

Kompozitní disková pružina

Bc. Patrik Dohnal

Diplomová práce
2020



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Patrik Dohnal**
Osobní číslo: **T18330**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **Kombinovaná**
Téma práce: **Kompozitní disková pružina**

Zásady pro vypracování

1. Vypracování literární rešerše uvedené problematiky.
2. Návrh kompozitní diskové pružiny a nástroje pro její výrobu.
3. Návrh zkušební přípravky pro statické a dynamické testování.
4. Vyhodnocení dosažených výsledků.

Forma zpracování diplomové práce: **Tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1] Yoshiro Yamada, Toshio Kuwabara a Yoshiro KUWABARA. *Materials for Springs*. Springer Berlin Heidelberg, 2011. ISBN 3642093035, 9783642093036.
- [2] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [3] D. AGARWAL, Bhagwan, Lawrence J. BROUTMAN, Lubomír SODOMKA, Richard BAREŠ, Jan JAVORNICKÝ a Jaroslava ZEMÁNKOVÁ. *Vláknové kompozity*. 1. vydání. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1987.
- [4] VASSILOPOULOS, Anastasios P. *Fatigue life prediction of composites and composite structures*: edited by Anastasios P. Vassilopoulos. Oxford: Woodhead Publishing, 2010. Woodhead Publishing in materials. ISBN 978-1-4398-2789-5.
- [5] DHARAN, C.k.h a Jesse a BAUMAN. *Composite disc springs*. *Composites Part a* [online]. Elsevier, 2007, 38(12), 2511-2516 [cit. 2019-07-31]. DOI: 10.1016/j.compositesa.2007.08.008. ISSN 1359835X.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lukáš Maňas**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **15. května 2020**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

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

Ve Zlíně dne 10. února 2020

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou 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;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou 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);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne: 15.05.2020

Jméno a příjmení studenta: Patrik Dohnal

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se zaměřuje na návrh kompozitní diskové pružiny. Teoretickým základem bylo seznámení s experimentálními výrobními procesy již vyrobených kompozitních diskových pružin. V teoretické části je proveden rešerše aktuálních technologických pokroků při výrobě kompozitních pružin obecně. Cílem práce je navrhnout kompozitní diskovou pružinu a navrhnout formy pro její výrobu. V praktické části je díky teoretickým poznatkům řešen návrh formy pro technologii lisování a pro technologii RTM. Dále jsou navrženy přípravky pro statický a dynamický test. Tyto návrhy jsou zpracovány v programu Autodesk Inventor 2020.

Klíčová slova: Belleville pružina, kompozitní disková pružina, kompozitní materiál, karbonové vlákno, prepreg, tuhost tlumiče, mechanické chování, ortotropní materiály, lisovací forma

ABSTRACT

The diploma thesis focuses on the design of a composite disc spring. The theoretical basis was acquaintance with experimental production processes of already produced composite disc springs. The theoretical part is a search of current technological advances in the production of composite springs in general. The aim of the work is to design a composite disc spring and to design molds for its production. In the practical part, thanks to theoretical knowledge, the design of the mold for the pressing technology and for the RTM technology is solved. Furthermore, jigs for static and dynamic test are proposed. These designs are processed in Autodesk Inventor 2020.

Keywords: Belleville spring, composite disc spring, composite material, carbon fiber, prepreg, damper stiffness, mechanical behavior, orthotropic materials, pressure mold

Touto cestou bych chtěl poděkovat Ing. Lukáši Maňasovi za vedení mé diplomové práce,
za vstřícnou pomoc, podporu, rady, a připomínky.

Dále bych chtěl poděkovat svým přátelům, přítelkyni a rodině za poskytnuté zázemí,
trpělivost a oporu.

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST.....	10
1 KONVENČNĚ POUŽÍVANÉ PRUŽINY.....	11
1.1 POUŽITÍ.....	12
1.2 VÝHODY.....	12
1.3 DRUHY PRUŽIN.....	12
1.4 TYPY DISKOVÝCH PRUŽIN	13
1.4.1 Šroubovité pružiny	13
1.4.2 Prstencové (kroužkové) pružiny	13
1.4.3 Pryžové pružiny	14
1.5 GEOMETRIE DISKOVÉ PRUŽINY	14
1.6 CHARAKTERISTIKA DEFORMACE	15
2 KOMPOZITNÍ PRUŽINY	17
2.1 KOMPOZITNÍ LISTOVÉ PRUŽINY VYZTUŽENÉ 3D TKANINOU	17
2.1.1 Typy tkanin	18
2.1.2 Mechanické vlastnosti pružiny.....	18
2.1.3 Testování tlumících vlastností.....	19
2.1.4 Testování charakteristiky opotřebení	20
2.1.5 Kontrola delaminace	21
2.1.6 Tření mezi diskovými pružinami	21
2.2 POVRCHOVÉ ÚPRAVY KOMPOZITŮ	23
2.2.1 Povrchová úprava výztuže	23
2.3 TEPLOTNÍ CYKLOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	25
3 KOMPOZITNÍ DISKOVÉ PRUŽINY	28
3.1 MATERIÁL PRO VÝROBU.....	28
3.1.1 Vláknové materiály	29
3.1.2 Kladení vrstev	31
3.1.2.1 Skladba tkanin v produkci	33
3.1.3 Skladba vlákna	33
3.1.4 Karbonová vlákna	34
3.1.5 Matrice diskových pružin.....	35
3.2 TESTOVÁNÍ.....	39
3.2.1 Veličiny testování.....	39

3.3	SKLADBA PRUŽIN	39
3.3.1	Výpočet skladby diskových pružin	42
II	PRAKTICKÁ ČÁST	44
4	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	45
5	NÁVRH MODELU DISKOVÉ PRUŽINY.....	46
5.1	VOLBA MATERIÁLU KOMPOZITNÍ PRUŽINY	47
5.2	NUMERICKÉ ŘEŠENÍ.....	48
5.2.1	Diskuze k výpočtu.....	51
6	NÁVRH LAY-UP DIAGRAMU	53
6.1.1	Volba orientace vláken.....	53
7	NÁVRH LISOVACÍ FORMY	55
7.1	VÝSLEDNÝ VÝROBEK	55
7.2	DORAZOVÉ PODLOŽKY	56
7.3	VODÍCÍ PRVKY.....	56
7.4	TEMPERACE FORMY	57
7.4.1	Popis výpočtu.....	58
7.5	IZOLAČNÍ DESKY	59
7.6	TRANSPORTNÍ PRVKY	60
7.7	ZNAČKY PRO UKLÁDÁNÍ MATERIÁLU DO FORMY	61
7.8	HORNÍ BLOK.....	61
7.9	SPODNÍ BLOK.....	62
7.10	SESTAVA LISOVACÍ FORMY.....	63
7.11	NÁSTŘIHOVÝ PLÁN PREPREGU.....	64
7.12	LISOVACÍ PROGRAM	66
7.13	TECHNOLOGICKÝ POSTUP VÝROBY.....	67
7.13.1	Příprava prepregu a pracoviště.....	67
7.13.2	Nastavení stroje a lisování	69
7.13.3	Dokončovací operace a kontrola	69
7.13.4	Dodatečné vytvrzení – postrucing.....	69
8	NÁVRH RTM FORMY	71

8.1	ODVZDUŠNĚNÍ FORMY.....	71
8.2	TĚSNĚNÍ	71
8.3	VSTŘIKOVACÍ SYSTÉM.....	72
8.4	TVÁRNÍK	73
8.5	TVÁRNICE	74
8.6	SESTAVA RTM FORMY	75
8.7	TECHNOLOGICKÝ POSTUP.....	76
8.7.1	Zvolený materiál	76
8.7.2	Tlak vstřikování	77
8.7.3	Vstřikování.....	77
8.7.4	Vytvrzovací proces.....	78
8.7.5	Výrobek.....	78
9	NÁVRH 3D MODELŮ PŘÍPRAVKU	79
9.1	STROJ ZWICK HC 25	79
9.2	ULOŽENÍ PRUŽIN DO TLUMIČE	80
9.3	ZÁKLADNÍ PŘÍPRAVEK.....	81
9.4	PŘÍPRAVEK PRO STATICKÝ TEST	82
9.5	PŘÍPRAVEK PRO DYNAMICKÝ TEST SADY PRUŽIN	82
9.6	PŘÍPRAVEK PRO DYNAMICKÝ TEST TLUMIČE	83
10	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	85
	ZÁVĚR	87
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	89
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	92
	SEZNAM OBRÁZKŮ	94
	SEZNAM TABULEK.....	97
	SEZNAM PŘÍLOH.....	98

ÚVOD

Převážnou část studia slýcháme teoretické vysvětlení, za jakých podmínek, jakým způsobem a s jakými materiály lze pracovat a tvořit díky nim pokročilé výrobky, které napomohou strojírenskému nebo plastikářskému průmyslu a mnoho dalším. S diplomovou prací přichází možnost vytvořit pokrokový výrobek z nedávno vyvinutého materiálu, s vidinou inovace diskových pružin za pomoci komponentních materiálů.

Skupina polymerů vyztužených vlákny je jedna z mála, která nabízí velmi široké možnosti kombinací látek a technologií k výrobě prototypových výrobků. Tyto kombinace dokážeme aplikovat na výrobky jejichž použití může být technicky jednoduché, nebo výrobky, které jsou použity v extrémních konstrukčních sestavách, např. v leteckém průmyslu nebo dokonce v kosmonautice.

Nositel pevnosti je mimo jiné také matrice, která má neméně důležitou zásluhu jako výztuž v podobě vlákna. Tyto matrice mají prapůvod v přírodě, jakožto vedlejší produkt průmyslu. V plastikářském průmyslu, převážně tedy v problematice kompozitních výrobků, se však přírodní pryskyřici zabývat nebudeme. Zajímat se budeme hlavně o polymerní matrice, jako jsou nejrůznější syntetické látky, díky nimž dokážeme uspokojujivě vytvořit celek navrstvených vláken s požadovanými vlastnostmi. Tyto celky dokáží velmi dobře obstát v porovnání s konvenčně používanými kovovými materiály.

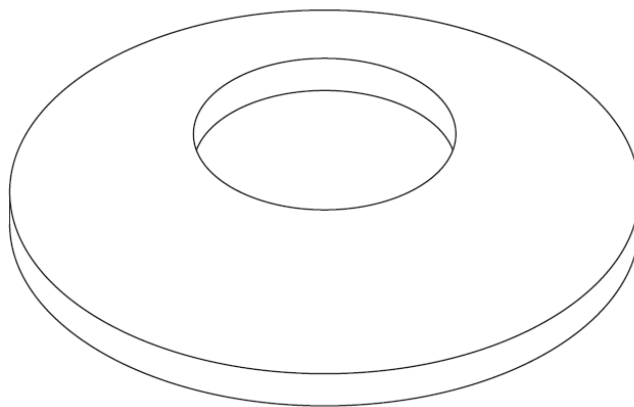
Kov jako surovina nikdy nevyumizí ze strojírenského průmyslu. V mnoha aplikacích je plně dostačující, avšak pro náročné zákazníky a inovátory je v dnešní době mnohem zajímavější, již dříve zmíněný, kompozitní materiál, který nám přináší mnoho výhod, ale i nevýhod. Tyto parametry lze upravovat mnoha způsoby a tím se přiblížit k ideálnímu stavu výrobku. K tomu je zapotřebí studovat tyto materiály podrobněji, poté najít jejich společnou konfiguraci, která bude schopna konkurovat kovovému materiálu ve všech směrech. Tento proces studia je velmi náročný a k výsledku je zapotřebí mnoho úsilí a experimentů.

Inovace, jako je náhrada kovových pružin kompozitními je v dnešní době reálná. Byly zde i reálné pokusy a zástavby, které však vyžadují další testování a úpravy. S ekvivalentní náhradou kovové diskové pružiny přichází velmi výrazná úspora nejen hmotnosti ale také místa, hlavně z pohledu únosnosti na menší výšce celé sestavy diskových pružin při zachování velmi identických parametrů. V této problematice je samozřejmě mnoho úskalí, které je potřeba eliminovat a zachovat materiál kompozitní pružiny homogenní a také aby odolával vnějším provozním vlivům a povětrnostním podmínkám.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KONVENČNĚ POUŽÍVANÉ PRUŽINY

V polovině devatenáctého století byla vynalezena disková pružina ve tvaru komolého kuželu. Tento disk byl následně nazván „Belleville Washer“ podle jména svého vynálezce Juliana F. Belleville. Ve 21. století jsou diskové pružiny používány v rozsáhlých zařízeních jako jsou kosmické lodě, satelity, zdravotnická zařízení, obranné systémy, automobily a obráběcí stroje. Tyto pružiny jsou kónické podložky navržené tak, aby je bylo možné zatěžovat pouze v axiálním směru. Mohou být zatěžovány staticky kontinuálně, přerušovaně nebo být cyklicky vychýleny, tj. dynamicky zatíženy. Použitím pružiny tohoto typu, samostatně nebo v naskládaných kombinacích, může být dosaženo proměnných charakteristik celku, které jsou vyhovující pro dané aplikace. Diskové pružiny řeší problémy s velkým zatížením v omezeném prostoru, například v sestavách spojky převodovky, zarážkách a upevňovacích prvcích. Trh může nabídnout řadu možností jejich kombinací v různých konfiguracích a pro různé únosnosti. Pružiny jsou používány ve dvou širokých kategoriích aplikací. V jednom případě poskytují velmi vysoké zatížení při malých průhybech, jako například u kovových raznic v mechanismech zpětného rázu a přetlakových ventilech. Druhá kategorie využívá speciální nelineární charakteristiky vychýlování zátěže – zejména těch s konstantní zátěží. V těchto aplikacích udržují konstantní sílu bez ohledu na změny rozměrů způsobené opotřebením, změnami teploty nebo tolerancemi. Dále tato konstrukce a uspořádání eliminuje boční vychýlení celého mechanismu oproti vinuté pružině, u které při zatížení vzniká torze, která záporně ovlivňuje její funkci. [6]



Obr. 1 Disková pružina „Belleville“ [8]

1.1 Použití

Pružiny slouží např. k zachycování (absorpci) energie nárazů a kmitu (pružiny podvozku vozidel, pryžové silentbloky motorů a stabilizátorů, pryžová tělesa ve spojkách), k vzájemnému přitlačování dílů mechanismů (spojkové pružiny), k přitlaku stěračů a k vracení mechanických ovladačů do výchozí polohy jedno-činných hydraulických válců. Dále jsou používány jako zbraňové mechanismy zpětného rázu, příruby potrubí, malé obráběcí stroje a aplikace, kde rozdíl expanze může způsobit uvolnění šroubu. Diskové pružiny jsou používány např. k odpružení při ukotvení těžkých strojů motorů (např. stroje výtahu s navijákem).

1.2 Výhody

Vysoké zatížení při malém průhybu umožňuje, že diskové podložky jsou s oblibou používány pro aplikace, kde je zapotřebí vysoká těsnost dotažení vysoce namáhaných šroubů tam, kde působí tepelná roztažnost, vibrace a tečení materiálu, které by mohly způsobit jejich uvolnění. Jednou z velkých výhod diskových podložek je jejich jednoduchá geometrie a poměrně jednoduchý způsob výroby formy, případně přípravků pro jejich výrobu. Toto činí jejich výrobu relativně levnou zejména ve velkých množstvích při standardních rozměrech. Diskové podložky se dají také snadno specifikovat a nainstalovat. Technici mohou použít jedinou podložku nebo zdvojnásobit zatížení bez změny průhybu namontováním dvou podložek paralelně. Dvě podložky umístěné v sérii – to znamená s jednou v obráceném směru – se zdvojnásobí průhyb bez změny zatížení. Montéři často pro dosažení požadovaného výkonu a k vyrovnání pnutí na stejných šroubech experimentují s kombinacemi paralelních a sériových podložek.

1.3 Druhy pružin

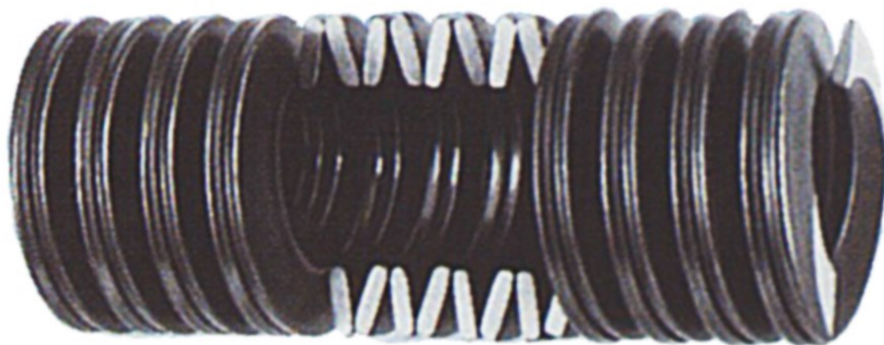
Pružiny (péra) je možné dělit podle druhu namáhání, pro které jsou určeny, na tlačné, tažné, ohybové a zkrutné (torzní). Podle tvaru jsou kovové pružiny děleny na šroubovitě, ploché (ohybové), tyčové (torzní), talířové a prstencové. Pružicí jednotky mohou mít také podobu pryžových válečků, pneumatických nebo hydropneumatických jednotek. Šroubovitě pružiny jsou většinou vinuté z ocelového drátu na válcový trn jako tlačné (se stoupáním větším, než je průměr drátu), tažné nebo jako torzní. Tlačné a tažné vinuté pružiny mají velké rozsahy pohybu s přibližně lineární charakteristikou. Zkrutné vinuté pružiny se používají např. k

přítlaku aretační západky blokující zpětný chod západkového kola nebo páky (ruční brzdy). Zkrutné tyče mají většinou kruhový průřez. Akční a reakční kroučící (točivé) momenty na opačných koncích deformují elasticky krutem zkrutnou tyč. Zkrutné tyče jsou využívány ke stabilizaci (zkrutné stabilizátory) nebo k odpružení náprav osobních automobilů. Měřicí zkrutné tyče jsou používány k měření točivého momentu u momentových klíčů.

1.4 Typy diskových pružin

1.4.1 Šroubovitě pružiny

Tyto pružiny jsou zevnějškem podobné konfiguraci diskových pružin uložených protilehle na sebe. Poskládány jsou ze dvou kusů plochých šroubovic zatočených do sebe, mající přitom v podélném řezu identický profil jako konfigurace protilehle poskládaných talířových pružin. Tyto šroubovitě diskové pružiny jsou využívány např. k vytváření upínací síly během frézování, nebo také pro předpětí akceleračního pedálu v systému elektricky ovládaného akcelérátoru. [2]

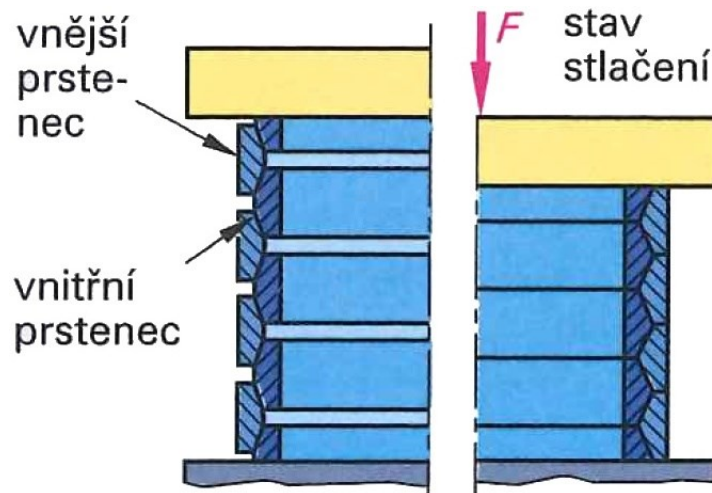


Obr. 2 Šroubovitá talířová pružina [2]

1.4.2 Prstencové (kroužkové) pružiny

Tento typ pružiny je složen z vnějších a vnitřních uzavřených ocelových profilovaných prstenců, které se dotýkají vzájemnými kuželovými plochami. V klidovém stavu bez zatížení mají mezi sebou prstence axiální vůli. Při axiálním zatížení se díky klínovému efektu rozestupují vnější prstence, a naopak stlačují vnitřní. Rozsah tohoto mechanismu je omezený šířkami mezer mezi prstenci, které vytváří při plném stlačení dva válce. Díky tření kuželových ploch je docíleno vysoké tuhosti a velice dobrého tlumení. Používají se v železniční dopravě, konkrétně v náraznících vagónů, jak osobních, tak transportních. Dále

jako nárazníky válcovaných polotovarů na dojezdových válečkových mechanismech válcovacích tratí.



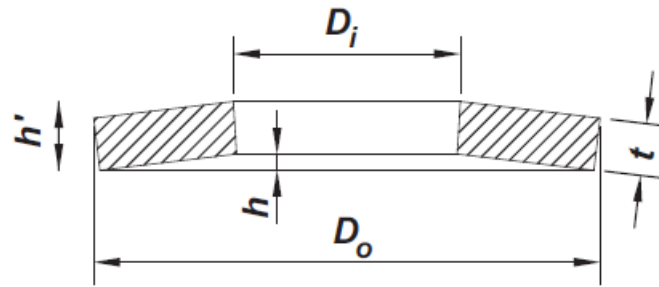
Obr. 3 Kroužková pružina [7]

1.4.3 Pryžové pružiny

Pryžové pružiny se používají většinou k tlumení záchvěvů jako tzv. silentbloky nebo jako pružné spojky. Jsou vhodné pro zavěšení motoru, převodové skříně nebo odpružení dílů podvozku osobních i nákladních automobilů. Silentblok se skládá z pryžového jádra a kovových pouzder pro upevnění vibrujících součástí, jako je motor nebo náprava, a opěrné části karoserie. Pryžové části silentbloků a spojek mohou být namáhané na tlak nebo smyk.

1.5 Geometrie diskové pružiny

Pružný kónický kotouč s otvorem uprostřed je zobrazen na obrázku 1. Má nelineární charakteristiku deformace síly, což je užitečné v určitých aplikacích. Diskové pružiny jsou kompaktní a jsou schopné velké tlakové síly, ale jejich výchylky jsou omezené. Jejich geometrii tvoří dvojice průměrů, vnějšího D_o a vnitřního D_i , dále tloušťka pružiny t a celková výška pružiny h' . Další rozměry, jako maximální zdvih pružiny h , se dá z těchto geometrií zjistit výpočtem.



Obr. 4 Hlavní rozměry pružiny [8]

1.6 Charakteristika deformace

Charakteristiky deformace síly pro tyto pružiny závisí na vlastnostech materiálu a rozměrech znázorněných na obrázku 4. Vztah mezi silou zatížení a prohnutím neboli vychýlením je nelineární a nelze jej považovat jako tuhost. Napětí v diskové pružině je soustředěno na vnitřních hranách průměru a vnějších průměrech. Největší napětí je ve stlačeném stavu, a proto dochází k napětí na vnitřním poloměru konvexní straně. Tyto rovnice jsou citovány z Normy DIN 2092 – výpočet talířové pružiny. [9],[21]

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

$$F_{Tc} = F \cdot \frac{n}{1 \pm \mu_M \cdot (n - 1) \pm \mu_R} \quad (2)$$

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

$$K_1 = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\left(\frac{\delta - 1}{\delta} \right)^2}{\frac{\delta + 1}{\delta - 1} - \frac{2}{\ln \delta}} \quad (4)$$

$$K_2 = \frac{6}{\pi} \cdot \frac{\frac{\delta - 1}{\ln \delta} - 1}{\ln \delta} \quad (5)$$

$$K_3 = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{\delta - 1}{\ln \delta} \quad (6)$$

$$\sigma_{OM} = - \frac{4 \cdot E}{1 - \mu^2} \cdot \frac{t \cdot s}{K_1 \cdot D_e^2} \cdot \frac{3}{\pi} \quad (7)$$

$$\sigma_l = -\frac{4 \cdot E}{1 - \mu^2} \cdot \frac{t \cdot s}{K_1 \cdot D_e^2} \cdot \left[K_2 \cdot \left(\frac{h_0}{t} - \frac{s}{2 \cdot t} \right) + K_3 \right] \quad (8)$$

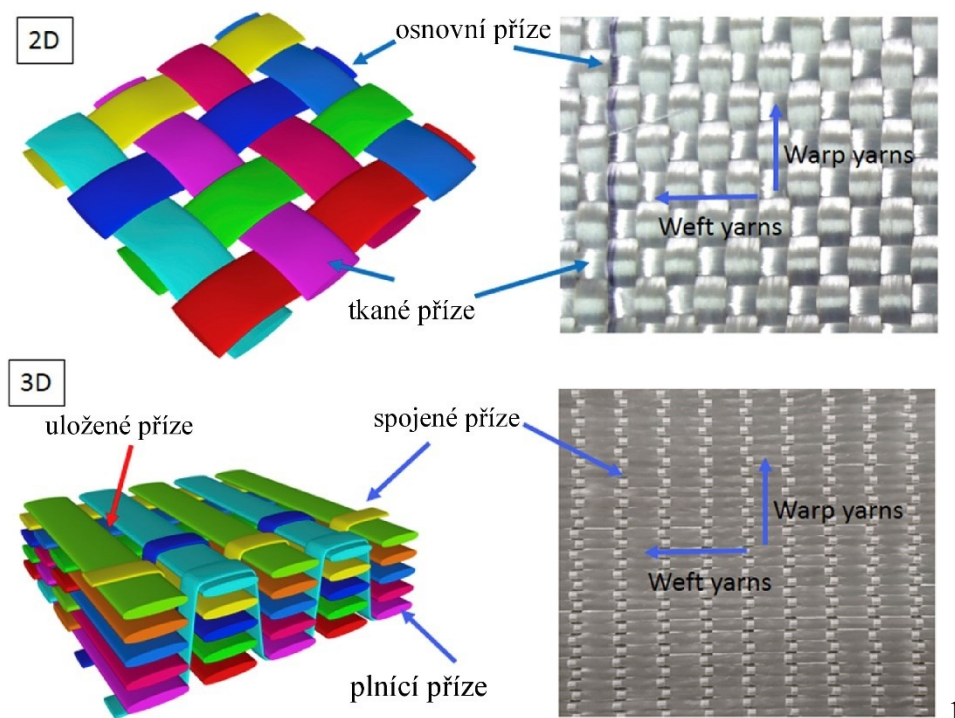
$$\sigma_{ti} = \frac{4 \cdot E \cdot \delta}{K_1 \cdot D_o^2 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left[K_2 \cdot \left(h - \frac{\delta}{2} \right) + K_3 t \right] \quad (9)$$

$$\sigma_{to} = \frac{4 \cdot E \cdot \delta}{K_1 \cdot D_o^2 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left[K_4 \cdot \left(h - \frac{\delta}{2} \right) + K_5 t \right] \quad (10)$$

2 KOMPOZITNÍ PRUŽINY

2.1 Kompozitní listové pružiny vyztužené 3D tkaninou

V automobilovém průmyslu prozatím nedošlo k výraznému přechodu z polostrukturálních na nosné komponenty jako jsou podvozek nebo systém odpružení. Hlavní příčinou je anizotropie kompozitního materiálu, protože při navrhování a výrobě kompozitu představuje mnoho komplikací. V současné době jsou textilními strukturálními kompozity materiály, které se volí pro různé předběžné aplikace. Tyto materiály v EU nacházejí mnoho inovativních aplikací v oblasti letectví, sportu nebo lékařské a občanské výstavby. Kompozity vyztužené textilní strukturou jsou také určeny pro nosné aplikace. Avšak je potřeba je dále vyvíjet a bude trvat ještě dlouhou dobu, než budou vyráběny v sériové výrobě a použity v běžném provozu. Nedávno bylo provedeno několik zkoušek pro stanovení mechanických vlastností a použití pro aplikace tlumících systémů. Behera se zabýval vlivem návrhu vazby na mechanické vlastnosti kompozitů vyztužených 3D tkaninou. Byla zkoumána mechanická výkonnost 3D tkaných distančních sendvičových kompozitů s různými geometriemi buněk.



Obr. 5. Schéma 2D a 3D tkaniny [16]

Bylo zjištěno, že únavová výkonnost klesá se zvýšením procenta pojiva. Zhang zkoumal nárazové chování v nízkých rychlostech oscilace u jednosměrných 2D a 3D tkaných kompozitů vyztužených polyethylenem. Textilní strukturální kompozit se však dosud nezkoumal pro použití v automobilovém sektoru. Výzkum byl zaměřen na potenciál textilní strukturální kompozity pro jeho použití v listovém plátu listové pružiny pro automobilový průmysl. [16]

2.1.1 Typy tkanin

Jako materiál byly použity sekaná vlákna, obousměrné (2D) prosté tkané textilie a trojrozměrné (3D) tkané textilie z textilních vláken E-glass (dodávané Owens Corning, Indie) s různou lineární hustotou 600–2400 tex. Stejný materiál byl rozsekán na 10 mm dlouhá vlákna. Pevnost v tahu, procenta prodloužení a počáteční modul u těchto materiálů byly $3445 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$, $2,53 \% \pm 0,10 \%$ a $72 \text{ GPa} \pm 1,5 \text{ GPa}$. Byla zvolena epoxidová matrice s ohledem k provedeným experimentům. Použití vinylesterových a polyesterových pryskyřic nedosahovalo na dobré výsledky epoxidové pryskyřice. Bylo provedeno mnoho experimentů, které se snažily nahradit ekonomičtější pryskyřice za epoxidy, ale všechny pokusy o použití polyesterových nebo vinylesterových pryskyřic byly dosud neúspěšné. Jako materiál matrice byl vybrán Epoxy LY556 s tužidlem HY951 v poměru 10:1. Pevnost v tahu, procentuální prodloužení a počáteční modul byly zjištěny na $73 \text{ MPa} \pm 2 \text{ MPa}$, $4 \% \pm 0,20 \%$ a $5 \text{ GPa} \pm 0,2 \text{ GPa}$. [16]

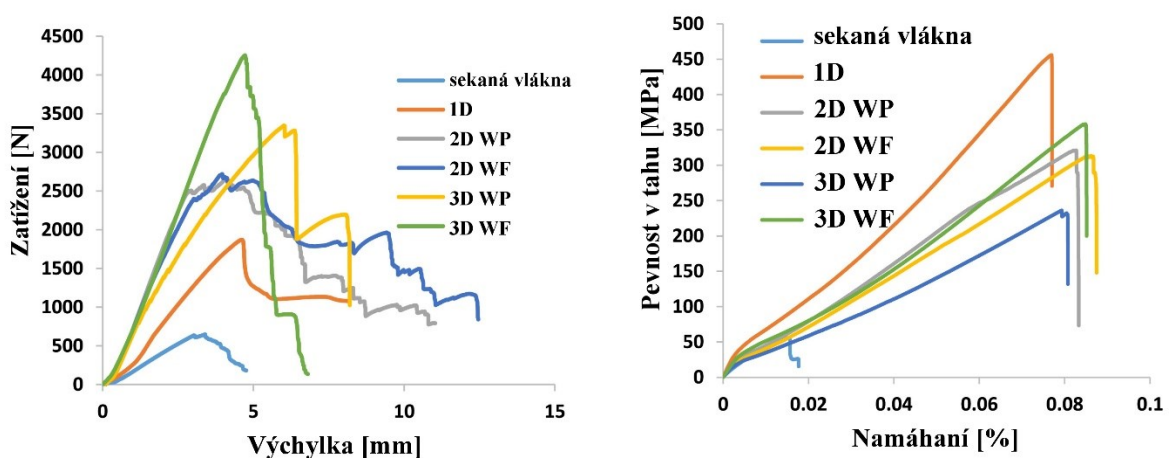
Tab. 1 Měřené parametry několika vyztužených materiálů.

Skladba vláknitého systému	Objemová frakce vláken [%]	Hustota kompozitu [g/cm^3]	Plošná hustota tkaniny [g/m^2]	Stohování vrstev	Tloušťka jednotlivých vrstev [mm]	Celková tloušťka [mm]
Sekané	$38 \pm 1,1$	$1,71 \pm 0,08$	-	-	-	$6,6 \pm 0,32$
1D	$54 \pm 1,1$	$1,93 \pm 0,13$	1150 ± 20	8	$1,3 \pm 0,15$	$5,1 \pm 0,27$
2D	$39 \pm 1,3$	$1,73 \pm 0,09$	1020 ± 18	9	$1,2 \pm 0,17$	$6,2 \pm 0,25$
3D	$48 \pm 3,6$	$1,85 \pm 0,12$	8200 ± 60	1	$6,5 \pm 0,31$	$6,3 \pm 0,18$

2.1.2 Mechanické vlastnosti pružiny

Mechanické vlastnosti jsou obvykle zkoumány několika běžnými způsoby. Ve studii Khatkara a Behery byly mechanické vlastnosti testovány pomocí univerzálního tahového stroje o kapacitě 100 KN. Pro tahový test je potřeba několik vzorků o stejném rozměru pro

každou kompozitní strukturu při rychlosti deformace 2 mm / min. Pevnost v ohybu byla stanovena třibodovým ohybovým testem. Pro stanovení pevnosti v ohybu kompozitu byly zaznamenána data pěti vzorků. Z obvyklé křivky napětí při deformaci získané z tahové a ohybové zkoušky je možno vyvodit, že kompozit 1D poskytuje nejvyšší pevnost v tahu a sekaný kompozit je nejslabší. Pevnost 2D a 3D vyztužených materiálů zůstává mezi těmito dvěma v pořadí rozdělení objemové frakce v jejich příslušném směru. Ohybová tuhost kompozitů byla nejvyšší u 3D a 2D tkaniny. [16]



Obr. 6 Křivky zatížení-výchylky a Pevnosti v tahu při stlačení pružiny

2.1.3 Testování tlumících vlastností

Mimo mechanické vlastnosti je potřeba zohlednit také další vlastnosti spojené se zjištěním životnosti daného funkčního prvku. Tlumení je jednou z důležitých vlastností listové pružiny pro zajištění plynulé jízdy bez vibrací. Kompozity mají vlastní tlumící vlastnosti, díky nimž jsou vhodné pro aplikaci listových pružin ve srovnání s běžnými kovovými materiály. Během mechanické deformace vytvářejí polymerní materiály obrovské vnitřní tření díky viskoelastickým vlastnostem materiálu. Kompozit tedy nabízí vlastní tlumící kapacitu a zlepšené chování při tlumení. Ve dříve zmíněné studii byly testovány u kompozitních prvků jejich tlumící vlastnosti z hlediska dynamické mechanické analýzy (DMA) a tlumení hystereze. DMA kompozitních vzorků byla testována pomocí MCR 702 Multidrive Dynamic mechanického analyzátoru v režimu třibodového ohybu. Vzorky o rozměrech 50 mm x 10 mm byly testovány při frekvenci 10 Hz a teplotě pohybující se od pokojové teploty do 200 °C. Amplituda byla nastavena mezi 40 a 50 μm na základě tloušťky vzorků. Byl

studován akumulací modul, ztrátový modul kompozitu pro listovou pružinu v závislosti na teplotě. Chování hysteretního tlumení kompozitní listové pružiny bylo stanoveno v souladu se standardem SAE J 1528. Kompozitní listová pružina byla analyzována v ohybovém režimu pro stanovení jejich hysteretního výkonu zatížením až 200 N a návratem zpět na 0 N při rychlosti zatížení 5 N/s. Kompozit vyztužený 3D tkanou strukturou vykazoval vysokou schopnost absorpce energie. To bylo způsobeno přítomností specifického vyztužení a skutečností, že modul pružnosti v kompozitu se pozitivně mění s nárůstem izotropního rozdělení vláken. Avšak u všech ostatních kompozitů bylo zjištěno, že tlumení (modul ztrát) 3D kompozitu bylo nižší, lze tlumení dále zlepšit optimalizací konfigurace pojiva v závislosti na počtu pojiv vyžadovaných na jednotku plochy k udržení 3D struktury, což může poskytnout lepší kombinaci absorpce energie a tlumení. V další zkoumané studii architektury vláken v 3D kompozitu bylo zjištěno, že špatná mechanická výkonnost byla způsobena přesycením vyztuže pryskyřicí. [16]

2.1.4 Testování charakteristiky opotřebení

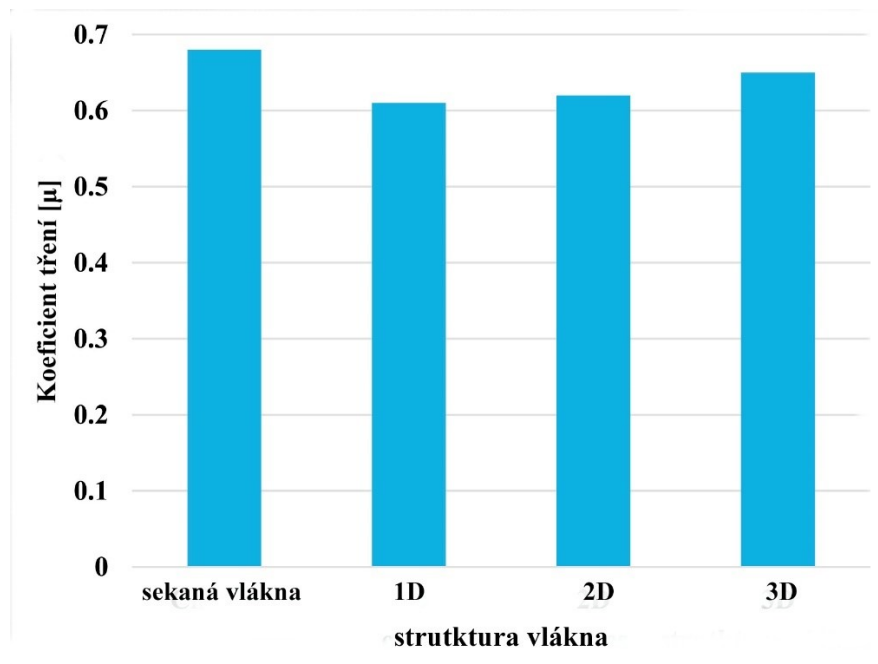
Testování opotřebení bylo prováděno v souladu se standardem ASTM G99 za použití jedno frekvenčního tribometru CETR-3 UMT. Zkouška byla provedena při rychlosti 0,25 m/s pro kluznou vzdálenost 1 m při standardním zatížení 100 N. Jako brusný materiál byl použit brusný papír s hrubostí třídy 120. Bylo vyzorováno, že se koeficient tření mění pozitivně s distribucí vláken v různých směrech při separaci materiálu za konstantního objemu. Sekané vláknité kompozity měly nejvyšší koeficient tření díky distribuci vláken ve více směrech. 1D kompozitní struktura měla koeficient nejnižší a zvýšená pro 2D a 3D strukturu, v 1D byla všechna vlákna v jednom směru, zatímco pro 2D a 3D vlákna byla distribuována ve dvou, respektive ve třech směrech. [16]

Specifická míra opotřebení K_0 byla zjištěna pomocí níže uvedené rovnice:

$$K_0 = \frac{\Delta V}{F \cdot D} \quad (11)$$

Kde je:

ΔV	objem opotřebení
F	aplikované zatížení
D	posuvná vzdálenost



Obr. 7 Porovnání opotřebení třením kompozitních struktur [16]

2.1.5 Kontrola delaminace

Díky elektronovým mikroskopům bylo možné pořídit snímky testovaných kompozitů. Při testování listových plátů pružin, byla zjištěna poměrně velká míra delaminace vzorků s 1D a 2D výztuží a sekanou výztuží, což dělá z těchto typů tkanin nevyhovující typ materiálu pro aplikaci v listové pružině.

2.1.6 Tření mezi diskovými pružinami

Tření figuruje při funkci diskových pružin velmi významně a ovlivňuje charakteristiku sady a také jejich životnost. Velikost tření je závislá na vedení sady pružin, jakosti povrchu, mazání, výšce sady a počtu na sebe naskládaných vrstev. Tření činí asi 3 až 5 % zatížení na jednu vrstvu. [3]

Většina teoretických výpočtů zanedbávala účinky tření v důsledku kontaktu s navzájem se opírajícími povrchy, které způsobují při zatěžování a uvolňování odlišné deformační křivky. Curti a Montaniniho dokázali zohlednit účinky tření, což napomáhá přesnějším stanovováním charakteristik diskových pružin. Důležité bylo znát koeficient tření mezi povrchy diskových pružin a nosnými povrchy. Byly provedeny experimentální zkoušky na ocelových kónických talířových pružinách, aby se vyhodnotil koeficient tření a jeho závislost na zatížení a rychlosti průhybu. Zkoušky se uskutečnily za použití pneumatického

zařízení. Mezi dvě diskové pružiny stejného typu se vložila ocelová posuvná deska, upevněná podél menšího průměru. Byly použity dvě posuvné desky s různou tvrdostí (220HB a 420HB, měřeny standardními Brinellovými testy). Provedlo se více než 350 testů na kónických talířových pružinách s různou geometrií, změnou rychlosti průhybu a výpočtem koeficientu tření pro různá tlaková zatížení. Během testování nebyly zjištěny žádné negativní vlivy, které by měnily hodnotu koeficientu tření. Průměrné hodnoty koeficientu tření byly stabilní pro všechny pružiny s rozdílnou geometrií. Rozmezí koeficientu tření 0,134 – 0,145 při použití ocelové desky 420HB. Numerické příklady a srovnání s experimentálními testy a konečnými výpočty prokázaly, že zanedbávání účinků tření vede k odchylkám v hodnotách zátěžových křivek asi 2–5 % (pro koeficient tření $f = 0,14$; průměrná hodnota koeficientu), v závislosti na parametrech, které definují geometrii talířové pružiny. Díky výsledkům byl vyvozen závěr, že je možné zanedbat třecí účinky při použití „měkké“ diskové pružiny, zatímco je doporučeno vzít v úvahu třecí účinky v případě „tvrdých“ kotoučových pružin. [17]

Zatížení vzniklá třením působí mezi kuželovou styčnou plochou jednotlivých pružin (koeficient w_M) a styčnou plochou rovných ploch mezi stlačenou pružinou (koeficient w_R). Takovéto zatížení způsobuje zvýšení zatížení pružiny, když je pružina zatížená a snížení, když je zatížení odstraněno. [21]

Vlastnosti zatížení/průhybu musí být vypočítány použitím následujícího vzorce:

$$F_{gesR} = F \cdot \frac{n}{1 \pm w_M \cdot (n - 1) \mp w_R} \quad (12)$$

Kde je:

F_{gesR}	[N]	Zatížení pružiny, pro pružiny skládané paralelně, se zřetelem na tření
F	[N]	zatížení pružiny
w_M	-	koeficient pro kuželové styčné plochy
w_R	-	koeficient pro rovinné styčné plochy
-	-	zatížení
+	-	odlehčení
n	-	počet jednotlivých talířových pružin skládaných paralelně

Níže v tabulce jsou rozepsány koeficienty pro konvenční kovové pružiny, díky kterým je možno provést výpočet, avšak pro kompozitní pružiny nejsou hodnoty koeficientů dány.

Tab. 2 Hodnoty tření mezi povrchy plochy (w_M) a tření hrany (w_R). [21]

Rozměrové řady dle EN 16983:2016	w_M	w_R
A	0,005 do 0,03	0,03 do 0,05
B	0,003 do 0,02	0,02 do 0,04
C	0,002 do 0,015	0,01 do 0,03

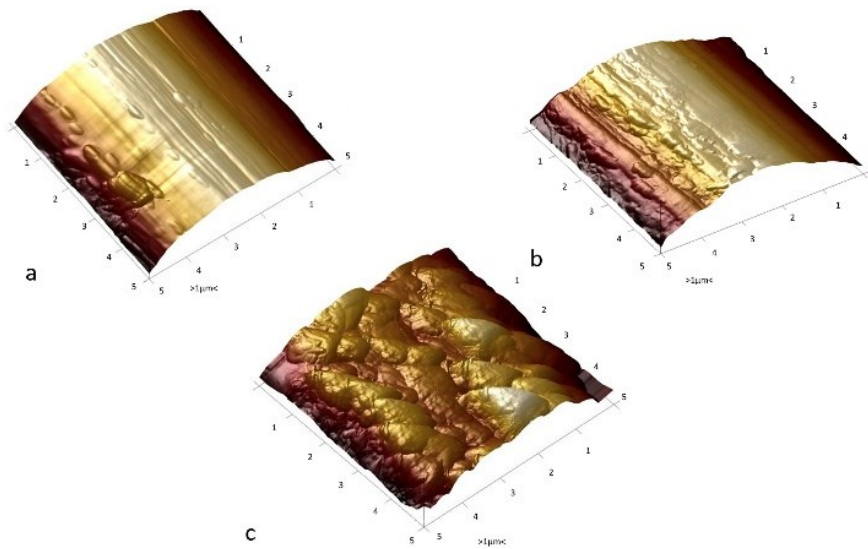
2.2 Povrchové úpravy kompozitů

Hladký a chemicky netečný povrch anorganického uhlíkového vlákna může vést ke špatné přilnavosti a nízké adhezi vláknité matrice, což dále negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti kompozitů vyztužených uhlíkovými vlákny. K odstranění omezení vyvolaných překážkami na hladkém povrchu vláken bylo popsáno mnoho výzkumů týkajících se povrchových úprav uhlíkových vláken. Nejen povrchová úprava výztuží obecně může ovlivnit mechanické vlastnosti. Je třeba dbát také na povrchovou úpravu hotových odformovaných výrobků. Homogenita povrchu výrobků ovlivňuje nejen mechanické vlastnosti, ale také životnost a odolnost daného výrobku. Tyto parametry se dají ovlivnit technologickým postupem a dokončovacími operacemi.

2.2.1 Povrchová úprava výztuže

Ve studii D. Semitekolose bylo zkoumáno zvýšení mezifázové pevnosti vazby vlákna a matrice u kompozitů z uhlíkových vláken pomocí elektro-polymerace kyseliny polymetakrylové na komerčně dostupných tkaninách z uhlíkových vláken. Avšak vzhledem k malé aktivní měrné ploše, nízké energii povrchu, nepolárním vlastnostem a chemické inertnosti vykazuje povrch uhlíkových vláken slabou mezifázovou adhezi. V důsledku toho nejsou napětí z matrice na výztužná vlákna adekvátně přenášena, tedy mechanická integrita prostřednictvím houževnatosti, podélné a příčné pevnosti, zůstává sporná. Proto většina kompozitů vykazuje tendenci k selhání na rozhraní vazby vlákno-matrice v důsledku slabé fyzické vazby a tak vystavuje vlákno tzv. Pull-out efektu. Tento jev může významně snížit celkové mechanické vlastnosti kompozitu, jako je mezilaminární smykové napětí. K řešení tohoto problému byly použity různé techniky povrchové úpravy např. ošetření plazmovou oxidací plynů a kapalin, a elektrochemickými metodami. Výsledná povrchová topografie je

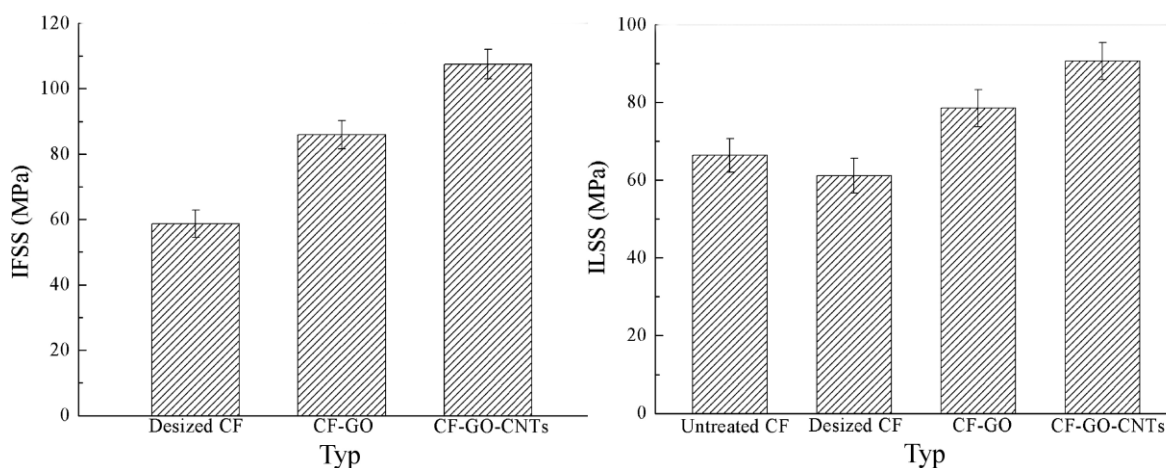
zobrazena na obrázku 8., kde je možné vidět kompozitní vlákno bez povrchové úpravy (obrázek 8b). Na dalších dvou obrázcích jsou zachyceny povrchy po aplikaci výše zmíněných metod. Z těchto metod nejlépe vyšla metoda elektropolymerace, po jejímž využití byla o 3 % zvýšená hmotnost vzorku, ale i přesto byly mnohonásobně zvýšeny smáčecí vlastnosti vlákna epoxidovou pryskyřicí a zvýšena adhezivní síla vlákna s polymerní matricí. Celkově to vedlo k 36% zvýšení mezilaminární smykové pevnosti. Elektropolymerace PMMA (Polymethylmethakrylát) na uhlíkové vláknité textilie může být zjevně efektivním nástrojem pro zvýšení adheze na rozhraní vlákna a matrice. Protože probíhá ve vodném prostředí, jakož i nákladově efektivní krok pro eliminaci vytrhávání přetržených vláken, jde o postup šetrný k životnímu prostředí. [19]



Obr. 8. Snímky získané AFM mikroskopem - nedotčená textilie (a), elektrochemicky ošetřená b) elektropolymerizovaná c). [19]

Před několika lety bylo vyvinuto zavedení uhlíkových nanotrubic (CNT) do kompozitů, jako účinné posílení pro zlepšení kompozitních vlastností. Z tohoto důvodu vzniká hybridní složení uhlíkových vláken s uhlíkovými nanotubicemi, jako nový způsob výroby výkonných vysoko-mechanických kompozitů. Přestože je přímá aplikace CNT na povrch vlákna účinnou metodou ke zlepšení vlastností na rozhraní vlákno-matrice, nedostatek chemických vazeb omezuje další zvýšení mezifázových vlastností výsledných kompozitních výrobků. Oxid grafenu (GO) s vynikajícími mechanickými vlastnostmi se může rovnoměrně rozptýlit a pevně adsorbovat na povrchu uhlíkových vláken. Vyvine tak nové hierarchické vyztužení. Jako nový uhlíkový materiál má GO dvourozměrnou strukturu a vykazuje

mimořádné mechanické a tepelné vlastnosti. Tyto dva prvky byly vzájemně na sobě modifikovány chemickou reakcí na povrchu uhlíkového vlákna. Studie R. Zhanga nám podobně, jako z přechozího článku, přiblížila, jakým způsobem se zlepšily vlastnosti po zušlechtní uhlíkového vlákna. Díky aplikaci GO a CNT bylo dosaženo většího povrchu hybridních vláken, které výrazně zvýšily povrchovou plochu vlákna a drsnost. Tyto parametry dále zvyšují povrchovou energii vlákna a její smáčivost. I přes vznik mírných trhlin došlo ke zvýšení mezifázové adheze mezi uhlíkových vláken a maticí. Při zkoumání lomu se několikanásobně snížilo množství vytrhnutých vláken a to naznačilo, že se výrazně zlepšily mezifázové vlastnosti a mechanické propojení mezi uhlíkovými vlákny a maticí. Tyto výsledky také naznačují, že se díky aplikaci GO a CNT významně zlepšily vlastnosti vlákna. [20]

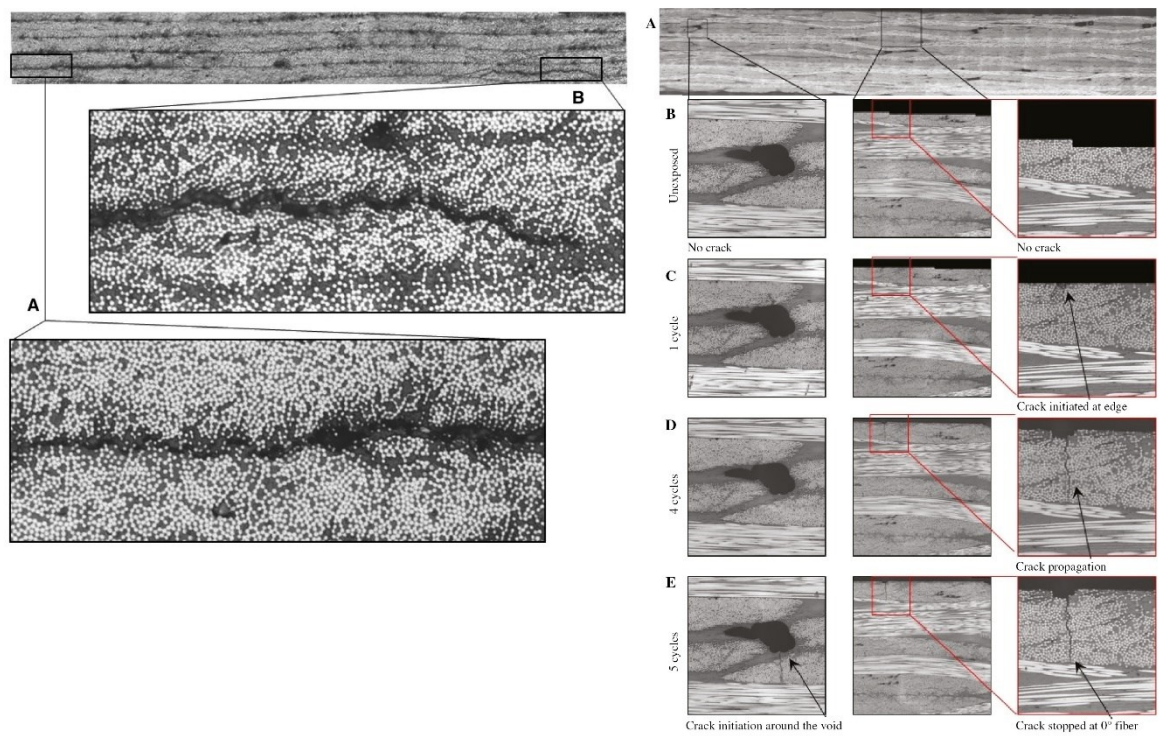


Obr. 9. Interlaminární (vlevo) a mezilaminární (vpravo) fázové napětí. [20]

2.3 Teplotní cyklování kompozitních materiálů

Polymerní i polymerní kompozitní materiály mají sklon k předčasným nežádoucím vlivům na mechanické a fyzikální vlastnosti během doby provozu. Kompozitní materiály ve vesmíru podléhají tvrdým okolním podmínkám, jako je ultrafialové záření, vysoké vakuum, atomový kyslík, nabité částice, umělé trosky, mikrometeoroidy, elektromagnetické záření a tepelné cykly, které způsobují degradaci materiálu. Když je kompozitní materiál vystaven extrémním změnám teploty, je vyvoláno tepelné napětí. Tepelná napětí jsou způsobena velkým rozdílem tepelné roztažnosti vlákna a matrice. Nepřetržité tepelné cykly mohou způsobit tvorbu mikrotrhlin, což vede k oddělování vláken / matrice v kompozitu, a nakonec k selhání materiálového systému. Zejména mechanické a tepelné vlastnosti kompozitů vystavených těmto tepelným cyklům, upoutaly velkou pozornost ze strany výzkumných

ústavů a vesmírného průmyslu. Mahdavi ve své studii spolu s kolegy využil materiál CYCOM 5320-1. Jedná se o zpevněný epoxidový prepreg systém. Pro analýzu byly použity dva různé kompozitní vzorky vyrobené z jednosměrné tkaniny (UD) a tkané textilie – 5 svazkového karbonového materiálu a epoxidové pryskyřice CYTEC. Ve studii byly porovnávány mechanické a tepelné vlastnosti vzorků po vystavení tepelnému cyklování. U vzorků UD jsou mikrotrhliny viditelnější po 350 tepelných cyklech. Trhliny se začaly tvořit spojením sousedních dutin dohromady a způsobením delaminačních trhlin mezi vrstvami. V jedné vrstvě se také vytvořilo několik trhlin spojením dutin. Všechny pozorované trhliny byly vodorovné a v celé tloušťce vrstvy kompozitu nebyly nalezeny žádné svislé trhliny. Výsledky mikroskopie pro křížovou vrstvu byly pozorovány pro prvních pět cyklů a pro cykly s číslem 10 až 40. Na rozdíl od vzorků UD, kde nedošlo k žádné viditelné trhlince až do 350 tepelných cyklů, zobrazení vzorku s křížovou vrstvou ukazuje přítomnost několika mikrotrhlin v počátečních cyklech. Pozorování a porovnání je zobrazeno na obrázku 10. Po čtyřech cyklech nedošlo k žádné trhlince a po pátém cyklu byla trhlina zahájena v malé prohlubni, která nebyla vyplněna materiálem. Dále byl pozorován další zdroj iniciace trhlin, kde mikrotrhlina začíná od povrchu těsně po jednom cyklu a pokračuje, dokud nedosáhne vláken další vrstvy. Obecně jde o malé velikosti dutin a pro zahájení a šíření trhlin je zapotřebí více tepelného cyklování. Všechny zjištěné trhliny začaly růst přes tloušťku materiálu. Zvýšením počtu tepelných cyklů se trhliny šířily po celé tloušťce vrstvy a zastavily se po dosažení následující vrstvy. [22]



Obr. 10 Mikroskopické pozorování tvorby trhlin jednosměrné tkaniny kompozitu (vlevo) a křížové tkaniny (vpravo). [22]

3 KOMPOZITNÍ DISKOVÉ PRUŽINY

Vývoj a zapracování součástek z kompozitních materiálů je na vzestupu. Mnoho vědců se již o toto téma zajímá a spousta součástek je již nahrazena kompozitním ekvivalentem, avšak kompozitní disková pružina je stále ve stavu vývoje a testování. I přes několik pokusů jsou stále diskové pružiny pouze prototypy a do sériové výroby se prozatím nedostaly a to i přes skutečnost, že se vyrovnávají parametry pružinám ocelovým a u některých dokonce vykazují vlastnosti mnohem lepší.

3.1 Materiál pro výrobu

Tab. 3 Materiálové vlastnosti vláknových kompozitních systémů a kovů [13]

Materiál / Vlastnosti	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Koeficient tepelné roztažnosti [$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]
CFRP	1700	135	0,2
GFRP	1100	42	20
Vysokopevnostní ocel	1400	210	14
Duraluminum	550	70	23
Hliník	170	70	24

Srovnání vlastností pružin z několika materiálů znázorněné dle Tab. 3 je velmi přínosné pro další volby konstant nejen při výpočtu. Materiál kompozitních diskových pružin se skládá z vláken a matrice. Vlastnosti pružin se většinou ovlivňují mechanickými vlastnostmi vláknitého materiálu. Na druhé straně má matricová pryskyřice sekundární vlastnosti, jako je odolnost vůči životnímu prostředí a trvanlivost pružin. Kromě toho má kvalita spojování vlákna a matrice klíčovou roli u charakteristických vlastností samotné pružiny. Vysoká pevnost v tahu a vysoký modul pružnosti jsou považovány za nejvýznamnější přednosti kompozitních pružin. Jako vhodný vláknitý materiál pro aplikaci na pružiny bylo dle Yamady voleno skelné nebo uhlíkové vlákno. Pro pružinové aplikace byly studovány také vysokomodulové aramidové vlákna, jako je Kevlar, avšak problém tečení a hygroskopických vlastností je stále aktuální a je třeba jej stále vyřešit. Existuje však slibný pokus, kdy tkaný látkový materiál z kevlarových vláken a skleněných vláken získal vynikající vlastnosti, pokud jde o vysokou pevnost a vysokou absorpci energie. Tuto kombinaci materiálů se podařilo vytvořit ve své studii H. Aokimu. Skelná vlákna mají výhodu oproti uhlíkovým vláknům z hlediska nákladů a produktivity. Uhlíková vlákna se používají v oblasti vysoce výkonných aplikací, jako je letecký průmysl. Mechanickou vlastnost diskové pružiny nese hlavně matrice. Nicméně má pouze druhořadou roli,

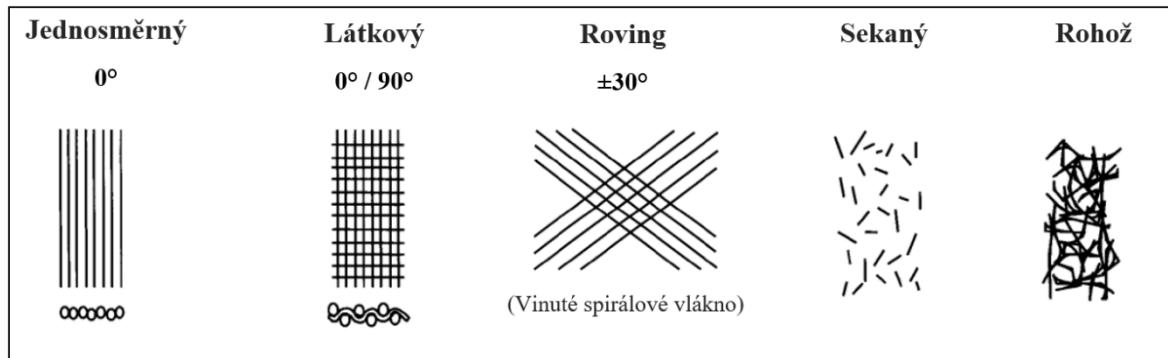
ovlivňuje totiž vlastnosti jako houževnatost, odolnosti vůči teple, absorpci vlhkosti a vůči olejům a také proti únavovému lomu. Obecně se široce používá epoxidová pryskyřice. Pro správnou aplikaci je však také možné použít jiné pryskyřice, jako je nenasycená polyesterová pryskyřice, fenolová pryskyřice nebo termoplastická pryskyřice. [13]

Kompozitní materiál může být definován jako kombinace dvou nebo více vrstev materiálu, která vede k lepším vlastnostem, než když se použijí jednotlivé komponenty samostatně. Na rozdíl od kovových slitin si každý materiál zachovává své specifické chemické, fyzikální a mechanické vlastnosti. Dvě nejdůležitější složky jsou obvykle vlákna a matrice. Typická vlákna zahrnují sklo, aramid a uhlík, který může být spojitý či nespojitý. Matrice mohou být polymery, kovy nebo keramika. Tato část se zabývá kontinuálními a diskontinuálními vlákny implementovány do polymerních matic, s důrazem na vysoce výkonné strukturální kompozity s kontinuálními vlákny. Spojité výztuže zahrnují jednosměrné, tkané látky a navíjené. Zatímco nespojité vyztužení zahrnuje sekaná vlákna a náhodně orientovaná vlákna rohoží. [10]

3.1.1 Vlákenné materiály

Skladba vlákna je definována jako uspořádání vláken v kompozitu, které ovlivňuje nejen vlastnosti kompozitu, ale také jeho zpracování. Charakteristiky vláknité architektury, které ovlivňují mechanické vlastnosti, zahrnují kontinuitu, orientaci, zvlnění a vzájemné propojení vláken. Během zpracování a sycení matrice vláknovou architekturou určuje obsah dutin, smáčení, distribuci a nesmáčenou plochu vláken. Tyto parametry ovlivňují vlastnosti a pevnosti vytvrzeného celku. Při použití kontinuálního vlákna, může být architektura vláken jednorozměrná, dvourozměrná nebo trojrozměrná. Jednorozměrné architektura může být produkována technikou prepregu nebo jinými výrobními způsoby, jako je například pultruze. Dvourozměrné a trojrozměrné architektury se vyrábějí v textilních výrobních procesech a používají se u kapalných kompozitních formovacích procesů, jako je formování maticí, při kterém je tekutý polymer vstřikován do suchého předlisku obsahujícího dvourozměrnou nebo trojrozměrnou vláknovou architekturu. Každý typ vláknové architektury má své jedinečné vlastnosti, a je-li správně používán, může poskytnout příležitost nejen přizpůsobit strukturální výkon kompozitu, ale také vytvořit různé strukturální tvary. V jednorozměrné architektuře jsou vláknité prameny (příze) orientovány v jednom směru. Jednosměrná orientace kontinuálních vláken v kompozitu vytváří nejvyšší pevnost a modul ve směru vlákna, ale mnohem nižší pevnost a modul v příčném směru vlákna. Vícevrstvý kompozitní

laminát může být sestaven pomocí jednorozměrné architektury, ve které každá vrstva může obsahovat jednosměrná kontinuální vlákna, ale úhel orientace z vrstvy do vrstvy se může měnit. Při správné orientaci vláken v různých vrstvách lze zmenšit rozdíl v hodnotách pevnosti a modulu v různých směrech. Jedním velkým problémem u mnoha vícevrstevných laminátů je však to, že jejich interlaminární vlastnosti mohou být zhoršené a mohou být náchylné k brzkému selhání a může nastat delaminací, kdy praskliny vzniklé na rozhraní mezi vrstvami kvůli vysokému mezilaminárnímu tahu a smykovému napětí způsobují výše zmíněnou delaminaci. Dvourozměrná architektura s kontinuálními vlákny může být buď obousměrná, nebo vícesměrná. V obousměrné architektuře jsou vláknité příze (nebo prameny) buď tkané, nebo prokládané dohromady ve dvou vzájemně kolmých směrech. Vláknité příze jsou zvlněné a mění svůj směr pletení nahoru a dolů, aby vytvořily prokládanou strukturu. Změnou počtu vláken v pramencích na jednotku šířky ve směrech osnovy a výplně lze v těchto dvou směrech získat různé vlastnosti. Pokud je počet vláknenných přízí stejný v osnovních i výplňových směrech, vlastnosti jsou v obou směrech stejné a tkanina je vyrovnaná. Vlastnosti v jiných směrech jsou však stále nízké. Pletení a tkaní jsou dva další textilní procesy využívané pro výrobu dvourozměrné vláknové architektury. V pletené textilií jsou vláknité příze namísto prokládaných propletené. V případě, že pletací příze prochází v příčném směru, tkanina se nazývá úpletová tkanina, pokud naopak tkanina prochází v podélném směru rovnoběžně se strojem, látka se nazývá osnovní pletenina. Pletené textilie se vyrábějí na průmyslových pletacích strojích, ve kterých sada těsně umístěných jehel táhne příze a tvoří smyčky. Pletené tkaniny jsou pružnější jsou vhodnější pro vytváření tvarů s pevnými rohy. Biaxiální pletené textilie se vyrábějí vzájemným propletením dvou sad souvislých přízí, jedna ve směru +0 a druhá ve směru -0 vzhledem k ose pletení. Úhel u se nazývá úhel opletu nebo úhel předpětí. Triaxiální copánky obsahují třetí sadu přízí orientovaných podél osy pletení. Pletená konstrukce je nejvhodnější pro trubkové konstrukce, ale používá se také pro ploché tvary. [12]

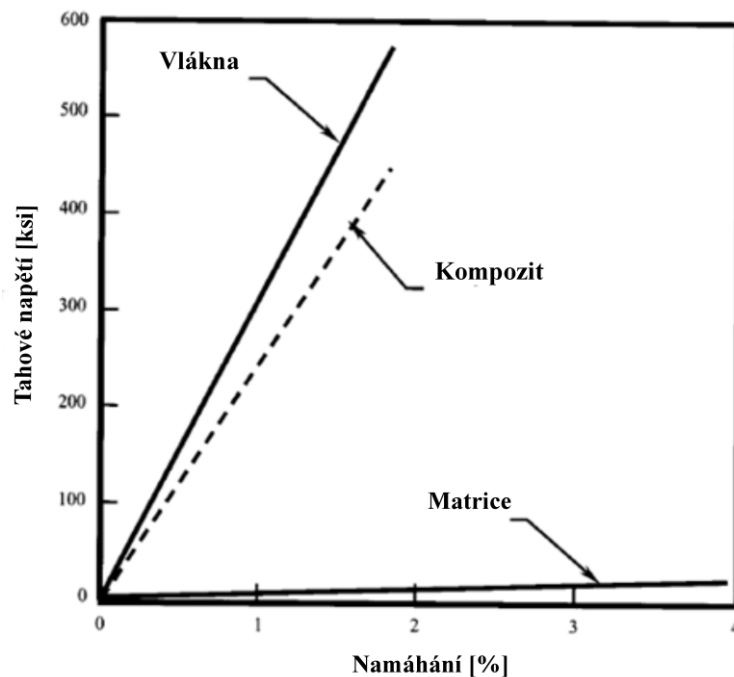


Obr. 11 Možnosti vyztužení [10]

V jedné ze studií kompozitních pružných materiálů byly použity vyztuže těchto struktur: sekaná vlákna, obousměrné (2D) prosté tkané textilie a trojrozměrné (3D) tkané textilie z textilních vláken E-glass (dodávané Owens Corning, Indie) s různou lineární hustotou 600–2400 tex. Stejný materiál byl nasekán na 10 mm dlouhá vlákna. Pevnost v tahu, procenta prodloužení a počáteční modul u těchto materiálů byly $3445 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$, $2,53 \% \pm 0,10 \%$ a $72 \text{ GPa} \pm 1,5 \text{ GPa}$. Listová pružina je v automobilu nosným prvkem. Jako materiál matrice byl vybrán Epoxy LY556 s tužidlem HY951 v poměru 10: 1. Pevnost v tahu, procentuální prodloužení a počáteční modul byly zjištěny na $73 \text{ MPa} \pm 2 \text{ MPa}$, $4 \% \pm 0,20 \%$ a $5 \text{ GPa} \pm 0,2 \text{ GPa}$. [16]

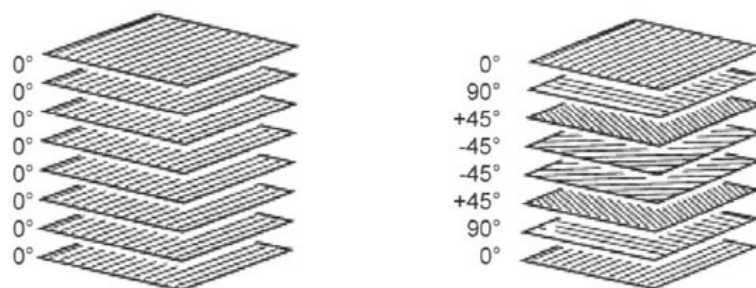
3.1.2 Kladení vrstev

Kompozity s kontinuálními vlákny jsou vrstvené materiály (viz. obrázek 8.), ve kterých jsou jednotlivé vrstvy, pláty nebo lamináty orientovány ve směrech, které zvyšují pevnost ve směru primárního zatížení. Jednosměrné (0°) lamináty jsou extrémně pevné a tuhé v přímém směru. V kolmém směru jsou naopak velmi slabé, v tomto případě je zatížení vystaveno nízkému množství polymerní matrice. Zatímco vlákno s vysokou pevností může mít pevnost v tahu 3,5 GPa nebo více, charakteristická polymerní matrice má běžnou pevnost v tahu pouze 35–70 MPa (obrázek. 7). [10]



Obr. 12 Tahové vlastnosti vlákna, matrice a kompozitu [10]

Podélné tahové a tlakové zatížení je přenášeno vlákny, zatímco matrice rozděluje zatížení mezi vlákna v tahu, stabilizuje a zabraňuje vzpěru vláken při zatěžování. Matrice je také základním nosičem zatížení pro inter-laminární (střih mezi vrstvami) a příčné (90%) napětí. Orientace vláken přímo ovlivňuje mechanické vlastnosti, z toho vychází, že je logické orientovat co nejvíce vrstev, které v hlavním směru ponosou největší zatížení a tím docílíme požadované pevnosti. Tento postup je možné aplikovat a bude fungovat pro určité struktury. Většinou je nutné vybalancovat tahové vlastnosti do několika různých směrů a tím docílíme možnosti zatížit symetrické břemeno bez potřeby přesného centrování a umístování. Například ve směru 0° , $+45^\circ$, -45° a 90° a dále je možno tuto konfiguraci kladení výztuže opakovat. [10]



Obr. 13 Kvazi-izotropní uspořádání laminátů

Vyvážený laminát se stejným počtem vrstev ve 0° , $+45^\circ$, -45° a 90° se nazývá kvaziisotropní laminát, jelikož nese stejnou zátěž ve všech čtyřech směrech. Podle Campbella jsou tyto orientace preferované, protože se jedná o poměrně vyvážené lamináty, které nesou zatížení ve více směrech. [10]

3.1.2.1 Skladba tkanin v produkci

Sekaná tkanina, 1D, 2D, 3D vyztužovací textilie byly použity v jedné ze studií. Jejich schematické znázornění jsou vyobrazeny na obrázku 1. Ve směru 1D bylo vkládáno vlákno ve směru útku, aby byla udržena struktura v jednom směru. U 2D byla vyvinuta ortogonální pevná struktura, za použití pojivových přízí, pletená pravidelně do kříže. Konstrukční parametry byly vybrány takovým způsobem, aby mohla být udržována konstantní plošná hustota (GSM) všech tří tkanin. Udržování stejné GSM je důležité pro srovnání mechanických vlastností různých tkaných předlisků. V dané studii GSM jedné vrstvy 3D tkaniny odpovídá stohování 9 vrstev 2D tkaniny a stohování 8 vrstev 1D tkaniny. [16]

3.1.3 Skladba vlákn

Vláknová architektura je definována jako uspořádání vláken v kompozitu, které ovlivňuje nejen vlastnosti kompozitu, ale také jeho zpracování. Charakteristiky vláknité architektury ovlivňují mechanické vlastnosti, zahrnují kontinuitu, orientaci, zvlnění a vzájemné propojení vláken. Během zpracování určuje tok pojiva mezi vlákny, obsah dutin, smáčení vláken, distribuci vláken, nesmáčenou plochu a další charakteristiky ve výsledném kompozitu. Použijí-li se kontinuální vlákna, architektura vláken může být jednorozměrná, dvojrozměrná nebo trojrozměrná. Jednorozměrná architektura může být vytvářena za pomoci prepregu, nebo jinými výrobními způsoby, jako je například pultruze. Dvourozměrné a trojrozměrné architektury jsou vyráběny v textilních výrobních procesech a používány při kapalných kompozitních formovacích procesech. Používají se například u formování pryskyřicí, při kterém je kapalný polymer vstřikován do suchého předlisku obsahujícího dvourozměrnou nebo trojrozměrnou vláknovou architekturu. Každý typ architektury má své jedinečné vlastnosti a je-li používán správně, může zlepšit strukturální vlastnosti kompozitu a poslouží také k výrobě různých konstrukčně složitých tvarů.

Faktoru určující výběr typu vlákna:

- Pevnost v tahu – Pokud je pevnost v tahu primárním konstrukčním parametrem, je možno zvolit jako nejlepší materiál E-glass z důvodu nízké ceny.
- Modul pevnosti – Při navrhování tohoto modulu má uhlík výraznou výhodu oproti sklu i aramidovým vláknům.
- Pevnost v tlaku – Pokud je primární požadavek na pevnost v tlaku, má uhlík oproti sklu a aramidu výraznou výhodu. Je zapotřebí vyhnout se při výběru aramidu, vzhledem k jeho špatné pevnosti v tlaku.
- Modul komprese – Uhlíková vlákna jsou tou nejlepší volbou, přičemž E-glass má nejméně žádoucí vlastnosti.
- Hustota – Aramidová vlákna mají menší hustotu, následuje uhlík a poté S-2 Glass a E-sklo.
- Koeficient tepelné roztažnosti – Aramidová a uhlíková vlákna mají koeficient, který je mírně negativní, zatímco S-2 a E-sklo jsou pozitivní.
- Rázová pevnost – Aramidová vlákna mají vynikající odolnost proti nárazu, zatímco uhlík je křehký, tudíž není vhodným materiálem. Je třeba poznamenat, že matrice má také významný vliv na rázovou pevnost.
- Vlivy vnějšího působení – Výběr matrice má největší dopad na kompozitní odolnost vůči povětrnostním vlivům. Aramidová vlákna jsou degradována ultrafialovým světlem a dlouhodobá provozní teplota by měla být udržována pod 170 °C. Uhlíková vlákna podléhají oxidaci při teplotách vyšších než 370 °C, i když zkoušky tepelné oxidace v polyimidech prokázaly pokles pevnosti už mezi 260–300 °C. Skelná vlákna mají tendenci být hydrofilní a absorbovat vlhkost.
- Náklady – E-sklo je typově nejlevnější na našem trhu, zatímco uhlík je nejdražší. Čím menší je velikost koudele, tím dražší je uhlíkové vlákno. Větší velikost koudele snižuje náklady zpracování. To je dáno množstvím materiálu, který je uložen v jednotlivých vrstvách, čím více materiálu tím menší pracnost. Objemnější koudele ve tkané látce mohou zvýšit pravděpodobnost dutin a mikro-krakování matrice kvůli tvorbě vzduchovým kapes.

3.1.4 Karbonová vlákna

Pružiny se skládají z vysoce pevného, kontinuálního, uhlíkového vlákna s vysokým modulem pružnosti na bázi polyakrylonitrilu (5 až 10 μm) a epoxidová pryskyřice jsou typický produkt. Na základě vysoké měrné síly, vysoce specifického modulu a vynikající

odolnosti proti únavě, má pružina pozoruhodný rys lehkosti, kompaktnosti a dlouhé životnosti. Tato zásluha by také mohla být výhodná pro další vysoce standardní výrobky s parametry jako je například přesnost rozměrů, chemická odolnost a složitý tvar. Můžeme navrhovat pružiny podavače dopravních strojů, vibrační pružiny a pružiny ventilu motoru, jako typické aplikace pružin a také pružiny zavěšení na podvozku automobilu.

Uhlíkové vlákno obsahuje výbornou kombinaci vlastností, zároveň je dražší než sklo nebo aramid. Má nízkou hustotu, nízký koeficient tepelné roztažnosti a je vodivé. Je konstrukčně velmi efektivní a vykazuje vynikající odolnost proti únavě. Je také křehké (deformace-méně než 2%) a vykazuje nízkou odolnost proti nárazu. Vodivost způsobuje galvanickou korozi, pokud je umístěna v přímém kontaktu s hliníkem. Uhlíkové vlákno je na dnešním trhu dostupné v široké škále pevnosti (2–7 GPa) a tuhosti (modul 4–21 GPa). S tímto širokým rozsahem vlastností jsou uhlíková vlákna často klasifikována jako vysokopevnostní nebo vysokomodulová vlákna. Pojmy uhlík a grafit jsou často používány k popisu stejného materiálu. Avšak uhlíková vlákna obsahují méně jak 95 % uhlíku a jsou karbonizována při teplotách 1000–1500 °C, zatímco grafitová vlákna obsahují 99 % uhlíku a jsou nejprve karbonizována a poté grafitizována při teplotách mezi 1900–3000 °C. Obecně vede proces grafitizace k vláknu s vyšším modulem. Uhlíková a grafitová vlákna jsou vyráběna z hedvábí, polyakrylonitrilu (PAN) nebo smoly na bázi ropy. Vlákna založená na PAN produkují nejlepší kombinaci vlastností. Materiál Rayon byl vyvinut jako předchůdce před PAN, ale dnes se zřídka používá kvůli jeho vyšším pořizovacím a výrobním nákladům a nižšímu výnosu. Vlákna na bázi ropy byla také vyvinuta jako levnější alternativa k PAN, ale používají se hlavně k výrobě grafitových vláken s vysokým a ultra vysokým modulem. Uhlíková i grafitová vlákna se vyrábějí jako nezkroucené svazky zvané tows dle profesní terminologie. Běžné velikosti koudelů jsou 1k, 3k, 6k, 12k a 24k, kde k = 1000 vláken. Bezprostředně po výrobě jsou uhlíková a grafitová vlákna normálně povrchově upravena, aby se zlepšila jejich adheze k polymerní matici. Klíždla, často epoxidy bez vytvrzovacího činidla, se často nanášejí jako tenké filmy (1 % nebo méně), pro zlepšení manipulace a ochranu vlákna během tkaní nebo jiných manipulačních operací. [10]

3.1.5 Matrice diskových pružin

Matrice udržuje vlákna ve správné poloze, chrání vlákna před oděrem, přenáší zatížení mezi vlákny a zajišťuje mezilaminární smykovou pevnost. Správně zvolená matrice také poskytuje odolnost vůči teplu, chemikáliím a vlhkosti, má vysokou mez pevnosti, vytvrzuje

při nízkých teplotách, a přesto má dlouhou životnost v náročných provozech a zároveň není toxická. Nejčastějšími termosetovými pryskyřicemi používanými pro kompozitní matrice jsou polyestery, vinylestery, epoxidy, bismaleimidy, polyimidy a fenoly.

Termosetové pryskyřice se většinou skládají z pryskyřice (např. Epoxidové) a mísitelného vytvrzovacího činidla. Na počátku se obě látky smísí, vytvoří tekutinu s nízkou viskozitou, která se vytvrzuje buď v důsledku vnitřně generovaného (exotermického), nebo záměrně dodávaného tepla z vnějšku, tím se myslí například temperace formy. Vytvrzovací reakce tvoří sérii zesíťovacích procesů mezi molekulárními řetězci, takže se vytvoří jedna velká molekulární síť, což vede k nerozlučné pevné látce, kterou nelze po opětovném ohřevu znovu zpracovat. Po zahřátí na dostatečně vysokou teplotu blok změkne nebo roztaje, takže jej lze několikrát přepracovat. Proto jsou na dnešním pokročilém trhu s kompozitními výrobky dominantní termosetové kompozitní systémy. Důležitým hlediskem při výběru matrice je provozní teplota, při které bude výsledný díl pracovat. Teplota skelného přechodu, T_g , je dobrým indikátorem teplotní odolnosti matrice. Pro polymerní materiál je důležitá teplota T_g , při které se mění z tuhé sklovité pevné látky na měkký, vláčný a poddajný materiál. V tomto okamžiku je polymerní struktura stále neporušená a zároveň se přerušují příčné vazby. Matrice by se nikdy neměla používat nad teplotou T_g , a to jen v případě, že nejde o velmi krátkou životnost jako např. u těla rakety. Dobrým pravidlem při volbě pryskyřice je to, že je zvolen materiál, u kterého je teplota T_g o 10 °C vyšší než maximální provozní teplota. Jelikož je většina polymerních pryskyřic nasákavých a absorbují vlhkost, která snižuje T_g , není neobvyklé volit pravidlo, kde je teplota T_g až o 40 °C vyšší než provozní teplota. Je známo, že různé pryskyřice absorbují vlhkost různou rychlostí a mají také rozdílnou úroveň nasycení. Proto musí být konkrétní výběr pryskyřice hodnocen také z hlediska vlivu na životní prostředí. Většina termosetových pryskyřic je poměrně odolná vůči rozpouštědlům a chemikáliím. [10]

Tab. 4 Mechanické vlastnosti vybraných termosetů

	ρ [10 ³ kg m ⁻³]	E_t [GPa]	σ_{Pt} [GPa]	$\varepsilon_{m,krit}$ [%]	
Epoxidová pryskyřice	1,1 - 1,4	2,1-6,0	35-90	1-10	Vysoce výkonné matricové systémy. Dobré vlastnosti ve vyšších teplotách, odolnější než polyestery (120–135 °C)
Polyestery	1,1-1,5	1,3-4,5	45-85	1-5	Používají se v mnoha v komerčních aplikacích. Relativně levné a zároveň dobře zpracovatelné.
Fenolické pryskyřice	1,3	4,4	50-60	1-3	Vysokoteplotní systémy s dobrou odolností proti kouři a ohni. Využití v letectví. Velmi obtížné pro zpracování.
Polyimidy	1,2-1,9	3,0-3,1	80-190	2-40	Polyimidy jsou odolné velmi vysokým teplotám (280-310 °C). Velmi obtížné pro zpracování.

Většina polymerních pryskyřic je nasákavých, tudíž absorbují vlhkost, která snižuje T_g . Není neobvykle nutné, aby byla T_g až o 40 °C vyšší než provozní teplota. Různé pryskyřice absorbují vlhkost s odlišnou rychlostí a rovněž mají odlišnou úroveň nasycení. Většina termosetových pryskyřic je dostatečně odolná vůči rozpouštědlům a chemikáliím. Obecně platí, že čím vyšší je požadovaný teplotní výkon, tím více je výsledný výrobek křehký. Tvrzené termosetové pryskyřice jsou poměrně dostupné, ale jejich cena je razantně vyšší a teplota T_g je naopak nižší. Vysokoteplotní pryskyřice jsou také nákladnější a obtížnější na zpracování.

I když při výběru vláken obvykle převažují parametry mechanických vlastností kompozitu, výběr matrice může také velmi ovlivnit výsledné vlastnosti. U některých operacích se vlákna namáčí, aby se s pryskyřicí lépe spojily. Poté vytvářejí chemickou nebo mechanickou vazbu, která ovlivňuje schopnost přenosu zatížení z vlákna na matrici. Matrice může mikrokrakovat během vytvrzování nebo v provozu. Křehké vytvrzovací systémy jsou náchylné na mikrotrhliny, zejména pokud jsou teploty zpracování vysoké a provozní teploty jsou nízké. Jde o velmi velký rozdíl z pohledu tepelné roztažnosti mezi vlákny a matricí. [10]

Faktory určující výběr matrice:

- Doba zpracovatelnosti – Jedná se o časové období, kdy je možné matrici zpracovávat. Dle tohoto údaje se posuzuje využitelnost, způsob výroby a skladování. Doba zpracovatelnosti se obvykle vztahuje na čisté pryskyřice (nevztužené).

Dlouhá doba zpracovatelnosti je žádoucí pro procesy, při kterých je použita čistá pryskyřice, jako je navíjení mokrých vláken a přenos pryskyřice. Krátká doba zpracovatelnosti vyžaduje časté výměny lázně a zvýšené množství odpadu. Dále může krátká doba negativně ovlivnit kvalitu dílu při mokrém procesu tím, že vytváří riziko nedokonalého nasycení.

- Skladovatelnost – Toto je doba, po kterou může být materiál matrice skladován za určitých podmínek v prostředí, které splňuje veškeré požadavky pro to, aby bylo možné s materiálem dobře manipulovat a nezměnily se jeho vlastnosti. Termosetové předimpregnované materiály se obvykle skladují v mrazárnách. Jejich trvanlivost je 6 až 12 měsíců, poté je nutná opětovná certifikace. Termosetové materiály, jejichž části (pryskyřice a vytvrzovací činidlo) jsou dodávány v samostatných nádobách a mají obvykle delší dobu skladování (až 2 roky) při pokojové teplotě. Přesto, že to není tak reaktivní látka jako prepreg, v průběhu času může docházet ke změnám viskozity a chemickým změnám. Chlazení meziprojektu zpomaluje proces a prodlužuje jeho životnost.
- Viskozita – Viskozitu nevytvrzené pryskyřice lze popsat jako její odpor proti tečení. Požadavky na viskozitu závisí na daném procesu, ale obvykle platí, že čím nižší je viskozita, tím jednodušší je zpracování a lepší smáčivost vlákna. Při zahřívání pryskyřice viskozita zpočátku klesá a poté stoupá s tím, jak postupně probíhají chemické reakce, dokud nezačne tuhnout nebo přecházet do stavu gelu. Pro mokré zpracování termosetů jsou obvykle výhodné viskozity menší než 1 Pa.s. Termoset se obvykle považuje za gelový, když dosáhne viskozity 100 Pa.s.
- Čas vytvrzování – U termosetových pryskyřic je doba vytvrzování, doba potřebná k tomu, aby proběhly všechny potřebné zesíťovací reakce. Pryskyřice s vyšší teplotou T_g obvykle vyžadují delší doby vytvrzení. Epoxidové pryskyřice mají obecně dobu vytvrzování 2 až 6 hodin při zvýšené teplotě. U některých epoxidů, polyesterů a vinylesterů nemusí být nutné dodatečné vytvrzení. Pryskyřice s vyšší teplotou T_g , jako jsou bismaleimidy a polyimidy, vyžadují delší vytvrzovací cykly a následné vytvrzení (175–245 °C). Následné vytvrzování dále napomáhá zlepšení mechanických vlastností při vyšších provozních teplotách a zvyšuje T_g matrice u některých epoxidů, bismaleimidů a polyimidů. U některých procesů, jako je lisování a pultruze, je požadována velmi krátká doba vytvrzování. Teplota vytvrzování může

být u epoxidů až 120–180°C. Teplota vytvrzování polyimidů se pohybuje v rozmezí 315–370 °C [10]

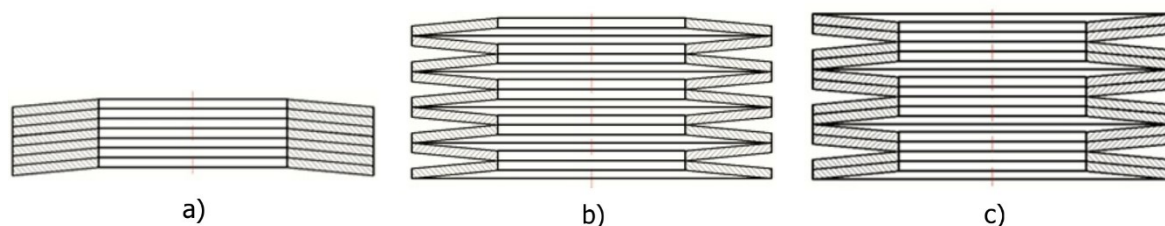
3.2 Testování

Testování na jednotlivých prvcích a sestavách bylo ve studii kompozitních diskových pružin provedeno stlačením disku mezi dvěma plochými ocelovými deskami. Tření mezi kontaktními oblastmi bylo pro jednotlivé zkoušky zanedbáváno. Byly testovány čtyři jednotlivé diskové prvky.

3.2.1 Veličiny testování

Při testování se jedná se o několik veličin, které dále určují charakteristiku samotné pružiny a jsou směrodatnými údaji pro porovnání a diskuzi. Testovanou veličinou byla rychlost komprese za určitý čas, dokud se disk úplně nezploštěl. Další veličinou bylo zatížení při určité frekvenci diskové pružiny. Cyklické zatížení bylo přibližně dvojnásobné, oproti působení tlaku, až do samotného zploštění pružiny. Tímto testem se zjišťovalo možné přetížení pružiny. Výše zmíněné testy byly aplikovány na čtyři konfigurace diskových pružin. [18]

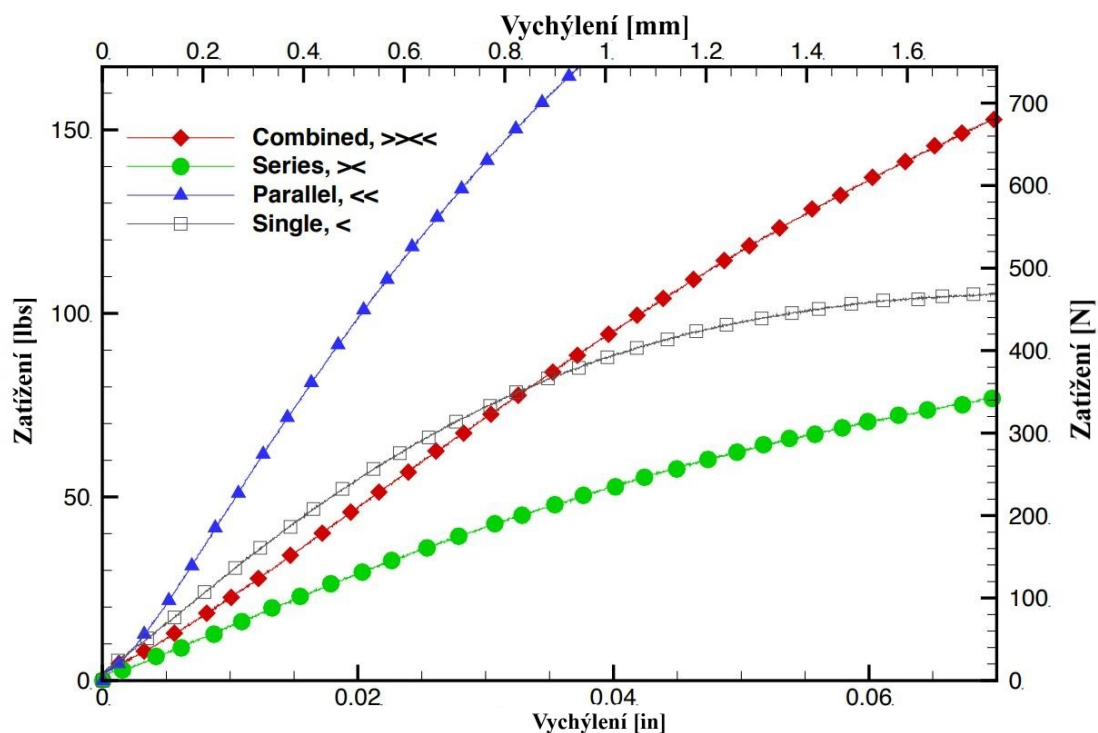
3.3 Skladba pružin



Obr. 14 Možnosti uložení diskových pružin, a) paralelní b) sériové c) kombinované

Jednotlivé diskové pružiny, nebo prvky, mohou být uspořádány a seskupeny, jak je popsáno na obrázku. 13. Skupina dvou nebo více prvků paralelně je jednotka. Skupina dvou nebo více jednotek v sérii je sestava. Orientace a počet jednotek ve svazku mění tuhost a únosnost stanovenou na obrázku. 14. Když jsou prvky naskládány paralelně, je maximální únosnost sestavy součtem jejich jednotlivých prvků a vychýlení sestavy je stejné jako u jediného prvku. U sériové konfigurace se maximální zatížení rovná jednotlivým prvkům a maximální vychýlka sestavy se rovná maximálnímu vychýlení kombinovaných prvků. Vzhledem

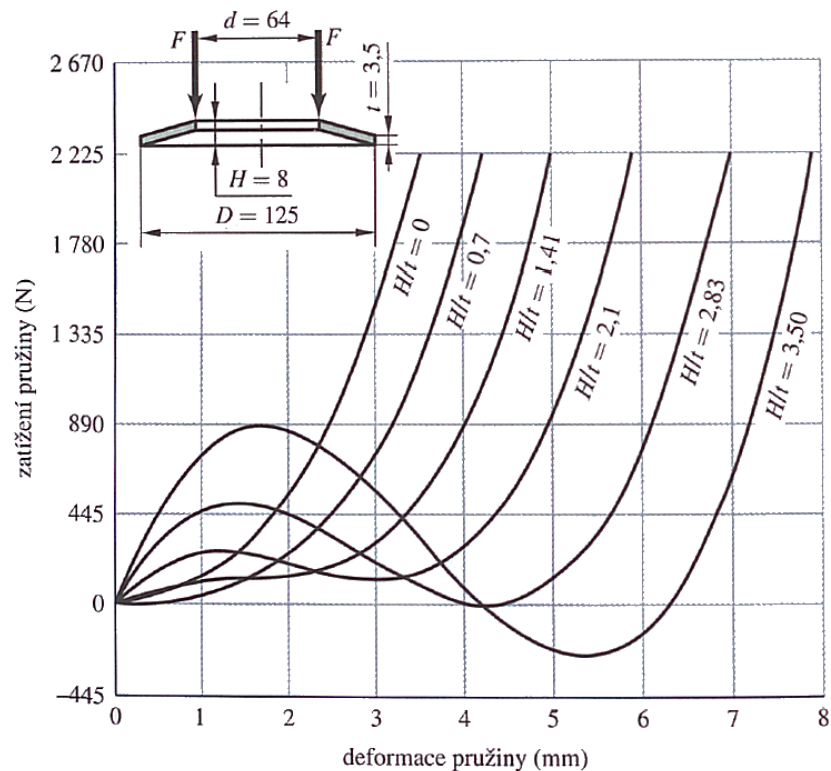
k tomu, že mnoho aplikací vyžaduje velké množství disků v každém tlumiči, byla vyvinuta krátká notace, která určuje, jak je jednotlivé uskupení prezentováno. Závorky („<“ nebo „>“) mohou sloužit k reprezentaci omezeného počtu pružin, ale pomocí tohoto zápisu je obtížné rychle vyúčtovat velké množství disků. Alternativní zápis funguje následovně. Počínaje spodní částí svazku spočítejte počet prvků v každé jednotce sousedních rovnoběžných kotoučových pružin. Oddělení každé jednotky pomlčkou „-“, znamená, že jsou v sériové kombinaci. Například kombinace disků reprezentovaných závorkami chevron (<< <<< >>>) bude mít zápis „2-1-3-2“. Dále pomocí šipek „<“ nebo „>“ označujeme orientaci počáteční pružiny. Například skupina dvou paralelních pružin v sérii, se skupinou tří paralelních pružin, může mít označení „<2-3“ (<<>>>) nebo „>2-3“ (>><<<) v závislosti na orientaci. Pokud je v zásobníku opakující se sekvence, tak se tato sekvence ohraničuje a jejich počet je označen pomocí indexu. Používají se dva typy sekvencí: opakující se a symetrické. Pokud se sekvence opakuje, používá se v indexu zásobníku zápis „r“. Například (<<>>> <<>>>) má zápis „(<2-3) 2r“. Pokud je posloupnost symetrická kolem středu zásobníku, uvádí se pomocí „s“ v notaci indexů. Například (<<>>> <<<>>) bude označeno jako „(<2-3) 2s“. Lineární chování sady pružin se stanovuje analogicky s analýzou elektrických odporů. Rovnice popisující konstantu celého svazku pružin a celkové výšky svazku L, jsou dány Schnorrem. [18]



Obr. 15 Vlastnosti jednotlivých druhů uložení diskových pružin

Diskové pružiny je možno konfigurovat na sebe protilehle (natočené proti sobě střídavě větším a menším průměrem), přilehle (na sebe) nebo kombinovaně. Při protilehlé konfiguraci (prodlužování pružiny) se zvýší rozsah pohybu celku. Při přilehlé konfiguraci se zvýší nosnost neboli tuhost pružiny, tj. síla, kterou se působí na kompletní konfiguraci pružiny.

Na obrázku 5. jsou zobrazeny pracovní charakteristiky v závislosti poměru H/t , kde H je volná výška a t tloušťka pružiny. Z grafu je zřejmé, že pro hodnoty H/t v rozsahu od 1,41 do 2,1 je prostřední část charakteristik prakticky konstantní. U poměru $H/t \geq 2,83$ je průběh křivky obdobný jako písmeno „S“. Takové pružiny je možno konfigurovat na sebe a vytvořit tak paralelní neboli soulehlé uložení, tak jako na obrázku 17b, kdy je celková tuhost sady vyšší než tuhost samostatné pružiny. Konfigurace s protilehlým uložením jsou tvořeny pružinami skládanými proti sobě, přičemž je celková tuhost sady nižší než tuhost samostatné pružiny. Kombinovaně uložené pružiny jsou uloženy soulehle a skládané proti sobě.



Obr. 16 Pracovní charakteristiky talířové pružiny v závislosti na poměru H/t . [3]

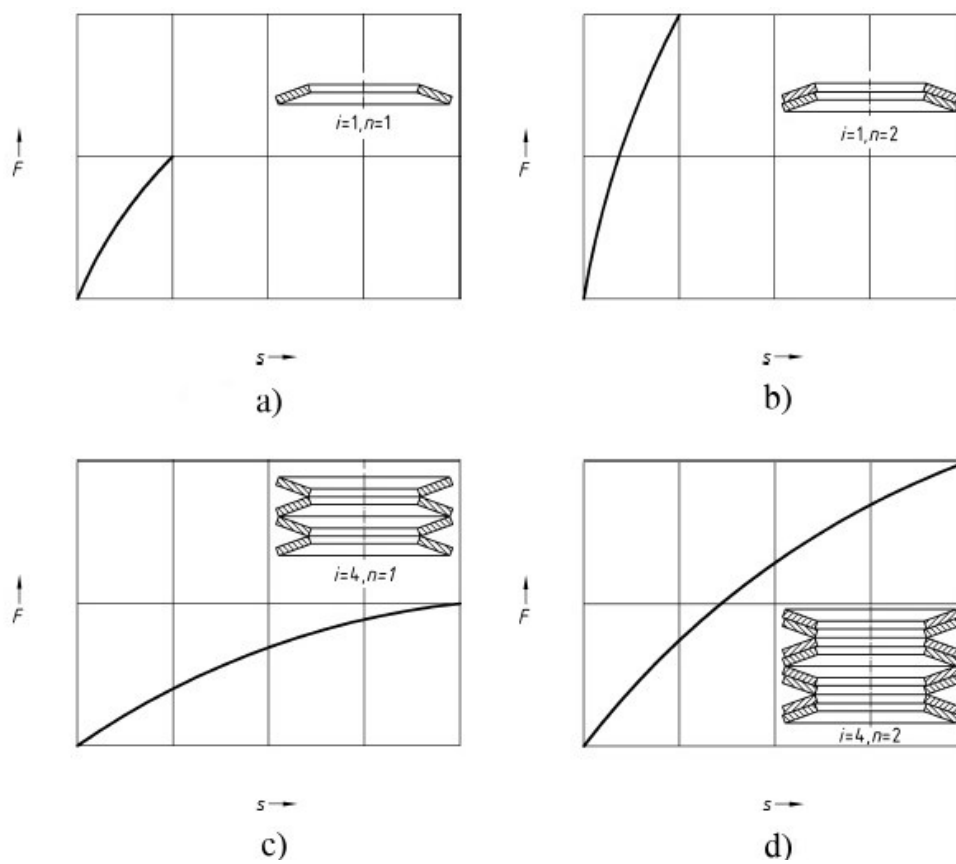
3.3.1 Výpočet skladby diskových pružin

Je mnoho možností, jak lze diskové pružiny uspořádat a vytvořit charakteristiku celku. U diskových pružin, paralelně složených s konstantním průhybem, existuje přímá úměra k počtu jednotlivých diskových pružin ve svazku jako je znázorněno na obrázku 16 a), 16 b). Naopak při skládání pružin do jednotlivých sad a při konstantním zatížení, je průhyb přímo úměrný k počtu jednotlivých talířových pružin, které tvoří svazek jako na obrázku 16 b), 16 c). U svazků kladených do sad, zatížení pružiny vzroste s počtem jednotlivých talířových pružin, tvořící každý svazek a průhyb s počtem svazků (viz. obrázek 17 d). [21] Výpočet vztahující se na skládané pružiny:

$$F_{ges} = n \cdot F \quad (13)$$

$$s_{ges} = i \cdot s \quad (14)$$

$$L_0 = i[l_0 + (n - 1)t] \quad (15)$$



Obr. 17 Změny křivek zatížení/průhybu v závislosti na skládání diskových pružin [21]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je navrhnout dvě odlišné technologie výroby diskové pružiny z uhlíkového vlákna, která bude ekvivalentem pro konvenčně používanou ocelovou pružinu. Jedna z těchto technologií je lisování předimpregnované výztuže za působení tepla, s pomocí navržené výrobní formy. Druhá zvolená technologie je metoda RTM. K těmto technologiím je potřeba navrhnout výrobní cykly a diagram pro kladení jednotlivých vrstev. Pro výsledné diskové pružiny se dále navrhnout přípravky pro otestování na zkušebním stroji. Tyto přípravky budou vhodné, jak pro test statický, pro samotnou diskovou pružinu, tak pro test dynamický, pro sadu pružin a test kompletně smontovaného tlumiče.

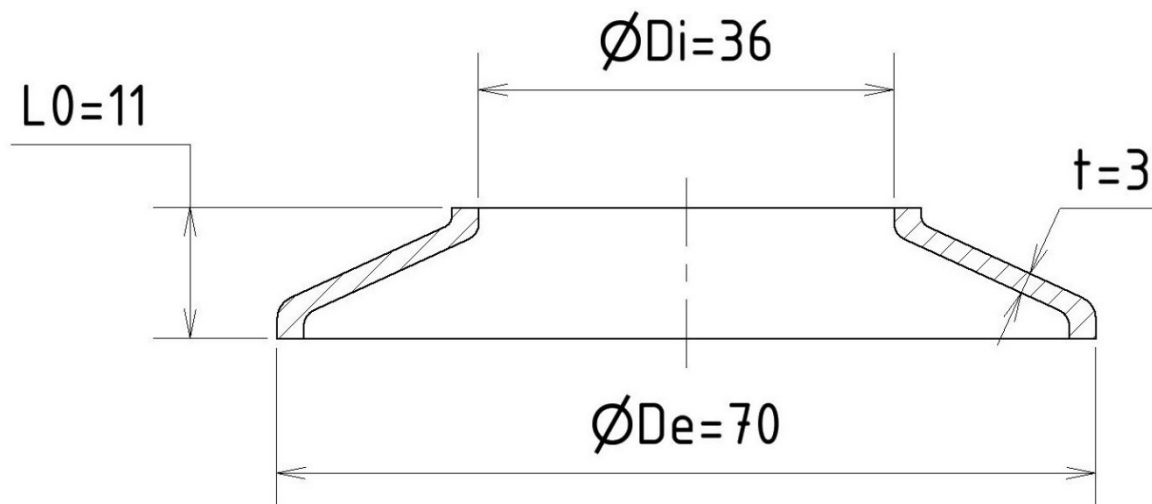
1. Návrh kompozitní diskové pružiny.
2. Návrh lisovací formy.
3. Návrh RTM formy.
4. Popis výrobních cyklů včetně vytvrzovacích programů a všech nutných operací.
5. Návrh skladby pružiny + lay-up diagram pro jednotlivé vrstvy.
6. Návrh 3D modelu přípravku pro statické a dynamické testování.
7. Vyhodnocení navržených řešení.

5 NÁVRH MODELU DISKOVÉ PRUŽINY

Základem návrhu kompozitní diskové pružiny je konvenčně využívaná ocelová pružina od Firmy Alcomex. Pružina je vyrobena z materiálu EN 1.8159 (15 260). Právě srovnání materiálů, které zmiňuje Yamada v tabulce 2, jako je ocel, uhlíkové vlákno a skelné vlákno, je pro tento experiment velmi přínosné a také nápomocné při volbě materiálu pružiny. Při návrhu modelu byl převzatý poznatek z výše zmíněné studie. Výška L0 byla zdvojnásobena oproti ocelové pružině. Výška ocelové pružiny je 5,1 mm. Převzaté pravidlo je na výšku aplikováno, výpočtová výška je tudíž 10,2 mm. Další parametry, které jsou potřeba pro výpočet jsou dány průměrem a tloušťkou ocelové pružiny, tyto hodnoty zůstaly stejné. [13]

Tab. 5 Znamé hodnoty ocelové a kompozitní pružiny

Označení	Název veličiny	Hodnoty kompozitní pružiny	Hodnoty ocelové pružiny	Jednotky
D_e	Vnější průměr pružiny	70,00	70,00	mm
D_i	Vnitřní průměr pružiny	35,50	35,50	mm
L_0	Celková volná výška pružiny	10,2	5,10	mm
E	Modul pružnosti v tahu	56600	206000	Mpa
μ	Poissonovo číslo	0,29	0,29	-
h_0	Provozní výška talíře	2,10	2,10	mm
t	tloušťka disku	3,00	3,00	mm
$s=0,75 \cdot h_0$	zkušební stlačení	1,58	1,58	mm
μ_M	součinitel povrchového tření	0,017	0,017	-
μ_R	součinitel tření na okrajích	0,035	0,035	-
i	Počet sériově uspořádaných sad disků	8,00	8,00	-
n	Počet paralelně uložených disků v sadě	2,00	2,00	-



Obr. 18 Zakótovaný 3D model kompozitní pružiny v řezu.

5.1 Volba materiálu kompozitní pružiny

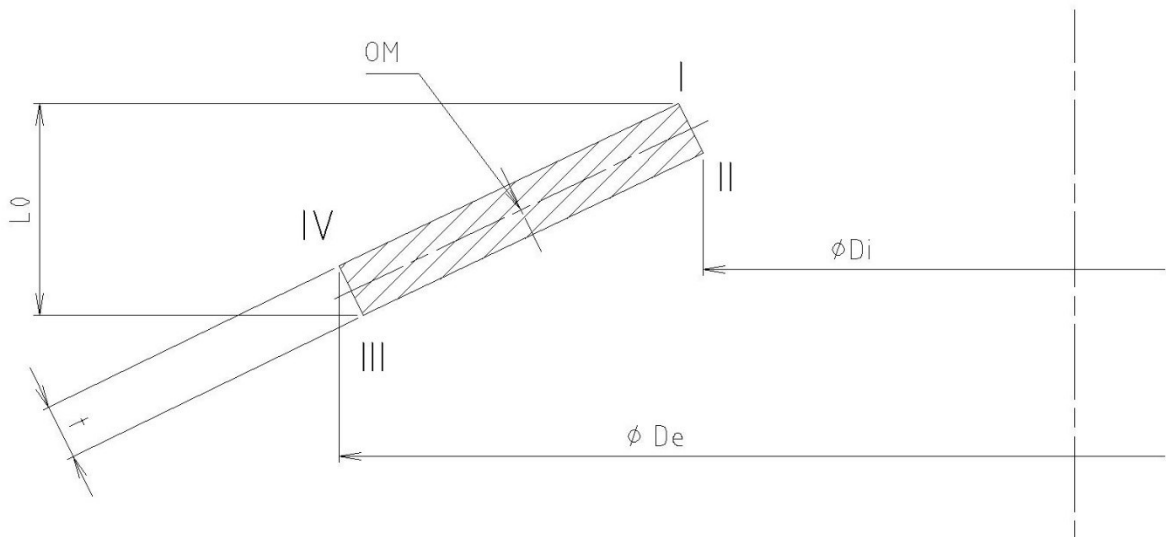
Pro numerické řešení byl zvolen materiál výrobce Delta-preg, konkrétně vysokopevnostní uhlíková tkanina GG200T (Tenax HTA-3k) předimpregnovaná epoxidovou pryskyřicí DT806R, jejíž vlastnosti byly ověřeny a porovnány v teoretické části. V této části práce také byly nastudovány jednotlivé experimenty z oblasti vývoje kompozitních diskových pružin. Technický list tohoto materiálu se nachází v příloze P I - MATERIÁLOVÝ LIST PREPREGU DELTA-PREG.

Tab. 6 Základní vlastnosti prepregu TENAX HTA-3k [P I]

Veličina	Hodnota	Jednotky
Plošná hmotnost	441	g/m ²
Materiál vláken	Karbonové vlákno	-
Vazba	keprová 2x2	-
Průměr Vláknů	7	um
Hustota tkaniny	200	g/m ²
Typ pryskyřice	Epoxidová termosetová	-
Dynamická viskozita	nízká - <300	Pa.s-1
Lepivost	nízká až střední	-
Obsah pryskyřice v tkanině	40	%
Maximální doba skladování	21 dní při 20 °C, 1 rok při - 18 °C	
Vytvrzovací teplota	65 ÷ 140	°C

5.2 Numerické řešení

Následující vzorce jsou dány normou ČSN EN 16984: Talířové pružiny – Výpočet, pro výpočet diskové pružiny, která je aktualizována v květnu 2017. Tato norma je českou verzí evropské normy EN 16984:2016. Přeložena do českého jazyka je Úřadem pro technickou normalizaci a zkušebnictví. Má stejný status jako oficiální verze. Zároveň norma existuje ve třech oficiálních verzích (anglické, francouzské a německé). Vztahy jsou obecné bez přepočtu třecích sil při jakémkoliv uložení. Díky studii, kdy Dharan popisuje zdvojnásobení výšky disku oproti konvenčně používané, se lze přesvědčit, že mají v porovnání obě pružiny velmi podobnou charakteristiku. Díky tomuto zjištění, byla zvolena výška 2,2x větší. Stále platí, že bude kompozitní pružina zatěžována jednoosým zatížením. [14]



Obr. 19 Zobrazení průřezu diskové pružiny s důležitými body zatížení

Síla vyvinutá pružinou při vychýlení s:

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

$$F = \frac{4 \cdot 56600}{1 - 0,29^2} \cdot \frac{3^3 \cdot 5,4}{0,688 \cdot 70^2} \cdot \left[\left(\frac{7,2}{3} - 5,4 \right) \cdot \left(\frac{7,2}{3} - \frac{5,4}{2 \cdot 3} \right) + 1 \right] = 20297 \text{ N}$$

Síla pružiny při zatížení a odlehčení s ohledem na tření:

$$F_{Tc+} = F \cdot \frac{n}{1 \pm \mu_M \cdot (n - 1) \pm \mu_R} \quad (2)$$

$$F_{Tc+} = F \cdot \frac{n}{1 \pm 0,0165 \cdot (2 - 1) \pm 0,035} = 42684 \text{ N}$$

$$F_{Tc-} = F \cdot \frac{n}{1 - \mu_M \cdot (n - 1) - \mu_R}$$

$$F_{Tc-} = F \cdot \frac{n}{1 - 0,0165 \cdot (2 - 1) - 0,035} = 38503 \text{ N}$$

Tuhost pružiny:

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

$$k = \frac{4 \cdot 3800}{1 - 0,29^2} \cdot \frac{t^3}{0,688 \cdot 70^2} \cdot \left[\left(\frac{7,2}{3} \right)^2 - 3 \cdot \frac{7,2}{3} \cdot \frac{5,4}{3} + \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{5,4}{3} \right)^2 + 1 \right] \quad (2)$$

$$= 2650 \text{ N/mm}$$

Výpočet tvarových součinitelů:

$$K_1 = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\left(\frac{\delta - 1}{\delta} \right)^2}{\frac{\delta + 1}{\delta - 1} - \frac{2}{\ln \delta}} \quad (3)$$

$$K_1 = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\left(\frac{1,97 - 1}{1,97} \right)^2}{\frac{1,97 + 1}{1,97 - 1} - \frac{2}{\ln 1,97}} = 0,688$$

$$K_2 = \frac{6}{\pi} \cdot \frac{\frac{\delta - 1}{\ln \delta} - 1}{\ln \delta} \quad (4)$$

$$K_2 = \frac{6}{\pi} \cdot \frac{\frac{1,97 - 1}{\ln 1,97} - 1}{\ln 1,97} = 1,213$$

$$K_3 = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{\delta - 1}{\ln \delta}$$

$$K_3 = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{1,97 - 1}{\ln 1,97} = 1,366 \quad (5)$$

Maximální tlakové napětí v pružině při vychýlení $s = 0,75 \cdot h_0$:

$$\sigma_{OM} = -\frac{4 \cdot E}{1 - \mu^2} \cdot \frac{t \cdot s}{K_1 \cdot D_e^2} \cdot \frac{3}{\pi} \quad (7)$$

$$\sigma_{OM} = -\frac{4 \cdot 3800}{1 - 0,29^2} \cdot \frac{3 \cdot 5,4}{0,688 \cdot 70^2} \cdot \frac{3}{\pi} = -1133 \text{ MPa}$$

$$\sigma_I = -\frac{4 \cdot E}{1 - \mu^2} \cdot \frac{t \cdot s}{K_1 \cdot D_e^2} \cdot \left[K_2 \cdot \left(\frac{h_0}{t} - \frac{s}{2 \cdot t} \right) + K_3 \right] \quad (8)$$

$$\sigma_I = -\frac{4 \cdot 3800}{1 - 0,29^2} \cdot \frac{3 \cdot 5,4}{0,688 \cdot 70^2} \cdot \left[1,21 \cdot \left(\frac{7,2}{3} - \frac{5,4}{2 \cdot 3} \right) + 1,37 \right] = -3783 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{II} = -\frac{4 \cdot E}{1 - \mu^2} \cdot \frac{t \cdot s}{K_1 \cdot D_e^2} \cdot \left[K_2 \cdot \left(\frac{h_0}{t} - \frac{s}{2 \cdot t} \right) - K_3 \right] \quad (9)$$

$$\sigma_{II} = -\frac{4 \cdot 3800}{1 - 0,29^2} \cdot \frac{3 \cdot 5,4}{0,688 \cdot 70^2} \cdot \left[1,21 \cdot \left(\frac{7,2}{3} - \frac{5,4}{2 \cdot 3} \right) - 1,37 \right] = 538 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{III} = -\frac{4 \cdot E}{1 - \mu^2} \cdot \frac{t \cdot s}{K_1 \cdot D_e^2} \cdot \frac{1}{\delta} \left[(K_2 - 2 \cdot K_3) \cdot \left(\frac{h_0}{t} - \frac{s}{2 \cdot t} \right) - K_3 \right]$$

$$\sigma_{III} = -\frac{4 \cdot 3800}{1 - 0,29^2} \cdot \frac{3 \cdot 5,4}{0,688 \cdot 70^2} \cdot \frac{1}{1,97} \left[(1,21 - 2 \cdot 1,37) \cdot \left(\frac{7,2}{3} - \frac{5,4}{2 \cdot 3} \right) - 1,37 \right] \quad (10)$$

$$= 2195 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{IV} = -\frac{4 \cdot E}{1 - \mu^2} \cdot \frac{t \cdot s}{K_1 \cdot D_e^2} \cdot \frac{1}{\delta} \left[(K_2 - 2 \cdot K_3) \cdot \left(\frac{h_0}{t} - \frac{s}{2 \cdot t} \right) + K_3 \right]$$

$$\sigma_{IV} = -\frac{4 \cdot 3800}{1 - 0,29^2} \cdot \frac{3 \cdot 5,4}{0,688 \cdot 70^2} \cdot \frac{1}{1,97} \left[(1,21 - 2 \cdot 1,37) \cdot \left(\frac{7,2}{3} - \frac{5,4}{2 \cdot 3} \right) + 1,37 \right] \quad (11)$$

$$= 550 \text{ MPa}$$

Tab. 7. Vypočtené experimentální hodnoty kompozitní diskové pružiny

Označení	Název veličiny	Hodnota kompozitní pružiny	Hodnota ocelové pružiny	Jednotky
F	Síla plně stlačené pružiny	20297,0	12287,5	N
F _{Tc-}	Síla celé sady pružiny při odlehčování	42684,7	25840,6	N
F _{Tc+}	Síla celé sady pružiny při zatěžování	38503,5	23309,3	N
K1	Tvarový součinitel	0,69	0,69	-
K2	Tvarový součinitel	1,21	1,21	-
K3	Tvarový součinitel	1,37	1,37	-
L _S	Délka plně stlačené sady pružin	115,2	57,6	mm
L ₀	Volná délka sady pružin	163,2	81,6	mm
i	Počet sériově uspořádaných sad disků	8	8	-
n	Počet paralelně uložených disků v sadě	2	2	-
s _T	Celková deformace sady	86,4	43,2	mm
δ	Poměr průměrů pružiny	1,97	1,97	-
σ _{OM}	Napětí materiálu v daném místě pružiny	-1133,46	-1211,02	MPa
σ _I	Napětí materiálu v daném místě pružiny	-3782,66	-2406,59	MPa
σ _{II}	Napětí materiálu v daném místě pružiny	-537,90	1060,20	MPa
σ _{III}	Napětí materiálu v daném místě pružiny	2195,54	1306,86	MPa
σ _{IV}	Napětí materiálu v daném místě pružiny	549,99	-451,29	MPa

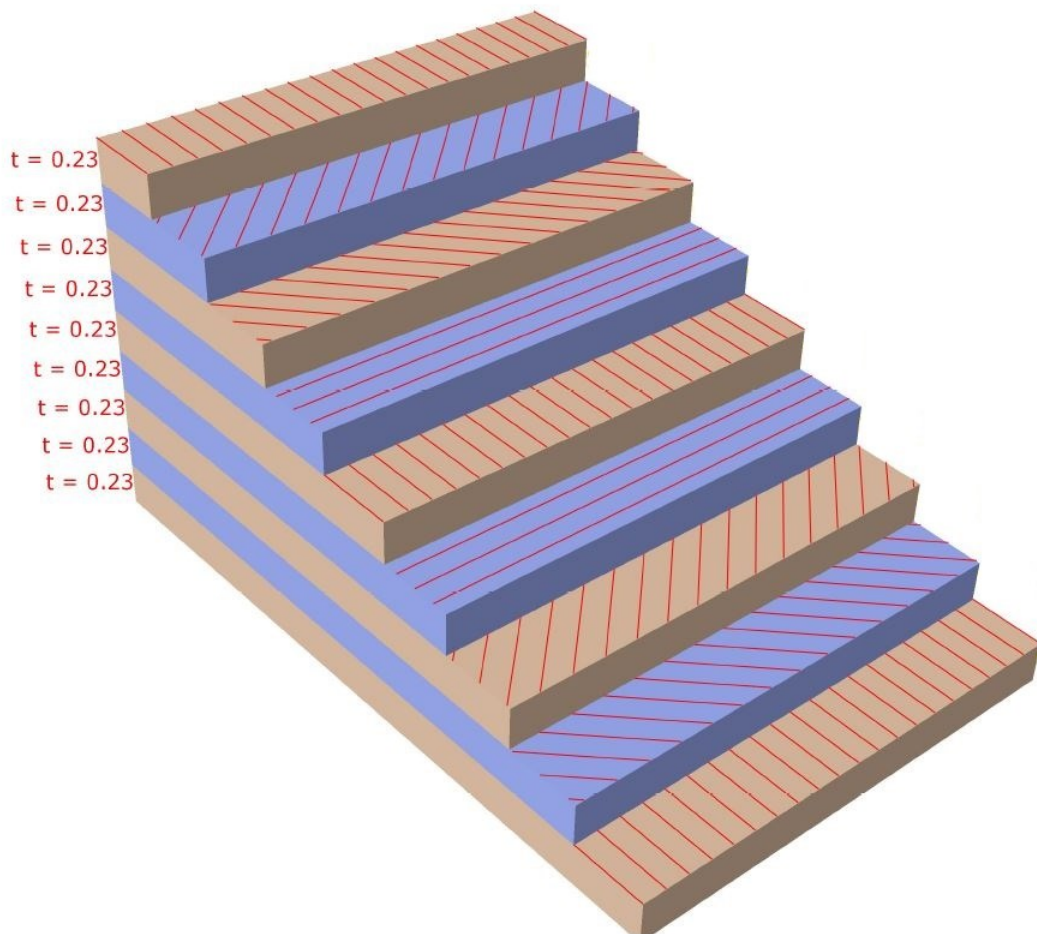
5.2.1 Diskuze k výpočtu

Výpočet maximálního pracovního zatížení, kdy je zkušební stlačení $s = 0,75 \cdot h_0$ nám říká, že je možné zatížit kompozitní diskovou pružinu ekvivalentní hmotností 136,2 kg. Z Tabulky 6 je možné vyčíst, že hodnoty plně stlačené pružiny se liší o celý řád N ve

prospěch konvenční pružiny. Tyto hodnoty jsou dány primárně modulem pružnosti v tahu a dalších vstupních hodnot s dalšími přepočty. Tyto výsledky vedou k přípravě experimentálního řešení. Díky parametrům dodavatelů lze zpřesnit výpočet a přiblížit se blíže reálným výsledkům, které lze později porovnat s výsledky měření hotového modelu. Napětí v daných místech pružiny se vyskytují také v záporných číslech, záporná hodnota v tomto případě znamená, že se jedná o tlakové napětí.

6 NÁVRH LAY-UP DIAGRAMU

Dle nastudovaných materiálů z literatury bylo pro výrobu experimentálně zvoleno uložení jednotlivých vrstev dle obrázku 18. Uložení je symetrické, tím by mělo být dosaženo vlastností, které zajistí funkčnost diskové kompozitní pružiny. Na plochu dutiny formy bude aplikován separátor pro snadnější manipulaci s hotovým výrobkem a také pro zjednodušení dalších výrobních cyklů pružin. Lay-up diagram byl sestrojen ve výukové verzi programu Abaqus/CAE firmy Dassault Systèmes.



Obr. 20 Lay-up diagram kompozitní diskové pružiny

6.1.1 Volba orientace vláken

Orientace vláken kompozitních materiálů má velký vliv na modul pružnosti a smykový modul. Obvykle se volí orientace $[0^\circ/90^\circ]$ nebo $[0^\circ / +45^\circ / -45^\circ / 0^\circ]$. Výběrem optimálního umístění orientace vláken můžeme navrhnout vysoce výkonnou pružinu s nižší hmotností a

vynikající únavovou pevností proti vibracím s velkou amplitudou a menším zástavbovým prostorem. Dle získaných vědomostí volím konfiguraci $[0^\circ / +45^\circ / -45^\circ / 90^\circ / 0^\circ]$. Tato konfigurace dále pokračuje zrcadlově a kompletně tak tvoří 9 vrstev. Pro experimenty je předpoklad, že uložení vláken bude měnit a dále porovnávat naměřené hodnoty.

7 NÁVRH LISOVACÍ FORMY

Lisovací forma je určena pro formování v lisovacím stroji Fontijne LabPro 600 se standardním rozměrem desek 400x400 mm a lisovací silou až 600 kN. Forma pro lisování je čtyřnásobná, tato násobnost byla zvolena z důvodu časové úspory, kdy je možné za jeden pracovní cyklus stroje vyrobit čtyři kusy pružin. Předem připravený materiál je kladen do formy dle nástřihového plánu a lay-up diagramu. Na obě tvarové vložky jsou přišroubovány samostatné tvárníky a tvárnice, každý čtyřmi kusy šroubů. Tuto formu tedy dělají univerzální a je možné v případě úpravy geometrie součásti demontovat, opravit, případně nahradit jinými tvárníky s podobnou geometrií. Tvar tvárníku a tvárnice je cylindrický, stejně jako otvory pro ně a tím je zajištěno jejich vystředění. [23]

7.1 Výsledný výrobek

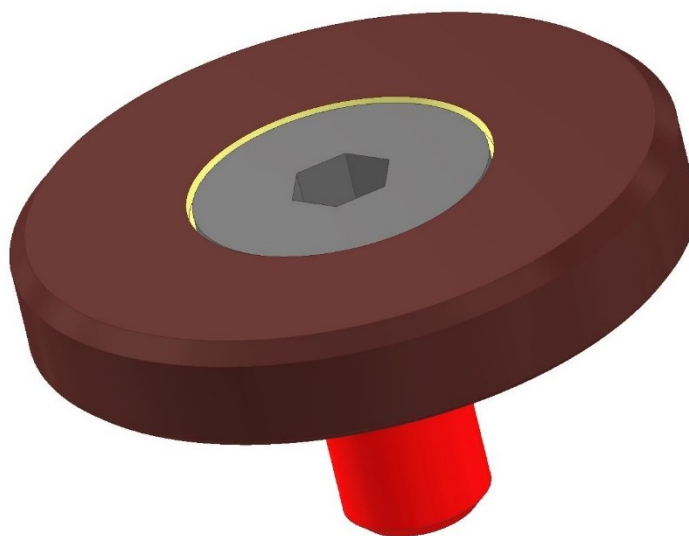
Vzhledem k experimentální – prototypové výrobě není lisovací forma konstruována pro výsledný výrobek. V dalších krocích je potřeba výrobek za pomoci dokončovacích operací obrobít. Nutné je také zbrousit ošřepené okraje a další přebytečný materiál na spodní a horní hraně výrobku. Na obrázku 21. je výrobek zobrazen již po základních úpravách. Následně je nutné zbrousit diskovou pružinu do požadovaného tvaru pro uložení do tlumiče. Brousit je potřeba horní nebo spodní lem výrobku.



Obr. 21 3D Model diskové pružiny

7.2 Dorazové podložky

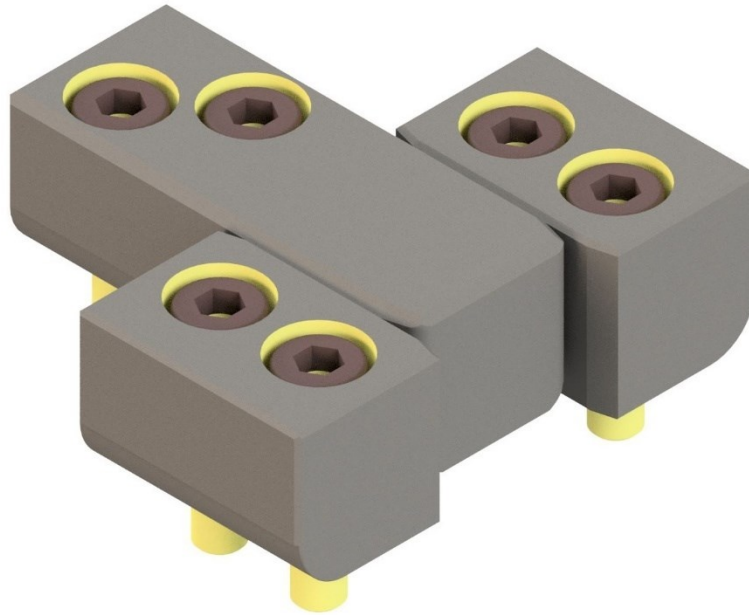
Dorazové podložky slouží k eliminování nárazu a následné kolizi tvarových částí při nastavení stroje, a také pro případ, kdy bude forma odmontována ze stroje. V tomto případě dorazové podložky zajistí, aby na sebe nedolehly tvarové vložky při demontáži z lisovacího stroje. Jejich rozměr je 18x3 mm a jsou vyrobeny z automatové oceli dle DIN 9S20K. Jejich tvrdost je 46 ± 2 HRC a odolají zátěži až 980 N/mm^2 . Upevnění ve formě je zajištěno šroubem se zapuštěnou hlavou a šestihranem o rozměru 4x10 mm se závitem M4.



Obr. 22 Dorazová podložka se šroubem

7.3 Vodící prvky

Vedení formy je zajištěno kluznými vodícími prvky od firmy Hasco. Vodící desky v horní části formy jsou vyrobeny z materiálu EN 1.2162 (ČSN 19 487) a je na nich aplikován DLC povlak. Jejich tvrdost dosahuje 60HRC. Spodní vodící vedení je vyrobeno ze stejného materiálu jako vodící blok a stejným povlakováním DLC, tvrdost čelistí je 58 HRC. Celek vedení je bezúdržbový a má velmi dlouhou životnost. Vodící prvky jsou umístěny dle pravidel o zabudování. Použitý spojovací materiál je taktéž z produkce Hasco, jde konkrétně o šrouby s válcovou hlavou pro imbus 5x35 dle DIN EN ISO 4762.[24]



Obr. 23 Sestava vodících prvků Hasco. [24]

7.4 Temperace formy

Vytápění je zajištěno válcovými nízkonapěťovými patrony o rozměrech 6,5x20 mm a jmenovitým výkonem 125 W. Jejich výhodou je montáž bez potřebné vůle. Montáž je prováděna za pomoci přípravku ve spreji, který napomáhá zefektivnit přenos tepla mezi patronou a ohříváním materiálem. Regulace je zajištěna regulační jednotkou, napojenou na jednotlivé okruhy patron a kontrolována teplotním čidlem, umístěným mezi patronami v rovnoměrných vzdálenostech od jednotlivých patron. Kabelové vedení je zajištěno podélnými drážkami zakrytými izolační deskou. Kabelové vedení je vedeno v armovaném ochranném pouzdře z pozinkovaných ocelových drátů s izolací skelným vláknem a impregnovaným silikonem, odolným proti znehodnocení tepelným působením v rozmezí -60 °C až +250 °C.

$$P_{ges} = P \cdot n = 125 \cdot 12 = 1500 \text{ W} \quad (12)$$

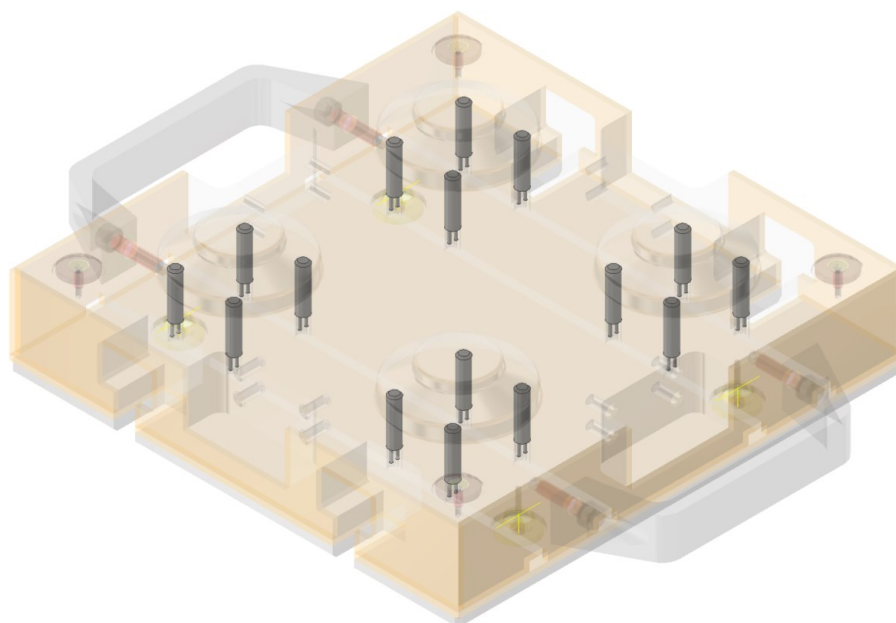
$$t = \frac{m \cdot c \cdot \Delta t}{P_{ges} \cdot 3600} \cdot 1,5 = \frac{7 \cdot 921,6 \cdot 150}{P_{ges} \cdot 60} \cdot 1,5 = 16,2 \text{ min} \quad (13)$$

$$I_{ges} = I \cdot n = 0,54 \cdot 12 = 6,4 \text{ A} \quad (14)$$

Kde je:

Veličina	Popis	Znamé hodnoty/ vypočtené hodnoty	Jednotky
----------	-------	-------------------------------------	----------

P_{ges}	Celkový výkon konfigurace patron	1500	W
P	Výkon jedné topné patrony	125	W
n	Počet patron	12	ks
t	Čas ohřevu	16,2	min
m	Hmotnost bloku	7	kg
c	Měrná tepelná kapacita hliníku dle tabulky	921,6	J/kg.K
Δt	Rozdíl počáteční a požadované teploty	150	-
I_{ges}	Celková spotřeba energie konfigurace patron	6,54	A
I	Spotřeba energie jedné patrony	0,54	A



Obr. 24 Konfigurace topných patron ve spodní tvarové vložce

7.4.1 Popis výpočtu

Výpočtem byla zjištěna doba, za kterou dokáže sestava elektrických patron vytopit formu na požadovanou teplotu. Z programu Autodesk Inventor 2020 byl zjištěn objem tvarové desky a také hmotnost dle zadaného materiálu. Pro výpočet byl zvolen materiál hliník 6061-AHC dle materiálové knihovny programu Inventor. Hmotnost desky je 6,86 kg, pro výpočet byla použita hmotnost na celé jednotky. Měrná tepelná kapacita hliníku byla vyčtena z tabulky výrobce Hasco. Změna teploty $\Delta t=150\text{ }^{\circ}\text{C}$ byla použita z důvodu možných odchylek teploty

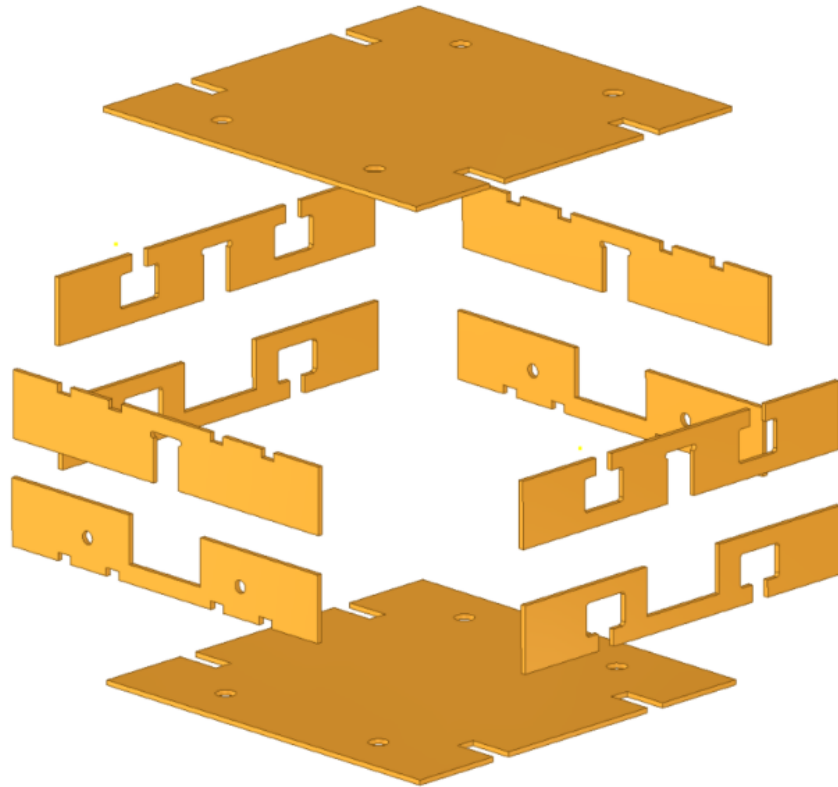
v místnosti, nezávisle na zvolené lisovací teplotě. Výsledný čas se tak bude pohybovat z rozmezí ± 1 min. Koeficient ztráty tepla byl použit stejně jako v příkladovém výpočtu v katalogovém listu produktu patrony a to 1,5. Dle výpočtů výrobce bylo zjištěno, že tato konfigurace patron dokáže zvýšit teplotu bloku o 150 °C za 16,2 minut. Při výpočtu se bere v potaz i tepelná ztráta. Z toho vyplývá, že je vytápění pro toto použití dostačující.

7.5 Izolační desky

Obě části formy jsou po obvodu opatřeny izolačními deskami, které zamezují ztrátě teploty vyhřívaných tvarových částí. Jsou vyrobeny z izolačního materiálu dodávaného firmou Hasco v různých rozměrech. Jde o kombinaci syntetické pryskyřice a skelných vláken. Jednotlivé desky je možno dodat v požadovaném tvaru, nebo v původním obdélníkovém formátu, který lze nařezat na potřebný rozměr. Poté jsou vyřezány otvory, které by mohly znemožnit funkci formy.

Tab. 8 Parametry použitých izolačních desek

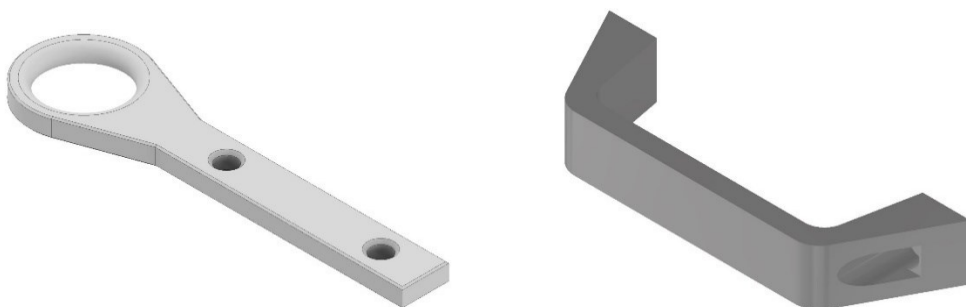
Obchodní název produktu	HASCO Z121
Maximální provozní teplota	230 °C
Maximální tlakové zatížení	420 N/mm ²
Koeficient vodivosti λ	0,21 W/m.K



Obr. 25 Sestava izolačních desek formy

7.6 Transportní prvky

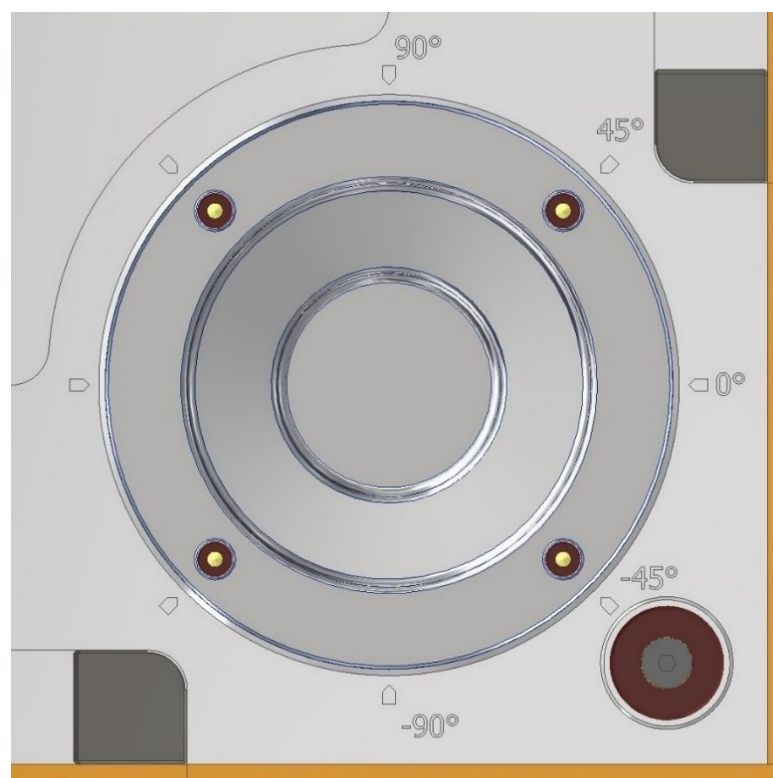
K manipulaci je forma osazena dvěma druhy manipulačních prvků. Jedním z nich jsou hliníkové úchytky na spodní tvarové vložce, která napomáhá při usazování formy do lisu. Tyto úchytky jsou k formě přišroubovány permanentně. Druhý manipulační prvek je k formě přišroubován pouze při transportu formy mimo lisovací stroj, tyto prvky zajišťují jak spojení formy, tak aby se nepoškodily tvarové vložky navzájem a forma se nerozpadla. Manipulační prvky jsou po přesunu do lisovacího stroje odmontovány, aby nebránily umístění stroje do lisu.



Obr. 26 Transportní prvky – oko(vlevo), úchytka(vpravo)

7.7 Značky pro ukládání materiálu do formy

Orientační značky jsou na formě vyraženy z důvodu lepší orientace pracovníka. Správné otočení prepregu je důležité pro jednotlivé výrobky a jejich další testování. Značky jsou vyraženy na plochu spodního bloku formy v rozmezí 45° a nezasahují do tvarové vložky. Tento fakt zjednoduší případnou úpravu nebo výměnu tvarové vložky a nemusí tak následovat nová ražba. Stejně značky jsou i na pomocném plechovém plátu, který bude k dispozici na pracovním stole, odkud pracovník odebírá předpřipravené výstřižky prepregu.

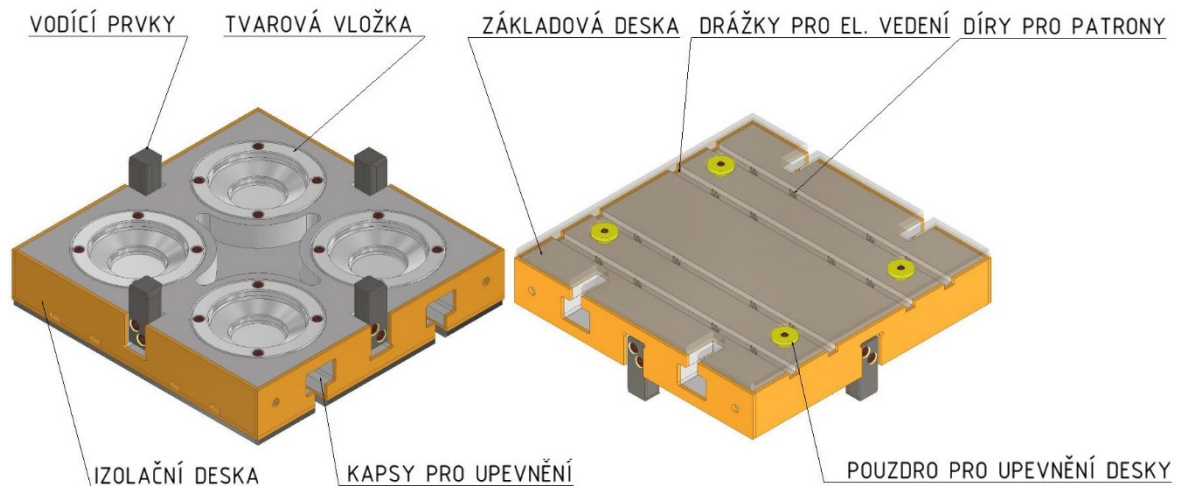


Obr. 27 Orientační značky na bloku formy

7.8 Horní blok

Horní blok je pohyblivá část formy, která díky vedení doléhá na spodní tvarovou vložku. Tento díl je pohyblivý a díky němu je přenášena tlaková síla, jež napomáhá vrstvám k co nejlepšímu styku a homogenizaci kladených vrstev. Do vyfrézovaných otvorů jsou vloženy tvarové vložky, které je možno v případě potřeby upravit, případně nahradit tvarovými vložkami s upravenou geometrií, bez potřeby demontáže celého bloku formy. Horní blok je opatřen normalizovanými vodícími prvky. Rozměr vodícího bloku je $20 \times 18 \text{ mm}$ a jeho délka

je 50 mm. Celý blok je obložen izolačními deskami o síle 3 mm. Dále jsou na ploché straně desky vyfrézovány drážky a v nich jsou vrtány slepé díry o průměru 6,5 mm a délce 21 mm, do kterých jsou vloženy 4 ks topné patrony pod každou tvarovou vložkou. V desce jsou dále frézovány otvory pro upevnění ke stolu lisu za pomoci T matice. Základová deska je upevněna za pomoci pouzder a zajišťuje také horní izolační desku. Ve středu bloku je vyfrézováno tvarové odlehčení.

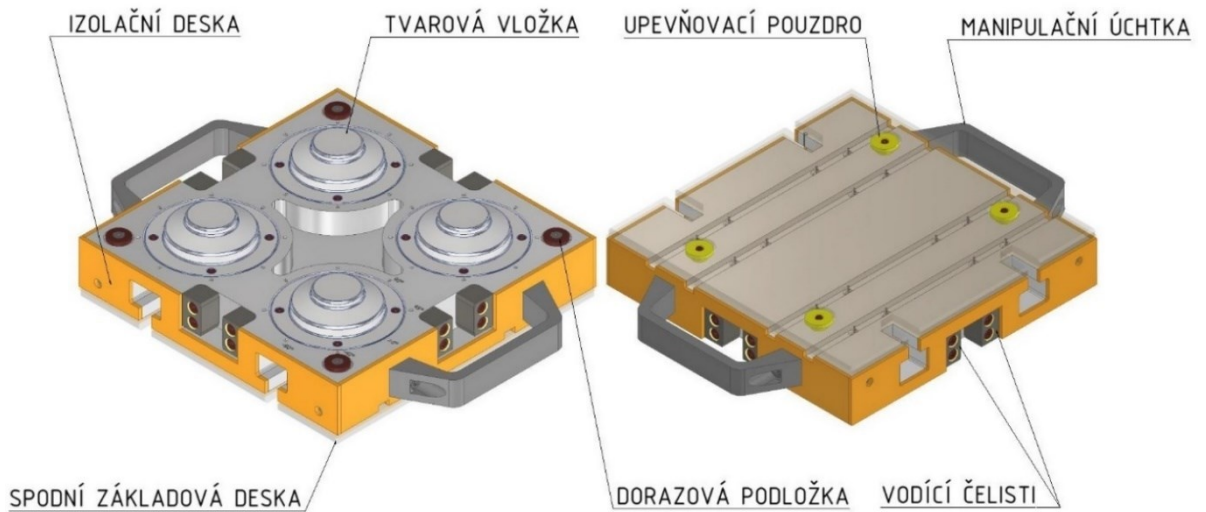


Obr. 28 Horní blok lisovací formy

7.9 Spodní blok

Spodní blok tvoří základnu formy. Na blok jsou namontovány normalizované vodící čelisti, do kterých se zasouvají vodící bloky horní části formy a jejich rozměry jsou 18x18x27 mm. Spodní blok je také osazen dorazovými podložkami, které jsou zde hlavně kvůli transportu pro zamezení vzájemného dotyku tvarových vložek. Stejně jako u horního bloku jsou do vyfrézovaných otvorů vloženy a přišroubovány tvarové vložky. Spodní část formy má hmotnost necelých 7 kg a celková hmotnost formy dosahuje maximálně 15 kg a i přesto je zde potřeba instalovat závěsný transportní systém, díky kterému je zajištěna manipulace. Na spodní tvarové vložce jsou namontovány hliníková madla, díky kterým lze s formou manipulovat v lisovacím stroji při montáži, případně ji přidržovat při manipulaci a následném usazení. Díky zaklesnutému vedení formy nedojde při manipulaci k natočení nebo vychýlení vrchní a spodní tvarové vložky formy. Spodní díl je opatřen otopnými patronami ve stejném postavení jako v protilehlém bloku formy. Na vrchní ploše bloku jsou vyraženy značky pro vkládání nastříhaného materiálu a jeho orientaci dle lay-up diagramu.

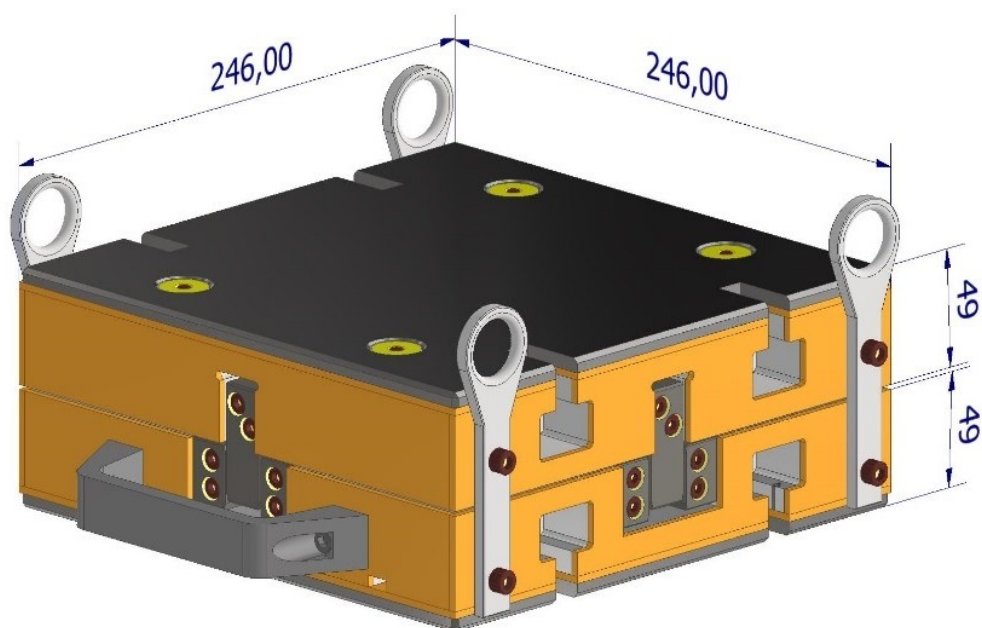
Stejné značky jsou také na pomocném plechovém plátu, kde je materiál před kladením do formy připravený.



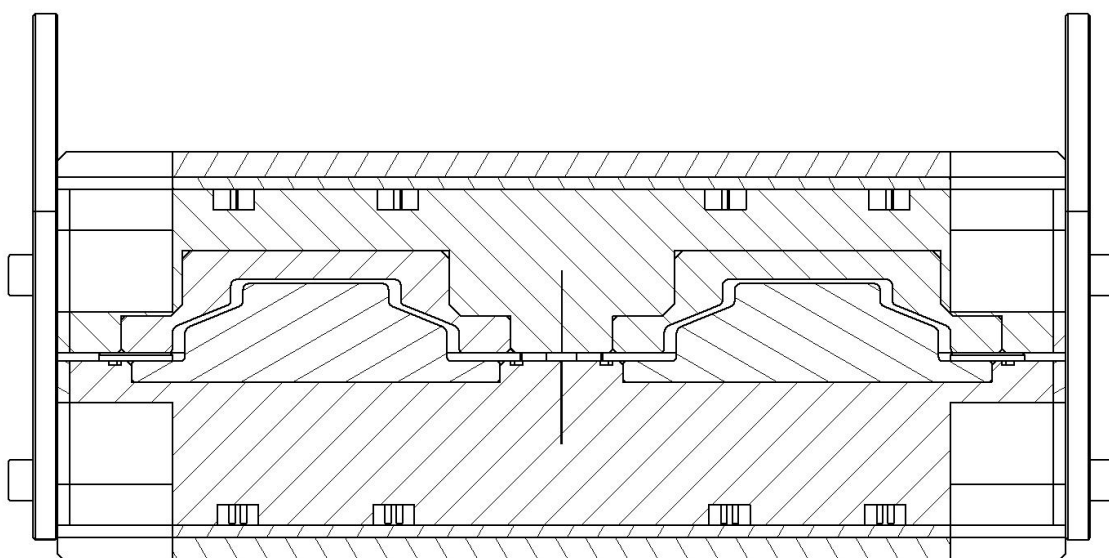
Obr. 29 Spodní blok lisovací formy.

7.10 Sestava lisovací formy

Sestava se skládá z hlavních dvou částí, spodního a vrchního dílu, které spolu vytváří výsledný tvar. Další částí jsou podpůrné prvky, které zajistí vzájemnou polohu tvarových částí. Podpůrnými prvky jsou vodící desky rovnoměrně rozmístěny ve formě tak, aby neomezovaly její funkčnost. Forma je dále obložena tepelně izolačními deskami, na které jsou z horní a spodní strany upevněny zušlechťené, za tepla tvářené, obdélníkové základové desky s jakostí ČSN 19436 o výšce 6 mm a tvoří základní stykové plochy s lisovacím strojem. Jejich tvrdost dosahuje 280 HB. [24]



Obr. 30 Sestava lisovací formy.

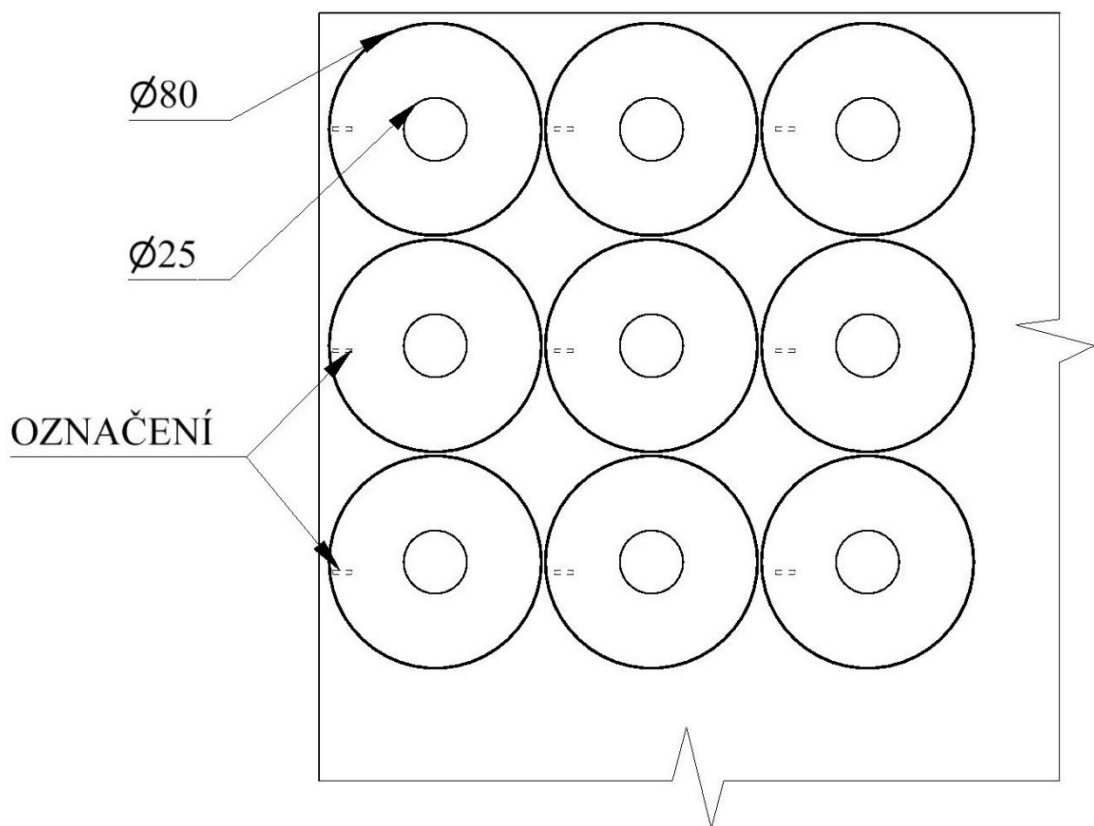


Obr. 31 Řez dutinami lisovací formy

7.11 Nástřihový plán prepregu

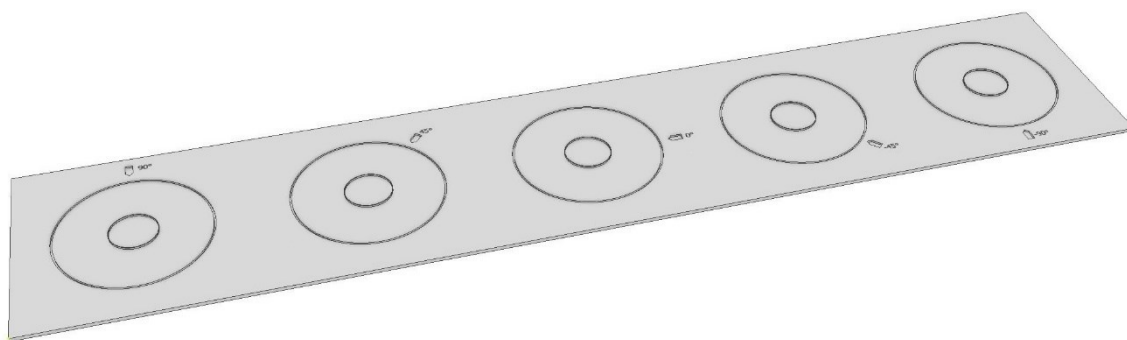
Nástřihový plán je řešen metodou početní, záměrně tak, aby se z plátu materiálu vytěžilo co nejvíce kusů výstřížků. I přes méně vhodný kruhový tvar je možno z výchozího polotovaru o rozměru 1x1,2 m vystříhnout nejprve 168 kusů. Vnitřní kruh – technologický odpad, je bohužel nevyhovující pro další použití a proto tvoří odpad. Na polotovar byl opakovaně

rozmístěný kruh o průměru 80 mm. Po prvním výrobním cyklu je potřeba zvážit, jestli je navržený průměr polotovaru dostačující a vyhovuje předpokladům. V prvním kroku jsou vystřiženy tvary kruhu o průměru 80 mm, dále je potřeba vystříhnout v těchto tvarech otvor o velikosti 24 mm. Oba průměry je možno vytvořit trubkovou raznicí na horizontálním lisu. Pro výrobu jednoho cyklu je nutné vystříhnout pouze 35 kusů polotovaru. Tudíž stačí provést stříh pouze v prvních třech řadách. Pro lepší manipulaci je dobré vystříhnout rozměr 1200x255 mm, z tohoto rozměru dále nastříhat menší kusy a poté až výsledný tvar. Ideální řešení, které zajistí přesný stříh, je řez zajistit na řezacím stroji, do kterého nahrajeme nástřihový plán. Tento proces nám zajistí přesný řez a ušetří mnoho času, který je možné dále využít při přípravě výroby. Pro znázornění je na níže uvedeném obrázku nástřihový plán pro 9 ks prepregu. Pro rozlišení orientace prepregu je nutné, aby byl materiál, po označení stříhové linky, označen orientační čarou, kterou je možné vytvořit bílou fixou na vodní bázi tak, aby nedošlo k ovlivnění parametrů materiálu. Tyto vystřižené kusy si poté dělník položí na připravený plát se značkami, který bude mít na pracovním stole v blízkosti lisu.



Obr. 32 Nástřihový plán prepregu

Identické značky jsou jak na plátu se značkami, tak i na bloku formy. Tyto značky zajistí, aby pracovník poznal pootočení prepregu, jak při ručním stříhu, tak i stříhu na stroji. Aby bylo pootočení správné, musí lícovat zaznačená značka na prepregu se značkou vyraženou na formě a na plátu na stole. Tímto pomocným značením se eliminují chyby při výrobě. Roztříděné vrstvy poté pracovník naskládá na sebe a vloží do připravené formy.



Obr. 33 Pomocný plechový plát s vyraženými značkami

7.12 Lisovací program

Program je určen podle doporučení výrobce a zkušeností získaných z teoretické studie obdobných technologických operací a výzkumů. Dle doporučení výrobce prepregů je potřeba dbát na omezení teploty lisování a to na 140°C. Tato teplota je hraniční a je doporučeno tuto teplotu nepřekračovat, případně je potřeba věnovat velkou pozornost chování prepregu v průběhu lisování při této teplotě. Kovový materiál obecně velmi dobře vede teplo. Při cyklech je doporučeno vytvářet prodlevy, díky kterým se teplota formy ustálí. Nedojde tak k přehřátí a následného znehodnocení použitého materiálu. Po otestování výrobků je možné lisovací program experimentálně poupravit na základě předešlého sledování a vyhodnocování zkušebních metod a cyklů, při kterých byl vyroben nejodolnější a nejkvalitnější výrobek. Pro výrobu je zvolen Program č. 2.

Tab. 9 Doporučené hodnoty výrobních cyklů

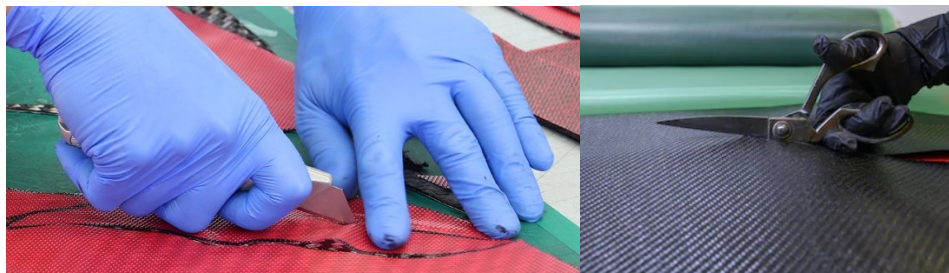
Veličina/Program	1	2	3	4
Teplota [°C]	125	130	135	140
Čas lisování [min]	15–25	12-20	10-15	6-10
Lisovací síla [kN]	5-10	5-10	5-10	5-10

7.13 Technologický postup výroby

Celý technologický postup je rozdělen do tří hlavních částí. V postupu budou popsány jednotlivé úkony dle časového sledu po sobě jdoucích operací. Při manipulaci s nevytvrzenými pryskyřicemi a vláknitými materiály je třeba zvážit preventivní opatření. Pro ochranu obsluhy a zabránění kontaminaci součástí, je výrobcem doporučeno používat čisté ochranné rukavice. Výrobní cykly udávají sled jednotlivých úkonů pro vytvoření co nejkvalitnější výrobku za co nejkratší čas. Zároveň však nesmí ovlivnit žádnou z částí procesu. Zahrnuje výrobní postupy, jednotlivé úkony seřazené za sebou a také lisovací cykly, díky něž proběhne nastavení lisovacího stroje.

7.13.1 Příprava prepregu a pracoviště

Následuje vyjmutí zmraženého prepregu z mrazícího zařízení, minimálně 6 h před výrobním procesem, pro jeho zotavení a dosažení okolní teploty. Tento postup zabrání tomu, aby nevytvrzený prepreg absorboval vlhkost ze vzduchu. Vlhkost by mohla mít vliv na finální kvalitu součástí. Po rozmražení a zotavení se přichystají všechny potřebné nástroje a materiály. Pokud půjde o prototypovou výrobu, tak zotavený prepreg bude nastříhán dle nástřihového plánu. U sériové výroby lze prepreg nařezat za pomoci digitálního plotteru na přesné rozměry.



Obr. 34 Ruční řezání prepregu [26]

Při opětovném skladování prepregu je nutné zabalit roli zpět do ochranného vaku, dobře ji utěsnit a vložit do mrazáku. Separátor se dle návodu naleje do stříkací pistole, která je napojena na centrální rozvod vzduchu. Forma se doveze k lisu spolu se všemi potřebnými nástroji, jako je plastová škrabka a čisté rukavice. Forma se upevní a vystředí v lisu. Poté se lis zvedne na dostatečnou hladinu zdvihu a pomocí rozpouštědla se očistí tvarové části formy. Následuje zapnutí regulačního zařízení, na které je napojeno vytápění formy a vyčkání na dosažení požadované teploty.



Obr. 35 Nastavení teploty regulačního zařízení

Při vytápění se stříkací pistolí nanáší separátor LOCTITE FREKOTE HMT 2 nástřikem za pomoci suchého vzduchu na tvarové části formy. Nástřik se nanáší ve 4 až 6 po sobě jdoucích vrstvách v rozmezí minimálně 5 minut, za tuto doby je nanesená vrstva dostatečně vyžrát.



Obr. 36 Vysokotlaká pistol pro nástřik separátoru [25]

7.13.2 Nastavení stroje a lisování

Do provozu bude uveden plně automatický lisovací stroj a dle specifikací se nastaví přítlačná síla a doba přítlaku. Připravené jednotlivé vrstvy prepregu se kladou postupně na sebe do formy, tak aby byl dodržen lay-up diagram. K orientaci slouží vyražené značky jak na formě, tak na plátu, kde jsou výstřižky nachystány. Po kontrole dosažení požadované teploty na regulačním zařízení je spuštěn lisovací program a vizuálně kontrolován průběh cyklu. Po dokončení cyklu se lis otevírá.

7.13.3 Dokončovací operace a kontrola

Výrobky se opatrně vyjmou z formy, za pomoci nástrojů, které nepoškodí povrch formy. Je lepší vyhnout se nástrojům jako například kovová škrabka nebo šroubovák, které by mohly povrch formy nenávratně poškodit, vhodnější je tedy škrabka plastová. Pokud ve formě zůstaly zbytky materiálu, bude potřeba je odstranit za použití plastové škrabky. Dalším krokem je dočištění výrobku rozpouštědlem a příprava formy na další výrobní cyklus. Výrobky se odloží na odkládací plochu. Po vychladnutí je nezbytné ořezat přebytečný materiál diamantovým kotoučem. Na pásové brusce se zbrousí oba průměry pružiny na požadovanou výšku, při broušení je potřeba průběžného přeměrování. Vychladnuté výrobky dále podstupují níže popsané dodatečné vytvrzení.

7.13.4 Dodatečné vytvrzení – postrucing

Pro dosažení co nejlepších vlastností materiálu, je doporučen tzv. postcuring. Tento proces maximalizuje některé fyzikální vlastnosti materiálu, urychlí vytvrzení, zvýší teplotu skelného přechodu, čímž je dosaženo vyšší homogenity materiálu a také lepší zesíťování

výrobku. Toto vytvrzení zahrnuje následující čtyři cykly. První cyklus: Vytažený výrobek je vložen do pece s nárůstem teploty $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$. na počáteční teplotu vytvrzení, kterou je možno zvolit v hodnotách $65\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebo $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Druhý cyklus: Po dosažení zvolené teploty se zpomalí rychlost zvyšování teploty na tempo $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$. ($20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hod}$) a dosáhne se teploty $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Snížení tempa je nezbytně důležité pro vývoj T_g ve výrobku a eliminace zkreslení výsledku. Třetí cyklus: Udržování teploty $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 1 hodiny. Čtvrtý cyklus: Ochlazení výrobku na pokojovou teplotu v tempu $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$.



Obr. 37 Digitálně regulovaná pec pro postcuring [26]

8 NÁVRH RTM FORMY

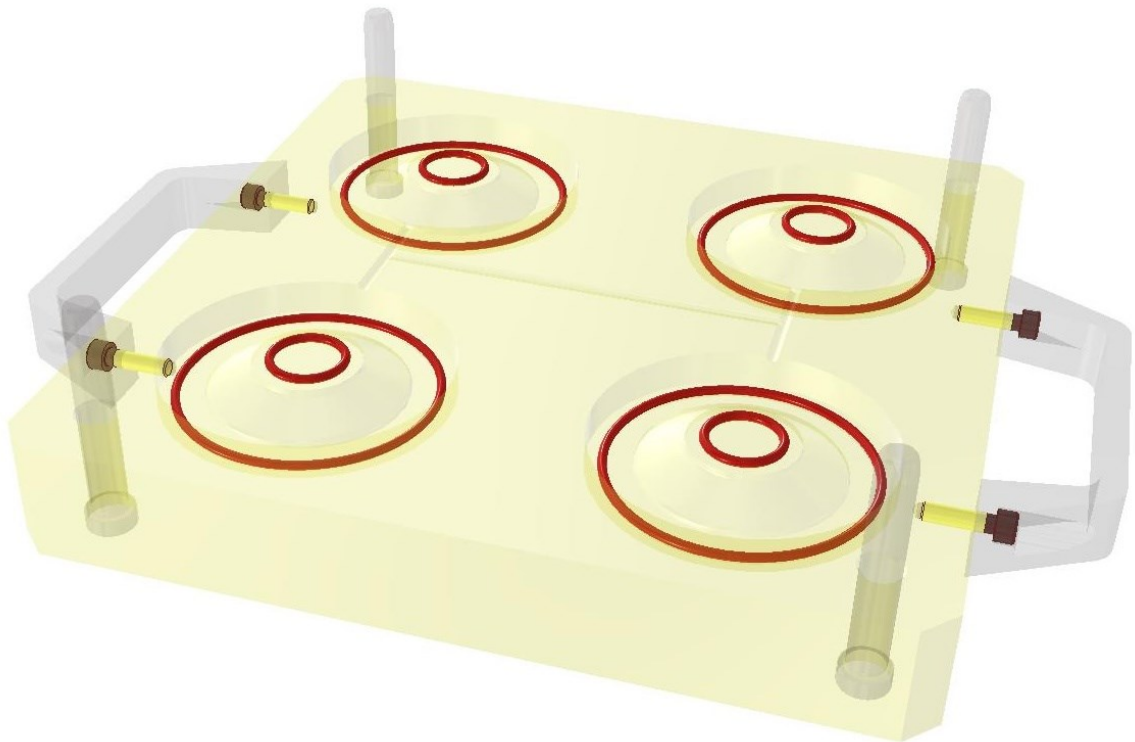
Forma pro RTM slouží ke vstřikování pryskyřice do dutiny pod nízkým tlakem. Dutina formy je vyplněná vláknovou výztuží. Hlavním parametrem jsou nástroje, které jsou při návrhu formy zvoleny. Při návrhu formy RTM je třeba zvážit mnoho parametrů, které jsou dále popsány v následující kapitolách.

8.1 Odvzdušnění formy

Dutinu je nutné kompletně naplnit pryskyřicí, a proto je potřeba do formy umístit odvzdušňovací otvory pro odvádění přebytečného vzduchu z dutiny. Když se pryskyřice dostane do dutiny formy, musí se z tohoto prostoru odebrat vzduch. Existuje mnoho možností odvzdušnění RTM formy. V našem případě je odvzdušnění zajištěno mezerami mezi tvarovými bloky formy. Konkrétně jde o mezikruží od dutiny formy, po kanál s těsněním. Pokud se vzduch z formy při prvních výrobních cyklech nepodaří dostat, vznikne vzduchová kapsa, která negativně ovlivní funkčnost a strukturu výrobku, proto jsou tyto mezery dostatečně velké. Pokud i při tomto řešení vzniknou vadné výrobky způsobené přebytečným vzduchem, bude nutné zabezpečit dodatečné odvzdušnění. Případný přetok, který vznikne v odvzdušňovacích mezerách není nežádoucí. Tyto přetoky jsou následně odstraněny při dokončovacích úpravách výrobku.

8.2 Těsnění

Těsnost formy bude zajištěna gumovým těsněním kruhového průřezu z materiálu MQV, odolávající teploty až 200 °C. V každé tvarové vložce jsou vloženy dva kusy těsnění. Rozměr menšího těsnění je 24x3 mm a rozměr většího těsnění je 42x3 mm. Těsnění zajišťuje koncentraci přebytečného vzduchu do dutiny formy, tím vzniká odpor proti tečení směsi do dutiny. Díky odporu se dutina plní postupně a dochází k lepšímu prosycení tkaniny v dutině. Oba kusy těsnění jsou znázorněny na obrázku 40.

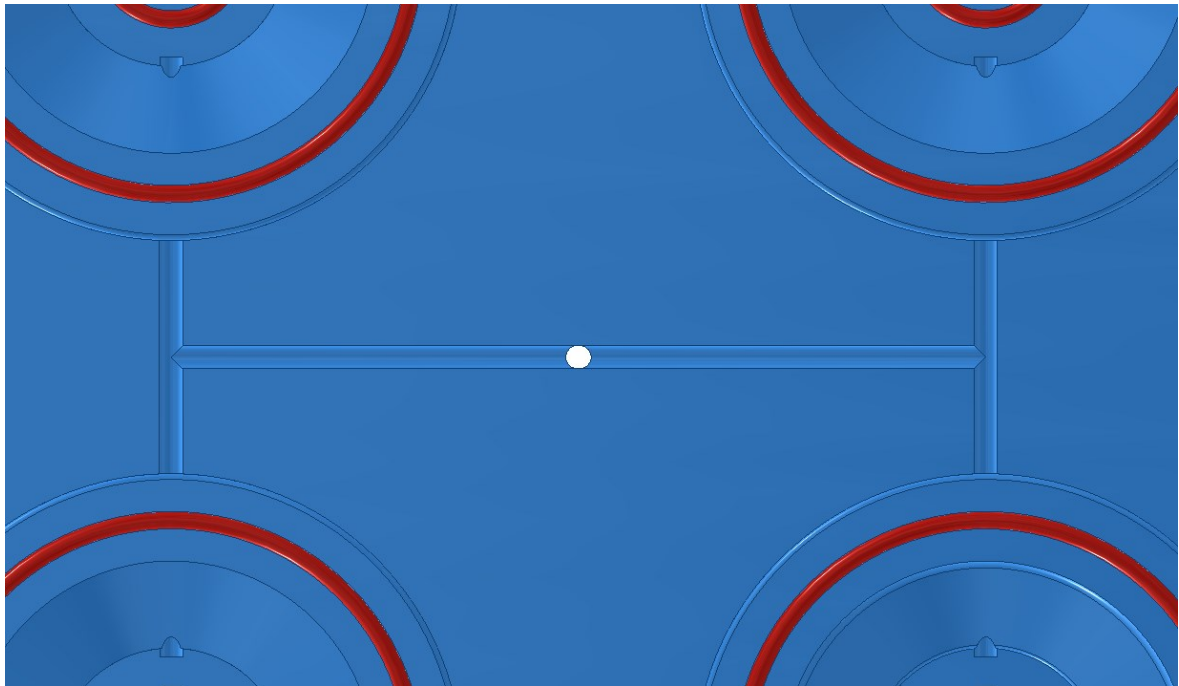


Obr. 38 Těsnění RTM formy mezi tvárníkem a tvárnici

8.3 Vstříkovací systém

Vstříkovací otvor zajišťuje vstup pryskyřice do dutiny formy. Pro nalezení tohoto injekčního portu existuje mnoho možností a vždy záleží na tom, jaký tvar se bude vyrábět. Proto neexistuje žádné pravidlo ani průvodce, který by naznačoval, co je třeba v jednotlivých případech zvolit. Vše záleží na konkrétní geometrii a rozměrech výrobku. Řešení se mění v závislosti na tom, zda se jedná o pravoúhlé nebo rotační těleso obsahující díry či nikoliv. Dalšími aspekty jsou, kolik portů je zapotřebí a jejich rozdělení a umístění. Ze všech těchto důvodů je nutné studovat proces plnění, díky tomu je možné pozorovat problémy tečení ještě před výrobou formy. V dnešní době existují simulační programy, které poskytují konstruktérům několik možností, jak vše prozkoumat. Dle nastudovaných informací a studií byl zvolen jeden vstříkovací port umístěný v horním bloku desky. Z tohoto portu proudí vstříkovaná pryskyřice hlavním rozvodným kuželovým kanálem do rozvodných kanálků. Rozmístění kanálků je do písmene H, kvůli počtu dutin, které jsou ve formě čtyři. Vtokové ústí každé dutiny je umístěno na její horní hraně. Dutiny jsou rotační, nejsou zde žádné velké záhyby, za které by směs nedotekla. Dutiny jsou také úzké, tudíž se bude pomalu prosycovat

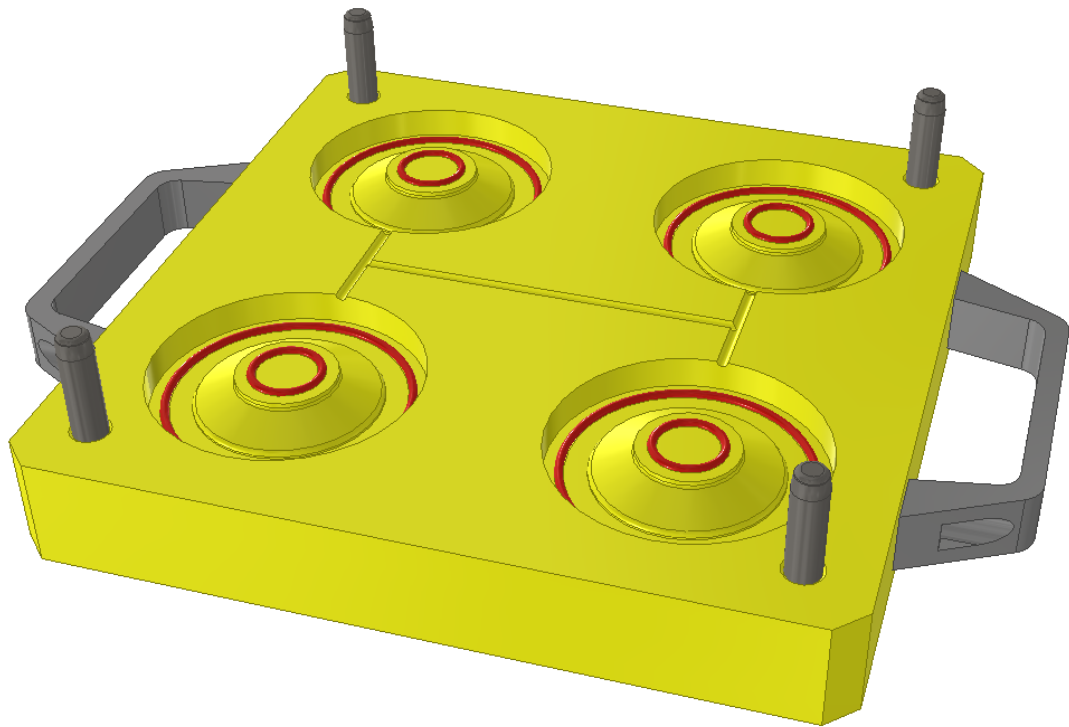
o horní hrany po spodní. Celý systém vtokových kanálků je umístěn v dělicí rovině formy, a to z důvodu snadného odformování celého vtokového systému.



Obr. 39 Pohled na rozvodné kanálky ve tvárnici

8.4 Tvárník

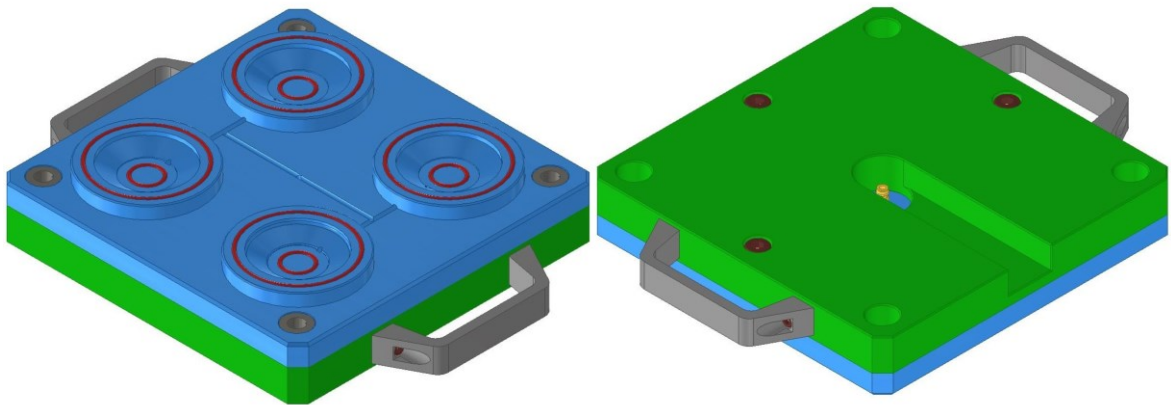
Tvárník tvoří základní desku RTM formy. Tvárník je osazen čtyřmi vodícími kolíky, které zajišťují vzájemné uložení tvarových bloků, aniž by se poškodily. Tvárník je vyroben z Hliníku 6061-AHC. Pro snadnou manipulaci s formou jsou na obou bocích tvárník přišroubovány hliníkové rukojeti. Do půlkruhových frézovaných kanálků tvárníku jsou vloženy těsnění. Tyto těsnění je vždy lepší umístit do tvárníku tak, aby nedošlo k jejich posunutí a následnému zničení při přitlačení formy. Na dělicí rovině tvárníku jsou vyfrézovány půlkruhové rozvodné kanálky sloužící k rozvodu směsi pryskyřice.



Obr. 40 Tvárník RTM formy

8.5 Tvárnice

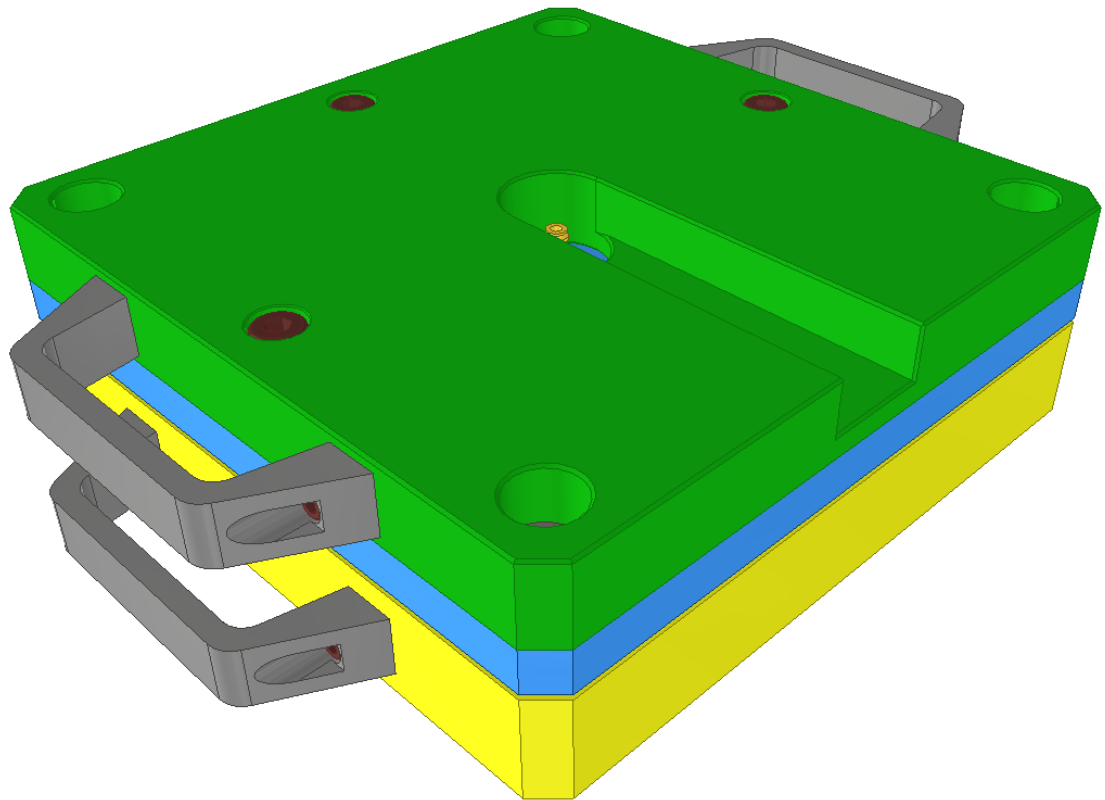
Tvárnice má funkci uzavírání formy. Forma je uzavřena a zajištěna stlačením horní desky lisovacího stroje. Ve tvárnici jsou otvory osazením pro vložení lineárních kuličkových pouzder. Do otvorů jsou tyto pouzdra přesně usazeny a zajišťují vedení vodičích čepů. Do tvárnice jsou vyfrézovány vtokové kanálky, které rovněž zajišťují tok směsi pryskyřice. V tvarových plochách je dále vyfrézována půlkruhová drážka pro vložení těsnění. Do tvárnice jsou vyvrtány kanálky, které ústí v horní hraně dutiny. Na horní ploše tvárnice je vyvrtán závit, do kterého je našroubován vtokový ventil, který ústí do kuželového kanálku. Na ventil je při výrobním procesu připevněna hadice s rychlospojkou. K bloku tvárnice je dále šrouby připevněna přídržná deska, ve které je vyvrtán otvor a vyfrézována drážka pro odsazení ventilu a prostoru pro hadici, jinak by mohlo dojít ke kolizi s horní lisovací deskou. Na obou bocích přídržné desky jsou přišroubovány rukojeti pro manipulaci a odformování po dokončení procesu.



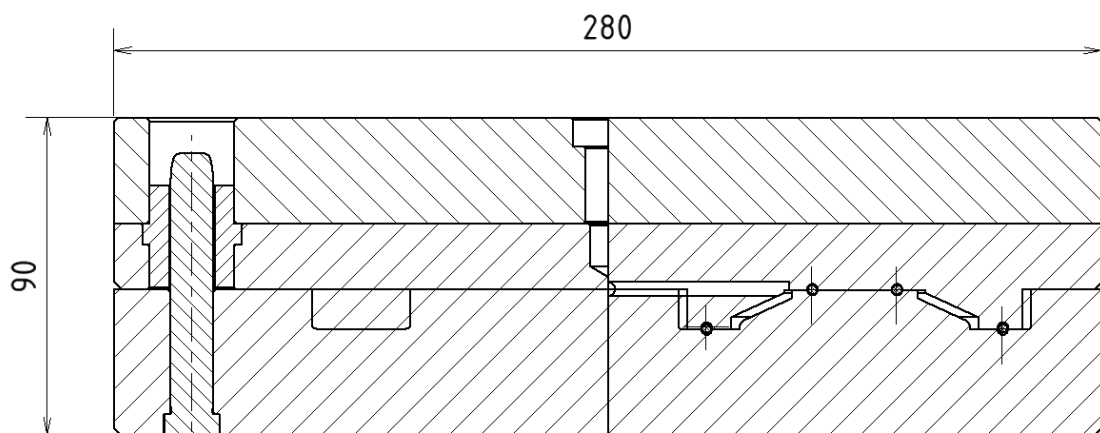
Obr. 41 Tvárnice RTM formy

8.6 Sestava RTM formy

Sestava formy se skládá ze dvou základních částí, a to tvárníku a tvárnice. Tyto dvě tvarové části vytváří dutinu formy, do které bude vsřikována směs pryskyřice s tvrdidlem. Forma je zajištěna proti pootočení díky válcovým kolíkům a bude upevněna na stole s T drážkami za pomoci šroubů, které se budou opírat o horní hranu tvárnice a tím také formu uzavřou.



Obr. 42 Sestava RTM formy



Obr. 43 Řez dutinou RTM formy

8.7 Technologický postup

8.7.1 Zvolený materiál

Jako materiál pro výrobu pružiny RTM technologií byla zvolena uhlíková tkanina KC Industry 200g/m², 3K, která bude před vstřikováním již usazena. Tato tkanina je předem

vytvářovaná a vložená do dutiny formy. Je nutné vytvořit takzvaný předlisek, který lze vytvořit v lisovací formě. Nastříhaný materiál je vložen do formy a pod nízkým tlakem vytvářován a dále kladen do dutiny formy. Na trhu je mnoho různých pryskyřičných systémů s odlišnými vlastnostmi. Je několik důležitých aspektů, které je nutné dodržet pro volbu správného systému. Systém musí mít nízkou viskozitu pro úplné zatečení do všech dutin RTM formy a prosycení veškeré výztužné tkaniny. Dále je nutné, aby měla pryskyřice vhodné vytvrzovací vlastnosti vzhledem ke zvolenému technologickému postupu. Dalším kritériem jsou vhodné mechanické a fyzikální vlastnosti pro získání požadovaného výrobku. Typické druhy pryskyřic jsou polyesterové, vinylesterové a epoxidové. Vybraná pryskyřice se smísí s reaktivním tvrdidlem v daném poměru, tato směs zajišťuje vytvrzení celku. Největší omezení tkví ve viskozitě pryskyřice. Rozsah viskozity komerčních směsí se pohybuje v rozmezí 0,05 Pa.s až 2 Pa.s. Běžně je používána směs, která obsahuje několik přísad, které ovlivňují nejen zpracovatelské vlastnosti, ale také vlastnosti výsledného kompozitu, jako je například objemové smrštění, modifikace viskozity pryskyřice nebo reakční rychlost systému. Pro vstřikování je zvolena nízkoviskózní epoxidová pryskyřice LH 230 spolu s tužidlem H 508 s teplotní odolností 80 °C v poměru 100:30, pryskyřice k tužidlu. Jako gelcoat formy bude použit typ EG 100-T vhodný pro tenké vrstvy. Gelcoat je možné aplikovat jak nátěrem, tak i nástřikem přímo do formy. Povrch výrobku po vyjmutí z formy není potřeba dále upravovat.

8.7.2 Tlak vstřikování

Po smíchání pryskyřice s tvrdidlem je možno použít mísící zařízení, u kterého lze nastavit přesný poměr vstřikovaných látek. U zvolené pryskyřice je doporučeno mísit v poměru 100:30. Směs je vstřikována do formy pod tlakem, který nepřesáhne 6 barů. Největšími důvody pro vstřikování za nízkého tlaku do 6 barů jsou, že struktura vlákna se během procesu plnění nemění a průběh toku je pravidelný a homogenní. V důsledku toho jsou vlákna zcela impregnována a vzduch může být snadněji odváděn z dutiny. Při nižším tlaku je také plnění pomalejší a vzduch se za tuto dobu dostane z dutiny jednodušeji.

8.7.3 Vstřikování

Forma je utěsněna dvěma druhy těsnění a uzavřena za pomoci tlaku lisovacího stroje. Do formy je pod nízkým tlakem vstřikována pryskyřice smíchána spolu s tvrdidlem v daném poměru. Pro RMT vstřikování je nutné, aby měla vstřikovaná směs nízkou viskozitu a bylo

tím zajištěno prosycení vláknové výztuže a vyplněna celá dutina formy. Forma musí být opatřena efektivně konstruovaným odvodušňovacím systémem z důvodu eliminace tvorby vzduchových bublin, které jsou pro výrobky nežádoucí.

8.7.4 Vytvrzovací proces

Pryskyřice začíná vytvrzovací proces podle druhu tvrdidla během procesu plnění. Při působení tepelné energie ve formě se aktivuje polymerizační mechanismus, který zajistí vytvrzení pryskyřice. V našem případě je teplota formy řešena vytápěním deskami lisovacího stroje.

8.7.5 Výrobek

Jakmile je proces dokončený, znamená to, že je dutina vyplněná pryskyřicí s výztuží a celek je dostatečně vytvrzený, je možné formu rozložit a výrobek z formy vyjmout. Kvalita celého procesu spočívá nejen na vyztužovací tkanině a pryskyřici, ale také na samostatném procesu plnění, parametrech plnění, které jsou stejně důležité jako použité materiály.

9 NÁVRH 3D MODELŮ PŘÍPRAVKU

Přípravek pro testování námi vyrobené pružiny je navržen jako univerzální, a to z důvodu několika hledisek testování. Model přípravku je navržen pro testovací stroj ZWICK HC 25. Přípravek má dvě základní součásti, které slouží k upnutí tlumiče do testovacího stroje. Další přídavné součásti slouží k upnutí samostatné pružiny a sady kompozitních pružin. Ke všem sestavám přípravků pro daný typ testu existuje výkresová dokumentace, která přiložena v příloze P II – Výkresová dokumentace sestav přípravku.

9.1 Stroj Zwick HC 25

Tento stroj je jeden z nejpoužívanějších laboratorních testovacích strojů, se kterými se můžeme setkat. Jeho velká výhoda je kompaktnost. Stroj může být využit jako stolní nebo samostatný na tuhém rámu, může mít integrovaný agregát nebo vedlejší základnu, na které jsou externí čidla. Tato konfigurace stroj velmi odlehčí. U modelů HC je ovládání umístěno nad testovanou oblastí s konstrukcí rámu se dvěma sloupy, která má základnu na platformě s T drážkami. Unikátní vlastností verze HC je jeho integrovaný hydraulický agregát pro samostatný provoz. Rychlost průtoku kapaliny je 11 litrů/min a díky dostatečné zvukové izolaci je stroj vhodný pro laboratorní provoz.

Funkce:

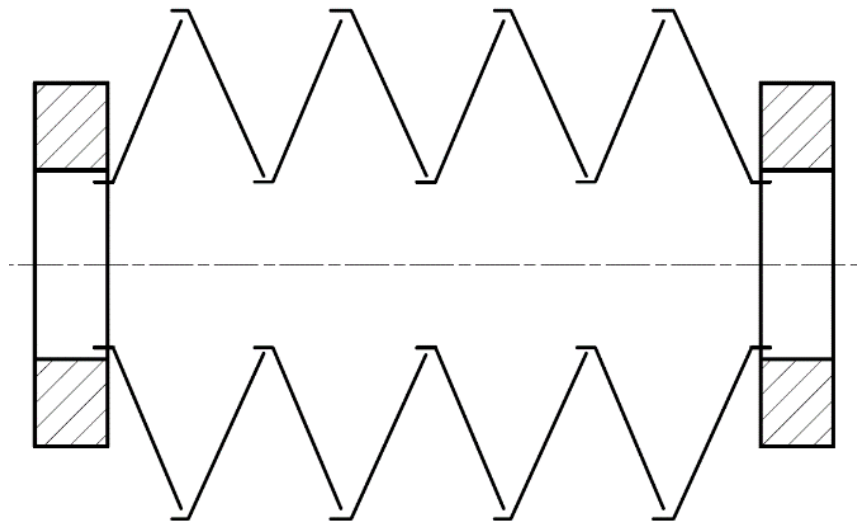
- Dvousloupový rám pro dynamické testy do 25 kN.
- Hydrostatická ložiska bez těsnění se schopností vyrovnat se s významnými příčnými silami převládajícími při tlakových a ohybových zkouškách.
- Minimální statické a dynamické kluzné tření na ložiscích.
- Sloupce jsou pokoveny chromem pro přesné vedení horní příčky a dlouhodobou odolnost vůči korozivním médiím a celkovému opotřebení.
- K dispozici je kompletní rozsah příslušenství: tepelná komora, tlakové desky, úchytky vzorků, ohybová testovací souprava, vyrovnávací přípravek atd.
- Volitelné hydraulické upínání a nastavení zdvihu pro snadné umístění horní příčky pomocí ovládacího panelu.
- Vysoká radiální a torzní tuhost celé konstrukce.



Obr. 44 Servohydraulický testovací stroj Zwick HC 25

9.2 Uložení pružin do tlumiče

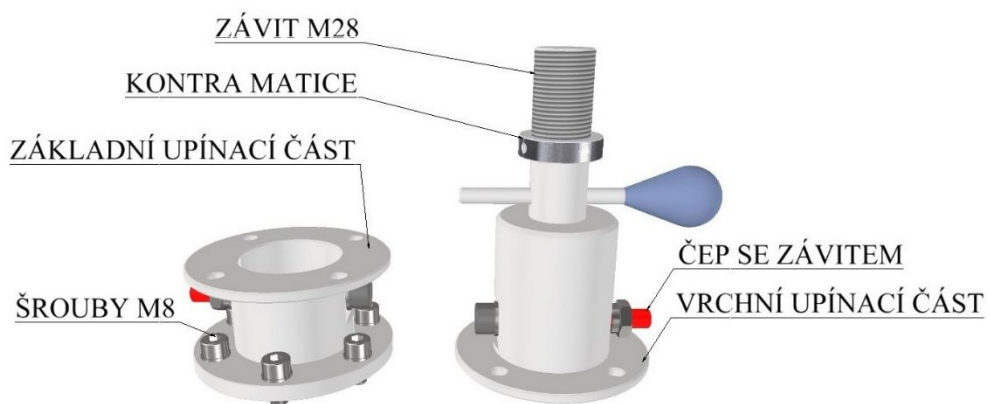
Složení pružin do finální konfigurace pružin bylo zvoleno sériově z důvodu použití na tlumiči motocyklu. Sériové uložení bylo zvoleno z důvodu charakteristiky, která dovolí pružinám prohnutí při poměrně nízkém zatížení oproti jiným konfiguracím. Počet pružin sestavených na tlumiči je 16 ks. Obrázek 45 znázorňuje vzájemné uložení diskových pružin. Pružiny do sebe zapadají díky lemům, vytvořených při výrobě a následnému broušení. Jednotlivé pružiny jsou na sebe uloženy v sérii vždy spodní a horní hranou se střídáním otočení o 180°.



Obr. 45 Schéma uložení pružin.

9.3 Základní přípravek

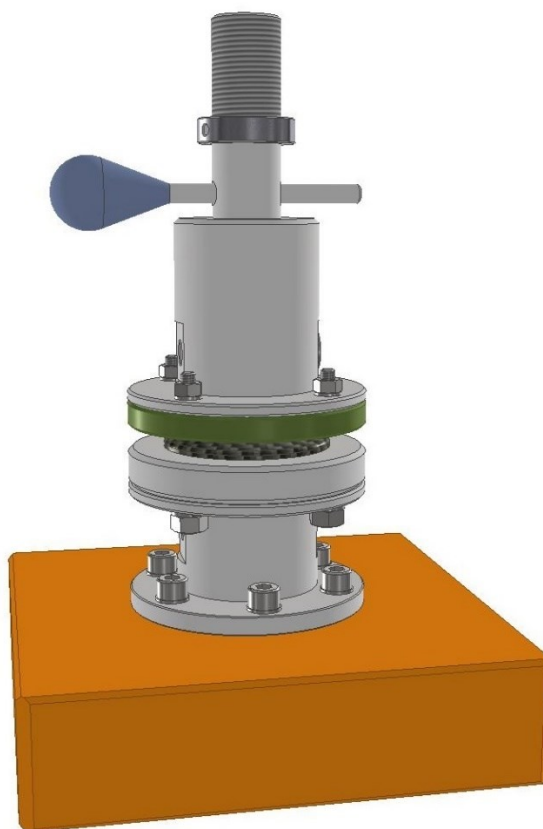
Jedním ze dvou základních přípravků bude spodní příruba, která bude upnuta za pomoci šroubů ke spodní platformě s „T“ drážkou. Druhá základní součást je horní příruba, která bude díky závitů M28 přišroubována na vrchní, pohyblivou část zkušebního stroje. Dále jsou k přípravku navrženy dva druhy přírub pro konkrétní typ pružiny se jmenovitými rozměry (popsány na obrázku 18). Všechny příruby jsou zajištěny pomocí šroubového spojení šroubů se zapuštěnou hlavou. Šrouby jsou zapuštěny tak, aby nedošlo ke kolizi s testovaným výrobkem a jsou spojeny s maticí s šestihrannou hlavou, která je podložena podložkou.



Obr. 46 Základní části přípravku, dolní upínací část (vpravo), horní upínací část (vpravo)

9.4 Přípravek pro statický test

Přípravek pro statický test má dvě části, které se přišroubují na základní části testovacího přípravku. K vrchní části je přišroubována příruba cylindrického tvaru se zvýšeným lemem o průměru 35 mm, který kopíruje průměr horní hrany testované pružiny a díky tomu se samostatná pružina vystředí a bude zajištěná proti vychýlení z osy stroje. Druhá část je hladká deska bez jakýchkoliv lemů, ve které bude mít testovaná součást oporu. Kruhová deska je připevněna ke spodní přírubě šrouby, které jsou našroubovány přímo do desky a na ně jsou našroubovány matky se šestihranou hlavou a podloženy podložkami. Součásti jsou vyrobeny z materiálu EN 1.0535 (ČSN 12 060).

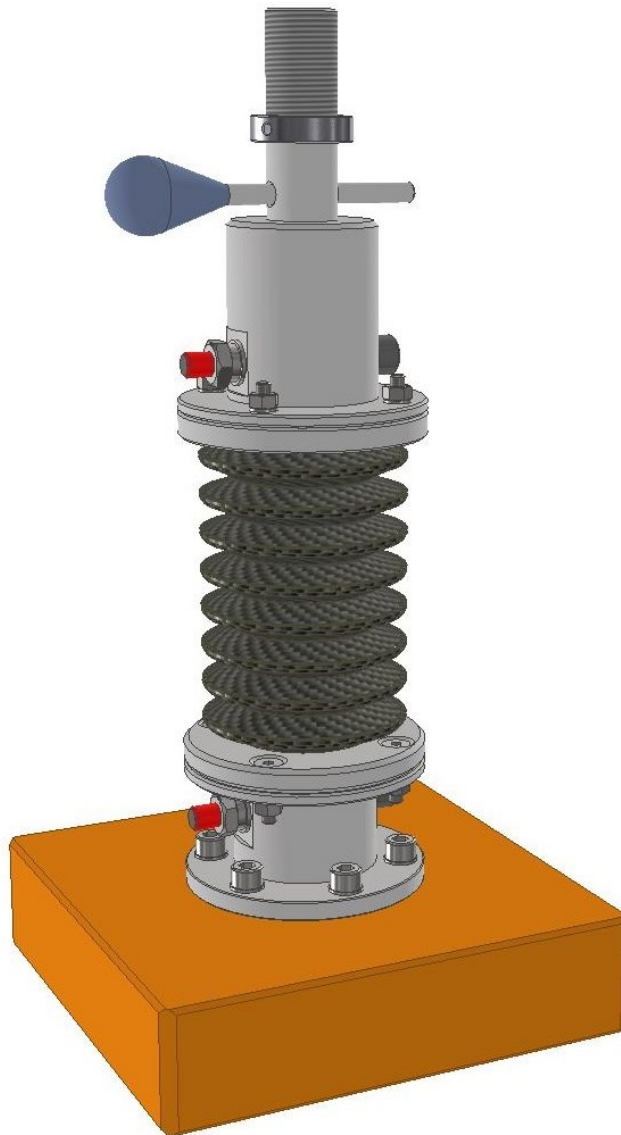


Obr. 47 Sestava přípravku pro statický test

9.5 Přípravek pro dynamický test sady pružin

Přípravek pro testování celé sady pružin je konstruován tak, aby se do sebe protilehlé kusy zasunovaly a bylo možné dostatečné stlačení sady. Zároveň tato konstrukce slouží také pro jednoduché vedení pružin při případném osovém vychýlení, což by se u tohoto typu nemělo projevit, avšak při experimentální výrobě a testování se může tento jev vyskytnout. Horní

přírubu tvoří kruhová deska s přesnou bezešvou trubkou z oceli EN 1.0254 (ČSN 42 6711). Příruba je přišroubovaná k horní základní části za pomoci zapuštěných šroubů jako v předchozím případě, aby nedošlo ke kolizi šroubového spojení se vzorky. Spodní příruba je tvořena kruhovou přírubou s tyčovým profilem z oceli EN 1.210 (ČSN 19 452) žihán na měkko, který se zasouvá při testování do trubkového profilu.



Obr. 48 Sestava přípravku pro dynamickou zkoušku sady pružin

9.6 Přípravek pro dynamický test tlumiče

Přípravek pro testování kompletního tlumiče spolu s ustavenými diskovými pružinami spočívá v ustavení horní a spodní upínací části do testovacího stroje. Dále se tlumič vloží do těchto přípravků a upevní díky šroubům s maticí. Na obou stranách přípravku je průchozí

díra, do které je vložen šroub skrz oko tlumiče na spodní straně a vidlicí v horním přípravku. K tomuto přípravku nejsou potřeba kromě šroubů s maticemi namontovat další příruby. Příruby jsou vyrobeny z oceli EN 1.0535 (ČSN 12 060).



Obr. 49 Přípravek pro testování tlumiče

10 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Tab. 10 Porovnání ekonomických aspektů výroby kompozitní diskové pružiny

Parametr / Technologie	Lisovací forma	RTM forma	
Doba výrobního cyklu	20	12	min
Gel time separátoru / gelcoatu	Okamžitě	9	min
Přípravné práce	25	25	min
Technologické pauzy	15	15	
Celková doba cyklu	60	61	min
Postcuring / chladnutí	270 / 10	0 / 10	min
Ceny materiálů			
Tkanina 1m ²	587 Kč	468 Kč	
Tvrdidlo 1kd		354 Kč	
Pryskyřice - 1 kg	0	283 Kč	
Separtárot/gelcoat -1 kg/ 1 l	1 634 Kč	199 Kč	
	2 221 Kč	1 304 Kč	
Pracnost výroby 50 cyklů	15,5	12,5	h
Předpokládaný počet vyrobených kusů	50	50	

Tab. 11 Porovnání technologií výroby kompozitní diskové pružiny

Parametr / Technologie	Lisování	RTM
Výrobní tlak	30 kN	Uzavírací - 10 kN
		Vstřikovací: max 6 bar
Teplota pro daný cyklus	130 °C	100 °C
Příprava materiálu	Dělení	Dělení + lisování preformu
Rozměr půdorysu formy	250 x 250 mm	200 x 200 mm
Výška	200 mm	150 mm
Tepelná izolace	Izolační desky	Bez izolace
Temperace formy	Topné patry s regulací za- stavěné do formy	Topné desky lisu s regulací
Hmotnost dle programu Autodesk Inventor 2020	15,5 kg	10,2 kg
Upevnění do lisu	Tvarové kapsy	Pouze přítlačnou silou
Vedení formy	Vodící desky	Tvarové kužely
Další využití	Lisování preformu pro RTM technologii	
Účelnost	Udržitelná - vyměnitelné tva- rové vložky	Jednúčelová - bez možnosti výměny tvarových vložek

Pro zhodnocení výsledků byly sledovány 2 aspekty, technologie výrobního procesu a ekonomičnost výrobního procesu. V tabulce 10 jsou srovnány, právě ekonomické aspekty výroby formy. Pro lepší porovnání byly obě formy konstruovány jako čtyřnásobné. Jako první se srovnávala doba výrobního cyklu. Oba cykly trvaly téměř stejnou dobu, trvají cca 60 minut, avšak u lisovaných výrobků, je doporučeno dodatečné vytvrzení, které zlepší výsledné materiálové vlastnosti. Tím se doba cyklu čtyř pružin prodlouží o 270 minut. Operaci dodatečného chladnutí je však možné provést po vyrobení celé série pružin. V jedné sérii je plánováno vyrobit 50 ks každou technologií. Podle kalkulace materiálu na jeden kg nebo l, v případě prepregu na m² bylo zjištěno, že je materiál pro výrobu výrobku RTM technologií o 917 Kč levnější na měrnou jednotku. Pracnost u obou technologií je rozdílná, a to z důvodu stráveného času u procesu dodatečného.

V tabulce 11. jsou sledovány technologické aspekty obou výrobních procesů. Tlak při výrobním procesu lisování a RTM technologií je rozdílný. Tlak při lisování je vyvozen automatickým lisem. Pro RTM technologií je vyvozen lidským úsilím. V případě dílenských lisů není náročnost velká, proto je tento bod zanedbatelný. Teplota obou procesů je 100 °C až 130 °C. Tyto teploty jsou orientační a je možné je během výrobního procesu měnit dle potřeby. V případě dělení materiálu uhlíkového vlákna nebo prepregu je v obou technologiích za potřeba tvary z dodaných plátů oddělit dle nástřihového plánu. Tuto operaci je vhodné provést v numericky řízených strojích. U technologie RTM je nutné taky vylisovat předlisek, který je následně vkládán do formy. Tento předlisek je možné vyrobit v navržené lisovací formě bez zapnuté temperace. Co se týče izolace formy, je u navržených konstrukcí zaizolována pouze forma lisovací. Obě navržené formy jsou vytápěny, v lisovací formě je vše řešeno patrony, forma pro RTM pouze otopnými deskami. Z pohledu hmotnosti je těžší forma pro lisování, a to z důvodu použití menších bloků materiálu, které se následně obrábí, u RTM technologie není nutná velká tuhost formy z důvodu menších tlaků lisu. Rozměrově se liší formy o 30 mm. Obě formy jsou osazeny vodícími prvky, které jsou normalizovány. Účelně je výkonnější forma lisovací, a to hlavně kvůli možnosti výměny tvarových vložek při případných úpravách. Lisovací formu je také možné využít pro lisování předlisku, což je v případě RTM technologie také potřeba.

ZÁVĚR

Charakteristika navrhované pružiny byla určena ve fázi výběru materiálů jejího konstrukčního návrhu a zvolenými výrobními postupy. Základní materiálové vlastnosti uvedené v tabulce 6 a specifické vlastnosti každého produktu budou vyhodnoceny celkovou kontrolou rozměrů a testování po jejich výrobě. Protože se charakteristika pružnosti pružiny mění s rozměrovou přesností, stává se rozměrová kontrola důležitým procesem jak během výroby forem, tak i při samotné výrobě diskové pružiny. Náhodná nebo celková kontrola tloušťky, šířky a vzdálenosti otvorů pružiny je možná přeměřovat během celého procesu.

Konstrukce lisovací formy byla vytvořena s ohledem na vlastnosti materiálu a účelem výroby pružin a účel výroby je experimentální. Všechny vyrobené pružiny budou dále testovány. Lisovací forma je tvořena dvěma hlavními částmi, horním a spodním blokem, do kterých jsou zasazeny tvarové vložky. Díky tomu je možné tvarové vložky dále měnit bez potřeby změny konstrukce formy nebo jejímu rozebrání. Vedení formy je zajištěno vodícími normalizovanými bloky, které jsou bezúdržbové. Její vytápění je zajištěno elektrickými topnými patronami taktéž normalizovanými. Pro kontinuitu celého výrobního procesu je forma obložena izolačními deskami a lisovací forma je čtyřnásobná. Vzhledem k jejím rozměrům je možné formu vložit do lisovacích zařízení dílenských, tak i laboratorních.

Forma pro výrobu technologií RTM je navržena pro výrobu jednoho kusu diskové pružiny. Její malé rozměry usnadňují manipulaci jak při přípravě, tak i výrobě diskové pružiny. Výhodou konstrukce obou forem je totožný rozměr výsledného výrobku. Při výrobním procesu RTM je možné využít lisovací formy pro vytvoření předlisku výztužných vláken, která je dále vložena do dutiny RTM formy a tím odpadá návrh a následná výroba dalšího nástroje, který by bylo nutné pro výrobu zajistit. Forma je navržena s ohledem na její odvodušnění. Pro kontrolu dostatečné propustnosti je doporučeno provést kontrolní výpočet podle Darcyho rovnice. Před výrobou formy by bylo vhodné provést tokovou analýzu za pomoci simulačního softwaru pro ověření vhodného umístění vtokových kanálů a správného odvodušnění formy.

Pro vyrobené součásti byly navrženy testovací přípravky pro tři druhy testování. Návrh přípravků byl vytvořen s ohledem na univerzálnost a je možné otestovat vyrobené součásti statickým testem a dynamickým testem. Sada přípravků obsahuje celkem šest kusů. Dva základní jsou upnuty do testovacího stroje. Do této konfigurace je možné umístit tlumič pružení s namontovanou konfigurací pružin a podrobit je tímto dynamickému testu. Po

přišroubování dvou přírub na tyto základní typy je možné podrobit sadu pružin dynamické zkoušce, avšak bez přítomnosti tlumiče. Do přípravku se vloží pouze zvolená konfigurace sady pružin. Tyto příruby jsou pomyslné vedení sady pružin, aby nedošlo k případnému vychýlení z osy. Protikusy se do sebe při stlačení pružin zasunují. Poslední dva komponenty slouží k podrobení diskové pružiny statickou zkouškou. Příruby pro tuto zkoušku je přišroubovává k základním přírubám stejně jako příruby pro dynamickou zkoušku. Horní část příruby tvoří desku s lemem, který vymezuje diskovou pružinu proti vychýlení z osy. Spodní část tvoří opěrnou desku, která slouží jako styková plocha se spodní hranou disku.

Diplomová práce obsahuje návrh diskové pružiny, formy pro lisování prepregu kompozitního materiálu, návrh RTM formy pro výrobu kompozitní pružiny a přípravků pro testování vyrobených pružin.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 9788086960296.
- [2] DILLINGER, Josef. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Praha: Europa-Sobotáles, 2007, 608 s. ISBN 9788086706191.
- [3] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. Brno: VUTIUM, 2010, xxv, 1159 s. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 9788021426290.
- [4] Surface Treatments For Disc Springs. Belleville springs [online]. Arthur Street, Lakeside, Redditch, 2020 [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: <https://www.bellevillesprings.com/surface-treatments-for-disc-springs/>
- [5] Povrchová úprava kovů DELTA-TONE. Evropská databanka [online]. Kolín, 17.03.2016 [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: <https://www.edb.cz/clanek-6331-povrchova-uprava-kovu-delta-tone-jedine-u-svum-cz>
- [6] Belleville washers. *Associated Spring, a business of Barnes Group Inc* [online]. 2014 [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: <https://www.asbg.com/products/spring-washers/belleville-washers.aspx>
- [7] Jjvcela. Kroužková pružina.jpg [online]. In: 12.1.2013 [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <https://images.app.goo.gl/a2akpThSDKNPi6Zs5>
- [8] Mechanical Design Engineering Handbook. 2014. ISBN 9780080977591. Dostupné také z: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsebk&an=486054&scope=site>
- [9] L. NORTON, Robert. *Machine Design*. Prentice Hall, 1996. ISBN 9780135650110.
- [10] CAMPBELL, F. C. *Manufacturing processes for advanced composites*. New York: Elsevier, 2004, 1 online zdroj (xii, 517 p.). ISBN 9781856174152. Dostupné také z: http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMPAC0002/manufacturing_processes_for_advance_d_composites
- [11] VRBKA, Jan. *MECHANIKA KOMPOZITŮ*. Brno: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2008.

- [12] MALLICK, P. K. Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design. 3rd ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2007, 640 p. ISBN 9781420005981. Dostupné také z: <http://marc.crcnetbase.com/isbn/9781420005981>
- [13] YAMADA, Yoshiro, Toshio KUWABARA a Yoshiro KUWABARA. Materials for Springs. Heidelberg: Springer Berlin, 2011. ISBN 3642093035, 9783642093036.
- [14] DHARAN, C.K.H. a Jesse A. BAUMAN. Composite disc springs. Composites: Part A, Applied Science [online]. 2007, 38(12), 2511-2516 [cit. 2020-02-10]. DOI: 10.1016/j.compositesa.2007.08.008. ISSN 1359835X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X07001406>
- [15] SHAMS, Seyedmohammad, Peng YANG a Rani ELHAJJAR. Damage Initiation and Fatigue Behavior of Carbon-Fiber Composite Disk Springs. SAE International Journal of Materials [online]. 2016, 9(1), 181-186 [cit. 2020-02-17]. DOI: 10.4271/2015-01-9084. ISSN 19463979.
- [16] KHATKAR, Vikas, B. K. BEHERA a R. N. MANJUNATH. Textile structural composites for automotive leaf spring application. COMPOSITES PART B-ENGINEERING [online]. 2020, 182 [cit. 2020-03-04]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107662. ISSN 13598368.
- [17] CURTI, G. a R. MONTANINI. On the Influence of Friction in the Calculation of Conical Disk Springs. Journal of Mechanical Design [online]. 1999, 121(4), 622-627 [cit. 2020-03-08]. DOI: 10.1115/1.2829508.
- [18] YANG, Peng, Rani ELHAJJAR a Stacy VAN DYKE. An investigation into the mechanics of fiber reinforced composite disk springs. Steel and Composite Structures [online]. 2015, 18(3), 775-791 [cit. 2020-03-08]. DOI: 10.12989/scs.2015.18.3.775. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/277648763_An_investigation_into_the_mechanics_of_fiber_reinforced_composite_disk_springs
- [19] SEMITEKOLOS, Dionisis, Panagiotis KAINOURGIOS, Craig JONES, Amit RANA, Elias P. KOUMOULOS a Costas A. CHARITIDIS. Advanced carbon fibre composites via poly methacrylic acid surface treatment; surface analysis and mechanical properties investigation. Composites: Part B, Engineering [online]. 2018, 155, 237-243 [cit. 2020-03-18]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.08.027. ISSN 13598368.

[20] GAO, Bo, Ruliang ZHANG, Maoshuai HE, et al. Effect of a multiscale reinforcement by carbon fiber surface treatment with graphene oxide/carbon nanotubes on the mechanical properties of reinforced carbon/carbon composites. COMPOSITES PART A-APPLIED SCIENCE AND MANUFACTURING [online]. 2016, 90, 433-440 [cit. 2020-03-20]. DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.08.012. ISSN 1359835X.

[21] ICS 21.160. ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA: Talířové pružiny – Výpočet. 2. vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.

[22] MAHDAVI, S., S.K. GUPTA a M. HOJJATI. Thermal cycling of composite laminates made of out-of-autoclave materials. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics [online]. 2018, 25(6), 1145–1156 [cit. 2020-04-17]. DOI: 10.1515/sectm-2017-0132. ISSN 21910359. Dostupné z: <https://www.degruyter.com/view/journals/sectm/25/6/article-p1145.xml?rskey=LYkQ0t&result=1>

[23] Firma ANAMET s.r.o.: Laboratorní deskové lisy LabPro. ANAMET s.r.o. [online]. [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <https://www.anamet.cz/laboratorni-deskove-lisy-labpro>

[24] HASCO Hasenclever GmbH + Co KG: Katalog normálií [online]. Lüdenscheid, Deutschland, 2020 [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <https://www.hasco.com/cs/>

[25] Red-rider – svět aditiv a olejů: VYSOKOTLAKÁ STŘÍKACÍ PISTOLE HP 300ML MAX. 5BAR GEKO. Red Rider s.r.o. [online]. 2020 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://www.red-rider.cz/4569-vysokotlaka-strikaci-pistole-hp-300ml-max-5bar-geko.html>

[26] Tooling prepregs. (C)Easy Composites [online]. 2019 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://www.easycomposites.co.uk/#!/prepreg/tooling-prepregs/xpreg-xt135-carbon-fibre-tooling-prepreg-backing.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

EU	Evropská unie	
3D	trojrozměrný	
2D	dvojrzměrný	
1D	jednorozměrný	
tex	jednotka jemnosti příze	
DMA	dynamická mechanická analýza	
K_0	specifická míra opotřebení	
ΔV	objem opotřebení	
HB	tvrdost podle brinela	
w_M	koeficient tření na hraně	
w_R	koeficient tření kuželové plochy	
PMMA	polymethylmethakrylát	
cnt	carbonové nano trubice	
GO	oxid grafenu	
UD	jednosměrné	
GSM	konstantní plošná hustota	
PAN	polyakrylnitril	
RTM	resin transfer moulding	
HRC	tvrdost podle rockwella	
HC	hydraulický	
DLC	diamond liquid coat	
D_e	vnější průměr pružiny	mm
D_i	vnitřní průměr pružiny	mm
L_0	celková volná výška pružiny	mm
E	modul pružnosti v tahu	Mpa
μ	poissonovo číslo	-
h_0	provozní výška talíře	mm
t	tloušťka diskové pružiny	mm
$s=0,75 \cdot h_0$	zkušební stlačení	mm
μ_M	součinitel povrchového tření	-
μ_R	součinitel tření na okrajích	-
i	počet sériově uspořádaných sad disků	-
n	počet paralelně uložených disků v sadě	-

F	síla plně stlačené pružiny	N
F_{Tc-}	síla celé sady pružiny při odlehčování	N
F_{Tc+}	síla celé sady pružiny při zatěžování	N
$K1$	tvarový součinitel	-
$K2$	tvarový součinitel	-
$K3$	tvarový součinitel	-
L_s	délka plně stlačené pružiny	mm
L_0	volná délka sady pružin	mm
i	počet sériově uspořádaných sad disků	-
n	počet paralelně uložených disků v sadě	-
s_T	celková deformace sady	mm
δ	poměr průměrů pružiny	-
σ_{OM}	napětí materiálu v daném místě pružiny	MPa
σ_1	napětí materiálu v daném místě pružiny	MPa
σ_2	napětí materiálu v daném místě pružiny	MPa
σ_3	napětí materiálu v daném místě pružiny	MPa
σ_4	napětí materiálu v daném místě pružiny	MPa
D	posuvná vzdálenost	mm
F_{gesR}	zatížení pružiny, pro pružiny skládané paralelně	N
T_g	teplota skelného přechodu	°C
ρ	hustota	kg/m ³
E_t	modul pružnosti v tahu	GPa
σ_{Pt}	pevnost v tahu	GPa
$\varepsilon_{m,krit}$	tažnost	%
F_{Tc+}	síla pružiny při zatížení	N
F_{Tc+}	síla pružiny při odlehčení	N
P_{ges}	celkový výkon konfigurace patron	W
I_{ges}	celková spotřeba energie konfigurace patron	A
P	výkon jedné topné patrony	W
I	spotřeba energie jedné patrony	A
m	hmotnost bloku	kg
c	měrná tepelná kapacita	J/kg.K
Δt	změna teploty	-
λ	koeficient vodivosti	W/m.K
	viskozita	Pa.s

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Disková pružina „Belleville“ [8]	11
Obr. 2 Šroubovitá talířová pružina [2].....	13
Obr. 3 Kroužková pružina [7].....	14
Obr. 4 Hlavní rozměry pružiny [8]	15
Obr. 5. Schéma 2D a 3D tkaniny [16]	17
Obr. 6 Křivky zatížení-výchylky a Pevnosti v tahu při stlačení pružiny	19
Obr. 7 Porovnání opotřebení třením kompozitních struktur [16]	21
Obr. 8. Snímky získané AFM mikroskopem - nedotčení textilie (a), elektrochemicky ošetřená b) elektropolymerizovaná c). [19].....	24
Obr. 9. Interlaminární (vlevo) a mezilaminární (vpravo) fázové napětí. [20].....	25
Obr. 10 Mikroskopické pozorování tvorby trhlin jednosměrné tkaniny kompozitu (vlevo) a křížové tkaniny (vpravo). [22]	27
Obr. 11 Možnosti vyztužení [10].....	31
Obr. 12 Tahové vlastnosti vlákna, matrice a kompozitu [10].....	32
Obr. 13 Kvazi-izotropní uspořádání laminátů	32
Obr. 14 Možnosti uložení diskových pružin, a) paralelní b) sériové c) kombinované	39
Obr. 15 Vlastnosti jednotlivých druhů uložení diskových pružin	40
Obr. 16 Pracovní charakteristiky talířové pružiny v závislosti na poměru H/t. [3]....	42
Obr. 17 Změny křivek zatížení/průhybu v závislosti na skládání diskových pružin [21]	43
Obr. 18 Zakótovaný 3D model kompozitní pružiny v řezu.....	47
Obr. 19 Zobrazení průřezu diskové pružiny s důležitými body zatížení	48
Obr. 20 Lay-up diagram kompozitní diskové pružiny.....	53
Obr. 21 3D Model diskové pružiny	55
Obr. 22 Dorazová podložka se šroubem	56

Obr. 23 Sestava vodících prvků Hasco. [24]	57
Obr. 24 Konfigurace topných patron ve spodní tvarové vložce	58
Obr. 25 Sestava izolačních desek formy.....	60
Obr. 26 Transportní prvky – oko(vlevo), úchytka(vpravo)	60
Obr. 27 Orientační značky na bloku formy	61
Obr. 28 Horní blok lisovací formy.....	62
Obr. 29 Spodní blok lisovací formy.....	63
Obr. 30 Sestava lisovací formy.....	64
Obr. 31 Řez dutinami lisovací formy.....	64
Obr. 32 Nástřihový plán prepregu	65
Obr. 33 Pomocný plechový plát s vyraženými značkami.....	66
Obr. 34 Ruční řezání prepregu [26]	68
Obr. 35 Nastavení teploty regulačního zařízení.....	68
Obr. 36 Vysokotlaká pistol pro nástřik separátoru [25].....	69
Obr. 37 Digitálně regulovaná pec pro postcuring [26]	70
Obr. 38 Těsnění RTM formy mezi tvárníkem a tvárnici	72
Obr. 39 Pohled na rozvodné kanálky ve tvárnici.....	73
Obr. 40 Tvárník RTM formy	74
Obr. 41 Tvárnice RTM formy.....	75
Obr. 42 Sestava RTM formy.....	76
Obr. 43 Řez dutinou RTM formy	76
Obr. 44 Servohydraulický testovací stroj Zwick HC 25.....	80
Obr. 45 Schéma uložení pružin.....	81
Obr. 46 Základní části přípravku, dolní upínací část (vpravo), horní upínací část (vpravo)	81
Obr. 47 Sestava přípravku pro statický test	82

Obr. 48 Sestava přípravku pro dynamickou zkoušku sady pružin	83
Obr. 49 Přípravek pro testování tlumiče	84

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Měřené parametry několika vyztužených materiálů.....	18
Tab. 2 Hodnoty tření mezi povrchy plochy (w_M) a tření hrany (w_R). [21].....	23
Tab. 3 Materiálové vlastnosti vláknových kompozitních systémů a kovů [13]	28
Tab. 4 Mechanické vlastnosti vybraných termosetů.....	37
Tab. 5 Známé hodnoty ocelové a kompozitní pružiny	46
Tab. 6 Základní vlastnosti prepregu TENAX HTA-3k [P I]	47
Tab. 7. Vypočtené experimentální hodnoty kompozitní diskové pružiny	51
Tab. 8 Parametry použitých izolačních desek	59
Tab. 9 Doporučené hodnoty výrobních cyklů	67
Tab. 10 Porovnání ekonomických aspektů výroby kompozitní diskové pružiny.....	85
Tab. 11 Porovnání technologií výroby kompozitní diskové pružiny.....	85

SEZNAM PŘÍLOH

P I – Materiálový list prepregu Delta-preg

P II - Výkresová dokumentace sestav přípravků

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST PREPREGU DELTA-PREG

Epoxy matrix systems

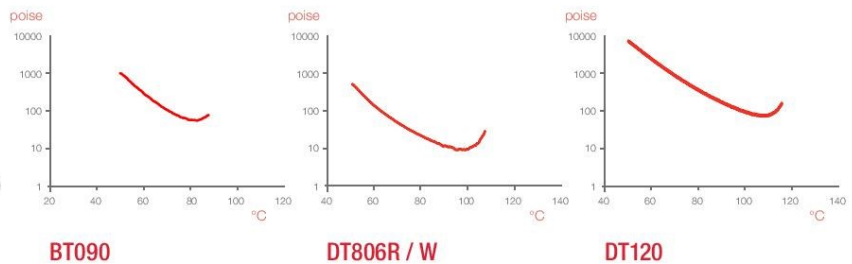
Sistemi resinosi epossidici

	LOW TEMPERATURE - BASSA TEMPERATURA		FAST CURING - CICLO RAPIDO	
	BT090	TR23	DT806R / DT806W	DT121R
Features and Applications Settori di applicazione e caratteristiche	Low temperature curing system Components from low cost/low temperature moulds. Sistema a bassa temperatura di cura Componenti da stampi per basse temperature.	Tooling Systems Also available higher Tg variants (TR33S and TR43) and longer outlife product (TR25). Sistemi per stampi Disponibili varianti a Tg maggiore (TR33S e TR43) e versione con maggiore vita di banco (TR25).	Low viscosity system for Out of autoclave processing and fast press moulding. DT806W is the tackier version. Sistema a bassa viscosità per processi fuori autoclave e cura rapida in pressa. DT806W la versione con pi tack.	Fast Curing Resin for Visual Cosmetic Applications For autoclave and press moulding. Aesthetic carbon fabrics 200 to 400 g/m ² . Sistema a cura rapida per applicazioni cosmetiche Per autoclave e pressa. Tessuti estetici di carbonio da 200 a 400 g/m ² .
Viscosity ⁽¹⁾ Viscosità ⁽¹⁾	Low Bassa	Low Bassa	Low Bassa	Medium-high Medio-alta
Cure Temperature Temperatura di cura (°C)	45 ÷ 110	Preliminary cure: 45 ÷ 60 25 h @ 45°C 10 h @ 60°C Post-cure: up to 200°C	65 ÷ 140 16 h @ 65°C 5 h @ 80°C 1 h @ 120°C	75 ÷ 135 (Autoclave) 120 ÷ 150 (Press moulding/pressa)
Gel time ⁽⁴⁾ (min @ °C) ⁽⁴⁾	4÷8 @ 90°C	Not Applicable for Tooling Systems. Non applicabile per i sistemi da stampi.	50÷60 @ 80°C 15÷19 @ 100°C 4÷6 @ 120°C 2÷3 @ 130°C	55÷65 @ 80°C 14÷18 @ 100°C 5÷7 @ 120°C
Tg ⁽³⁾ / Cure Cycle Tg ⁽³⁾ / Ciclo di cura	90÷95°C ⁽²⁾ / 180 min @ 70°C 100÷110°C ⁽²⁾ / 40 min @ 90°C 120÷130°C ⁽²⁾ / 20 min @ 120°C	205°C ⁽³⁾ with 4 h @ 200°C post-cure (250°C ⁽³⁾ maximum Tg for TR43)	90°C÷100°C ⁽³⁾ / 5 h @ 80°C 120°C÷130°C ⁽³⁾ / 1 h @ 120°C	90°C ⁽³⁾ / 12 h @ 80°C 120°C ⁽³⁾ / 90 min @ 120°C
Shelf Life Vita di banco	1÷2 days (gg) @ 20°C 60 days (gg) @ -18°C	2÷3 days (gg) @ 20°C 180 days (gg) @ -18°C Increased shelf life variant TR25 available (4 to 5 days) Disponibile versione con vita di banco aumentata: TR25 (4÷5 giorni)	21 days (gg) @ 20°C 365 days (gg) @ -18°C	21 days (gg) @ 20°C 365 days (gg) @ -18°C

Viscosity profile

Curve di viscosità

(Constant heating rate 2°C/min
Riscaldamento costante 2°C/min)



Thermal Performance of DT806R Laminates

All resins in the DT806 group have very similar thermal performance and have the same recommended cure cycles. The following table indicates the typical glass transition temperature (T_g) developed by DT806R laminates.

Cure Cycle	T _g (°C)
16 Hrs @ 65°C	70 to 80
5 Hrs @ 80°C	90 to 100
1.5 Hrs @ 100°C	110 to 120
1 Hr @ 120°C	120 to 130

Note: The Tangent Modulus Intercept T_g values have been measured by DMA, according ASTM D7028.

Mechanical Properties of Carbon Fabric Reinforced Laminates

Table 1 and Table 2 below shows some indicative averaged mechanical characteristics of DT806R carbon fibre laminates. These are with a 200 gsm (g/m²) high strength carbon twill fabric and a 150 gsm (g/m²) high strength carbon fibre unidirectional prepreg.

Table 1
GG200T(Tenax HTA-3k)-DT806R-42 Fabric Laminate

Mechanical Tests	Test Method	RT
Tensile Strength (0°) (MPa)	ASTM D 3039	817
Tensile Modulus (0°) (GPa)	ASTM D 3039	56.6
Tensile Strength (90°) (MPa)	ASTM D 3039	835
Tensile Modulus (90°) (GPa)	ASTM D 3039	55.9
Compression Strength (0°) (MPa)	ASTM D 6641	710
Compression Modulus (0°) (GPa)	ASTM D 6641	54.2
Compression Strength (90°) (MPa)	ASTM D 6641	701
Compression Modulus (90°) (GPa)	ASTM D 6641	53.6
In-Plane Shear Strength (MPa)	EN 6031	128.2
In-Plane Shear Modulus (GPa)	EN 6031	3.50
ILSS (MPa)	EN 2563	79.2