



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav automobilů, spalovacích motorů
a kolejových vozidel

Návrh skladby kompozitní struktury pro vůz
Formula Student

Composite structure layup design for Formula
Student car

DIPLOMOVÁ PRÁCE
2022

Bc. Jiří ZELENÝ

Studijní program: N0716A270001 – Dopravní a transportní technika

Studijní obor: N071TMVO – Motorová vozidla

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Pacoň

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zelený** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **461822**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Dopravní a transportní technika**
Specializace: **Motorová vozidla**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh skladby kompozitní struktury pro vůz Formula Student

Název diplomové práce anglicky:

Composite structure layup design for Formula Student car

Pokyny pro vypracování:

1. Navrhněte zátěžné stavy pro stanovené okrajové podmínky.
2. Navrhněte vzorky pro testování různých skladeb kompozitu.
3. Navrhněte metodu testování zkušebních vzorků.
4. Zkušební vzorky vyrobte a proveďte zkoušku.
5. Zkušební měření podrobte analýze a zvolte nejvhodnější skladbu s ohledem na vstupní okrajové podmínky

Seznam doporučené literatury:

Milliken, William F., and Douglas L. Milliken. Race Car Vehicle Dynamics. Warrendale, Pa: Society of Automotive Engineers, 1995.
LAŠ, Vladislav. Mechanika kompozitních materiálů. 2., přeprac. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008. ISBN 978-80-7043-689-9.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

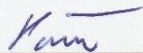
Ing. Lukáš Pacoň, ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

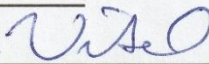
Datum zadání diplomové práce: **29.10.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **05.01.2022**

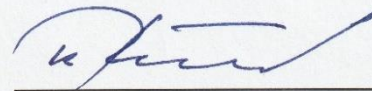
Platnost zadání diplomové práce:



Ing. Lukáš Pacoň
podpis vedoucí(ho) práce



doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



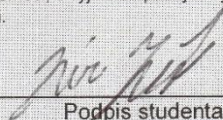
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

16.11.2021

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Anotační záznam

Jméno autora:	Bc. Jiří Zelený
Název práce:	Návrh skladby kompozitní struktury pro vůz Formula Student
Anglický název:	Composite structure layup design for Formula Student car
Rozsah práce:	125 stran 65 obrázků 30 tabulek 12 grafů
Akademický rok:	2021/2022
Ústav:	12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
Studijní program:	N0716A270001 – Dopravní a transportní technika
Vedoucí práce:	Ing. Lukáš Pacoň
Klíčová slova:	Kompozity, sendvičový panel, Formula Student, auto, monokok
Key words:	Composites, sandwich panel, Formula Student, car, monocoque

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem skladby kompozitní struktury pro vůz Formula Student, který nahradí stávající skladbu kompozitní struktury monokoku, a to za dodržení pravidel FSAE. První část popisuje soutěž Formula Student včetně týmu CTU CarTech. Další část se zabývá historickým vývojem bezpečnosti karosérií, prostorových trubkových rámců a monokoků, přičemž následně uvádí důležitá pravidla pro navržení rámců a monokoků a pevnostní nároky na ně. Následně práce rozebírá kompozitní materiály, zejména sendvičové konstrukce a její části. Další část práce se věnuje výrobním procesům kompozitních materiálů, mikromechanice kompozitních materiálů a stávající skladbě monokoku a parametrům skladeb. Poté jsou vybrány materiály a jejich testování, na které navazuje návrh nových skladeb na základě analytického a MKP výpočtu. Posléze jsou tyto skladby otestovány a přiřazeny oblastem monokoku, které jsou v souladu s výpočtovým dokumentem SES. Závěr práce je věnován shrnutí získaných výsledků a jejich přínosům.

Abstract

The thesis is examining the design of a composite structure for the Formula Student car to replace the existing layout of a composite structure of monocoque, complying with the FSAE rules. The first part of the thesis describes the Formula Student competition as well as the CTU CarTech team. The next chapter analyses the historical development of safety of bodyworks, space tube frames and monocoques, outlines important rules for a frame, monocoque design and strength requirements. Furthermore, the thesis examines composite materials, particularly sandwich construction and its parts. The following part of the thesis focuses on the manufacturing processes of composite materials, micromechanics of composite materials, and existing monocoque layout and layout parameters. Moreover, selected materials are tested, followed by the suggestion of the design of a new layout based on analytical and FEM calculations. These layouts are further tested and linked to parts of the monocoque with the consideration of the SES calculation document. The conclusion of the thesis summarizes obtained results and their contributions.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: „Návrh skladby kompozitní struktury pro vůz Formula Student“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitolu této práce.

V Praze dne: 5. 1. 2022

.....

(podpis autora)

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Lukáši Pacoňovi za vedení mé diplomové práce, konzultace, odborné a cenné rady při jejím zpracování.

Dále děkuji týmu CTU CarTech za možnost výroby vzorků, LA Composite a jejich zaměstnancům za konzultace a veškerou pomoc při jejich tvorbě. Touto cestou bych rád poděkoval Ing. Karlovi Doubravovi Ph.D. za pomoc při testování všech vyrobených vzorků. Nadále bych rád poděkoval Ing. Bc. Zdeněku Padovcovi Ph.D. za odborné rady a konzultace při vzniku analytického výpočtového programu.

Zvláštní poděkování bych věnoval své rodině a nejbližším, za všechnu morální a finanční podporu během celého studia, bez kterých by tato práce nemohla vzniknout.

Obsah

Úvod.....	11
Cíl práce.....	11
1. Soutěž Formula SAE a Formula Student.....	12
1.1. Statické disciplíny.....	13
1.1.1. Technická přejímka.....	13
1.1.2. Prezentace podnikatelského plánu	13
1.1.3. Náklady na výrobu a výroba	13
1.1.4. Technický návrh.....	14
1.2. Dynamické disciplíny.....	14
1.2.1. Skid Pad	14
1.2.2. Akcelerace	14
1.2.3. Autocross.....	14
1.2.4. Vytrvalostní závod	15
1.2.5. Spotřeba paliva.....	15
1.3. Studentský tým CTU CarTech.....	15
2. Karoserie	16
2.1. Pasivní bezpečnost.....	16
2.2. Historie experimentů v pasivní bezpečnosti.....	17
2.3. Prostorový trubkový rám	17
2.4. Prostorový trubkový rám ve Formula Student	18
2.5. Historie monokoku	19
2.6. Monokok z hliníkových sendvičových panelů.....	20
2.7. Monokok v CTU CarTech.....	21
3. Vybraná pravidla Formula SAE	22
3.1. Vybraná pravidla části šasi.....	23
3.1.1. Hlavní oblouk – MH	23
3.1.2. Výztuha hlavního oblouku – MHB	23
3.1.3. Podpora výztuhy hlavního oblouku – BMHS	23
3.1.4. Přední oblouk – FH	23
3.1.5. Výztuhy předního oblouku – FHB.....	24
3.1.6. Přední přepážka – FB	24
3.1.7. Podpora přední překážky – FBSS.....	24

3.1.8.	Boční nárazová struktura – SIS	24
3.2.	Materiálové požadavky trubkového rámu	25
3.3.	Předepsané požadavky a síly zatěžující kompozitní monokok	25
3.3.1.	Šroubové přípojné body primární konstrukce	25
3.3.2.	Uchycení bezpečnostních pásů	26
3.4.	Testování sendvičových panelů monokoku	26
3.4.1.	Tříbodová ohybová zkouška	26
3.4.2.	Obvodová smyková zkouška.....	27
4.	Kompozitní materiály	27
4.1.	Sendvičová konstrukce	28
4.1.1.	Jádra.....	29
4.1.2.	Potahy.....	34
4.1.3.	Vzájemná slučitelnost vlákna a matrice	39
4.1.4.	Formy vláken	39
4.1.5.	Matrice	43
5.	Výrobní procesy.....	45
5.1.	Ruční kladení.....	46
5.2.	Vrstvení prepregu	47
5.3.	Vakuové formování.....	48
5.4.	Autoklávové zpracování.....	48
5.5.	Tlakové lisování.....	49
5.6.	Vakuové vstřikování pryskyřice	50
5.7.	Pultruze	51
5.8.	Navíjení vláken	52
6.	Mikromechanika kompozitů	54
6.1.	Materiálové charakteristiky vlákových kompozitů	54
6.1.1.	Podélný modul pružnosti v tahu a podélná pevnost.....	56
6.1.2.	Kritický objemový podíl vláken.....	59
6.1.3.	Minimální objemový podíl vláken	60
6.2.	Laminátová teorie	60
6.3.	Způsob skládání laminátu	64
6.3.1.	Symetrické lamináty	65
6.3.2.	Vyvážené symetrické lamináty	65

6.3.3.	Symetrické křížově vrstvené lamináty.....	66
6.4.	Sendvičová teorie s uvažováním smyku	66
6.5.	Mechanismy porušování kompozitních materiálů	70
6.5.1.	Porušování kompozitu podélným tahovým namáháním	70
6.5.2.	Porušení kompozitu podélným tlakovým namáháním	71
6.5.3.	Porušení kompozitu příčným tahovým namáháním	72
6.5.4.	Porušení kompozitu příčným tlakovým namáháním.....	73
6.5.5.	Porušení kompozitu smykem	73
6.6.	Makromechanická kritéria	73
6.6.1.	Neinteraktivní kritéria	75
6.6.2.	Interaktivní kritéria	75
7.	Stará skladba monokoku	79
8.	Structural Equivalency Spreadsheet (SES)	82
8.1.	Srovnání kompozitové struktury s ocelovými profily	82
9.	Výběr materiálu.....	84
9.1.	Vybrané materiály a jejich mechanické vlastnosti	84
10.	Testování vzorků – tahová zkouška.....	86
10.1.	Tahová zkouška ASTM D3039 /D3039M-08.....	86
10.1.1.	Příprava vzorků.....	87
10.1.2.	Testování vzorků.....	88
10.1.3.	Výsledky testů.....	90
10.1.4.	Mechanické vlastnosti uhlíkových materiálů	91
11.	Návrh nových skladeb	92
11.1.	Analytický výpočet sendvičovou teorií s uvažovaným smykem jádra	92
11.1.1.	Vstupní data.....	92
11.1.2.	Výpočet matice tuhosti.....	93
11.1.3.	Výpočet transformované matice tuhosti	93
11.1.4.	Vyšetření průhybu vzorku	94
11.2.	Výpočet skladby metodou konečných prvků	94
11.3.	Navržené skladby	97
12.	Výroba vzorků.....	97
13.	Testy vzorků	99
13.1.	Tříbodová ohybová zkouška laminátu	100

13.2.	Smyková zkouška laminátu	105
14.	Nová skladba monokoku	108
15.	Výsledky skladby monokoku	111
15.1.	Srovnání analytických a MKP výpočtů s experimentem	111
15.2.	Nově navržená skladba monokoku	112
15.3.	Srovnání hmotností starých a nových skladeb a celého monokou.....	114
15.4.	Srovnání spotřeby materiálu	115
Závěr	Závěr	116
Použitá literatura	Použitá literatura	118
Seznam obrázků.....	Seznam obrázků.....	120
Seznam tabulek	Seznam tabulek	122
Seznam grafů	Seznam grafů	123
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	124

Úvod

V dnešní době nacházejí sendvičové konstrukce díky svým unikátním vlastnostem stále větší uplatnění v automobilovém průmyslu. Unikátnost sendvičových konstrukcí spočívá v jejich vysoké ohybové pevnosti a tuhosti při zachování nízké hmotnosti oproti jinému technickému řešení. Podstatnou výhodou je možnost navrhnout konstrukci tak, aby v různých místech a v různých směrech měla jiné mechanické vlastnosti. Těchto vlastností se využívá při konstrukci závodních vozů jako jsou vozy pro studentskou soutěž Formula Student. Na vývoji a výrobě vozu týmu CTU CarTech se podílejí jeho členové a studenti Českého vysokého učení technického v Praze, zejména Fakulty strojní. První vůz byl sestrojen v roce 2009 a od té doby se každý rok vyvíjí nový, až po již sestrojený vůz FS.13. Vozy se každoročně porovnávají na mezinárodních soutěžích s vozy jiných studentských týmů z celého světa. Všechny předchozí monokoky byly vyrobeny z uhlíkových vláken se standardním modulem. Teď je snaha je nahradit uhlíkovými vlákny s lepším modulem. Jejich použitím lze snížit hmotnost monokoku, a tím i celého auta. Monokok je jednolitá skořepina, která je hlavním konstrukčním článkem vozu.

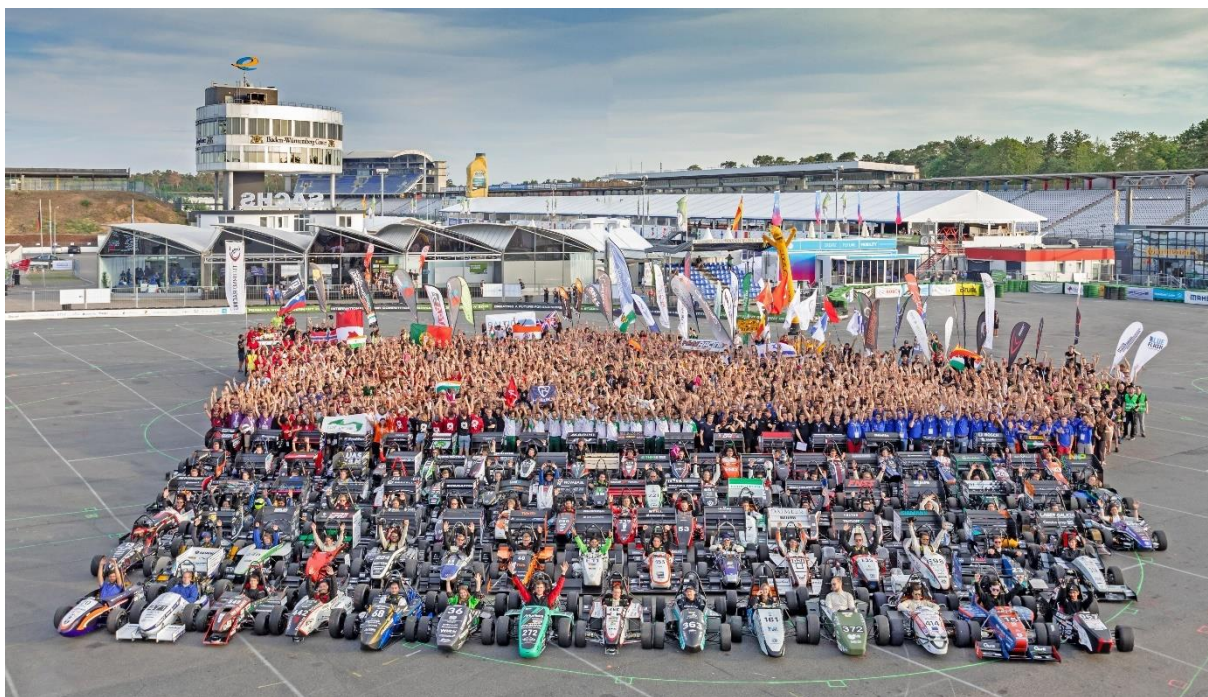
Cíl práce

V úvodu této práce předkládám několik cílů, které byly stanoveny, aby výsledná skladba byla přínosná pro tým a odpovídala jejich požadavkům. Těmito požadavky jsou splnění pravidla soutěže FSEA, úspory hmotnosti, a aby navrhnuté řešení bylo v možnostech týmu.

- 1) Navrhnete zátěžové stavy pro stanovené okrajové podmínky.
- 2) Navrhnete vzorky pro testování různých skladeb kompozitu.
- 3) Navrhnete metodu testování zkušebních vzorků.
- 4) Zkušební vzorky vyrobte a provedte zkoušku.
- 5) Zkušební měření podrobte analýze a zvolte nejvhodnější skladbu s ohledem na vstupní okrajové podmínky.

1. Soutěž Formula SAE a Formula Student

Formula Student vznikl z původní americké soutěže Formula SAE. Jde o významnou studentskou soutěž univerzitních týmů. Tým je složen ze studentů z bakalářského i magisterského studia. Počátky soutěže jsou v USA, kdy se v roce 1981 konaly první studentské závody. V Evropě se soutěž objevuje v roce 1998, a to konkrétně ve Velké Británii. Od roku 2013 jsou pravidelně konány i jedny závody v České republice. Jelikož existuje mnoho týmů po celém světě, tak jsou závody konány třeba i v Japonsku, Austrálii, Indii, Jižní Koreji, Thajsku a Brazílii. Celosvětově je do soutěže zapojeno přes 800 týmů ve třech kategoriích. [1]



Obr. 1 – Závodní týmy na soutěži Formula Student Germany [2]

Úkolem týmů je postavit jednomístné závodní auto, se kterým mohou soutěžit s ostatními týmy. Závod nevyhrává pouze tým s nejrychlejším vozem, ale tým s nejlepším celkovým konstrukčním řešením, výkonem, jakož i finančním a obchodním plánem. Formula Student je pro členy týmu výzvou k tomu, aby udělali další krok ve svém vzdělávání tím, že do něj zahrnou nabyté zkušenosti s konstrukcí, výrobou a také důležité ekonomické aspekty. Týmy vycházejí z předpokladu, že jsou výrobci vyvíjející prototyp, který má jít do výroby. Cílovou skupinou jsou neprofesionální víkendoví závodníci. Závodní auto musí vykazovat velmi dobré jízdní vlastnosti, jako je zrychlení, brzdění a ovladatelnost. Mělo by se nabízet za velmi rozumnou cenu a mělo by být spolehlivé. Úkolem týmu je sestavit nabídku složenou z dobře zkonstruovaného závodního auta, prodejního a výrobního plánu na 1000 vozů, který co nejlépe odpovídá těmto daným kritériím. O výběru nejlepšího vozu rozhoduje porota složená z odborníků z oblasti motoristického sportu, automobilového průmyslu a dodavatelů. Porota

hodnotí konstrukční vyspělost auta, finanční a obchodní plán na základně prezentace týmů. Zbytek hodnocení probíhá na trati, kde studenti v řadě výkonnostních tesů předvedou, jak dobře si jejich vlastnoručně postavená auta vedou v reálném prostředí.

Tyto disciplíny jsou rozděleny do dvou kategorií. První kategorií jsou statické disciplíny a druhou kategorií jsou dynamické disciplíny. Ty může vůz absolvovat až poté, co dostane povolení od všech stanovišť technických přejímek.

1.1. Statické disciplíny

Aby se studenti blíže seznámili s interdisciplinárním přístupem dnešního automobilového průmyslu jsou do soutěže zahrnuty nejen disciplíny, kde studenti potřebují technické znalosti, ale i ekonomické a komunikační schopnosti, jako jsou prezentační techniky nebo dovednosti finančního plánování. Proto tři statické soutěže vyžadují spolupráci napříč týmem v oblastech designu a uspořádání, konstrukce, marketingu a cenotvorby výrobku. Vyžadují také specializované odborné znalosti z různých technických a finančních studijních oborů. Každá jednotlivá akce má jinou váhu. [1]

1.1.1. Technická přejímka

Jedná se o kontrolu technické způsobilosti vozů podle aktuálních pravidel dané soutěže. Náklon vozu, kde se zkoumá únik provozních kapalin. Zkouška hluku, kde se posuzuje hlučnost výfuku, který nesmí přesáhnout stanovenou hlukovou hladinu. Poslední je zkouška brzd, kde se kontroluje funkce brzd a po dobu testu se auto nesmí při brždění vychýlit z přímého směru. [1]

1.1.2. Prezentace podnikatelského plánu

Každý tým představí svůj podnikatelský plán pro zkonstruovaný prototyp fiktivní společnosti zastoupené porotci. Během desetiminutové prezentace musí tým prokázat, proč jeho návrh nejlépe splňuje požadavky cílové skupiny, a ukázat, jak lze jeho návrh úspěšně prodat. Po prezentaci následuje pětiminutová diskuse a kolo otázek porotců. V něm se hodnotí obsah, struktura i úprava prezentace a výkon týmu při přednesu, stejně jako odpovědi na otázky poroty. [1]

1.1.3. Náklady na výrobu a výroba

Náklady jsou jedním z rozhodujících faktorů při navrhování vozu. V rámci analýzy nákladů se týmy musí vypořádat s výpočtem velikosti vozidla, jeho jednotlivých součástí a nezbytných výrobních kroků a vše zaznamenat do písemné zprávy o nákladech. Studenti pak musí odpovědět na otázky porotců týkající se zprávy o nákladech na jejich prototypový vůz. Kromě posouzení důkladnosti písemné zprávy se hodnotí i to, jak studenti rozumí výrobnímu procesu a výpočtu celkových nákladů. [1]

1.1.4. Technický návrh

Na začátku soutěže technických návrhů musí studenti odevzdat technický popis svého vozu. Z dokumentů musí být patrný jak jejich návrh, tak i způsob, jakým bude návrh aplikován na jimi zvolenou konstrukci. Na základě těchto dokumentů hodnotí členové poroty uspořádání, technický návrh, konstrukci a realizaci výroby skutečného vozidla. Poté probíhá diskuse, v níž jsou týmy porotci dotazovány. Tyto diskuse se zaměřují na objasnění technických detailů, zkoumání myšlení, které stojí za zvolenou konstrukcí, a také na odpovídající technické znalosti studentů. Při hodnocení se posuzuje nejen kvalita daného technického řešení, ale také důvody, které za ním stojí. [1]

Tabulka 1 – Rozdělení bodů u statických disciplín [1]

Statické disciplíny	Body
Technická přejímka	0
Prezentace podnikového plánu	75
Náklady na výrobu a výroba	100
Technický návrh	150
Celkem	325

1.2. Dynamické disciplíny

Vozy, které studenti navrhnou, se nehodnotí pouze při stání. Testují se také jejich schopnosti na závodní dráze. Každá dynamická disciplína testuje různé vlastnosti vozidel. Kromě maximálního podélného a příčného zrychlení jsou zkoumány a hodnoceny závodní vlastnosti, účinnost a výdrž formulových vozů. Při akceleračních závodech, Skid Padiu a autokrosu startuje každý vůz se dvěma jezdci, z nichž každý má povoleny dva pokusy. Nejlepší pokus je ten, za který bude vůz bodován. [1]

1.2.1. Skid Pad

Během disciplíny Skid Pad musí vozy projet okruh o tvaru osmičky lemovaný kužely na trati a každý okruh projet dvakrát. V každém případě se měří druhé kolo. Čas na kolo poskytuje srovnávací hodnotu pro maximální možné boční zrychlení vozu. Stejně jako ve všech dynamických soutěžích má i zde přejetí některého z kuželů za následek časovou penalizaci. [1]

1.2.2. Akcelerace

V disciplíně akcelerace se měří zrychlení vozidla z místa na rovince dlouhé 75 metrů. [1]

1.2.3. Autocross

V autokrosu vozy absolvují kilometr dlouhou trať s rovinkami, zatáčkami a šikanami. Trať je velice rozmanitá, takže vůz prověří z hlediska schopností jízdní dynamiky, přesnosti řízení, dobré akcelerace a brzdného účinku. Opět dochází k časovým penalizacím pro ty, kteří srazí některý z kuželů. Pořadí v autokrosu rozhoduje o startovních pozicích pro následnou vytrvalostní soutěž. [1]

1.2.4. Vytrvalostní závod

Vytrvalostní závod je hlavní disciplínou, která umožňuje získat nejvyšší počet bodů. Na trati dlouhé 22 kilometrů musí vozy prokázat své vlastnosti v krajních podmínkách, pro které byly navrhovány po dlouhou dobu, a to konkrétně zrychlení, rychlost, ovladatelnost, dynamiku, spotřebu paliva a spolehlivost. Endurance vyžaduje také dobré schopnosti ovládání vozu řidiče, protože na trati mohou být až čtyři vozy najednou. Každý tým má pouze jeden pokus a jezdci se střídají po 11 kilometrech. Hodnotí se kumulativní čas obou řidičů po průjezdu všech kol. [1]

1.2.5. Spotřeba paliva

Během vytrvalostního závodu se přesně zaznamenává spotřeba paliva. Pro výpočet skóre efektivity se však nepoužívá absolutní spotřeba paliva a energie, ale spotřeba vztažená k rychlosti. To má zabránit tomu, aby týmy jezdily ve vytrvalostním závodě obzvláště pomalu, s cílem získat co nejvyšší počet bodů v kategorii účinnosti. [1]

Tabulka 2 – Rozdělení bodů dynamických disciplín [1]

Dynamické disciplíny	Body
Skid Pad	75
Akcelerace	75
Autocross	100
Vytrvalostní závod	250
Spotřeba paliva	100
Celkem	525

Soutěž vyhrává tým s nejvíce získanými body z 1000 maximálně možných. To ovšem nemusí být pouze nejrychlejší vůz, jak je vidět z bodové struktury závodu.

1.3. Studentský tým CTU CarTech

Jak již bylo uvedeno výše, tým CTU CarTech je vysokoškolský tým Českého vysokého učení technického v Praze na Fakultě strojní. Je to první formulový tým v Česku se spalovacím motorem. Od roku 2007, kdy byl tým založen, se pravidelně účastní této soutěže. Tým se skládá zhruba z 30 studentů naší školy, a to jak z bakalářského, tak i magisterského studia. Tým je rozčleněn do několika skupin, které mezi sebou spolupracují a snaží se vyvinout a vyrobit co nejvíce technicky dokonalé závodní auto. V roce 2013 byl prostorový trubkový rám nahrazen uhlíkovým monokokem a malým trubkovým rámem, kde je uchycen motor s hnanou zadní nápravou. Tento koncept nosné struktury stále přetrvává až do dnešní doby. [3]



Obr. 2 – Vůz FS.13 týmu CTU CarTech [3]

2. Karoserie

Karosérie je jednou z nejsložitějších sestav vozidla. Kromě toho, že se jedná o složitý kus konstrukce, je to také prvek, který je nejvíce spojen s celkovou architekturou vozidla a jeho vzhledem. Karosérie vozidla má čtyři hlavní funkce:

- 1) Chránit cestující a náklad.
- 2) Zjistit příchytné body pro všechny ostatní hlavní součásti a rozdělit napětí mezi nimi.
- 3) Dávat vozidlu atraktivní a funkční vzhled.
- 4) Poskytnout aerodynamický tvar pro snížení odporu vzduchu a hluku.

Karosérie snad téměř všech vyráběných automobilů jsou vyrobeny z lisované oceli. Některá prémiová vozidla nahrazují ocel lisovaným hliníkem. V posledních desetiletích se začala používat uhlíková vlákna, a to zejména u lehkých sportovních vozů. Tyto materiály jsou velmi lehké, pevné, tuhé, což má za následek nižší hmotnost při zachování požadovaných vlastností karosérie. Často jsou používány ve spojení s jinými materiály k vytvoření tuhé a lehké karoserie. [4]

Ve Formula Student jsou používány dvě koncepce karosérie. První je prostorový trubkový rám a druhou je monokok.

2.1. Pasivní bezpečnost

Cílem oboru pasivní bezpečnosti je omezení následků nehod. První studie na téma pasivní bezpečnosti jsou spojeny s kanadským vojenským pilotem Hugh de Havenem, který přežil

srážku letadla, které pilotoval s jiným letadlem v nízké výšce. Srážku letadel přežil pouze Haven. Tato skutečnost ho přivedla k zamyšlení, proč přežil pouze on. Vysvětlení hledal na poli mechaniky. Přišel na to, že přežil díky tomu, že jeho kokpit nebyl silně zdeformován a letadlo dopadlo na křídlo, které vytvořilo deformační zónu. Později se zasloužil o zvýšení bezpečnosti provozu, doporučil instalování bezpečnostních pásů a nošení helmy ze strany pilotů. Stal se tvůrcem konceptu ochrany pasažérů „passenger packeaging“, který je platný do dnes. Koncept říká: měli bychom pasažéra obklopit strukturou, která se v případě nárazu dokáže deformovat, tedy dokáže změnit kinetickou energii nárazu do jiné formy energie. A dokáže jí zastavit na rozumné vzdálenosti. [5]

Dalším důležitým jménem v této oblasti je John Paul Stapp. Věnoval se zvýšení bezpečnosti pilotů a kosmonautů. Snažil se zjistit limity únosnosti lidského těla a vytvořil první testovací figurínu. Experimentoval se saňovou dráhou a zjistil, že připoutáním má pasažér výrazně vyšší šanci přežít než pasažér, který připoután není. Na základě toho doporučil používat bezpečnostní pásy v autě. [5]

2.2. Historie experimentů v pasivní bezpečnosti

Prvním, kdo se začal zabývat experimenty pasivní bezpečnosti v automobilové průmyslu, byl Auto Union (dnes Audi). V letech 1938-1941 existoval program na experimentální nárazové zkoušky za účelem zjištění, jaký vliv na pevnost vozidel by mělo použití lehkých materiálů, především platů a dřeva. Sestavili první metodiky pro zkoušení čelního nárazu, bočního nárazu, nárazu na kůl a převrácení vozidla. [5]

Důležitý koncept při navrhování vozidel zavedl Béla Barényi. Vymyslel koncept vozidla, kde je karosérie rozdělena do dvou odlišných oblastí. Jednou je kokpit vozidla, jejíž konstrukce by měla být co nejužší, tedy nepoddajná, aby definovala pozici zádržných systémů a kinematiku posádky v případě nárazu. Druhou oblastí jsou deformační zóny, které se nachází kolem kokpitu. Mají za úkol na vhodně dlouhých drahách pohlcovat kinetickou energii nárazu. [5]

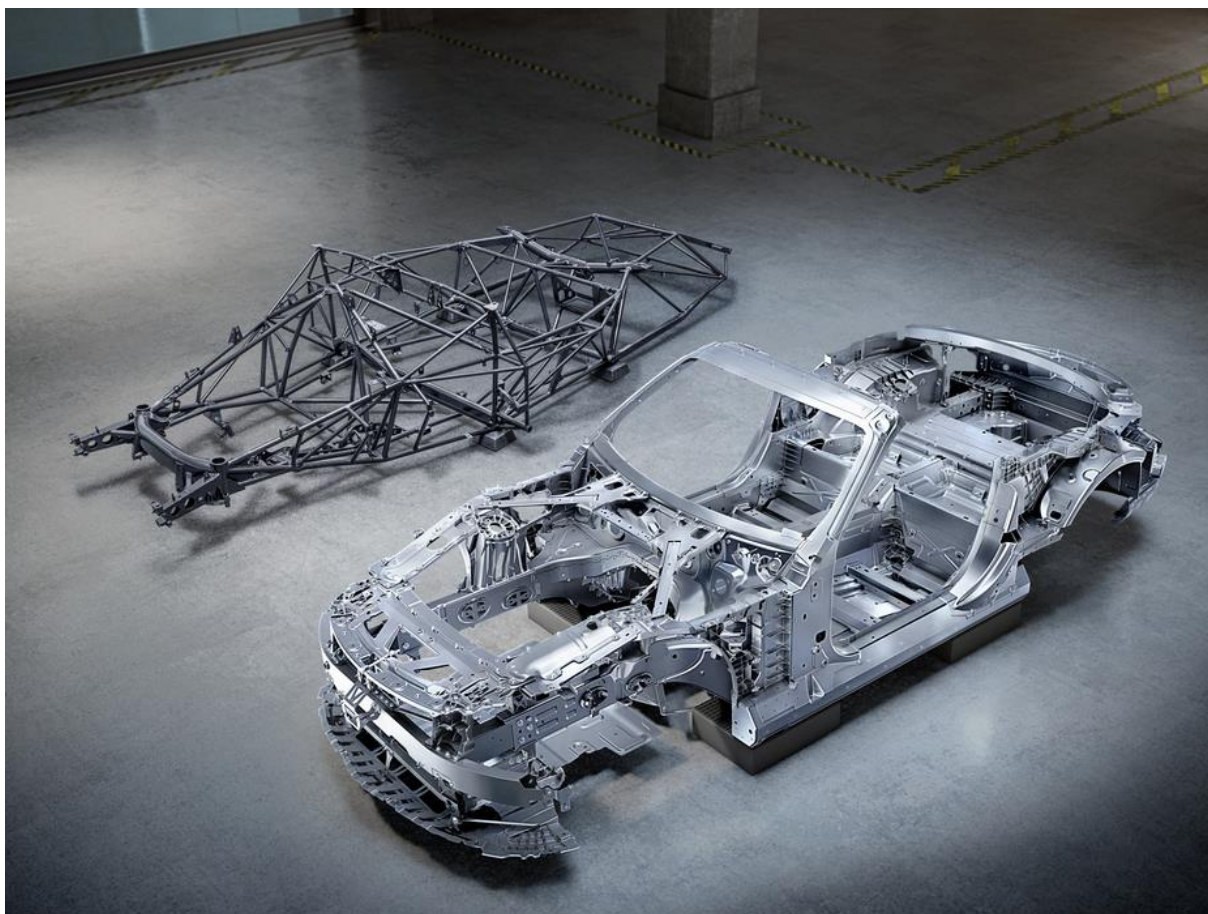
Obdobné principy jsou používány i ve Formula Student. Jako příklad vyžadované deformační zkoušky deformačního prvku umístěného na předku vozidla, nebo tříbodové zkoušky ocelových profilů nebo kompozitních sendvičových laminátů ze kterých se skládá kokpit vozu. [5]

2.3. Prostorový trubkový rám

Pro zlepšení tuhosti závodních vozů byl inženýry vyvinut třírozměrný rám – trubkový prostorový rám. Jeho konstrukce se skládá z ocelových nebo hliníkových trubek umístěných v trojúhelníkovém formátu, aby nesly zatížení od zavěšení, motoru, řidiče a aerodynamických sil. Skutečný prostorový rám má malé trubky, které jsou zatíženy pouze v tahu nebo tlaku, ale nemá žádné trubky zatížené v ohybu nebo krutu. To znamená, že každý nosný bod musí být

podepřen ve třech rozměrech. Podvozek s trubkovým prostorovým rámem využívá desítek trubek kruhového průřezu, které jsou umístěné v různých směrech, aby zajistily mechanickou pevnost proti silám, které na něj působí z jakéhokoliv směru. [6]

Na začátku 50. let vytvořil Mercedes-Benz závodní vůz 300SRL využívající trubkový prostorový rám. Ten také vytvořil první silniční vůz s trubkovým prostorovým rámem známý 300SL Gullwing. Protože práh dveří omezil přístup do kabiny, musely být dveře prodlouženy až na střechu. Výhoda prostorových trubkových rámu je, že se jednoduše kontrolují a opravují na rozdíl od monokokových podvozků. [6]



Obr. 3 – Karosérie Mercedes-AMG SL [7]

2.4. Prostorový trubkový rám ve Formula Student

Nezákladnějším a nejjednodušším konstrukčním řešením formule je prostorový trubkový rám. Jedná se o příhradovou konstrukci, která se skládá z k sobě svařených tenkostěnných ocelových profilů. Většinou se jako tenkostěnný profil používá kruhový průřez. Důvodem použití tohoto řešení je jednodušší výroba i cena materiálu. Pomocí laserového pálení jsou trubky předpřipraveny na požadované délky i s jejich natvarovanými konci. Ty jsou zakládány do přípravku tak, aby po vložení všech daných trubek a následném jejich svaření k sobě byl vytvořen prostorový rám tak, jak je navržen. Laser je použit z důvodu přesnosti řezání. A jako

přípravek je použit tlustý ocelový plech, do kterého jsou také vyřezány otvory pro sestavení přípravku a samotné trubky. Přípravek musí být dostatečně tuhý, aby při svařování rámu poskytoval fixaci trubek a nekroutil se. Tímto způsobem je vyroben i námi používaný malý trubkový rám, který se připevňuje k zadní části monokoku a je k němu připevněn mimo jiné motor, rozvodové ústrojí, zadní nápravy, vodní a olejové hospodářství.

Příhradové trubkové rámy, které se v týmu CTU CarTech používaly do čtvrté generace monopostu, dosahují pouze určité torzní tuhosti. Torzní tuhost lze zvýšit lepším uspořádáním trubek v konstrukci nebo zvětšením profilů. Minimální materiálové požadavky na materiály vychází ze zadaných pravidel, které se musí dodržovat při stavbě celého auta a jsou následně kontrolovány na závodech. Tyto příhradové trubkové konstrukce se u týmů využívají zejména pro jejich levnější výrobu oproti sendvičovému laminátovému monokoku a pro nepříliš náročnou technologii výroby.

2.5. Historie monokoku

Jedny z prvních zmínek o monokoku jsou datované do roku 1912, kdy výrobce letadel Aéroplanes Deperdussin postavil zvláštní závodní letadlo. Letadlo využívalo monokok slepený z dvou polovin, kde jádro bylo vyrobeno ze dřeva, potaženo dvěma vrstvami dřeva o tloušťce přibližně čtyři milimetry orientované pod různými směry.

U osobních automobilů se poprvé setkáváme s monokokem v roce 1923 u automobilky Lancia a jejich vozem Lambda. O velkosériové výrobě můžeme hovořit u vozu Nash 600 z roku 1941, kde byla použita při jeho konstrukci technika unifikované karosérie a rámu. Karosérie a rám byly svařeny v jeden celek. [8]

V kategorii motorsportu přišel první s monokokem závodní tým Lotusu v závodech Formule 1 v roce 1962. Vůz obsahující hliníkový monokok byl Lotus 25. Návrh přinesl větší torzní tuhost při nižší hmotnosti. O devatenáct let později tým McLaren představil první monokok vyrobený z uhlíkových vláken a hliníkovou voštinou jako jádro ve voze Lotus MP4/1, s kterým se také účastnil závodů soutěže Formule 1. Hlavní výhodou byla vysoká tuhost při zachování hmotnosti. Ten se rychle rozšířil i mezi ostatní týmy soutěže. Uhlíkový monokok měl také veliký vliv na bezpečnost závodů. [8]



Obr. 4 – Monocoque McLaren MP4/1 [9]

Konstruktéři se obávali schopnosti uhlíkových kompozitů odolávat velkým kolizím. V roce 1981 na velké ceně Itálie havaroval John Watson ve svém McLarenu a prudce narazil do bariéry. Od nehody dokázal odejít bez výrazného zranění. Tento incident rozptýlil veškeré pochybnosti o bezpečnosti kompozitů z uhlíkových vláken při zatížení rychlosti deformace.

Snaha o zlepšení bezpečnosti vyústila ve vývoj nových používaných materiálů a nových technologií pro výrobu. S počítači se začaly uplatňovat analýzy konečných prvků, aby se zjistilo, jak lépe využít dostupných materiálů pro lepší ochranu proti nárazu. [8]

2.6. Monokok z hliníkových sendvičových panelů

Monokoky se nadále vyrábějí i z hliníkových sendvičových panelů. Ty jsou tvořeny jádrem z hliníkové voštiny a dvěma hliníkovými potahy, které jsou umístěny po každé straně jádra. Jádro s potahy jsou spolu slepeny fóliovým lepidlem. Toto konstrukční řešení poskytuje vysokou tuhost a pevnost a zároveň si zachovává nízkou hmotnost. Toto řešení používají některé týmy jako například Cardiff Racing nebo Oxford Brookes Racing z Velké Británie. Používá se především díky jednoduché a levné výrobě panelů a následného monokoku. Ten se vyrábí pomocí předem přesně vyřezaných hliníkových panelů a následnému slepení k sobě nebo použitím nýtů a vyztužení těchto spojů dalšími lepenými spoji za použití dvousložkových epoxidových lepidel. Jedná se o rychlou a levnou operaci, která přináší přesné výsledky. Není k tomu potřeba žádné specializované nářadí ani vybavení. Nespornou výhodou je následná

recyklace po dosažení konce životnosti konstrukce. Nevýhodou je výsledné tvarové provedení monokoku s ohledem na využívání sendvičových desek a tím přinášející hmotnost navíc při každém spoji. [10]



Obr. 5 – Monokok z hliníkových panelů týmu Oxford Brookes Racing [11]

2.7. Monokok v CTU CarTech

Jak již je zmíněno výše, první auto s uhlíkovým monokokem, které bylo postaveno týmem CTU CarTech, bylo v roce 2013 vůz FS.05. Postup výroby byl navržen tak, že se laminovaly dvě poloviny monokoku zvlášť a po jejich dokončení se přilepily a přelaminovaly k sobě. Jako jádro byla využívána pěna od společnosti Rohacell, se kterou se dobře pracovalo, ovšem už neměla tak dobré mechanické vlastnosti jako hliníková voština, která ji v dalších vozech nahradila. Později při další generaci vozu FS.07 byl monokok laminovaný již v celku a odpadla operace slepení a mohl se rozvinout naplno potenciál monokoku, tedy laminovat ho jako jeden kus v celku.



Obr. 6 – Monokok vozu FS.08 týmu CTU CarTech

3. Vybraná pravidla Formula SAE

Formula Student je studentský motoristický sport, a tudíž má i vlastní pravidla, která jsou sepsaná do dokumentu, kterými se týmy při vývoji vozů musí řídit. Většina závodů se řídí podle stejných pravidel, která jsou vydávána soutěží Formula Student Germany. Aby se tým mohl soutěže účastnit, musí plnit všechna předpisy, která pořadatelé požadují. Z hlediska bezpečnosti jsou pravidla důsledně vyžadovaná a za jejich porušení hrozí diskvalifikace ze závodu. Samotná pravidla jsou členěna do následujících kategorií:

- Administrativní předpisy – A
- Obecné technické požadavky – T
- Vozidla se spalovacími motory – CV
- Elektrická vozidla – EV
- Technické kontroly – IN
- Statické zkoušky – S
- Dynamické zkoušky – D

Pravidla pro návrh monokoku jsou řízeny částí o obecně technických požadavcích, které se týkají také bezpečnostního zádržného systému, brzdového systému, pohonného ústrojí, aerodynamických a elektrických zařízení a další. Nadále budou popsána pravidla pouze pro konstrukci monokoku. [12]

3.1. Vybraná pravidla části šasi

Pravidla v této části se věnují primární struktuře, která chrání řidiče při kolizi. Proto je důležité navrhnout primární strukturu tak, aby odolala případným deformacím. Části primární struktury jsou následující:

3.1.1. Hlavní oblouk – MH

Main Hoop neboli hlavní oblouk je jedním ze základních bezpečnostních prvků zabraňujících poranění řidiče při převrácení. Oblouk je definován jako profil z uzavřeného průřezu spojující nejnižší bod šasi na obou stranách. Oblouk musí být vytvořený z jednoho kusu oceli a nesmí být svařovaný ani jinak upraven. Oblouk nesmí být vyosen o více než 10° do vertikální roviny. Hlavní oblouk musí být v případě ohnutí oblouku v bočním pohledu vždy vytriangulován další trubkou. Dovolený materiál na hlavní oblouk je buď legovaná nebo uhlíková ocel. Musí být přichycen alespoň čtyřmi držáky k struktuře plechy aspoň 2 mm tloušťky. [12]

3.1.2. Výztuha hlavního oblouku – MHB

Hlavní oblouk musí být podepřen dvěma trubkami (Main Hoop Bracing), jedním ze dvou způsobů, a to buď směrem dopředu nebo dozadu. Jsou připevněny k šasi. Tyto trubky musí svírat s hlavním obloukem alespoň 30° a zároveň tyto podpory musí být připojené maximálně 160 mm od shora hlavního oblouku. Vzpěry musí být přímé, neohnuté. [12]

3.1.3. Podpora výztuhy hlavního oblouku – BMHS

Podpora výztuh hlavního oblouku (Main Hoop Bracing Support) je oblast od nejnižšího bodu výztuhy hlavního oblouku až po nejnižší bod hlavního oblouku. Musí být vždy udělána triangulace, aby se předešlo ohybu trubek. Musí splňovat požadavky stejné jako podpory výztuh hlavního oblouku. Na odpružení, motor, převodovku či diferenciál nesmí být přenášeno zatížení ze vzpěr. V případě skořepinové konstrukce musí panel představující tuto část mít součin EI stejný nebo vyšší, než je součin EI odpovídajících trubek. [12]

3.1.4. Přední oblouk – FH

Přední oblouk (Front Hoop) je předepsán jako profil uzavřeného průřezu. Má za účel chránit řidičovy ruce. Oblouk spojuje nejnižší část monokoku na obou stranách. Řízení nesmí být výše než nejvýše položená část oblouku a volant musí být nejdále 250 mm v podélné rovině vozidla. Nejvyšší přípustné naklonění od příčné roviny vozidla je 20° . Způsob přichycení závisí na typu primární struktury. V případě trubkové konstrukce musí být přichycen stejně jako hlavní

oblouk nebo v případě skořepinové konstrukce musí být zalaminován a musí být prokázána ekvivalence s prvním typem přichycení. Materiály přípustné pro výrobu jsou hliník a ocel. [12]

3.1.5. Výztuhy předního oblouku – FHB

Je potřeba, aby dvě trubky předního oblouku (Front Hoop Bracing) splňovaly příslušné požadavky průřezu a materiálu. V přední části vozu je přední oblouk podepírán výztuhami předního oblouku tak, aby chránil řidičovy nohy. Výztuhy je nutné připevnit co nejbližší nejvyššímu bodu předního oblouku ovšem maximálně 50 mm od jeho vrcholu. Vzpěra musí být rovná bez ohybů a spojena s přední přepážkou. Pokud je přední oblouk nakloněn dozadu o více než 10°, je nutné použít přídatné výztuhy vedené dozadu. [12]

3.1.6. Přední přepážka – FB

Přední přepážka (Front Bulkhead) má bránit vniknutí předmětů do prostoru, kde má řidič nohy. Jakýkoli alternativní materiál použitý pro přední přepážku musí mít po obvodu pevnost ve smyku odpovídající ocelovému plechu o tloušťce 1,5 mm. Pokud je přední přepážka součástí kompozitní konstrukce a je modelována jako tvar "L", musí být součin EI přední přepážky kolem svislé a příčné osy ekvivalentní ocelové trubce splňující požadavky na přední přepážku. Délka průřezu kolmého na přepážky může být maximálně 25 mm, měřeno od nejzadnějšího čela přepážky. [12]

3.1.7. Podpora přední přepážky – FBSS

Podpora přední přepážky (Front Bulkhead Support Structure) je oblast mezi přední přepážkou a předním obloukem. Je zde vyžadovaná triangulace trubek. U kompozitní struktury jsou podpory přední přepážky porovnávány s ocelovou trubkovou konstrukcí. Panel nahrazující trubky musí dosahovat pevnosti ve stříhu 4 kN. Tyto náležitosti jsou vyžadovány předloženými testy panelů. [12]

3.1.8. Boční nárazová struktura – SIS

Boční nárazová struktura (Side Impact Structure) je část struktury, která má zachytit vzniklé síly od bočního nárazu. Nachází se v oblasti mezi předním a hlavním obloukem. Tvoří jí alespoň tři ocelové profily z každé strany a dva profily musí být umístěné podélně. Horní profil musí být ve vzdálenosti od 300 až 350 mm od země. U kompozitní struktury je panelu do podlahy monokoku po výšce 230 mm. Panel musí mít součin EI stejnou jako dva ocelové profily. Horizontální část boční nárazové struktury (Side Impact Structure horizontal) musí mít stejný součin EI jako jeden ocelový profil. Ve stříhu musí panel dosáhnout 7,5 kN zátěže. Všechny tyto podmínky musí být doložené testy. [12]

3.2. Materiálové požadavky trubkového rámu

Některá pravidla jsou společná pro všechny druhy formulových šasi. Kompozitní monokok je musí dodržovat. Na šasi jsou kladeny i materiálové požadavky. Pro dodržení bezpečnosti během provozu je potřeba dbát na správnou volbu materiálů a výrobních postupů. [12]

Tabulka 3 – Parametry ocelových materiálů [12]

Veličina	Označení	Jednotka	Hodnota
Modul pružnosti v tahu	E	[GPa]	200
Mez kluzu	R _e	[MPa]	305
Mez pevnosti v tahu	R _m	[MPa]	365

Tabulka 4 – Průřezové charakteristiky ocelových materiálů [12]

Položka nebo použití	Minimální tloušťka stěny	Minimální plocha průřezu	Minimální moment setrvačnosti
Hlavní a přední oblouk, uchycení pramenního popruhu	2,0 mm	175 mm ²	11 320 mm ⁴
Boční nárazová struktura, přední přepážka, vyztužení oblouků, úchyty pásů	1,2 mm	119 mm ²	8509 mm ⁴
Podpora přední přepážky, podpora výztuhy předního oblouku	1,2 mm	91 mm ²	6695 mm ⁴

3.3. Předepsané požadavky a síly zatěžující kompozitní monokok

3.3.1. Šroubové přípojně body primární konstrukce

Každý upevňovací bod dvou k sobě přišroubovaných částí primární konstrukce, musí být schopen přenést zatížení 30 kN v libovolném směru. Každý upevňovací bod vyžaduje minimálně dva šrouby o průměru 8 mm ocelové třídy 8.8 přišroubovaný k ose trubky. Držák musí být zhotoven z oceli o minimálně 2 mm tloušťce. Výztuhy předního oblouku, výztuhy hlavního oblouku a podpora výztuhy hlavního oblouku mohou být připevněny pouze jedním šroubem o průměru 10 mm a ocelové třídy 8.8, pokud je šroub umístěn v ose trubky. Při použití šroubového spoje v primární konstrukce nesmí dojít k rozdrčení jádra laminátu. [12]

3.3.2. Uchycení bezpečnostních pásů

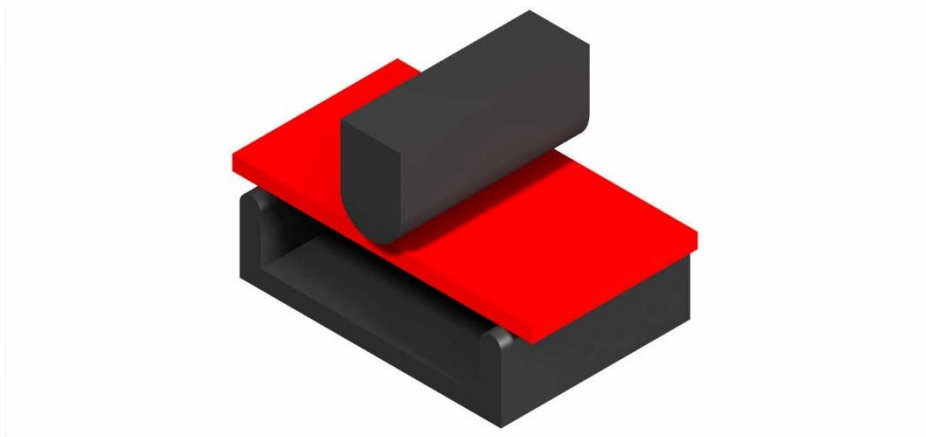
Jakékoliv připevnění pásů k monokoku musí být provedeno pomocí jednoho 10 mm šroubu třídy 8.8 nebo dvěma 8 mm šrouby třídy 8.8 a ocelovými podkladovými deskami o minimální tloušťce 2 mm. Pokud jsou ramenní a bederní pásy připevněny ke kompozitní struktuře, musí být prokázáno, že upevnění snese zatížení 13 kN a body upevnění pásů proti podklouznutí snesou 6,5 kN. Pokud jsou břišní pásy a pásy proti podklouznutí připevněny blíže než 100 mm od sebe, musí vydržet zatížení 19,5 kN. Splnění daných podmínek musí být prokázáno fyzickými testy. Hrany zkušebního přípravku musí být ve vzdálenosti aspoň 125 mm od místa, kde působí zatěžující síla. Zkouška musí odpovídat reálné geometrii panelu a zatížený musí být ve směru odpovídající zatížení se voze. [12]

3.4. Testování sendvičových panelů monokoku

Testováním sendvičových panelů monokoku se prokazuje ekvivalentní tuhost s trubkovým rámem. K tomuto porovnání se používá EI . Jedná se o součin modulu pružnosti a kvadratického momentu průřezu k neutrální ose. Všechny dokázané ekvivalence jsou zaznamenány v dometu SES (Structural Equivalency Spreadsheet), který je vyžadován pořadatelem závodů. Samotné zkušební vzorky musí být také předloženy na vyžádání při technické přejímce auta. [12]

3.4.1. Tříbodová ohybová zkouška

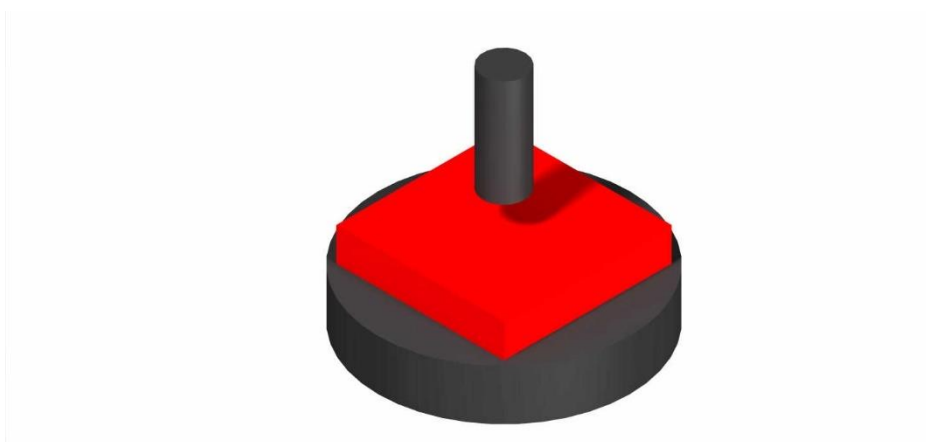
Vzorek velikosti 275 mm x 500 mm představuje segment boční strukturu monokoku, který se testuje na tříbodový ohyb. Vzorek je zesponu podepřen dvěma podporami, které mají mezi sebou vzdálenost 400 mm a shora je zatěžován tělesem o poloměru 50 mm, jehož šířka přesahuje šířku panelu. Panel musí mít aspoň stejné vlastnosti jako dva ocelové profily určené pro tuto oblast. Posuzuje se tuhost EI , pevnost a deformační energie panelu. Parametry panelu fotky a data musí být zanesené do SESu. Pro porovnání se provádí tříbodový test dvou ocelových profilů. U nich se zaznamenává a následně porovnává s panelem deformační energie při průhybu do 12,7 mm. Takto otestovat a zaznamenat do SESu se musí všechny skladby, které se objeví v primární struktuře. [12]



Obr. 7—Ukázka přípravku pro tříbodovou zkoušku

3.4.2. Obvodová smyková zkouška

Každá skladba z primární struktury se musí otestovat obvodovou smykovou zkouškou. Testovaný vzorek musí mít rozměry velikosti 100 mm x 100 mm. Válec o průměru 25 mm se protlačuje vzorkem tak dlouho, až projde oba dva potahy. Pod vzorkem v ose válce je otvor o průměru 32 mm. Hrany mohou mít 1 mm zaoblení. Výsledek a data zkoušky dávají do SESu. Vyhodnocují se vrcholy sil zaznamenané při zkoušce a z nich se dopočítává smyková pevnost sendviče. Ta musí odpovídat hodnotě, která je potřeba pro skladbu nacházející se v primární struktuře. [12]

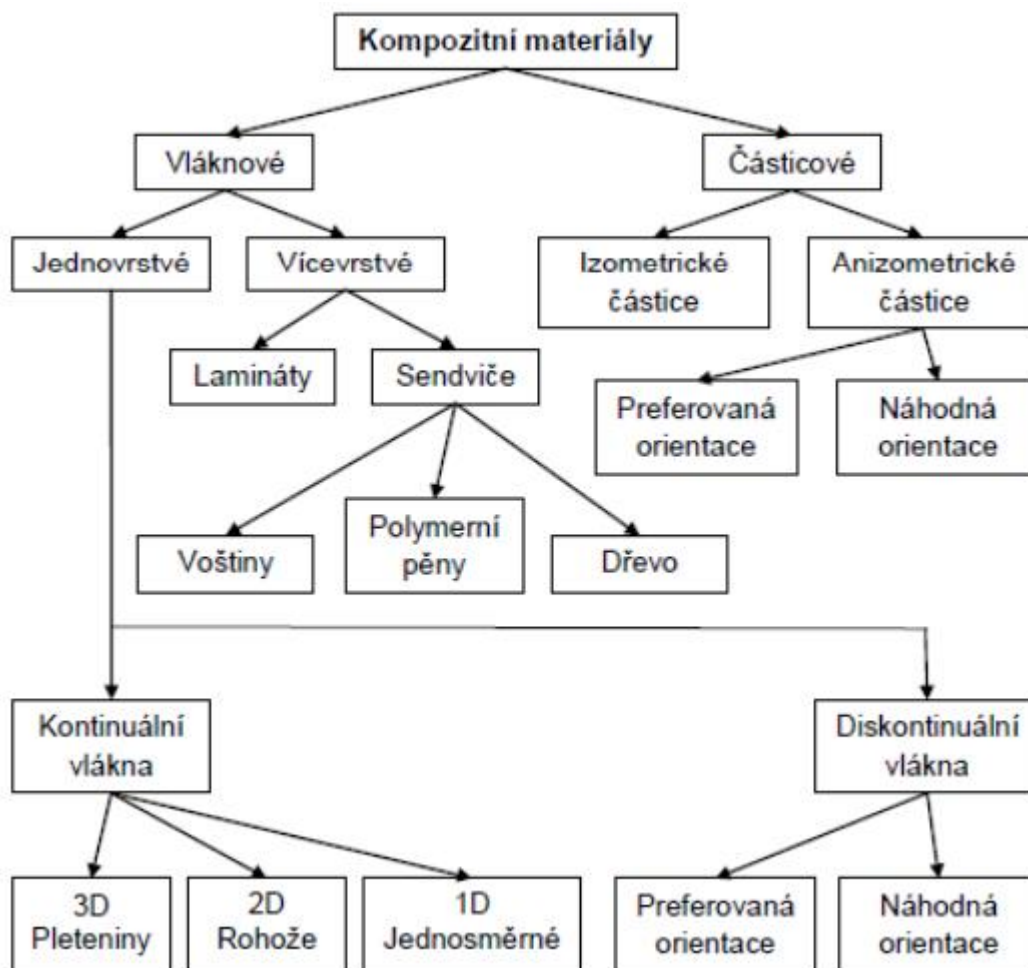


Obr. 8—Ukázka přípravku na smykovou zkoušku

4. Kompozitní materiály

Kompozitní materiál je složený ze dvou nebo více odlišných složek. Na rozdíly mechanických vlastností mezi složkami musíme pohlížet optikou makrostruktury, neboť při detailnějším pohledu mikrostruktury by většina materiálů byla taktéž kompozitní. Pro naše účely stačí, když se bude jednat o mechanicky a chemicky odlišné složky rozdělené rozhraním. V tomto případě se bude jednat o vláknové kompozitní materiály, takže nespojitá fáze (výztuha) bude ponořena do spojité fáze (matrice). Nespojitá fáze je pevnější a přenáší zatížení. Výsledné mechanické

vlastnosti kompozitu budou závislé na vlastnostech svých materiálových složek jejich podílu a geometrii výztuží vzhledem k systému. Je nutné rozdělit výztuže na základě geometrie do dvou skupin, a to vláknové kompozity a částicové kompozity. Vláknové kompozity, jsou kompozity, kde délka výztužného vlákna je podstatně větší než jeho průměr, zatímco částicové kompozity jsou z částí vláken, které nemají dlouhý rozměr. [13]

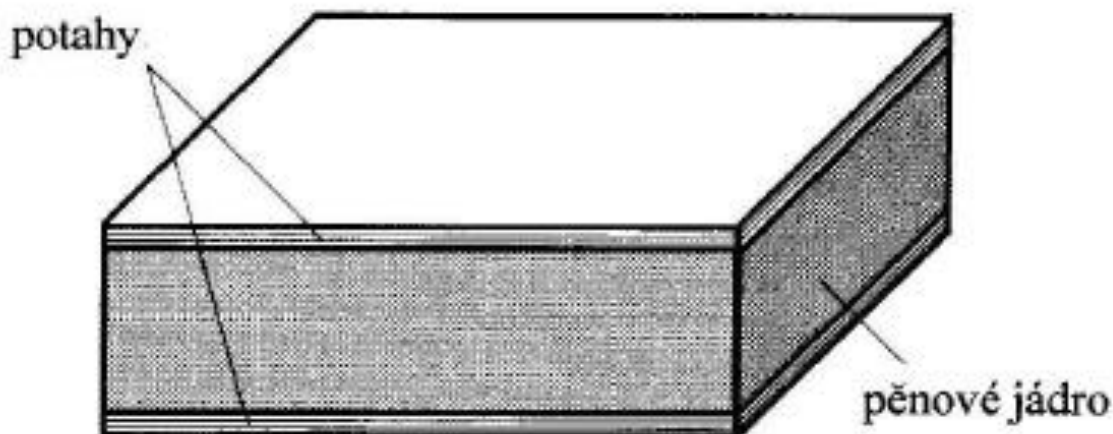


Obr. 9 – Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrie výztuže [14]

4.1. Sendvičová konstrukce

Jedná se o konstrukce s vysokou ohybovou pevností a tuhostí. Sendvičový materiál se skládá z jádra a z potahů. Jádro je lehké, má dobré vlastnosti proti tlakovému namáhání a přenášení smykové síly mezi potahy. Potah se na sendvičovém materiálu nachází na horní a spodní ploše a má dobré mechanické vlastnosti v tahu. Tloušťka jádra bývá mnohem větší než tloušťka potahů. To má za následek velkou ohybovou tuhost při zachování nízké hmotnosti materiálu. Dalšími výhodami konstrukcí vyrobených ze sendvičových materiálů jsou zvýšená odolnost proti nestabilitě (ve srovnání s konstrukcí z tenkostěnných kompozitů), únavová odolnost, odolnost proti šíření trhlin, rázům, teple a ohni.[13]

Se zvětšující tloušťkou sendviče narůstá přímo úměrně i její ohybová tuhost. Hlavní předností je, že k nárůstu hmotnosti v důsledku zvětšování tloušťky dochází pomalu, jelikož se zvětšuje pouze jádro, které je lehké. Důležitá je také smyková pevnost jádra, která se zvětšuje s jeho hustotou. Sendviče mají i nevýhody. Těmi největšími jsou složitá kontrola kvality, složité spojování do větších konstrukčních celků a zavádění silových účinků. [13]



Obr. 10 – Sendvičový panel [13]

4.1.1. Jádra

Hlavní funkcí jádra je přenášet mechanické zatížení z jednoho potahu na druhý potah pomocí příčného smyku. Voštinová jádra dosahují lepších mechanických vlastností než pěnová jádra při zachování stejné hustoty. Již při návrhu sendvičové konstrukce a výběru jádra musíme, kromě jeho mechanických vlastností, zohlednit způsob výroby i jeho geometrii konstrukce. [13]

○ Pěny

Pěny jsou jedním z nejvíce používaných typů jader v sendvičových strukturách. Používají se ve tvaru desek, který jsou typicky v tloušťkách od 5 mm do 20 mm. Ty se vyrábějí ze syntetických polymerů:

- polyvinylchlorid – PVC (Airex®, Herex®, Divinycell®)
- polyuretan – PUR
- polymetakrylid – PMI (Rohacell®)
- polystyren – PS
- polyethyltereftalát – PET

Hustota u těchto pěn, které se používají pro kompozitní konstrukce se nejčastěji pohybuje od 30 kg/m³ do 200 kg/m³. Jedná se o izotropní materiál, který má ve všech směrech stejné

mechanické vlastnosti. Jelikož jejich struktura je tvořená dutinami, ve kterých se nachází plyn, mají dobrý poměr hmotnosti a tlakové pevnosti. Dokáží dobře tlumit kmity a absorbovat energii. Tvarování některých pěn je možné pokud se zahřejí. [15]

- Polyvinylchloridová pěna – PVC

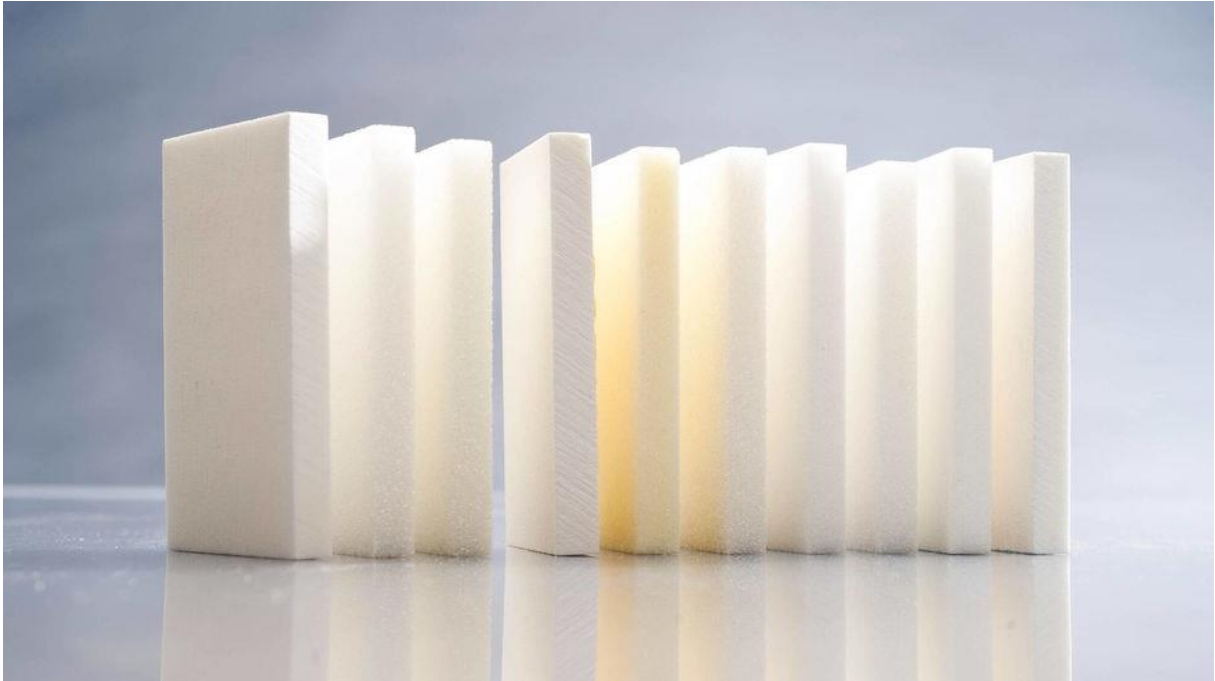
Polyvinylchloridové pěny se používají nejčastěji jako jádrové materiály do vysoce namáhaných sendvičových konstrukcí. PVC pěny mají dobrou odolnost proti nasákavosti, chemikáliím a dobrou kombinaci statických a dynamických vlastností. Dobrý je také jejich provozní rozsah teplot od -240 °C do +80 °C. PVC pěny se vyrábějí i jako nehořlavé. Jsou odolná proti polystyrenovým pryskyřicím. [15]

- Polyuretanová pěna – PUR

Polyuretanové pěny mají pouze průměrné mechanické vlastnosti a stává se při jejich použití, že se delaminuje jádro od potahu. To se děje kvůli stárnutí na rozhraní pryskyřice a jádra. To vede k jejich konstrukčnímu omezení. Uplatnění mají v konstrukcích, které jsou zatěžovány jen lehce; příkladem jsou sendvičové panely určené pro tepelnou izolaci. Má dobrou tvarovatelnost, obrobiteľnosť a akustickú absorpciu. Pěna pracuje i za zvýšených teplot (150 °C). [15]

- Polymetakrylimidová pěna – PMI

Konstrukční polymetakrylimidová pěna je základem lehkých sendvičových konstrukcí, které vykazují vysokou odolnost proti smyku a tlaku, a to i při zvýšených teplotách. Vydří vysoké procesní teploty do 190 °C. Vyrábí se v rozmezí hustot od 32 kg/m³ do 200 kg/m³. Je snadno obrobiteľná a tvarovatelná. Kromě její teplotní odolnosti má dobrou i odolnost proti tečení. Je vhodná do konstrukcí, které se vytvrzují v autoklávu.[16]



Obr. 11 – Pěnové jádro Rohacell [16]

- Polystyrénová pěna – PS

Nemá pro naše použití vynikající mechanické vlastnosti; její hustota se totiž pohybuje okolo 40 kg/m^3 . Používá se zejména při výrobě malých plavidel nebo surfových prken. Nelze jí používat v kombinaci s polystyrénovými pryskyřicemi, neboť by rozpustila její strukturu. [15]

- Polyethyltereftalátová pěna – PET

Jedná se o termoplast tvarovatelný při zahřátí. Má dobré mechanické vlastnosti, je dobře obrobitelný a nehořlavý. [15]

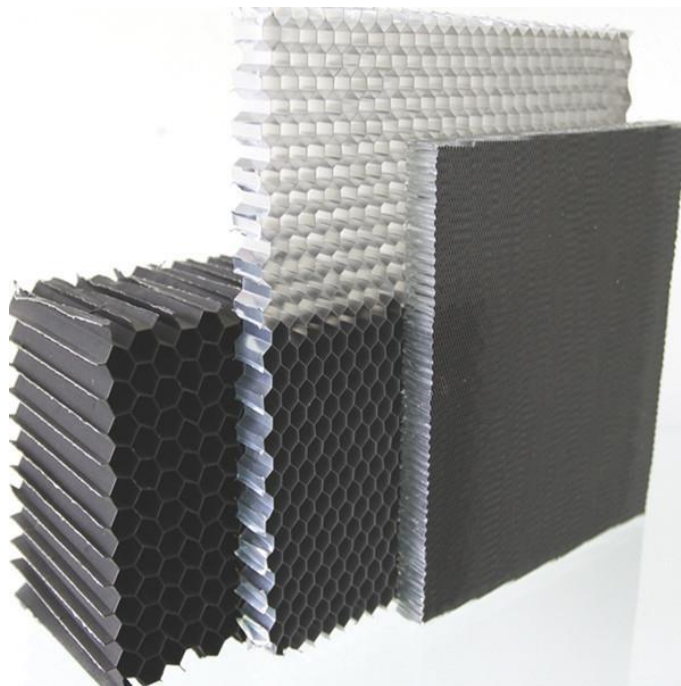
- Voštiny

Nejčastější tvar buňky je šestiúhelník, který se podobá buňkám včelí plástve, ale vyrábí se i v jiných tvarech. Voštinová jádra jsou vyráběna z různých materiálů jako jsou papír, aramid (Nomex®, Kevlar®), hliník, ocel a polymerní varianty. Hustota je od 30 kg/m^3 do 600 kg/m^3 . Vyrábějí se v tloušťkách od 3 mm do 250 mm. Dají se tvarovat pomocí malých sil nebo zahřátím. Mechanické vlastnosti jsou závislé na tloušťce stěny buňky tvaru buňky velikosti buňky a materiálu. Chování voštin je ortotropní, což znamená, že mají jiné vlastnosti v různých směrech. Buňky se dají plnit různými materiály pro lokální zlepšení mechanických vlastností. [15]

- Hliníková voština

Hliníkové voštiny nabízejí jednu z nejvyšších poměrů pevnosti a hmotnosti ze všech konstrukčních materiálů. Existují různé konfigurace tvaru a velikosti buněk. Její mechanické

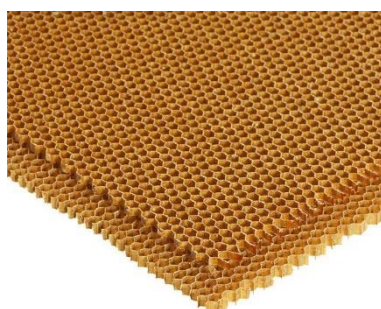
vlastnosti závisí na tloušťce stěn a velikosti buňky. Obvykle se zákazníkovi dodávají v blokové formě a roztahují se až před použitím. [15]



Obr. 12 —Hliníkové plástvové jádro [17]

- Nomexová voština

Na výrobu voštiny se používá papír Nomex, což je komerční označení papíru vyrobeného z aramidových vláken. Výroba voštiny probíhá tak, že se ponoří do fenologické pryskyřice a tím vznikne voštinové jádro, které má vysokou pevnost, odolnost proti ohni a je stabilní. Nejčastěji se používá do interiérových panelů, které musí být lehké. Nomex je oproti jiným jádrovým materiálům jako jsou SAN, PVC, balsa nebo hliníková voština dražší. [15]



Obr. 13 —Nomexové plástvové jádro [18]

- Balsa

Nejrozšířeněji používaným dřevěným jádrem je balsa. Poprvé se objevila v 40. letech 20. století jako jádro s hliníkovým potahem. Má dobrou akustickou absorpci a je dobrým tepelným izolantem. Jednou z nevýhod balsy je její vysoká minimální hustota, která činí

100 kg/m³. Tento problém ještě zhoršuje skutečnost, že balsa může během laminování absorbovat velké množství pryskyřice. Její použití je proto obvykle omezeno na projekty, kde není požadována optimální úspora hmotnosti nebo na lokálně velmi namáhané oblasti. [15]

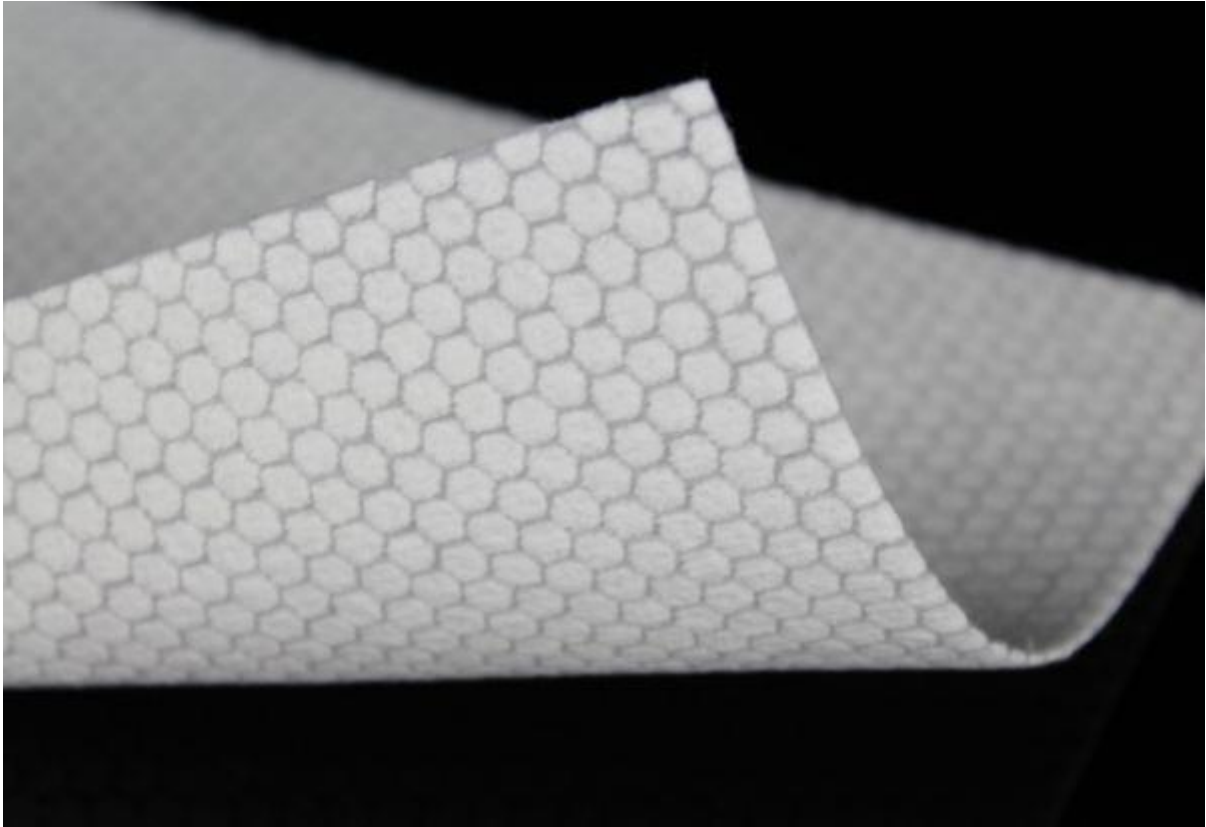
- Termoplastické voštiny

Termoplastické voštiny jsou vyrobené z termoplastů, mají nízkou hmotnost, nabízejí některé užitečné vlastnosti a případně umožňují snadnější recyklaci. Jejich hlavní nevýhodou je obtížnost v dosažení dobrého mezifázového spojení mezi voštinou a potahem a jejich relativně nízká tuhost. Ačkoli se zřídka používají ve vysoce zatížených konstrukcích, mohou být užitečné v jednoduchých vnitřních panelech. Nejčastěji se používají tyto polymery: [15]

- ABS – pro tuhost, rázovou pevnost, houževnatost, povrchovou tvrdost a rozměrovou stabilitu
- polykarbonát – pro UV stabilitu, vynikající propustnost světla, dobrou tepelnou odolnost a samozhášecí vlastnosti
- polypropylen – pro dobrou chemickou odolnost
- polyethylen – univerzální levný materiál pro jádro

- Ostatní jádrové materiály

Ačkoli se obvykle nepovažují za skutečná sendvičová jádra, existuje řada tenkých materiálů s nízkou hustotou, které lze použít k mírnému snížení hustoty jednoplášťového laminátu. Materiály jako Lantor Soric[®], Coremat[™] a Spheretex[™] se skládají z netkané "plstěné" tkaniny plné dutých kuliček snižujících hustotu. Obvykle mají tloušťku pouze 1-3 mm a používají se jako další vrstva výztuže uprostřed laminátu, protože jsou navrženy tak, aby se během konstrukce "smáčely" laminovací pryskyřicí. Duté kuličky však vytlačují pryskyřici, a tak výsledná střední vrstva, ačkoliv je mnohem těžší než pěnové nebo voštinové jádro, má nižší hustotu než ekvivalentní tloušťka laminátu ze vláken. Vzhledem k tomu, že jsou tak tenké, mohou se také snadno přizpůsobit zakřivení, a proto se snadno a rychle používají. [15]



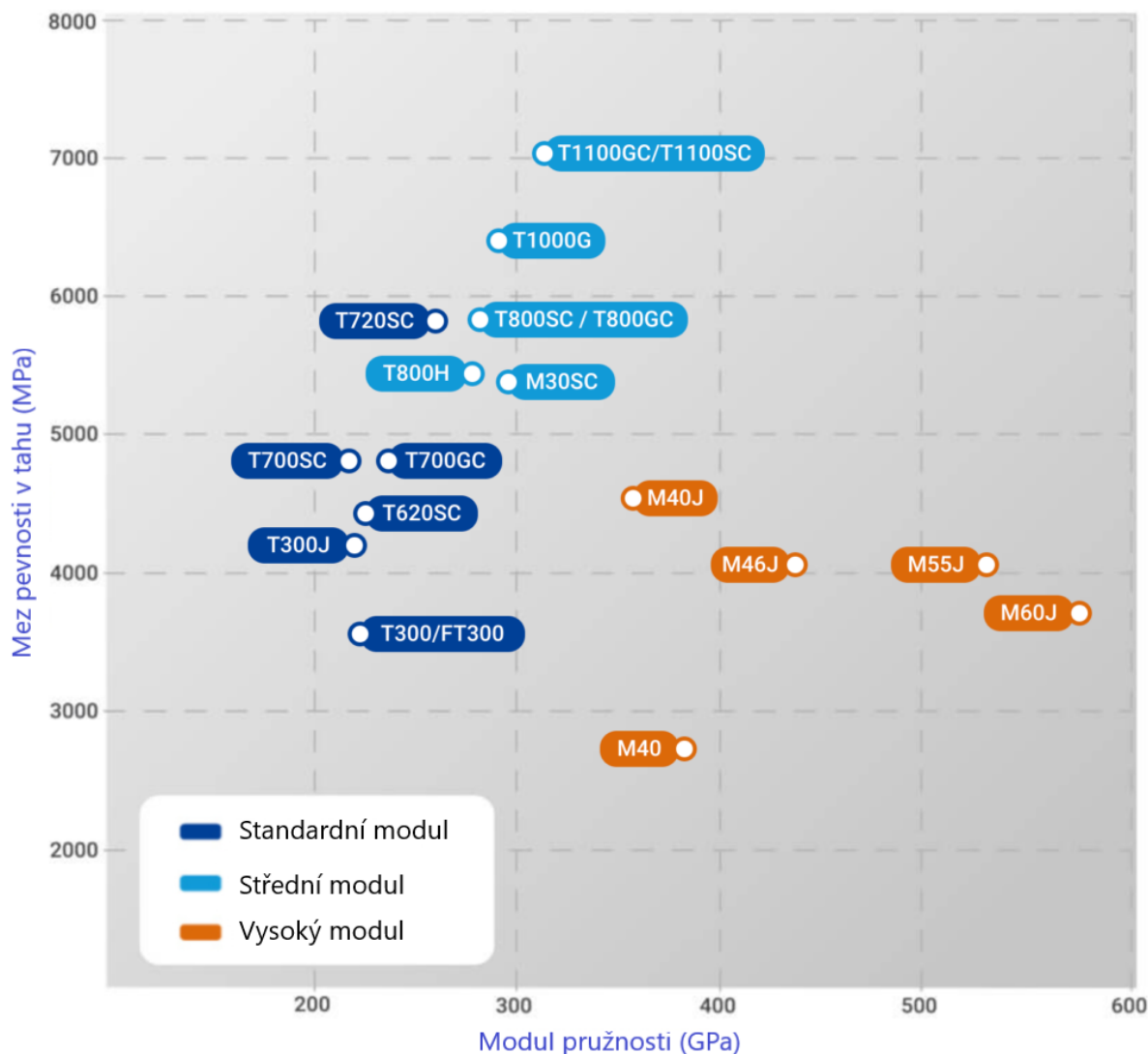
Obr. 14 – Jádro SORIC® [19]

4.1.2. Potahy

Hlavní funkcí potahu je přenášet osově napětí, které je způsobeno většinou ohybem sendvičové konstrukce. Potahy jsou zpravidla mnohonásobně tenčí než jádro.

- Výztuže

Na výztuž v konstrukčních aplikacích lze použít širokou škálu vláken. Vlákná lze klasifikovat podle délky na krátká a dlouhá, podle pevnosti nebo tuhosti pak na vlákná s nízkým modulem (LM), středním modulem (MM), vysokým modulem (HM) a ultravysokým modul (UHM). Dále lze vlákná dělit dle jejich chemického složení na organická a anorganická. Nejčastěji používaná anorganická vlákná v kompozitech jsou skleněná, uhlíková, bórová, keramická, minerální a kovová. Organická vlákná používaná v kompozitech jsou polymerní vlákná. Výběr typu vlákná zahrnuje kompromis mezi mechanickými, ekologickými vlastnostmi a cenou. [20]



Obr. 15 – Uhlíková vlákna Torayca® - Výběrová tabulka produktů [20]

- Skelná vlákna

Největší průmyslové využití mají skelná vlákna, neboť se vyrábějí ve velkém množství. Uhlíková a kevlarová vlákna jsou vyhrazeny pro vysoce výkonné součásti. Skleněná vlákna se zpracovávají ze sypkého skla – amorfní látky vyrobené ze směsi písku, vápence a dalších oxidických sloučenin. Hlavní chemickou složkou skelných vláken (46-75 %) je tedy oxid křemičitý (SiO_2). Řízením chemického složení a výrobního procesu lze získat širokou škálu skleněných vláken pro různé typy použití, která však vykazují typické vlastnosti skla, jako je tvrdost, odolnost proti korozi a inertnost. Kromě toho jsou pružná, lehká a levná. Díky těmto vlastnostem jsou skleněná vlákna nejběžnějším typem vláken používaných v levných průmyslových aplikacích. Vysoká pevnost skleněných vláken je dána nízkým počtem a velikostí defektů na povrchu vlákna. Všechna skleněná vlákna mají podobnou tuhost, ale různé hodnoty pevnosti a různou odolnost vůči degradaci vlivem prostředí. [21]

- Kevlarová vlákna

Kevlarová vlákna se vyrábějí z aramidového vlákna nažloutlé barvy. Vyrábí je společnost DuPont de Nemours (USA). Jedná se o aromatické polyamidy získané syntézou při $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, následně rozvlákňování a taženy za účelem vysokého modulu pružnosti. [21]

- Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna, nazývaná také grafitová vlákna, jsou lehká a pevná vlákna s vynikající chemickou odolností. Dominují v leteckém průmyslu. Mechanické vlastnosti uhlíkových vláken jsou dána atomovou konfigurací uhlíkových řetězců a jejich spojů, které jsou podobné krystalové struktuře grafitu. Pevnost uhlíkových vláken se řídí orientací uhlíkových řetězců. Atomové struktury s nejsilnějšími atomovými spojeními podél směru uhlíkových vláken. Vlastnosti uhlíkových vláken závisí na surovině použité k jejich výrobě a na konkrétním použitém výrobním postupu. Používají se dvě hlavní suroviny neboli prekurzory: polyakrylonitril (PAN) a dehet (pitchová vlákna).

Pitchová vlákna jsou levnější, ale mají nižší pevnost než vlákna PAN. Pevnost v tahu je přibližně poloviční a pevnost v tlaku je přibližně třetinová oproti vláknům PAN, což je dáno jejich vnitřní strukturou, která je činí citlivějšími na povrchové vady. PAN vlákna dominují na trhu s vysoce výkonnými vlákny pro letecké aplikace, protože je lze vyrobit s různými hodnotami tuhosti a pevnosti. Na rozdíl od skleněných vláken jsou uhlíková vlákna k dispozici v širokém rozsahu tuhosti. Tuhost je řízena tepelnou úpravou jak PAN, tak uhlíkových vláken. Tepelné zpracování je ovlivněno jak obsahem uhlíku, tak i orientací nejsilnějších uhlíkových článků podél směru vlákna; orientací článků se ovlivňuje tuhost vláken.

Důležitějším důvodem pro použití vláken s vysokým modulem pružnosti je maximalizovat poměr tuhosti a hmotnosti konstrukcí. Maximální provozní teplota uhlíkových vláken se pohybuje od $315\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $537\text{ }^{\circ}\text{C}$, ale může být dále omezena provozní teplotou matrice. Stejně jako v případě kompozitů s polymerní matricí. Jsou tužší než skelná vlákna. Uhlíková vlákna poskytují kompozitu lepší únavové vlastnosti tím, že snižují množství deformace v polymerní matrici při daném zatížení. Rovněž statická únava je u uhlíkových vláken méně výrazná. To je hlavní důvod, proč se pro uhlíková vlákna používá nižší bezpečnostní faktor 2,25, namísto 3,5 pro sklolaminát při navrhování tlakových nádob vystavených trvalému zatížení. Uhlíková vlákna jsou dobrými elektrickými vodiči. Mezi omezení uhlíkových vláken patří jejich nízká odolnost proti nárazům (v důsledku jejich vysoká tuhost, vysoká křehkost), stejně jako náchylnost k chemickému poškození v přítomnosti kyslíku a jiných oxidačních sloučenin při teplotách vyšších než $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ke galvanické korozi dochází, pokud jsou kompozity z uhlíkových vláken v kontaktu s kovy pod napětím, vzhledem k jejich dobré elektrické odolnosti. Proto

musí být v takovém případě mezi kompozity z uhlíkových vláken a kovy vytvořena izolační bariéra.

Hlavním omezujícím faktorem pro použití uhlíkových vláken je cena. Jeden z nejnovějších výzkumů v oblasti uhlíkových technologií vedl k vytvoření nového druhu uhlíkových vláken, tzv. uhlíkových nanotrubiček (CNT), jednoho z nejzajímavějších materiálů, které kdy byly objeveny. Uspořádání atomů uhlíku v CNTs je řízeno tak, aby vznikla dokonale válcová atomární struktura o průměru asi 1 nm a délce asi 1 μm , přičemž silné uhlíkové vazby jsou orientovány podél osy válce. Díky této řízené nanostruktuře jsou prakticky vyloučeny vrozené defekty, které se objevují v každém materiálu a které jsou většinou zodpovědné za pevnostní omezení. Díky výhodě této vysoké atomární orientace jsou CNT dosud nejpevnějšími a nejtužšími vlákny – jejich modul pružnosti je přibližně 1000 GPa a pevnost přibližně 30 GPa. Aby bylo možné využít jejich vynikající tuhosti a pevnosti, používají se nanotrubičky jako plnivo v polymerní matrici a tato směs se vytlačuje, čímž se získají vlákna plněná CNT, přičemž samotné vlákno je nanokompozitní systém. Během tohoto procesu se kontroluje uspořádání CNT tak, aby jejich osa byla co nejvíce zarovnána s délkou vlákna. V nanokompozitním vlákne samozřejmě nelze dosáhnout původní tuhosti ani původní pevnosti CNT, ale lze dosáhnout znatelného zlepšení. Kromě toho se dosáhne vynikajících vlastností v oblasti přenosu tepla a elektrických vlastností. Vysoká cena zatím činí CNT těžko dostupnými pro průmyslové aplikace. [21]



Obr. 16 – Uhlíkové, kevlarové a sklené tkaniny [22]

- Bórová vlákna

Vysoká tuhost, vysoká pevnost a nízká hustota jsou společné pro bórová vlákna. Vlákna bóru mají průměr přibližně 100 μm (rychlost růstu je asi 1 μm za sekundu). Vyznačují se také vysokou houževnatostí, vysokou únavovou pevností a velmi dobrým chování v tlaku. Jsou křehké, s nízkou rázovou silovou houževnatostí. Vlákna bóru se vyrábějí chemickou depozicí z par na wolframovém drátu (průměru 12 μm) při teplotě 1200 $^{\circ}\text{C}$. Vzhledem k pomalé

rychlosti výroby patří bórová vlákna k nejnákladnějším ze všech typů v současnosti vyráběných vláken, což motivuje k nahrazení bórových vláken uhlíkovými vlákny, kdykoli je to možné. [21]

- Keramická vlákna

Keramická vlákna se používají pro vysokoteplotní aplikace. Karbid křemíku (SiC) se vyrábí podobně jako vlákna z boru, avšak na uhlíkovém substrátu. Mají svá největší uplatnění jako výztuž pro kovové matrice, především titanové, ale i pro kovové materiály. Používají se také v kombinaci s teplotně odolnými polymerními matricemi. Stejně jako bórová vlákna se i SiC vlákna vyznačují vysokou tuhostí, vysokou pevností, a především vykazují vyšší teplotní odolnost. Zachovávají si svou pevnost v tahu až do teploty přibližně 1300 °C. Vzhledem k omezenému použití a malému objemu výroby je cena těchto vláken vysoká. Hliníková vlákna jsou založena na oxidu hlinitém Al_2O_3 . Keramická vlákna, která byla poprvé použita k vyztužení pístů dieselových motorů, dodávají kompozitům s kovovou matricí pevnost a tvrdost při vysokých teplotách, kdy obvykle dochází k degradaci vlastností kovů. [21]

- Čedičová vlákna

Čedičová vlákna lze zařadit mezi minerální vlákna. Tento výrobek využívá vulkanické čedičové horniny, roztavené a vytlačované do vláken. Čedičová vlákna se vyznačují lepšími mechanickými vlastnostmi než skleněná vlákna a jsou levnější než vlákna uhlíková. Vykazují vynikající tepelnou stabilitu, vysokou pevnost a tuhost, dobrou chemickou stabilitu, dobrou odolnost proti poškození a odolnost proti korozi a dobrou přilnavost k matrici. Jsou potenciálně použitelné pro tepelnou ochranu a konstrukční a stavební aplikace. [21]

- Kovová vlákna

Kovová vlákna zahrnují vlákna vyrobená z různých obecných kovů a slitin. Zpracováním surového materiálu do vláken malých rozměrů v řádu μm se prakticky eliminují vady vlastní sypkému materiálu a dosahuje se lepších vlastností. Pevnost vláken přímo souvisí s jejich průměrem, který zase souvisí s výrobními náklady na vlákna. Materiál vláken lze zvolit podle požadované aplikace, například lehká hliníková vlákna, silná ocelová vlákna nebo tuhá wolframová vlákna. Dalšími výhodami těchto vláken je jejich vynikající elektrická a tepelná vodivost. Kovová vlákna se obvykle používají jako výplňové sítě pro polymerní matrice, které dodávají konečnému konstrukčnímu kompozitnímu materiálu elektrickou vodivost, ochranu proti elektromagnetickému rušení nebo ochranu proti zásahu bleskem. Nekovová vlákna pokrytá tenkým kovovým povlakem kombinují výhody obou složek, substrátového vlákna i kovového povlaku. Neustále se zavádí nebo zdokonaluje řada nových vláken, ale přijímání nových výrobků z vláken na trhu pro konstrukční aplikace je pomalé z důvodu velkého počtu

charakterizačních zkoušek, které jsou nutné k zajištění bezpečné a účinné aplikace v různých podmínkách. [21]

4.1.3. Vzájemná slučitelnost vlákna a matrice

Většina vláken je pokryta látkou zvanou sizing. Vlákna se při zpracování značně poškozují, protože se třou o sebe navzájem a o zařízení. Sizing pomáhá chránit vlákna tím, že slouží jako mazivo a antistatické činidlo a pomáhá svazku vláken držet pohromadě jako celek. Kromě toho obsahuje pojivo, které podporuje spojení s matricí v kompozitu. Proto může mít stejné vlákno různou velikost v závislosti na typu polymeru, který se používá jako matrice. Ukazatelem kvality vazby mezi vlákny a matricí je intralaminární pevnost kompozitu. Pro proto se zkoušky intralaminární pevnosti ve smyku podle norem ASTM D2344, D4475 a D3914 se v průmyslu používají k vyhodnocení kompatibility mezi vlákny a matricí, která do značné míry závisí na dimenzování vlákna. [21]

4.1.4. Formy vláken

Vlákna zajišťují pevnost a tuhost při nízké hustotě, omezují tečení matrice, snižují tepelnou roztažnost a lze je použít ke zvýšení nebo snížení dalších fyzikálních vlastností, jako je tepelná vodivost, elektrická vodivost a průhlednost záření. Matrice zajišťuje přenos napětí mezi vlákny a chrání je před chemickým působením a otěrem. U každého výrobku hraje klíčovou roli nejen fyzikální vlastnosti, ale také náklady. Vláknové výztuže jsou hlavní součástí kompromisu mezi výkonem a náklady. Vysokého výkonu lze dosáhnout uvážlivým návrhem a výrobou výrobku, ale často existuje více než jedno řešení; konečná volba se řídí náklady. Existuje velké množství různých forem vláken, aby byly splněny požadavky různých způsobů zpracování. Vláknité výztuže lze získat jako kontinuální nebo diskontinuální vlákna, jednosměrně uspořádaná vlákna nebo textilní výrobky. Mezi textilními výrobky je možné použít například tkaniny, pleteniny a opletené tkaniny. Forma výztuže je konstrukčním parametrem a ovlivňuje kvalitu i cenu kompozitního materiálu. [21]

- Souvislá a nesouvislá vlákna

První klasifikaci forem vláken lze provést s ohledem na to, že kompozity jsou vyztuženy buď spojitými vlákny, přerušovanými vlákny, nebo částicemi. Pokud je požadována maximální dosažitelná tuhost a pevnost, používají se nekonečná vlákna. U kompozitů vyztužených spojitými vlákny přenášejí zatížení převážně vlákna orientovaná podél směru zatížení. Spojitá vlákna jsou balena v různých formách, která budou dále popsány. Proces výroby kompozitních dílů s použitím spojitých vláken je nákladný a pomalý. To je částečně způsobeno vyššími náklady na samotný systém výroby spojitých vláken a částečně specifikami metod používající spojitá vlákna pro výrobu kompozitních materiálů, jako je ruční vrstvení, vrstvení prepregů, výroba ve vakuových pytlích, lisování s přenosem pryskyřice atd. Alternativou při vyztužování

kontinuálními vlákny, která vedou ke snížení výrobních nákladů, je použití nespojitých vláken. [21] Při použití tohoto druhu výztuže je nižší nejen cena vláknového materiálu, ale také méně nákladné metody výroby na finální díl, jako je vstřikování apod.

Diskontinuální vlákna jsou krátká vlákna získaná nasekáním nekonečných vláken nebo vyrobená přímo jako krátká vlákna za účelem snížení nákladů. Mechanismus přenosu zatížení při použití nespojitých vláken se liší od mechanismu přenosu zatížení při vyztužení spojitými vlákny. Rozhodující roli hraje kvalita rozhraní mezi vlákny a matricí, protože zatížení se přenáší z vláken na vlákna prostřednictvím matrice. V důsledku efektu nesouvislých vláken nevyužívá vlákno k přenášení zatížení celou svou délkou a výsledný účinek vyztužení je ve srovnání s kontinuálními vlákny nižší.

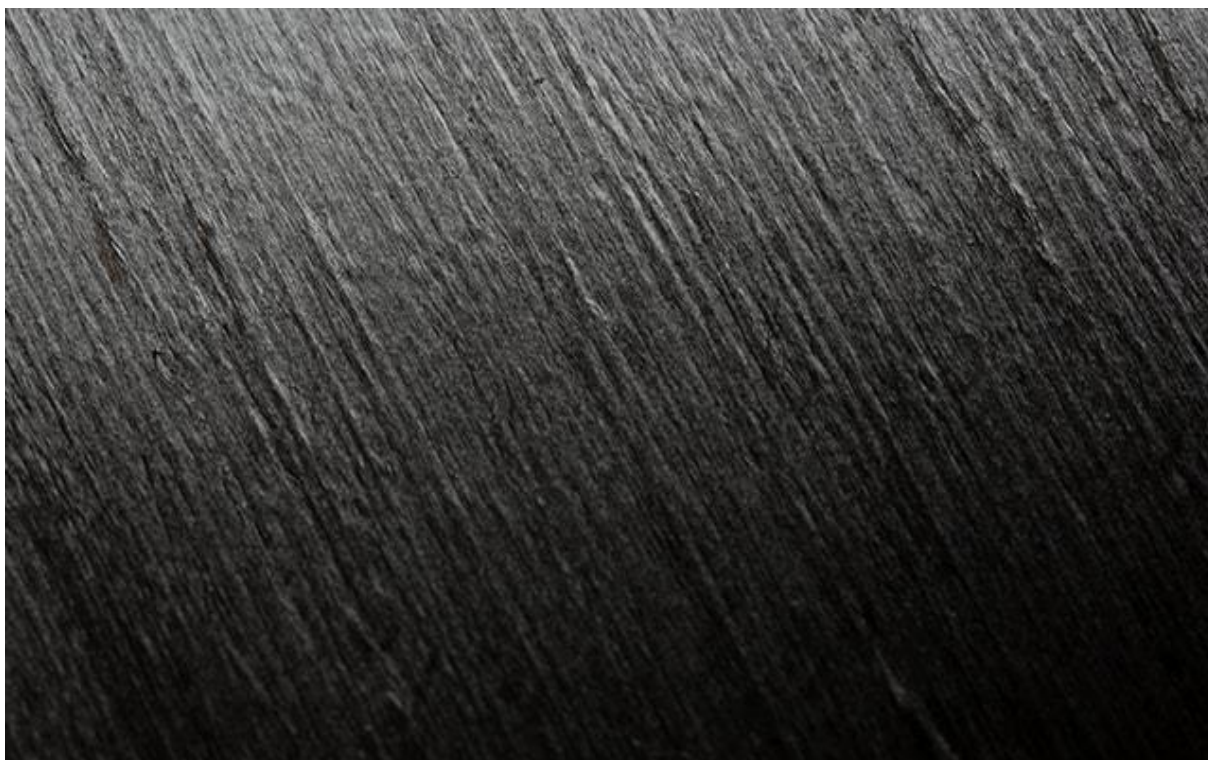
Aby krátké vlákno dosáhlo maximální nosnosti, musí mít minimální délku, která se nazývá kritická délka L_c . Maximální axiální únosnosti vlákna je dosaženo pouze v určité vzdálenosti od konců vlákna, kde převládají smykové účinky. Kritická délka vlákna není vlastní vlastností vlákna, ale závisí jak na poměru délky a průměru vlákna, tak na systému vlákno-matrice. Tímto způsobem, pokud je krátká délka vlákna vyhovující pro vyztužení určité polymerní matrice, může být nevhodná pro vyztužení jiné matrice. U nejběžnějších skleněných nebo uhlíkových vláken s polymerními matricemi se kritická délka může pohybovat od zlomku jednoho milimetru až po několik milimetrů. Vzhledem k jejich snadné zpracování a nízké ceně bylo vyztužování krátkých vláken studováno a neustále zdokonalováno. Kompozitní materiály založené na tomto typu výztuže mohou dosahovat 50 % pevnosti a 90 % tuhosti spojitě vyztužené se stejným vláknovým materiálem. Kvalitu těchto kompozitů lze zlepšit vylepšením rozhraní mezi vlákny a matricí a zajištěním přednostní orientace krátkých vláken podél směru zatížení. Kompozity vyrobené s náhodně uspořádanými krátkými vlákny mají téměř izotropní vlastnosti v rovině laminátu. Pravděpodobně hlavní nevýhodou pro konstrukční aplikace je, že kompozity s krátkými vlákny nesnižují tečení polymerních matric tak účinně jako spojitá výztuž. Kromě toho mají kompozity s krátkými vlákny obvykle nižší pevnost než spojitě vláknové kompozity. [21]

- 1D textil: Vlákno, Koudel, Příze, Roving

Vedle spojitých a nespojitých výztuh představují textilní výztuhy alternativy, které mohou zvýšit výkonnost a zároveň snížit výrobní náklady. Například proces lisování přenosem pryskyřice je zvláště vhodný pro zabudování tkaných textilních výztuží. Textilní průmysl a průmysl konstrukčních kompozitních materiálů tak v této oblasti spolupracuje. Jednotlivá vlákna jsou vstupní produkt pro textilní běhoun a vlákno je zase vstupní produkt pro výztužnou tkaninu, která je vstupním produktem pro konstrukci kompozitu. Konstrukční proces začíná návrhem a výrobou vlákna, přičemž vlastnosti vlákna hrají důležitou roli pro konečné vlastnosti

kompozitního materiálu. Například zvětšení zkrutu vlákna snižuje jeho modul pružnosti, ale může zlepšit únavové chování kompozitu. Proces návrhu a výroby textilií vede k následující klasifikaci forem textilií: [21]

- 1D textilie nebo jednotlivé nitě. Ty se nazývají vlákno, koudel, příze, roving
- 2D textilie nebo tkanina. Vzniká vzájemným prokládáním 1D textilií, přičemž vznikají různé vzory.
- 3D textil. Využívá 1D textilií a speciálními metodami zpracování textilu uspořádává nitě do složitých 3D tvarů. Výsledný kompozitní materiál se vyznačuje 3D pevným chováním.



Obr. 17 – Prepregová jednosměrná vlákna [23]

Pramen je nekroucený svazek souvislých vláken, který se používá jako jednotka. Všechna vlákna v prameni se vyrábějí současně, z jedné pece, a spřádají se dohromady. [21]

Příze nebo nit je kroucený pramen.

Roving je soubor rovnoběžných pramenů, kroucených nebo nekroucených; každý pramen je samostatný svazek vláken, jak bylo uvedeno výše. Pramen se vyrábí tak, že se smotá dohromady takový počet pramenů, aby se dosáhlo požadované hmotnosti na jednotku délky (TEX v g/km) nebo délky na jednotku hmotnosti (Yield v yd/lb). TEX je nepřímo úměrná YIELD:

$$TEX \left[\frac{g}{km} \right] = \frac{496,238}{YELD [yd/lb]} \quad (4.1.4.1)$$

V případě uhlíkových vláken se běžně používá termín „klubko“ a jejich lineární hustota se obvykle vyjadřuje jako počet neboli číslo K, které vyjadřuje počet vláken v klubku v tisících. Číslo K souvisí s TEXem prostřednictvím průměru vláken a hustoty takto:

$$TEX = \frac{\pi d_f^2}{4} \rho_f K \quad (4.1.4.2)$$

s TEX v [g/km], K v tisících, ρ_f v [g/cm³] a d_f v mikronech (1 mikron = 10⁻⁶ m). Tato rovnice však neposkytuje přesné výsledky TEXu, pokud je K nebo průměr vlákna jsou pouze přibližné. Pro přesnou předpověď hmotnosti nebo objemového podílu v kompozitu je vhodné vyžádat si hodnotu TEXu přímo od výrobce. Rovněž je třeba poznamenat, že variabilita $\pm 6\%$ TEXu není neobvyklá, a to jak u vláken ze skelných, tak z uhlíkových vláken a rovingů, a to i v rámci stejné šarže materiálu. Běžné rovingy ze skleněných vláken mají výtěžnost TEX mezi 8861 a 1985 g/km. Uhlík vlákna jsou běžně balena v tahu 3K až 36K (TEX 198 až 2290). [21]

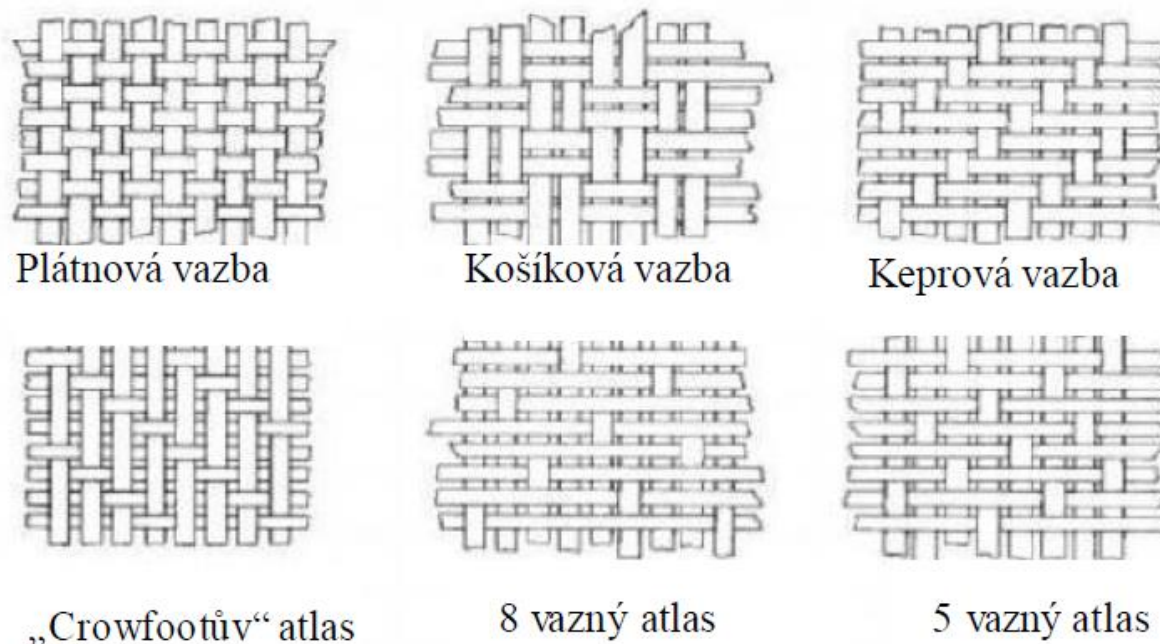
- 2D textilie: tkaniny

Jako výztuže pro kompozitní materiály lze použít širokou škálu textilních tkanin. Nejjednodušší, nejméně propracované a nejlevnější jsou *netkané textilie*. Netkaná textilie se obvykle nazývá *rohož*, která je vyrobena z náhodně orientovaných sekaných vláken. Tuto rohož můžeme nazývat CSM a je vyrobena z nekonečných pramenů nebo pramínek nepravidelně smotaných na stole a lisovaných nebo volně držných pohromadě velmi malým množstvím pojiva (lepidla). [21]

Závoj je tenká rohož, která se používá jako povrchová vrstva pro zlepšení korozní odolnosti kompozitu a využívá vyššího obsahu matrice v závoji. Jelikož je vrstva veilu hladká, bez textury tkané látky, používá se veil také ke zlepšení vzhledu dílu tím, že zakrývá strukturu výztuže pod ním. Závoj a rohože mají vlákna orientovaná náhodně ve všech směrech, což vede k izotropním vlastnostem kompozitu. Navzdory jejich nízkým nákladům jsou mechanické vlastnosti kompozitního materiálu s použitím tohoto druhu výztuže rovněž nízké. [21]

Tkanina je dvourozměrná výztuž získaná proplétáním přízí na tkacím stroji. Tkaninové výztuže mají mechanické vlastnosti o něco nižší než jednosměrná nekonečná vlákna. Obvykle se tkanina zpracovává proplétáním přízí podél dvou kolmých směrů: příže podél směru tkaní se nazývá *osnova* a proplétací příže kolmá na směr tkaní se nazývá *výplň* nebo *útek*. Vyvážených výztužných vlastností lze dosáhnout ve směru výplně i osnovy při použití stejného typu příže v obou osách tkaní. Tato architektura tkaní se nazývá dvouosá tkanina a je nejčastěji používaná jako konstrukční výztuž. V případě dvouosých tkaných struktur je možná široká škála vzorů

tkaní, přičemž nejběžnější jsou hladká vazba, keprová vazba a saténová vazba. Různé vzory tkaní zajišťují různé vlastnosti a struktury textilie a konečného kompozitního materiálu. [21]



Obr. 18 – Styly vazeb tkanin [24]

Kromě oblíbených dvouosých tkanin, jako je plátňová vazba, kepr a satén, existují i další tkaniny s jedinečnými vlastnostmi. Pokud je požadováno vyztužení pouze v jednom směru, ale při zachování snadné manipulace, nazývá se toto řešení jednosměrná tkanina. V tomto případě se podél směru osnovy používají normální příze, ale podél směru výplně se používají pouze tenké příze, které lze vyrobit z jiného levného a nekvalitního materiálu, jejichž úkolem je udržet osnovní příze pohromadě. Tímto způsobem se dosáhne mechanického zpevňujícího účinku pouze podél jedné osy (osy osnovy). Naproti tomu, pokud je požadován vícesosý vyztužující účinek (včetně směrů vychýlení), je řešením tříosá tkanina, která se získá proplétáním tří sad přízí pod různými úhly. Tímto způsobem lze dosáhnout kvaziizotropních vlastností materiálu, což však předpokládá i speciální technologie tkaní, které mají dopad na cenu výrobku. Všechny 2D textilie (rohož, tkanina, úplet, pletenina) jsou popsány a jejich architekturou vláken a hmotností na jednotku plochy v $[g/m^2]$. Architektura vláken se týká orientace a hmotnosti jednotlivých složek tkaniny. [21]

4.1.5. Matrice

Matrice má mnoho funkcí. Drží vlákna pohromadě, čímž přenáší zatížení přes rozhraní na výztužná vlákna a na kompozit z vnějších zdrojů. Přenáší některá zatížení, zejména příčné napětí, intralaminární smykové napětí. [21]

Matrice také hraje hlavní roli, pokud jde o tepelnou a elektrickou vodivost kompozitu, a také dominuje vnějším vlastnostem, jako je vzhled. Matricí mohou být polymery, kovy nebo

keramika. Polymerní matrice jsou nejběžnější, protože umožňují snadnou výrobu velmi složitých dílů s nízkými náklady na nástroje a nízkými investičními náklady na výrobu. Polymerní matice rozdělíme na dvě skupiny, a to termoplastické pryskyřice a termosetové pryskyřice. [21]

- Termosetové matrice

Termosetová matrice vzniká nevratnou chemickou přeměnou systému pryskyřic na zesíťovanou polymerní matici. Termosetové pryskyřice mají nízkou viskozitu, což umožňuje vynikající impregnaci vláknové výztuže a vysokou rychlost zpracování. Termosetové pryskyřice jsou nejběžnějšími pryskyřičnými systémy používanými v kompozitních systémech, protože se snadno zpracovávají a mají široký rozsah výkonnosti. Skladovatelnost je doba, po kterou lze nesmíšený systém pryskyřic skladovat bez degradace. Obvykle se doporučuje skladování v chladu, aby se dosáhlo nominální hodnoty skladovatelnosti výrobku. Životnost v nádobě nebo doba gelování je doba, po kterou může být smíšená pryskyřice, než viskozita vzroste do bodu, kdy již není možné zpracování. V závislosti na volbě iniciátoru nebo vytvrzovacího systému, katalyzátoru a reaktivity vytvrzovací cykly se mohou pohybovat od několika minut až po hodiny a mohou probíhat při pokojové teplotě nebo při zvýšené teplotě. Reakce mohou být exotermické nebo endotermické v závislosti na pryskyřici. Během vytvrzování směs uvolňuje nebo absorbuje teplo, houstne, tuhne a smršťuje se. Objemové smrštění při vytvrzování se liší v závislosti na typu a složení pryskyřice a tvrdidla. Objemové smrštění je způsobeno změnou volného objemu, ke které dochází při vytvrzování pryskyřice. Protože se vláknová výztuž nesmršťuje, může dojít k vnitřnímu pnutí, které způsobuje praskání a nesouosost vláken, jakož i rozměrovou nepřesnost a drsnost povrchu. Nejběžnější termosetové pryskyřice jsou: polyestery, vinylestery, epoxidové pryskyřice a fenolové pryskyřice. [21]

- Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice se hojně používají díky své univerzálnosti, vysokým mechanickým vlastnostem a vysoké odolnosti proti korozi. Epoxidy se smršťují méně než jiné materiály (1,2- 4 % objemu), což pomáhá vysvětlit jejich vynikající vlastnosti při lepení. Epoxidové pryskyřice jsou také oblíbené pro svůj jednoduchý proces vytvrzování, kterého lze dosáhnout při jakékoli teplotě v rozmezí 5 až 150 °C v závislosti na typu použitého vytvrzovacího prostředku a urychlovačů. Epoxidy se používají jako lepidla pro voštinové konstrukce a jako laminovací pryskyřice. [21]

- Termoplastické matrice

Termoplastický polymer nepodléhá během zpracování žádné chemické přeměně. Namísto toho je polymer z pevného stavu změkčen, aby mohl být zpracován, a po dokončení zpracování

se opět vrátí do pevného stavu. Termoplasty mají při teplotách zpracování vysokou viskozitu, což znesnadňuje jejich zpracování. Vysoká smyková napětí potřebná k tomu, aby termoplasty tekly, způsobují poškození vláken. Proto je jedním z hlavních cílů při výrobě nových termoplastických materiálů a procesů snížení viskózních účinků v kapalině. Protože vysoká viskozita zhoršuje impregnaci, je třeba věnovat zvláštní pozornost zajištění kontaktu mezi vlákny a polymerem. Termoplasty nevyžadují skladování v chladu a mají prakticky neomezenou skladovatelnost a životnost nádoby. Termoplastické kompozity lze také opravovat, protože přechod do fáze měknutí lze provést libovolně mnohokrát působením tepla. Polyether ether keton (PEEK) je běžnou termoplastickou matricí pro vysoce výkonné aplikace. Má velmi vysokou lomovou houževnatost, která je důležitá pro odolnost kompozitů proti poškození. [21]

5. Výrobní procesy

Volba výrobního procesu závisí na typu matrice a vláken, teplotě potřebné k vytvoření dílu a vytvrzení matrice a na ekonomické efektivitě procesu. Výrobní proces je často prvotním hlediskem při návrhu kompozitní konstrukce. Důvodem jsou náklady, objem výroby, rychlost výroby a vhodnost výrobního procesu pro výrobu požadovaného typu konstrukce.

Každý výrobní proces klade na konstrukční návrh určitá omezení. Konstruktor proto musí znát výhody, omezení, náklady, výrobní rychlosti a objemy a typická použití různých výrobních procesů. Při návrhu kompozitní konstrukce se materiál navrhuje současně s konstrukcí. Díky této volnosti lze navrhnout vysoce výkonné konstrukce za předpokladu, že konstruktor rozumí způsobu výroby materiálu. V této kapitole jsou uvedeny základní charakteristiky výrobních procesů, které jsou důležité pro konstruktéra konstrukcí. Ruční vrstvení, vrstvení prepregů, pytlivé lisování, zpracování v autoklávu, lisování, lisování s přenosem pryskyřice (RTM), vakuové lisování s přenosem pryskyřice (VARTM), pultruze, lisování z vláken a navíjení vláken. [21]

Směs výztuže a pryskyřice se ve skutečnosti stává kompozitním materiálem až v poslední fázi výroby, tj. po vytvrzení matrice. Po této fázi již není možné materiál upravovat, například tak, jak bychom chtěli upravit strukturu kovové slitiny tepelným zpracováním. V případě kompozitů s polymerní matricí je třeba ji polymerizovat, polyesterovou pryskyřicí. Během procesu tuhnutí přechází z kapalného stavu do stavu pevného stavu kopolymerací s monomerem, který je smíchán s pryskyřicí. Tento jev vede ke zpevnění. Toho lze dosáhnout buď pomocí chemické reakce (urychlovač) nebo teplem. [21]

Zpracování kompozitů s polymerní matricí zahrnuje následující jednotkové operace:

1. Umístění vláken v požadovaných směrech.

2. Impregnace vláken pryskyřicí.
3. Konsolidace impregnovaných vláken za účelem odstranění přebytečné pryskyřice, vzduchu a těkavých látek.
4. Vytvrzení nebo ztuhnutí polymeru.
5. Vyjmutí z formy.
6. Dokončovací operace, jako je ořezávání.

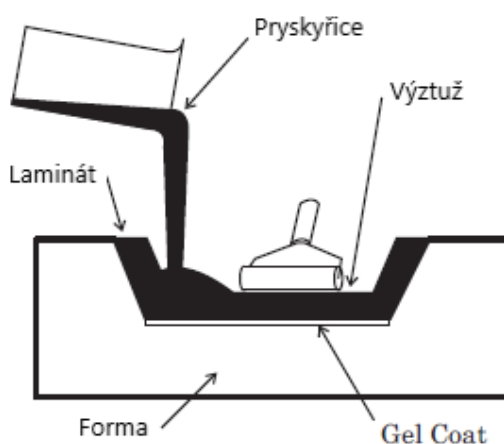
Různé výrobní procesy se liší způsobem provádění těchto operací. Některé z operací mohou být spojeny do jednoho jednoduchého kroku, aby se ušetřil čas. Například při navíjení vláken probíhá ukládání vláken, impregnace a konsolidace současně. Některé operace mohou být prováděny předem, například impregnace prepregu, který se následně použije při ručním vrstvení. Rozdíly ve způsobu zpracování materiálu mají významný dopad na náklady, rychlost výroby, kvalitu a výkonnost konečného výrobku. Každá metoda zpracování má své vlastní výhody a omezení, které ovlivňují konstrukční a materiálové řešení. [21]

5.1. Ruční kladení

Technika ručního kladení, se také nazývá mokré kladení, jedná se o nejjednodušší a nejrozšířenější výrobní proces. Jedná se o ruční kladení suchých výztuží do formy a následné nanášení pryskyřice. Poté se mokrý kompozit válcuje pomocí ručních válečků, aby se rovnoměrně roznesla pryskyřice a odstranily se vzduchové kapsy. Tento proces se opakuje, dokud splněna požadovaná skladba. Poté je vrstvená struktura vytvrzena. U otevřených metody je emisivita některých látek vysoká.

Proces ručního kladení můžeme rozdělit do čtyř hlavních kroků: příprava formy, nanášení gelu, vrstvení a vytvrzování. Příprava formy je jedním z nejkritičtějších kroků. Forma může být vyrobena ze dřeva, sádry, plastů, kompozitů nebo kovů v závislosti na typu a druhu počtu dílů, teploty vytvrzování, tlaku atd. Trvalé formy, které se používají pro dlouhé série, se vyrábějí z kovů. Formy vyrobené z kompozitů se většinou používají pro nízké objemy výroby, protože nereagují dobře na opakované použití. Forma může být pozitivního nebo negativního typu, podle toho, který povrch je potřeba mít vyhlazený. Na povrch formy se nanáší povlak separačního prostředku, který usnadňuje vyjmutí hotového dílu. Běžně používanými separačními prostředky jsou vosk, polyvinylalkohol, silikony a separační fólie. Volba separačního prostředku závisí na typu laminovaného materiálu a na požadovaném stupni lesku hotového výrobku. Po přípravě formy se aplikuje gelová vrstva, aby se dosáhlo dobrého vzhledu povrchu dílu. Gelový povrch se tak stává vnějším povrchem laminátu. Tento povrch tvoří ochrannou vrstvu, kterou vláknité výztuhy nepronikají, a výrobek nemusí vyžadovat žádné následné dokončovací operace na povrchu. Poslední kroky zahrnují přípravu materiálu, umístění vláken a vytvrzení. Vláknata se pokládají ve formě rohože z nasekaných vláken, tkaniny

nebo tkaného předu. Předem odměřené pryskyřice a katalyzátory se důkladně promíchají. Směs pryskyřic se poté nanese na vlákna. Vroubkovanými ručními válečky se materiál přitlačí k formě, aby se zajistilo úplné odstranění vzduchu. Vytvrzování obvykle probíhá při pokojové teplotě a konečný díl se vyjme vytažením z formy. Výrobní rychlost a náklady na techniku ručního vrstvení se značně liší a závisí na použitých vláknech a matrici, na velikosti vyráběného dílu. Výhodami této metody jsou 1) výroba dílu se složitou geometrií, 2) minimální investice do zařízení a nástrojů, 3) možnost sendvičové konstrukce, 4) snadné umístění vložky a konstrukční výztuže, 5) jednoduchá výroba dílu s vynikající povrchovou úpravou bez nutnosti vytvrzovacího procesu. [21]



Obr. 19 – Ruční kladení [21]

5.2. Vrstvení prepregu

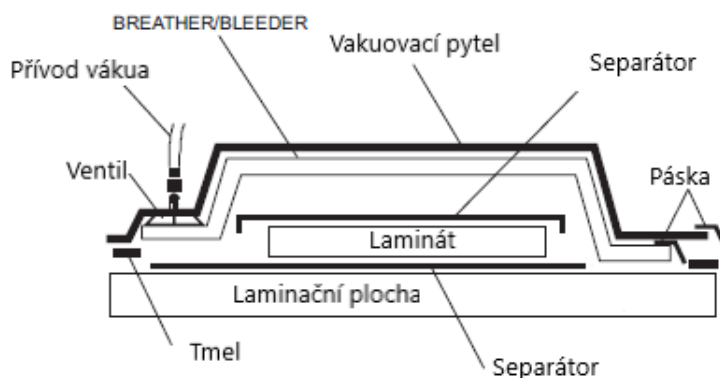
Prepreg je předimpregnovaný vláknový výztužný materiál, kde je pryskyřice částečně vytvrzená nebo zahuštěná. Vlákna jsou uspořádána do jednosměrné pásky, tkaniny, nebo náhodně nasekaných vláken. Základní rozdíl mezi vrstvením prepregů a konvenčním ručním kladením spočívá v tom, že při použití prepregu se impregnace vláken provádí před skládáním. Prepregy se hojně používají pro výrobu vysoce výkonných leteckých dílů a složitých geometrií. Většina prepregů se skládá z epoxidových pryskyřic a výztuh; obvykle obsahují skleněná, uhlíková a aramidová vlákna. Ve většině prepregů je obsah pryskyřice vyšší, než je požadováno v konečném dílu, takže je nutné ji při vytvrzování odstranit. Nižší obsah pryskyřice také snižuje hmotnost a náklady bez vlivu na pevnost. Nové prepregy se vyrábějí s obsahem pryskyřice blízkým čistému obsahu. Obsah pryskyřice blízký čistému obsahu pryskyřice znamená, že množství pryskyřice v prepregu je udržováno blízko obsahu pryskyřice požadovaného ve finálním dílu. Tyto prepregy se vyrábějí metodou impregnace za tepla, která minimalizuje množství těkavých látek přítomných v prepregu. [21]

Prepregy se obvykle dodávají v rolích vhodné šířky. Obvykle se nařezou tak, aby se vešly do formy, a pokládají se vrstva po vrstvě a danou orientací, dokud nevznikne požadovaná skladba.

Vzhledem k tomu, že pryskyřice je částečně vytvrzená, mají prepregy omezenou trvanlivost, která se prodlužuje skladováním v mrazničkách. Při vytvrzování dílů laminovaných pomocí prepregů je obvykle zapotřebí autokláv nebo vakuum. Výhodami vrstvení prepregu jsou především vysoký objemový podíl vláken, dále rovnoměrné rozložení vláken, jakož i jednoduchá a relativně čistá výroba. Nevýhodami jsou poté zejména pomalá práce s požadavkem na přesnost kladení, dražší zařízení na vytvrzování a dražší používaný prepregový materiál. [21]

5.3. Vakuové formování

Při vakuovém formování působí rovnoměrný tlak na laminát před jeho vytvrzením a zlepšuje uspořádání vláken a odstraňuje přebytečnou pryskyřici, vzduch a těkavé látky z matrice. Tlak se vyvíjí pomocí pružné membrány nebo vaku. Vrstvy výtuh se položí do formy a nanese se pryskyřice. Odvzdušňovací rohož pomáhá rozvádět podtlak po celém dílu a směřuje těkavé látky a přebytečnou pryskyřici do vakuového otvoru. Laminát se poté pokryje pružným sáčkem, který je dokonale utěsněn k formě. Poté se aplikuje vakuum a díl je vytvrzen teplem a tlakem. Přivedení vakua pod plachtu působí atmosférický tlak rovnoměrně na laminát. Vakuum pomáhá stáhnout přebytečné těkavé sloučeniny, jako jsou zbytky rozpouštědla, zachycený vzduch nebo nízkomolekulární složky pryskyřice. Po skončení cyklu se z materiálů stane celistvý tvarovaný díl, který má požadovanou skladbu. Existují tři základní metody působení tlaku na laminát: tlakový vak, vakuový vak a autokláv, přičemž poslední dvě jmenované metody jsou nejrozšířenější. [21]

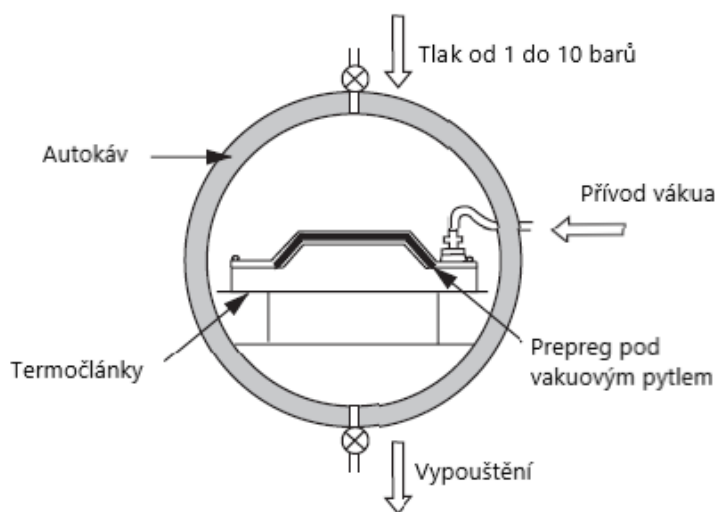


Obr. 20 – Vakuové formování [21]

5.4. Autoklávové zpracování

Autokláv je tlaková nádoba, která během vytvrzování dílu působí stlačeným plynem na díl. Používají se pro výrobu vysoce kvalitních a složitých dílů. Metoda je vhodná pro velké díly a střední výrobní množství. Zpracování kompozitů v autoklávu je rozšířením techniky vakuových vaků, poskytuje vyšší tlak, než je dostupný při vakuu, a umožňuje větší stlačení vrstev a odstranění dutin. Kompozitní díl se umístí a uzavře do vaku. Uvnitř vaku se vytvoří

podtlak a na vnější straně vaku působí atmosférický tlak. Díl i s přívodem podtlaku se umístí do autoklávu pro následné vytvrzení. Teplota dílu je pak zvýšena, aby došlo k vytvrzení polymeru. Vyšší teplota také snižuje viskozitu polymeru, což napomáhá smáčení výztuže a zpevnění kompozitu. Zvýšený tlak působí na nezpevněný kompozit mechanickými silami, zvyšuje účinnost transportu těkavých látek do vakuových otvorů a způsobuje, zvýšenou smáčivost kompozitu a proudění pryskyřice. Většina autoklávů pro výrobu kompozitů je ve tvaru válcových nádoby s klenutými konci, z nichž jeden tvoří dveře nebo vstup. Autoklávy s velkým průměrem vyžadují extrémně silné stěny a jsou velmi drahé. Většina autoklávů pro výzkum a vývoj má průměr asi 1 m, zatímco průměr výrobních autoklávů se pohybuje od 1 do 8 m. Pro výrobu dílů se používá polyesterové, epoxidové, hliníkové, ocelové a lité epoxidové formy. Velké epoxidové formy musí být vyztuženy, aby forma byla rozměrově stabilní. Autoklávové operace spotřebovávají velké množství energie, materiálu a materiálů na pytlování. Cyklus vytvrzování dílu v autoklávu je dlouhý a náročný. V případě velmi silných dílů může být nutné vytvrzovací cyklus několikrát opakovat, aby bylo dosaženo požadovaného vytvrzení. Rychlost výroby autoklávů je také určena profilem vytvrzování, který zahrnuje zahřívání, vytvrzování a dobu chlazení. [21]



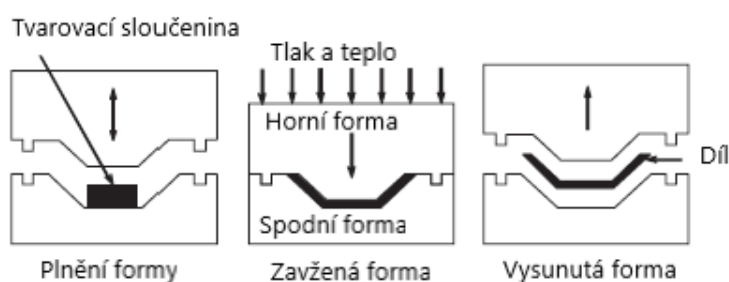
Obr. 21 – Autoklávové zpracování [21]

5.5. Tlakové lisování

Při lisování se používají shodné kovové pozitivní a negativní formy. Odměřené množství směsi (vlákno plus pryskyřice) je vloženo do formy. Hydraulický lis za použití tepla a relativně vysokého tlaku vytvarují vlákna s pryskyřicí do tvaru uzavřené vnější a vnitřní lisovací formy. Po vytvrzení materiálu se formy uvolní a vzniká nový díly vytažením z formy. Následné operace po lisování zahrnují odstranění otřepů a dovytvrzení. Tlakové lití je jednoduchý a dobře zavedený proces. Minimalizuje se při něm náklady na zhotovení dílu, téměř eliminuje plýtvání

materiálem a vyžaduje minimální pracovní sílu. Proces lze snadno automatizovat, což umožňuje velkoobjemovou výrobu s velmi dobrou opakovatelností. Malé díly lze vyrábět jako rychlostí 15 dílů za minutu a větší díly (např. automobilové nárazníky) rychlostí až 24 dílů za hodinu. Lis je nejdůležitějším a nejdražším zařízením v procesu lisování. Lisy pro lisování jsou obvykle vertikálně působící s pohyblivými zápustkami vyrobenými z nástrojové oceli. Povrchy formy jsou leštěny a někdy chromovány pro zvýšení tvrdosti povrchu. Velikosti lisů se pohybují od 100 tun do 4 000 tun a vyrábějí díly o hmotnosti od 1 kg do více než 75 kg. Volitelné vybavení zahrnuje předehřívače a předformovače, které umožňují rychlejší lisovací cykly a snižují množství zachyceného vzduchu v konečném dílu. Tlakové lisování neumožňuje vysoký obsah kontinuálních vláken. Proto nejsou díly vhodné pro primární konstrukce, i když se používají pro některé sekundární konstrukce. Tyto součásti pro tlakové lití se používají také v případech, kdy je požadována vysoká tuhost, a to tak, že se do dílu navrhnu žebra a příruby. Nejběžnějšími zatěžovacími směsmi používanými při lisování jsou BMC (bulk molding compound) a SMC (sheet molding compound). BMC je směs podobná těstu s obsahem vláken, který se pohybuje od 20 % do 50 %. Kombinace plniv (minerály, celulóza atd.) se mísí s pryskyřicemi v lopatkovém míchadle. Výztuž může tvořit sklo, celulóza, bavlna nebo jiné vláknité materiály. Tato dávka materiálu se vloží do formy při teplotě 150 až 200°C a formuje se při tlaku přibližně 3 až 4 MPa. [21]

SMC má delší vlákna a vyšší obsah vláken než BMC. Lze jej tvarovat do silných a tenkých profilů při zachování maximální integrity vláken. Desky SMC obsahují pryskyřici, plniva, katalyzátor a předimpregnované výztuže, které se rozřežou na desky vhodné velikosti nebo náplně, které se vloží do horké formy. Teplota formy je obvykle 150 až 200°C a formuje se při tlaku 7 až 14 MPa. [21]

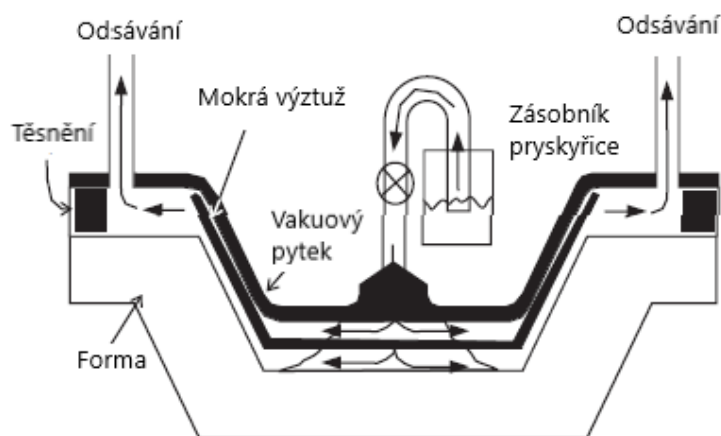


Obr. 22 – Tlakové lisování [21]

5.6. Vakuové vstřikování pryskyřice

Při vakuovém vstřikování pryskyřice (VARTM) se vakuum přivádí na výstup formy a pryskyřice se do formy vtahuje pouze pomocí vakua. Schéma procesu je znázorněno na obrázku. Tlak působící na impregnovanou výztuž je způsoben tlakovým rozdílem mezi působením vakua a atmosférického tlaku na povrch vaku. Vzhledem k tomu, že místo tlaku je aplikován podtlak,

může být jedna polovina formy nahrazena vakem. Proudění pryskyřice mohou napomáhat mikrodrážky zabudované do formy nebo do distribuční sítě umístěné pod vakem. Vzhledem k tomu, že tlakový rozdíl je mnohem nižší než tlak používaný při konvenční RTM a vytvrzování se nejčastěji provádí při teplotě okolí, lze podstatně snížit náklady na formu; těžké ocelové formy potřebné při tlakové RTM lze nahradit lehčími formami ze dřeva, epoxidu nebo lehké oceli. Doba cyklu tohoto procesu se pohybuje od několika minut až po hodiny u velkých složitých dílů. Typické aplikace VARTM zahrnují velké, komplexní díly, jako jsou trupy lodí apod. Tkané materiály jsou pro tento účel ideální, protože jsou dostatečně volné, aby pryskyřice mohla prosakovat. Voštinové jádro nelze použít, protože by se buňky zaplnily pryskyřicí. Pěny potřebují být dostatečně pevné, aby odolaly tlaku (rovnajícímu se aplikovanému vakuu). Lze dosáhnout vysokého objemového podílu vláken (až 60 %), při velmi nízkém obsahu prázdných míst. Do ovzduší se uvolňuje velmi málo těkavých organických látek. Pryskyřice je po celou dobu uzavřena, což je významná výhoda při použití VARTM ve srovnání s metodami mokrého vrstvení. Finální díly vyrobené tímto postupem mají dobré rozměrové tolerance, které jsou srovnatelné s tolerancemi u dílů vyrobené technologií RTM a pokládání prepregů a lepší než ruční a mokré vrstvení. Vzhledem k tomu, že VARTM se obvykle používá pro velké díly, může jakákoli neimpregnovaná plocha mít za následek znehodnocení dílu. Uživatel VARTM musí použít metodu pokusu a omylu nebo simulační software, aby se naučil, jak zabránit vzniku neimpregnovaným plochám. [21]

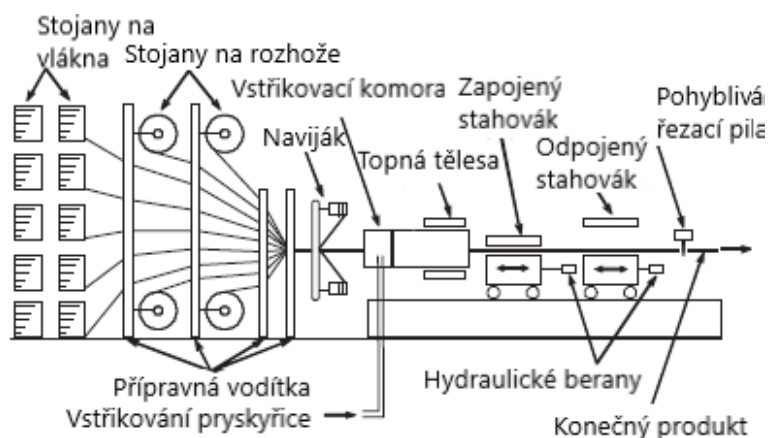


Obr. 23 – Vakuové vstřikování pryskyřice [21]

5.7. Pultruze

Pultruze je kontinuální výrobní proces, který se používá k výrobě tvarů konstantního průřezu libovolné délky. Pultruze je nízkonákladový proces, protože se při něm dosahuje přímé přeměny nekonečných vláken a pryskyřice na hotový díl. Vlákná jsou kontinuálně impregnována a protahována vyhřívanou matricí, kde jsou tvarována a vytvrzována. V nejjednodušší pultruzní lince se roving dávkuje ze stojanů na rohože a vedou se přes

předtvarovací vedení. Předtvarovací vodítka umísťují výztuhy na příslušná místa v průřezu výrobku, jak je určeno konstrukcí. Výztuže vstupují suché do vstřikovací komory, kde jsou smáčeny pryskyřicí dodávanou pod tlakem. Průřez zápustky dává výrobku konečný tvar. Jak vlhká výztuž prochází vstřikovací komorou, dochází k vytvrzování, kterému napomáhá teplo dodávané řadovými ohříváči. Při vytvrzování se kompozit smršťuje a odděluje od stěn matrice, přičemž matrici opouští jako hotový výrobek. Vytvrzený díl je poté vytažen vratnými tahači, které jsou synchronizovány tak, aby byla zajištěna konstantní rychlost. Výrobek se tak vyrábí kontinuálně v prakticky nekonečné délce. Pohyblivá řezací pila se upne k pohybujícímu se výrobku, kdykoli je k dispozici přednastavená délka výrobku, čímž se díl rozřízne bez zastavení procesu. Délka řezu je zvolena tak, aby usnadnila přepravu pultrudovaného výrobku. Lze vyrábět jak uzavřené profily (např. krabicový nosník), tak otevřené profily (např. I-nosník), ale jednodušší je vyrábět uzavřené profily. Uzavřené profily, jako je krabicový nosník, se vyrábějí pomocí trnu konzolovitě umístěného za vstupem do matrice. Pultruzní linka může být také vybavena rotačním navíječem, který aplikuje výztuhy pod úhlem (obvykle $\pm\theta$) kolem výrobku. To se běžně používá k výrobě trubek a hnacích hřídelí. Hlavní náklady procesu spočívají v zařízení, chromované matrice a konstrukce a seřízení vodícího systému. Z těchto důvodů je pultruze ideální pro velkosériové aplikace. Pultruze má určitá omezení týkající se orientace a obsahu vláken. Musí obsahovat minimální podíl podélných vláken, aby bylo možné výrobek vytáhnout. Objemový podíl vláken může zřídka překročit 45 %; typičtější hodnotou je 30 %.[21]

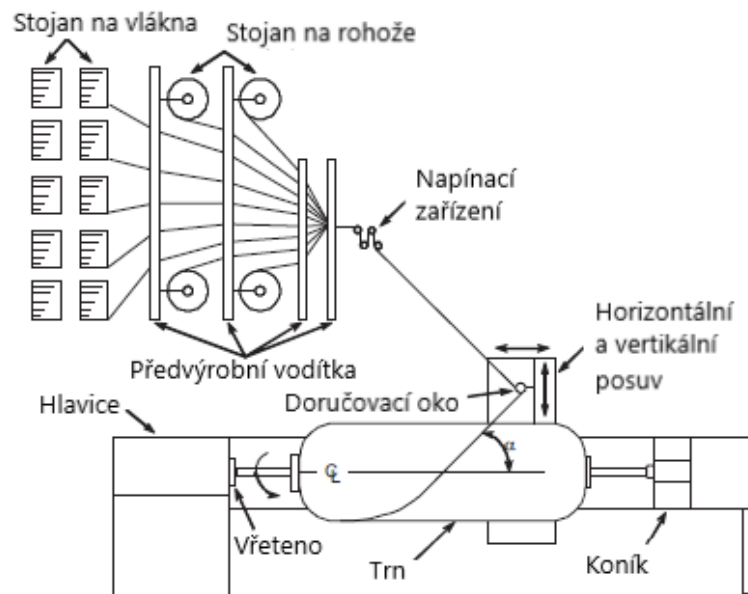


Obr. 24 – Pultruze [21]

5.8. Navíjení vláken

Většina tvarů vytvořených tímto procesem jsou rotační plochy, jako jsou trubky, válce a koule. Při navíjení vláken se na trn navíjejí nekonečné výztuže, jako je například roving, dokud není povrch pokryt a není dosaženo požadované tloušťky. Tento proces využívá suroviny vlákna a pryskyřici, v poměrně automatizovaném procesu s nízkou pracností, což přispívá k nízkým

výrobním nákladům. Předem naprogramované otáčení trnu a vodorovný pohyb podávacího oka vytvářejí šroubovicový vzor znázorněný na obrázku, což je nejjednodušší způsob provozu šroubovicového navíjecího stroje. Šroubový navíjecí stroj je podobný soustruhu. Trn se otáčí nepřetržitě, zatímco dodávací oko se pohybuje tam a zpět. Rychlost otáčení trnu a lineární rychlost dodávacího oka lze nastavit tak, aby se dosáhlo libovolné orientace vláken v rozmezí od 5° do 90°, což se nazývá obručové navíjení. Šroubový navíječ se třemi možnými pohyby, tzv. osami, je znázorněn na obrázku, ale k dispozici jsou stroje až se šesti osami. Bylo vyvinuto několik typů trnů, které usnadňují odstraňování. Nejjednodušší alternativou používanou u některých tlakových nádob je použití kovové vložky jako trnu a ponechání vložky jako nedílné součásti konečného výrobku. To je někdy nutné, aby se zabránilo úniku plynů difuzí přes kompozitní stěnu. Skládací trny jsou vyrobeny ze segmentů, které lze po vytvrzení dílu rozebrat. Tyto trny jsou nejdražší, a proto se používají pro velkosériovou výrobu. Rozpustný pískový trn je vyroben z písku a polyvinylalkoholu. Směs se odlévá ve dvou nebo více částech, které po sestavení dávají požadovaný tvar. Po vytvrzení kompozitu se trn rozpustí vstříknutím horké vody. Sádrové formy se používají pouze pro prototypy nebo malé série velkých dílů, protože jsou náročné na práci a při jejich odstraňování může dojít k poškození dílu. Kromě použití mokřých výtuh je možné použít i prepreg nebo mokřý převálcovaný materiál, ale tyto možnosti vždy zvyšují počet operací a náklady na výrobek. Maximální tloušťka, kterou lze navinout, je omezena skluzáváním vláken a jejich zvrásněním pod tlakem nových vrstev na vrcholu. Při velké tloušťce může být nutné navíjení přerušit a před přidáním dalších vrstev nechat díl částečně vytvrdit, dokud pryskyřice nepřejde do gelové formy. Tím se proces zpomaluje, což vede k dalším nákladům. Proto, stejně jako prakticky u všech procesů, se z výrobního hlediska dává přednost relativně tenkým laminátům. Hlavními omezeními navíjení vláken jsou omezení velikosti, geometrické možnosti, orientace vláken a povrchová úprava konečného výrobku. Obsah dutin může být vysoký, protože se nepoužívá vakuum ani autokláv a pryskyřice vytvrzuje při nízké teplotě. Rychlost posuvu se liší podle síly použitého vlákna, obvykle se jedná o rychlosti 0,6-1,2 m/s pro výrobu s použitím mokřého vlákna. [21]



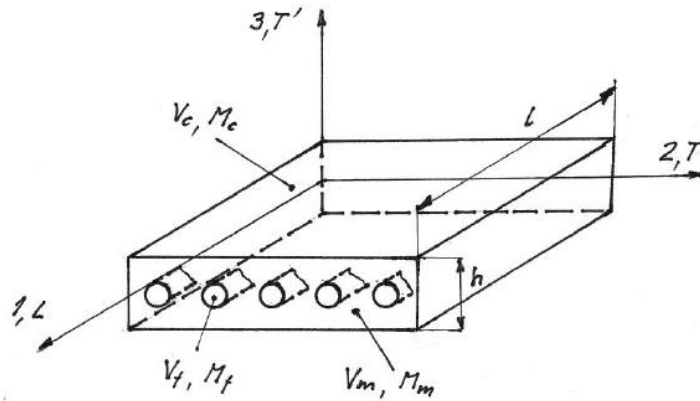
Obr. 25 – Navíjení vláken [21]

6. Mikromechanika kompozitů

Mikromechanika je studium kompozitních materiálů, které podrobně zohledňuje vzájemné působení jednotlivých materiálů. Mikromechanika umožňuje konstruktérům reprezentovat heterogenní materiál jako ekvivalentní homogennímu materiálu, obvykle anizotropního. Mikromechaniku lze použít k předpovědi tuhosti a pevnosti. Kompozitní materiály jsou třídou materiálů, které se navrhují současně s konstrukcí. Při navrhování s kovy je jedinou volbou typ slitiny a tepelné zpracování, po nichž následuje návrh geometrie. Kompozitní materiály se vyrábějí jako kombinace různých vláken s různými matricemi. Konstruktér může současně měnit vlákna, matrice, relativní množství jednotlivých složek a geometrii součásti. [13]

6.1. Materiálové charakteristiky vlákových kompozitů

U kompozitních materiálů je zásadní směšovací pravidlo, které udává objemový podíl vlákna a matrice. Dalším faktorem, který rozhoduje o vlastnostech je orientace vláken v systému. Aby kompozit zvládl co největší zatížení je důležité, aby směr působících sil byl shodný se směrem vláken.[24]



Obr. 26 – Model kompozitu [24]

Je potřebné nadefinovat základní veličiny:

M_c, M_f, M_m - celková hmotnost kompozitu, vláken a matrice

ρ_c, ρ_f, ρ_m - celková hustota kompozitu, vlákna a matrice

v_c, v_f, v_m - celkový objem kompozitu, vlákna a matrice

V_c, V_f, V_m - celkový objem vzorku, vlákna a matrice

Pro další použití platí objemové a hmotnostní podíly

$$v_f = \frac{V_f}{V_c} \quad (6.1.1)$$

$$v_m = \frac{V_m}{V_c} \quad (6.1.2)$$

$$m_f = \frac{M_f}{M_c} \quad (6.1.3)$$

$$m_m = \frac{M_m}{M_c} \quad (6.1.4)$$

Aby byla zachována podmínka objemu a hustoty platí

$$V_f + V_m = V_c \quad (6.1.5)$$

$$1 = \frac{V_f}{V_c} + \frac{V_m}{V_c} = v_f + v_m = \sum_i v_i \quad (6.1.6)$$

$$M_c = M_f + M_m = m_f + m_m = \sum_i m_i \quad (6.1.7)$$

$$1 = \frac{M_f}{M_c} + \frac{M_m}{M_c} = m_f + m_m = \sum_i m_i \quad (6.1.8)$$

Z toho je patrná provázanost objemového a hmotnostního podílu pomocí ρ

$$m_f = \frac{M_f}{M_c} + \frac{\rho_f \cdot V_f}{\rho_c \cdot V_c} = \frac{\rho_f}{\rho_c} \cdot v_f \quad (6.1.9)$$

$$m_m = \frac{M_m}{M_c} + \frac{\rho_m \cdot V_m}{\rho_c \cdot V_c} = \frac{\rho_m}{\rho_c} \cdot v_m \quad (6.1.10)$$

Pro hustotu kompozitu ρ_c platí následující vztah vycházející z celkové hmotnosti kompozitu

$$M_c = M_f + M_m \quad (6.1.11)$$

$$\rho_c \cdot V_c = \frac{\rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot V_m}{V_c} \quad (6.1.12)$$

$$\rho_c = \rho_f \cdot v_f + \rho_m \cdot v_m = \sum_i \rho_i \cdot v_i \quad (6.1.13)$$

Rovnice, která vyšla naposledy, se jmenuje směšovací pravidlo, kterým se stanovuje hustota kompozitu ρ_c

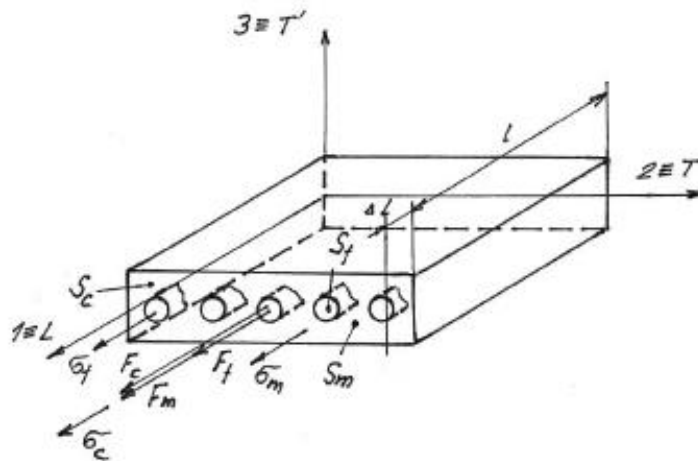
Tento vztah je platný pro ideální kompozitní materiál bez dutin, proto můžeme stanovit objemový podíl dutin v_d , kterým se měří kvalita kompozitu za pomoci hustot

$$v_d = \frac{\rho_{c,teor} - \rho_{c,ex}}{\rho_{c,teor}} \quad (6.1.14)$$

Kde $\rho_{c,teor}$ je hustota kompozitu a je shodná s ρ_c . [24]

6.1.1. Podélný modul pružnosti v tahu a podélná pevnost

V podélném směru se průměrné napětí v kompozitu σ_c označuje také jako směšovací pravidlo pro napětí



Obr. 27 – Model kompozitu [24]

Musíme zachovat rovnováhu sil v podélném směru

$$F_c = F_f + F_m \quad (6.1.1.1)$$

$$\sigma_c \cdot S_c = \sigma_f \cdot S_f + \sigma_m \cdot S_m \quad (6.1.1.2)$$

vydělením rovnice 1 a získáme

$$\sigma_c \cdot V_c = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m \cdot V_m \quad (6.1.1.3)$$

vydělením rovnice $\frac{1}{V_c}$ vyjde směšovací pravidlo pro napětí v kompozitu

$$\sigma_c = \sigma_f \cdot v_f + \sigma_m \cdot v_m = \sum_i \sigma_i \cdot v_i \quad (6.1.1.4)$$

σ_c průměrné podélné napětí v kompozitu

σ_f napětí ve vláknu

σ_m napětí v matrici

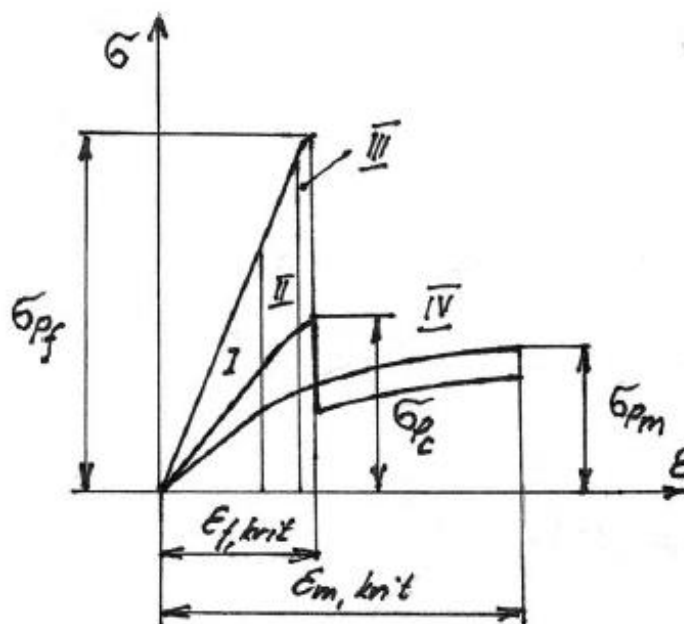
S_c plocha příčného průřezu v kompozitu

S_f plocha průřezu vlákna

S_m plocha průřezu matrice

S ohledem na podmínku statické silové ekvivalence bylo odvozeno směšovací pravidlo pro napětí v kompozitu. To platí pro pružný i plastický materiál. Při známosti tahových diagramů jednotlivých složek nám umožní stanovit tahový diagram kompozitních materiálů. [24]

Jak je vidět ze vztahu, oba komponenty při zatěžování vykazují lineární charakteristiku, tedy je tahový diagram kompozitu také lineární. Pokud je jedna ze zatěžovaných složek nelineární, tak tahový diagram kompozitu je také nelineární. [24]



Graf 1 – Tahový diagram [24]

Na tahovém diagramu jsou vidět čtyři části:

I – Vlákno i matrice mají lineární pružné chování.

II – Vlákno se chová lineárně pružně, ovšem matrice se chová pružně plasticky.

III – Vlákno i matrice mají pružně plastické chování.

IV – Po prasknutí vlákna vykazuje matrice elasticko-plastické chování.

Výsledný diagram je lineární pouze v I úseku ve zbylých úsecích II, III a IV je již nelineární.

Modul pružnosti kompozitu E_c v podélném směru můžeme stanovit a definovat v lineárně pružném úseku I. Hookův zákon stanovuje napětově-deformační charakteristiky vláken, matrice i kompozitu: [24]

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_f \quad (6.1.1.5)$$

$$\sigma_m = E_m \cdot \varepsilon_m \quad (6.1.1.6)$$

$$\sigma_c = E_c \cdot \varepsilon_c \quad (6.1.1.7)$$

Předpokládané dokonalé spojení na rozhraní vláknem a matricí, potom platí:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon_c \quad (6.1.1.8)$$

Dosazením předchozích vztahů vychází:

$$E_c \cdot \varepsilon_c = E_f \cdot \varepsilon_f \cdot v_f + E_m \cdot \varepsilon_m \cdot v_m \quad (6.1.1.9)$$

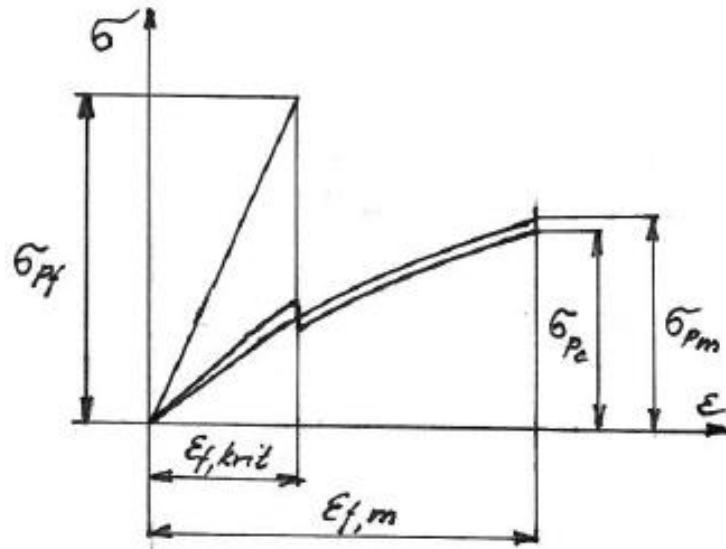
Po úpravě vychází:

$$E_c = E_f \cdot v_f + E_m \cdot v_m = E_f \cdot v_f + E_m \cdot (1 - v_f) \quad (6.1.1.10)$$

Výsledná tahová pevnost kompozitu σ_{Pc} je dána stavem, kdy dochází k praskání vláken. To se děje u dobře navrženého kompozitu, tj. kritické přetvoření vláken $\varepsilon_f = \varepsilon_{f,krit}$. Bereme dvousložkový kompozit a vztah pro napětí v kompozitu σ_c a se zahrnutí podmínky pro přetržení vlákna dostaneme:

$$\sigma_{Pc} = \sigma_{Pt,L} = \sigma_{Pf} \cdot v_f + \sigma_{m,\varepsilon_f,krit} \cdot (1 - v_f) \quad (6.1.1.11)$$

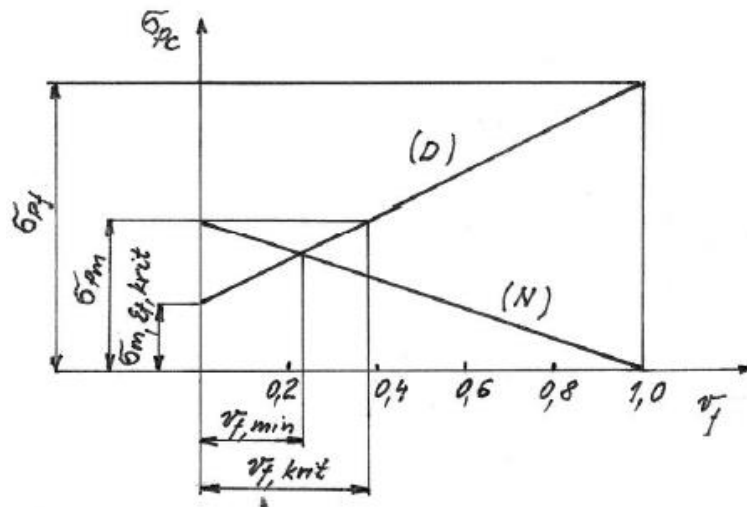
U nevhodně navrženého kompozitu s malým objemovým podílem vláken a velmi tažnou matricí dochází k tomu, že pevnost kompozitu je daná stavem, kdy praská matrice. Ještě dříve, než vlákna začnou přenášet zatížení, dojde k jejich přetržení. Pro tuto možnost dostáváme vztah: [24]



Graf 2 – Tahový diagram [24]

$$\sigma_{Pc} = \sigma_{Pt,L} = \sigma_{Pm} \cdot v_m + \sigma_{Pm} \cdot (1 - v_f) \quad (6.1.1.12)$$

Z těchto dvou variant dostáváme dvě rovnice pro dobře navržený (6.1.1.11) kompozit a špatně navržený kompozit (6.1.1.12). Graficky znázornění na Graf 1



Graf 3 – Diagram vhodně a nevhodně navrženého kompozitu [24]

6.1.2. Kritický objemový podíl vláken

Zavádíme dvě nové veličiny $v_{f,krit}$ (kritický objemový podíl vláken) a $v_{f,min}$ (minimální objemový podíl vláken). Jedná se o veličiny důležité pro navrhování kompozitu; kritický objemový podíl vláken $v_{f,krit}$ odpovídá případu, kdy pevnost kompozitu σ_{Pc} a pevnosti matrice σ_{Pm} jsou si rovny a kompozit je dobře navržený a můžeme zapsat: [24]

$$\sigma_{Pc} = \sigma_{Pm} \quad (6.1.2.1)$$

Po dosažení dostáváme:

$$\sigma_{Pc} = \sigma_{Pf} \cdot v_{f,krit} + \sigma_{m,\varepsilon_f,krit} \cdot (1 - v_{f,krit}) = \sigma_{Pm} \quad (6.1.2.2)$$

Z výsledného vztahu dopočítáme kritický objemový podíl vláken $v_{f,krit}$ jako

$$v_{f,krit} = \frac{\sigma_{Pm} - \sigma_{m,\varepsilon_f,krit}}{\sigma_{Pf} - \sigma_{m,\varepsilon_f,krit}} \quad (6.1.2.3)$$

6.1.3. Minimální objemový podíl vláken

Minimální objemový podíl vláken $v_{f,min}$ je stav, kdy dochází k shodné pevnosti dobře navrženého kompozitu a nevhodně navrženého kompozitu. Ten můžeme vidět na Graf 3 na průsečíku přímky D a N . Tedy:

$$\sigma_{Pc}(D) = \sigma_{Pm}(N) \quad (6.1.3.1)$$

Po dosažení vztahů:

$$\sigma_{Pf} \cdot v_{f,min} + \sigma_{m,\varepsilon_f,krit} \cdot (1 - v_{f,min}) = \sigma_{Pm} \cdot (1 - v_{f,min}) \quad (6.1.3.2)$$

po úpravě dostaneme vztah pro minimální objemový podíl vláken $v_{f,min}$:

$$v_{f,min} = \frac{\sigma_{Pm} - \sigma_{m,\varepsilon_f,krit}}{\sigma_{Pf} + \sigma_{Pm} - \sigma_{m,\varepsilon_f,krit}} \quad (6.1.3.3)$$

z toho vztahu vyplývá několik pravidel. Použití kompozitního materiálů dává smysl, pokud pevnost kompozitu je vyšší než pevnost matrice, tedy:

$$\sigma_{Pc} > \sigma_{Pm} \quad (6.1.3.4)$$

Následně musí platit:

$$v_f > v_{f,krit} \quad (6.1.3.5)$$

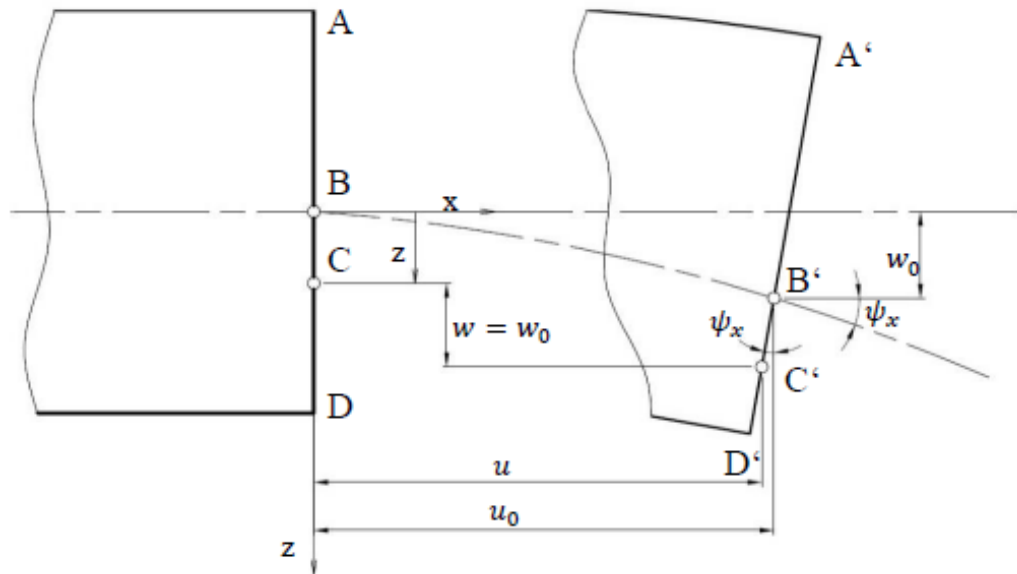
Což nám říká, že objemový podíl vláken je větší než kritický poměr vláken. [24]

6.2. Laminátová teorie

Pomocí laminátové teorie se dají analyticky počítat kompozity. Musíme uvažovat laminát jako tenkou desku s následujícími předpoklady:

- Všechny laminy v laminátu jsou kvazihomogenní.
- Tloušťka laminy je ve mnohem menší ve srovnání s jimi zbylými rozměry.
- Posun jednotlivých bodů je malý ve všech směrech.
- Spoj mezi laminami je ideální, nekonečně tenký, a proto jsou posunutí spojitá.
- Příčné posunutí se mění lineárně.
- Rovinný stav napjatosti je $\sigma_{zz} = \sigma_{xy} = \sigma_{yz}$ jelikož tloušťka laminátu je v porovnání se zbylými rozměry malá.

- Příčné zkosení $\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$ z toho důvodu zůstanou kolmice ke středové ploše kolmé i po deformaci a budou přímkové.
- Přetvoření v příčném směru $\varepsilon_{zz} = 0$ jde zanedbat, protože normálová vzdálenost od střednice roviny zůstává stejná.
- Mezi deformací a napětím budou závislosti lineární.



Obr. 28 – Část laminátu v rovině [24]

Na obrázku je znázorněn část laminátu v rovině xz . Část vlevo tvořená body AD je nezdeformovaný laminát. Zdeformovaný laminát vpravo označen A'D' je po deformaci a stále přímý a kolmý ke střednici. Deformace má vliv na bod B', kde vzniká posuv u_0, v_0, w_0 odpovídající osám x, y, z . Posuv bodu C vyjádříme jako:[24]

$$u = u_0 - z\psi_x \quad (6.2.1)$$

Kde ψ_x je sklon střední roviny laminátu, pak můžeme psát $\psi_x = \frac{\partial w_0}{\partial x}$. Pak platí posuv ve směru y

$$v = v_0 - z\psi_y \quad (6.2.2)$$

$$\psi_y = \frac{\partial w_0}{\partial y} \quad (6.2.3)$$

Jak vychází z předpokladů, tak tloušťku zanedbáme potom $w = w_0$,

Předešlé rovnice přepíšeme do tvaru pole posuvů

$$u = u_0 - z \cdot \frac{\partial w_0}{\partial x} = u_0 - z\psi_x \quad (6.2.4)$$

$$v = v_0 - z \cdot \frac{\partial w_0}{\partial y} = v_0 - z\psi_y \quad (6.2.5)$$

$$w = w_0 \quad (6.2.6)$$

Po derivování pole posuvů vznikne pole deformací

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \cdot \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \quad (6.2.7)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \cdot \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \quad (6.2.8)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{\partial v_0}{\partial y} - 2 \cdot z \cdot \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \cdot \partial y} \quad (6.2.9)$$

Přepsaný v maticovém zápisu

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^\circ \\ \varepsilon_{yy}^\circ \\ \varepsilon_{xy}^\circ \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (6.2.10)$$

kde deformační plochy jsou

$$\varepsilon_m^\circ = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^\circ \\ \varepsilon_{yy}^\circ \\ \varepsilon_{xy}^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ 2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \cdot \partial y} \end{bmatrix} \quad (6.2.11)$$

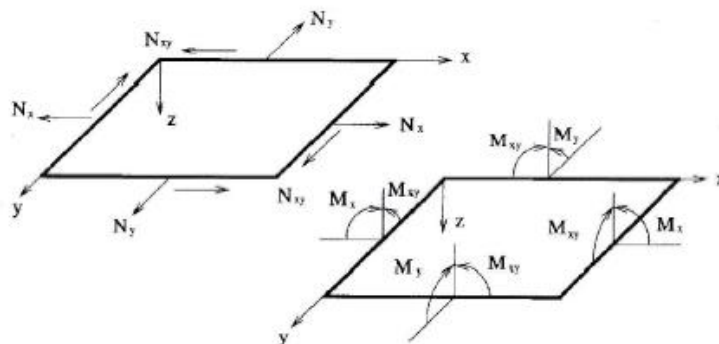
Pro jakoukoliv vrstvu jde vyjádřit napětí jako

$$\sigma' = Q \cdot \varepsilon' \quad (6.2.12)$$

Q je matice mimoosové tuhosti. Pro určení napětí v libovolné vrstvě při použití minulého vztahu dostaneme

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{61} & Q_{62} & Q_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^\circ \\ \varepsilon_{yy}^\circ \\ \varepsilon_{xy}^\circ \end{bmatrix} + z \cdot \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{61} & Q_{62} & Q_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (6.2.13)$$

Výslednice sil momentů jsou následující



Obr. 29 – Výslednice sil a momentů [24]

$$N_x = \int_{hk-1}^{hk} \sigma_{xx} dz \quad (6.2.14)$$

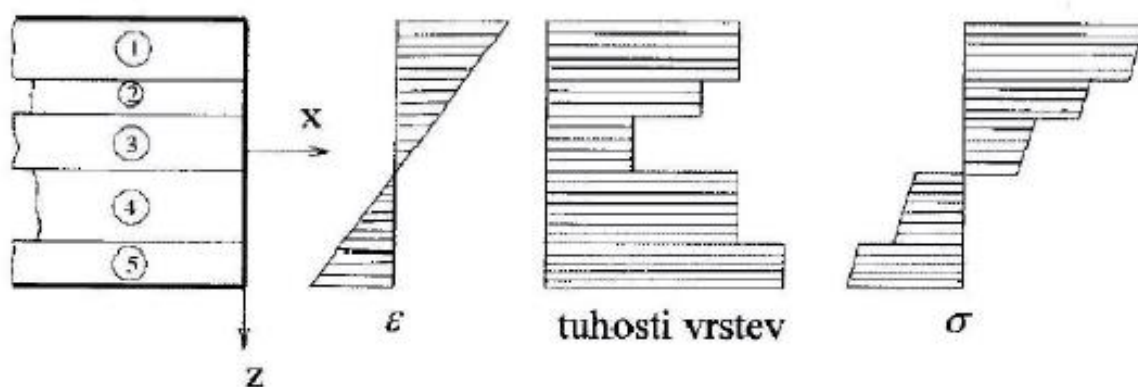
$$N_y = \int_{hk-1}^{hk} \sigma_{yy} dz \quad (6.2.15)$$

$$N_{xy} = \int_{hk-1}^{hk} \sigma_{xy} dz \quad (6.2.16)$$

$$M_x = \int_{hk-1}^{hk} \sigma_{xx} z dz \quad (6.2.17)$$

$$M_y = \int_{hk-1}^{hk} \sigma_{yy} z dz \quad (6.2.18)$$

$$M_{xy} = \int_{hk-1}^{hk} \sigma_{xy} z dz \quad (6.2.19)$$



Obr. 30 – Tuhosti vrstev kompozitu [24]

Napětí po celé tloušťce není spojité, je nutné výsledné síly a momenty, které působí v laminátu vyřešit jako součet účinků od všech n vrstev. Potom lze zapsat

$$N = \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} dz \quad (6.2.20)$$

A pro momenty

$$M = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} z dz \quad (6.2.21)$$

Když se dosadí do předchozích rovnic je zřejmé, že násobením integrálů s prvky matice Q jednotlivých vrstev a po provedení jejich součtu po celé tloušťce laminátu vyjde výraz

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} \\ A_{61} & A_{62} & A_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^\circ \\ \varepsilon_{yy}^\circ \\ \varepsilon_{xy}^\circ \end{bmatrix} + z \cdot \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{26} \\ B_{61} & B_{62} & B_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (6.2.22)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{26} \\ B_{61} & B_{62} & B_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^\circ \\ \varepsilon_{yy}^\circ \\ \varepsilon_{xy}^\circ \end{bmatrix} + z \cdot \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ D_{61} & D_{62} & D_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (6.2.23)$$

Jednotlivé prvky se stanoví z vztahů

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n (Q_{ij})_k (h_k - h_{k-1}) \quad (6.2.24)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (Q_{ij})_k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \quad (6.2.25)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (Q_{ij})_k (h_k^3 - h_{k-1}^3) \quad (6.2.26)$$

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_m^\circ \\ k \end{bmatrix} \quad (6.2.27)$$

Tím dostáváme konstitutivní rovnici laminátové desky, vyjadřující síly a momenty v závislosti na deformacích ve střední rovině a na křivosti. Globální nebo také celková matice tuhosti je matice, která vyjadřuje vazbu mezi těmito veličinami, kde

A je matice tahové tuhosti

B je matice vazbové tuhosti

D je matice ohybové tuhosti

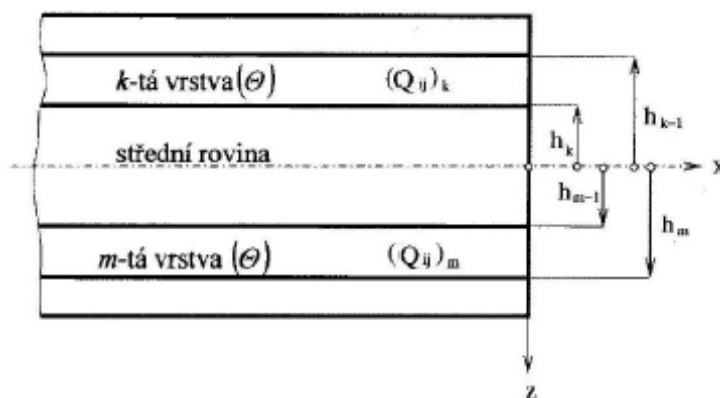
6.3. Způsob skládání laminátu

Požadovaných vlastností laminátu lze dosáhnout vhodnou skladbou jednotlivých vrstev. Důležité je, aby v matici tuhosti byly některé prvky nulové. Jelikož je laminát izotropní materiál, tak jde o ty prvky, které způsobí přídavné namáhání laminátu. Požadovaného účinku

se dosahuje pomocí kladení vrstev, které mají stejné mechanické vlastnosti pod různým úhlem a v daném pořadí.

6.3.1. Symetrické lamináty

Pro laminát je vhodné, když lze odstranit vazbu mezi tahem a ohybem a mezi tahem a krutem. Toho se dosáhne, když matice vazbové tuhosti bude rovna nule tedy $B = 0$.



Obr. 31 – Symetrický laminát [24]

$$(Q_{ij})_k = (Q_{ij})_m \quad (6.3.1)$$

$$|-h_{k-1}| = h_m \quad (6.3.2)$$

$$|-h_k| = h_{m-1} \quad (6.3.3)$$

To znamená, že k příspěvku od každé laminy nad střední rovinou bude existovat identická lamina, tedy se stejnými mechanickými vlastnostmi, orientací a ve stejné vzdálenosti od střední roviny na opačné straně.

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & 0 & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} & 0 & 0 & 0 \\ A_{61} & A_{62} & A_{66} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ 0 & 0 & 0 & D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ 0 & 0 & 0 & D_{61} & D_{62} & D_{66} \end{bmatrix} \quad (6.3.4)$$

6.3.2. Vyvážené symetrické lamináty

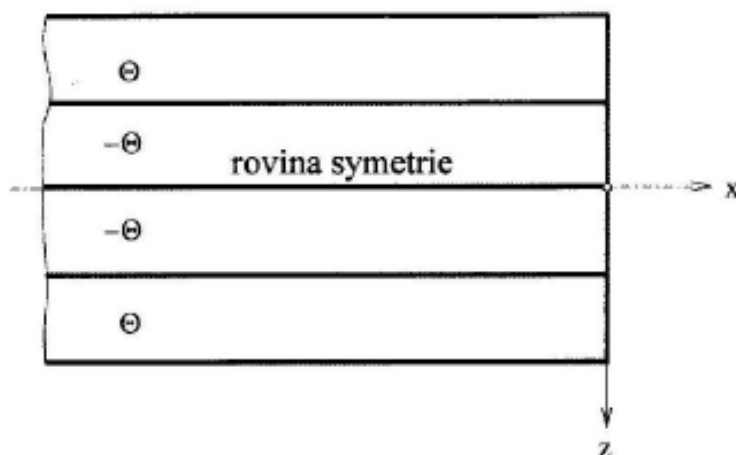
Při výrobě je vhodné z laminátu odstranit vazbu mezi normálovými silami a smykovou deformací. Tuto vazbu způsobují prvky A_{16} a A_{26} matice A . Musí tedy platit

$$A_{16} = A_{26} = 0 \quad (6.3.5)$$

Pak

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ 0 & 0 & 0 & D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ 0 & 0 & 0 & D_{61} & D_{62} & D_{66} \end{bmatrix} \quad (6.3.6)$$

laminát s touto skladbou se nazývá vyvážený symetrický laminát



Obr. 32 – Vyvážený symetrický laminát [24]

6.3.3. Symetrické křížově vrstvené lamináty

Tento laminát je tvořen pokládáním stejných vrstev pod uhly 0 a $\frac{\pi}{2}$ a rovina symetrie je střední vrstva. Celková matice tuhosti má tvar

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{11} & D_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{21} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \quad (6.3.7)$$

Symetrické křížové lamináty mají shodné vlastnosti jako ortotropní desky k jeho hlavním směrům.

6.4. Sendvičová teorie s uvažováním smyku

Používá se pro výpočet sendvičových konstrukcí. Do výpočtu jsou brány v potaz smykové deformace. Výpočetní vztahy s indexem 1 jsou pro dolní potah, vztahy pro horní potah mají horní index 2 a pro jádro c.

Bereme v potaz následující předpoklady:

- Platí Hookův zákon a malé deformace.
- Tloušťka jádra musí být mnohem větší než tloušťka potahů.

- Posunutí jádra u_c ve směru x a posunutí v_c ve směru y se po tloušťce z mění lineárně.
- Posunutí potahů u a v jsou konstantní po celé jejich tloušťce.
- Příčné posunutí w je nezávislé na souřadnici z a proto můžeme uvažovat $\varepsilon_{zz} = 0$.
- Jádro přenáší příčná smyková napětí σ_{yz}^c a σ_{zx}^c a proto $\sigma_{xx}^c = \sigma_{yy}^c = \sigma_{xy}^c = \sigma_{zz}^c = 0$.
- Jelikož je tloušťka potahů malá, je možné na nich zanedbat příčná smyková napětí a normálové napětí ve směru z . Takže platí $\sigma_{yz} = \sigma_{xz} = \sigma_{zz} = 0$.

Pole posuvů vyjádříme jako

$$u_c = u_0 - z\psi_x \quad (6.4.1)$$

$$v_c = v_0 - z\psi_y \quad (6.4.2)$$

kde u_0 a v_0 jsou posuvy ve směrech x a y střední roviny.

Posunutí dolního potahu vyjádříme

$$u_1 = u_0 - \frac{h}{2}\psi_x \quad (6.4.3)$$

$$v_1 = v_0 - \frac{h}{2}\psi_y \quad (6.4.4)$$

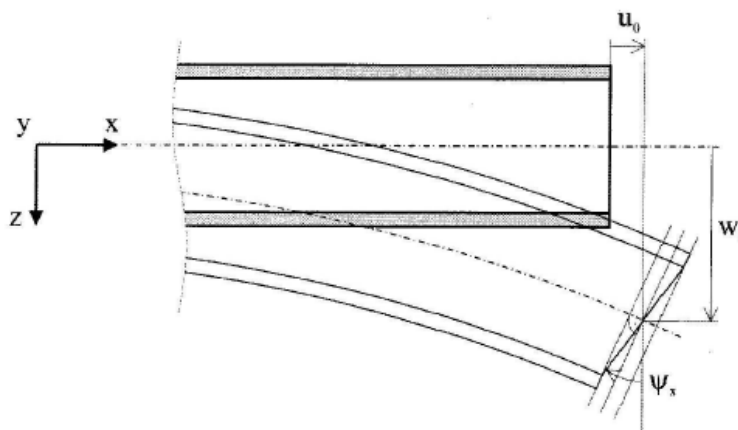
Posunutí horního potahu bude vypadat

$$u_2 = u_0 - \frac{h}{2}\psi_x \quad (6.4.5)$$

$$v_2 = v_0 - \frac{h}{2}\psi_y \quad (6.4.6)$$

Pro celý sendvič potom platí

$$w = w_0 \quad (6.4.7)$$



Obr. 33 – Posuv sendvičového nosníku [24]

Pole deformací se musí definovat pro každou část sendviče zvlášť. Pro dolní potah je pole deformací popsané následovně

$$\varepsilon_{xx}^1 = \frac{\partial u_1}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial x} - \frac{h}{2} \cdot \frac{\partial \psi_x}{\partial x} \quad (6.4.8)$$

$$\varepsilon_{yy}^1 = \frac{\partial v_1}{\partial y} = \frac{\partial v_0}{\partial y} - \frac{h}{2} \cdot \frac{\partial \psi_y}{\partial y} \quad (6.4.9)$$

$$\varepsilon_{zz}^1 = 0 \quad (6.4.10)$$

$$\varepsilon_{yy}^1 = \frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\partial v_1}{\partial y} = \frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial y} - \frac{h}{2} \cdot \left(\frac{\partial \psi_x}{\partial x} + \frac{\partial \psi_y}{\partial y} \right) \quad (6.4.11)$$

Z předpokladu malé tloušťky potahu, můžeme příčné smykové deformace γ_{yz}^1 a γ_{zx}^1 zanedbat. Pole deformací dolního potahu má tvar

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^1 \\ \varepsilon_{yy}^1 \\ \varepsilon_{xy}^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^{\circ} \\ \varepsilon_{yy}^{\circ} \\ \gamma_{xy}^{\circ} \end{bmatrix} + \frac{h}{2} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (6.4.12)$$

První vektor na pravé straně rovnice představuje pole deformací střední roviny a druhý vektor modifikované křivosti. Obdobně vypadá vztah pro horní pole deformace

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^2 \\ \varepsilon_{yy}^2 \\ \varepsilon_{xy}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^{\circ} \\ \varepsilon_{yy}^{\circ} \\ \gamma_{xy}^{\circ} \end{bmatrix} + \frac{h}{2} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (6.4.13)$$

Pole deformací jádra lze rozdělit na dvě deformační pole, a to první je deformační pole střední roviny a ohybové deformační pole

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^c \\ \varepsilon_{yy}^c \\ \varepsilon_{xy}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^{\circ} \\ \varepsilon_{yy}^{\circ} \\ \gamma_{xy}^{\circ} \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (6.4.14)$$

A druhé je pole příčných smykových deformací

$$\gamma^c = \begin{bmatrix} \gamma_{yz}^c \\ \gamma_{zx}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial w_0}{\partial y} - \psi_y \\ \frac{\partial w_0}{\partial x} - \psi_x \end{bmatrix} \quad (6.4.15)$$

Když známe pole deformací sendviče, potom můžeme vyřešit jeho pole napětí. Na jádro působí pouze smykové napětí. Lze tedy psát

$$\begin{bmatrix} \sigma_{yz}^c \\ \sigma_{zx}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{44}^c & C_{45}^c \\ C_{54}^c & C_{55}^c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \gamma_{yz}^c \\ \gamma_{zx}^c \end{bmatrix} \quad (6.4.16)$$

Dosazením výrazů nakonec získáme konstitutivní vztah

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \\ Q_y \\ Q_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} & B_{21} & B_{22} & B_{26} & 0 & 0 \\ A_{61} & A_{62} & A_{66} & B_{61} & B_{62} & B_{66} & 0 & 0 \\ C_{11} & C_{12} & C_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{26} & D_{21} & D_{22} & D_{26} & 0 & 0 \\ C_{61} & C_{62} & C_{66} & D_{61} & D_{62} & D_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{44} & F_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{54} & F_{55} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^\circ \\ \varepsilon_{yy}^\circ \\ \gamma_{xy}^\circ \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \\ \gamma_{yz}^c \\ \gamma_{zx}^c \end{bmatrix} \quad (6.4.17)$$

Kde

$$A_{ij} = A_{ij}^1 + A_{ij}^2 \quad (6.4.18)$$

$$B_{ij} = \frac{h}{2} (A_{ij}^2 - A_{ij}^1) \quad (6.4.19)$$

$$C_{ij} = A_{ij}^1 + A_{ij}^2 \quad (6.4.20)$$

$$D_{ij} = \frac{h}{2} (C_{ij}^2 - C_{ij}^1) \quad (6.4.21)$$

Následovně platí

$$A_{ij}^1 = \int_{-\frac{h}{2}+h_1}^{-h/2} (Q_{ij})_k dz = \sum_{k=1}^{n_1} \int_{h_{k-1}}^{h_k} (Q_{ij})_k dz = \sum_{k=1}^{n_1} (Q_{ij})_k (h_k - h_{k-1}) \quad (6.4.22)$$

$$C_{ij}^1 = \int_{-\frac{h}{2}+h_1}^{-h/2} z(Q_{ij})_k dz = \sum_{k=1}^{n_1} \int_{h_{k-1}}^{h_k} (Q_{ij})_k dz = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n_1} (Q_{ij})_k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \quad (6.4.23)$$

$$A_{ij}^2 = \int_{-h/2}^{-\frac{h}{2}+h_1} (Q_{ij})_k dz = \sum_{k=1}^{n_2} \int_{h_{k-1}}^{h_k} (Q_{ij})_k dz = \sum_{k=1}^{n_2} (Q_{ij})_k (h_k - h_{k-1}) \quad (6.4.24)$$

$$C_{ij}^2 = \int_{-h/2}^{-\frac{h}{2}+h_1} z(Q_{ij})_k dz = \sum_{k=1}^{n_1} \int_{h_{k-1}}^{h_k} (Q_{ij})_k dz = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n_1} (Q_{ij})_k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \quad (6.4.25)$$

$$F_{ij} = h \cdot C_{ij}^c \quad (6.4.26)$$

Kde n_1 a n_2 je počet vrstev v horním a dolním potahu, F_{ij} jsou prvky smykové matice tuhosti a kde C_{ij}^c jsou smykové konstanty jádra. Přepsaný vztah vypadá takto:

$$\begin{bmatrix} N \\ M \\ Q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & 0 \\ C & D & 0 \\ 0 & 0 & F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_m^\circ \\ k \\ \gamma^c \end{bmatrix} \quad (6.4.27)$$

Smykové vlastnosti jádra jsou v matici C_{ij}^c . Pokud je sendvičová deska symetrická, tak

$$A_{ij}^1 = A_{ij}^2 \quad (6.4.28)$$

$$C_{ij}^1 = -C_{ij}^2 \quad (6.4.29)$$

$$A_{ij} = 2A_{ij}^2 \quad (6.4.30)$$

$$D_{ij} = hC_{ij}^2 \quad (6.4.31)$$

$$B_{ij} = 0 \quad (6.4.32)$$

$$C_{ij} = 0 \quad (6.4.33)$$

$$F_{ij} = hG_{ji}^c, \quad (6.4.34)$$

Kde G_{ji}^c jsou moduly pružnosti ve smyku jádra. U izotropního jádra platí

$$F_{44} = F_{55} = hG_c \quad (6.4.35)$$

$$F_{45} = 0 \quad (6.4.36)$$

Kde G_c je modul pružnosti ve smyku jádra.

6.5. Mechanismy porušování kompozitních materiálů

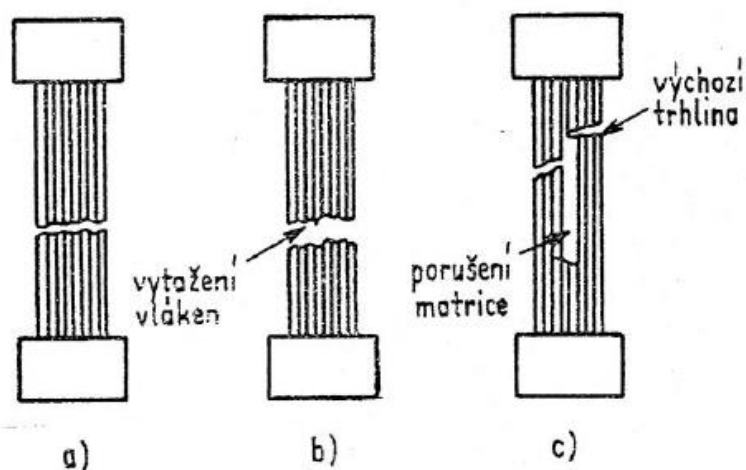
V dlouhovláknových jednosměrných kompozitních materiálech dochází k poruše dříve než je možné tuto poruchu pozorovat okem. Porucha, která se projevuje oddělením části kompozitu a přetržením vlákna, není tedy předem zřejmá. Nejčastějšími poruchami jsou:

- Přetržení vláken.
- Mikrotrhliny v matrici.
- Vlákna oddělená od matrice.
- Delaminace lamin od sebe.

6.5.1. Porušování kompozitu podélným tahovým namáháním

Pokud je kompozit namáhán tahem a podílně, vyskytují se u něj tři základní mechanismy porušení, závislé na mechanických vlastnostech a technologii výroby kompozitu:

- a) Křehké porušení.
- b) Křehké porušení s vytažením vlákna.
- c) Křehké porušení s porušením matrice.

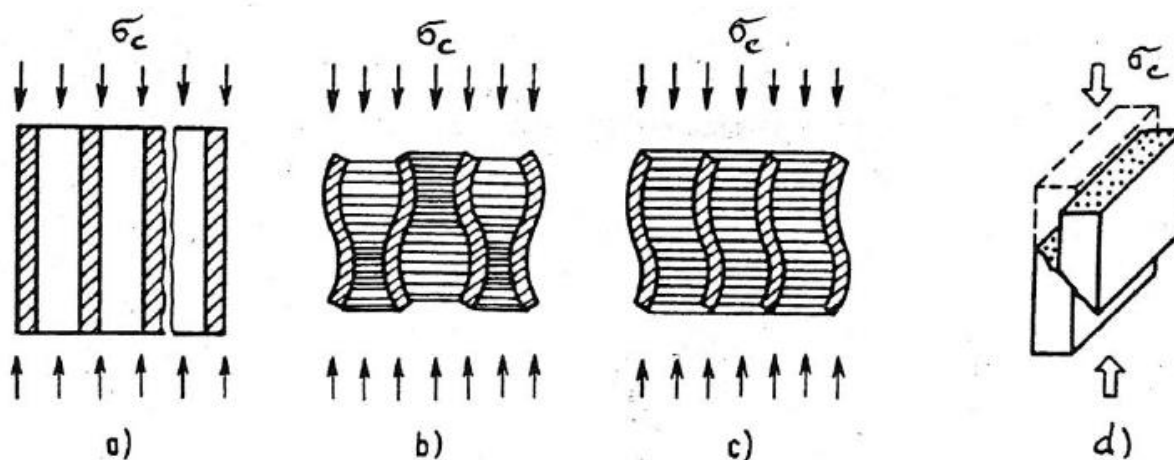


Obr. 34 – Poruchy kompozitu podélném tahovém namáhání [24]

6.5.2. Porušení kompozitu podélným tlakovým namáháním

Při tlakovém působení na kompozit vznikají čtyři základní mechanismy porušování:

- Příčné tahové porušování.
- Mikroprohnutí vláken s extenzní deformací.
- Mikroprohnutí vláken se smykovou deformací.
- Smykové porušení.



Obr. 35 – Porušení kompozitu podélném tahovém namáhání [24]

U druhého mechanismu mikroprohnutí vláken s extenzní deformací (b), není žádná spojitost s příčným přetvořením sousedních vláken. Pokud je malý objemový podíl vláken, nastává právě tato porucha. Vznik porušení nastává v místě s největším tahovým příčným přetvořením.

V případě mechanismu mikroprohnutí vláken se smykovou deformací (c) jsou sousední vlákna spolu ovlivněná, což se projevuje soufázovou deformací vláken. Tento případ vzniká, když je

v kompozitu velký objemový podíl vláken s hustou sítí vláken. První poruchy vznikají na hranici vlákna s matricí v důsledku smykového napětí, kvůli velkému zkosu.

Poslední případ (d) je jiný. K porušení kompozitu dochází v rovině maximálního globálního smykového napětí a lom prochází vlákny kompozitu.

Jelikož se mechanismy porušení liší, tak má každý rozdílné teoretické vztahy pro podélnou pevnost v tlaku.

Kritická deformace kompozitu v příčném stavu $\varepsilon_{L,krit}$ vychází z podélné deformace a lineárně pružného chování kompozitu.

$$\varepsilon_T = -\varepsilon_L \cdot \mu_{LT} \quad (6.5.2.1)$$

$$\varepsilon_{L,krit} = -\frac{\sigma_{Pd,L}}{E_L} \quad (6.5.2.2)$$

Z předchozích dvou vztahů vyjádříme kritickou deformaci v příčném stavu $\varepsilon_{T,krit}$

$$\varepsilon_{T,krit} = \frac{\sigma_{Pd,L}}{E_L} \cdot \mu_{LT} \quad (6.5.2.3)$$

A podélnou pevnost v tlaku získáme úpravou předchozího vztahu

$$\sigma_{Pd,L} = \frac{E_L \cdot \varepsilon_{T,krit}}{\mu_{LT}} \quad (6.5.2.4)$$

Abychom získali konečný vztah pro podélnou pevnost, použijeme směšovací pravidlo pro podélnou tuhost, Poissonovo číslo a Nielsenův vztah pro kritické příčné přetvoření

$$\sigma_{Pd,L} = \frac{(E_f \cdot \nu_f + (E_m \cdot \nu_m)) \cdot (1 - \nu_f^{\frac{1}{3}}) \cdot \varepsilon_{m,krit}}{\mu_f \cdot \nu_f + \mu_m \cdot \nu_m} \quad (6.5.2.5)$$

V případě, že nastane situace mikroprohnutí se smykovou deformací Obr. 35, platí

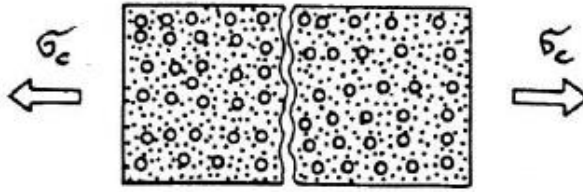
$$\sigma_{Pd,T} = \frac{G_m}{1 - \nu_f} \quad (6.5.2.6)$$

Kde G_m představuje smykový modul pružnosti matrice.

6.5.3. Porušení kompozitu příčným tahovým namáháním

Porušení je způsobeno koncentrací napětí na rozhraní vlákna s matricí. Může nastat i porušení vlákna, pokud je málo pevné. U poruch kompozitu příčným tahovým namáháním pozorujeme hlavně tyto tři možnosti:

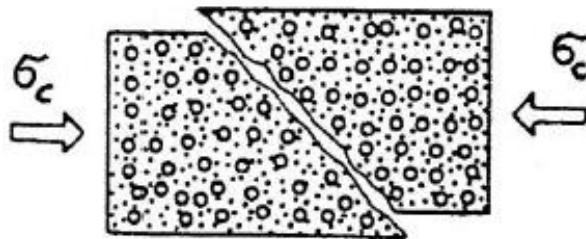
- a) Matrice nerušená tahem.
- b) Oddělení složek na hranici vlákna a matrice.
- c) Štěpení vláken.



Obr. 36 – Porušení kompozitu příčným tahovým namáháním [24]

6.5.4. Porušení kompozitu příčným tlakovým namáháním

Při tomto jevu nastává smykové porušení matrice, při kterém dochází k oddělování složek nebo k drcení vláken. Lom nastává v rovině, kde je největší smykové napětí, a svírá se směrem vnějšího zatížení σ_c úhel 45° .



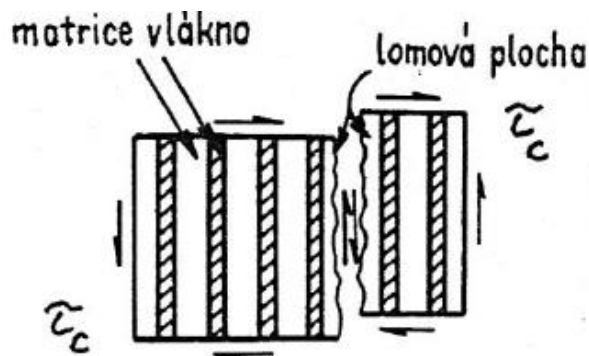
Obr. 37 – Porušení kompozitu příčným tahovým namáháním [24]

Výsledky experimentů ukazují, že příčná mez pevnosti v tlaku je menší než příčná mez pevnosti v tahu. Což lze zapsat jako

$$\sigma_{Pd,T} < \sigma_{Pd,L} \quad (6.5.4.1)$$

6.5.5. Porušení kompozitu smykem

K narušení homogenity kompozitu dohází buď smykovým porušením matrice nebo oddělováním složek v kompozitu nebo kombinaci obou těchto mechanismů.

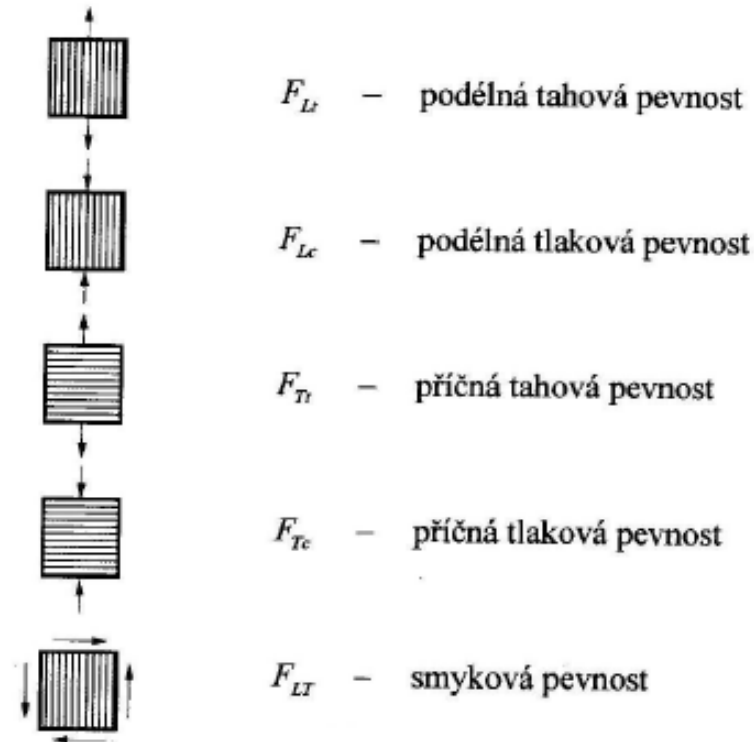


Obr. 38 – Porušení kompozitu smykem [24]

6.6. Makromechanická kritéria

U homogenních izotropních materiálů se používají podmínky pevnosti jako je například podmínka hustoty deformační energie potřebné k změně tvaru, nazývaná Mises. A tak je můžeme rozdělit do dvou skupin:

- a) Podmínky pro materiály, které mají přibližně stejnou mez pevnosti v tahu jako mez pevnosti v tlaku, jsou pro houževnaté materiály.
- b) Podmínky pro materiály, které mají rozdílnou pevnost tahu a v tlaku, které platí pro křehké materiály.



Obr. 39 – Namáhání kompozitu [24]

Všechny teorie vycházejí ze základních pevnostních parametrů určených v hlavních materiálových směrech (Obr. 39).

Pro jednosměrné kompozity můžeme rozdělit kritéria na:

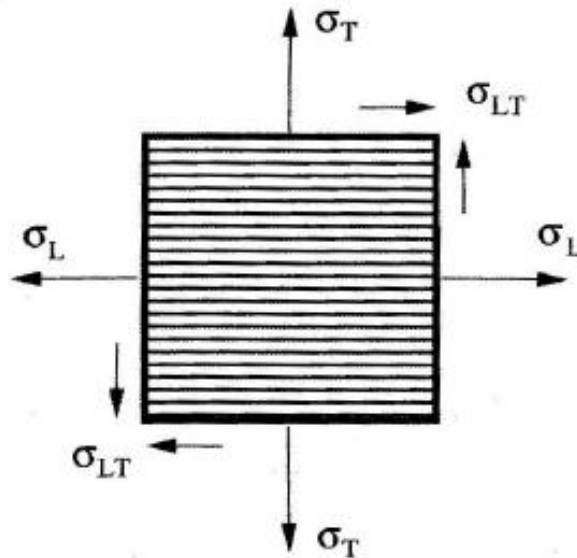
- Neinteraktivní kritéria
 - Kritérium maximálního napětí
 - Kritérium maximální deformace
- Interaktivní kritéria
 - Hillovo kritérium pevnosti
 - Tsai-Hillovo kritérium pevnosti
 - Hoffmanovo kritérium pevnosti
 - Tsai-Wu kritérium pevnosti
 - Puckovo kritérium pevnosti

6.6.1. Neinteraktivní kritéria

U těchto kritérií nejsou vazby mezi složkami normálových napětí ani mezi normálovými a smykovými složkami napětí.

- Kritérium maximálního napětí

Když některá ze složek napětí ($\sigma_L, \sigma_T, \sigma_{LT}$) v lamině dosáhne příslušné pevnosti materiálu, tak dochází k poruše materiálu.



Obr. 40 – Kritérium maximálního napětí [24]

- Kritérium maximální deformace

K porušení dojde, když jedna ze složek poměrného prodloužení nebo zkosu ($\varepsilon_L, \varepsilon_T, \varepsilon_{LT}$), dosáhne mezní hodnoty deformace.

6.6.2. Interaktivní kritéria

Interaktivní kritéria mají podstatu v energetické základě, a tudíž nemají nevýhodu neinteraktivních kritérií, kdy neexistuje vazba mezi podmínkami.

- Hillovo kritérium pevnosti

Vychází z von Misesovy podmínky pro izotropní materiály, tedy

$$\frac{1}{2} \left[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6 \cdot (\sigma_{yz}^2 - \sigma_{zx}^2 - \sigma_{yx}^2) \right] \leq \sigma_k^2 \quad (6.6.2.1)$$

Kde σ_k je mez kluzu izotropního materiálu.

Pro ortotropní materiály Hill kritérium rozšířil a dodal podmínku, kdy se materiál poruší ve tvaru

$$A(\sigma_T - \sigma_{T'})^2 + B(\sigma_{T'} - \sigma_L)^2 + C(\sigma_L - \sigma_T)^2 + 2D\sigma_{T'}^2 + 2E\sigma_{LT'}^2 + 2F\sigma_{LT}^2 = 1 \quad (6.6.2.2)$$

Kde složky napětí jsou v hlavních směrech anizotropie L, T, T' . A, B, C, D, E, F jsou parametry materiálových charakteristik a jsou závislé na pevnostech materiálů ve hlavních směrech anizotropie a pevnosti ve smyku. Vztah lze přepsat tak, aby se dal vyjádřit pomocí pevnosti materiálu. V podmínce je uvažována pevnost materiálu v tahu a v tlaku jako stejná. Když je $\sigma_{T'} = \sigma_{LT'} = \sigma_{TT'}$, tedy stav rovinné napjatosti, můžeme Hillovu podmínku pevnosti zapsat takto:

$$\left(\frac{\sigma_L}{F_L}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{F_T}\right)^2 - \left(\frac{1}{F_L^2} + \frac{1}{F_T^2} - \frac{1}{F_{T'}^2}\right)\sigma_L\sigma_T + \left(\frac{\sigma_{LT}}{F_{LT}}\right)^2 = 1 \quad (6.6.2.3)$$

F vyjadřují meze pevnosti v příslušných směrech.

- Tsai-Hillovo kritérium pevnosti

Tsai zjednodušil předchozí Hillovu podmínku pevnosti pro rovinnou úlohu pro jednosměrné kompozity, za předpokladu $F_T = F_{T'}$; potom můžeme psát

$$\left(\frac{\sigma_L}{F_L}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{F_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{LT}}{F_{LT}}\right)^2 - \frac{\sigma_L\sigma_T}{F_L^2} = 1 \quad (6.6.2.4)$$

Tím je vyjádřen vztah ve souřadnicovém systému O pro uzavřenou plochu. Když podmínku upravíme, aby zohledňovala rozdílnou pevnost v tahu a v tlaku, tak plocha porušení pak není spojitá.

- Hoffmanovo kritérium pevnosti

Hoffman rozšířil Hillovu podmínku tím, že zavádí jiná chování materiálu v tahu a jiná v tlaku. Aby došlo k porušení materiálu, musí být splněna tato podmínka

$$B_1(\sigma_T - \sigma_{T'})^2 + B_2(\sigma_{T'} - \sigma_L)^2 + B_3(\sigma_L - \sigma_T)^2 + B_4\sigma_L + B_5\sigma_T + B_6\sigma_{T'} + B_7\sigma_{TT'}^2 + B_8\sigma_{LT'}^2 + B_9\sigma_{LT}^2 = 1 \quad (6.6.2.5)$$

B jsou konstanty pro materiály a vyjadřují se pevností materiálu. Pokud se jedná o rovinnou napjatost v rovině L, T pak Hoffmanova podmínka pevnosti vypadá

$$\frac{\sigma_L^2}{F_{Lt}F_{Lc}} + \frac{\sigma_T^2}{F_{Lt}F_{Lc}} - \frac{\sigma_L\sigma_T}{F_{Lt}F_{Lc}} + \frac{F_{Lc} - F_{Lt}}{F_{Lt}F_{Lc}}\sigma_L + \frac{F_{Tc} - F_{Tt}}{F_{Tt}F_{Tc}}\sigma_T + \frac{\sigma_{LT}^2}{F_{LT}^2} = 1 \quad (6.6.2.6)$$

- Tsia-Wu kritérium pevnosti

Na úpravu vztahu přišli Tsai a Wu s polynomem, který vycházel z přesvědčení, že plocha poškození obsahuje jen složky napětí, ne už složky deformace. Pro anizotropní materiály tak napsali podmínku

$$f_i\sigma_i + f_{ij}\sigma_i\sigma_j = 1, i, j = 1, 2, \dots, 6, \quad (6.6.2.7)$$

Kde f_i a f_{ij} reprezentují tenzory pevnosti prvního a druhého řádu, a mohou se stanovit pomocí experimentu a nejběžněji se podmínka uvádí ve tvaru

$$\left(\frac{1}{F_{Lt}} - \frac{1}{F_{Lc}}\right)\sigma_L + \left(\frac{1}{F_{Tl}} - \frac{1}{F_{Tc}}\right)\sigma_T + \frac{\sigma_L^2}{F_{Lt}F_{Lc}} + \frac{\sigma_T^2}{F_{Tl}F_{Tc}} + \frac{\sigma_{LT}^2}{F_{LT}^2} + 2f_{12}^*\frac{\sigma_L\sigma_T}{F_{Lt}F_{Lc}} = 1 \quad (6.6.2.8)$$

- Puckovo kritérium pevnosti

Puck současně aplikuje dvě na sobě nezávislá kritéria porušení:

- Kritérium porušení vláken.
- Kritérium porušení mezi vlákny.

Důvodem je odlišnost charakteru porušení a není teda možno ani jedno vynechat, ani je spojit do jednoho.

- U kritéria pro porušení vláken platí (a)

Jednosměrný kompozit, který pod vlivem namáhání dosahuje takové prostorové napjatosti, že σ_L je napětí ve směru vláken, tak poškození nastane pokud

$$\sigma_{fL} = F_{ft} \quad \text{pro} \quad \sigma_{fL} \geq 0 \quad (6.6.2.9)$$

$$\sigma_{fL} = -F_{fc} \quad \text{pro} \quad \sigma_{fL} < 0 \quad (6.6.2.10)$$

Kde F_{ft}, F_{fc} jsou pevnosti vláken v tahu a tlaku,

σ_{fL} je napětí ve vláknech ve směru vlákna.

F_t může představovat skutečnou tahovou pevnost vlákna, tak F_{fc} většinou není skutečná pevnost v tahu, jelikož $\sigma_{fL} < 0$ dochází k nestabilitě vláken v matrici. Podmínka pro porušení vláken při kombinovaném zatížení vláken vyvolaném složkami σ_{fL}, σ_{fT} je

$$\frac{1}{F_{\varepsilon Lt}} \left(\varepsilon_L + \frac{v_{fLT}}{E_{fL}} m_{\sigma f} \sigma_T \right) = 1 \quad \text{pro} \quad (\dots) \geq 0 \quad (6.6.2.11)$$

$$\frac{1}{F_{\varepsilon Lc}} \left(\varepsilon_L + \frac{v_{fLT}}{E_{fL}} m_{\sigma f} \sigma_T \right) = -1 \quad \text{pro} \quad (\dots) < 0 \quad (6.6.2.12)$$

Kde

$F_{\varepsilon Lt}, F_{\varepsilon Lc}$ jsou mezní tahová a tlaková deformace v podélném směru

ε_L je poměrné prodloužení laminy v podélném směru od zatížení působícího v témže směru

v_{fLT} je Poissonovo číslo vlákna

E_{fL} modul pružnosti vlákna v tahu

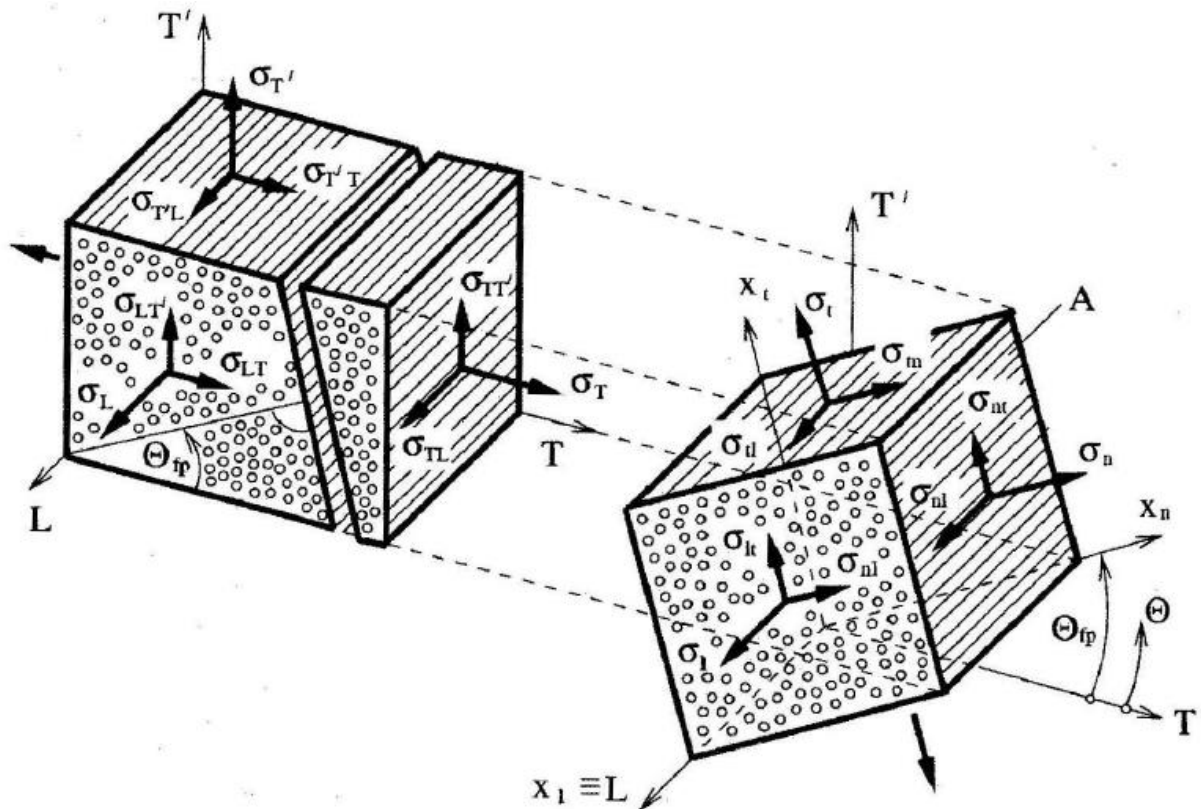
σ_T je napětí laminy v příčném směru

$m_{\sigma f}$ je koeficient zahrnující účinek zvýšení napětí vznikající vlivem rozdílných modulů pružnosti vlákna a matrice

- U kritéria pro porušení materiálu mezi vlákny platí (b)

Zkušební z experimentů laminátů, které byli z vrstev uhlíkových vláken nebo z vláken skelných a matricí z epoxidu říkají, že při lomu vykazují vrstvy křehkost. Obzvlášť pokud se

jedná o poškození mezi vlákny. Zajímavé je, že některá kritéria porušení vychází z von Misesovy podmínky plasticity, používané hlavně pro tvárný materiál. Puck předpokládá, že lom je tvořen jen napětím, které působí v ploše lomu. Na Obr. 41 je znázorněna prostorová napjatost $\sigma_L, \sigma_T, \sigma_{T'}, \sigma_{TT'}, \sigma_{LT'}, \sigma_{LT}$ v souřadném systému $O(L, T, T')$ a šikmá lomová plocha pro případ mezivláknového lomu. V rovině lomu působí napětí $\sigma_n, \sigma_{nt}, \sigma_{nl}$.



Obr. 41 – Model Puckova kritéria porušení [24]

Značení pro napětí:

- $\sigma_n \sim \sigma_{\perp}$ příčné napětí
- $\sigma_{nt} \sim \sigma_{\perp\perp}$ příčně příčné smykové napětí
- $\sigma_{nl} \sim \sigma_{\perp\parallel}$ příčně podélné smykové napětí

Pokud v rovině působí příčně tahové napětí $\sigma_n > 0$ spolu s σ_{nt}, σ_{nl} , pak podmínka pevnosti vypadá

$$\left(\frac{\sigma_n}{R_{\perp}^{(+A)}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{nt}}{R_{\perp\perp}^A}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{nl}}{R_{\perp\parallel}^A}\right)^2 = 0 \quad \text{pro} \quad \sigma_n \geq 0 \quad (6.6.2.13)$$

R^A je lomový odpor roviny A při namáhání jedním napětím působícím v této rovině. Z toho můžeme soudit, že

$R_{\perp}^{(+A)}$ lomový odpor roviny A namáhané příčně tahovým napětím ležícím v této rovině

$R_{\perp}^{(-)A}$ lomový odpor roviny A namáhané příčně tlakovém napětím ležícím v této rovině

$R_{\perp\perp}^A$ lomový odpor roviny A namáhané příčně příčným smykovém napětím ležícím v této rovině

$R_{\perp\parallel}^A$ lomový odpor roviny A namáhané příčně podélným smykovém napětím ležícím v této rovině

Pokud v rovině A , kde nastane lom, je pouze napětí $\sigma_n > 0$, pak

$$R_{\perp}^{(+)A} = F_{Tt} \quad (6.6.2.14)$$

F_{Tt} je tahová příčná pevnost jednosměrového kompozitu

Pokud v rovině A , kde nastane lom, je pouze napětí $\sigma_n < 0$, pak

$$R_{\perp}^{(-)A} = F_{Tc} \quad (6.6.2.15)$$

F_{Tt} je tlaková příčná pevnost jednosměrového kompozitu.

Pokud v rovině A , kde nastane lom, je pouze napětí σ_{nl} , pak

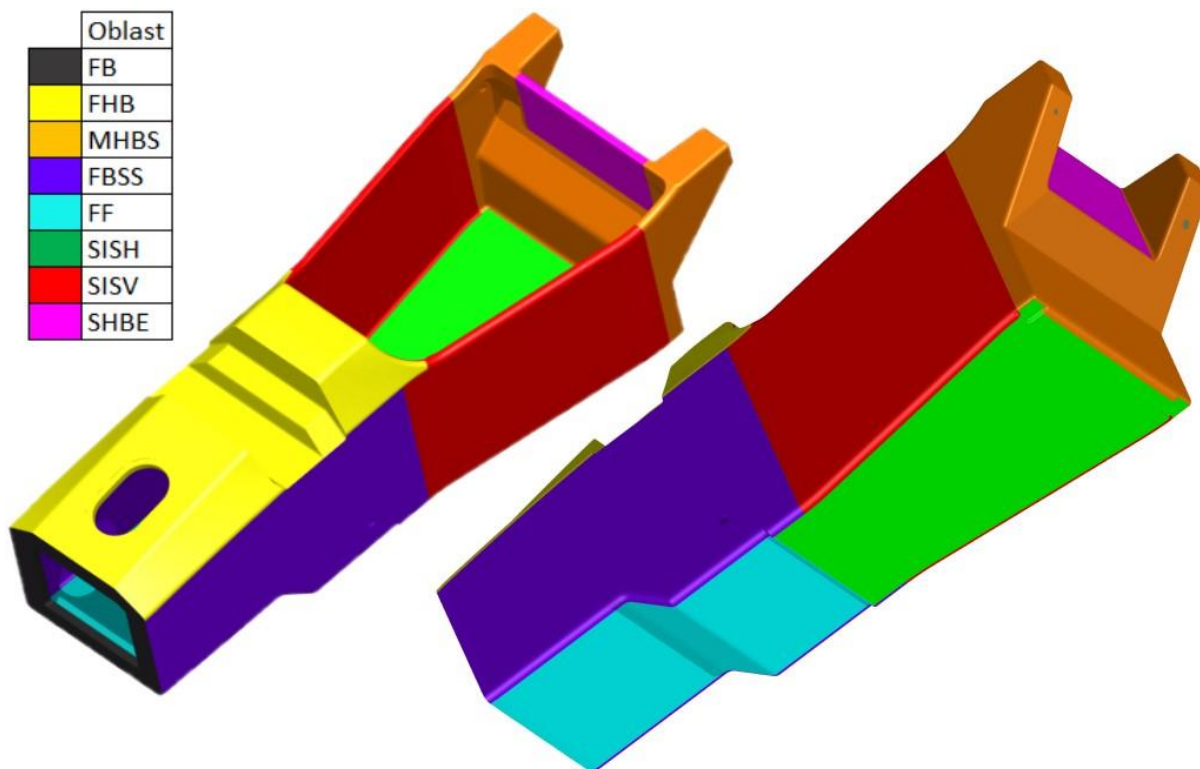
$$R_{\perp\parallel}^{(-)A} = F_{LT} \quad (6.6.2.16)$$

F_{Tt} je smyková pevnost jednosměrové laminy.

7. Stará skladba monokoku

Jako výchozí stav byla brána nynější skladba z formule. Známý byly jednotlivé skladby částí vozu a jejich mechanické vlastnosti ze zkoušek, dokumentu SES a hmotnosti jednotlivých vzorků.

Skladba monokoku byla následující:



Obr. 42 – Oblasti původní skladby monokoku

Potahy byly vyrobené z materiálu SIGAPREG® C W200-TW2/2-E3223/38%.

Tabulka 5 – Vlastnosti původního prepregové tkaniny SIGAPREG®

Vlastnosti		
Vlastnost vytvrzeného materiálu	Jednotka	Typické hodnoty
Modul pružnosti	GPa	59
Mez pevnosti v tahu	MPa	657

A jádrem z hliníkové voštiny PCGA-XR2 3000.

Tabulka 6 – Vlastnosti hliníkového jádra

Označení	Výška	Velikost buňky	Hustota	Pevnost	Modul pružnosti	Pevnost ve smyku		Modul pružnosti ve smyku	
						V tlaku		Směr L	Směr W
				mm	mm	kg/m ³	MPa	MPa	MPa
Al. Honey	20	6,4	83,3	4,69	1020	2,28	1,34	460	260

V tabulce 7 jsou vidět parametry použitých sendvičových zkoušených laminátů.

Tabulka 7 – Vlastnosti původních vzorků

Veličina	Označení	Jednotky	T300x5	T300x7
Potahy	-	-	[90/0/+45/-45/90]s	[90/90/0/+45/-45/90]s
Výška panelu	h	mm	21,4	22,2
Tloušťka vnějšího potahu	c	mm	0,9	1,3
Tloušťka vnitřního potahu	t ₁	mm	0,9	1,3
Tloušťka jádra	t ₂	mm	19,6	19,6
Max. zatížení v ohybu	F	N	12 650	18 950
Gradient	Grad	N/mm	1773	2518
Korigovaný gradient	Grad'	N/mm	1999	2976
I _{vzorku}	I _{vzorku}	mm ⁴	45801	78180
E _{vzorku}	E _{vzorku}	MPa	58200	50700
Tuhost vzorku	EI	Nm ²	2666	3964
Mez pevnosti σ	σ	MPa	293	269
Max. zatížení ve stříhu	F	N	8157	11520
Pevnost ve stříhu	MPa	MPa	115,4	112,8
Hmotnost vzorku	m	g	773	952

Tabulka 8 udává parametry oblasti monokoku.

Tabulka 8 – Vlastnosti původních oblastí monokoku

Oblast	Označení	Hmotnost	Plocha	Množství materiálu
		g	m ²	m ²
Front Bulkhead (FB)	T300x7	712	0,103	1,440
Front Hoop Bracing (FHB)	T300x7	3 300	0,477	6,673
Main Hoop Bracing Support (FHBS)	T300x7	3 378	0,488	6,397
Front Bulkhead Support Sturture (FBSS)	T300x7	4 710	0,680	9,523
Front Floor (FF)	T300x5	1 682	0,299	2,992
Side Impact Structure Horizontal (SISH)	T300x5	2 520	0,448	6,274
Side Impact Structure Vertical (SISV)	T300x7	4 251	0,614	7,658
Shoulder Harness Bar Equivalency (SHBE)	T300x7	759	0,110	1,535
Celkem		21 311	3,219	42,492

Na oblast Front Bulkhead byl zepředu přilepen hliníkový plech o tloušťce 1 mm, aby byly splněny podmínky. Celková hmotnost sendvičového laminátu je 21,311 kg bez předního oblouku, hlavního oblouku, podpory hlavního oblouku, hliníkové desky na Front Bulkheadu a insertů. Inserty jsou závitové vložky sloužící k přenesení zatížení na kompozitní strukturu.

8. Structural Equivalency Spreadsheet (SES)

Structural Equivalency Spreadsheet je vyžadovaný dokument vytvořený v programu Microsoft Excel. Dokument je tvořen jednotlivými listy s volnými buňkami, připravenými k zadání jednotlivých parametrů. Nacházejí se zde též vysvětlující informace k vyplnění. Vkládají se i potřebné doklady pravosti materiálů a provedených zkoušek panelů. Dále se zde vyplňuje podrobná skladba panelů s orientacemi a vlastnostmi vrstev a graficky znázorňuje členění částí kompozitní struktury.

U zkoušek se vkládají údaje z provedených testů jako jsou tloušťky potahů a jádra, rozměry panelu, maximální zatížení a dva body z průběhu zatížení. Parametry jsou důležité pro porovnání s trubkovými profily. Výpočty v dokumentu jsou kontrolním výpočtem kompozitní struktury k trubkovému rámu.

8.1. Srovnání kompozitní struktury s ocelovými profily

V této části je vysvětlen postup navrhování nových skladeb částí monokoku. Parametry kompozitní struktury musí být stejné nebo větší než u trubkových řešení stejné části struktury. Každá tato část monokoku má v dokumentu SES příslušný list. Jde o tyto hlavní části primární struktury: přední oblouk (FH), hlavní oblouk (MH), výztuha hlavního oblouku (MHB), podpora výztuhy hlavního oblouku (MHBS), podpora předního oblouku (FHB), přední přepážka (FB), podpora přední přepážky (FBSS), boční nárazová přepážka (SIS) a uchycení ramenní pásů (SHBE). Parametry jednotlivých částí se udávají jen pro jednu polovinu šasi. Počítá se s tím, že auto je symetrické podle podílné roviny. Jeden list, ověřující uchycení ramenní pásů, je vidět na Obr. 43.

Shoulder Harness Bar Equivalency

		Enter construction type	Composite only	
Material Property	Baseline	Your Tube	Your Composite	Your Total
Material type	Steel	Steel	Other 3	
Tubing Type	Round	Round	N/A	
Material name /grade	Steel	Steel	SIS hor.	
Youngs Modulus, E	2,00E+11	2,00E+11	6,31E+10	
Yield strength, Pa	3,05E+08	3,05E+08	2,53E+08	
UTS, Pa	3,65E+08	3,65E+08	2,53E+08	
Yield strength, welded, Pa	1,80E+08	1,80E+08	N/A	
UTS welded, Pa	3,00E+08	3,00E+08	N/A	
Number of tubes	1	1		
Tube OD, mm	25	25		
Wall, mm	2,5	2,5		
Thickness of panel, mm			22,52	
Thickness of core, mm			19,6	
Thickness of inner skin, mm			1,46	
Thickness of outer skin, mm			1,46	
Panel height,mm			140	
OD, m	0,025	No tubes		
Wall, m	0,0025			
I, m ⁴	1,13E-08		4,54007E-08	4,54E-08
EI	2,26E+03		2,86E+03	2,86E+03
Area, mm ²	176,7		408,8	408,8
Yield tensile strength, N	5,39E+04		1,03E+05	1,03E+05
UTS, N	6,45E+04		1,03E+05	1,03E+05
Yield tensile strength, N as welded	3,18E+04		1,03E+05	1,03E+05
UTS, N as welded	5,30E+04		1,03E+05	1,03E+05
Max load at mid span to give UTS for 1m long tube, N	1,32E+03		4,08E+03	4,08E+03
Max deflection at baseline load for 1m long tube, m	1,22E-02		9,62E-03	9,62E-03
Energy absorbed up to UTS, J	8,04E+00		6,05E+01	6,05E+01
				126,5
				231,3
				191,9
				160,3
				325,2
				195,1
				308,6
				79,0
				752,5

Obr. 43 – Ukázka listu z výpočtového dokumentu SES [1]

Bíla pole jsou názvy a jednotky a nedají se měnit. Šedá pole se také nedají měnit a ukazují parametry materiálů. Mění se a vyplňují žlutá pole. Pro kompozitní materiály jsou důležitá tato pole: pole pro typ používané konstrukce (Enter construction type) tedy Composite only, typ materiálu (Material type), kde se vybere ozkoušený vzorek, který má svoje materiálové vlastnosti získané při zkoušení třibodovým ohybem a smykem. Dále se udává tloušťka jádra (Thickness of core) a tloušťka vnitřního a vnějšího potahu (Thickness of inner/outer skin). Poslední pole, která se vyplňuje je výška panelu (Panel height), který udává velikost segmentu v šasi.

V prvním segmentu buněk jsou údaje o materiálu. Ty jsou neměnné a předepsané. Druhý segment buněk udává počet, průměr a tloušťku trubek náležící pro danou část porovnávající s kompozitem. Třetí část udává již zmíněné parametry panelu. Poslední část jsou dopočtené všechny potřebné ekvivalence. Správnost navržené skladby je vidět v pravém sloupci, kde jsou zobrazeny procentuální porovnání parametru mezi segmentu z trubek a kompozitu. Zelená pole znázorňují splnění podmínky, která musí být 100 % a více kromě průhybu, které musí být menší než 100 %.

9. Výběr materiálu

Doposud byly používány předsycené uhlíkové tkaniny vyrobené z druhů vláken T300 tedy se standardním modulem. V dnešní době se tento typ vláken používá především jako povrchová vrstva laminátu určený pro estetickou aplikaci v interiéru.

Pro snížení hmotnosti jsou zapotřebí tkaniny z typů uhlíkových vláken, které mají vyšší modul pružnosti.

Jako vlákna s vyšším modulem pružnosti byla vybrána vlákna T800H, T800SC, T1000G a M40J a M46J. Byly zvoleny tkaniny z vyjmenovaných typů vláken kromě M40J a N46J; ty byly poptány jako jednosměrné textilie. Preferovaný druh vazby byla keprová vazba (Twill 2/2).

9.1. Vybrané materiály a jejich mechanické vlastnosti

Nakonec bylo vybrána tkanina z vláken T800H se středním modulem, která se používá ve významných programech leteckého inženýrství a Formulí 1. Ostatní materiály z jiných vláken byly buď moc drahé nebo nebyly v současné době k sehnání.

Konkrétně se jedná o materiál CC204 ER450 38% T800H 6K 125cm s těmito vlastnostmi uvedené v technickém listu.

Tabulka 9– Vlastnosti nového prepregu CC204 ER450

Vlastnosti		
Suchá tkanina	Jednotka	Typické hodnoty
Styl tkaní	-	Twill 2/2
Druh vláken	-	T800H 6k
Hustota vláken	g/cm ³	1,81
Osnova	vláken/cm	4,5
Útek	vláken/cm	4,5
Plošná hmotnost	g/m ²	199 (± 4 %)
Nevytvrzený prepregu	Jednotka	Typické hodnoty
Jmenovitá plošná hmotnost	g/m ²	321
Jmenovitý obsah pryskyřice	Wt %	38(± 3)
Šířka	mm	1250
Tloušťka vytvrzené vrstvy	mm	0,209
Hustota kompozitu	g/cm ³	1,53

Vlastnost vytvrzeného materiálu	Jednotka	Typické hodnoty
Modul pružnosti 0°	GPa	75,6
Mez pevnosti v tahu 0°	MPa	1127
Prodloužení při přetížení 0°	%	1,34
Poissonovo číslo	-	0,07
Modul pružnosti 90°	GPa	73,3
Mez pevnosti v tahu 90°	MPa	1044
Prodloužení při přetížení 90°	%	1,22
Poissonovo číslo	-	0,07
Modul ve smyku v rovině	GPa	4,25

U jednosměrné tkaniny bylo vybráno vlákno M40J s vysokým modulem pružnosti, zvýšenou pevností v tahu oproti jiným vláknům. To bylo následně prosyceno epoxidovou pryskyřicí.

Tabulka 10 – Vlastnosti jednosměrného vlákna a prepregu

Vlastnosti		
Suchá vlákna	Jednotky	Typické hodnoty
Modul pružnosti	GPa	377
Pevnost v tahu	MPa	4400
Prodloužení při přetížení 0°	%	1,2
Hustota vláken	g/cm ³	1,77
Vlastnost vytvrzeného materiálu	Jednotky	Typické hodnoty
Modul pružnosti	GPa	226
Pevnost v tahu	MPa	2500
Deformace v tahu	%	1,11
Modul ve smyku v rovině	MPa	123
Mez pevnosti v tahu 90°	MPa	63

Tyto dva materiály byly použity při navrhování nových skladeb.

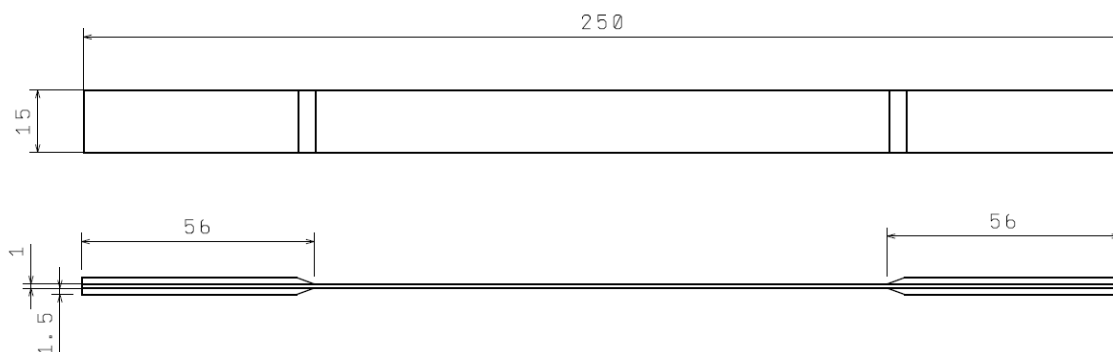
Jádro bylo zachováno. Byla použita hliníková voština PCGA-XR2 3000 výšky 20 mm.

10. Testování vzorků – tahová zkouška

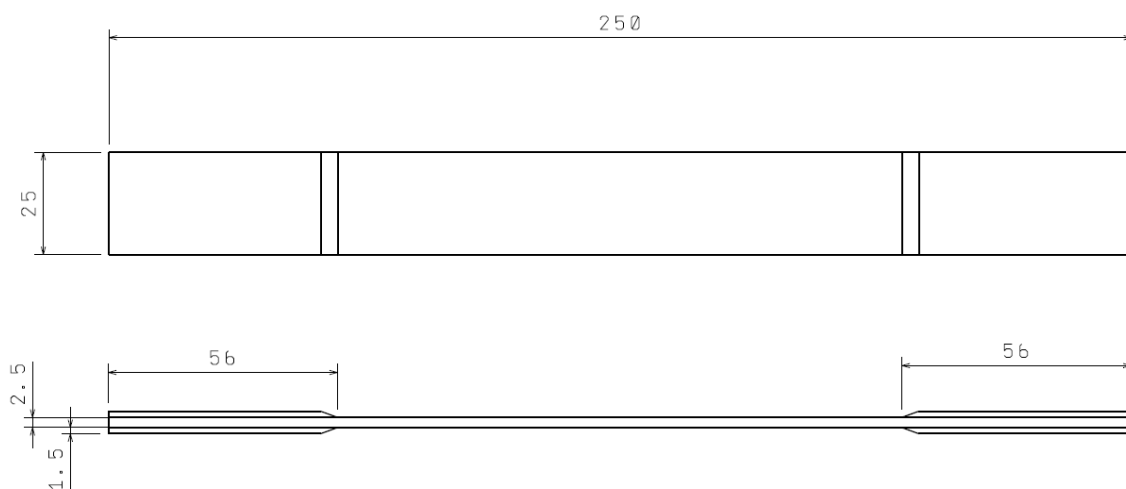
Tato kapitola se věnuje zjištění materiálových vlastností vybraných prepregových tkanin. Pomocí tahové zkoušky byl zjištěn modul pružnosti v tahu a mez pevnosti v tahu. Tyto hodnoty byly použity pro výpočet tuhosti a návržení nové skladby sendvičových panelů metou MKP a analytickou metodou.

10.1. Tahová zkouška ASTM D3039 /D3039M-08

Zkouška ASTM D3039 /D3039M-08 je standardní zkušební metoda pro tahové vlastnosti kompozitních materiálů s polymerní matricí. Tato zkušební metoda určuje tahové vlastnosti v rovině kompozitních materiálů s polymerní matricí vyztužených vlákny s vysokou modulovou hmotností. Formy kompozitních materiálů jsou omezeny na kompozity vyztužené spojitými nebo nespojitými vlákny, u nichž je laminát vyvážený a symetrický vzhledem ke směru zkoušky. Rozměry zkušebních vzorků byly navrženy a zkoušeny podle normy. Byly navrženy tři druhy vzorků ze tří různých materiálů. Dva vzorky byly vyrobeny z textilie ve vazbě kepr. Následně byly testovány ve směru osnovy i útku, aby se zjistily vlastnosti tkaniny v obou směrech, tedy ve směru 0° a 90° . Rozměry těchto vzorků jsou vidět na obrázku Obr. 45. Třetí vzorek ve formě jednosměru byl testován pouze po směru vlákna; rozměry vzorku jsou vidět na Obr. 44.



Obr. 44 – Rozměry vzorků z jednosměrných vláken na tahovou zkoušku



Obr. 45 – Rozměry vzorků z tkanin na tahovou zkoušku

10.1.1. Příprava vzorků

Vzorky a jejich navrhované parametry jsou v Tabulce 11.

Tabulka 11 – Navrhované parametry zkušebních vzorků

Označení	Materiál	Skladba	Rozměr [mm]
A	T800H	13 vrstev pod úhlem 0°	2,5x25x250
B	T800H	13 vrstev pod úhlem 90°	2,5x25x250
C	T300	13 vrstev pod úhlem 0°	2,5x25x250
D	T300	13 vrstev pod úhlem 90°	2,5x25x250
E	M40J	10 vrstev pod úhlem 0°	1x15x250
Příložky	Sklo	15 vrstev	1,5x25/15x56

Počet kusů zkušebních těles byl od každé skladby šest kusů, aby se v případě potíží dal jeden zkušební vzorek vyřadit a nezkreslil výsledky. Vyřezání zkušebních vzorků bylo provedeno vodním paprskem, který je ze všech metod dělení nejšetrnější k vláknu a nejpřesnější vzhledem k důležitosti přesnosti rozměru vzorku. Pro tento účel byla vylaminována deska o rozměrech 200 x 300 mm pro vzorky A, B, C, a D a deska 110 x 300 pro vzorek E. Materiály pro příložky byl zvolen skelný prepreg. Celkově bylo vyřezáno 230 kusů příložek a 30 kusů zkušebních těles.

Plochy kontaktu vzorků s příložkami byly připraveny na lepení zdrsněním a odmaštěním. Následně byly slepeny dvousložkovým epoxidovým konstrukčním lepidlem LOCTITE EA 9466, které poskytuje vysokou pevnost v loupání a ve smyku. Vytvrzuje se při pokojových teplotách.

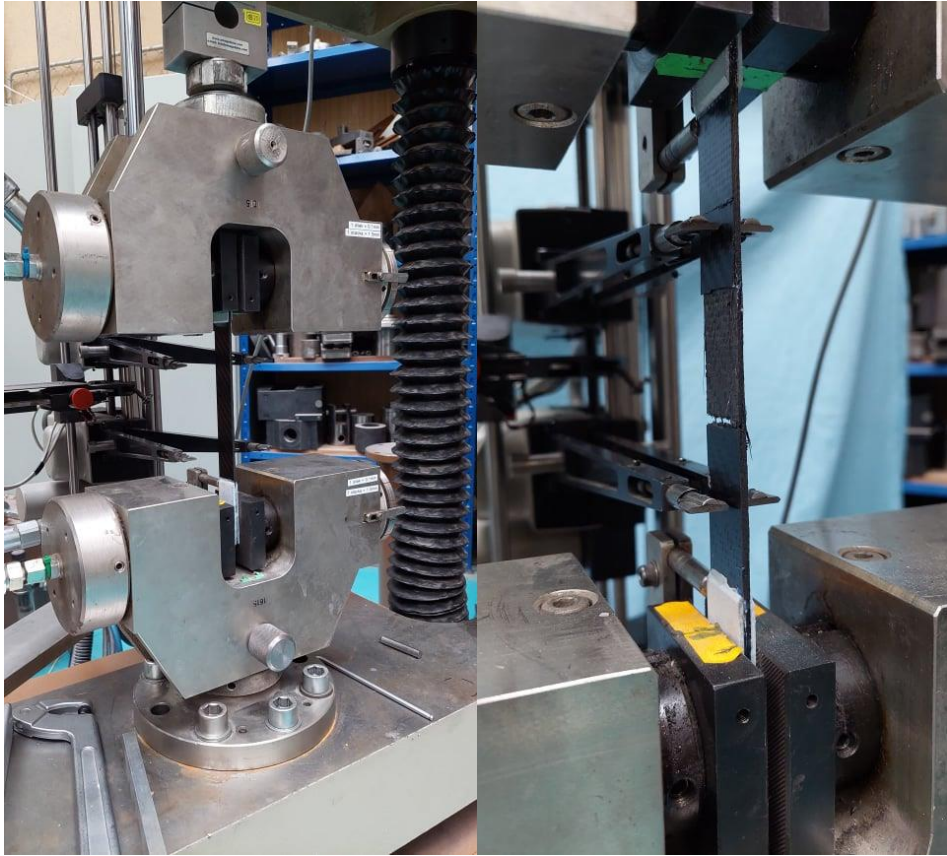


Obr. 46 – Vzorky na zkoušku ASTM D3039 /D3039M-08

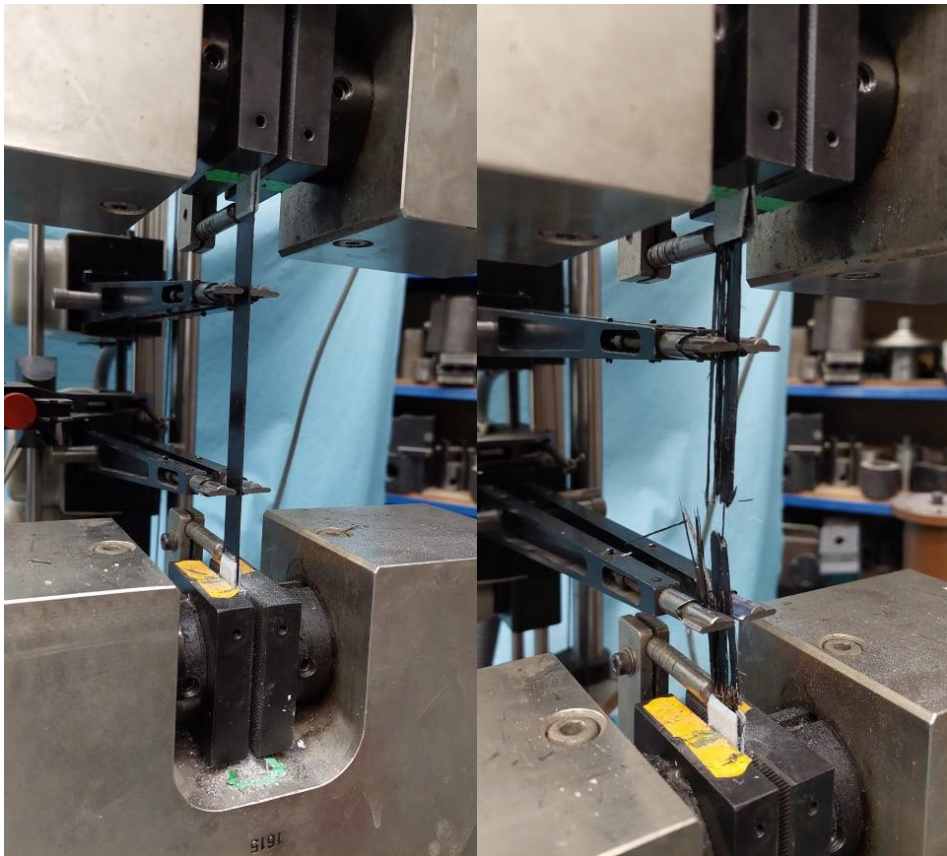
Před zkouškou byla u každého vzorku změřena tloušťka, šířka a hodnoty zapsány pro následnou analýzu výsledků. Naměřené hodnoty jsou zapsány v Tabulka 12 .

10.1.2. Testování vzorků

Veškeré zkoušení vzorků a panelů bylo provedeno v halových laboratořích ústavu mechaniky Fakulty strojní ČVUT v Praze. Vzorek byl vystředěn, aby se zatěžoval ve směru vláken a nebyl zatížen ohybem. Jako referenční hodnota prodloužení bylo $l_0 = 80 \text{ mm}$. Rychlost posuvu byla zvolena 2 mm/min. Zaznamenávány byly hodnoty síly, posuvu, prodloužení a času.



Obr. 47 – Zkoušení vzorku z textilie



Obr. 48 – Zkoušení vzorku z jednosměrného vlákna

10.1.3. Výsledky testů

Z naměřených dat byl doložen modul pružnosti v tahu E a mez pevnost v tahu R_m .

Tabulka 12 – Naměřené a získané hodnoty z tahové zkoušky

Materiál	Vzorek	a	b	S	F	R_m	E
		mm	mm	mm ²	N	MPa	MPa
T800H - 0°	A1	2,84	25,00	71,00	62 095	875	73 600
	A2	2,90	24,82	71,98	62 547	869	78 169
	A3	2,85	24,90	70,97	61 805	871	73 319
	A4	2,86	24,94	71,33	57 003	799	77 187
	A5	2,89	24,92	72,02	58 463	812	75 010
	A6	2,90	24,90	72,21	58 008	803	71 897
T800H - 90°	B1	2,85	25,01	71,28	49 676	694	55 407
	B2	2,85	24,80	70,68	56 861	795	71 000
	B3	2,90	24,90	72,21	53 477	741	61 172
	B4	2,88	24,85	71,57	57 502	803	71 944
	B5	2,85	24,95	71,11	62 939	885	80 578
	B6	2,86	24,88	71,16	57 080	802	70 589
T300 - 0°	C1	2,36	24,98	58,95	47 948	813	67 300
	C2	2,38	24,93	59,33	47 236	796	63 106
	C3	2,39	24,82	59,32	40 662	685	58 522
	C4	2,40	24,84	59,62	45 835	769	60 666
	C5	2,39	24,89	59,49	42 038	707	58 907
	C6	2,39	24,93	59,58	40 963	687	60 013
T300 - 90°	D1	2,43	24,90	60,51	43 010	711	66 287
	D2	2,43	24,89	60,48	42 614	705	66 654
	D3	2,39	24,90	59,51	39 939	671	66 629
	D4	2,42	24,82	60,06	43 960	732	66 324
	D5	2,42	24,84	60,11	41 238	686	65 698
	D6	2,42	24,98	60,45	43 226	715	63 535
M40J - 0°	E1	1,00	14,85	14,85	25 197	1 697	197 643
	E2	0,95	14,89	14,15	24 372	1 723	203 762
	E3	0,98	14,95	14,65	25 579	1 746	203 090
	E4	0,99	14,94	14,79	25 564	1 728	200 368
	E5	0,99	14,98	14,83	23 609	1 592	219 284
	E6	0,99	14,88	14,73	23 216	1 576	197 628

kde: a - průměrná tloušťka vzorku

b - průměrná šířka vzorku

S - průřez vzorku

$$S = a \cdot b \quad (10.1.3.1)$$

F - maximální síla při poruše

R_m - mez pevnosti v tahu

$$R_m = \frac{F}{S} \quad (10.1.3.2)$$

E - modul pružnosti v tahu

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (10.1.3.3)$$

Z naměřených hodnot byla dopočítána mez pevnosti v tahu a modul pružnosti v tahu. Statisticky byla zjištěna průměrná hodnota, směrodatná odchylka a variační koeficient jednotlivých materiálů. Červeně vyznačená data nebyl zahrnuta do výpočtu. Žluté hodnoty nejsou relevantní, jelikož při zkoušce vzorků nedošlo k přetržení vzorků. Důvodem byla moc veliká plocha vzorků a vysmeknutí vzorků z čelistí při zkoušce. Hodnota modulu pružnosti v tahu šla dopočítat a je určena správně.

Tabulka 13 – Výsledné vlastnosti naměřených materiálů tahové zkoušky

Materiál	Vzorek	Parametry	\bar{x}	s	V
			MPa	MPa	%
T800H - 0°	A	R_m	838	33,61	4,01
		E	74 864	2 203	2,94
T800H - 90°	B	R_m	805	46,21	5,74
		E	71 057	6 154	8,66
T300 - 0°	C	R_m	729	152,96	20,99
		E	61 419	3 018	4,92
T300 - 90°	D	R_m	703	19,78	2,81
		E	65 854	1 084	1,65
M40J - 0°	E	R_m	1677	67,48	4,02
		E	203 629	7 392	3,63

kde: \bar{x} - průměrná hodnota

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (10.1.3.4)$$

s - směrodatná odchylka

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - \bar{x}^2} \quad (10.1.3.5)$$

V - variační koeficient

$$V = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (10.1.3.6)$$

10.1.4. Mechanické vlastnosti uhlíkových materiálů

Ke stanovení mechanických vlastností materiálů, použitých ve výpočtech, byly aplikovány naměřené hodnoty z tahové zkoušky, hodnoty z materiálových listů a hodnoty, které byly zjištěné týmem CTU CarTech v průběhu jeho existence.

Tabulka 14 – Mechanické vlastnosti uhlíkových materiálů

Označení	Jednotky	Uhlíkové tkaniny		Jednosměrná uhlíková tkanina
		T300	T800H	M40 J
$E_1 = E_L$	MPa	61 420	74 860	203 630
$E_2 = E_L$	MPa	65 860	71 060	5 000
μ_{12}	–	0,25	0,07	0,28
ρ	kg/m ³	1500	1530	1770
t	mm	0,185	0,220	0,100

11. Návrh nových skladeb

Při návrhu nových skladeb byl kladen největší důraz na snížení hmotnosti celého monokoku. Toho bylo docíleno snižováním počtů vrstev v obou potazích sendviče. Byly navrženy skladby na základě vybraných materiálů a jejich získaných mechanických vlastností. Jako další krok pro snížení hmotnosti bylo vytvoření nových oblastí na monokoku (SIS Abov a Frame Support), které nemusí splňovat tak vysoké nároky na mechanické vlastnosti sendvičového kompozitu.

11.1. Analytický výpočet sendvičovou teorií s uvažovaným smykem jádra

Tato kapitola se zabývá analytickým výpočtem průhybu kompozitního panelu v závislosti na zatěžující síle. Tato teorie byla popsána výše, takže z ní bude zde vycházeno. Jedná se o výpočet tříbodového ohybu panelu. Výpočet slouží k rychlému a jednoduchému návrhu skladby pro následné ověření pomocí MKP výpočtu a ověření navržené skladby v SESu. Kalkulace byla provedena v programu Matlab.

11.1.1. Vstupní data

Pro výpočet jsou potřeba tato vstupní data potahu, jádra, rozměry vzorku a okrajové podmínky zkoušky

Potah:

$E_1 = E_L$ – modul pružnosti ve směru vláken v MPa

$E_2 = E_L$ – modul pružnosti ve příčném směru vláken m MPa

μ_{12} – Poissonovo číslo

ρ – hustota vlákna v kg/m³

t_v – tloušťka jedné vrstvy v mm

θ – úhel natočení jednotlivé vrstvy

Jádro:

$E_1 = E_L = E_2 = E_T =$ – modul pružnosti v MPa

- μ_j – Poissonovo číslo
- ρ_j – hustota jádra v kg/m³
- h – tloušťka jádra v mm
- G – smykový modul v MPa

Okrajové podmínky a rozměry vzorku:

- l – délka vzorku v mm
- b – šířka vzorku v mm
- P – zatěžující síla v N

11.1.2. Výpočet matice tuhosti

Za předpokladu, že lamina je lineárně elastický materiál, můžeme odvodit vztah mezi napětí a deformací. Jedná se o případ rovinné napjatosti, resp. o zobecněný Hookův zákon.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (11.1.2.1)$$

Potom symetrická matice tuhosti vypadá:

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{(1 - \mu_{12} \cdot \mu_{21})} & \frac{\mu_{21} \cdot E_1}{(1 - \mu_{21} \cdot \mu_{12})} & 0 \\ \frac{\mu_{21} \cdot E_2}{(1 - \mu_{21} \cdot \mu_{12})} & \frac{E_2}{(1 - \mu_{12} \cdot \mu_{21})} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \quad (11.1.2.2)$$

kde

$$\mu_{21} = \mu_{12} \cdot \frac{E_2}{E_1} \quad (11.1.2.3)$$

11.1.3. Výpočet transformované matice tuhosti

Transformační matice T mění napěťové a deformační hodnoty lamin z materiálových souřadnic na souřadnice v obecném systému. Souřadnicový systém 1, 2, 3 se potočením o úhel θ mění na souřadnicový systém x, y, z kolem osy $z \equiv 3$.

$$Q' = T_\varepsilon^{-1} \cdot Q \cdot T_\sigma \quad (11.1.3.1)$$

Kde

$$T_\varepsilon = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & \sin\theta \cdot \cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & -\sin\theta \cdot \cos\theta \\ -2\sin\theta \cdot \cos\theta & 2\sin\theta \cdot \cos\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix} \quad (11.1.3.2)$$

A

$$T_\sigma = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & 2\sin\theta \cdot \cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & -2\sin\theta \cdot \cos\theta \\ -\sin\theta \cdot \cos\theta & \sin\theta \cdot \cos\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix} \quad (11.1.3.3)$$

Výsledkem je transformovaná matice tuhosti Q' dané vrstvy v obecné souřadnicové soustavě. Každá vrstva potahu může být jinak orientována.

11.1.4. Vyšetření průhybu vzorku

Výpočet průhybu (w_f) sendvičového vzorku pomocí laminátové teorie s uvažováním vlivu příčných smykových sil provedeme:

$$w_f = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot b} \cdot D_{11}^* \cdot \left(1 + 12 \cdot \frac{F_{55}^*}{D_{11}^*} \cdot \frac{1}{l^2} \right) \quad (11.1.4.1)$$

kde

D_{11}^* je prvkem inverzní matice D^* k matici ohybové tuhosti D .

Prvky matice smykové tuhosti F získáme:

$$F = \begin{bmatrix} h \cdot G & 0 \\ 0 & h \cdot G \end{bmatrix} \quad (11.1.4.2)$$

Kde F_{55}^* je prvek inverzní matice smykové tuhosti F .

Po dosazení do všech vztahů vychází výsledný průhyb w_f pod zatěžující silou. Ten slouží k zjištění tuhosti vzorku po dosazení do SESu a k porovnání s MKP a experimentálními výsledky.

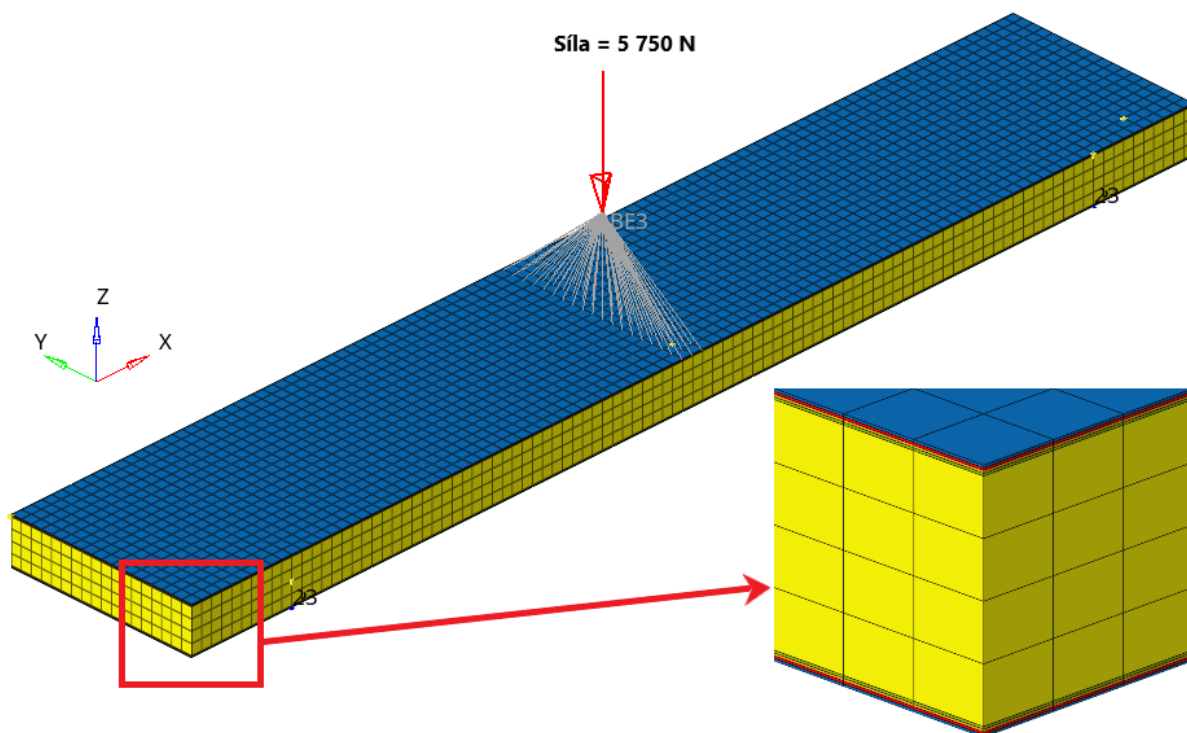
V Tabulka 15 jsou uvedeny moduly pružnosti pro všechny navržené skladby.

Tabulka 15 – Navržené moduly pružnosti nových skladeb

Označení skladby	Analytika
	E [MPa]
T800Hx3	63 900
T800Hx4	64 800
T800Hx5	62 600
T800Hx7	58 200

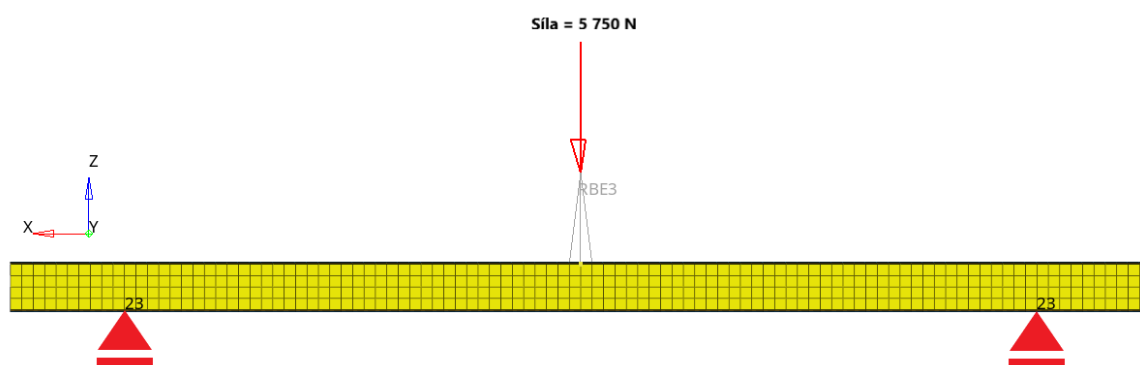
11.2. Výpočet skladby metodou konečných prvků

Výpočty byly provedeny výpočtovým softwarem HyperWorks. Rozměry simulovaných vzorků byl 90 x 500 mm. Do výpočetního dokumentu SES byly vloženy všechny potřebné hodnoty pro přiřazení skladeb k oblastem vozu. Výpočetní model nosníku byl vytvořen v programu HyperWorks, kde byly nastaveny všechny materiálové hodnoty pro uhlíkový potah i jádro. Taktéž byly nastaveny parametry laminátu, jako je tloušťka a orientace jednotlivých vrstev.



Obr. 49 – Výpočtový model vzorku T800Hx4

Zátěžný stav je stanoven pravidly soutěže. Podpory pod vzorkem musí být vzdáleny od sebe alespoň 400 mm a zatěžování uprostřed probíhá válcem o poloměru 50 mm. Laminát je symetrický. Ve výpočtu byly podpory realizovány odebráním posuvu v osách z, x. Zatěžování pro tuto (T800Hx4) i ostatní vzorky bylo prováděno vazbou BRE3 a maximálním zatížením pro tuto skladbu bylo 5 750 N. Výsledná hodnota maximálního zatížení byla určena tehdy, když kritérium porušení laminátu bylo rovné 1 tedy 100 % jak se vidět na Obr. 51.

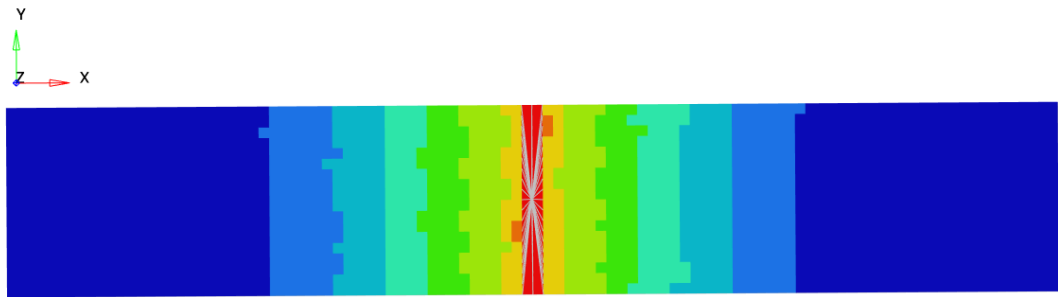


Obr. 50 – Zátěžný stav vzorku T800Hx4

Contour Plot
Composite Failure(Ply Failure, Max)

1: 1
Subcase 3 (Bending) : Static Analysis : Frame 0

1.004E+00
8.926E-01
7.810E-01
6.695E-01
5.579E-01
4.463E-01
3.347E-01
2.232E-01
1.116E-01
2.472E-09
No Result
Max = 1.004E+00
2D 82673
Min = 2.472E-09
2D 82356



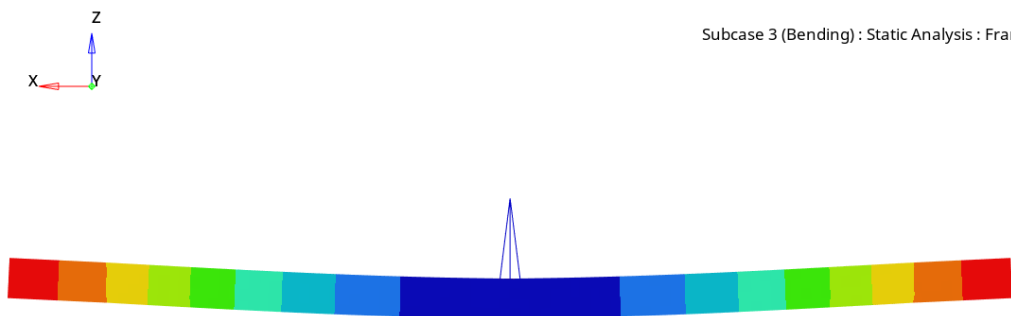
Obr. 51 – Zobrazení kritéria porušení kompozitu u vzorku T800Hx4

Poté byl odečten maximální průhyb pro dané zatížení.

Contour Plot
Displacement(Z)
Analysis system

1: 1
Subcase 3 (Bending) : Static Analysis : Frame 1

2.341E+00
1.187E+00
3.303E-02
-1.121E+00
-2.275E+00
-3.429E+00
-4.583E+00
-5.738E+00
-6.892E+00
-8.046E+00
No Result
Max = 2.341E+00
Grids 309693
Min = -8.046E+00
Grids 309908



Obr. 52 – Průhyb vzorku T800Hx4

Tento postup byl použit u všech čtyř navržených vzorků a výsledné hodnoty byly použity pro dopočítání modulu pružnosti laminátu. Ty jsou uvedeny v tabulce.

Tabulka 16 – Navržené nové skladby a modul pružnosti

Označení skladby	MKP
	E [MPa]
T800Hx3	63 200
T800Hx4	62 300
T800Hx5	57 000
T800Hx7	61 500

11.3. Navržené skladby

Ze simulací a aplikování dat v SESu byly navrženy čtyři druhy skladeb s jádrem z hliníkové voštiny PCGA-XR2 3000 výšky 20 mm.

Tabulka 17 – Navržené nové skladby na kompozitní strukturu

Označení skladby	Skladba	Tloušťky potahů	Tloušťka jádra	Maximální zatížení v ohybu
		mm	mm	N
T800Hx3	[0/+45/90]s	0,66	20	4 575
T800Hx4	[0/+45/-45/90]s	0,88	20	5 750
T800Hx5	[0/90/+45/-45/0]s	1,10	20	6 800
T800Hx7	[0/0/90/+45/-45/0/90]s	1,54	20	8 250

V tabulce 18 jsou vidět oblasti monokoku a k nim přiřazené jednotlivé skladby za pomoci získaných hodnot z výpočtů a SESu.

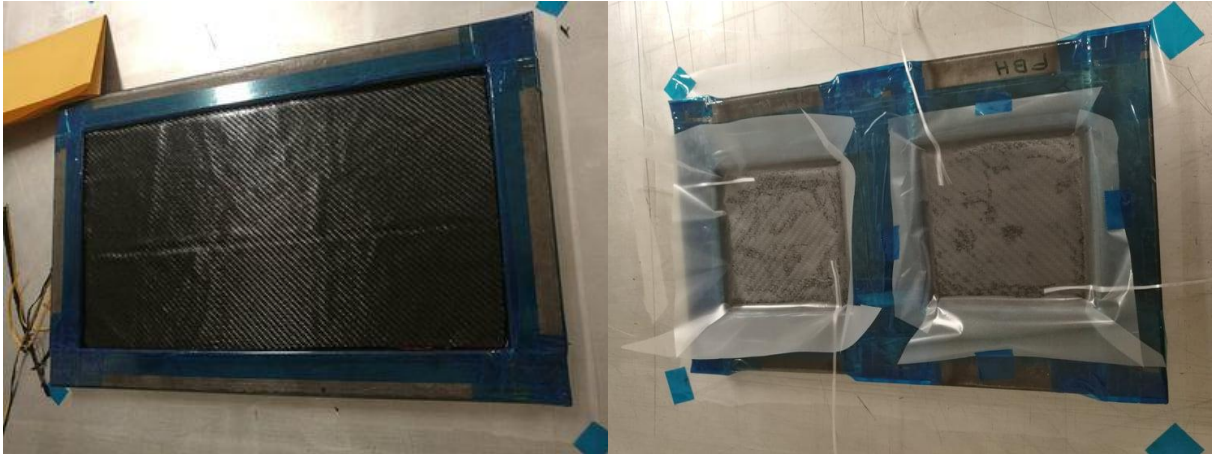
Tabulka 18 – Nově vytvořené skladby na kompozitní strukturu přiřazené oblastem v ní

Oblast	Označení skladby
Front Bulkhead (FB)	T800Hx7
Front Hoop Bracing (FHB)	T800Hx5
Main Hoop Bracing Support (MHBS)	T800Hx4
Front Bulkhead Support Sturture (FBSS)	T800Hx4
Side Impact Structure Horizontal (SISH)	T800Hx4
Side Impact Structure Vertical (SISV)	T800Hx4
Shoulder Harness Bar Equivalency (SHBE)	T800Hx7

12. Výroba vzorků

Pro výrobu vzorků byla zvolena technologie autoklávového vytvrzování prepregu. Prepreg je předsycený materiál pryskyřicí. V tomto případě byl materiál uhlíková textilie. Byly vytvořeny čtyři vzorky na tříbodový ohyb a čtyři vzorky na stříhovou zkoušku.

Prvním krokem bylo opatřit desku na které se vytvrzovaly vzorky separační vrstvou. Tou byla separační fólie. Na separační fólii byly položeny rámy, do kterých se skládaly vzorky. Vzorky s voštinovým jádrem je potřeba chránit před deformací kolmou na buňky jádra způsobenou vakuem a přetlakem během vytvrzování. Na separační fólii byly naskládány vrstvy prepregu přesného rozměru a podle požadované skladby vzorku. Skladby vzorků jsou uvedeny v Tabulka 18. Na spodní vrstvy materiálu byla položena vrstva fóliového lepidla AF-163 pro lepší spojení spodní vrstvy a jádra. Na fóliová lepidla se umístilo jádro z hliníkové voštiny a na ni opět fóliová lepidla, a nakonec horní vrstva potahového materiálu podle určení vzorku.



Obr. 53 – Výroba vzorků na třibodový ohyb

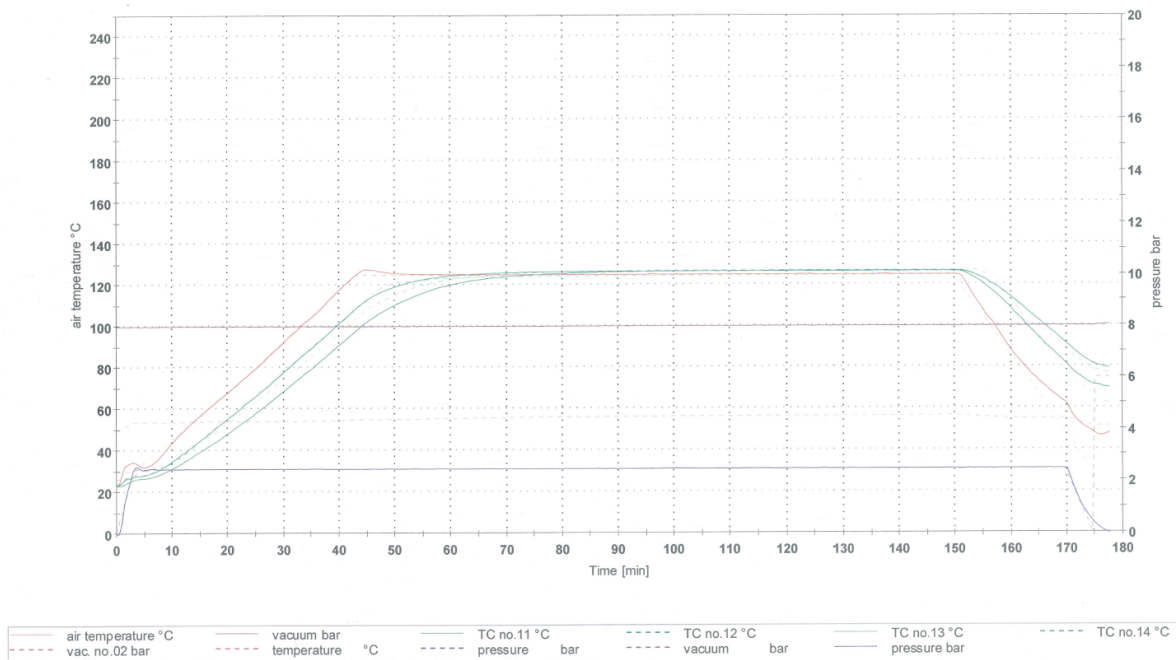
Obr. 54 – Příprav vzorků na smykovou zkoušku

Tato technologie výroby vyžadovala zabalení dílu do technologických materiálů. Jako první vrstva materiálu, kterou bylo potřeba položit na horní potah, sloužila perforovaná separační fólie. Jejím účelem bylo vytvořit prostupnou bariéru mezi dílem a vrstvou breatheru. Breather souží k rozvedení podtlaku po celém vzorku. Tato separační fólie byla perforovaná, aby přebytečná pryskyřice v prepregu mohla být odsátá do breatheru. Ten byl položen přes celý vzorek. Celá deska byla zabalena do podtlakového pytle s ventilem pro přívod podtlaku.

Vzorky byly vytvrzeny podtlakem -0,8 kPa a přetlakem 2,5 bar. Výsledná teplota při cyklu byla 125 °. Vytvrzovací parametry cyklus jsou vidět na obr. 55.



Obr. 55 – Vytvrzené vzorky na smykovou zkoušku



Obr. 56 – Průběh vytvrzování vzorků

Po vytvrzení byly vzorky vyndány z rámců připraveny na testování. Vzorky bylo potřeba oříznout na rozměry 500 x 275 mm a 100 x 100 mm.

13. Testy vzorků

Podle pravidel je potřeba otestovat všechny druhy skladeb, které jsou na monokoku použity, přičemž jejich tuhost musí být rovna nebo větší než tuhost ocelových profilů v dané části šasi. Všechny skladby bylo také potřeba podrobit smykové zkoušce pro zjištění maximální zátěžné síly.

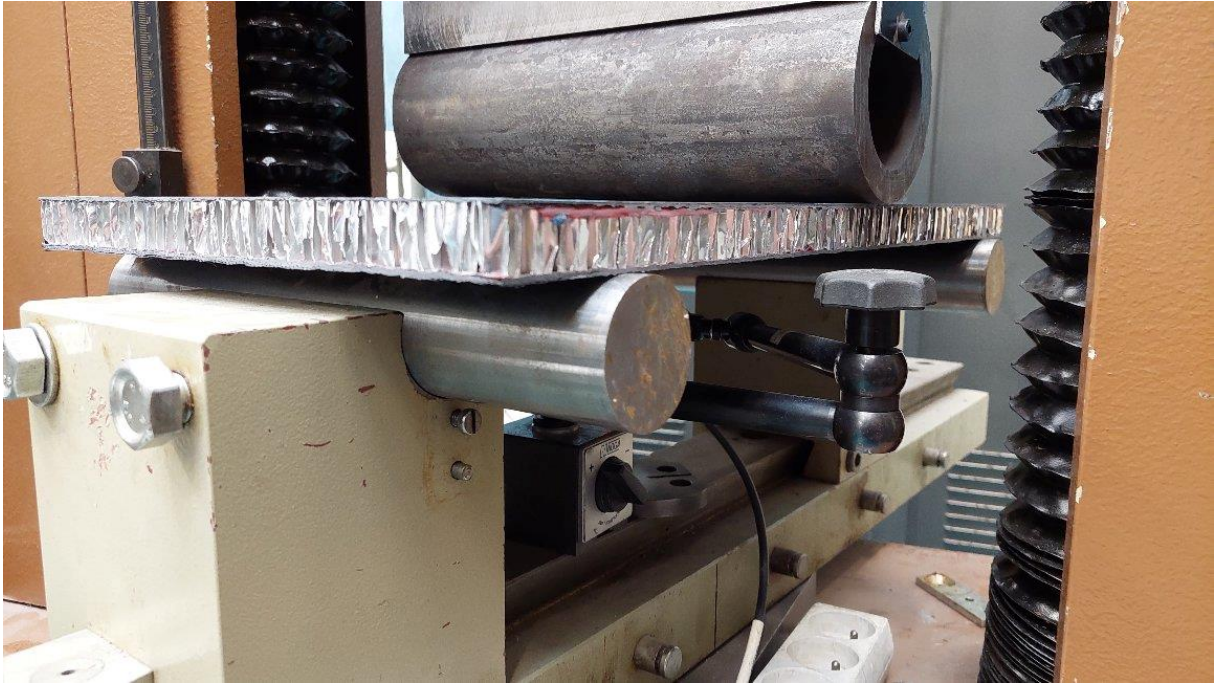
Zkoušky byly prováděny na univerzálním zkušebním stroji FPZ100/1, umožňujícím zjistit pevnostní a přetvárné chování látek při tahovém, tlakovém a ohybovém namáhání. Rychlost posuvu příčnicku byla 2 mm/min.



Obr. 57 – Zkušební stroj na tříbodový ohyb se vzorkem

13.1. Tříbodová ohybová zkouška laminátu

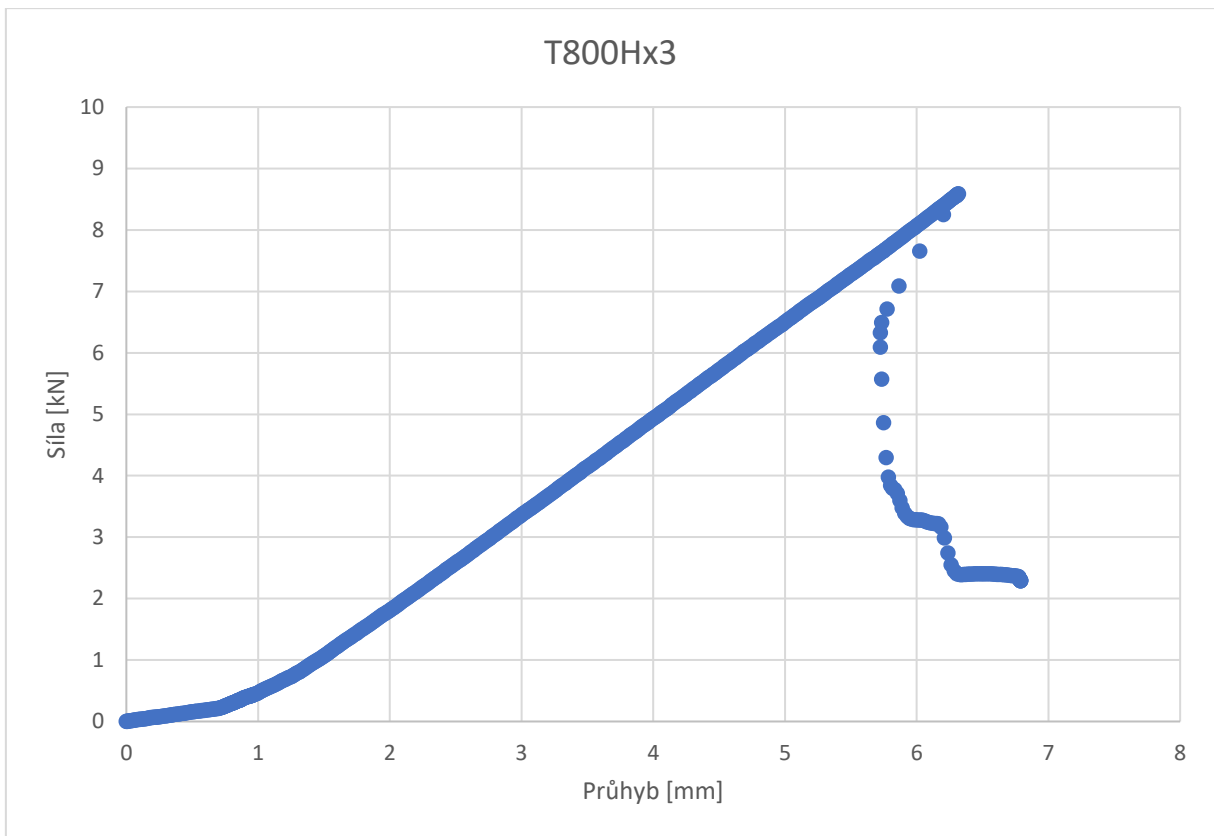
Jedná se o destruktivní zkoušku, kdy zkušební deska byla umístěna na dvě podpory a uprostřed byla zatěžována tělesem. Během celé zkoušky byla zaznamenána působící síla a průhyb pod vzorkem v místě působení zatěžujícího členu. Test probíhal až do té doby, než došlo k destrukci vzorku.



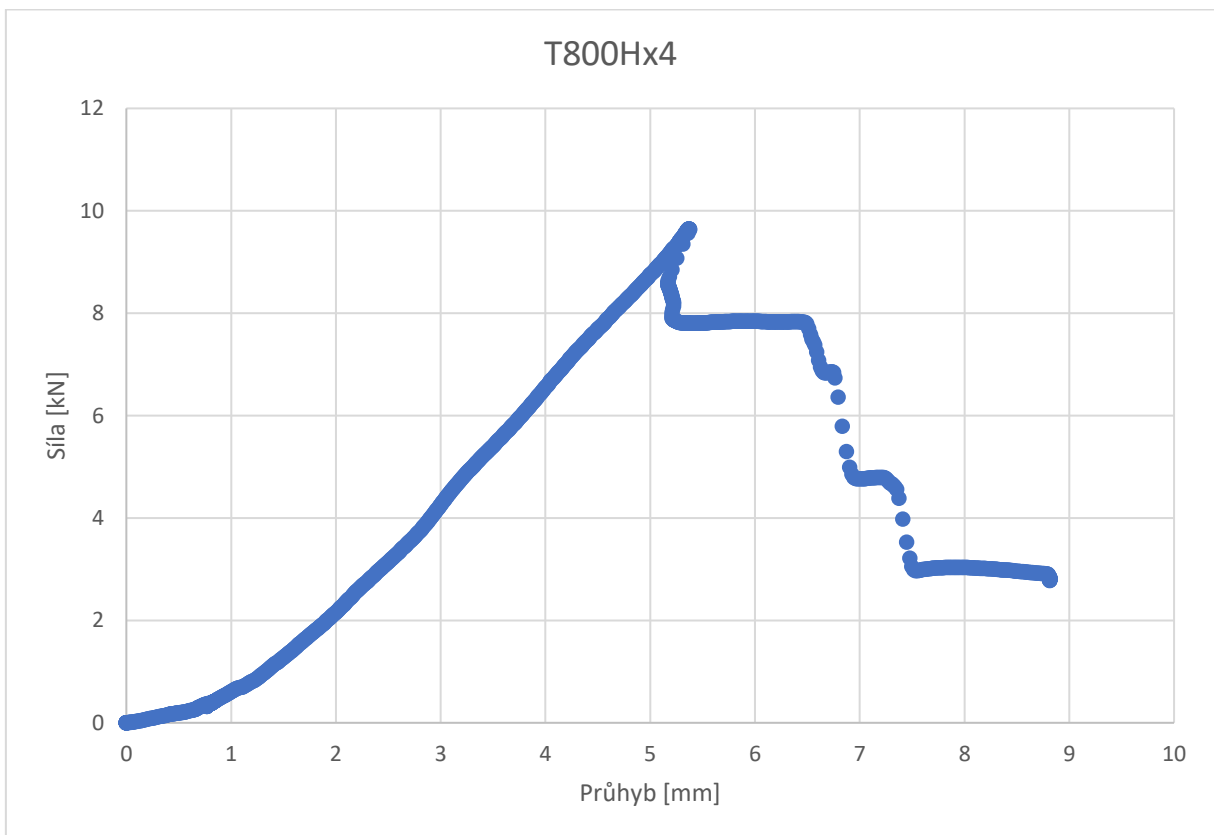
Obr. 58 – Nezatížený vzorek před zkouškou



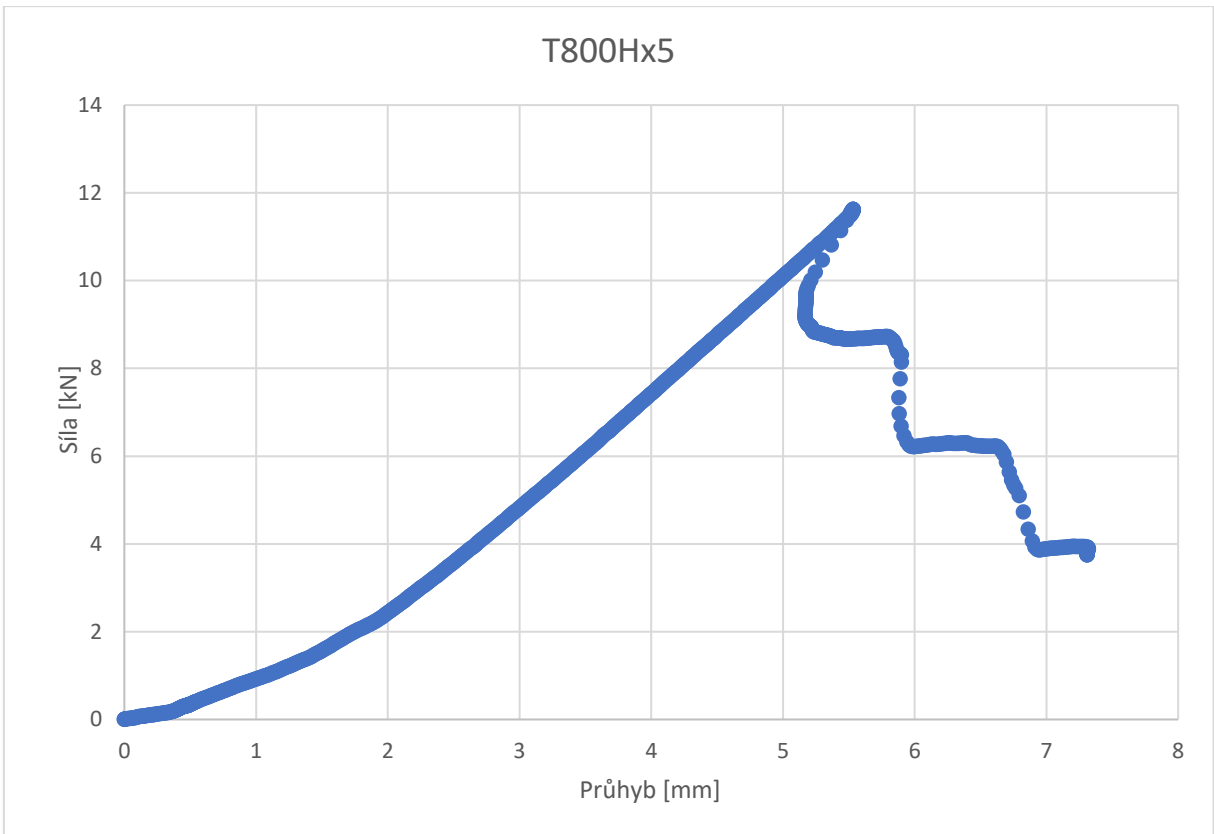
Obr. 59 – Zatížený vzorek po zkoušce, kdy došlo k poruše



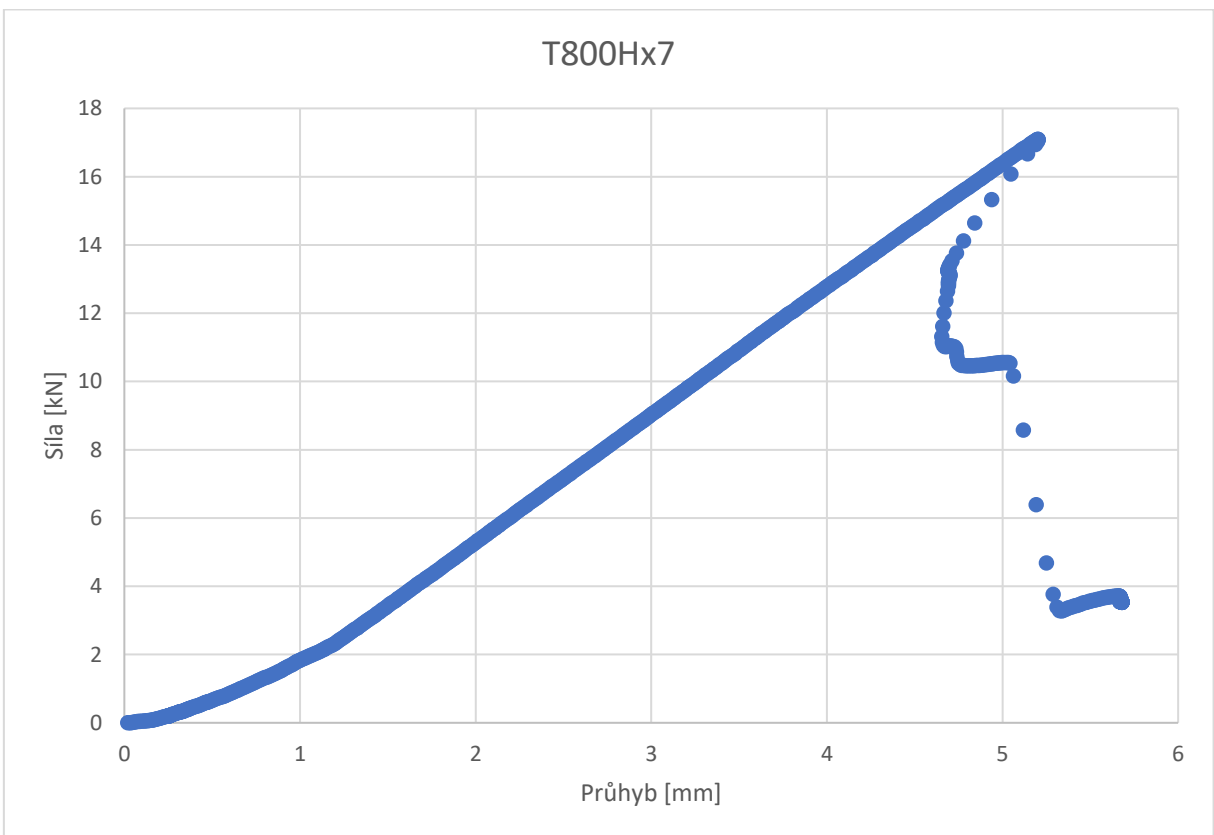
Graf 4 – Zatížení v závislosti na průhybu vzorku T800Hx3



Graf 5 – Zatížení v závislosti na průhybu vzorku T800Hx4



Graf 6– Zatížení v závislosti na průhybu vzorku T800Hx5



Graf 7 – Zatížení v závislosti na průhybu vzorku T800Hx7

Ze začátku je v grafech vidět nelineární část. Ta je způsobena vlivem nedolehnutí vzorku na podpory podél celého vzorku. Po vymizení této vůle se graf stal lineárním. Data do SESu byla brána z lineární části grafu. V Tabulka 19 a Tabulka 20 jsou vidět hodnoty jednotlivých vzorků.

Tabulka 19 – Parametry nových skladeb T800Hx3 a T800Hx4

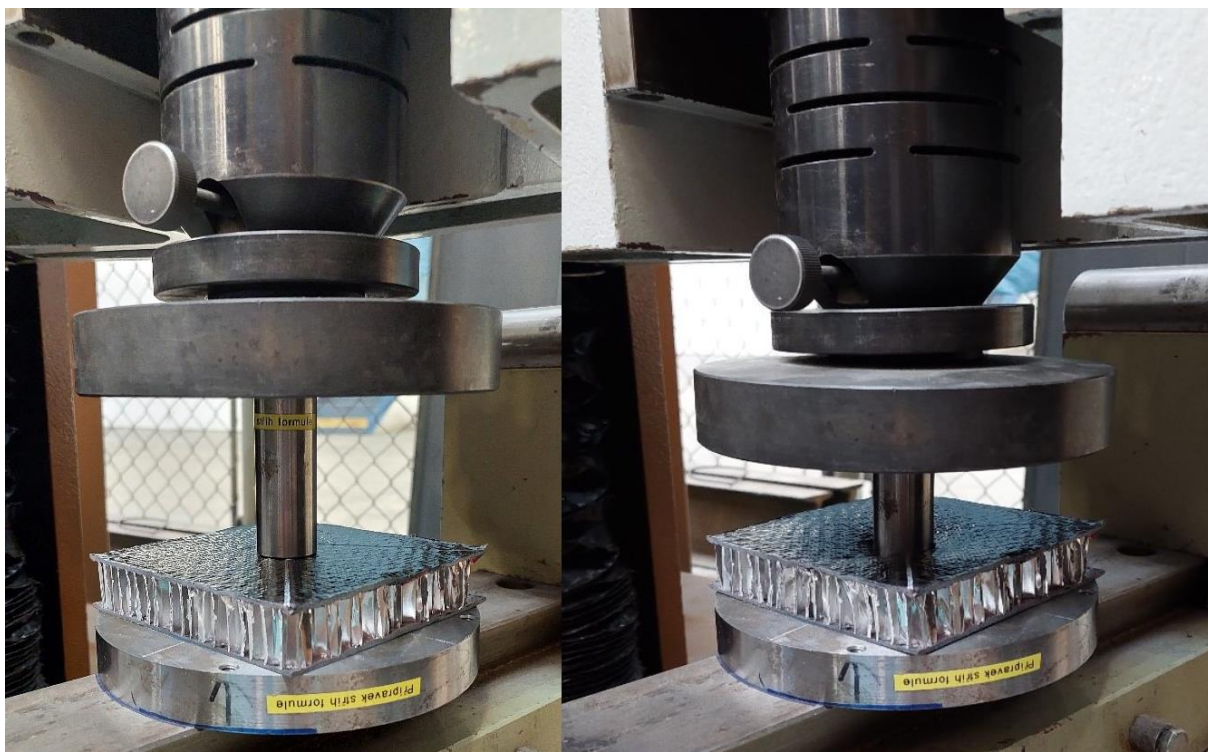
Veličina	Označení	Jednotka	T800Hx3	T800Hx4
Potahy		-	[0/+45/90]s	[0/+45/-45/90]s
Tloušťka vzorku	h	mm	20,9	21,38
Tloušťka jádra	c	mm	19,6	19,6
Tloušťka vnějšího potahu	t ₁	mm	0,65	0,89
Tloušťka vnitřního potahu	t ₂	mm	0,65	0,89
Max. zatížení v ohybu	F	N	8 589	9 648
Gradient	Grad	N/mm	1 360	1 796
Korigovaný gradient	Grad'	N/mm	1 718	2 541
Modul pružnosti vzorku	I _{vzorku}	mm ⁴	36662	51410
Moment setrvačnosti vzorku	E _{vzorku}	MPa	62 500	65 900
Tuhost vzorku	EI	Nm ²	2291	3388
Mez pevnosti	σ	MPa	245	201
Max. zatížení ve střihu	F	N	5563	6907
Pevnost ve střihu	MPa	MPa	109	95,8
Hmotnost vzorku	m	g	564	656

Tabulka 20 – Parametry nových skladeb T800Hx5 a T800Hx7

Veličina	Označení	Jednotka	T800Hx5	T800Hx7
Potahy		-	[0/90/+45/-45/0]s	[0/0/90/+45/-45/0/90]s
Tloušťka vzorku	h	mm	21,9	22,74
Tloušťka jádra	c	mm	19,6	19,6
Tloušťka vnějšího potahu	t ₁	mm	1,15	1,57
Tloušťka vnitřního potahu	t ₂	mm	1,15	1,57
Max. zatížení v ohybu	F	N	11 620	17 090
Gradient	Grad	N/mm	2 100	3 287
Korigovaný gradient	Grad'	N/mm	2 982	4 646
Modul pružnosti vzorku	I _{vzorku}	mm ⁴	2 982	96926
Moment setrvačnosti vzorku	E _{vzorku}	MPa	58 300	63 900
Tuhost vzorku	EI	Nm ²	3973	6194
Mez pevnosti	σ	MPa	187	200
Max. zatížení ve střihu	F	N	8990	13080
Pevnost ve střihu	MPa	MPa	95,9	106,1
Hmotnost vzorku	m	g	741	922

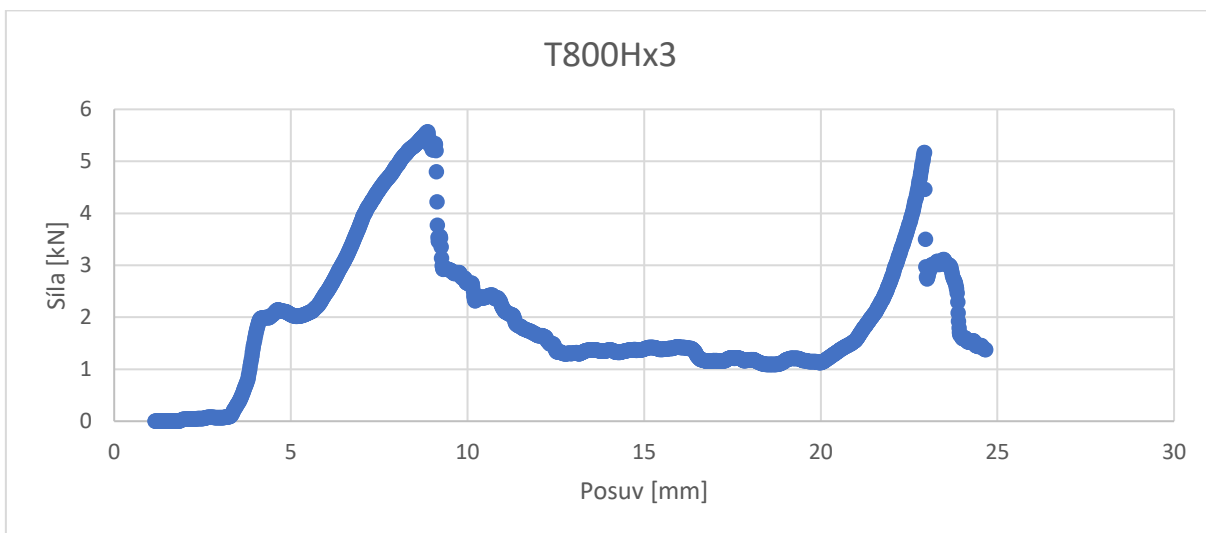
13.2. Smyková zkouška laminátu

Jednalo se o destruktivní zkoušku. Test proběhl na stejném univerzálním stroji. Byly testovány všechny čtyři vzorky. Na testování byl použit testovací přípravek, který splňoval požadavky pravidel soutěže. Zatěžování vzorků probíhalo až pod spodní potah testovaného vzorku.

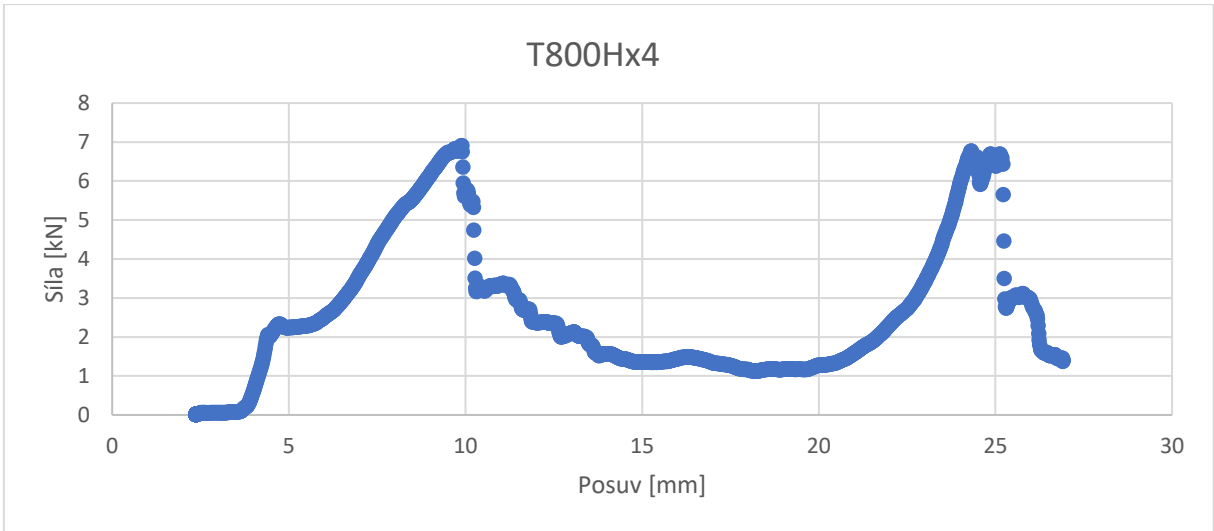


Obr. 60 – Zkouška smykem

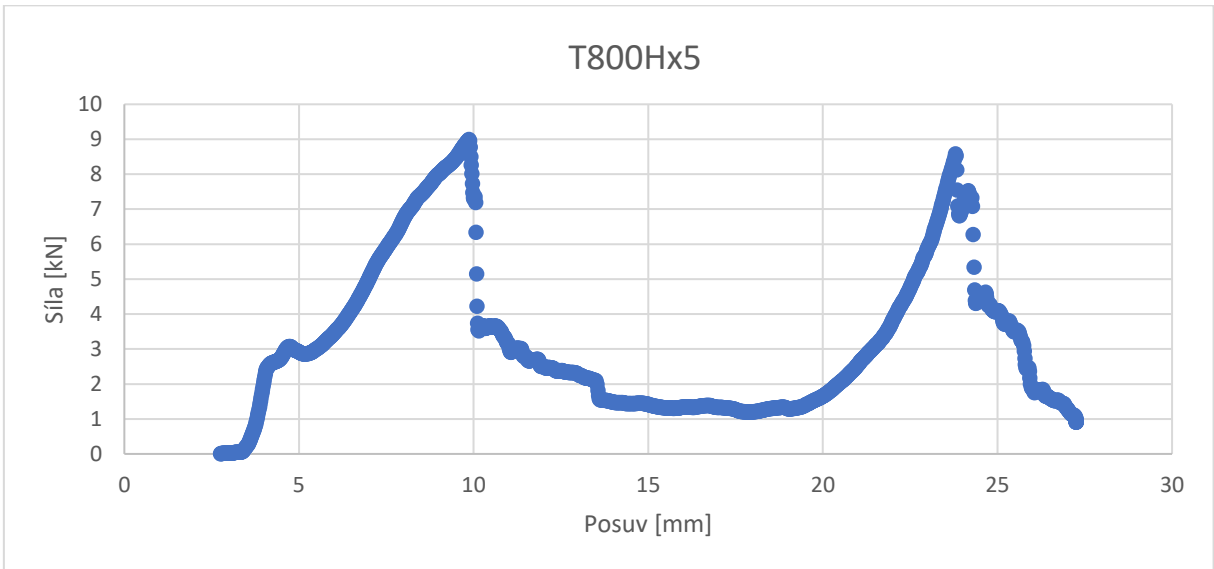
Zde jsou uvedené grafy jednotlivých vzorků vykreslující zatížení v závislosti na posuv protlačovaném válečku.



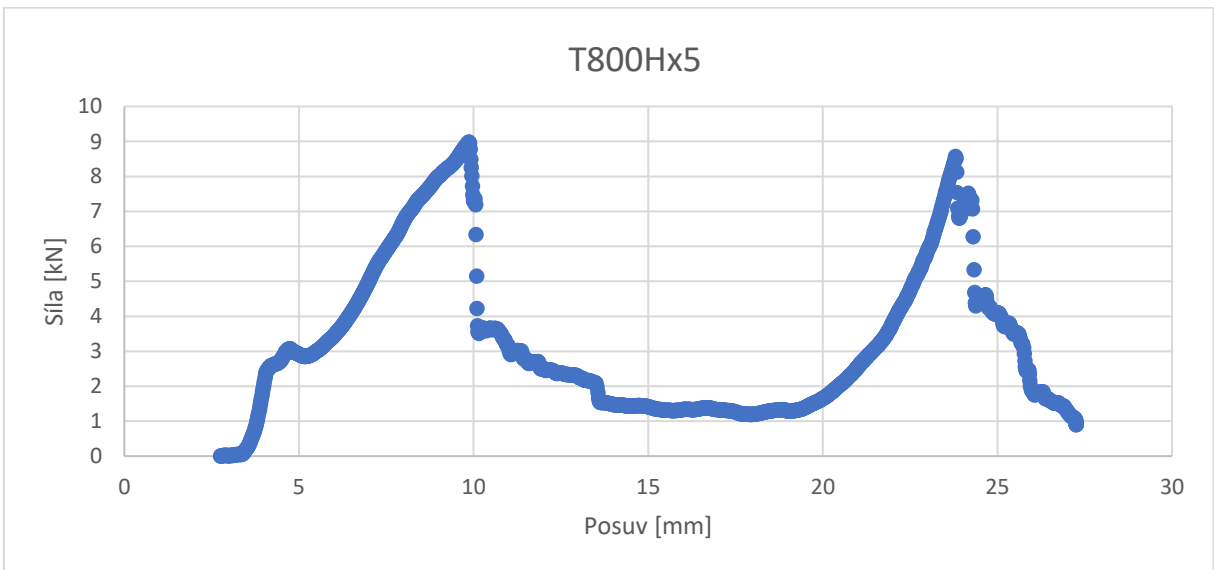
Graf 8 – Síly v závislosti na posuvu válečku u vzorku T800Hx3



Graf 9 – Síly v závislosti na posuvu válečku u vzorku T800Hx4



Graf 10 – Síly v závislosti na posuvu válečku u vzorku T800Hx5



Do dokumentu byly uvedeny nejvyšší hodnoty obou vrcholů zatěžující síly v závislosti na posuvu. Pro podporu přední přepážky (BFSS) musí být druhý vrchol větší než 4 000 N a pro boční nárazovou strukturu (SIS) větší než 7 500 N. Dále byla uvedena hodnota tloušťky potahu a z toho byla vypočtena smyková pevnost potahu.

$$\sigma_{shear} = \frac{F_{max}}{\pi \cdot 25 \cdot t_2} \quad (13.2.1)$$



Obr. 61 – Vzorek smykové zkoušky po testu

V tabulce jsou vidět největší zatížení schopná přenést každý z potahů, která byla zadávána do SESu, a z nichž se vypočítala pevnost ve smyku.

Tabulka 21 – Naměřené hodnoty ze smykové zkoušky

Označení vzorku	Max zatížení u horního potahu	Max zatížení u spodního potahu	Pevnost ve smyku
	N	N	
T800Hx3	5 566	5 170	101,3
T800Hx4	6 907	6 695	95,8
T800Hx5	8 990	8 575	94,9
T800Hx7	13 080	10 460	84,8

Provedené testy proběhly v souladu s pravidly soutěže. Výsledky z provedených testů byly zpracovány.

14. Nová skladba monokoku

Do SESu byly zadány výsledky z provedených zkoušek. Na základě návrhu nové skladby byly do oblastí monokoku přidělovány parametry příslušných skladeb. Pro ty oblasti, kde předpokládaná navržená skladba nebyla dostačující, byla použita jiná, která již vyhověla daným požadavkům.

Tabulka 22 ukazuje výsledné navržené skladby pro konkrétní oblasti monokoku, které vyhověly požadavkům a byly ověřeny výpočtovým dokumentem SES.

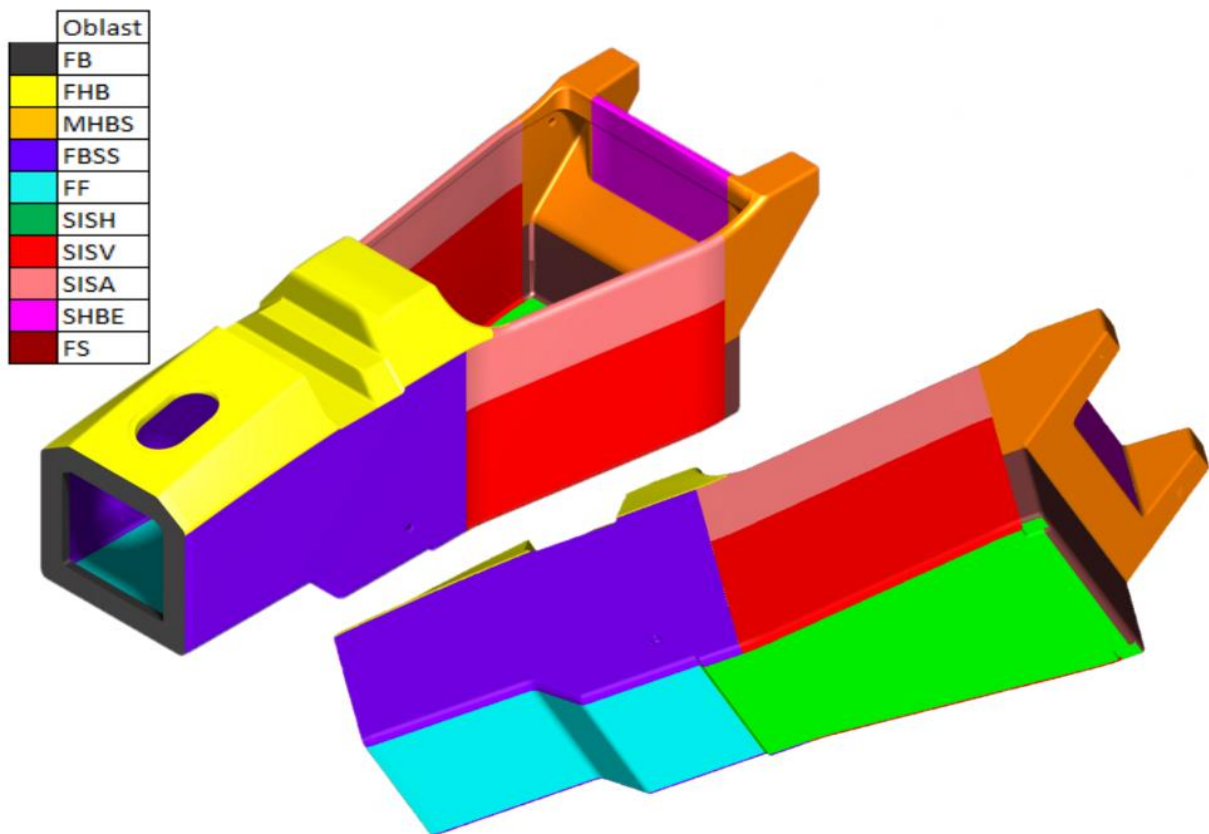
Tabulka 22 – Naměřené a vypočtené hodnoty vzorků a oblastí

Veličina	Označení	Jednotka	Front Bulkhead (FB)	Front Hoop Bracing (FHB)	Main Hoop Bracing Support (MHBS)
Označení	-	-	T800Hx7	T800Hx4	T800Hx7
Tloušťka vzorku	h	mm	22,74	21,38	22,74
Tloušťka jádra	c	mm	19,6	19,6	19,6
Tloušťka vnějšího potahu	t ₁	mm	1,57	0,89	1,57
Tloušťka vnitřního potahu	t ₂	mm	1,57	0,89	1,57
Výška panelu formule	b	mm	122	142	160
Gradient	Grad	N/mm	3 287	1 796	3 287
Korigovaný gradient	Grad'	N/mm	4 646	2 541	4 646
Modul pružnosti vzorku	E	MPa	63 900	65 900	63 900
Moment setrvačnosti vzorku	I	mm ⁴	96 926	51 410	96 926
Tuhost vzorku	EI _{vzorku}	Nm ²	6 194	3 388	6 194
Tuhost panelu formule	EI _{panelu}	Nm ²	5 853	1 746	3 604
Maximální zatížení vzorku	F	N	17 090	9 648	17 090
Min. rozměr trubek	-	mm	∅ 25,4 x 1,6	∅ 25,4 x 1,6	∅ 25,4 x 1,2
Počet kusů trubek	-	ks	2	1	2
Min. tuhost požadovaných trubek	EI _t	Nm ²	3 404	1 702	2680
Porovnání tuhostí konstrukcí	-	%	172	103	134
Hmotnost vzorku	m _{vzorku}	g	922	656	922
Hmotnost skladby	m	g/m ²	6 705	4 771	6 705
Hmotnost panelu formule	m _{panelu}	g	689	2 274	2 253
Množství materiálu potřebný na panel formule	S	m ²	1,440	2,383	2,688

Tabulka 23 – Naměřené a vypočtené hodnoty vzorků a oblastí

Označení	Jednotka	Front Bulkhead Support Structure (FBSS)	Side Impact Structure Horizontal (SISH)	Side Impact Structure Vertical (SISV)	Shoulder Harness Bar Equivalency (SHBE)
-	-	T800Hx4	T800Hx4	T800Hx5	T800Hx7
h	mm	21,38	21,38	21,9	22,74
c	mm	19,6	19,6	19,6	19,6
t ₁	mm	0,89	0,89	1,15	1,57
t ₂	mm	0,89	0,89	1,15	1,57
b	mm	373	193	320	140
Grad	N/mm	1 796	1 796	2 100	3 287
Grad'	N/mm	2 541	2 541	2 982	4 646
E	MPa	65 900	65 900	58 300	63 900
I	mm ⁴	51 410	51 410	68 152	96 926
El _{vzorku}	Nm ²	3 388	3 388	3 973	6 194
El _{panelu}	Nm ²	4 593	2 307	4 623	2 830
F	N	9 648	9 648	11 620	17 090
-	mm	∅ 25,4 x 1,2	∅ 25,4 x 1,6	∅ 25,4 x 1,6	∅ 25,4 x 2,5
-	ks	3	1	2	1
El _t	Nm ²	3 404	1702	3 404	2 318
-	%	135	136	136	122
m _{vzorku}	g	656	656	741	922
m	g/m ²	4 771	4 771	5 389	6 705
m _{panelu}	g	3 245	2 138	2 077	724
S	m ²	5,442	3,585	3,855	1,215

V Tabulka 22 a Tabulka 23 jsou vypsány jen oblasti, které se musí řídit pravidly. Na obrázku 62 jsou vidět všechny oblasti monokoku a v tabulce pod ním jejich navržené skladby.



Obr. 62 – Nové rozdělení oblastí na skořepinové struktuře

Tabulka 24 – Hmotnosti, plochy a množství materiálu potřebné na oblasti monokoku

Oblast	Označení skladby	Hmotnost	Plocha	Množství materiálu
		g	m ²	m ²
Front Bulkhead	T800Hx7	689	0,103	1,440
Front Hoop Bracing	T800Hx4	2 274	0,477	2,383
Main Hoop Bracing Support	T800Hx7	2 253	0,336	2,688
Front Bulkhead Support Sturture	T800Hx4	3 245	0,680	5,442
Front Floor	T800Hx4	1 427	0,299	2,394
SIS Horizontal	T800Hx4	2 138	0,448	3,585
SIS Vertical	T800Hx5	2 077	0,385	3,855
SIS Abov	T800Hx3	937	0,228	1,828
Shoulder Harness Bar Equivalency	T800Hx7	735	0,110	1,535
Frame Support	T800Hx4	724	0,152	1,215
Celkem		16 502	3,219	26,364

Pro oblast SIS Abov je volena ta nejlehčí skladba z důvodu redukce váhy. V oblasti Front Floor byla volena skladba T800Hx4 z důvodu zde nacházející se pedálová platforma, která přenáší do kompozitu velké zatížení a je zde riziko poškození kompozitu od brzdové kapaliny. V oblasti Frame Support byla zvolena skladba T800Hx4. Ta byla zvolena z důvodu, zde se nacházejícího šroubového spojení s rámem, a tím spojená potřeba dostatečně pevného a bezpečného laminátu.

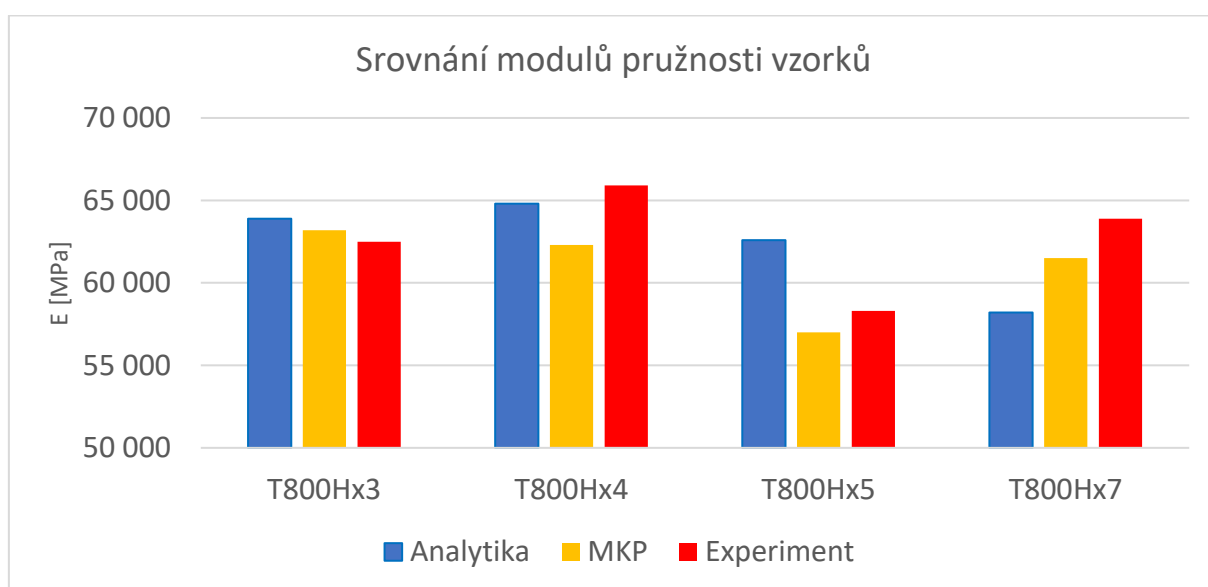
Celkově nově navržená skladba na monokok váží 16,502 kg bez předního oblouku, hlavního oblouku, podpory hlavního oblouku, insertů uvnitř monokoku a hliníkového plechu tloušťky 0,1 mm přilepeného zepředu na Front Bulkhead.

15. Výsledky skladby monokoku

V této kapitole budou shrnuty všechny výsledné poznatky z práce získané simulacemi, výpočty a experimentálním měřením.

15.1. Srovnání analytických a MKP výpočtů s experimentem

Návrh kompozitních panelů proběhl pomocí analytického výpočtu pro rychlé a jednoduché navrhování kompozitních sendvičových panelů v programu Matlab. Ze získaného průhybu a působící síly byly dopočítány moduly pružnosti potřebné pro určení tuhosti panelů. Jako další metoda pro návrh byla použita metoda konečných prvků. Byl použit program HyperWorks. Ze získaných dat z MKP byly dopočítány moduly pružnosti pro navržené panely. Obě tyto metody byly použity při návrhu nových skladeb. Vzorky s navrženými skladbami byly otestovány a ze získaných dat byl dopočítán modul pružnosti, který se porovnal s návrhy. Výsledné srovnání hodnot modulů pružnosti pro navržené skladby jsou vidět v Tabulka 25.

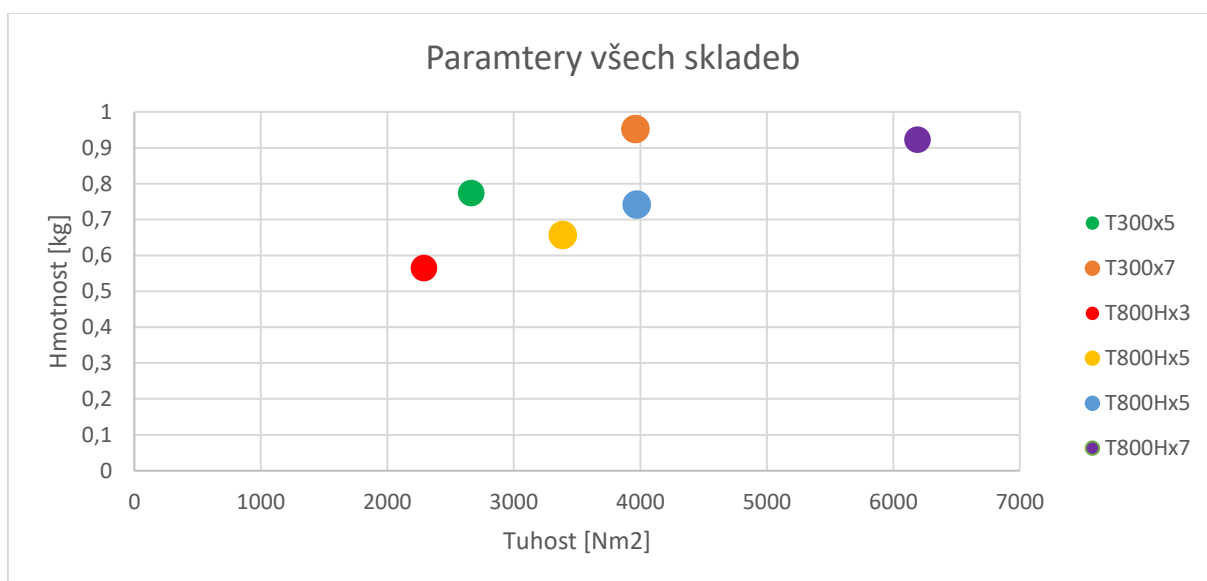


Graf 11 – Srovnání modulů pružnosti vzorků

Tabulka 25 – Porovnání modulu pružnosti

Metoda	Veličina	Označení vzorku			
		T800Hx3	T800Hx4	T800Hx5	T800Hx7
Analytika	E [MPa]	63 900	64 800	62 600	58 200
	Porovnání E s experimentem [%]	2,24	-1,67	7,38	-8,92
MKP	E [MPa]	63 200	62 300	57 000	61 500
	Porovnání E s experimentem [%]	1,12	-5,46	-2,23	-3,76
Experiment	E [MPa]	62 500	65 900	58 300	63 900

Návrh vzorů se lišil do 8,92 % od naměřeného experimentu. To mohlo být způsobené výrobním procesem vzorků. Pro přesnější zjištění vlastností by bylo potřeba vždy testovat 5-6 kusů od každého vzorku.



Graf 12 – Parametry všech skladeb

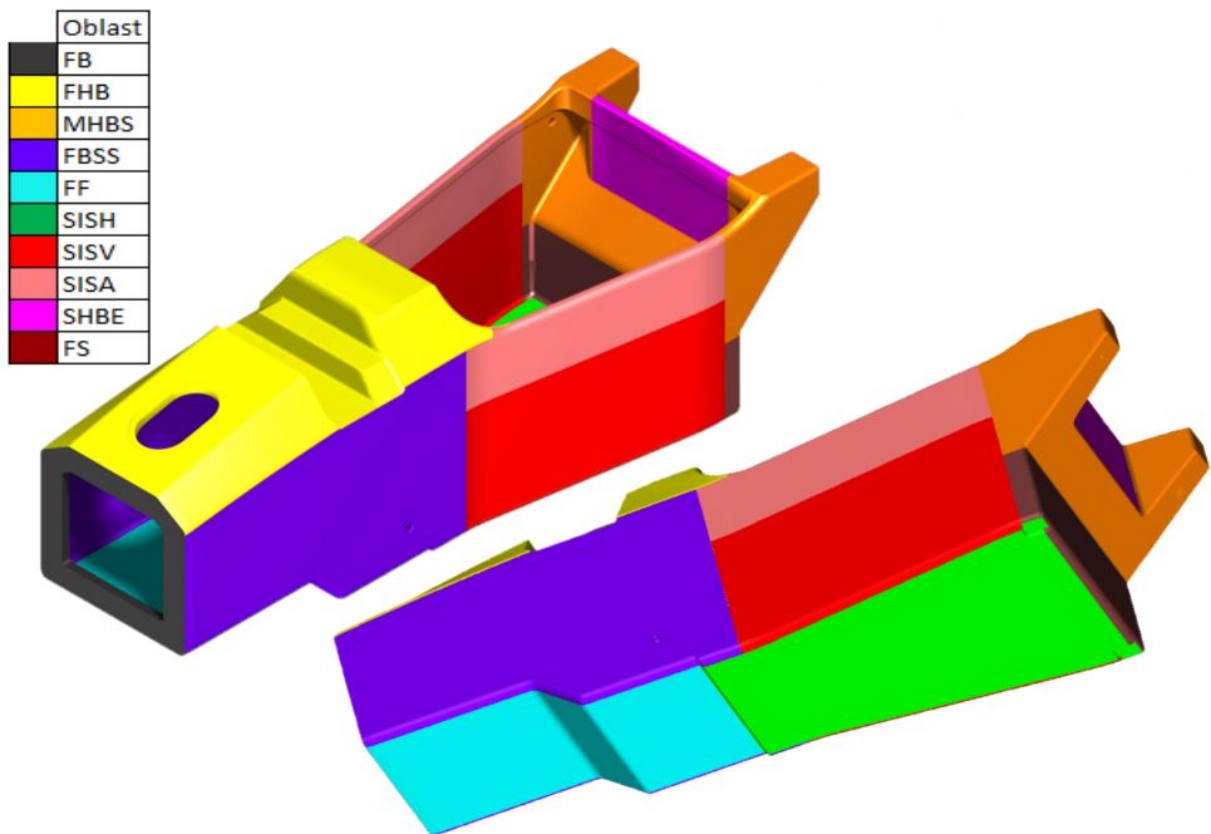
Tabulka 26 – Vypočítané hodnoty vzorků

Označení	Tuhost	Hmotnost
	Nm ²	kg
T300x5	2 666	0,773
T300x7	3 964	0,952
T800Hx3	2291	0,564
T800Hx4	3388	0,656
T800Hx5	3973	0,741
T800Hx7	6194	0,922

Je vidět, že vzorky vyrobené z vláken T800H mají lepší parametry, a tedy jsou pro použití vhodnější než staré vzorky.

15.2. Nově navržená skladba monokoku

Na základě zpracovaných údajů ze simulací výpočtů a experimentů byla navržena nová skladba monokoku, která splnila kladené požadavky na dodržení pravidel a snížení hmotnosti. Byl rozšířen počet druhů skladeb, z původních dvou na čtyři skladby, pro lepší optimalizaci skladeb na monokoku. Segmenty, s použitými novými skladbami, jsou vidět na Obr. 63.



Obr. 63 – Nové rozdělení oblastí na skořepinové struktuře

Tabulka 27 – Nové rozdělení oblastí na skořepinové struktuře

Oblast	Označení	Skladba
Front Bulkhead (FB)	T800Hx7	[0/0/90/+45/-45/0/90]s
Front Hoop Bracing (FHB)	T800Hx4	[0/+45/-45/90]s
Main Hoop Bracing Support (MHBS)	T800Hx7	[0/0/90/+45/-45/0/90]s
Front Bulkhead Support Sturture (FBSS)	T800Hx4	[0/+45/-45/90]s
Front Floor (FF)	T800Hx4	[0/+45/-45/90]s
Side Impact Structure Horizontal (SISH)	T800Hx4	[0/+45/-45/90]s
Side Impact Structure Vertical (SISV)	T800Hx5	[0/90/+45/-45/0]s
Side Impact Structure Abov (SISA)	T800Hx3	[0/+45/90]s
Shoulder Harness Bar Equivalency (SHBE)	T800Hx7	[0/0/90/+45/-45/0/90]s
Frame Support (FS)	T800Hx4	[0/+45/-45/90]s
Jádro	Al. Honey	pod úhlem 0°

15.3. Srovnání hmotností starých a nových skladeb a celého monokoku
Byly navrženy a experimentálně otestovány nové skladby na monokok, které vyhovují pravidlům. Porovnání je vidět v tabulce.

Tabulka 28 – Hmotnosti skladeb

Název	Jednotka	Staré skladby		Nové skladby			
		T300x5	T300x7	T800Hx3	T800Hx4	T800Hx5	T800Hx7
Hmotnost vzorku	g	773	952	564	656	741	922
Hmotnost sendviče	g/m ²	5 622	6 924	4 102	4 771	5 389	6 705

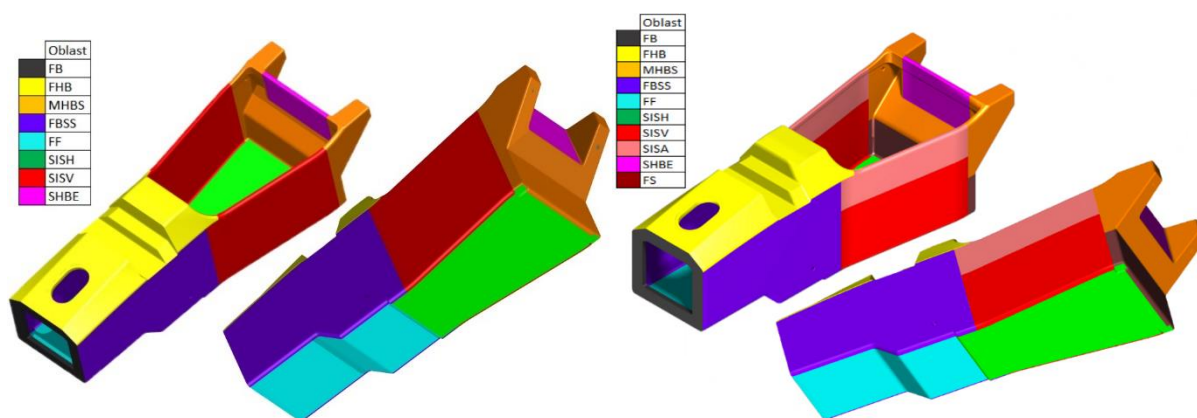
Srovnání celkové hmotnosti jednotlivých oblastí u celého monokoku je vidět v tabulce 28.

Tabulka 29 – Srovnání staré a nové skladby

Oblast	Stará skladba		Nová skladba		
	Označení	Hmotnost [g]	Označení	Hmotnost [g]	Rozdíl oproti staré skladbě [%]
FB	T300x7	712	T800Hx7	689	-3,2
FHB	T300x7	3 300	T800Hx4	2 274	-31,1
MHBS	T300x7	3 378	T800Hx7	2 253	-3,2
FBSS	T300x7	4 710	T800Hx4	3 245	-31,1
FF	T300x5	1 682	T800Hx4	1 427	-15,1
SISH	T300x5	2 520	T800Hx4	2 138	-15,1
SISV	T300x7	4 251	T800Hx5	2 077	-22,2
SHBE	T300x7	759	T800Hx7	735	-40,8
SISA	-	-	T800Hx3	937	-3,2
FS	-	-	T800Hx4	724	-31,1
Celkem		21311		16 502	-22,6

Použitím nově navržených skladeb byl monokok odlehčen z 21,311 kg o 4,809 kg tedy 22,6 % na 16,502 kg.

V souladu s pravidly, byly vytvořeny nové segmenty na monokoku a tím se dosáhla optimalizace skladby a snížení hmotnosti. Zvýšil se počet segmentů z osmi na deset.



Obr. 64 – Oblasti staré skladby

Obr. 65 – Oblasti nové skladby

Nově byla vyčleněna oblast Side Impact Structure Abov se skladbou T800Hx3 a Frame Support se skladbou T800Hx4. Tímto bylo uspořeno 972 g.

15.4. Srovnání spotřeby materiálu

Změnou skladby bylo třeba i použít méně prepregu na výrobu vnějšího a vnitřního potahu.

Tabulka 30 – Porovnání minima potřebného materiálu

Oblast	Množství materiálu [m ²]	
	T300	T800H
Front Bulkhead (FB)	1,440	1,440
Front Hoop Bracing (FHB)	6,673	2,383
Main Hoop Bracing Support (MHBS)	6,397	2,688
Front Bulkhead Support Sturture (FBSS)	9,523	5,442
Front Floor (FF)	2,992	2,394
Side Impact Structure Horizontal (SISH)	6,274	3,585
Side Impact Structure Vertical (SISV)	7,658	3,855
Side Impact Structure Abov (SISA)	1,535	1,828
Shoulder Harness Bar Equivalency (SHBE)	-	1,535
Frame Support (FS)	-	1,215
Celkem	42,492	26,364

Minimální množství potřebného prepregu se snížili z 42,492 m² o 16,128 m² tedy o 37,96 % na 26,364 m². Potřebné množství hliníkové voštiny na jádro zůstalo stejné, a to 3,219 m².

Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout kompozitní strukturu pro vůz Formula Student, která jednak splňuje mezinárodní pravidla FSEA, jednak má nižší hmotnost než struktura dříve používaná. Pro toto řešení byly navrženy, otestovány a zvoleny nové skladby, které tyto podmínky splňují. Pro toto řešení byl zvolen jako materiál obou potahů prepregová tkanina vyrobená z vláken T800H se středním modulem pružnosti, vysokou pevností v tahu a s vynikajícími vyváženými kompozitními vlastnostmi. Jako jádro byla zvolena hliníková voština. Skladba byla navržena na existující tvar monokoku studentské formule týmu CTU CarTech.

V diplomové práci byly popsány sendvičové struktury a jejich materiály. Dále byla popsána technologie vytvrzování v autoklávu, která byla použita na výrobu testovaných vzorků a bude využita i na výrobu monokoku. Byly navrženy zátěžové stavy pro stanovené okrajové podmínky. Těmito stavy byl tříbodový ohyb a smyk sendviče pro stanovené okrajové podmínky vyplývající z pravidel FSEA. Byla popsána stará skladba kompozitní struktury. Následně byl objasněn postup pro analytický výpočet ohybové tuhosti sendvičového panelu pro případ zatížení tříbodovým ohybem. Pro hodnoty potřebné k určení tuhosti panelů byl vytvořen program v softwaru Matlab, který používá klasickou sendvičovou teorii s uvažováním vlivu příčných smykových sil a výpočetní dokument SES. Jako další metoda pro výpočet ohybové tuhosti byla použita metoda MKP pomocí programu HyperWorks a výpočetní dokument SES. Na základě výsledků z těchto metod byly navrženy vzorky pro testování různých skladeb kompozitu.

Jako první byla provedena zkouška uhlíkových tkanin a uhlíkových jednosměrných vláken. Na základě dat ze zkoušek byly stanoveny tuhosti a pevnosti testovaných materiálů. Dále byla provedena tříbodová ohybová zkouška navržených panelů podle podmínek pravidel FSEA. Následně se zkoušela smyková pevnost zvolených vzorků opět dle pravidel FSEA. Z naměřených dat byly navrženy lamináty přiřazeny jednotlivým částem kompozitní struktury. Na části kompozitní struktury, které jsou regulovány pravidly, byly použity tři ze čtyř navržených skladeb. Čtvrtá skladba byla použita na částech kompozitní struktury, které nejsou omezeny pravidly.

Nově navržené skladby, které byly použity na monokok, snížily celkovou hmotnost o 4,8 kg, což je redukce hmotnosti o 22,6 % na celkovou váhu 16,5 kg. Příčinu snížení hmotnosti je třeba spatřovat ve vhodnějším návrhu skladeb pro dané potřeby oblastí; jejich počet se zvednul z osmi na deset. Zároveň na výrobu monokoku bude potřeba o 16,1 m² méně materiálu, což je snížení o 38 %.

Ve srovnání použitých návrhových metod na nově vytvořené skladby bylo zjištěno, že navržené moduly pružnosti se shodují s provedeným experimentem, tedy realitou. Větší odchylky mohou být způsobeny výrobním procesem a také počtem testovaných vzorků od každé skladby.

Tabulka 31 – Porovnání modulů pružnosti nových skladeb

Metoda	Veličina	Označení vzorku			
		T800Hx3	T800Hx4	T800Hx5	T800Hx7
Analytika	E [MPa]	63 900	64 800	62 600	58 200
	Porovnání E s experimentem [%]	2,24	-1,67	7,38	-8,92
MKP	E [MPa]	63 200	62 300	57 000	61 500
	Porovnání E s experimentem [%]	1,12	-5,46	-2,23	-3,76
Experiment	E [MPa]	62 500	65 900	58 300	63 900

Všechny cíle diplomové práce byly splněny, jelikož nové skladby dosahují ve srovnání s původními vyšších hodnot ohybových tuhostí a nižší hmotnosti. To je ovšem vykoupeno vyšší cenou nově použitého prepregu. Návrh nové skladby kompozitní struktury je realizovatelný v týmu CTU CarTech, který má zkušenosti s výrobou kompozitních dílů. Dalším krokem by měl být návrh závitových vložek do kompozitní struktury pro uchycení dílů.

Použitá literatura

- [1] *Formula Student Germany* [online]. 2021 [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: www.formulastudent.de.
- [2] *Siemens Blog* [online]. 2019 [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://blogs.sw.siemens.com/academic/formula-student-germany-the-most-advanced-student-competition-in-the-world/>.
- [3] *CTU CarTech* [online]. 2021 [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://cartech.cvut.cz/>
- [4] MACEY, Stuart a Geoff WARDLE. *H point The Fundamentals of car design & packagin*. China: Curb Industries, 2009. ISBN 978-1-933492-37-7.
- [5] VAŠÍČEK, Michal. *Pasivní bezpečnost motorových vozidel* [přednáška]. Praha. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 3. 3. 2021.
- [6] *Formula 1 Dictionary* [online]. 2021 [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <http://www.formula1-dictionary.net/chassis.html>.
- [7] *Mercedes-Benz Media Newsroom USA* [online]. 2021 [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://media.mbusa.com/releases/release-f263b73b74ccd81a68d0f509783785fd-completely-new-bodyshell-for-upcoming-mercedes-amg-sl>.
- [8] *Formula 1 Dictionary* [online]. 2021 [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <http://www.formula1-dictionary.net/monocoque.html>.
- [9] *Euro Car News* [online]. [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <http://www.eurocarnews.com/media/pictorials/1137/5165.jpg>.
- [10] DAVIES, H. C., M BRYANT, M HOPE a C MEILLER. *Design, development, and manufacture of an aluminium honeycomb sandwich panel monocoque chassis for Formula Student competition* [online]. Cardiff, 2011 [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: https://orca.cardiff.ac.uk/17318/1/Design%2C_development%2C_and_manufacture.pdf. CASE STUDY. Cardiff University, School of Engineering.
- [11] KASJANICS, Anton, Joe EDWARDS, Thomas GOUGH a Thomas RICKARD. *A feasibility study looking into the design and manufacture of a composite chassis for Formula Student* [online]. Southampton, 2015 [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <http://thomasrickard.uk/general/files/GDP.pdf>. Report. University of Southampton, Faculty of Engineering and the Environment.
- [12] *Formula Student Rules 2022* [online]. 2022. 2021 [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2022/rules/FS-Rules_2022_v1.0.pdf.
- [13] LAŠ, Ladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. 2. přepracované vydání. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008. ISBN 978-80-7043-698-9.

- [14] MIKULA, Martin. *Kompozitní materiály na bázi uhlíkových vláken* [online]. Brno, 2012 [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=54627. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [15] *Composite Materials Handbook*. Newport, 1998. Dostupné také z: <https://businessdocbox.com/Metals/74814122-Composite-materials-handbook.html>.
- [16] *Evonik Leading Beyond Chemistry* [online]. 2021 [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://composites.evonik.com/en/products-services/foams/rohacell>.
- [17] *Tasuns* [online]. [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <http://cz.t-composites.net/composite-sandwich-panels/aluminum-honeycomb-core/aluminum-honeycomb.html>.
- [18] *Huarui Honeycomb* [online]. 2021 [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <http://cz.hrhoneycombs.com/aluminum-honeycomb/nomex-honeycomb-core-for-sale.html>.
- [19] *HP-Textiles* [online]. 2021 [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://shop.hp-textiles.com/shop/en/hp-core-sf-soric-sf-3mm.html>.
- [20] *Toray Carbon Fibres Europe* [online]. [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://toray-cfe.com/en/products/torayca-carbon-fibers/>
- [21] BARBERO, Ever J. *Introduction to COMPOSITE MATERIALS MATERIALS DESIGN*. 2nd edition. Florida: Taylor & Francis Group, 2011. ISBN 978-1-4398-9413-2.
- [22] *Epigroup* [online]. 2021 [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://www.epigroup.eu/EN/wp-content/uploads/2018/07/4.png>.
- [23] *Toray Innovation by Chemistry* [online]. 2021 [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: https://www.toray.co.id/en/products/carbon/car_0020.html.
- [24] VRBKA, Jan. *MECHANIKA KOMPOZITŮ* [online]. Brno, 2008 [cit. 2021-12-31]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/19075854-Mechanika-kompozitu-prof-rndr-ing-jan-vrbka-drsc-ustav-mechaniky-teles-mechatroniky-a-biomechaniky-fakulta-strojního-inženýrství-vut-v-brně.html>. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

Seznam obrázků

Obr. 1 – Závodní týmy na soutěži Formula Student Germany [2]	12
Obr. 2 – Vůz FS.13 týmu CTU CarTech [3]	16
Obr. 3 – Karosérie Mercedes-AMG SL [7]	18
Obr. 4 – Monocoque McLaren MP4/1 [9]	20
Obr. 5 – Monokok z hliníkových panelů týmu Oxford Brookes Racing [11]	21
Obr. 6 – Monokok vozu FS.08 týmu CTU CarTech	22
Obr. 7 – Ukázka přípravku pro tříbodovou zkoušku	27
Obr. 8 – Ukázka přípravku na smykovou zkoušku	27
Obr. 9 – Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrie výztuže [14]	28
Obr. 10 – Sendvičový panel [13]	29
Obr. 11 – Pěnové jádro Rohacell [16]	31
Obr. 12 – Hliníkové plástvové jádro [17]	32
Obr. 13 – Nomexové plástvové jádro [18]	32
Obr. 14 – Jádro SORIC® [19]	34
Obr. 15 – Uhlíková vlákna Torayca® - Výběrová tabulka produktů [20]	35
Obr. 16 – Uhlíkové, kevlarové a sklené tkaniny [22]	37
Obr. 17 – Prepregová jednosměrná vlákna [23]	41
Obr. 18 – Styly vazeb tkanin [24]	43
Obr. 19 – Ruční kladení [21]	47
Obr. 20 – Vakuové formování [21]	48
Obr. 21 – Autoklávové zpracování [21]	49
Obr. 22 – Tlakové lisování [21]	50
Obr. 23 – Vakuové vstřikování pryskyřice [21]	51
Obr. 24 – Pultruze [21]	52
Obr. 25 – Navíjení vláken [21]	54
Obr. 26 – Model kompozitu [24]	55
Obr. 27 – Model kompozitu [24]	56
Obr. 28 – Část laminátu v rovině [24]	61
Obr. 29 – Výslednice sil a momentů [24]	63
Obr. 30 – Tuhosti vrstev kompozitu [24]	63
Obr. 31 – Symetrický laminát [24]	65
Obr. 32 – Vyvážený symetrický laminát [24]	66
Obr. 33 – Posuv sendvičového nosníku [24]	67
Obr. 34 – Poruchy kompozitu podélném tahovém namáhání [24]	71
Obr. 35 – Porušení kompozitu podélném tahovém namáhání [24]	71
Obr. 36 – Porušení kompozitu příčným tahovým namáháním [24]	73
Obr. 37 – Porušení kompozitu příčným tahovým namáháním [24]	73
Obr. 38 – Porušení kompozitu smykem [24]	73
Obr. 39 – Namáhání kompozitu [24]	74
Obr. 40 – Kritérium maximálního napětí [24]	75
Obr. 41 – Model Puckova kritéria porušení [24]	78
Obr. 42 – Oblasti původní skladby monokoku	80

Obr. 43 – Ukázka listu z výpočtového dokumentu SES [1]	83
Obr. 44 – Rozměry vzorků z jednosměrných vláken na tahovou zkoušku	86
Obr. 45 – Rozměry vzorků z tkanin na tahovou zkoušku	86
Obr. 46 – Vzorky na zkoušku ASTM D3039 /D3039M-08	88
Obr. 47 – Zkoušení vzorku z textilie	89
Obr. 48 – Zkoušení vzorku z jednosměrného vlákna	89
Obr. 49 – Výpočtový model vzorku T800Hx4	95
Obr. 50 – Zátěžný stav vzorku T800Hx4.....	95
Obr. 51 – Zobrazení kritéria porušení kompozitu u vzorku T800Hx4.....	96
Obr. 52 – Průhyb vzorku T800Hx4	96
Obr. 53 – Výroba vzorků na tříbodový ohyb	98
Obr. 54 – Příprav vzorků na smykovou zkoušku	98
Obr. 55 – Vytvrzené vzorky na smykovou zkoušku.....	98
Obr. 56 – Průběh vytvrzování vzorků.....	99
Obr. 57 – Zkušební stroj na tříbodový ohyb se vzorkem	100
Obr. 58 – Nezatížený vzorek před zkouškou.....	101
Obr. 59 – Zatížená vzorek po zkoušce, kdy došlo k poruše	101
Obr. 60 – Zkouška smykem	105
Obr. 61 – Vzorek smykové zkoušky po testu	107
Obr. 62 – Nové rozdělení oblastí na skořepinové struktře.....	110
Obr. 63 – Nové rozdělení oblastí na skořepinové struktře.....	113
Obr. 64 – Oblasti staré skladby	114
Obr. 65 – Oblasti nové skladby	114

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Rozdělení bodů u statických disciplín [1]	14
Tabulka 2 – Rozdělení bodů dynamických disciplín [1]	15
Tabulka 3 – Parametry ocelových materiálů [12]	25
Tabulka 4 – Průřezové charakteristiky ocelových materiálů [12].....	25
Tabulka 5 – Vlastnosti původního prepregové tkaniny SIGAPER®	80
Tabulka 6 – Vlastnosti hliníkového jádra	80
Tabulka 7 – Vlastnosti původních vzorků	81
Tabulka 8 – Vlastnosti původních oblastí monokoku	81
Tabulka 9– Vlastnosti nového prepregu CC204 ER450.....	84
Tabulka 10 – Vlastnosti jednosměrného vlákna a prepregu	85
Tabulka 11 – Navrhované parametry zkušebních vzorků.....	87
Tabulka 12 – Naměřené a získané hodnoty z tahové zkoušky	90
Tabulka 13 – Výsledné vlastnosti naměřených materiálů tahové zkoušky	91
Tabulka 14 – Mechanické vlastnosti uhlíkových materiálů	92
Tabulka 15 – Navržené moduly pružnosti nových skladeb.....	94
Tabulka 16 – Navržené nové skladby na kompozitní strukturu.....	97
Tabulka 17 – Nově vytvořené skladby na kompozitní strukturu přiřazené oblastem v ní	97
Tabulka 18 – Parametry nových skladeb T800Hx3 a T800Hx4	104
Tabulka 19 – Parametry nových skladeb T800Hx5 a T800Hx7	104
Tabulka 20 – Naměřené hodnoty ze smykové zkoušky	107
Tabulka 21 – Naměřené a vypočtené hodnoty vzorků a oblastí	108
Tabulka 22 – Naměřené a vypočtené hodnoty vzorků a oblastí	109
Tabulka 23 – Hmotnosti, plochy a množství materiálu potřebné na oblasti monokoku	110
Tabulka 24 – Porovnání modulu pružnosti	111
Tabulka 25 – Vypočítané hodnoty vzorků.....	112
Tabulka 26 – Nové rozdělení oblastí na skořepinové struktuře	113
Tabulka 27 – Hmotnosti skladeb.....	114
Tabulka 28 – Srovnání staré a nové skladby	114
Tabulka 29 – Porovnání minima potřebného materiálu.....	115
Tabulka 30 – Porovnání modulů pružnosti nových skladeb	117

Seznam grafů

Graf 1 – Tahový diagram [24]	57
Graf 2 – Tahový diagram [24]	59
Graf 3 – Diagram vhodně a nevhodně navrženého kompozitu [24]	59
Graf 4 – Zatížení v závislosti na průhybu vzorku T800Hx3	102
Graf 5 – Zatížení v závislosti na průhybu vzorku T800Hx4	102
Graf 6 – Zatížení v závislosti na průhybu vzorku T800Hx5	103
Graf 7 – Zatížení v závislosti na průhybu vzorku T800Hx7	103
Graf 8 – Síly v závislosti na posuvu válečku u vzorku T800Hx3	105
Graf 9 – Síly v závislosti na posuvu válečku u vzorku T800Hx4	106
Graf 10 – Síly v závislosti na posuvu válečku u vzorku T800Hx5	106
Graf 11 – Srovnání modulů pružnosti vzorků	111
Graf 12 – Parametry všech skladeb	112

Seznam použitých zkratk a symbolů

symbol	jednotka	název
A		matice tahové tuhosti
B		matice vazbové tuhosti
b		výška panelu formule
C		matice ohybové tuhosti
c	mm	tloušťka jádra
t	mm	tloušťka potahu
BMHS		podpora výztuh hlavního oblouk
E	MPa	modul pružnosti v tahu
EI	N m ²	ohybová tuhost
F	N	maximální zatížení vzorku
F'		matice smykové tuhosti
FB		přední přepážka
FBSS		podpora přední přepážky
FF		přední podlaha
FH		přední oblouk
FHB		výztuha předního oblouku
FS		podpora rámu
h	mm	výška panelu
I	mm ⁴	moment setrvačnosti
M_c, M_f, M_m	kg	celková hmotnost kompozitu, vláken, matrice
MH		hlavní oblouk
MHB		výztuha hlavního oblouku
R _e	MPa	mez kluzu
R _m	MPa	mez pevnosti v tahu
S	m ²	množství materiálu potřebné na panel
SES		strukturální ekvivalentní tabulka

SIS		boční nárazová struktura
SISH		boční nárazová struktura vodorovná
SISV		boční nárazová struktura svislá
TEX	g/km	dílková hustota
V_c, V_f, V_m	m^3	celkový objem vzorku, vlákna a matrice
v_c, v_f, v_m	m^3	celkový objem kompozitu, vlákna a matrice
ρ_c, ρ_f, ρ_m	kg/m^3	celkový hustota kompozitu, vlákna, matrice