vyjadřující sílu potřebnou k jednotkové deformaci pružiny. V tomto případě lze takové chování vyjádřit Hookovým zákonem.

2. Pružiny s degenerivní charakteristikou

Tuhost s výchylkou prudce klesá (téměř až k nule).

Příkladem je talířová pružina.

3. Pružiny s progresivní charakteristikou

Tuhost se s výchylkou zvyšuje.

Příkladem je šroubovitá pružina kuželová.

2.1 Šroubovitá pružina

Drát o průměru d , navinutý kolem osy v určité vzdálenosti D a se stoupáním p . Modifikací těchto parametrů dostáváme pružiny s jinými vlastnostmi. Tyto pružiny se vyznačují dobrým využitím materiálu a svou lehkostí. Ve šroubovitých pružinách není jen jedno namáhání, jedná se o kombinované namáhání složené z tlaku (tahu), ohybu, krutu a smyku. Nejčastěji se používá drát kruhového průřezu.

$$s = \frac{8 \cdot F \cdot n \cdot D^3}{G \cdot d^4} \quad (1)$$

s - stlačení pružiny [mm]

Maximální smykové napětí je dáno superpozicí smykového napětí krouticího momentu a smykového napětí od posouvající síly. Postupným upravováním se dostaneme k tomuto tvaru rovnice.

$$\tau = K_S \cdot \frac{8 \cdot F \cdot D}{\pi \cdot d^3} \quad (2)$$

K_S – součinitel smykového napětí

K_S vyjadřuje vliv posouvající síly na smykové napětí

$$K_S = \frac{2C + 1}{2C} \quad (3)$$

$$C = \frac{D}{d} \quad (4)$$

U většiny šroubovitých válcových pružin se hodnota C (poměr vinutí) pohybuje mezi 6 až 12, čemuž odpovídají hodnoty součinitele smykového napětí od 1,08 do 1,04.

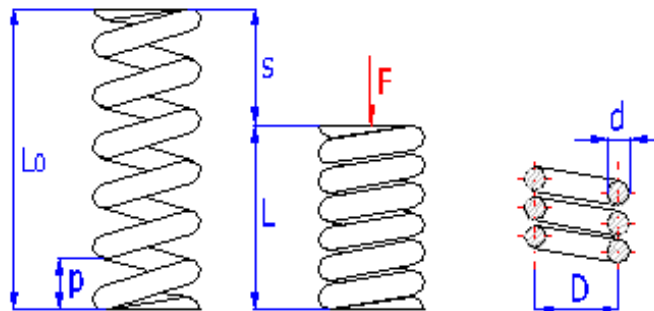
$$k = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot n \cdot D^3} \quad (5)$$

k - tuhost pružiny [N/mm]

d - průměr drátu [mm]

D - střední průměr pružiny [mm]

Vzorce byly ověřeny podle ČSN 02 6001, kde sice měly některé vzorce jiný tvar, ale po rozepsání a upravení byly identické. [1]



Obr. 9. Základní veličiny u šroubovitě pružiny [7]

2.2 Talířová pružina

Talířové pružiny jsou vhodné pro velké zatěžovací síly při poměrně malých deformacích, proto můžou být v porovnání s ostatními pružinami menší. Výrazný vliv na funkci talířových pružin má tření. Při zatěžování pružiny dochází ke tření v dosedací ploše (na okrajích) pružiny. U sady paralelně uložených pružin dále dochází k povrchovému tření mezi jednotlivými disky. Vliv tření se projeví zvětšením síly při zatěžování a zmenšením síly při odlehčování pružiny. [7]

$$F_{TC} = F \cdot \frac{n}{1 \pm \mu_M(n-1) \pm \mu_R} \quad (6)$$

kde:

F_{TC} ...korigovaná síla pružiny [N]

μ_M ...součinitel povrchového tření [-]

μ_R ...součinitel tření na okrajích [-]

- při zatěžování

+ ... při odlehčování

$$F = \frac{4 \cdot E}{1 - \mu^2} \cdot \frac{t^3 \cdot s}{K_1 \cdot D_e^2} \cdot \left[\left(\frac{h_0}{t} - \frac{s}{t} \right) \cdot \left(\frac{h_0}{t} - \frac{s}{2t} \right) + 1 \right] \quad (7)$$

$$k = \frac{4 \cdot E}{1 - \mu^2} \cdot \frac{t^3}{K_1 \cdot D_e^2} \cdot \left[\left(\frac{h_0}{t} \right)^2 - 3 \cdot \frac{h_0}{t} \cdot \frac{s}{t} + \frac{3}{2} \left(\frac{s}{t} \right)^2 + 1 \right] \quad (8)$$

$$K_1 = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\left(\frac{\delta - 1}{\delta} \right)^2}{\frac{\delta + 1}{\delta - 1} - \frac{2}{\ln \delta}} \quad (9)$$

D_e - vnější průměr pružiny [mm]

E - modul pružnosti v tahu [MPa]

F - síla pružiny [N]

h - výška talíře [mm]

h_0 - vnitřní výška talíře ($h_0=h-t$) [mm]

k - tuhost pružiny [N/mm]

K_1 - tvarový součinitel [-]

s - deformace (stlačení) pružiny [mm]

t - tloušťka materiálu [mm]

μ - poissonovo číslo [-]

δ - poměr průměrů ($\delta=D_e/D_i$) [-]

[7]

Vzorce byly překontrolovány podle normy ČSN 02 6060.

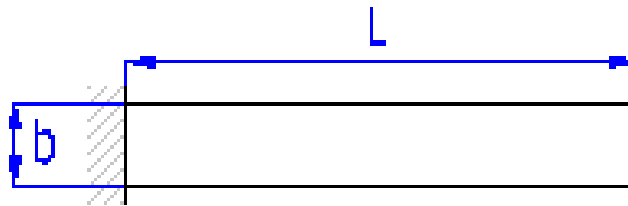
Tab. 1. Doporučené rozměry talířové pružiny [7]

poměr průměrů D_e/D_i	1.75 - 2.5
poměrná výška h_0/t	0.4 - 1.4
poměr D_e/t	16 - 40
počet paralelních disků n	max. 3
počet sériových disků i	max. 20
celkem disků v sadě $n*i$	max. 30
štíhlostní poměr L_0/D_e	max. 3

2.3 Listová pružina

Listové pružiny fungují na principu ohybem zatěžovaných dlouhých štíhlých nosníků obdélníkového průřezu. Pro výpočet se používá teorie vetknutého nosníku na jedné straně. Oka na konci listu pro upevnění z výpočtu se vypouští. Šířka listu se volí podle zatěžující síly, přičemž se listy dotýkají po celé délce, posouvají se jeden po druhém při pružení a přenáší tlak mezi nimi – proměnná hystereze. Samotné listy jsou vystředěny drážkou proti posunu do strany a mohou se mezi ně vkládat vložky.

Samostatný list pružiny

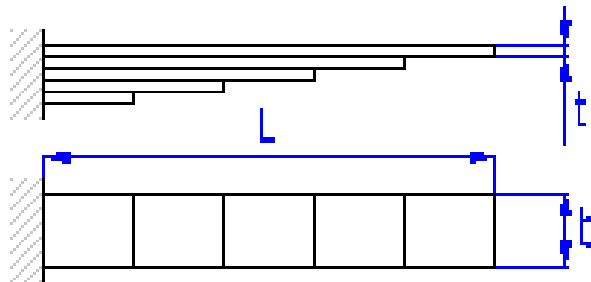


Obr. 10. Samostatná listová pružina [7]

$$s = \frac{4 \cdot F \cdot L^3}{E \cdot b \cdot t^3} \quad (10)$$

$$\sigma = \frac{6 \cdot F \cdot L}{b \cdot t^2} \quad (11)$$

Pružina ve svazku



Obr. 11. Listová pružina ve svazku [7]

$$s = \psi \cdot \frac{4 \cdot F \cdot L^3}{E \cdot n \cdot b \cdot t^3} \quad (12)$$

$$\sigma = \frac{6 \cdot F \cdot L}{n \cdot b \cdot t^2} \quad (13)$$

$$\psi \approx \frac{3}{\left(2 + \frac{n' + 1}{n}\right)} \quad (14)$$

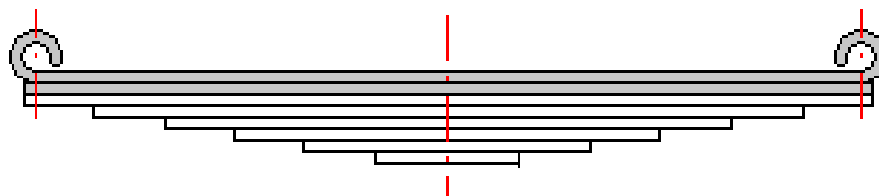
[7]

b - šířka listu pružiny [mm]

E - modul pružnosti v tahu [MPa]

- F - zatížení pružiny [N]
L - funkční délka pružiny [mm, in]
n - celkový počet listů pružiny [-]
n' - počet extra přidaných listů plné délky [-]
s - deformace (průhyb) pružiny [mm]
t - tloušťka listu pružiny [mm]
 ψ - tvarový součinitel [-]
 σ - napětí materiálu pružiny v ohybu [MPa] [7]

Pro zvýšení tuhosti a únosnosti pružiny se mohou přidat přídavné listy pružiny, ty jsou také obdélníkového průřezu s konstantním profilem. Mohou být také ukončeny oky, které slouží k uchycení pružiny v pracovní poloze. Tato oka slouží k zasunutí ložiskového čepu, kluzného pouzdra nebo silentbloku. Pokud mají být okem přenášeny velké síly, může být oko konstrukčně řešeno zesílením koncového průřezu. Pružinová oka pro kluzná pouzdra, ložiskové čepy nebo silentbloky musí být třískově opracovány (vystružováním). Pro některé konstrukční aplikace je nutné i broušení oka na šířku. [14]



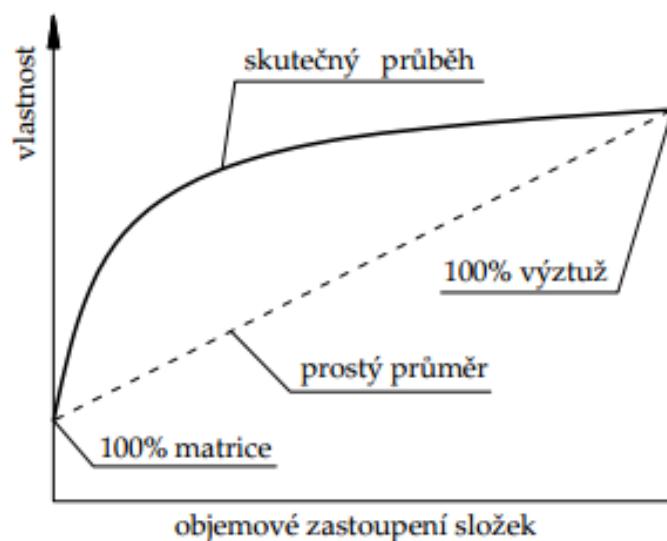
Obr. 12. Listová pružina s extra listy [7]

3 SROVNÁNÍ KONVENČNÍCH MATERIÁLŮ S KOMPOZITNÍMI

3.1 Kompozity

Kompozit je látka složená ze dvou a více složek, každá z nich má rozdílné vlastnosti, a když se spojí v daný kompozit, tak výsledné vlastnosti jsou jiné, než které mají jednotlivé složky samostatně. Například to může být kompozit skleněných vláken a pryskyřice, nebo také uhlíková vlákna, aramidová i ocelová, ale i něco obyčejného, s čím se člověk setkává denně, jako třeba železobeton, dřevo či živočišné tkáně.

Synergický efekt se označuje jako situace, kdy výsledný efekt je větší, než součet účinků jednotlivých složek v tomto materiálu. Základní vlastnosti materiálu, např. objemovou hmotnost je možné stanovit z jednoduchých směšovacích pravidel. Většina vlastností je však ovlivněna synergickým chováním a jejich přesné určení je už poněkud obtížnější. Většina kompozitů se vyrábí tak, aby synergický efekt byl co největší. [10]



Obr. 13. Synergický efekt [26]

3.1.1 Výztuže v kompozitech

Pro zlepšení mechanických vlastností kompozitů jsou přidávána vlákna. Je to dlouhý útvar, jehož délka převyšuje všechny ostatní rozměry, hlavně pak průměr. V současné době se věnuje výzkumu kompozitů značná pozornost, a jelikož se dá kombinovat téměř cokoli, tak je hodně možností k odzkoušení. Známé jsou třeba kompozity s uhlíkovými vlákny, skleněnými vlákny, ale i s přírodními vlákny. Tato vlákna přenášejí většinou tahové namáhání. [17] Podle toho, jak jsou vlákna v prostoru umístěna, se dále dělí.

3.1.1.1 Roving

Jedná se o „nekonečný“ pramen složený z 20ti až 60ti konců, sdružených z rovnoběžně uložených nestočených vláken nebo tažených přímo z taveniny (6-12000 elementárních vláken). Zpracovává se buď sekáním nebo tkaním, navíjením nebo tažením nekonečného pramence. Spředený roving se vyrábí z vláken stočených kolem podélné osy. [2]



Obr. 14. Roving [27]

3.1.1.2 Rohož

Jedná se o plošnou výztuž skládající se z nekonečných nebo sekaných, nahodile orientovaných, pramenců vláken spojených polymerními pojivy rozpustnými v rozpouštědlových pryskyřicích tzv. sizingem. Pokud se jedná o rohož z kontinuálních vláken tak není potřeba fixovat jejich vzájemnou polohu. Celá rohož se pak lisuje za tepla, abychom docílili soudržnosti pro následné operace s rohoží. Používá se v případech, kdy není žádaná viditelná textura sklovýztuže a také jako první vrstva, která zvyšuje odolnost proti vnějším vlivům, třeba chemickým sloučeninám. [8]



Obr. 15. Rohož [28]

3.1.1.3 Tkanina

Tkanina vzniká pravidelným propletením rovingu nebo vláken, díky tomu dostaneme na jednotku plochy daleko více vláken než u rohože, kompozit je potom daleko pevnější.

Nejvýznamnější charakteristikou tkaniny je tzv. „gramáž“, která udává hmotnost g/m^2 (udává též jemnost tkaniny) a typ textilní vazby. Tkaniny se též dají dělit podle typu vazby na základní a jednoduchou plátňovou vazbu, keprovou vazbu, která se vyznačuje vyšší pevností, protože vlákna jsou méně zvlněná a atlasovou (saténovou) vazbu, která má ještě menší vychýlení vláken. [2]



Obr. 16. Tkanina [29]

3.1.2 Matrice v kompozitech

Matrice neboli pojivo je materiál, kterým je prosycen systém vláken a partikulárních komponent tak, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek. Úkolem matrice je zaručení geometrického tvaru, přenos sil a ochrana vláken. Matrice musí mít vhodnou viskozitu a povrchové napětí, aby vlákno smočila úplně a bez bublin. [2] V běžné praxi se nejčastěji používají reaktivní pryskyřice, které se buď samostatně, nebo za pomoci tvrdidel, katalyzátorů či aldehydů vytvrzují polyadící nebo polymerací bez odštěpení těkavých složek. Tyto pryskyřice se nazývají lici, laminační, impregnační, prosycovací či zalévací.

3.1.2.1 *Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)*

Bývá složena z nasycené karbové kyseliny a alespoň jednou složkou alkoholu. Pryskyřice je rozpouštěna v monomerním rozpouštědle, se kterým je kopolymerizovatelná. Polyesterové pryskyřice mají dobré mechanické, elektrické a chemické vlastnosti. Polyestery jsou vhodné do slabě kyselého prostředí.

3.1.2.2 *Vinylesterové (VE-R) nebo fenakrylátové (PFA-R) pryskyřice*

Bývá tvořena z fenylových nebo fenylenových derivátů. Koncová skupina řetězce bývá esterifikovaná kyselina akrylová. Pryskyřice je rozpouštěna v monomerním rozpouštědle, se kterým je kopolymerizovatelná. Vinylestery mají dobrou odolnost v kyselém i alkalickém prostředí, zvláště ve vysokých teplotách. Skelným vláknem vyztužené vinylesterové profily mají dobrou elektrickou a tepelnou izolaci. [37]

3.1.2.3 *Epoxidové pryskyřice (EP-R)*

Mají dostatek epoxidových skupin pro vytvrzení. Mají dobré elektroizolační vlastnosti v široké oblasti teplot, cenná je i jejich značná odolnost proti vodě, roztokům alkálií i kyselin a některým rozpouštědlům.

3.1.2.4 *Fenolické pryskyřice*

Jsou vyráběny kondenzací fenolů a vodných roztoků aldehydů.

3.1.2.5 *Metakrylátové pryskyřice (MA-R)*

Jsou vyráběny z polymerizovatelné směsi polymerních a monomerních esterů kyseliny metakrylové. Tyto pryskyřice je možné naplnit retardéry hoření, čímž přináší vynikající řešení pro aplikace, kde je požadována ohnivzdornost výrobku.

3.1.2.6 Izokyanátové pryskyřice

Obsahují dostatek izokyanátových skupin nutných pro vytvrzení.

[2]

Tab. 2. Mechanické vlastnosti základních typů matric [13]

Pryskyřice	Hustota [g/cm ³]	Modul pružnosti [GPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Deformace do lomu [%]
Epoxidová	1,1-1,4	2,1-6,0	35-90	1-10
Polyesterová	1,1-1,5	1,3-4,5	45-85	1-5
Fenolická	1,3	4,4	50-60	1-3

3.1.3 Výhody kompozitních materiálů

- Manipulace s tímto materiálem je mnohem snazší a bezpečnější. V porovnání s ocelí, je kompozit až 4x lehčí, měrná hmotnost (1800 Kg/m³).
- Výrobky netrpí trvalou deformací po úderu nebo nadměrném zatížení jako kovové prvky.
- Kompozity odolávají dlouhodobě řadě chemikálií a nekorodují, nemusí se dodatečně natírat a ani jinak povrchově chránit.
- Kompozitní konstrukce se nemusí zemnit, jsou vhodné pro aplikace, kde může dojít k úrazu elektrickým proudem, bleskem nebo i tam, kde působí bludné proudy.
- Kompozity se dobře opracovávají. Jejich řezný odpor je podobný jako při zpracování tvrdého dřeva. Navíc, při obrábění nevznikají nebezpečné ostré hrany a třísky jako u oceli.
- Možnost vyrábět designově složité výrobky
- Odolnost vůči ultrafialovému záření
- Nízká degradace materiálu v čase
- Hygienická nezávadnost
- Výborné mechanické pevnosti
- Pevnost v tahu od 240 MPa do 1000 MPa (skleněná vlákna), resp. 3000 MPa (uhlíková vlákna)
- Nehořlavost
- Měrná tepelná vodivost

0,19 W.m-1.K-1 pro aplikace s požadavky na potlačení tepelných mostů

- Dlouhodobá tepelná odolnost
Podle typu pryskyřice 100 až 180°C
- Povrchová rezistivita
[5]

3.1.4 Nevýhody kompozitních materiálů

- Mnohdy složité způsoby zpracování a následná výroba součástí
- Horší mechanické vlastnosti při působení síly kolmo na orientaci vláken
- Velké náklady při dimenzování náročných konstrukcí
- Špatná identifikace a oprava lokálních poškození

Tab. 3. Vlastnosti kompozitů s různými vlákny [2]

Vlastnosti	Kompozity		
	vyztužené sklem	aramidové	uhlíkové
Hustota	+ -	++	+
Mez pevnosti v tahu	+	+	+
Modul pružnosti	-	+	++
Mez pevnosti v tlaku	+	-	+
Rázová houževnatost	+	+	-
Tlumení	-	+	-
Chování při statickém a dynamickém namáhání	+	+	++
Dielektrické vlastnosti	++	++	-
Adheze, přilnavost	++	-	+
Nasákavost	+	-	+
Cena	++	+ -	-

Při výběru vlákna hraje kromě jeho vlastností také jeho cena. Ta se liší podle typu materiálu, ale také podle zpracování. Nejlevnější bývá skleněné vlákno, které se vyrábí z levných a snadno dostupných surovin. Naopak aramidová vlákna sice taky vychází z levných surovin, jejich výroba je ale podstatně dražší. Nejdražší jsou vlákna uhlíková. Výroba je energeticky náročná a přitom musí být poměrně kvalitní. Speciální typy uhlíkových vláken mohou být až 500x dražší než obyčejné skleněné.

3.2 Oceli

Ve většině případů se používá konvenční materiál ocel, je totiž levnější a dá se snadněji automatizovat výroba.

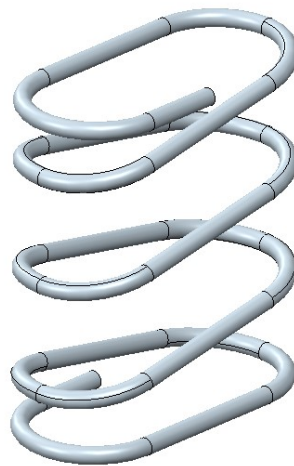
Pro méně namáhané pružiny se používá ocel 12 071 nebo 12 090

Pro středně namáhané pružiny se používá ocel 13 250 nebo 13 270

Pro hodně namáhané pružiny je vhodná ocel 14 260 a 15 260

Mezi neželezné materiály lze zařadit fosforové bronzy, mosazi, slitiny mědi a beryllia a různé slitiny niklu. [40]

- Vysoká pevnost vzhledem k hmotnosti
- Relativně snadná možnost automatizace
- Možnost svařování
- Recyklovatelnost
- Náročnější na údržbu (koroze)
- Možnost výroby pružin s rozdílnými vlastnostmi



Obr. 17. Oválná pružina volnoběžky

3.3 Ostatní materiály

3.3.1 Slitiny mědi s obsahem beryllia

Mezi pružinovými slitinami mědi mají největší význam berylliové bronzy. Uplatnění nalézájí v oblasti elektrotechniky, spojů a kontaktů. Vynikají dobrou odolností proti korozi, vysoká mez kluzu a dobrá elektrická vodivost. Jejich podíl na trhu roste.

3.3.2 Slitiny mědi bez obsahu beryllia

Pokud je třeba lepší elektrická vodivost, tak se dají použít například hořčíkové bronzy nebo kadmiové bronzy. Pro větší pevnost se používají deformačně zpevněné bronzy a některé mosazi. [3]

3.3.3 Kaučuk

Může se používat v přírodní nebo syntetické formě, případně kombinace obou, jelikož každá forma má své pro i proti. Jsou náchylné na teplotu a agresivní látky jako třeba benzín či olej. Na druhou stranu jsou ale levné, progresivní a nepotřebují údržbu. Velký vlastní útlum pryže spolu s velkou elasticitou se využívá k útlumu kmitavých pohybů s velkým kmitočtem, ale i k tlumení hluku, proto pružiny u auta mají pryžové uložení, které zlepšuje odpružení.



Obr. 18. Příklady pryžových silentbloků [30]

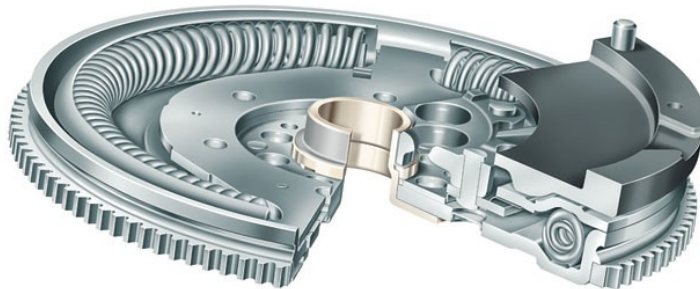
4 VYUŽITÍ JEDNOTLIVÝCH PRUŽIN

Pružiny jsou využívány pro jejich schopnost absorbovat energii na základě elastické deformace. Je nutné ale rozlišovat různé typy aplikací, protože ne všechny pružiny jsou vhodné třeba pro dynamické namáhání. Proto musí člověk, který pružinu navrhuje dbát nejen na geometrii pružiny, ale také na to, z jakého materiálu bude zhotovena. Podle fyzikálního principu činnosti lze pružiny rozdělit na mechanické, pneumatické, Hydropneumatické, apod.

4.1 Použití šroubových pružin

- Odpružení aut, motorek, kol,...
- Pružné páky
- Pružiny pro vytváření konstantního přitlaku
- Pružiny pro návrat do klidové polohy
- Tlumení kmitání
- Elektrotechnický a spotřební průmysl
- Všeobecně skoro všude

[1]



Obr. 19. Dvoumotový setrvačnick [31]

4.2 Použití talířových pružin

- Předmontované pružinové sady – systémy závěsných kotlů
- Pojistné spojky proti přetížení – udržují tření pro přenos kroutícího momentu

- Vyrovnávání vůle – vyrovnání geometrických tolerancí u montážních celků
- Ventily – předem hydraulicky zatížené sady
- Vratné pružiny pístu – vrací píst do původní polohy po uvolnění zatížení spojky
- Komponenty pro upínání nástrojů
- Skladování energie pro bezpečnostní systémy
- Upnutí lanové dráhy – třecí zámek
- Pružinové brzdy
- Hutnictví – důlní a těžební technika
- Zemědělství – zařízení kypřících soustav rozmetadel a drtičů
- Pružné podložky

[6]



Obr. 20. Přítlačný kotouč spojky [32]

4.3 Použití listových pružin

- V oblasti průmyslu (pérové spony, podavače, vymezořovače, vyrovnávání tlaků, výroba kontejnerů, přítlačná zařízení, apod.).
- V zemědělství (kypřiče, pásové dopravníky, různé typy kultivátorů, nože, radličky, cepáky, diskové podmítače, pruty na vibrační pásy apod.).
- V lehkém průmyslu (pružící díly a výztuhy pro kožedělný průmysl, apod.).
- Nápravy aut

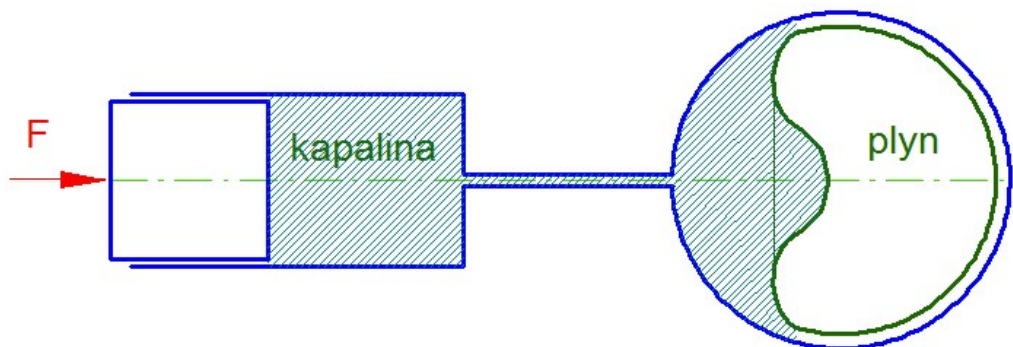
[6]



Obr. 21. Aplikace listové pružiny na nápravě [33]

4.4 Použití ostatních pružin

- Pryžové pružiny nachází své uplatnění jako silentbloky na podvozku aut či železničních vagonch pro malé rychlosti. Jejich tuhost závisí na způsobu namáhání a do určité míry i na tvaru pružiny.
- Pneumatické pružiny se používají zejména u nákladních aut, autobusů a návěsů. Při zatížení se pružiny stlačí a regulačním ventilem se do pružiny vrací stejné množství vzduchu, kolik bylo vytlačeno. [9]
- Hydropneumatické pružiny poprvé použila firma Citroën u svého podvozku a používá se dodnes v luxusnějších automobilech jako například BMW, Mercedes či Porsche. Jedná se o téměř stejný systém jako u pneumatické pružiny.



Obr. 22. Hydropneumatická pružina [34]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 POPIS AKTUÁLNÍHO STAVU PRO DANOU APLIKACI

V dnešní době existuje velká škála kompozitů, které se mohou lišit výztuží (rohože, tkaniny,...), druhem pojiva (o jakou pryskyřici se jedná) a výrobou daného kompozitu. Díky jejich vlastnostem se kompozity využívají čím dál častěji, ať už jde o jejich nízkou hmotnost, odolnost vůči vnějším vlivům či snadnou údržbu.

5.1 Šroubovitá pružina od Audi

Jádrem pružiny jsou dlouhá vzájemně stočená skelná vlákna impregnovaná epoxidovou pryskyřicí. V dalším výrobním kroku jsou kolem této jen několik milimetrů tlusté „duše“ strojově navíjena další vlákna střídavě pod úhlem $+45^\circ$ a -45° k podélné ose. Jednotlivé vrstvy se při stlačování i roztahování vzájemně dokonale doplňují, takže mohou optimálně pohlcovat působící síly. V poslední fázi výroby je polotovar vytvrzen v peci při teplotách více než 100°C . Pružiny z kompozitu vyztuženého skelnými vlákny lze precizně nastavit pro příslušné použití a jejich materiál nabízí vynikající vlastnosti. Nepodléhá korozi, ani po dopadech odletujících kamenů, a je odolný vůči chemikáliím, jako jsou prostředky pro čištění kol. V neposlední řadě vyžaduje výroba mnohem méně energie než u ocelových pružin. [11]



Obr. 23. Kompozitní pružina v porovnání s konvenční [35]

V tomto případě má kompozitní pružina s totožnou silou jako konvenční v řezu větší průměr profilu, což může být v některých případech nežádoucí. Je to způsobeno způsobem výroby, kdy výrobce používá jádro, které po všech operacích vytahuje.

5.2 Listová pružina v nové generaci Volva

Nová listová pružina ve Volvu nahrazuje tradiční šroubovitě pružiny, ale oproti standardnímu řešení je lehčí o 4,5 kilogramu. Další velkou výhodou je celkové zlepšení jízdních vlastností a snížení úrovně vibrací a nežádoucího hluku v kabině automobilu. Nejde ale jen o mechanické vlastnosti, díky snížení hmotnosti se také zmenšuje hodnota emisí CO₂, což je v dnešní době důležitý aspekt. Pružina je vyráběna na bázi polyuretanové pryskyřice LOCTITE MAX 2 od firmy Henkel. Tato matrice díky své nízké viskozitě rychle plní formu, rychleji impregnuje vlákna a tím i zkracuje čas celého výrobního cyklu. Tato pryskyřice se také oproti epoxidové pryskyřici rychleji vytvrzuje, což celý výrobní cyklus také urychluje. O celou výrobu těchto pružin se stará firma BENTELER-SGL, leader v oblasti výroby kompozitních součástí pro automobilový průmysl. [12]



Obr. 24. Zadní víceprvková náprava nového Volvo XC90 [19]

Je patrné (Obr. 24), že tímto uspořádáním náprav došlo ke zmenšení potřebného prostoru pro jejich fungování, nejsou zde totiž klasické věže zavěšení nápravy jako u klasického řešení, tím se může zvětšit zavazadlový prostor, kde nebudou překážet po stranách výklenky.

5.3 Nahrazení šroubovitě pružiny za sérii kompozitních talířových

Kompozitní pružiny mají oproti pružinám z oceli velkou výhodu, protože mohou být až o 70% lehčí. Když se nahradí tradiční šroubovitá pružina sérií talířových, získá se tím systém, který výrazně eliminuje nežádoucí kroutící moment a celá tato sestava může být snadno upravena na požadující vlastnosti díky desítkám kombinací jednotlivých kompozitových disků. Další velkou výhodou tohoto systému je snadné vycentrování bez ztráty vzpěrné stability na rozdíl od šroubovitě pružiny, která má při velkém stlačení tendenci se vychýlit do boku. Další výhodou tohoto řešení je větší bezpečnost. Ocelová pružina se při svém pohybu ohýbá, kroutí, vytváří teplo a to všechno vede k únavovému lomu při určitém počtu cyklů, to může být velmi nebezpečné. To neznamená, že by uhlíkové disky nemohly selhat, ale jejich způsob porušení je postupný, jednotlivé vrstvy kompozitu se začnou delaminovat. V případě potřeby se jednoduše jednotlivý disk snadno vymění za nový. Velkou nevýhodou tohoto systému je ale cena. Jedna tato sada stojí přibližně 1000\$. [14]



Obr. 25. Série kompozitních talířových pružin [36]

Zda půjde toto řešení využít i ve větších sériích záleží na tom, zda bude možné snížit výrobní cenu celého setu.

6 TECHNOLOGIE PRO VÝROBU KOMPOZITNÍCH PRUŽIN

V této bakalářské práci byla zvolena metoda Light RTM, protože poskytuje několik výhod. Díky pevné formě a podtlaku, který nasává pryskyřici skrz ventil. Tato výroba se vyznačuje těmito vlastnostmi:

- Vysoká produktivita
- Snížení nákladů na pracovní sílu
- Pohledové povrchy jsou hladké
- Vylepšená rozměrová stálost
- Lepší kontrola procesu
- Dlouhá životnost formy
- Žádné emise
- Lepší pracovní podmínky

Vzhledem ke složitosti tvaru pružiny je nutné k tomu přizpůsobit i formu, ve které se bude pružina vyrábět. Jednotlivé tvary, které budou tvořit dutinu formy, se budou vyrábět pomocí elektroerozivní metody. Ta umožňuje vytvářet tvarově složité součásti. Každá funkční plocha bude poté vyleštěna pomocí brusných papírů o velké jemnosti od 320 do 1200 a nanese na vrstva gelcoatu. S jednotlivými vrstvami a nepatrným smrštěním výrobku je nutné při návrhu počítat a přizpůsobit tomu tvar modelu. V praxi se takové výrobky vyrábí podle modelu ve formě STP nebo IGS.

V této bakalářské práci je návrh samotné formy, která se podle uvážení může upravit, aby mohla být ukotvena ke stolu či rámu nebo přidány oka či záseky pro odformování po dokončení procesu vytvrzování. Dále také může být přidán temperační systém pro rychlejší vytvrzování pryskyřice ve formě. Tím by se urychlil celý proces výroby a snížila by se tím cena jednotlivé pružiny.

Pokud bychom se zaměřili na konkrétní zásady pro konstrukci forem z kompozitních materiálů, zjistili bychom, že technologie a postupy pro výrobu forem se mohou v některých detailech lišit v závislosti na výrobcu. [18]

6.1 Návrh tvaru a volba technologie

Návrh tvaru a technologičnost konstrukce obsahuje komplexní souhrn požadavků. Konstrukce výrobku však musí zajistit funkčnost a požadovanou životnost při maximální hospodárnosti.

V tomto případě se jedná o formu pro odlévání kompozitové pružiny metodou LRTM, která nahrazuje konvenční pružinu zadního tlumiče motocyklu Simson. Konstrukční návrh by měl obsahovat níže popsané zásady.

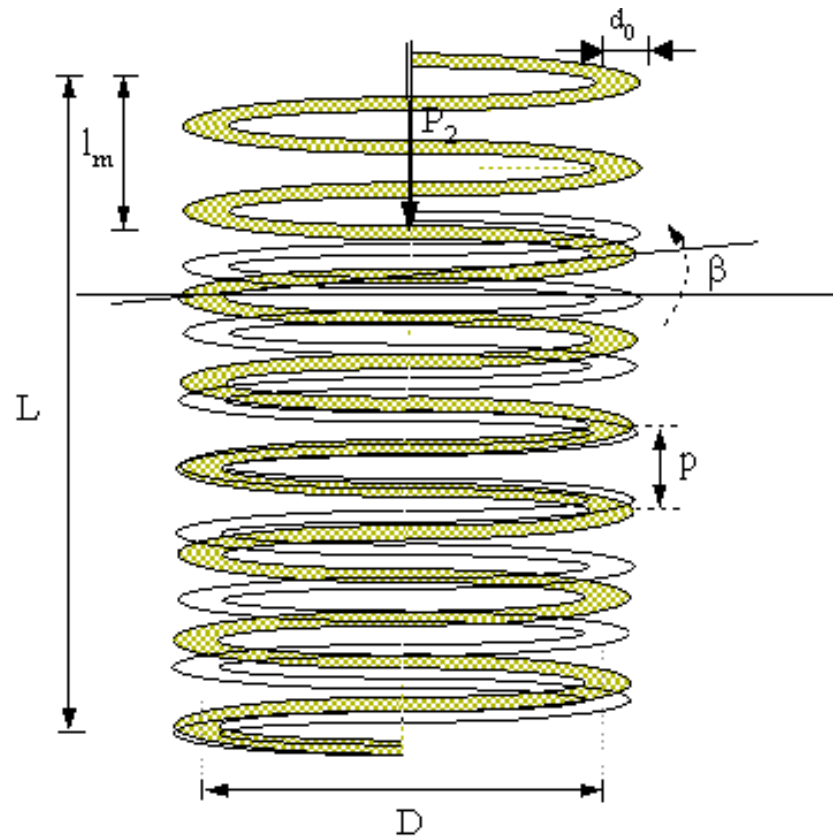
- využitelnost materiálu - malý odpad
 - díky těsnění ve formě je odpad minimální, u tohoto návrhu však budou odpadní konce pružiny, které se budou odřezávat
- přizpůsobení konstrukce technologii výroby - volí se s ohledem na objem výroby
 - z hlediska tvarové složitosti a pevnosti byla vybrána ocel pro horní i spodní polovinu formy, zajistí se tím i dostatečná pevnost
- nízká cena
 - v tomto případě bude cena poněkud vyšší z důvodu složitého tvaru obroběných ploch
- využití hromadně vyráběných polotovarů a dílů
 - budou použity hadice, spojovací materiál a jiné normalizované dílce
- přiměřené nároky na přesnost
 - pro tuto aplikaci je zbytečné vyrábět pružinu na příliš přesné rozměry - méně jak desetiny milimetru
- co nejmenší počet a složitost operací
- co nejkratší čas výroby
 - vybrána adekvátní směs pryskyřice a tužidla pro optimální vlastnosti výrobku
- co nejjednodušší manipulace
 - poněkud složitější operace rozebrání děleného jádra
- co nejmenší potřeba výrobních a skladovacích ploch
 - vzhledem k velikosti pružiny to problém není, potíž může nastat, pokud bude podtlaková vývěva příliš velká
- možnost nenáročné recyklace

Je jasné, že skloubit všechny požadavky může být v některých případech složité, protože mohou být až protichůdné. Největší odpovědnost bude v tomto případě padat na konstruktéra formy, který musí tyto zásady zohledňovat již v samotném návrhu formy. [41]

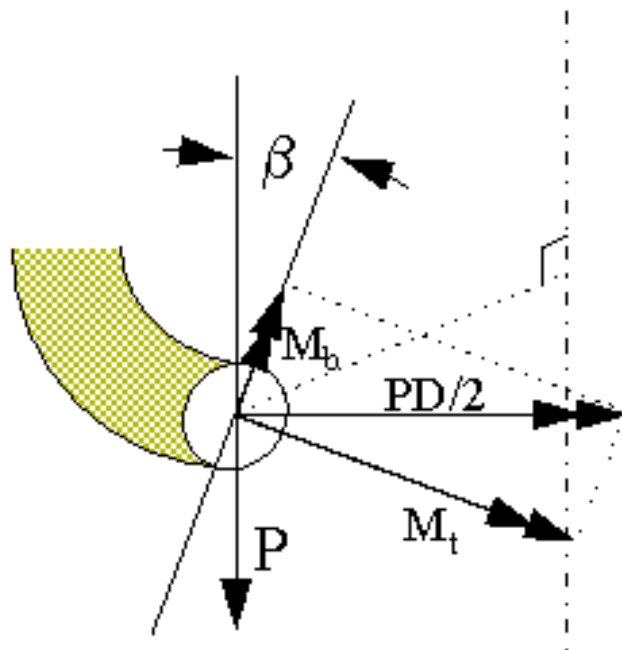
U forem pro technologii Light RTM je tedy nutné brát zřetel na těsnost formy, která do značné míry ovlivňuje mechanické vlastnosti výrobku. Musí být také dostatečně pevná, aby zajistila velký počet cyklů výroby při zachování kvality výrobku.

7 NÁVRH KOMPOZITNÍ PRUŽINY

7.1 Výpočet kompozitní pružiny



Obr. 26. Základní veličiny u kompozitové šroubovité pružiny [4]



Obr. 27. Napětí v průřezu kompozitové pružiny [4]

$$\sigma = \frac{M_b d_0}{I_b} \frac{1}{2} = \frac{[F(D/2) \sin \beta] d_0}{I_b} \frac{1}{2} \quad (15)$$

$$\tau = \frac{M_t d_0}{J_t} \frac{1}{2} = \frac{[F(D/2) \cos \beta] d_0}{J_t} \frac{1}{2} \quad (16)$$

$$J_t = \frac{\pi}{32} d_0^4 \quad (17)$$

Je jasné, že u kompozitové pružiny hlavní tuhost pružiny zajišťují vnější vrstvy, zatímco příspěvek vnitřního jádra je menší. Pro lepší tuhost v poměru váha výkon můžeme tedy použít duté profily. Základní vzorce jdou tedy snadno přepsat do tvaru:

$$\sigma = \frac{M_b d_0}{I_b} \frac{1}{2} = \frac{16 \cdot F \cdot D \cdot d_0}{\pi \cdot (d_0^4 - d_i^4)} \cdot \sin \beta \quad (18)$$

$$\tau = \frac{M_t d_0}{J_t} \frac{1}{2} = \frac{8 \cdot F \cdot D \cdot d_0}{\pi \cdot (d_0^4 - d_i^4)} \cdot \cos \beta \quad (19)$$

$$I_b = \frac{\pi}{64} (d_0^4 - d_i^4) \quad (20)$$

$$J_t = \frac{\pi}{32} (d_0^4 - d_i^4) \quad (21)$$

[4]

Kde β je úhel stoupání závitů.

Z teorie obsažené v předchozí části, je zřejmé, že modul pružnosti ve smyku je hlavní vlastnost materiálu ovlivňující pevnost kompozitové pružiny. U kompozitních materiálů je maximum smykového napětí dosaženo uložení vláken pod úhlem $\pm 45^\circ$. Abychom minimalizovali ohybová napětí, ukládáme vlákna pod úhlem $\pm \theta$, kdy se θ volí tak, aby minimalizovala napětí. Pro šroubovitou pružinu je vhodné použít skleněná vlákna ve formě punčoch, ty jsou snadno ovladatelné a dobře se hodí pro kruhový průřez. [4]

Střední průměr pružiny:
 $D := 49 \cdot \text{mm}$

Zatěžovací síla:
 $F := 400 \cdot \text{N}$

Vnější průměr profilu:
 $d_0 := 7 \cdot \text{mm}$

Vnitřní průměr profilu:
 $d_i := 2 \cdot \text{mm}$

Úhel stoupání:
 $\beta := 10^\circ$

Zatížení:

$$M_b := \frac{F \cdot D}{2} \cdot \sin(\beta) = 1.702 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_t := \frac{F \cdot D}{2} \cdot \cos(\beta) = 9.651 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Kvadratické momenty:

$$I_b := \frac{\pi}{64} \cdot (d_0^4 - d_i^4) = 117.073 \text{ mm}^4$$

$$J_t := \frac{\pi}{32} \cdot (d_0^4 - d_i^4) = 234.147 \text{ mm}^4$$

Napětí:

$$\sigma := \left(\frac{16 \cdot F \cdot D \cdot d_0}{\pi \cdot (d_0^4 - d_i^4)} \right) \cdot \sin(\beta) = 50.875 \text{ MPa}$$

$$\tau := \left(\frac{8 \cdot F \cdot D \cdot d_0}{\pi \cdot (d_0^4 - d_i^4)} \right) \cdot \cos(\beta) = 144.264 \text{ MPa}$$

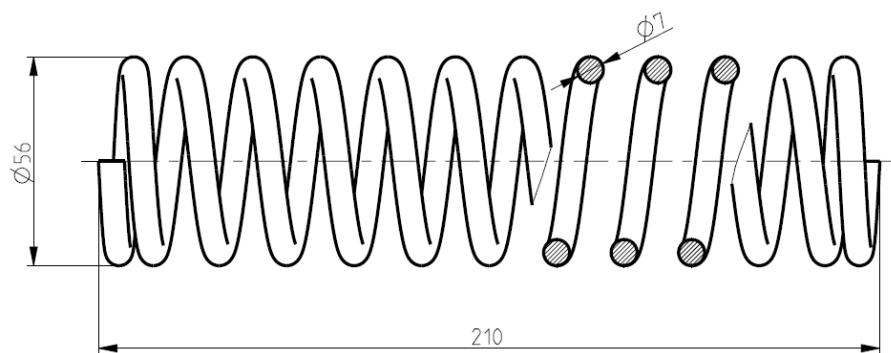
Obr. 28. Přibližný výpočet nahrazující pružiny

Hodnoty byly zvoleny s ohledem na rozměry výchozí pružiny a aplikaci, ve které pružina pracuje. Dává to představu o tom, jaké namáhání bude muset kompozitová pružina snést a to za adekvátní bezpečnosti. Je patrné (Obr. 27), že napětí je rozděleno do dvou složek, z nichž smykové napětí je výrazně větší, v tomto případě přibližně 144 MPa. Se stoupajícím úhlem stoupání se bude zvyšovat normálové napětí, což je nežádoucí, bezpečnost pružiny se bude výrazně snižovat.

NÁVRH VÝROBY KOMPOZITNÍ PRUŽINY POUŽITÍM TECHNOLOGIE LIGHT RTM

7.2 PŘEDLOHA

Před vlastním konstrukčním návrhem bylo potřeba udělat rozbor vstupujících veličin. Jednotlivé kroky byly voleny ke skutečnosti, že se jedná pouze o konstrukční návrh řešení pro zvolenou technologii Light RTM. Cena celého návrhu v tomto případě není limitující.



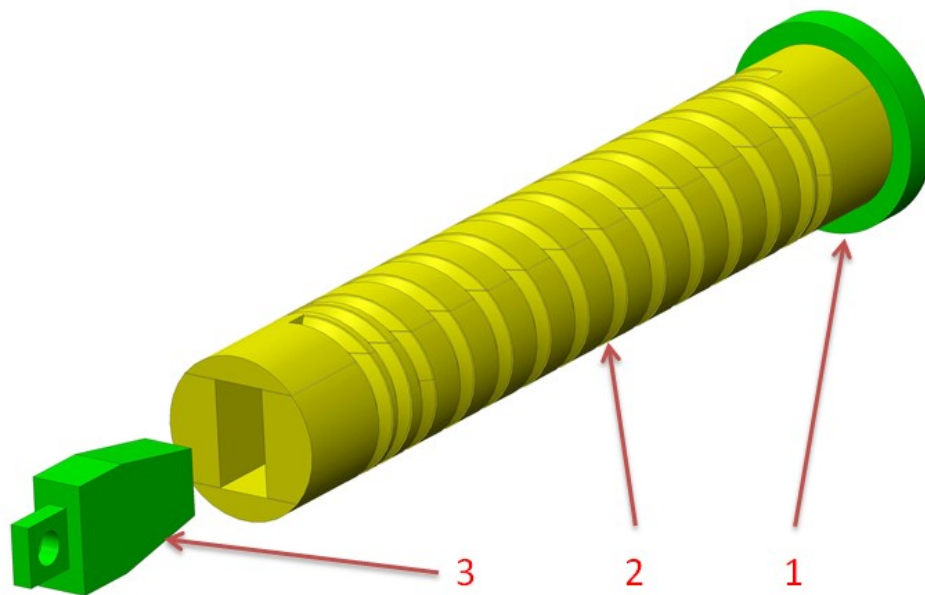
Obr. 29. Pružina zadního tlumiče motocyklu Simson

Jako předloha byla zvolena pružina zadního tlumiče. Její rozměry byly změřeny posuvným měřidlem a řešení uchycení pružiny vychází z fotografií motocyklu. Z nich vyšlo, že konce pružin nejsou obrobena do rovné plochy, což návrh trochu ulehčilo. Návrh vychází z požadavků na kvalitu výrobku, opakovatelnost a jednoduchost výroby. Celý návrh byl modelován v programu PTC Creo 2.0, který využívá například ŠKODA AUTO, zvláště při vývoji motorů.

Aby měla výsledná pružina požadované vlastnosti, je nutné zkombinovat jádro a vnější vrstvy výztuže, v tomto případě asi nejvhodnější ocelové lanko, na které se nasunou pletené skelné punčochy. Ocelové lanko zajistí dobrou ovladatelnost při vkládání do formy. Samotné skelné punčochy by se mohly lámat a nechtěně kroutit. Skládání vláken v punčoše bývá pod úhlem 45° , aby se dosáhlo optimálních vlastností (snaha minimalizovat ohybové napětí) a jednotlivé vrstvy skleněných vláken by měly být co nejhustší, aby se dosáhlo co nejlepších mechanických vlastností. Přesný počet vrstev však bude lepší experimentálně vyzkoušet, přílišná hustota vláken by mohla mít negativní účinek. Takto nachystaný polotovár se namotává kolem děleného jádra.

7.3 Dělené jádro

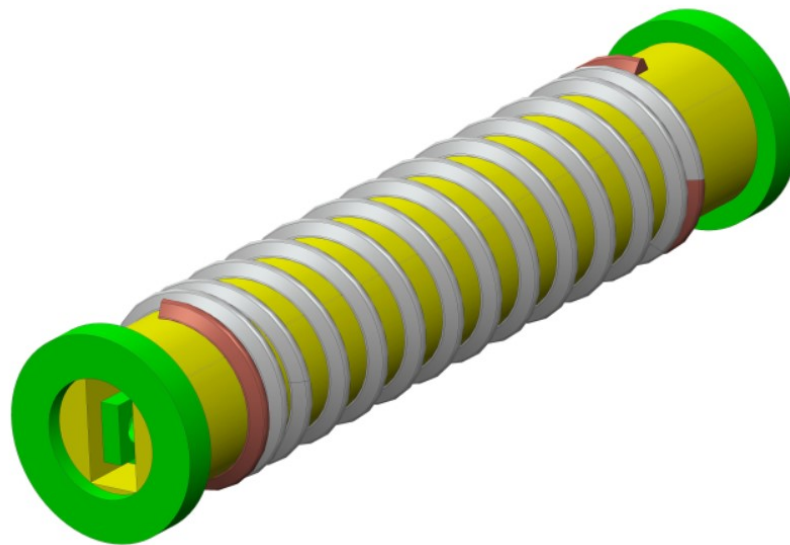
Připravený polotovár pro výrobu pružiny se namotává na dělené jádro, které musí zaručovat rozebiratelnost. Jádro i zbytek formy bude nejlepší vyrobít elektroerozivní metodou, která poskytuje skvělé možnosti, co se týče tvarové složitosti či přesnosti, která se pohybuje v setinách milimetru. Rozdělení jádra vzhledem k přesnosti bude nejlepší pomocí drátové řezačky, která je velmi přesná a šířka úběru materiálu oproti jiným metodám je velmi malá (v praxi 0,4 mm a víc), přídavek materiálu je tedy nepatrný.



Obr. 30. Dělené jádro včetně jisticích kroužků

Takto rozdělené jádro je vsazeno do dvou středících kroužků poz.1, které jádro centrují v samotné formě a poté rozepráno dvěma klíny poz.3, které se pomocí ok po operaci vytáhnou. Jednotlivé segmenty budou nastříkány izolačním nástřikem RENGEL SW 56, ten odolává epoxidovým pryskyřicím a zajišťuje velký počet odformování. Tímto způsobem je zajištěno, aby pryskyřice zbytečně nezatíkala do jádra.

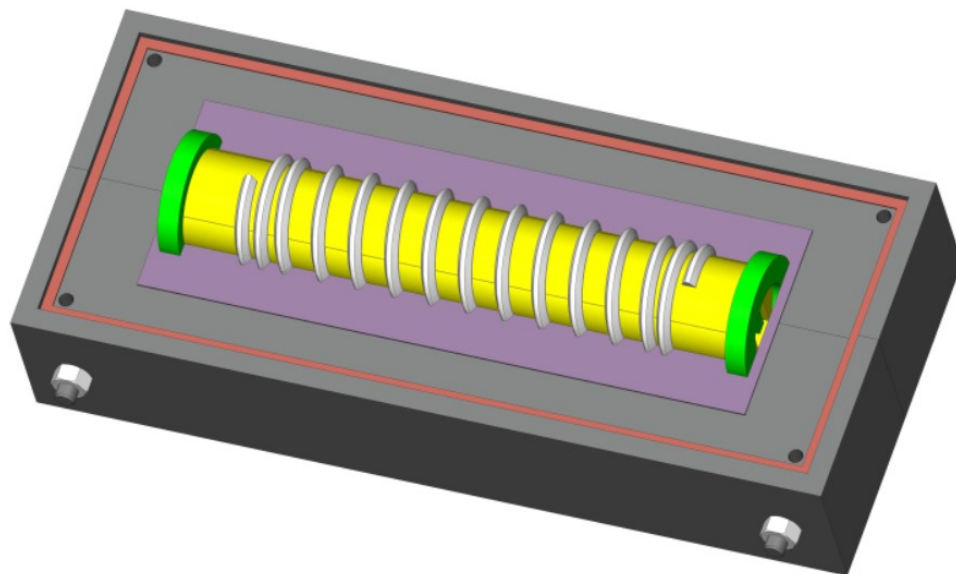
Pro snadnější vstup a výstup pryskyřice do formy bylo ke koncům pružiny přidána část závitů navíc, aby oba konce byly nasměrovány k vrchní straně formy. Po dokončení operace budou tyto přebytečné konce odříznuty na požadovanou délku pružiny. U vstupu i výstupu se mohou vyskytnout nedotočené místa, to záleží na odladění postupu, i z toho důvodu byly přidány části vinutí na koncích.



Obr. 31. Předchystané jádro s namotaným profilem

7.4 Spodní dělený rám

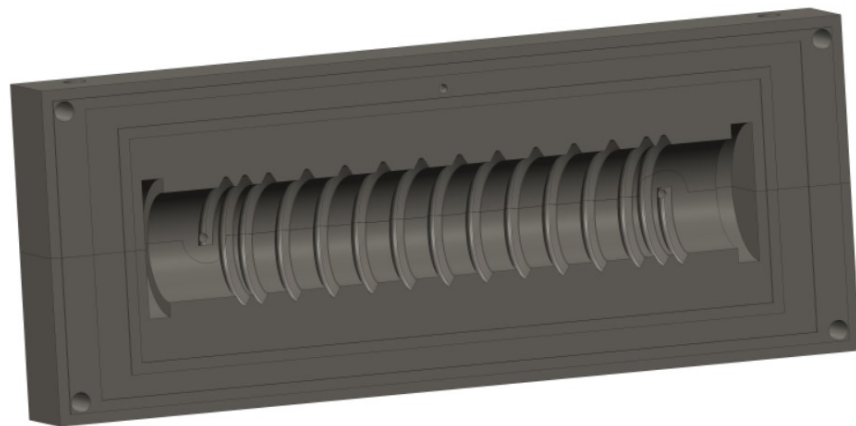
Takto předchystané a zajištěné jádro s přídavkem vinutí na odřezání se poté vloží do spodního děleného rámu staženého závitovou tyčí. To se vyrábí stejnou elektroerozivní metodou jako jádro a styčné plochy nastříkány izolačním nástřikem RENGEL SW 56. Kolem jádra je nutné kvůli těsnosti vložit těsnění, to je přimáčknuto horním rámem formy. Těsnění musí být odolné vůči těkavým složkám v pryskyřici, teplotě, ale i tak bude nutná včasná výměna.



Obr. 32. Spodní dělený rám s vloženým jádrem

7.5 Vrchní dělený rám

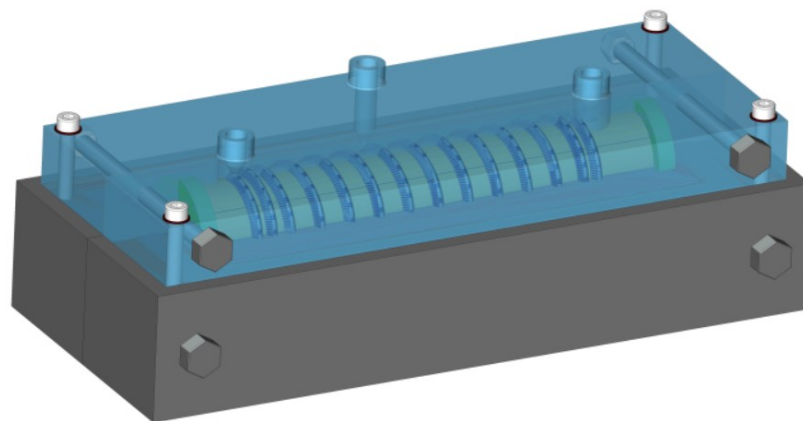
Po vsazení složeného jádra do spodního rámu a uložení těsnění se položí horní rám, který je rozdělený poněkud netradičně kolem vstupního a výstupního otvoru z důvodu těsnosti formy. Obě poloviny jsou na styčných plochách opatřeny izolačním nástřikem RENGEL SW 56 a staženy k sobě závitovou tyčí. Horní i dolní polovina je opatřena epoxidovým gelcoatem P na výrobu forem od firmy HAVEL Composites. Nutno počítat při návrhu s výškou nánosu gelcoatu.



Obr. 33. Samostatný horní rám

7.6 Složení formy

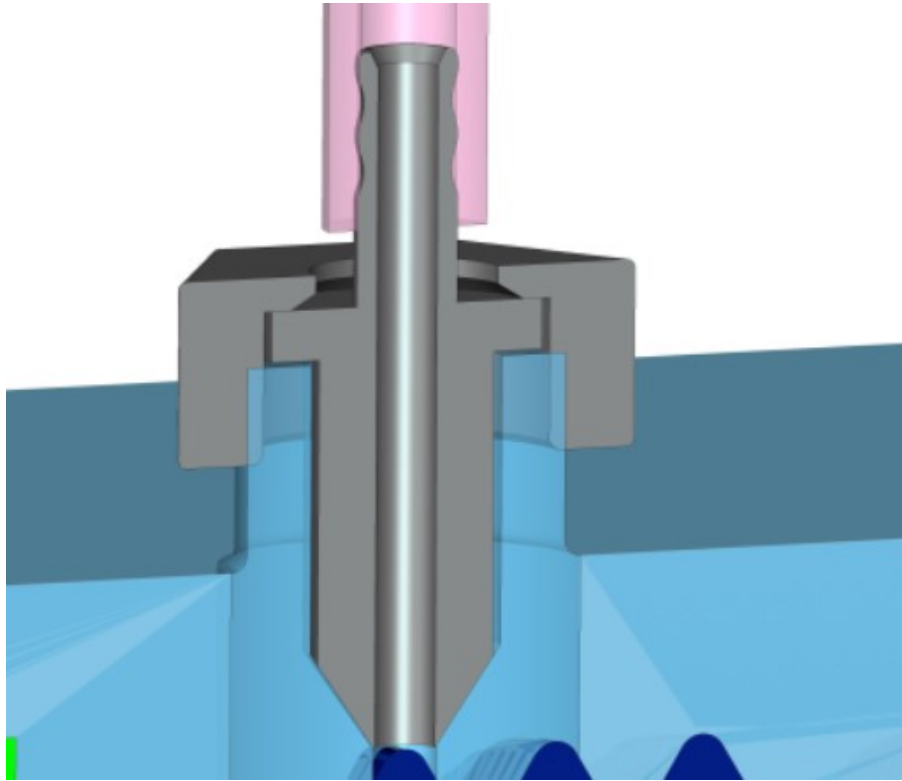
Když se vrchní polovina usadí na svém místě, bude potřeba ji spojit se spodní čtyřmi šrouby, které vedou s vůlí skrz vrchní polovinu a jsou našroubovány ve spodní. Pod hlavami šroubů jsou vždy těsnění pro dokonalé utěsnění formy.



Obr. 34. Připevněný horní rám

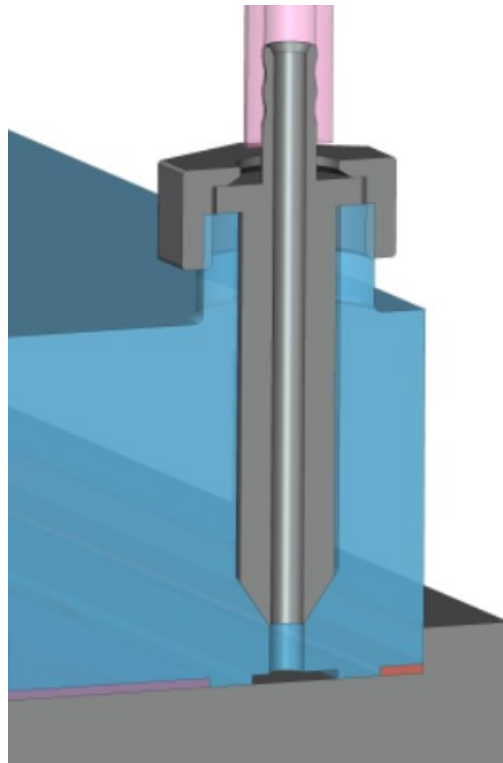
V tomto pohledu je také vidět vstupní otvor do formy a dva výstupní, do kterých se budou připevňovat vstupní a výstupní náboje.

7.7 Finální montáž



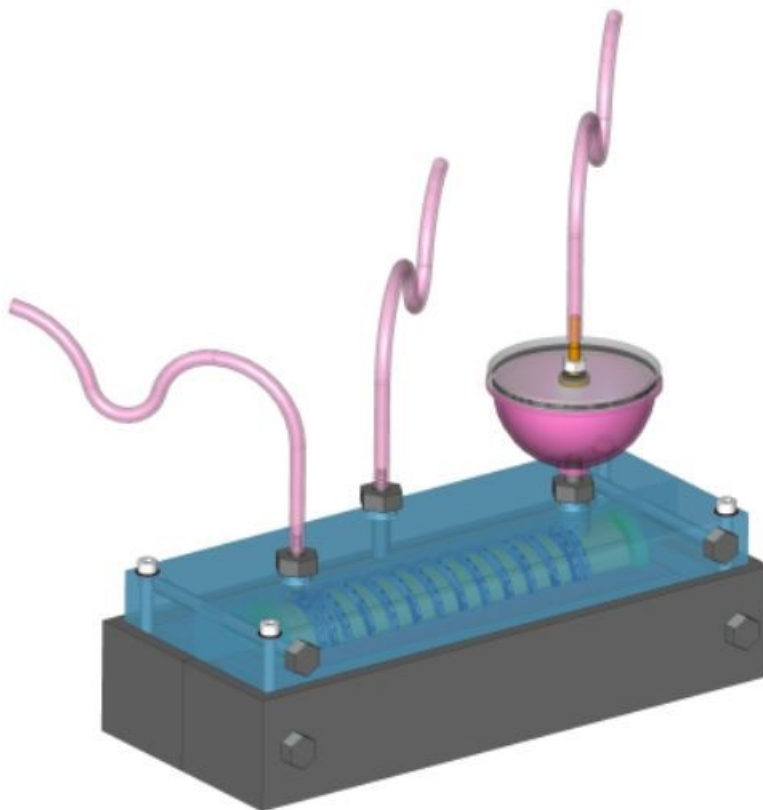
Obr. 35. Vstupní náboj

Každý vstup i výstup je řešen kuželovým nábojem, který dosedá na obrobenou plochu v rámu. Špička náboje je s malým přesahem. Náboj je poté zajištěn převlečnou maticí a nakonec nasunuta gumová hadice pro přívod nebo odsávání vzduchu. Toto řešení má zajistit, aby se pryskyřice nedostávala do míst, kde je to nežádoucí. Každý kužel je opatřen těsnícím nátěrem RENGEL SW 56 pro zajištění nepropustnosti vzduchu. V případě potřeby je možné na zaváděcím průměru obrobít drážku a navléct o-kroužek.



Obr. 36. Pomocný výstup

Pomocný výstup odsává přebytečný vzduch mezi těsněními, zajistí tak lepší těsnost formy.



Obr. 37. Kompletní forma

Takto složená forma se připojí na míchací jednotku, která přivádí pryskyřici s tužidlem (LH 288 epoxidová pryskyřice + H 505 tužidlo, tato směs zajišťuje dostatečnou dobu na zpracování a dobrou kvalitu prosyceného materiálu) do formy. Tato směs není nutná následně vytvrzovat v peci, její vytvrzovací teplota se pohybuje okolo 10-30°C. Tepelná odolnost těchto systémů může být zvýšena na přibližně 90 °C postupným tepelným temperováním při teplotě 50 -70 °C. [16]

Dále se připojí podtlaková vývěva, která vytváří relativně malý podtlak, který se může lišit podle složitosti a velikosti formy (většinou 0.4-1 bar). Do podtlakové vývěvy je také připojený druhý vývod, který vytváří podtlak mezi těsněními.

Pro odpovídající mechanické vlastnosti pružiny bude nutné zvětšit průměr vinutí, tím pádem bude nutné i upravit uložení pružiny pro danou aplikaci. V tomto případě bude stačit jen o něco málo větší miska, ve které je pružina uložena.

Odhadovaná cena by mohla být kolem 100 000 Kč s tím, že by bylo vhodné vyrobit duplicitní složené jádro, což by proces výroby ještě o něco urychlilo. Takto vysoká cena vychází ze zvolené metody opracování a měla by se tedy rozmělnit mezi velký počet výrobků. Do cenové kalkulace nebyla započtena údržba spojená s provozem výroby.

ZÁVĚR

Kompozitní materiály se staly v průběhu let nepostradatelné a jejich vývoj prošel od jednoduchých směsí až po složité několikvrstvé kompozity. Když ale kompozity srovnáme s konvenčním řešením, tak jsou jasné některé nevýhody, jak z hlediska ceny, tak i s budoucím recyklováním. Ocel je možné oproti už vytvrzeným a nerecyklovatelným kompozitům dále zpracovávat. Dále pro ocel hovoří snadná automatizace a tím i vyšší produktivita. Na druhou stranu mají kompozity lepší mechanické vlastnosti v poměru váha/výkon či lepší chemickou odolnost, stále jsou však oblasti, kde konvenční materiály nebyly kompozitovými překonány.

Výsledkem této bakalářské práce by měla být pružina schopná nahradit pružinu z konvenčního materiálu, z toho důvodu byla také zvolena metoda Light RTM (Resin Transfer Molding), která zajišťuje opakovatelnost výroby pružiny a dobrou kvalitu výrobku díky podtlaku, který dovolí prostoupit pryskyřici skrz celý objem materiálu ve formě.

Kompozitové pružiny mají samozřejmě prostor pro zlepšování a určitě se budeme díky vlastnostem kompozitů s takovými aplikacemi setkávat čím dál častěji. Jejich lehkost vzhledem k jejich mechanickým vlastnostem je velkým lákadlem pro mnoho odvětví, zvláště pak pro automobilový či letecký průmysl.

V tomto případě je prostor ke zlepšování v tvaru profilu pružiny. Jiný tvar by mohl pomoci zlepšit vkládání a poté vyndávání z formy a k celkovému zrychlení procesu výroby pružiny.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS, VLK, Miloš (ed.). *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2010, xxv, 1159 s. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [2] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [3] SVOBODA, Pavel. *Základy konstruování*. Vyd. 4. Brno: CERM, 2011, 234 s. ISBN 978-80-7204-750-5.
- [4] *Lightweight structures: Composite materials* [online]. [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: <http://www.lightweight-structures.com/the-design-and-manufacture-of-a-spring-using-composite-materials/index.html>
- [5] *Kompozitní konstrukce: materiálové vlastnosti* [online]. [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: <http://www.prefa-kompozity.cz/materialove-vlastnosti/>
- [6] *Grevis: pružiny tvářené za tepla* [online]. [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: <http://www.grewis.cz/pruziny/listove-pruziny.php>
- [7] *Pružiny. Mitcalc.com* [online]. [cit. 2016-02-01]. Dostupné z: <http://mitcalc.com/doc/springs/help/cz/springs.htm>
- [8] *Kompozity: Zdeněk Kořínek* [online]. [cit. 2017-02-26]. Dostupné z: <http://kompozity.webnode.cz/>
- [9] *Wikiwand: Odpružení* [online]. [cit. 2017-02-26]. Dostupné z: <http://www.wikiwand.com/cs/Odpru%C5%BEn%C3%AD>
- [10] *CHEMPOINT: Vědci pro průmysl a praxi* [online]. [cit. 2017-02-26]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/polacek>
- [11] *IFaster* [online]. [cit. 2017-02-26]. Dostupné z: <http://ifaster.cz/kompozit-misto-ocle-audi-bude-mit-lehci-pruziny/>
- [12] *Henkel: Automobilový průmysl* [online]. [cit. 2017-02-26]. Dostupné z: http://www.henkel.cz/automotive/novinky-11253_lehke-jako-pirko-12125_CZC_HTML.htm
- [13] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Vydání 1. Brno: VUT v Brně, Fakulta chemická, 2003, 193 s. ISBN 8021424435.

- [14] JIM'S GARAGE: IMIS–Road Trip, sort of [online]. [cit. 2017-03-01]. Dostupné z: <https://jimsgarage.wordpress.com/2012/12/11/imisroad-trip-sort-of/>
- [15] Vacuum Bagging Techniques [online]. [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: <http://www.westsystem.com/ss/assets/HowTo-Publications/Vacuum-Bagging-Techniques.pdf>
- [16] HAVEL Composites [online]. [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com>
- [17] JANČÁŘ, Josef. Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003. ISBN 8021424435.
- [18] HORÁK, Jan. Konstrukční řešení RTM formy pro zadaný díl. Zlín, 2016. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Doc. Ing. Soňa Rusnáková Ph.D.
- [19] *Podkapotou.sk* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://podkapotou.zoznam.sk/cl/1000617/1540635/V-osobnych-autach-takmer-vyhynuli---Volvo-vzkriesilo-listove-pruziny>
- [20] *Příklady vinutých pružin* [online]. In: . [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: http://dietz.eu/images/10_druckfedern520.jpg
- [21] *Princip výroby* [online]. In: . [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: http://www.madehow.com/images/hpm_0000_0006_0_img0120.jpg
- [22] *Katalog* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: http://www.tstservis.cz/pdf/Mubea_Katalog.pdf
- [23] *Listová pružina* [online]. In: . [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <https://d2t1xqejof9utc.cloudfront.net/screenshots/pics/b3fef3b3c1714d5>
- [24] *Parabolická pružina* [online]. In: . [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.parabolicspring.com/TIC-taper4.jpg>
- [25] *Protéza* [online]. In: . [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://mojeproteza.cz/wp-content/uploads/2016/05/1E93-runner-jr-02.jpg>
- [26] *Kompozitní materiály* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: http://mech.fsv.cvut.cz/~zemanj/teaching/12_stradal.pdf
- [27] *Roving* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://catalog.wlimg.com/1/45985/full-images/fiberglass-roving-868497.jpg>

- [28] *Rohož* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: http://www.polyglass.cz/obchod/pics/praskove_a_emulzni_rohoze.jpg
- [29] *Tkanina* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.wallmocz.cz/img/rt.jpg>
- [30] *Silentbloky* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.guma.cz/silentbloky/silentbloky.jpg>
- [31] *Dvouhmotový setrvačnick* [online]. In: . [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: http://img.auto.cz/news/img/art/2015-20/620_555451458356d.jpg
- [32] *Přítlačný kotouč* [online]. In: . [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: http://www.mjauto.cz/editor/image_uploads/12455_ScreenShot.jpg
- [33] *Náprava* [online]. In: . [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.kasperwing.com/trailer%20images/new-right-leaf-spring.jpg>
- [34] *Hydropneumatická pružina* [online]. In: . [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fd/Hydropneumatická%20pružina.jpg?1486916951132>
- [35] *Porovnání* [online]. In: . [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: http://media.novinky.cz/186/441864-top_foto1-4or5s.jpg?1405413006
- [36] *Série talířových pružin* [online]. In: . [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.mw-ind.com/sites/default/files/styles/large/public/bellows-shock.jpg?itok=w8zRvEN9>
- [37] *Pryskyřice* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf
- [38] *Ruční zpracování technických materiálů II: Ruční vinutí pružin* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: http://sousvitavy3.netventic.net/repository/medialib/user_273/Rucnizpractechmateri alu/VY_32_INOVACE_OVZ_3_16.pdf
- [39] *Talířové pružiny* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.uvbtechnik.cz/data/files/katalog-talirovych-pruzin-33.pdf>
- [40] *Tumlikovo: Metal Cutting technologies* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/>
- [41] *MM Průmyslové spektrum: Sendvičové konstrukce* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/archiv.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

s	Stlačení pružiny
τ	Smykové napětí
K_s	Součinitel smykového napětí
C	Poměr vinutí
k	Tuhost pružiny
d	Průměr drátu
D	Střední průměr pružiny
σ	Napětí materiálu pružiny v ohybu
J_t	Kroutící moment setrvačnosti
I_b	Kvadratický moment
D_e	Vnější průměr pružiny
E	Modul pružnosti v tahu
F	Síla pružiny
h	Výška talíře
h_0	Vnitřní výška talíře
K_1	Tvarový součinitel
t	Tloušťka materiálu
μ	Poissonovo číslo
δ	Poměr průměrů ($\delta = D_e/D_i$)
b	Šířka listu pružiny
L	Funkční délka pružiny
n	Celkový počet listů pružiny
n'	Počet extra přidaných listů plné délky
ψ	Tvarový součinitel

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Příklady vinutých pružin [20]</i>	12
<i>Obr. 2. Princip výroby základní šroubovitě vinuté pružiny [21]</i>	13
<i>Obr. 3. Uložení talířových pružin [7]</i>	14
<i>Obr. 4. Vztah mezi výškou talířové pružiny a tloušťkou</i>	15
<i>Obr. 5. Listová pružina [23]</i>	16
<i>Obr. 6. Parabolická pružina [24]</i>	17
<i>Obr. 7. Protéza s pružnou spodní částí [25]</i>	18
<i>Obr. 8. Průběh deformace pružiny [7]</i>	19
<i>Obr. 9. Základní veličiny u šroubovitě pružiny [7]</i>	21
<i>Obr. 10. Samostatná listová pružina [7]</i>	23
<i>Obr. 11. Listová pružina ve svazku [7]</i>	23
<i>Obr. 12. Listová pružina s extra listy [7]</i>	24
<i>Obr. 13. Synergický efekt [26]</i>	25
<i>Obr. 14. Roving [27]</i>	26
<i>Obr. 15. Rohož [28]</i>	27
<i>Obr. 16. Tkanina [29]</i>	27
<i>Obr. 17. Oválná pružina volnoběžky</i>	31
<i>Obr. 18. Příklady pryžových silentbloků [30]</i>	32
<i>Obr. 19. Dvouhmotový setrvačnick [31]</i>	33
<i>Obr. 20. Přítlačný kotouč spojky [32]</i>	34
<i>Obr. 21. Aplikace listové pružiny na nápravě [33]</i>	35
<i>Obr. 22. Hydropneumatická pružina [34]</i>	35
<i>Obr. 23. Kompozitní pružina v porovnání s konvenční [35]</i>	37
<i>Obr. 24. Zadní víceprvková náprava nového Volva XC90 [19]</i>	38
<i>Obr. 25. Série kompozitních talířových pružin [36]</i>	39
<i>Obr. 26. Základní veličiny u kompozitové šroubovitě pružiny [4]</i>	42
<i>Obr. 27. Napětí v průřezu kompozitové pružiny [4]</i>	42
<i>Obr. 28. Přibližný výpočet nahrazující pružiny</i>	44
<i>Obr. 29. Pružina zadního tlumiče motocyklu Simson</i>	45
<i>Obr. 30. Dělené jádro včetně jisticích kroužků</i>	46
<i>Obr. 31. Předchystané jádro s namotaným profilem</i>	47
<i>Obr. 32. Spodní dělený rám s vloženým jádrem</i>	47

<i>Obr. 33. Samostatný horní rám</i>	48
<i>Obr. 34. Připevněný horní rám.....</i>	48
<i>Obr. 35. Vstupní náboj.....</i>	49
<i>Obr. 36. Pomocný výstup</i>	50
<i>Obr. 37. Kompletní forma.....</i>	50

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Doporučené rozměry talířové pružiny [7]</i>	<i>22</i>
<i>Tab. 2. Mechanické vlastnosti základních typů matric [13]</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 3. Vlastnosti kompozitů s různými vlákny [2]</i>	<i>30</i>

SEZNAM PŘÍLOH

CD s technickými listy