



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Teze disertační práce

Vývoj a konstrukční řešení kompozitních pružin

Development and Construction Solution of Composite Springs

Autor: **Ing. Lukáš Maňas, Ph.D.**

Studijní program: P3909 Procesní inženýrství

Studijní obor: 3909V013 Nástroje a procesy

Školitel: doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.

Oponenti: doc. Ing. Dagmar Měřínská, Ph.D.
prof. Dr. Ing. Libor Beneš, IWE
prof. Ing. Zdeněk Jonšta, CSc.

Zlín, Září 2020

© Ing. Lukáš Mañas, Ph.D.

Vydala **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně** v edici **Doctoral Thesis Summary**.
Publikace byla vydána v roce 2020

Klíčová slova: kompozitní pružina, pružná struktura, skelné vlákno, prepreg, vytvrzovací proces, parabolická pružina, listová pružina, disková pružina, vinutá pružina

Key words: composite spring, flexible structure, glass fiber, prepreg, curing process, parabolic spring, leaf spring, disc spring, coil spring

Plná verze disertační práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

ISBN 978-80-7454-945-8

Poděkování:

Rád bych poděkoval všem, kteří mi v průběhu řešení disertační práce poskytli pomoc. Chtěl bych poděkovat docentce Rusnákové, která byla mojí školitelkou v průběhu doktorského studia. Dále bych rád poděkoval všem kolegům a kamarádům z Ústavu výrobního inženýrství a Centra polymerních systémů. Jedním z nich je právě Ladislav Fojtl, kterému děkuju za veškerou pomoc v profesním, ale také osobním životě. Velké díky patří také mojí celé rodině, především pak rodičům za podporu a všechno co pro mě dělají a také Kateřině, bez které by to nešlo.

Poděkování a uznání si zaslouží také společnosti, s jejichž pomocí byly provedeny některé z experimentů a jejichž přístrojové vybavení bylo pro řešení disertační práce k dispozici. Jedná se především o společnost FORM s.r.o. zastoupenou panem Vladimírem Rusnákem. Společnost umožnila přípravu prototypových struktur a zkušebních vzorků a těles. Dále společnost HŽP a.s., člena Třineckých železáren – Moravia Steel, s jejíž pomocí byly definovány požadavky kladené na kompozitní pružiny a která rovněž poskytla přístrojové vybavení umožňující testování prototypových součástí. Společnost byla zastoupena panem Radkem Páleníkem a panem Pavlem Nekoksou. Dalším spolupracujícím partnerem byla společnost R&D Mold Machining s.r.o., která umožnila výrobu zkušebních vzorků v autoklávu.

Tato disertační práce byla spolufinancována z projektu Interní grantové agentury Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně IGA/FT/2019/001.

ABSTRAKT

Kompozitní materiály jsou známé již desítky let, během kterých se zasloužili o řadu praktických využití v celém spektru celosvětově produkované výroby. Takového úspěchu bylo možné dosáhnout především díky schopnosti posunout se nad limity konvenčně využívaných materiálů. Pro kompozitní materiály však může být omezující tloušťka vytvářené struktury bez jádrového materiálu, proto ani výrobci jednotlivých materiálů neuvádí, jakým způsobem a za jakých doporučených procesních podmínek silnostěnné kompozitní struktury vyrábět. Vzhledem ke skokovému posunu jednotlivých částí průmyslového sektoru, vedoucího ke hledání nových technologických a procesních postupů a také motivaci zavedených firem vyrábět nové produkty, jsou dodavatelé ochotni učit se novým, pro ně dosud neznámým materiálovým kombinacím a technologiím. Tato skutečnost pak jednotlivým firemním ale i výzkumným organizacím umožňuje naplno využívat potenciál kompozitních materiálů zejména pro udržitelnost konkurenceschopnosti a vývoji nových aplikací.

Disertační práce se věnuje vývoji a konstrukčnímu řešení kompozitních pružin. Především pak pružin označovaných jako pružiny listové a parabolické. Při návrhu jednotlivých struktur jsou také uvažovány technologie, materiály a polotovary, které jsou dostupné a využitelné při sériové výrobě řešených pružných prvků. Samotnému návrhu struktur předchází ověření vyrobiteľnosti součástí pomocí známých a laboratorně dostupných technologií. Práce pojednává o jednotlivých typech materiálů, jejich zpracování a využitelnosti při výrobě kompozitních struktur. Samostatně řeší také výrobu jednotlivých typů zkušebních vzorků a pružin. Okrajově se zabývá výrobou diskových a vinutých pružin. Dále je práce zaměřena na hodnocení mechanických testů vyrobených struktur a v poslední části jsou také stanoveny závěry a doporučení pro sériovou výrobu kompozitních pružných prvků.

ABSTRACT

Composite materials have been known for decades during which they have contributed to a number of practical applications in global scale of production. This success was achieved mainly through the ability to move beyond the limits of conventional materials. Nevertheless, the thickness of the manufactured structure may be limiting for composite materials. For this reason, manufacturers of individual materials do not state how and under which recommended process conditions to produce thick-walled composite structures. Due to the rapid growth of individual industry sectors, new technological and process procedures are being sought. The motivation of established companies to produce new products also plays a major role. From a supplier perspective, it is important to learn new material combinations and manufacturing technologies. This fact enables individual corporate and research organizations to fully exploit the potential of composite materials, in particular for the sustainability of competitiveness and the development of new applications.

This dissertation thesis is focused on the research of the development and construction solution of the composite springs. Above all, springs referred to as leaf and parabolic. In the production of individual structures, technologies, materials and semi-finished products, which are available and usable in the serial production of solved flexible structures, are also considered. In the first place, the manufacturability of components is investigated using known and laboratory-available technologies. The work deals with individual types of materials, their processing and usability in the production of the composite structures. Furthermore, it deals with the production of individual types of test specimens and springs. The thesis also marginally deals with the production of disc and coil springs. Moreover, the work is focused on the evaluation of mechanical testing results of manufactured structures and in the last part also the determination of conclusions and recommendations for the serial production of composite flexible elements.

OBSAH

ÚVOD.....	7
1. SOUČASNÝ STAV	9
1.1 Pružné prvky.....	9
1.2 Kompozitní pružné prvky.....	10
1.3 Namáhání kompozitních pružných prvků	14
2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	17
3. ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE	19
3.1 Materiál pružných kompozitních struktur	19
3.2 Návrh a výroba kompozitních struktur.....	20
3.3 Statické testování.....	22
3.4 FEM model - provedení výpočtů.....	25
3.5 Ověření výroby silnostěnných pružných prvků	26
3.6 Ověření vyrobitelnosti pružných prvků.....	28
3.7 Návrh a konstrukční řešení prototypové formy.....	31
3.8 Výroba prototypových struktur – typ D	31
3.9 Testování - únavová zkouška	33
3.10 Optimalizace procesu výroby	34
4. PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI.....	39
5. ZÁVĚR.....	40
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	45
SEZNAM OBRÁZKŮ	49
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	50
PUBLIKAČNÍ AKTIVITY STUDENTA.....	51
ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA.....	53

ÚVOD

Snaha o udržení konkurenceschopnosti a vytváření nových možností pro inovace v automobilovém odvětví má tendenci modifikovat stávající produkty a zavedené postupy. Další možností je nahrazování starých a zastaralých produktů produkty novými či inovovanými. Tento trend je patrný v celém spektru průmyslového odvětví a výjimkou není ani oblast zabývající se produkcí pružných prvků. Využití kompozitních materiálů strhává pozornost výrobců pružných prvků především díky své specifické pevnosti a odolnosti vůči korozi. Nejčtenější využití kompozitních pružných prvků je v oblasti letecké, automobilové a námořní. Obecně se tedy jedná o dopravní průmysl, kde převážnou většinu aplikací nalézáme v podvozkových sestavách jízdních souprav sloužících zejména k přepravě surovin a dalších produktů. Rychle se měnící tvář ekonomiky a přiblížení se 4. průmyslové revoluci mění také způsob života a vytvářené hodnoty tak přináší celospolečenskou změnu vyžadující úpravy neinovovaných částí průmyslu či například změnu pohledu na zavedené, konvenčně využívané výrobní postupy a materiálové základny.

Kompozitní pružné prvky, pružiny, parabolické pružné prvky, nebo například listové a vinuté kompozitní pružiny jsou v posledních dekádách pojmy, které výrobci pružných prvků a výzkumné instituce užívají zejména v souvislosti s výsledky základního a následně také aplikovaného výzkumu. Aktivita související s výběrem vhodných materiálů, technologií a procesů zpracování jsou uvedeny v řadě publikací zabývajících se obecnou rešerší problematiky kompozitních pružných prvků z vybraných odborných publikací. Minimálně 50 % procent hmotnosti pružného prvku lze ušetřit nahrazením ocelové pružiny pružinou kompozitní. Tato skutečnost hraje významnou roli zejména v leteckém průmyslu, kde je považována bezesporu za výhodu. Naproti tomu výrobci automobilů a kolejových vozidel jsou nuceni zkracovat životnost produktů, což vede ke snížení výrobních nákladů. Pro nahrazení konvenčních materiálů by tedy bylo velmi přínosné hlubší studium problematiky kompozitních prvků tak, aby byla zaručena stálost navrhnutých řešení a především bezpečnost výrobků a jejich uživatelů. Z tohoto důvodu jsou jednotlivé aplikace pružných prvků diskutovány v disertační práci také v oblasti výzkumu a praktického využití a jsou tak nedílnou součástí provedené literární rešerše.

Část světových výrobců již na tento trend zareagovala a vytváří si tak žádaný konkurenční náskok. Za zmínku stojí například německá společnost SGL Carbon, která ve spolupráci s automobilovým výrobcem Volvo vyrábí velkosériově kompozitní pružné prvky pro podvozky vlastního modelového portfolia. Jedním z předních výrobců konvenčních pružných prvků v České Republice je také společnost HŽP a.s. zabývající se výrobou pružin více než 65 let. Jedním ze strategických cílů této společnosti je diverzifikace. Nový produkt, který by umožnil rozdělení aktivit do dalších oblastí, značně snižuje riziko podnikání a s využitím výzkumu je logickým krokem právě návrh vhodných kroků pro vývoj a konstrukční řešení kompozitních pružných prvků. Spolupráce s přední českou společností zabývající se výrobou pružných prvků je důležitou součástí disertační práce. Výsledný produkt by mohl umožnit čelit stále přísnějším emisním normám, které si kladou za cíl ochranu životního prostředí a omezení spotřeby energií a tedy snížení znečištění Země.

Proces návrhu kompozitních struktur je obecně velmi silně ovlivněn empirickými zkušenostmi. Ne jinak je tomu také u kompozitních pružných struktur. Stěžejní částí je materiálová skladba listové pružiny a tedy optimalizace jejího složení pro získání co nejlepších výsledků při hodnocení parametrů tuhosti, únavové životnosti pružného prvku a také stěžejní hmotnosti pružiny. Kompozitní pružný prvek je vzhledem k vysoké výšce struktury problematická struktura obsahující řadu proměnných. Z tohoto důvodu je optimalizace pružného prvku velmi náročnou operací, která vyžaduje časově náročné experimenty a zohlednění široké oblasti řešení.

1. SOUČASNÝ STAV

1.1 Pružné prvky

Základní vlastností pružných prvků je schopnost, díky které se tyto prvky po odlehčení vrátí do původní polohy nebo do původního tvaru. Mimo tento fakt vykazují pružné prvky také schopnost absorbovat nebo využít vibrace, uvolňovat, pojmout nebo využívat nárazovou sílu. Terminologie pružných prvků udává jako jeden z nejzákladnějších parametrů charakteristiku pružiny, popisující závislost mezi působícím zatížením $F [N]$ a vyvolanou deformací $s [mm]$. [1]

Pružný prvek lze dále charakterizovat pomocí tuhosti, udávající odolnost proti stlačení. Tuhost lze definovat jako parametr určující změnu charakteristického rozměru ve směru působící síly. Tuhost pružného tělesa se může v průběhu zatěžování měnit, tuhost není konstantní, přičemž převrácenou hodnotu tuhosti označujeme jako poddajnost. Parametr tuhosti je závislý na geometrii pružného prvku a na jeho materiálu. Zásadní vlastností materiálu posuzovaného z pohledu tuhosti je modul pružnosti, popisující vztah mezi napětím a deformací (prodloužení na jednotkovou délku). Obecně platí, že je modul pružnosti u jednoho stejného materiálu neměnný v závislosti na různých typech tepelného zpracování materiálu. Naproti této veličině je postavená mez kluzu určující velikost napětí (síly na jednotku plochy) potřebného k trvalé deformaci pružného prvku. Pokud však vyvolané napětí zůstává pod mezí kluzu, dochází po odstranění zatížení k navrácení pružného prvku do původní polohy. [2, 3, 4]

Obecně můžeme tvrdit, že vytvoření vnitřních napětí vně struktury materiálu může pozitivně ovlivnit výsledné hodnoty napětí vyvolaného působením síly $F [N]$ na pružnou strukturu. Takovéto pozitivní ovlivnění únosnosti pružných struktur je využitelné zejména pro dosažení vyššího počtu cyklů při dynamickém namáhání. Hodnota počtu cyklů dosažená při testování závisí rovněž na koeficientu zatížení zohledňujícím velikost horní hodnoty (meze) zatěžující síly $F_H [N]$ a spodní hodnoty (meze) zatěžující síly $F_D [N]$ volených pro dynamické namáhání. Koeficient zatížení je popsán jako podíl těchto sil a je vždy větší než 1. Svou maximální hodnotou se blíží horní hodnotě zatěžující síly, avšak z důvodu stanovení nutného zatížení pružného prvku vyvolaného hmotností soupravy těchto hodnot zpravidla nedosahuje.

Posledním charakteristickým parametrem definujícím vlastnosti pružného prvku je mez únavy, vyjádřená amplitudou napětí, při které nedochází k únavovému

lomu. Je omezena limity napětí odpovídajícími maximálnímu přípustnému zatížení a zatížení určující zatížení počáteční. Z pohledu trvanlivosti se jedná o konstrukci umožňující při odpovídající údržbě a definovaném počtu cyklů (větší než 2×10^6) užívání po celou dobu požadované životnosti, přičemž hodnota počtu cyklů je závislá na koeficientu zatížení k_z , jehož stoupající hodnota snižuje dosažitelný počet cyklů. [1]

1.2 Kompozitní pružné prvky

V případě vinutých pružných prvků je velkou výhodou proti ocelovým pružinám až o 70 % nižší hmotnost. Výrobci uvádí hmotnostní úsporu až 6 kg u osobního automobilu. V případě nákladních automobilů jsou tyto hodnoty mnohem výraznější, což se také projevuje na nákladech společností na jeden kilogram přepravovaného zboží. Výroba pružných prvků je pak až 5 krát méně energeticky náročná. Jednotlivé operace výroby kompozitních pružných prvků jsou součástí výrobního procesu, který je velmi krátký – řádově v desítkách minut v případě využití technologie PCM (z angl. Prepreg Compression Molding). Dalšími výhodami jsou také vyšší vlastní frekvence struktur, chemická odolnost, nemagnetické a nevodivé vlastnosti. [6, 7, 8, 9]

Materiály kompozitních pružných prvků

Z materiálového hlediska lze využít veškeré běžně dostupné výztuže, jenž svými vlastnostmi nabízí širokou škálu možností kombinací a uložení jednotlivých vrstev kompozitní struktury. Mezi hlavní materiály pak patří skelné a uhlíkové výztuže, případně také jejich kombinace s výztuží aramidovou. Pro vývoj materiálového složení kompozitní pružiny je nezbytně nutný výběr materiálů vhodných pro přímou aplikaci v laboratorních podmínkách a s ohledem na parametry a provedené výpočty je nutné uvažovat také použití zvolených materiálů a polotovarů ve velkosériové výrobě. [10, 11, 12]

Jun Ke a kolektiv navrhuje použití takového materiálu, který by byl schopen lépe ukládat energii listové pružiny, čímž by zabezpečili lepší jízdní vlastnosti soupravy a zároveň snížili poškození vozovky. Kombinace uhlíkové výztuže a epoxidové pryskyřice je schopna při dynamickém zatížení ukládat největší množství energie. Tento materiál má také vysokou pevnost a tuhost a nízkou hmotnost. Na druhou stranu má nízkou rázovou houževnatost a v případě kontaktu

s kovem by koroze mohla způsobit problémy. Velmi vysoká cena tohoto materiálu je pro praktické použití limitující. Ve srovnání s uhlíkovými vlákny mají skleněná vlákna nižší pevnost a tuhost, vyšší hustotu, lepší odolnost proti korozi, vyšší rázovou pevnost a mnohem nižší náklady. Se skleněnými vlákny se tedy získává příznivá kombinace mezi vlastnostmi materiálu a cenou. Skelná vlákna se skládají ze dvou hlavních typů E a S2. Ačkoli vlákna S2 mají lepší mechanické vlastnosti než vlákna E, náklady na vlákna E jsou mnohem nižší než na vlákna typu S2. V publikované studii proto doporučuje jako výztužný materiál používat právě skleněná vlákna typu E. [13, 14]

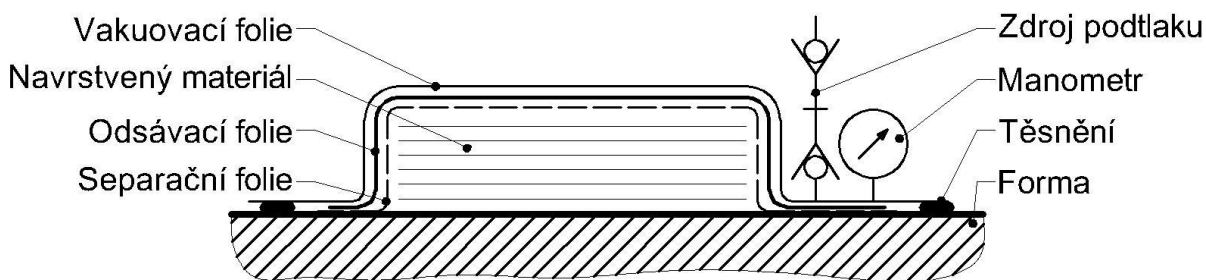
Materiál pojivové fáze, tedy použité pryskyřice, musí plnit dva základní požadavky. Patří mezi ně přenos zatížení mezi vyztuženými vlákny a ochrana těchto vláken před erozí způsobenou vnějším prostředím. Riziko štěpení u těchto součástí, vlivem vnějšího zásahu, je poměrně vysoké. Proto by měl pojivový systém odolávat teplotním šokům a měl by být odolný proti korozi a stárnutí. Nevhodně navržené rozhraní pojivového materiálu a vyztužujících vláken může vést ke ztrátě tuhosti a následnému delaminačnímu selhání, které je hlavní formou únavových poruch. V současnosti jsou jako matricové systémy běžně používány v listových pružinách epoxidová a polyesterová pryskyřice. [13, 14, 15]

Druhou skupinou materiálů využívaných při výrobě kompozitních pružných prvků jsou předimpregnované polotovary ve stavu B, které umožňují jednoduchou manipulaci bez nutnosti prosycování výztuže pryskyřicí. Nevýhodou je pak nutnost skladování těchto materiálů při velmi nízkých teplotách bod bodem mrazu (řádově desítky stupňů celsia). Tento problém lze do jisté míry odstranit volbou typu zásobování „Just in Time“ (JIT).

Technologie výroby kompozitních pružných prvků

Pro výrobu součástí z kompozitních materiálů existuje řada zavedených a ověřených výrobních technologií, které jsou schopné vyrábět vysoce kvalitní komponenty. Každá z těchto technologií má své silné a slabé stránky. Může se jednat například o vakuovou infuzi, lisování nebo technologicky jednoduché postupné ruční kladení vrstev vláknové výztuže a její průběžné prosycování matricí. Technologie mohou rovněž využívat několik typů nástrojů. Mezi nejčastější pak patří nástroje kovové, nebo nástroje vyrobené z kompozitních materiálů. [5, 10, 11, 15, 16, 17, 18, 38, 39]

V laboratorních podmínkách nachází uplatnění lisování předimpregnovaných materiálů ve vyhřívané peci (Obr. 1), přičemž principem technologie je navrstvení všech vrstev struktury a jejich následné zavakuování. Velkou výhodou u této technologie je možnost jejího využití při výrobě prototypových součástí, pro které není potřeba mít vyrobenou finančně nákladnou lisovací či RTM výrobní formu. Pro zefektivnění výroby a výsledné jakosti struktury lze takto zavakuovaný materiál vložit do autoklávu, ve kterém vlivem působení přetlaku dosáhneme vyšší jakosti vnitřní struktury. [15, 16, 17, 19, 20, 40]



Obr. 1: Schéma technologie využívající zdroj vakua

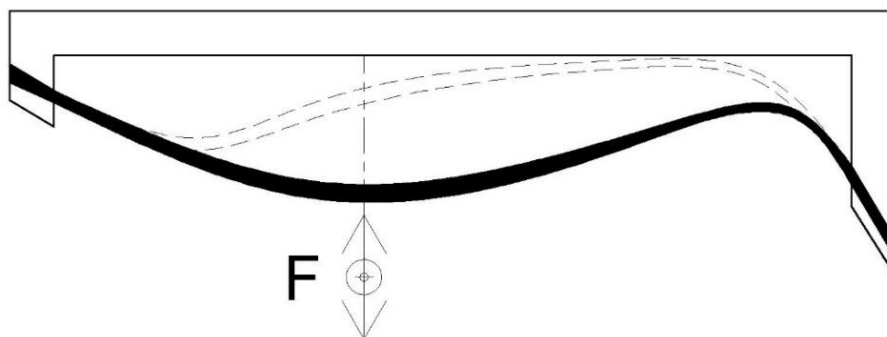
Zásadní technologií pro výrobu rozměrných kompozitních pružin ve velkosériové výrobě je technologie PCM využívající temperovaných desek lisu, případně temperovaných tvarových vložek výrobní formy. Do lisovací formy lze vkládat polotovary ve formě předimpregnovaných výztuží a následně je stlačit do požadovaných rozměrů odpovídajících velikosti dutiny formy – v případě že je sledován rozměr mezery [mm] dutiny formy. Při dodržení technologických a procesních zásad tak lze ve velmi krátkých časových intervalech, řádově v desítkách minut, vytvářet požadované struktury. Takto vytvrzené struktury pak mohou postoupit hromadně další výrobní kroky, jako jsou dotvrzování ve vyhřívané peci, případně úprava povrchu. Uvedená technologie nevyžaduje speciální zařízení pro úpravu materiálových směsí a do jisté míry tak kompenzuje nevýhody technologie RTM. [12, 16, 17, 19, 21, 22]

Keerthi Vasana uvádí v práci zabývající se výrobou a testováním kompozitních pružin z uhlíkových, skelných a aramidových vláken, že použitím metody ručního laminování dosahujeme snížené pevnosti. Je to způsobeno zejména důsledkem přítomnosti vzduchových bublin ve vnitřní struktuře vyráběných pružin. Rovněž poukazuje na velmi zajímavý fakt snížení pevnosti hybridních struktur v porovnání s pevností, kterou by dosahovala struktura, pokud by obsahovala pouze jeden typ vláken, například uhlíkových. [23]

Využitelnost kompozitních pružných prvků

Kompozitní pružné prvky jsou řešením u hledání nových možností při návrhu odpružení a to zejména u podvozků používaných v dopravním průmyslu. Předpokládá se, že celosvětová produkce kompozitních listových pružin v roce 2023 bude odpovídat částce téměř devadesáti milionům amerických dolarů. [24]

Řada výrobců se díky výzkumným aktivitám dostává k uplatnění těchto pružin v sériové výrobě. S ohledem na dostupné informace se však jedná o pružiny dimenzované na deformace odpovídající zatížení silou $F_{MAX} = 10\,000\text{ N}$. Inovací řešenou v této oblasti jsou pak kompozitní listové a parabolické pružiny s progresivní charakteristikou (Obr. 2). Velkou předností tohoto řešení je plynulejší průběh tlumících účinků vzniklých vlivem rostoucího zatížení. [8]



Obr. 2: Schematické zobrazení progresivní listové pružiny

Snižování nákladů na vyrobenou jednotku je prioritní bod každého výrobního sektoru využívajícího moderní metody výroby a plánování. Rovněž tyto skutečnosti napomáhání plnění přísných emisních norem, které musí výrobci dopravních prostředků splnit. Přestože se výrobci snaží udržet nízké náklady, legislativa řídí inovace. Emise pro osobní vozidla stanovené Evropskou unií se v průběhu let snížili z hodnoty 161 g/km (2006) na 132 g/km v roce 2012. Evropská unie dále souhlasila se stanovením nového cíle pro emisní limity CO₂ na 95 g/km do konce roku 2020. Od roku 2021 do roku 2030 je dle Evropské unie plánováno snížení produkovaného CO₂ o 37,5 %. Dosažení těchto cílů bude i nadále nutit výrobce k inovacím prostřednictvím nových zdrojů paliva, jeho účinnosti a uplatnění lehkých materiálů. [5, 8, 25, 26, 27]

Sedláček a kolektiv se v práci zabývají návrhem a optimalizací listové pružiny pro vozidla železniční dopravy, přičemž optimalizace byla provedena pomocí početní simulace na základě současného řešení ocelových listových pružin.

Navrhnuté řešení využívá epoxidovou pryskyřici a jednosměrné skelné vlákno typu E. Vytvořený FEM (z angl. Finite element method) model definoval jednotlivé vrstvy pružné struktury a vychází z navrhnuté geometrie pružiny. Výsledky provedených analýz posunutí ukazují maximálně 5 % rozdíl ve srovnání původní nahrazované ocelové pružiny s pružinou kompozitní. V práci byly vyhodnoceny indexy poruch pomocí třírozměrných kritérií selhání maximálního napětí a kritéria interlaminárního selhání příčného střihu. Byla určena kritická místa modelu. Hmotnost listové pružiny byla snížena použitím této konstrukce z 12,6 (kg) na 1,9 (kg), což znamená snížení hmotnosti o více než 80 %. [28]

1.3 Namáhání kompozitních pružných prvků

Pružné prvky použité v dopravním průmyslu jsou nepravidelně cyklicky namáhané součásti, současně zatížené statickou silou vyvolanou hmotností soupravy, které jsou součástí. Z této definice tedy plyne nutnost zabývat se jak zatížením cyklickým, tak zatížením statickým vyvolaným hmotností soupravy. V případě pohybující se soupravy se setkáváme také s reakcemi vyvolanými právě pohybem sestavy. V ideálním případě by tedy bylo vhodné testovat všechny kombinace zatížení, reagujících na směry působícího zatížení, stejně tak jako jejich kombinaci statické a dynamické části. Realizace takového experimentu je však v nasimulovaných podmínkách složitou operací vyžadující speciální zkušební zařízení. Proto se hlavní zatížení realizují zpravidla samostatně pro jeden směr působení.

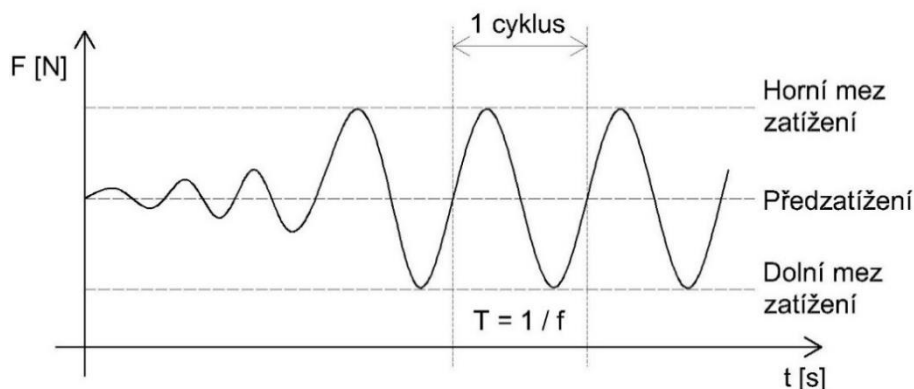
Statické namáhání

Z pohledu statického namáhání je důležitá volba maximálního zatížení působícího na testovací vzorek. Zpravidla se uvažuje maximální dosažená hodnota napětí vyvolaného při poruše materiálové struktury. Při vyhodnocení dat je však nutné uvažovat také okolní podmínky testování a chování struktury při zatížení nad mezí kluzu a zohlednit tak všechny pozorované změny struktury a odečíst vhodnou velikost působícího napětí. Je důležité upozornit na skutečnost, že i menší porucha ve struktuře, byť test stále probíhá a maximální napětí stoupá, dokáže ovlivnit výslednou strukturu natolik, že bude její životnost prudce snížena. [29]

Thippesh experimentálně řeší nahrazení trapézové ocelové pružiny pružinou ze skelných vláken. Na pružině, skládající z jednosměrných skelných vláken prosycených epoxidovou pryskyřicí Araldite LY556. Při experimentu bylo hodnoceno dosažené napětí, přirozená frekvence a hmotnost pružiny. Nahrazovaná a navrhovaná pružina měly podobnou geometrii a jejich materiály vykazovaly podobné mechanické vlastnosti. V experimentu byla použita materiálová kombinace využívající 60 % procent blíže nespecifikovaných jednosměrných skelných vláken, 10 % recyklovaného popílku a směsi epoxidové pryskyřice Araldite LY566 s tvrdidlem Aradur HY 951 v hmotnostním poměru 100:12. Pružný prvek je vyroben technologií ručního kladení suché výztuže a následného rovnoměrného prosycení pojivovou směsí s pomocí válečku. Standartní ohybový test je proveden dle ASTM D790, přičemž bylo zjištěno, že deformace [mm] a maximální napětí [MPa] (experimentálně zjištěnou) mají u kompozitních listových pružin, velmi dobrou shodu s pružinou ocelovou. Kompozitní listová pružina poskytuje výhodnější užitné vlastnosti a přináší vyšší účinnost vozidla ve srovnání s ocelovou listovou pružinou. [30]

Cyklické namáhání

Cyklické namáhání, jeho testování a velikost zatížení pro jednotlivé hladiny je závislá na výsledcích a vyhodnocení statického chování struktur. Pro struktury, jejichž geometrie neumožňuje použití standardních postupů dle příslušných norem, se testování řídí především požadavky koncového odběratele. Z pohledu kompozitních listových pružných prvků patří mezi konečný sledovaný parametr především dosažený počet cyklů pro jednotlivé konkrétně zvolené hladiny zatížení. Základní zobrazení cyklického namáhání je zobrazeno na obrázku 3. [29, 31]



Obr. 3: Základní terminologie cyklického zatěžování [39]

Mezi hlavní nastavované parametry můžeme zařadit:

- horní hodnota zatěžující síly F_H [N],
- spodní hodnotu zatěžující síly F_D [N],
- koeficient zatížení k_z udávající poměr mezi hodnotou horní a spodní mezi zatížení,
- frekvence zatěžování [Hz].

Převážná většina vědeckých prací publikujících problematiku pružných kompozitních prvků není zaměřena na experimentální testování únavových vlastností. Syambabu Nutalapati definuje únavu pružných kompozitních struktur jako poškození v důsledku cyklického, opakované působícího napětí. Uvádí, že je účelné rozlišovat mezi únavou s vysokým a nízkým počtem cyklů. Jsou-li plastické deformace vzniklé v oblasti trhlin malé a těleso struktury je deformováno elasticky, mluvíme o struktuře, která je schopna odolat vysokému počtu cyklů. Pokud je cyklické zatížení doprovázeno plastickou deformací celé struktury jedná se o strukturu schopnou odolávat pouze malému počtu cyklů. Řádově několik stovek cyklů. Uvádí, že v materiálových vědách je únava progresivní, lokalizované a trvalé strukturální poškození, ke kterému dochází, když je materiál vystaven cyklickým nebo kolísajícím napětím při jmenovitém napětí. Výsledné napětí může být pod konečným tahovým napětím nebo dokonce mezi kluzu materiálu, přesto může způsobit selhání. [32, 37]

Studie únavového zatížení zveřejněná v práci zabývající se návrhem pružiny pro podvozek vojenského dopravního prostředku definuje zatížení pružiny jako ohybové a částečně torzní účinky. Vzhledem ke skutečnosti ztráty pevnosti vlivem opakovaného zatížení doporučuje charakterizovat míru degradace použitých materiálů. Studie hodnotila únavové vlastnosti E - skleněných vláken/epoxidů a S2 - skleněných vláken/epoxidů. Maximální napětí a poměr zatížení pro přední a zadní pružinové sestavy jsou zvoleny takovým způsobem, aby představovaly zatížení, se kterými se souprava setká ve skutečném provozu. Výsledek studie doporučuje, na základě Googmanových diagramů, použití S2 skleněných jednosměrných vláken, u kterých je možno dosáhnout počtu 100 000 cyklů při požadovaném maximálním zatížení 205 kN. [33]

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cíle disertační práce jsou směřovány zejména k aplikaci vícevrstvých kompozitních materiálů při vývoji a konstrukčnímu řešení kompozitních pružných struktur s ohledem na obecné požadavky zadavatelů odebírajících pružné prvky vyrobené z konvenčních materiálů.

Stanovené cíle řešení disertační práce a jejich jednotlivých dílčích částí:

- Návrh materiálového složení a typů pružných kompozitních struktur.
- Výroba navrhnutých zkušebních vzorků a těles.
- Ověření výroby silnostěnných a prototypových pružných kompozitních prvků pomocí zvolených materiálových polotovarů, technologií a technologických postupů.
 - Optimalizace vytvrzovacího programu silnostěnné struktury.
 - Výroba a zhodnocení silnostěnné struktury.
 - Ověření výrobitelnosti kompozitní vinuté pružiny.
 - Ověření výrobitelnosti kompozitní disková pružiny.
 - Ověření výrobitelnosti kompozitní listové pružiny.
- Návrh a konstrukční řešení prototypových přípravků pro malosériovou výrobu kompozitních pružných prvků.
- Výroba prototypových kompozitních pružných struktur.
- Testování prototypových součástí se zaměřením na cyklické zkoušky.
- Vyhodnocení výsledků testování a aplikace poznatků testovacího procesu do konstrukčního řešení a technologie výroby.
- Návrh pružných struktur pro ověření stanovených závěrů.
- Optimalizace procesu výroby a příprava výrobních postupů pro velkosériové využití s ohledem na automatizaci.
- Zhodnocení dosažených materiálových možností a technologických řešení.

Široká oblast, řešená v disertační práci, neumožňuje její rozčlenění na část zabývající se samostatně metodikou a část pojednávající o vlastním provedení experimentu. Z tohoto důvodu jsou jednotlivé dílčí části disertační práce řešeny v samostatných kapitolách, z nichž většina obsahuje část zohledňující metodiku a současně část popisující provedení experimentu a diskuzi výsledků.

Tyto kapitoly, cíle, ve výsledku popisují zvolené, chronologicky uspořádané řešení disertační práce. Disertační práce neobsahuje konkrétní zadání pro nahrazení vybrané, konvenčně používané pružiny, nicméně se řídí obecnými pravidly a požadavky odběratelů kladenými na tyto pružné prvky a zejména do první části řešení využívá také geometrii ocelového pružného prvku použitého reálně v sestavě podvozku nákladního dopravního prostředku. Tato skutečnost je dána tím, že je nutné se při nahrazení dosud využívaných prvků řídit také geometrií uložení v sestavě podvozku tak, aby nebylo nutné celou tuto sestavu modifikovat. Naproti tomu však v úvahu přichází například změna uchycení pružného prvku v sestavě podvozku.

3. ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Problematika zabývající se vývojem nových funkčních prvků a struktur je oblastní velmi rozsáhlou a lze ji tedy hodnotit na základě široké řady vstupních a výstupních parametrů. Mezi hlavní činitele upravující výsledné vlastnosti vyráběných pružných struktur patří zejména materiálové složení a typ zvoleného materiálu vyztužujících vláken a pojiva. Disertační práce hodnotí problematiku výroby pružných prvků od počátečního návrhu až po návrh nástrojů umožňující sériovou výrobu takových struktur. Hodnocení jednotlivých dílčích částí je prováděno na základě provedených experimentů zabývajících se výrobou a testováním navržených materiálových složení a konstrukčních návrhů. Ověřování jednotlivých materiálových kombinací a struktur, či technologických a procesních parametrů je testováno v laboratořích Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a také za pomoci kooperujících společností, poskytujících zázemí a nutné speciální vybavení, nástroje a strojní podporu. Zvolené společnosti jsou ve svých oborech dlouhodobě zavedené a jejich bohaté zkušenosti dále umožní jednotlivé technologické a procesní parametry kontrolovat z pohledu reálné výrobní produkce. Některé z dílčích částí disertační práce jsou rovněž realizovány v německém institutu pro chemické technologie Fraunhofer ICT v rámci projektu Mezinárodní mobilita vědeckých pracovníků Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně.

3.1 Materiál pružných kompozitních struktur

Materiály vstupující do problematiky byly voleny s ohledem na jejich mechanické a technologické vlastnosti, dostupnost a možnost využití těchto materiálů při zavedení velkosériové výroby pružných kompozitních struktur. Současně byly do problematiky volby materiálu zahrnuty také informace získané z provedených literárních rešerší, jejichž výsledky byly uvedeny v části popisující současný stav řešené problematiky.

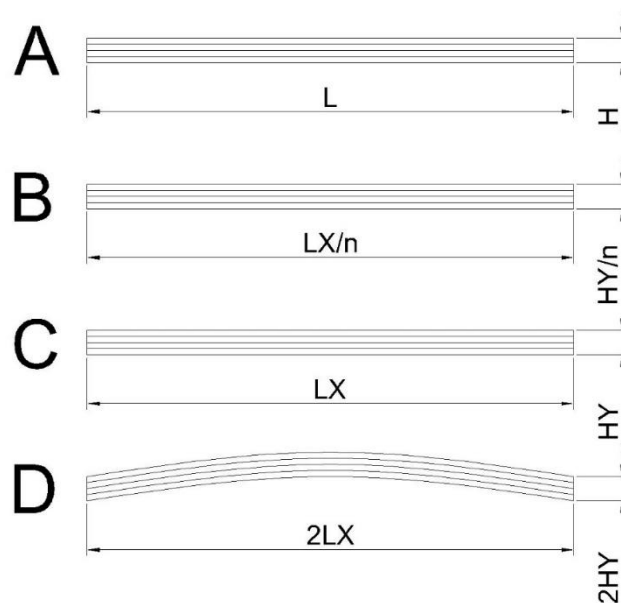
Pro první fázi řešení disertační práce byly po konzultaci s vedoucím disertační práce vybrány tři typy konkrétních materiálových kombinací výztuže:

- skelná výztuž (VV430U-DT806R-34), [34]
- uhlíková výztuž (SE84LV/HEC/450/400mm/35+/-3%/),
- kombinace skelné a uhlíkové výztuže pro vytvoření hybridní struktury. [35]

Po provedení mechanických testů, ověření deklarovaných vlastností a výrobě prvních prototypů pružných prvků byl jako hlavní materiál pro řešení disertační práce zvolen prepregový polotovar dodavatele Delta-Preg - skelné výztuže prosycené epoxidovou pryskyřicí Delta-Tech DT 806R.

3.2 Návrh a výroba kompozitních struktur

Pro účely testování kompozitních pružných struktur bylo v první části disertační práce navrženo a vyrobeno několik sérií zkušebních vzorků a těles, pomocí kterých bude prováděno testování posuzovaných veličin. Návrhy jednotlivých typů zkušebních těles a vzorků jsou zobrazeny na obrázku 4 a jejich uplatnění, včetně základních rozměrů je popsáno v tabulce 1.



Obr. 4: Typy zkušebních těles

Tab. 1 Využití jednotlivých typů zkušebních struktur

Typ struktury	Využití struktury	Velikost struktury [mm]
A	Charakterizace vstupních veličin	Dle řídicí normy
B	Laboratorní cyklické testování	Dle zkušebního stroje
C	Cyklické testování	$l = 1000, h = 25, *s_p$
D	Prototyp pružiny	$l = 2000, h = 50, *s_p$

* s_p - neměnná šířka pružné struktury [mm]

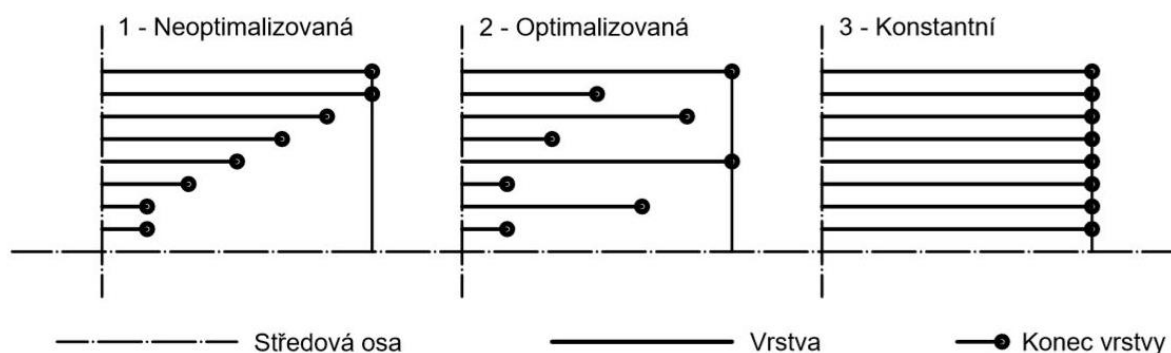
Typ struktury A je určený pro charakterizaci vstupních veličin FEM modelování. Totožná velikost zkušebních těles byla zvolena pro prvotní ověření

deklarovaných vlastností materiálu stanovených výrobcem. Testování a vyhodnocování jednotlivých struktur plně korespondovalo s požadavky cílených aplikací, které definovaly nutná zatížení a další faktory vstupující do problematiky. S ohledem na uvedené byly navrženy struktury s rozměry odvíjejících se od konvenčně využívaných pružných prvků, v tabulce 1 označovaných jako typ struktury D. Struktura D, prototyp pružiny, slouží v první řadě pro ověření vyrobiteľnosti pružné struktury takovéto velikosti.

Zkušební vzorky typu B, určené pro laboratorní cyklické testování, byly navrhovány s ohledem na přístrojové vybavení laboratoří Ústavu výrobního inženýrství. Testování sérií zkušebních vzorků typ B bylo provedeno na servohydraulickém testovacím stroji Zwick/Roell HC 25.

Zkušební tělesa typu C jsou určena pro testování zmenšeného modelu prototypového pružného prvku – typu D. Pro zachování vyššího počtu ukládaných vrstev bylo zvoleno poloviční měřítko původní struktury. Při poloviční velikosti byla v parabolické struktuře zkušebního tělesa stále dostatečně vysoká četnost překladů. Pro výrobu struktur typu C bylo nutné dále navrhnout jejich skladbu zobrazující jednotlivé ukládané vrstvy materiálu. Byly vytvořeny tři typy základních skladeb – neoptimalizovaná, optimalizovaná a konstantní skladba. Optimalizovaná a neoptimalizovaná skladba vytvořila po uložení všech kladených vrstev parabolickou pružnou strukturu.

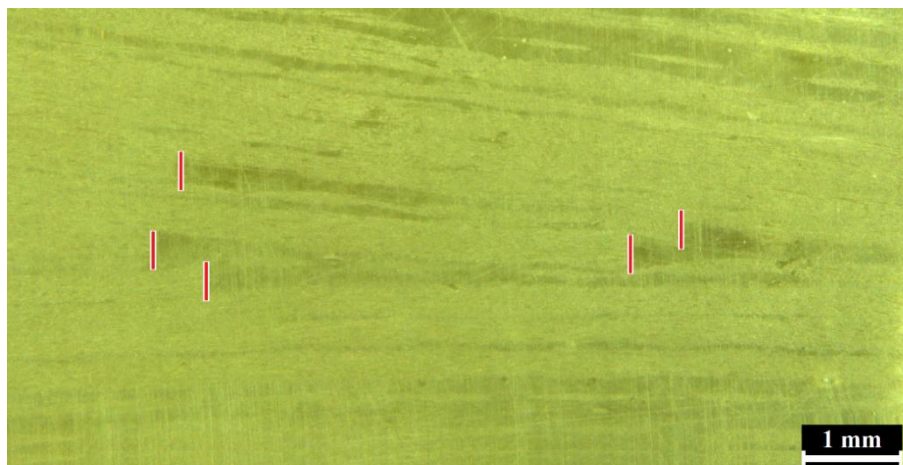
Typy navržených skladeb jsou zobrazeny níže na obrázku 5. Sestavení bylo odvozeno z dostupných literární zdrojů a obecně platných pravidel pro práci se zvolenými materiály.



Obr. 5: Typy skladeb zkušebních vzorků

Optimalizovaná struktura je popsána jako struktura, jejíž skladba je řízena obecně platnými pravidly pro ukládání jednotlivých vrstev. Naopak definice

neoptimalizace spočívá právě v seskupování dvou a více konců vrstev v jednom bodě struktury. Tento jev může nepříznivě ovlivnit výsledné vlastnosti kompozitní struktury a jeho zobrazení bylo zachyceno na mikroskopickém snímku – obrázek 6.



Obr. 6: Seskupování konců jednotlivých vrstev v neoptimalizované struktuře

Navrhnuté typy zkušebních těles a ostatních pružných struktur byly vyrobeny pomocí technologie využívající vytvrzování v uzavřené vytvrzovací peci s podporou vakuového vaku připojeného na rozvodnou síť s konstantní hodnotou podtlaku 0,85 MPa. Tato výrobní technologie byla zvolena vzhledem k její vhodnosti pro použití při laboratorních podmínkách a s ohledem na množství vyráběného počtu pružných struktur.

Pro ověření vytvrzení byl u připravených zkušebních těles a ostatních pružných struktur ověřen obsah pryskyřice ve struktuře pomocí kalcinační metody a stupeň vytvrzení pomocí DSC analýzy. Obě metody potvrdily vhodně zvolené procesní podmínky přípravy navrhnutých kompozitních struktur.

3.3 Statické testování

Po výrobě desek byly přichystány zkušební tělesa určená pro charakterizaci vstupních veličin pro FEM modelování a ověření deklarovaných vlastností materiálů stanovených výrobcem. Doporučená velikost zkušebních těles byla stanovena dle odpovídajících norem.

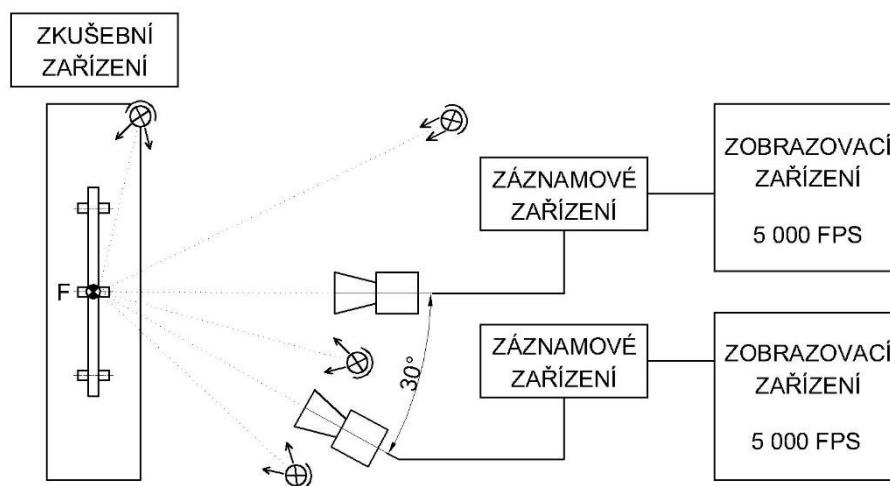
Část disertační práce, obsažená v kapitole zabývající se statickým testováním a FEM modelováním, je vytvářena ve spolupráci s kooperující společností v rámci

smluvního výzkumu a z tohoto důvodu jsou výsledky jednotlivých dílčích zkoušek zahrnuty do důvěrných informací a v disertační práci nejsou podrobně popsány a uvedeny.

Mezi získané výstupy kapitoly patří:

- stanovení konstant modulu pružnosti v tahu E [MPa],
- stanovení modulu pružnosti ve smyku G [MPa],
- stanovení Poissonových konstant,
- stanovení hodnot elastických konstant pro matici a výztuž struktury,
- výpočet efektivního modulu pružnosti jednosměrného kompozitu,
- výpočet tloušťky prototypové pružné struktury s tuhostí ocelové pružnice,
- provedení FEM analýzy na základě získaných vstupních hodnot.

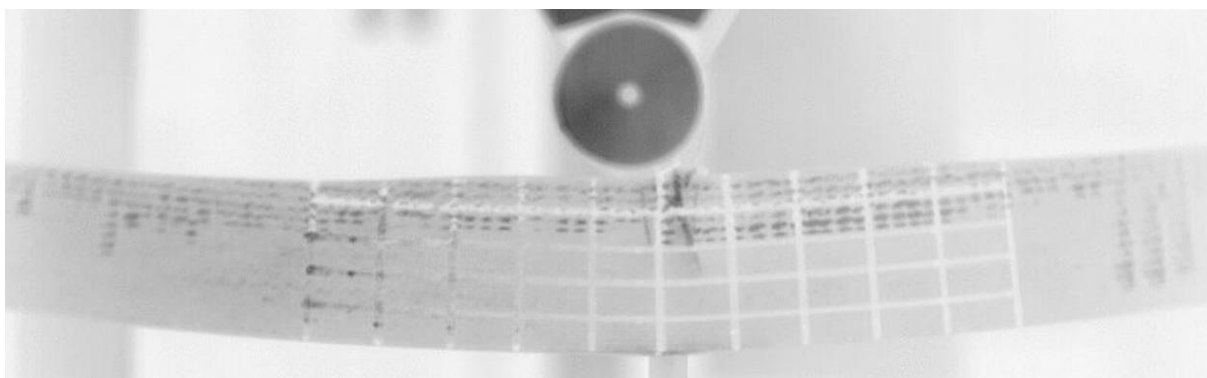
Po provedení základních statických testů byl rovněž navrhnout experiment, který využívá snímání vysokorychlostní kamerou. Při experimentu byly použity dvě sestavy vysokorychlostních kamer zachycujících statickou zkoušku rychlostí záznamu 5 000 snímků za sekundu. Experiment je zobrazen schematicky pro lepší názornost na obrázku 7. Na pružném prvku délky 1 metr byla ve sledované oblasti také vyznačena síť tvořená obdélníky rozměru 5 x 10 mm sloužících pro popis chování struktury při ohybové zkoušce.



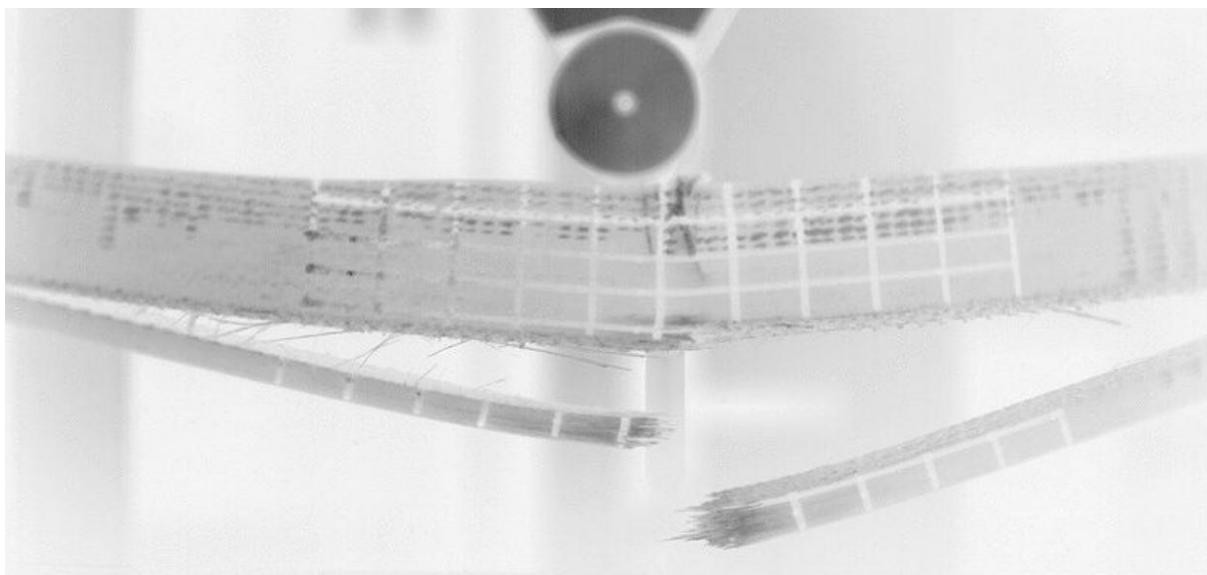
Obr. 7: Snímání statické zkoušky vysokorychlostní kamerou

Obrázky 8 a 9 zobrazují kamerový výstup. Pro lepší rozlišitelnost poruch a zobrazení vytvořené sítě jsou u záznamu invertovány barvy. Na obrázku 8 jsou

jasně viditelné poruchy způsobené průhybem vyvolaným působícím zatížením. Reakcí na průhyb je v počáteční fázi natahování jednotlivých skelných vláken v okrajových částech struktury (na tahové straně) a jejich následně přetržení. Současně se, působením tlaku na horní – tlakové straně, vytváří prasklina v pojivové části struktury. Na obrázku 9 je již patrná deformace vyvolaná delaminací v oblasti vnější takové strany a deformace mřížky s viditelným prodloužením tahových vrstev struktury. Ztráta stability vyvolaná delaminací vedla k poklesu tuhosti sestavy a následné ztrátě stability vedoucímu k trvalému poškození.



Obr. 8: Snímek 1



Obr. 9: Snímek 4

3.4 FEM model - provedení výpočtů

Pro vypracování části zabývající se výrobou parabolických prototypových pružných prvků byl experiment nastaven s následujícími parametry:

Tab. 2 Požadavky kladené na navrhovaný pružný prvek

Parametr	Hodnota
Tuhost pružiny k [N/mm]	150 [$\pm 5\%$]
Frekvence [Hz]	1,5
Požadovaná životnost [Počet cyklů]	200 000

Parabolický tvar pružiny, tedy výška v jednotlivých místech délky, je dán rovnicí 1 následovně:

$$h = h_0 \times \sqrt{\frac{x}{l}} \quad (1)$$

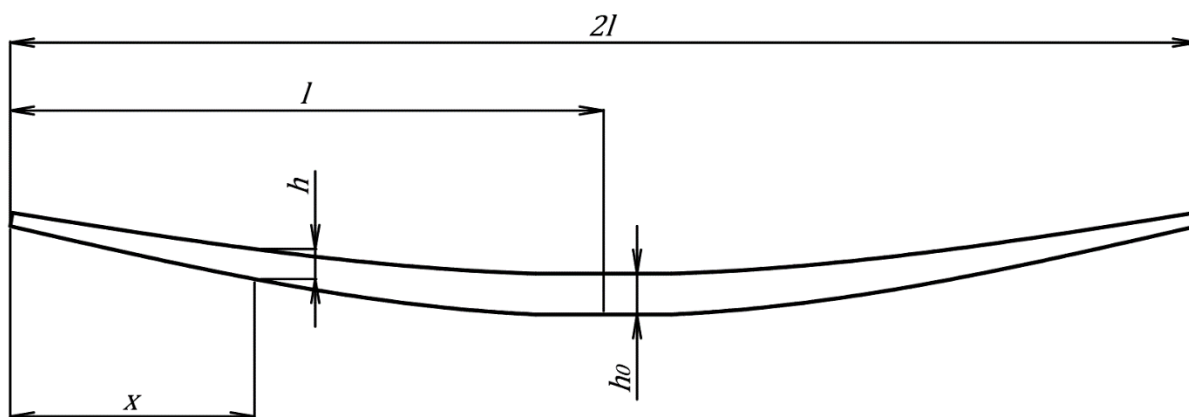
kde,

h [mm] ... výška průřezu ve vzdálenosti x od konce pružného prvku

h_0 [mm] ... výška průřezu středu pružného prvku

l [mm] ... délka ramena pružného prvku

x [mm] ... vzdálenost průřezu tvořícího parabolický tvar od konce pružného prvku



Obr. 10: Geometrie výpočtu tvaru paraboly

Pro modelování v MSC Marc byly zvoleny skořepinové FEM elementy. Základním prvkem geometrie modelu pružného prvku je vytvořená rovina – střednice listové pružiny. Při návrhu modelu bylo využito symetrie jak z

hlediska geometrie, tak z hlediska okrajových podmínek. Model byl vytvořen jako čtvrtinový s rovinami symetrie v polovině délky a v polovině šířky pružného prvku. Tloušťka jednotlivých skořepinových elementů je po délce proměnná a je definována uzlově pro dodržení parabolického tvaru profilu pružného prvku dle rovnice 1. Nejprve byla s pomocí modelu stanovena tloušťka h_0 [mm] takovým způsobem, aby bylo dosaženo požadované tuhosti pružiny 150 N/mm [$\pm 5\%$]. Následně bylo určeno maximální napětí v krajních vrstvách pružiny pro jednotlivá maximální zatížení. Výsledky analýzy byly využity pro návrh skladby jednotlivých pružných prvků a jejich zmenšených ekvivalentů. Výška struktury tvořené skelnými vlákny byla početně stanovena na 65 mm.

3.5 Ověření výroby silnostěnných pružných prvků

Z provedených výpočtů je patrné, že je nutné při výrobě prototypové pružiny, pomocí zvolených polotovarů, použít vysoký počet vrstev materiálu. V případě struktury vysoké až 65 mm je nezbytné uvažovat možná rizika plynoucí právě z velkého množství vytvrzovaného materiálu. Na takové riziko upozorňuje rovněž dodavatel v materiálovém listu a při použití struktury vyšší než 5 mm klade důraz na dodržení prodlev v teplotách a rychlostech ohřevu vytvrzovacího programu. Optimalizované vytvrzovací podmínky výrobce neuvádí. Nedodržení postupu může mít za následek silnou exotermickou reakci. Ověření výroby bylo provedeno s reaktivní epoxidovou pryskyřicí DT 806R obsažené ve skelném prepregovém polotovaru dodavatele Delta-Tech.

Na riziko exotermické reakce upozorňuje řada dodavatelů a také řada publikací pojednávajících o úpravě vytvrzovacího programu. Autoři Gower, Shaw a Broughton uvádí optimalizaci procesu vytvrzování jako víceetapový ohřev vytvrzovaného materiálu. To znamená, že vytvrzovací teploty je dosaženo stupňovitým ohřevem s časovými prodlevami umožňujícími pozvolný ohřev materiálu. [36]

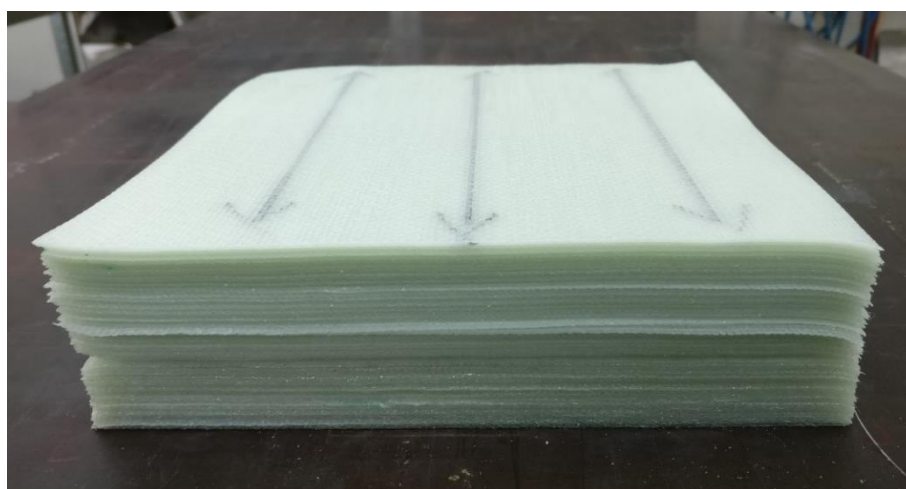
Pro ověření výroby struktur s vysokým počtem vrstev byl navrhnout při řešení disertační práce následující vytvrzovací program:

- ohřev materiálů 1 °C/min z laboratorní teploty na teplotu 60 °C,
- výdrž 45 minut při teplotě 60 °C,
- ohřev materiálů 1 °C/min na teplotu vytvrzování 75 °C,
- výdrž 60 minut při teplotě 75 °C,

- ohřev materiálů 1 °C/min na teplotu vytvrzování 90 °C,
- výdrž 120 minut při teplotě 90 °C,
- ohřev materiálů 1 °C/min na teplotu vytvrzování 120 °C,
- výdrž 60 minut při teplotě 120 °C,
- ochlazení 2 °C/min na laboratorní teplotu.

Dovytvrzení při teplotě vytvrzování 120 °C výrobce nevyžaduje, proto při výrobě tlustostěnné struktury nebylo využito.

Pro ověření výroby tlustostěnné struktury (na základě FEM výpočtu) byla navržena deska (Obr. 11) o rozměrech 200x200x50 mm tvořená 150 vrstvami jednosměrného skelného předimpregnovaného materiálu VV430U-DT806R-34.

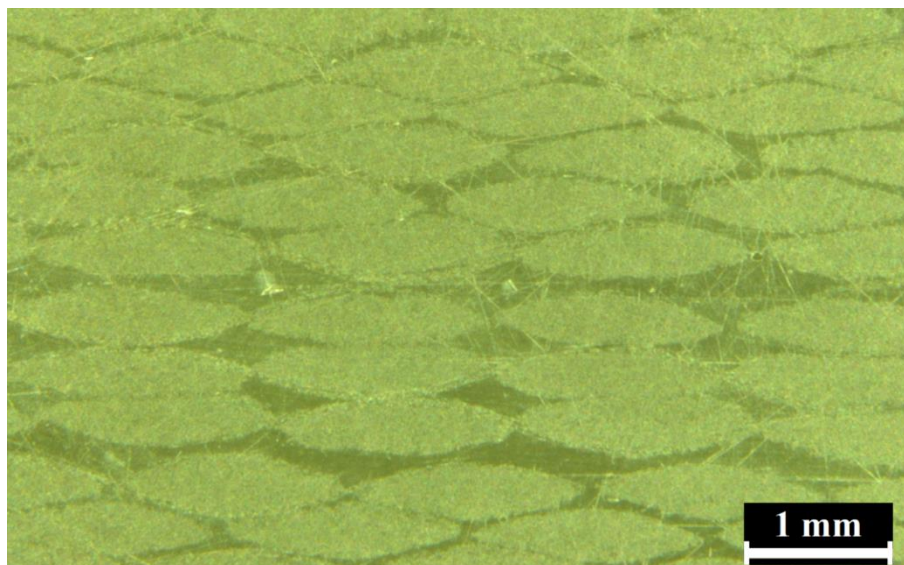


Obr. 11: Uložení vrstev tlustostěnné struktury

Tlustostěnná deska byla pro ověření vlastností struktury rozdělena pomocí vysokotlakého řezání vodním paprskem. Řezání bylo realizováno v kooperující společnosti Form s.r.o Horní Lideč dle připravených DWG souborů. Rozdělení struktury umožnilo stanovení stupně vytvrzení středu struktury a posouzení, zda materiál při vytvrzení degradoval nebo zda se uvnitř struktury vyskytovaly jiné výrobní vady. Diferenciální skenovací kalorimetrie neprokázala významné odchylky ve vytvrzení ve srovnání s referenčními vzorky, vytvořenými při posuzování těles typ A. Rozdíl ve vytvrzení nebyl vyšší než tři desetiny procenta. V řezu struktury bylo možné pozorovat vzduchové kapsy vzniklé při ukládání jednotlivých vrstev. Tyto kapsy vznikaly mezi jednotlivými prameny rovingů, tvořící strukturu tkaniny, i přes důkladné stlačení každé z ukládaných vrstev.

Vyrobená struktura byla posuzována mikroskopicky také ve směru kolmém na hlavní směr UD vláken. Při pozorování je viditelné, že uložení jednotlivých vrstev materiálu bylo nahodilé (Obr. 12). Z obrázku můžeme definovat dva typy uložení:

- první typ – rovingové prameny jsou uloženy nad sebou (střed struktury zobrazené na obrázku 12),
- druhý typ – rovingové prameny jsou uloženy střídavě v jejich rozhraních.



Obr. 12: Uložení vrstev materiálu ve struktuře

V případě ukládání vysokého počtu vrstev může mít kombinace obou typů uložení za následek rozdílnou výšku struktury při výrobě shodných prototypových součástí. Druhý typ uložení může také vykazovat vyšší náchylnost k vytváření vzduchových kapes uvnitř struktury.

Po stanovení vytvrzovacího programu silnostěnných struktur bylo možné navrhnout nové pružné struktury. Jedná se o zmenšené rovinné pružné struktury, jejichž základní rozměry jsou v měřítku 1:2 v porovnání s původní nahrazovanou ocelovou pružinou. Jedná se o zkušební vzorky typ C.

3.6 Ověření výrobitelnosti pružných prvků

Pro ověření možností použití zvolených technologií, materiálů a navrhnutých procesních podmínek vytvrzování byly v disertační práci okrajově zkoumány

možnosti výroby vinutých, diskových a listových pružných prvků v samostatné kapitole zohledňující také geometrii pružných prvků, která při ověřování vyrobitelnosti silnostěnných struktur nebyla uvažována.

Vinutá pružina

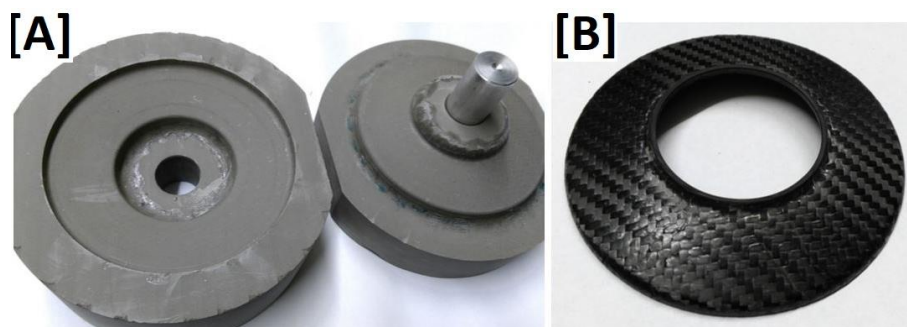
V případě vinutých pružin byla navržena metodika postupu výroby vinuté pružiny. Při výrobě byly navrženy a připraveny dva typy polotovarů určených pro technologii vakuové infuze a technologii vytvrzování ve vyhřívané peci. Pružina má pro ověření výrobní technologie volně stanovenou geometrii rozměrů definující vinuté pružiny. Vyrobené pružiny obsahovaly od 35 do 70 % hmotnostního podílu vláken. Lze tedy konstatovat, že při uvedených vyšších hodnotách bylo dodrženo optimální zastoupení výztuže ve struktuře a technologie pro výrobu vinutých pružin je možné využít.



Obr. 13: Vinutá pružina využívající předimpregnovanou výztuž

Disková pružina

Geometrie kompozitní diskové pružiny vychází z běžně dostupných, konvenčně používaných, diskových pružin vyráběných z ocelí. Velkou výhodou použití diskové pružiny je zejména odstranění nežádoucího vzpěru, vyvolaného při stlačení soustavy pružinových segmentů oproti standardní pružině vinuté. Po definování základní geometrie byla vyrobena prototypová forma (Obr. 14A) z umělého dřeva s obchodním označením Ebablock a série zkušebních pružných segmentů (Obr. 14B).



Obr. 14: [A] – Výrobní forma, [B] – Segment pružiny

Listová pružina

Pro ověření vyrobiteľnosti listové pružiny byla vybrána konkrétní aplikace pružného prvku – sportovní odvětví, pružina do „skákacích bot“. Pro návrh technologie výroby bylo v první fázi nutné analyzovat původní pružný prvek. Odpařením epoxidové pryskyřice bylo zjištěno, že je pružina tvořena v celém průřezu rovingovými skelnými vlákny. Tento fakt je podpořen také materiálovým výbrusem, který byl mikroskopicky snímán. Z výsledných snímků je patrná skladba pružiny, která je tvořena výhradně rovingovými vlákny a technologie výroby RTM.

Pro účely výroby v laboratorních podmínkách byla navržena a vyrobena výrobní forma. Vyroběné struktury byly dále posuzovány při statickém testování. Návrhem výrobní formy určené pro listové pružiny se potvrdily možnosti výroby pružných prvků při použití předimpregnovaných polotovarů a získané poznatky bylo možné využít v následujícím kroku při návrhu výrobní formy pro výrobu prototypových kompozitních pružných prvků typu D.



Obr. 15: Výroba listové pružiny

3.7 Návrh a konstrukční řešení prototypové formy

S řešením disertační práce souvisí také navrhnutí formy pro výrobu prototypových pružných prvků, geometricky odpovídajících konvenčně využívaným pružinám. Právě pro tyto účely byly specifikovány požadavky na nástroj, který byl následně navrhnout a vyroben. Konstrukce výrobní formy musí umožňovat plnění následujících parametrů:

- dostatečně kvalitní temperace - prohřev ukládaných materiálů,
- vyhovující tuhost a pevnost,
- změna výšky vyráběných struktur,
- výroba dvou kusů pružných prvků současně.

Vyrobená forma je zobrazena na obrázku 16. Forma byla rovněž doplněna o mechanismus umožňující spojení obou jejích částí, čímž umožňuje stlačení uloženého materiálu, s pomocí distanční podložek, na požadovanou výšku vyráběných pružných struktur.



Obr. 16: Výrobní forma pro parabolickou pružinu

3.8 Výroba prototypových struktur – typ D

Výroba prototypových kompozitních struktur zahrnovala využití získaných zkušeností a jejich zahrnutí do výrobního procesu. Jednalo se zejména o využití poznatků získaných při řešení tlustostěnných kompozitních struktur a poznatků získaných při návrhu a výrobě ostatních typů zkušebních vzorků a těles. Byly navrženy procesní podmínky výroby pro pružné struktury typu D a jejich jednotlivé lay-up diagramy, poté byly pružné struktury vyrobeny.

Výroba polotovaru proběhla ve vytvrzovací peci dle připraveného programu, který byl zvolen následovně:

- ohřev materiálů 1 °C/min z laboratorní teploty na teplotu 50 °C,
- výdrž 60 minut při teplotě 50 °C,
- ohřev materiálů 1 °C/min na teplotu vytvrzování 75 °C,
- výdrž 75 minut při teplotě 75 °C,
- ohřev materiálů 1 °C/min na teplotu vytvrzování 90 °C,
- výdrž 120 minut při teplotě 90 °C,
- ohřev materiálů 1 °C/min na teplotu vytvrzování 120 °C,
- výdrž 60 minut při teplotě 120 °C,
- ochlazení 2 °C/min na laboratorní teplotu.

Při řešení disertační práce bylo celkově vyrobeno 8 prototypových pružných prvků typu D. Porovnání experimentálně a početně vytvořených struktur proběhlo na základě statického měření, při kterém se prokázala shoda obou navržených struktur.

Detailní informace výroby kompozitních struktur typů D, například skladba jednotlivých prototypů, jsou omezeny dokumentem „Dodatek č. 1 ke smlouvě o spolupráci ze dne 29. 5. 2015“ rozšiřující „Smlouva o spolupráci č. 1 uzavřená podle § 1746 odst. 2 zákona č. 89/2012 Sb., občanského zákoníku“, omezující jejich publikaci a proto nejsou v disertační práci uvedeny.

Ekonomické zatížení výroby kompozitních pružných prvků typu D lze rozdělit na několik základních částí, z nichž mezi hlavní patří návrh a výroba prototypové výrobní formy, nákup vybraných materiálů a náklady na strojní a lidské zdroje. Do ostatních položek ekonomického zatížení lze zařadit například náklady na přepravu výrobní formy a další položky, přímo se nepodílející na výsledné jakosti navrhovaných pružných struktur. Celkově byly náklady vyčísleny na 66 524 Kč pro jeden pracovní cyklus. Náklady na výrobu jedné prototypové pružiny byly 33 262 Kč - při použití skelného prepregu a zohlednění ceny nástroje. Náklady na výrobu jednoho skelného pružného prvku (bez ceny nástroje) byly 19 262 Kč. Uvedené hodnoty jsou určeny pro zvolenou technologii zpracování vytvrzování předimpregované skelné výztuže při působení teploty a podtlaku.

3.9 Testování - únavová zkouška

Únavová zkouška je rozdělena do dvou základních částí. První část byla částečně realizována ve spolupráci s firmou HŽP a.s. Společnost prováděla statické a únavové testování struktur typu D a C, navrnutých při řešení disertační práce, na vlastním jednoúčelovém hydraulickém testovacím zařízení. Část výsledků a také vybrané citlivé informace nejsou v disertační práci, pro splnění podmínek dodatku o spolupráci, uvedeny. Druhá část experimentu, sledující únavové chování navrnutých a vyrobených pružných struktur typ B, byla prováděna při laboratorních podmínkách s pomocí zkušebního servohydraulického stroje Zwick/Roell HC 25.

Hlavním požadavkem při nastavení únavové zkoušky je dodržení tuhosti pružného prvku (požadovaná hodnota 150 N/mm) a životnosti 200 000 cyklů při co nejvyšší zatěžující síle. Z požadavků výrobců vychází také parametr testovací frekvence, jejíž hodnota je stanovena na 1,5 Hz.

Mezi parametry sledovanými při experimentu prováděném ve společnosti HŽP a.s. jsou frekvence a hladiny zatížení. Parametry byly voleny dle vnitřních kritérií a s ohledem na požadavky odběratele. Sledovanými parametry únavové zkoušky struktur typu B, které jsou nastavovány do řídicího programu TestXpert R, jsou frekvence a hladiny zatížení.

Pro zkušební vzorky byly samostatně stanoveny hodnoty síly F_{MAX} [N] na základě statického testování. V průběhu testování byly rovněž voleny rozdílné hodnoty koeficientu zatížení.

Výsledky únavového chování uvedené v disertační práci zobrazují možnosti pro použití navrnutých struktur při hladině zatížení 70 % odpovídající 514 MPa. Při tomto zatížení, a zároveň při zohlednění možné změny dolní meze zatížení, je možné splnit požadovaný počet cyklů stanovený na 200 000.

Kompozitní prvky typu D vykazovaly podobné charakteristiky, avšak pro zpřesnění výsledků je v disertační práci doporučeno navrhnutí nového typu upínacího přípravku, umožňujícího kvalitnější spojení zejména ve středové části pružného prvku. Pro struktury typu C je doporučeno testování více kusů struktur při rozdílných velikostech hladin zatížení. Pomocí struktur typ B bylo prokázáno, že zařazení optimalizace do struktur typu C může pozitivně ovlivnit, v případě využití překládaného spoje, výsledky dosaženého počtu cyklů. Lze také očekávat vyššího procentuálního navýšení počtu cyklů při hladině zatěžování nižší než použité – 70ti procentní.

Z dosažených výsledků lze také usuzovat, že použití struktur tvořených výhradně jednosměrnými vlákny může pozitivně ovlivnit výsledné hodnoty dosaženého počtu cyklů. Doporučení z tohoto poznatku je takové, že je vhodné navrhnout strukturu parabolického tvaru složenou výhradně z jednosměrných vláken (bez vytvoření spojů), která budou mít stejnou délku jako pružný prvek samotný. Toho lze docílit změnou geometrie průřezu v délce pružiny.

Jinou možností pro zvýšení únosnosti je použití výztuže tvořené sklem typu S2, obecně dosahujících vyšší pevnosti než použitá skelná výztuž typu E. Pro tyto účely by bylo nutné navrhnout vhodný polotovar skelné výztuže a vybrat vhodného dodavatele. Z literárních zdrojů a reálných aplikací pružných prvků je také patrná možnost využití struktury s vytvořeným vnitřním předpětím. Taková struktura by mohla využívat polotovar jádra připraveného samostatně a po vložení do dutiny formy vytvářející ve struktuře předpětí umožňující snížení vyvolaných napětí vlivem provozu soupravy. Další možností je navrhnutí kompozitní pružiny s progresivní charakteristikou.

3.10 Optimalizace procesu výroby

Souběžně při řešení disertační práce byly navrženy teoretické možnosti pro velkosériovou výrobu s ohledem na automatizaci. Byl navrhnout upravený model pružného prvku, výrobní forma a procesní podmínky výroby.

Model pružného prvku

Při návrhu modelu byla uvažována obecně platná pravidla pro ukládání kompozitních materiálů, pomocí kterých byly stanoveny základní požadavky kladené na model pružného prvku.

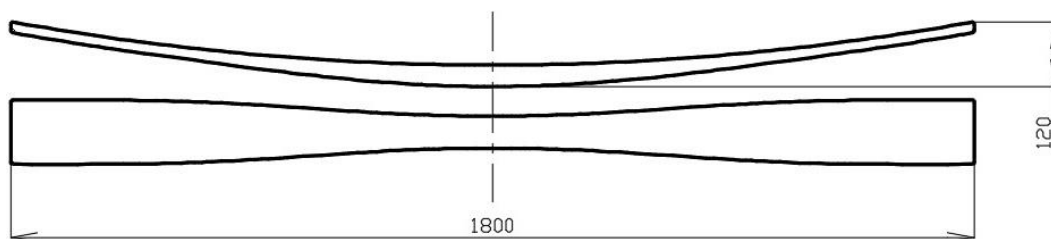
Základní požadavky na model pružného prvku jsou definovány následovně:

- parabolický tvar pružného prvku,
- výroba z prepregových polotovarů,
- použití polotovarů neměnné délky pro eliminaci vnitřních napětí a deformací,
- kloubové třibodové uchycení pružného prvku v sestavě podvozku.

Z požadavků kladených na pružný prvek je patrné, že je pro jejich splnění nutné zvolit model s konstantním průřezem v celé délce pružného prvku, avšak s proměnlivými hodnotami výšky a šířky tohoto průřezu pružiny v jednotlivých místech její délky. Tímto způsobem lze docílit vlastností parabolické pružiny a rovněž splnit požadavek, že struktura nebude obsahovat místa vyvolávající ve struktuře vnitřní napětí a z nich plynoucí deformace. Model pružného prvku je zobrazen na obrázku 17, základní rozměry pružného prvku jsou zobrazeny na obrázku 18.



Obr. 17: Model pružného prvku s proměnlivou geometrií průřezu



Obr. 18: Základní rozměry pružného prvku

Na modelu byla zvolena šířka středového průřezu (šířka pružiny v jejím středu) 60 mm a výška středového průřezu (výška pružiny v jejím středu) 40 mm. Šířka průřezu na koncích pružiny je rovna 120 mm, výška průřezu je rovna 20 mm.

Zvolená geometrie modelu je účelová a slouží pouze pro navrhnutí výrobní formy. Vychází však z technických řešení reálně využívaných pružných prvků. Mimo to také zároveň odstraňuje nedostatky struktur, které vznikají při požadavku použití parabolického tvaru pružného prvku. Nevýhoda tohoto řešení spočívá v nutnosti zařazení dodatečných operací do procesu výroby. Tyto operace by spočívaly ve vytvoření tvarového zámku a navrhnutí speciálních upínacích přípravků umístěvaných na konce pružného prvku. V případě umístění tvarového zámku do konstrukce tvarových vložek dutiny formy by mohl nastat problém s vyhozením

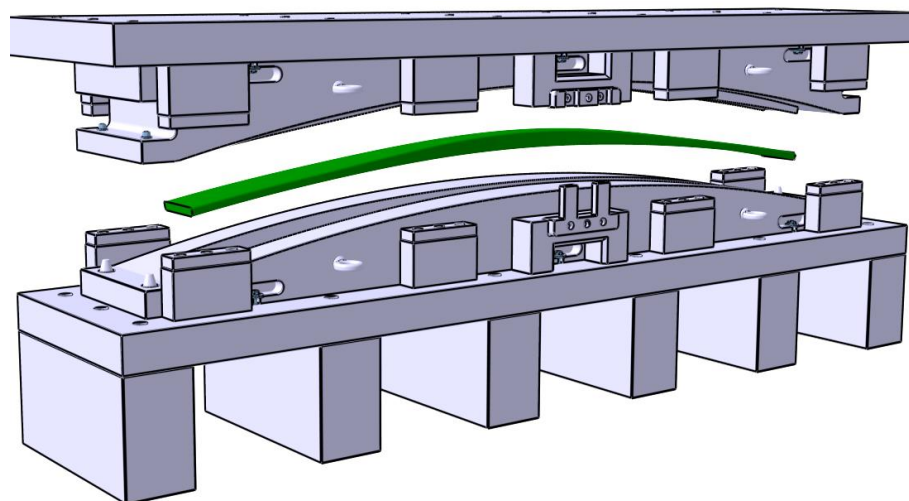
vytvrzené struktury z dutiny tvarové vložky. Pro konkrétní aplikaci a zpřesnění geometrie pružiny a jejího uchycení by bylo nutné vytvořit model s využitím metody konečných prvků.

Konstrukce formy

Konstrukce nástroje – výrobní formy, vychází z navrhnutého modelu pružného prvku a požadavku automatizace výrobního procesu. Jednotlivé požadavky na konstrukci formy byly definovány následovně:

- dvoudílná forma tvořená horní a spodní tvarovou vložkou,
- násobnost tvarové vložky formy – 1,
- použití technologie lisování předimpregnovaných polotovarů,
- nenáročnost vyjmutí pružné struktury z dutiny formy,
- nízká hmotnost tvarových vložek,
- zaručená tuhost sestavy formy.

Navrhnutou sestavu výrobní formy, zobrazenou na obrázku 19, by dále bylo možné vložit do lisovacího zařízení a následně připojit k temperanční jednotce a systému řízení lisovacího zařízení. Systém umožňuje nastavení lisovacích parametrů, například lisovací síly nebo sledování teplot s pomocí vložených čidel.

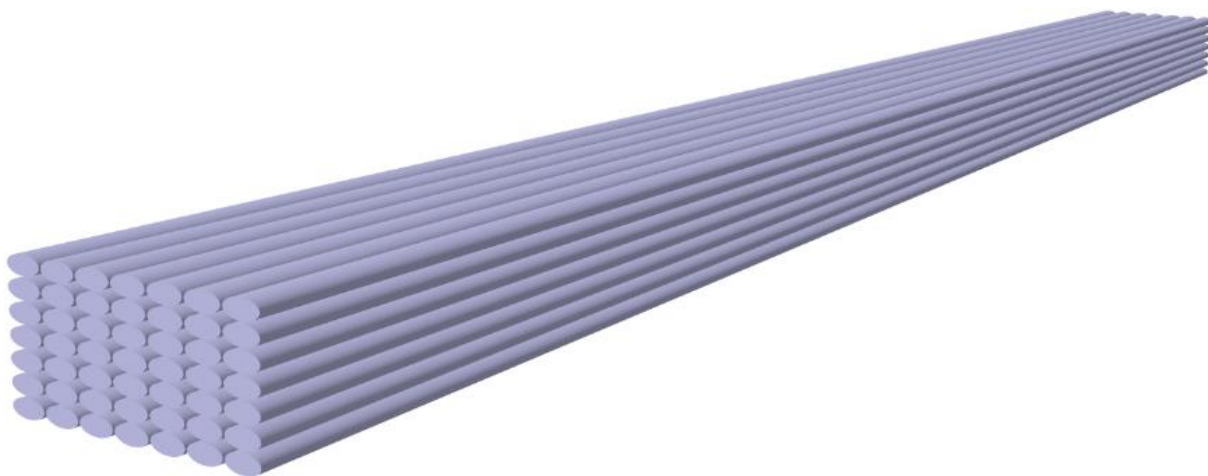


Obr. 19: Sestava výrobní formy

Proces výroby

Pro návrh automatizace procesu byla navržena materiálová skladba jednosměrné tkaniny, zobrazená schematicky v délce a v řezu na obrázku 20. Pro návrh procesu výroby je použita shodná epoxidová pryskyřice a totožné skelné vlákno.

Polotovar je tvořen epoxidovou pryskyřicí a jednosměrnými skelnými vlákny ve formě rovingů, které jsou volně uloženy vedle sebe. Procentuální zastoupení jednosměrné tkaniny je ve směru rovnoběžném se směrem vláken 100 %. Tkanina se rovněž vyznačuje vysokou hmotností na 1 m². Při řešení disertační práce byly používány tkaniny s gramáží 425 g/m². V případě této tkaniny by mohla být gramáž například 3 000 g/m², v závislosti na typu použitého rovingu. Obecně platí, že pro urychlení výrobního procesu bude požadován materiálový svazek o co nejvyšší hmotnosti na jeden metr čtvereční. Volné uložení umožňuje změnu šířky pružné prvku při stlačení materiálu v dutině výrobní formy. Seskupení tkanin do polotovarových svazků je vytvořen polotovar (Obr. 20), který je dále možno uložit do dutiny výrobní formy. Takto vytvořené materiálové polotovary by mohly být pásově přepravované na určené, zakládací místo a postupně vkládány do dutiny formy.



Obr. 20: Polotovar určený pro uložení do dutiny formy

Vzhledem k použití velkého množství materiálu a požadavku, aby vyplnil určenou dutinu formy, je vhodné, aby byl materiál před uložením do formy temperován. Ohřev materiálu na spodní hranici vytvrzování 65 °C umožňuje jednodušší formovatelnost materiálu a současně odstraňuje vzduchové bubliny, které by mohly vzniknout při stlačení polotovaru a tedy při změně jeho geometrie.

Použitá epoxidová pryskyřice je schopná vytvrzovat při velmi rychlých lisovacích cyklech. Jednotlivá nastavení jsou zobrazena v tabulce 3.

Tab. 3 Pracovní cykly pro rychlé vytvrzení epoxidového systému.

Pracovní cyklus				
	Přehřev polotovaru	Čas [min.]	Teplota [°C]	Gel time [s]
Cyklus P1	Ano	10 – 25	125	270
Cyklus P1	Ano	12 – 20	130	210
Cyklus P1	Ano	10 – 15	135	150
Cyklus P1	Ano	6 – 10	140	90

Uvedené pracovní cykly jsou přibližné a jsou závislé na použitém materiálovém polotovaru, jeho objemu, tvaru dutiny formy a také na lisovacím nástroji. Z pohledu výroby pružného prvku je potřeba uvažovat dostatečně dlouhou dobu gelování, tedy fáze, ve které je možno s pryskyřicí pracovat takovým způsobem, aby výroba byla proveditelná (anglicky Gel time). Tvorba polymeru musí být při vytvrzování v prvních stádiích zesítní a to do té míry, že narušení vytvořeného polymerního gelu nebude mít vliv na konečné vlastnosti vytvrzené součásti. Například při použití pracovního cyklu P4 je možné pojivový materiál zpracovávat po dobu 90 sekund, což je doba dostatečně dlouhá pro kvalitní uzavření lisovací formy.

Do procesu výroby lze zařadit také dodatečné operace. V případě pružných prvků se jedná o ořez vytvořené struktury a povrchové úpravy, vytvoření tvarových zámků či upevnění kloubových závěsů sloužících pro upevnění pružného prvku k sestavě podvozku.

4. PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

Kompozitní pružné prvky jsou široce zastoupené v dopravním průmyslu, avšak jednotlivé typy lze také využít při návrhu jednoúčelových a univerzálních konstrukcí.

Přínos práce popisují následující body:

- Stanovení technologických operací vyžadovaných při práci se zvolenými kompozitními materiály.
- Charakterizace požadavků pro vytvrzování silnostěnných kompozitních struktur.
- Ověření vyrobiteľnosti rozdílných typů pružných kompozitních prvků.
- Specifikace kritérií při konstrukci vhodných výrobních nástrojů a přípravků.
- Určení vlivu skladby struktury na vlastnosti struktur podrobených cyklickému testování.

Rozšíření poznatků o chování pružných kompozitních struktur.

5. ZÁVĚR

Disertační práce se zabývá vývojem kompozitních pružných prvků. Z pohledu současné výroby a také nároků na vyráběné součásti se jedná o poměrně složitou aplikaci kompozitních materiálů a proto byla s řešenou problematikou spojena řada problémů zasahujících do celého výrobního procesu. Prvním krokem při řešení byla volba materiálové složení porovnávaných kompozitních struktur. Z obecných požadavků a vlastních aplikací využívaných dosud pro kompozitní pružné prvky byl jako hlavní materiál v disertační práci zvolen skelný prepregový polotovar s označením VV430U-DT806R-34. Jedná se o polotovar ve formě tkaniny, ve které je 90 % vláken ve formě UD, 10 % vláken tvoří nosnou kostru tkaniny zabraňující posun vláken uložených v hlavním směru. Polotovar využívá vlákna typ E – EC9 5x136 tex/EC9 68 tex. Zvolený materiálový polotovar byl impregnován epoxidovou pryskyřicí Delta-Tech DT 806R a umožňuje rovněž využití při laboratorní výrobě kompozitních pružných prvků.

Dalším krokem při řešení práce byl návrh a výroba kompozitních struktur. Byly navrženy čtyři typy zkušebních těles a vzorků označovaných jako typ A, typ B, typ C a typ D. Typ struktury, označované písmenem A, sloužil k charakterizaci vstupních veličin. Velikost zkušebních těles byla stanovena normou ČSN EN ISO 14125 Vlákny vyztužené plastové kompozity – Stanovení ohybových vlastností a normou ČSN EN ISO 527-5 Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 5: Zkušební podmínky pro plastové kompozity vyztužené jednosměrnými vlákny. Typ struktury B sloužil pro laboratorní cyklické testování, tedy k hodnocení únavového chování struktur. Typ struktury C a typ struktury D byl určen pro testování prototypových součástí a struktur v kooperující společnosti HŽP a.s. Pro jednotlivé typy zkušebních struktur byl poté samostatně vytvořen lay-up diagram. Jednotlivé vytvořené diagramy byly vytvořeny jako optimalizované a neoptimalizované, přičemž optimalizace byla popsána jako zohlednění umístění jednotlivých vrstev ve struktuře takovým způsobem, kdy nedochází k seskupování jednotlivých konců struktur v jednom místě. Toto seskupování vykazuje ve strukturách nežádoucí vnitřní napětí a může ovlivnit únavové chování pružných struktur.

Disertační práce dále pokračovala výrobou zkušebních těles typu A. Pro výrobu těles byla využita rovinná forma, na kterou byl uložen prepregový polotovar a pomocné materiály a poté byla celá sestava umístěna do temperované komory

umožňující výrobu kompozitních součástí při působení podtlaku. Pro vytvrzení byl navrhnout vytvrzovací program dle doporučených parametrů udávaných výrobcem v materiálovém listu. Vzhledem k volbě teplotě vytvrzování 100 °C bylo do procesu výroby zařazeno také dovytvrzení, sloužící po vytvrzení k odstranění vnitřního pnutí či jiným možným deformacím. Následně byly vyrobené kompozitní desky odformovány a děleny s pomocí vodního paprsku na požadované rozměry zkušebních těles. Na vyrobených deskách byly rovněž provedeny, pro ověření vytvrzení, zkoušky určující podíl pryskyřice a stupeň vytvrzení. Ověření zastoupení množství výztuže ve struktuře proběhlo s pomocí vypalovací pece na připravených částech ověřovacích zkušebních těles. Rozdíly požadovaných hodnot a hodnot změřených byly u skelné výztuže minimální a pohybovaly se v rozmezí -0,88 % až 1,61 %. Na vybraných vzorcích byla provedena DSC analýza udávající stupeň vytvrzení, při které bylo zjištěno, že žádný z patnácti posuzovaných vzorků nevykazoval odchylky větší než 0,25 % od vzorku referenčního. Tímto způsobem byly ověřeny vyrobené zkušební tělesa, která byla v následujícím kroku využita pro stanovení vstupních veličin nezbytných pro FEM modelování. S pomocí získaných výsledků byly vytvořeny v programu MSC Marc FEM parabolické modely, na jejichž základě byly vyrobeny další typy prototypových parabolických struktur. Jednotlivé FEM modely vycházejí z požadavků kladených na konvenčně využívané pružné prvky. Důležitý byl především parametr tuhosti, parametr frekvence a parametr požadované životnosti.

Při posuzování chování kompozitních struktur byla v práci využita metoda statické zkoušky snímané vysokorychlostní kamerou, s jejíž pomocí bylo popsáno chování vláken na tlakové a tahové straně zatížení kompozitní pružné struktury. Reakcí na působící zatížení je v počáteční fázi natahování jednotlivých skelných vláken v okrajových částech struktury (na tahové straně) a jejich následně přetržení. Současně se, působením tlaku na horní – tlakové straně, vytváří prasklina v pojivové fázi struktury.

Před výrobou navrhnutých modelů pružných prvků bylo nejprve nutné ověřit vyrobitelnost silnostěnných kompozitních struktur, jelikož v případě struktury vysoké až 65 mm bylo nezbytné uvažovat možná rizika plynoucí právě z velkého množství vytvrzovaného materiálu. Z tohoto důvodu byl optimalizován vytvrzovací program. Optimalizace spočívala ve vícefázovém ohřevu vysokého počtu vrstev, který zabraňuje prudkému zvýšení teploty struktury vlivem exotermické reakce. Pro optimalizace byla vybrána teplota vytvrzování 120 °C nevyžadující dodatečné dovytvrzení. Pro ověření výroby tlustostěnné struktury

byla navržena deska o rozměrech 200 x 200 x 50 mm tvořená 150 vrstvami jednosměrného skelného předimpregnovaného materiálu VV430U-DT806R-34. Prvním krokem výroby byla příprava formy a tkaninového materiálu s pomocí řezacího plotru. Následně byl na připravenou formu uložen skelný materiál. Při ukládání byl kladen důraz na dodržení shodné orientace vláken všech vrstev a důkladného stlačení každé pokládané vrstvy pomocí teflonového hladítka. Vzhledem k množství ukládaných vrstev materiálu byla struktura zavákuována vždy po padesáti nových vrstvách. Dalším krokem bylo vytvrzení dle navrhnutého vytvrzovacího programu. Následně byla struktura rozřezána s pomocí vodního paprsku a mikroskopicky snímána na připravených materiálových výbrusech. Byla provedena diferenciální skenovací kalorimetrie, která neprokázala významné odchylky ve vytvrzení ve srovnání s referenčními vzorky, vytvořenými při posuzování těles typu A. Výsledkem hodnocení je mimo jiné struktura obsahující vzduchové kapsy viditelné pouhým okem a nahodilým uložením jednotlivých vrstev, ovlivňujícím výslednou výšku struktury. Tento fakt může mít vliv na počet použitých vrstev při výrobě prototypového pružného prvku typu D a na jeho vlastní tuhost. Na základě výsledků byla upravena výpočtová tloušťka jedné vrstvy uvažované pro další návrh struktur.

Pro ověření možností použití zvolených technologií, materiálů a navrhnutých procesních podmínek vytvrzování byly v disertační práci okrajově zkoumány možnosti výroby vinutých, diskových a listových pružných prvků v samostatné kapitole zohledňující také geometrii pružných prvků, která při ověřování vyrobitelnosti silnostěnných struktur nebyla uvažována. Při posuzování zvolených technologií byly navrženy materiálové polotovary a vyrobeny výrobní formy pro tři základní typy pružných prvků. Následně byly tyto pružné prvky vyrobeny. Na základě provedených experimentů lze konstatovat, že byla ověřena výroba pružných prvků při zvolené technologii a materiálech.

Po stanovení vytvrzovacího programu silnostěnných struktur a ověření zvolených technologií výroby bylo možné vyrobit nové pružné struktury – struktura typ C. Jednalo se o zmenšené rovinné pružné struktury, jejichž základní rozměry jsou v měřítku 1:2 v porovnání s původní nahrazovanou ocelovou pružinou. Byly vyrobeny tři typy struktur o stejné šířce – optimalizovaná a neoptimalizovaná struktura s proměnnou výškou a struktura s výškou konstantní. U vyrobených struktur bylo následně hodnoceno únavové chování ve společnosti HŽP a.s.

Souběžně s výrobou struktur typu C byl řešen také návrh prototypové formy umožňující výrobu struktur typ D v laboratorních podmínkách. Do návrhu byly

aplikovány poznatky získané z ověření výroby jednotlivých typů pružných struktur, přičemž výsledkem byla výrobní forma umožňující výrobu pružného prvku délky dvou metrů. Výrobní forma využívá ocelovou žebrovou konstrukci umožňující rovnoměrné působení tepelných účinků na zaformovaný materiál a je současně vhodná pro technologii ručního laminování, technologii lisování a technologie vytvrzování v temperované komoře při působení podtlaku a přetlaku. Po návrhu výrobní formy byly z vybraného skelného prepregu vyrobeny prototypové pružné prvky typ D využívající optimalizovaný vytvrzovací program.

Jednotlivé připravené struktury byly v disertační práci hodnoceny také z pohledu statického a cyklického chování. K tomuto účelu bylo využito přístrojové vybavení Ústavu výrobního inženýrství a také přístrojové vybavení kooperujících společností. V případě struktur typu D výsledné hodnoty dosažených počtů cyklů, při použití systému upnutí, nedosahovaly požadované životnosti parabolických pružných cyklů. Jako hlavní činitel, ovlivňující dosažený počet cyklů, byl označen použitý systém ukládání vrstev. Z literárních zdrojů, obsažených v teoretické části disertační práce je patrné, že v případě vrstvených kompozitních struktur může dojít k vytváření rozhraní, označovaných jako spoje ve struktuře – místa, kde je konec kratší vrstvy struktury přeložen vrstvou delší. S tímto rizikem souvisí také důvod, proč byly navrženy zkušební vzorky typ C a typ B zohledňující právě tyto skutečnosti. Pomocí provedených měření bylo zjištěno na strukturách typu C, že nejlepší vlastnosti vykazuje struktura s konstantní výškou, tvořená vrstvami stejné délky bez vytvořených spojů. Tuto skutečnost potvrdily také navrhnuté struktury typu B.

Na základě doporučení navrhnout parabolické struktury využívající v celé délce jednosměrných vláken byla v disertační práci navrhnutá optimalizace základních částí výrobního procesu. Teoretické možnosti optimalizace spočívají v návrhu nového modelu využívajícího konstantního průřezu v celé délce pružiny. Toho je docíleno změnou geometrie průřezu. Takto vytvořený model neobsahuje defekty ve vnitřní struktuře, které by vedly k jeho předčasné deformaci, nebo ke snížení počtu dosažených cyklů. Souběžně bylo navrženo uchycení konců pružin využívající tvarový zámek a svěrný spoj. V kapitole zabývající se optimalizací byla rovněž navrhnutá výrobní forma a materiálový polotovar určený pro technologii lisování. Z pohledu finančního zatížení navrhnutého procesu lze očekávat snížení nákladů na výrobu jednoho kusu pružného prvku vzhledem k možnosti využití vícenásobné výrobní formy a také využití krátkých lisovacích cyklů. Naopak lze očekávat vyšší finanční zatížení při návrhu lisovací formy,

které by však do jisté míry mohlo být kompenzováno právě sériovostí vyráběných pružných struktur.

Dalším možným směrem při řešení disertační práce by bylo zaměření se na problematiku z pohledu ekonomického a zejména ekologického zatížení celého procesu. Vzhledem k finanční náročnosti ekologické likvidaci by bylo výhodné pružné kompozitní prvky, které by byly na konci plánované životnosti, dále využívat jako prvotní surovinu. Jedním z hlavních směrů řešení by tedy měly být možnosti využití vytvrzených kompozitních struktur s ukončenou dobou životnosti.

Pro samotné prodloužení životního cyklu jednotlivých struktur je pak možné uvažovat o řešení využívající vnitřního předpětí v navrhovaných strukturách a současně použití dalších typů materiálů matric a výztuží, které by mohly dále zvýšit dosahovaný počet cyklů při stanoveném zatížení.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] YAMADA, Yoshiro, Toshio KUWABARA a Yoshiro KUWABARA, 2011. Materials for Springs. Springer Berlin Heidelberg. ISBN 3642093035.
- [2] WAHL, A. M. Westinghouse electric and manufacturing company. Mechanical Spring. 1. vyd. Cleveland, Ohio: Penton publishing company.
- [3] BLAŽEK, Václav. Pružiny a svazky pružnic: výpočet a konstrukce. Praha: SNTL, 1955.
- [4] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. Konstruování strojních součástí. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [5] CORBRIDGE, David. Compression moulding of hybrid carbon fibre composites for structural applications. UNITED KINGDOM, 2018. PhD thesis. University of Nottingham.
- [6] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [7] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymeric materials: structure, properties, applications. Munich: Carl Hanser Verlag, 2001. ISBN 15-699-0310-7.
- [8] Pružiny z kompozitů: Podvozek. In: <https://www.mubea.com> [online]. [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <https://www.mubea.com/cz/products-technologies/automotive/podvozek/pruziny-z-kompozitu/>
- [9] GAIKWAD, Dadasaheb, Rakhi SONKUSARE a Sameer WAGH, 2012. Composite Leaf Spring for Light Weight Vehicle- Materials, Manufacturing Process, Advantages & Limitations. Int J Engg Techsci Vol 3(2) 2012,410-413, 4.
- [10] JANČÁŘ, Josef. Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [11] MRÁZ, Petr a Jaroslav TALÁCKO. Konstrukce strojů s kompozitními materiály. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-010-3540-9.
- [12] WANBERG, John. Composite materials. Stillwater, MN: Wolfgang Pub., c2009. Fabrication handbook, #1. ISBN 19-291-3376-6.

- [13] KUNZARKAR, Prasad a Tushar GUJRATHI, 2018. A Review on Automotive Car Composite Leaf Spring Design and Optimization. International Journal of Recent Development in Engineering and Technology. (Volume 7, 4). ISSN 2347-6435.
- [14] KE, Jun et al., 2019. A review on material selection, design method and performance investigation of composite leaf springs. Composite Structures [online]. 226. ISSN 0263-8223.
- [15] Gebremeskel, Shishay Amare. “Design, Simulation, and Prototyping of Single Composite Leaf Spring for Light Weight Vehicle.” (2013).
- [16] AGARWAL, Bhagwan D. a Lawrence J. BROUTMAN. Vláknové kompozity: celostátní vysokoškolská příručka pro vysoké školy technické. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [17] CHUNG, Deborah D. L. Composite materials science and applications. 2nd ed. London: Springer, 2010. ISBN 978-184-8828-315
- [18] WANBERG, John. Composite materials: Fabrication handbook 2. Stillwater, MN: Wolfgang Pub, 2010. ISBN 978-192-9133-932.
- [19] HARPER, Charles A. Handbook of plastics, elastomers, and composites. 4th ed. New York: McGraw-Hill, c2002, xii, 884 p. ISBN 00-713-8476-6.
- [20] AIRD, Forbes. Composite materials: a guide to high performance non-metallic materials for race cars, street rods, body shops, boats, and aircraft. Rev. and updated ed. New York: HP Books, c2006. Fabrication handbook, #1. ISBN 978-1-55788-498-5.
- [21] WANBERG, John. Composite materials: step by step projects. Stillwater, MN: Wolfgang Publications, [2014]. ISBN 978-1-929133-36-9.
- [22] WANBERG, John. Composite materials: Fabrication handbook 3. Stillwater, MN: Wolfgang Pub, 2012. ISBN 978-1-935828-66-2.
- [23] KEERTHI VASAN, T., S. M. SHIBI a C. K. TAMILSELVAN. Fabrication and testing of composite leaf spring using carbon, glass and aramid fiber. Materials Today: Proceedings. 2020, 21(1), 45-51. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.05.358. ISSN 22147853.
- [24] Automotive Composite Leaf Springs Market. In: <https://www.stratviewresearch.com> [online]. Stratview Research, 2018 [cit.

2018-10-25]. Dostupné z: <https://www.stratviewresearch.com/181/automotive-composite-leaf-springs-market.html>

[25] Regulation (EU) No 333/2014 of the European Parliament and of the Council of 11 March 2014 amending Regulation (EC) No 443/2009 to define the modalities for reaching the 2020 target to reduce CO₂ emissions from new passenger cars

[26] Regulation (EU) 2019/631 of the European Parliament and of the Council of 17 April 2019 setting CO₂ emission performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles, and repealing Regulations (EC) No 443/2009 and (EU) No 510/2011 (Text with EEA relevance.)

[27] SIEBERT, Ernst, R., GRASSER, S. Mass production of composite leaf springs. *Lightweight des worldw* 11, 18–21, 2018. DOI: 10.1007/s41777-018-0013-0

[28] SEDLACEK, Frantisek, Petr BERNARDIN a Vaclava LASOVA, 2016. Design of a Composite Leaf Spring for Railway Vehicles. KATALINIC, Branko, ed. Proceedings of the 27th International DAAAM Symposium 2016 [online]. DAAAM International Vienna, s. 0493-0500 [cit. 2020-04-08]. DAAAM Proceedings. DOI: 10.2507/27th.daaam.proceedings.074. ISBN 9783902734082.

[29] 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.

[30] THIPPESH, L. Fabrication of Hybrid Composite Mono-Leaf Spring with Unidirectional Glass Fibers. *Materials Today: Proceedings*. 2018, 5(1), 2980-2984. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.01.096. ISSN 22147853.

[31] SUBA, O. Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů. 3. vyd.; Zlín, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, ISBN 978-80-7318-948-8

[32] SYAMBABU, Nutalapati, 2015. DESIGN AND ANALYSIS OF LEAF SPRING BY USING COMPOSITE MATERIAL FOR LIGHT VEHICLES. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*. © IAEME Publication, 6, Issue 12, Dec 2015, 36-59. ISSN P: 0976-6340; O: 0976-6359

- [33] ANDERSON, Rune N., 1984. Manufacturing Process for Production of Composite Leaf Springs for 5-Ton Truck. Michigan: Research and development center, 156 s.
- [34] Delta-Tech DT 806R: Materiálový list - VV430U-DT806R-34, Delta Preg [online]. © 2018 [cit. 2017-8-22] Dostupné také z: <https://www.delta-tech.it>
- [35] Gurit SE-84LV: Materiálový list, Gurit [online]. © 2018 [cit. 2017-8-22] Dostupné také z: <http://www.gurit.com>
- [36] GOWER, M. R. L., R. M. SHAW a W. R. BROUGHTON, 2009. EFFECT OF CURE CYCLE ON THE PROPERTIES OF THICK CARBON/EPOXY LAMINATES. 17th International Conference on Composite Materials (ICCM-17). Edinburgh, UK, 11.
- [37] MAHDI, E. A. A. M. S. HAMOUDA, 2013. An experimental investigation into mechanical behavior of hybrid and nonhybrid composite semi-elliptical springs. Materials & Design (1980-2015) [online]. 52, 504-513 [cit. 2020-04-08]. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.05.040. ISSN 02613069.
- [38] AZHAR, A. B. M. et al., 2015. Conceptual Mold Design for Multi-curved Natural Fiber Reinforced Composite Body Armor Panel. Procedia CIRP [online]. 37, 95-100 [cit. 2020-04-08]. DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.017. ISSN 22128271.
- [39] RAJESH, K., S.Vamshi KRISHNA a Ch. SUSHANTH, 2015. Design Analysis and Fabrication of Composite Mono Leaf Spring for Automobile Vehicle. International Journal of Current Engineering and Technology. Vol. 5, No. 6 (Dec 2015). ISSN E 2277 – 4106; P 2347 – 5161.
- [40] MORE, Mr. Y. S. a Prof. D. S. CHAUDHARI, 2016. Design and Analysis of Sisal Filled Glass Epoxy Composite Leaf Spring. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering [online]. 13(04), 146-155 [cit. 2020-04-08]. DOI: 10.9790/1684-130403146155. ISSN 2320334X.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Schéma technologie využívající zdroj vakua	12
Obr. 2: Schematické zobrazení progresivní listové pružiny	13
Obr. 3: Základní terminologie cyklického zatěžování [39]	15
Obr. 4: Typy zkušebních těles.....	20
Obr. 5: Typy skladeb zkušebních vzorků	21
Obr. 6: Seskupování konců jednotlivých vrstev v neoptimalizované struktuře .	22
Obr. 7: Snímání statické zkoušky vysokorychlostní kamerou.....	23
Obr. 8: Snímek 1	24
Obr. 9: Snímek 4	24
Obr. 10: Geometrie výpočtu tvaru paraboly	25
Obr. 11: Uložení vrstev tlustostěnné struktury	27
Obr. 12: Uložení vrstev materiálu ve struktuře.....	28
Obr. 13: Vínutá pružina využívající předimpregnovanou výztuž	29
Obr. 14: [A] – Výrobní forma, [B] – Segment pružiny	30
Obr. 15: Výroba listové pružiny	30
Obr. 16: Výrobní forma pro parabolickou pružinu.....	31
Obr. 17: Model pružného prvku s proměnlivou geometrií průřezu.....	35
Obr. 18: Základní rozměry pružného prvku	35
Obr. 19: Sestava výrobní formy	36
Obr. 20: Polotovár určený pro uložení do dutiny formy.....	37

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Využití jednotlivých typů zkušebních struktur.....	20
Tab. 2 Požadavky kladené na navrhovaný pružný prvek	25
Tab. 3 Pracovní cykly pro rychlé vytvrzení epoxidového systému.....	38

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

F	[N]	Síla
F _H	[N]	Horní mez zatěžující síly
F _D	[N]	Dolní mez zatěžující síly
F _{MAX}	[N]	Maximální síla
k _Z	[-]	Koeficient zatížení
-	[%]	Hladina zatěžování
s	[mm]	Hodnota deformace
T	[°C]	Teplota
T _g	[°C]	Teplota skelného přechodu
E	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
G	[MPa]	Modul pružnosti ve smyku
k	[N/mm]	Tuhost pružiny
t	[s]	Čas
%	[-]	Procenta
m	[g]	Hmotnost
T	[s]	Perioda
f	[Hz]	Frekvence
L, l	[mm]	Délka vzorku/tělesa
H, h	[mm]	Výška vzorku/tělesa
h ₀	[mm]	Výška průřezu středu pružného prvku
x	[mm]	Vzdálenost průřezu tvořícího parabolický tvar od konce pružného prvku
s _p	[mm]	Šířka vzorku/tělesa

PUBLIKAČNÍ AKTIVITY STUDENTA

Databáze – Scopus:

1. MAŇAS, Lukáš, Soňa RUSNÁKOVÁ, Milan ŽALUDEK, Ladislav FOJTL, Vladimír RUSNÁK. Possibilities of replacement of two side metal molds for the production of two facing side composite by one side mold. *Manufacturing Technology* [online]. 2016, vol. 16, iss. 3, s. 558-561. [cit. 2019-06-25]. ISSN 1213-2489.
2. FOJTL, Ladislav, Lukas MAŇAS, Soňa RUSNÁKOVÁ, Filip TOMANEC, Jiří KOHUT. The Effect of Polymer Pin Ribs on Reinforcement of Sandwich Structures. *Manufacturing Technology*. 2018, 18(6), 889-894. DOI:10.21062/ujep/196.2018/a/1213-2489/MT/18/6/889, ISSN 12132489.
3. MAŇAS, Lukáš, Soňa RUSNÁKOVÁ, Jakub JAVOŘÍK, Milan ŽALUDEK, Ladislav FOJTL. Verification of Material Composition and Manufacturing Process of Carbon Fibre Wheel. *Manufacturing Technology*. 2019, 19(2), 280-283. DOI: 10.21062/ujep/283.2019/a/1213-2489/MT/19/2/280. ISSN 12132489.
4. TOMANEC, Filip, Soňa RUSNÁKOVÁ, Martina Kalová, Lukáš Mañas. INNOVATION OF ILIZAROV STABILIZATION DEVICE WITH THE DESIGN CHANGES. *MM Science Journal*. 2019, 2019(01), 2732-2738. DOI: 10.17973/MMSJ.2019_03_2018005. ISSN 18031269.
5. KALOVA, Martina, Filip TOMANEC, Soňa RUSNÁKOVÁ, Lukáš Mañas, Zdeněk JONŠTA. MOLD DESIGN FOR RINGS OF EXTERNAL FIXATOR. *MM Science Journal*. 2019, 2019(01), 2739-2746. DOI: 10.17973/MMSJ.2019_03_2018002. ISSN 18031269.
6. FOJTL, Ladislav, Soňa RUSNÁKOVÁ, Milan ŽALUDEK, Alexander ČAPKA, Lukáš MAŇAS. Manufacturing and Mechanical Characterization of Bio-Based Laminates and Sandwich Structures. *Materials Science Forum*. 2017, 891(6). DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.891.542. ISSN 1662-9752.
7. ČAPKA, Alexander, Vladimir P. VAVILOV, Soňa RUSNÁKOVÁ, Ladislav FOJTL, Milan ŽALUDEK, Lukáš MAŇAS. Detecting Water in Composite Sandwich Panels by Using Infrared Thermography. *MSF*. 2017, 891(6), 516-521. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.891.516. ISSN 1662-9752.

Užitný vzor:

1. Užitný vzor číslo 33455 – Zkušební těleso k testování soudržnosti polymerního tělesa se zapouzdřenou tvarovou vložkou.
2. Užitný vzor číslo 34219 – Zařízení pro aditivní 3D tisk s konstrukčním řešením eliminace studených spojů. (Podána přihláška vynálezu ČR PV 2020-357.)

Diplomové práce:

1. DOBIÁŠ, Jan. 3D tisk jako podpora kompozitních struktur.
2. ŠAFAŘÍK, Ondřej. Využití kompozitních materiálů ve sportovním odvětví.
3. DOHNAL, Patrik. Kompozitní disková pružina.

Bakalářské práce:

1. CHOVANČÍK, Tomáš. Návrh konstrukce a technologie výroby součásti pro automotive.
2. OKÁL, Petr. Návrh konstrukce a výroby kompozitních pružin.
3. MADĚRYČ, Tomáš. Návrh konstrukce součásti z kompozitních materiálů.
4. KOZEL, Jan. Návrh výrobní součásti vyráběné technologií 3D tisku.
5. ŠAFAŘÍK, Ondřej. Uplatnění vakuové infuze pro výrobu hybridních kompozitních systémů.
6. MIGOTA, Slavomír. Využití CAM při výrobě součásti.

ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA

Ing. Lukáš Mañas

Ústav výrobního inženýrství, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Centrum polymerních systémů, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Narozen: 3. 9. 1990, Zlín, Česká Republika

Vzdělání:

13. 11. 2019 – 27. 11. 2019

ACSA - Zvyšování znalosti v oblasti projektového řízení ve vědě a výzkumu,

Číslo kurzu: P1354

01. 09. 2015 – DOSUD

UTB ve Zlíně, Fakulta Technologická – EQF 8,

Obor/specializace: Nástroje a procesy

Disertační práce: Vývoj a konstrukční řešení kompozitních pružin

16. 07. 2013 – 02. 06. 2015

UTB ve Zlíně, Fakulta Technologická – EQF 7,

Obor/specializace: Výrobní inženýrství

13. 07. 2010 – 12. 06. 2013

UTB ve Zlíně, Fakulta Technologická – EQF 6,

Obor/specializace: Procesní inženýrství

Pracovní zkušenosti:

01. 01. 2020 – DOSUD

UTB ve Zlíně, Centrum polymerních systémů,

Pozice: Výzkumný projektový pracovní

NPU I LO1504 – Centrum pokročilých a kompozitních materiálů

TE04020466 – REAKTIN – Dlouhovláknové kompozity pro sériovou výrobu

01. 09. 2019 – DOSUD

UTB ve Zlíně, Fakulta Technologická,

Pozice: Akademický pracovník – Asistent

01. 09. 2019 – 31. 12. 2019

UTB ve Zlíně, Centrum polymerních systémů,

Pozice: Výzkumný projektový pracovní

NPU I LO1504 – Centrum pokročilých a kompozitních materiálů

TE01020216 – Centrum pokročilých a kompozitních materiálů

01. 02. 2019 – 31. 08. 2019

UTB ve Zlíně, Centrum polymerních systémů,

Pozice: Výzkumný projektový pracovník

TE01020216 – Centrum pokročilých a kompozitních materiálů

01. 08. 2018 – 31. 01. 2019

Mezinárodní mobilita - Fraunhofer ICT,

Mezinárodní mobilita výzkumných pracovníků UTB ve Zlíně,
CZ.02.2.69/0.0/0.0/16_027/0008464

01. 04. 2016 – 30. 07. 2018

UTB ve Zlíně, Centrum polymerních systémů,

Pozice: Výzkumný projektový pracovník

NPU I LO1504 – Centrum pokročilých a kompozitních materiálů

TE01020216 – Centrum pokročilých a kompozitních materiálů

Výuka v předmětech:

T1PR – Základy výrobních procesů

T1CD/TQCD – Úvod do CAD

T1TK1 – Technické kreslení I

T5ZIK – Zpracovatelské inženýrství kompozitů

T7VKM – Vlastnosti kompozitních materiálů

T9KJS – Konstrukce jednoúčelových strojů

AQING – Inženýrská grafika

TK8OS – Oborový seminář

TQPK1 – Počítačová podpora konstrukce I

Rok 2016, 2017, 2018:

Funkce hlavního řešitele projektu IGA (Interní grantové agentury)

Ing. Lukáš Maňas, Ph.D.

Vývoj a konstrukční řešení kompozitních pružin

Development and Construction Solution of Composite Springs

Teze disertační práce

Vydala Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně,
nám. T. G. Masaryka 5555, 760 01 Zlín

Náklad: vyšlo elektronicky

Sazba: autor

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

Rok vydání 2020

Pořadí vydání: první

ISBN 978-80-7454-945-8