VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

APLIKACE SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE NA FORMULOVÝ VŮZ
SANDWICH STRUCTURE APPLICATION ON THE FORMULA CAR

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Ing. Tomáš Žídek
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. František Löffelmann
SUPERVISOR

BRNO 2016

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Letecký ústav
Student:	**Ing. Tomáš Žídek**
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Stavba letadel
Vedoucí práce:	**Ing. František Löffelmann**
Akademický rok:	2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Aplikace sendvičové konstrukce na formulový vůz

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Formule Student poskytuje studentům příležitost k řešení praktických konstrukčních problémů a výsledky jejich práce napomáhají k reprezentaci VUT v Brně. Tým TU Brno Racing v současné době směřuje k aplikaci sendvičové konstrukce monokoku budoucí formule, který by nahradil stávající trubkový rám a při splnění požadavků FSAE snížil celkovou hmotnost vozu.

Cíle diplomové práce:

1) Stručný popis požadavků na monokokovou konstrukci Formule Student
2) Návrh nové geometrie monokoku
3) Volba dostupných materiálů a technologie výroby
4) Návrh skladby jednotlivých panelů pro splnění požadavků vzhledem k trubkovému rámu dle pravidel SAE
5) Vytvoření MKP modelu monokoku k určení torzní tuhosti, případně navržení modifikací
6) Provedení testů: 3-bodový ohyb a smyková zkouška panelu

Seznam literatury:

ECSS – European Cooperation for Space Standardization. Space engineering: Structural materials handbook – Part 3: Load transfer and design of joints and design of structures. ECSS-E-HB-32-20 Part 3A. ESA Requirements & Standards Division, Noordwijk, The Netherlands, 20 March 2011.

Idaflieg. Interessenggemeinschaft Deutscher Akademischer Fliegergruppen. Dimensionierungsrichtwerte für den Segel- und Motorsegelflugzeugbau. 1988.

ASM Handbook Volum 21 Composites. ASM International The materials Information Company 2001

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 30. 11. 2015

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá aplikací sendvičové konstrukce na vůz Formule Student, který nahradí stávající trubkový rám při splnění požadavků FSAE. Úvodní část práce popisuje mezinárodní soutěž Formule Student včetně týmu TU Brno Racing. Poté jsou uvedeny důležitá pravidla pro konstrukci rámů a kompozitních monokoků. Pro zvolenou technologii výroby jsou zjištěny pevnostní parametry potahů z uhlíkových a hybridních vláken. Další část práce pojednává o návrhu sendvičového panelu za využití analytického výpočtu pro určení jeho ohybové tuhosti. Na základě těchto návrhů jsou provedeny tříbodové ohybové a smykové zkoušky. Pomocí MKP simulace je zjištěna torzní tuhost trubkového rámu a koncepce monokoku z navržených sendvičových panelů. Závěr práce je věnován shrnutí získaných poznatků a možnému postupu výroby monokoku.

KLÍČOVÁ SLOVA

Formule Student, FSAE, klasická teorie laminátů, sendvičový panel, voština, monokok, kompozity, torzní tuhost, MKP

ABSTRACT

The master thesis describes application of a sandwich construction for Formula Student car. It will replace the current tubular space frame according to FSAE rules. The introduction is focused on the information of international Formula Student competition, including TU Brno Racing Team. Then there are important rules for the construction of frames and composite monocoques. For the selected production technology are found strength properties of face sheets made of carbon and hybrid fibres. Another part of thesis deals with the design of the sandwich panel using analytical calculation to determine the bending stiffness. On the basis of these proposals are made three-point bending and shear tests. Using of FEM simulation is detected torsional stiffness of the tubular space frame and the monocoque concept from the proposed sandwich panels. The conclusion is devoted to a summary of the important information and possible monocoque manufacturing process.

KEYWORDS

Formula Student, FSAE, classical lamination theory, sandwich panel, honeycomb, monocoque, composite, torsional stiffness, FEM

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŽÍDEK, T. Aplikace sendvičové konstrukce na formulový vůz. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 99 s. Vedoucí diplomové práce Ing. František Löffelmann.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Františka Löffelmanna a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 16. května 2016 ……..……..……..

Tomáš Žídek

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Františku Löffelmannovi za odborné vedení a cenné rady, kterými usměrňoval moji práci. Poděkování náleží také týmu TU Brno Racing za možnost zhotovení zkušebních vzorků. Dále bych chtěl poděkovat touto cestou Ing. Janu Šplíchalovi, Ph.D. a Ing. Josefu Zapletalovi, Ph.D. za pomoc při testování vyrobených vzorků. Zvláštní poděkování patří zejména mým rodičům za morální a finanční podporu po celou dobu studia.

OBSAH

Úvod 11
1 Soutěž Formule Student a FSAE 12
1.1 Studentský tým TU Brno Racing 14
1.2 Používané typy rámů 15
1.2.1 Prostorový trubkový rám 15
1.2.2 Monokok z hliníkových sendvičových konstrukcí 17
1.2.3 Monokok z kompozitních sendvičových konstrukcí 17
2 Pravidla návrhu Formule SAE 21
2.1 Charakteristika základních částí šasi 21
2.2 Materiálové požadavky příhradových rámů 23
2.3 Geometrická omezení pro šasi vozidla 24
2.4 Speciální požadavky na kompozitní monokoky 26
2.5 Testování sendvičových panelů monokoku 27
3 Sendvičové konstrukce 29
3.1 potahy 29
3.1.1 Matrice 29
3.1.2 Výztuže 30
3.2 Jádra 31
3.2.1 Pěnová jádra 31
3.2.2 Voštiny 32
3.3 Použitá technologie výroby 33
3.3.1 Ruční laminování s dodatečným vakuováním 33
3.3.2 Postup laminování 34
3.3.3 Požadavky na formy 36
4 Návrh sendvičových panelů 37
4.1 Výpočtový dokument SES 38
4.1.1 Porovnání s ocelovými profily 39
4.2 Analytický výpočet panelů 41
4.2.1 Výpočet potahu panelů klasickou laminární teorií 41
4.2.2 Kontrola potahu 46
4.2.3 Výpočet panelů pro tříbodový ohyb 48
4.2.4 Kontrola sendvičového panelu 50
4.3 Parametry navržených panelů 52
5 Testování zkušebních vzorků 55
5.1 Tahová zkouška kompozitních vzorků 55

5.1.1 Příprava vzorků ... 55
5.1.2 Testování vzorků ... 58
5.1.3 Výsledky testů ... 59
5.1.4 Definování mechanických vlastností kompozitních materiálů ... 63
5.2 Tříbodová ohybová zkouška sendvičového panelu ... 64
5.2.1 Příprava vzorků ... 65
5.2.2 Testování vzorků ... 68
5.2.3 Výsledky testů a jejich porovnání ... 69
5.3 Smyková zkouška sendvičového panelu ... 73
5.3.1 Příprava vzorků ... 73
5.3.2 Testování vzorků ... 75
5.3.3 kontrola výsledků ... 77
6 Určení torzní tuhosti pomocí MKP ... 79
6.1 Tvorba 3D modelu monokoku ... 80
6.1.1 Popis modelování ... 80
6.1.2 Ověření modelu dle pravidel FSAE ... 83
6.1.3 Finální koncepční návrh šasi ... 84
6.2 Tvorba výpočtového modelu pro navržené šasi ... 84
6.2.1 Výpočetní software ... 84
6.2.2 Vytvoření výpočetní sítě ... 85
6.2.3 Zadání vlastností modelu ... 87
6.2.4 Zadání okrajových podmínek ... 90
6.2.5 Řešení výpočtového modelu ... 91
6.3 Analýza výsledků a porovnání torzních tuhostí ... 91
6.3.1 Výsledky výpočtového modelu rámu vozu Dragon 6 ... 91
6.3.2 Výsledky výpočtového modelu pro navržené šasi ... 93
6.3.3 Porovnání výsledků ... 94
7 Výsledný kompozitní monokok ... 96
Závěr ... 99
Seznam použitých zkratek a symbolů ... 103
Seznam příloh ... 105

ÚVOD

V současné době nacházejí sendvičové konstrukce uplatnění v mnoha odvětvích průmyslu, zejména v dopravním a leteckém. Jejich hlavní předností je vysoká ohybová pevnost a tuhost při zachování nízké hmotnosti. Tyto vlastnosti jsou vyžadovány i u závodních vozů. Na vývoji a výrobě vozu Formule Student se podílejí členové konstrukčního týmu TU Brno Racing (Technical University Brno Racing) tvořeného převážně studenty Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Od roku 2010 se podařilo sestrojit již šestou generaci vozů Dragon. Svůj prototyp porovnávají na mezinárodních soutěžích s vozy ostatních vysokých škol z celého světa. Všechny předchozí konstrukce vozů byly vyrobeny z prostorového trubkového rámu. Nyní je snahou vytvořit monokok z uhlíkových vláken, kde by byla aplikována sendvičová konstrukce. Monokok je jednolitá skořepina, která tvoří hlavní konstrukci vozu. Jeho použitím lze snížit hmotnost celé formule a zároveň zvýšit její torzní tuhost.

Cílem diplomové práce je navrhnout sendvičovou konstrukci monokoku z uhlíkových vláken pro vůz Formule Student, jenž nahradí stávající trubkový rám při splnění požadavků FSAE. Úvod práce se věnuje soutěži Formule Student a studentskému týmu. Další část je zaměřena na přehled důležitých pravidel pro konstrukci kompozitního monokoku. Následně jsou popsány sendvičové konstrukce, používané materiály i zvolená technologie výroby. Pozornost je věnována návrhu sendvičového panelu za využití analytického výpočtu pro určení jeho ohybové tuhosti. Na základě tahové zkoušky jsou zjištěny pevnostní parametry potahů z uhlíkových a hybridních vláken. Pro ověření analytických výpočtů jsou provedeny tříbodové ohybové a smykové zkoušky. Pomocí MKP simulace je zjištěna torzní tuhost trubkového rámu a koncepce monokoku z navržených sendvičových panelů. Závěr práce je věnován shrnutí získaných poznatků a možnému postupu výroby monokoku.

1 SOUTĚŽ FORMULE STUDENT A FSAE

Formule Student je jednou z nejprestižnějších evropských soutěží určených pro studenty bakalářských a magisterských oborů vysokých škol. Nabyté znalosti při studiu realizují v inovativním závodním týmu, kde získávají praktické zkušenosti a dovednosti z oblasti techniky, managementu i marketingu. Rozvíjí kreativní činnost a učí se týmové spolupráci. Díky těmto aspektům nacházejí členové tohoto týmu snadněji uplatnění v pracovním životě.

Vznik soutěže Formule Student se datuje k roku 1998 jako sesterská soutěž Formule SAE (FSAE), která se realizuje v USA od roku 1981 pod záštitou společnosti automobilových inženýrů SAE (Society of Automotive Engineers). Formule Student náleží pod organizaci IMechE (Institution of Mechanical Engineers). Poprvé se tato soutěž konala ve Velké Británii. Po jejím vzoru začaly vznikat v Evropě, s přibývajícím počtem týmů, další mezinárodní soutěže. Na německém Hockenheimringu se pořádá soutěž Formula Student Germany, jež se účastní až 115 týmů. Další soutěže probíhají v Itálii (Formula SAE Italy), ve Španělsku (Formula Student Spain), v Maďarsku (Formula Student Hungary), v Rakousku (Formula Student Austria), v Rusku (Formula Student Russia) a v neposlední řadě v České republice na okruhu v Mostě (Formula Student Czech Republic). Soutěže vyžadují téměř stejné technické nároky na závodní vozy, proto se mohou studenti účastnit všech mezinárodních soutěží a získávat tak více zkušeností. Uvedené soutěže se člení do kategorií podle typu pohonné jednotky. Nejpočetnější kategorie používá čtyřdobý spalovací motor (Formula Student Combustion). Díky modernímu trendu ve snižování spotřeby paliva a emisí existují v USA soutěže Formula Hybrid a Formula Electric. Formula Hybrid představuje vozidlo s hybridním pohonem, tzn. se spalovacím motorem a elektromotorem. Formula Electric představuje vůz poháněný pouze elektromotorem. V Evropě má tato kategorie název Formula Student Electric. Na celém světě se nachází celkem 528 týmů se spalovacím motorem a 102 týmů s elektrickou formulí. [1], [2], [3], [4]

Obr. 1 Logo Formule Student Germany [4]

Obr. 2 Logo Formule Student Czech Republic [5]

Úkolem vysokoškolských studentů je vytvořit malou fiktivní firmu, jež má za cíl vývoj a výrobu 1000 vozů ročně. Každým rokem navrhne a sestaví pouze jedno prototypové jednomístné závodní vozidlo formulového typu. Vůz musí mít otevřený kokpit a kola nesmí být zakryta. Cílovým zákazníkem je víkendový amatérský závodník. Formule by se měla vyznačovat perfektní ovladatelností s rychlou akcelerací a výbornými brzdnými účinky, ale také by měla být výkonná, spolehlivá, bezpečná, ekologická, estetická a levná.

Vozy jsou posuzovány na základě statických a dynamických zkoušek. Dynamickou disciplínu může vozidlo absolvovat, pokud splní požadavky technické přejímky. Jde o kontrolu technické způsobilosti a bezpečnosti vozu dle aktuálních pravidel FSAE nebo modifikovaných pravidel u jednotlivých soutěží. Provádí se náklonová zkouška, při níž je vozidlo nakloněno a kontroluje se únik provozních kapalin. Důležitá je zkouška brzd, kdy se formule při zabrzdění nesmí vychýlit z přímého směru. Nakonec se kontroluje hlučnost výfuku, u něhož nesmí dojít k překročení předepsaného limitu.

Tabulka 1 Statické disciplíny [6]

Statické disciplíny	Hodnocení	Body
Technická přejímka	správnost vozu dle pravidel	0
Konstrukční prezentace	konstrukce vozu	150
Nákladová a výrobní prezentace	výše nákladů za výrobu 1 000 kusů vozů	100
Business prezentace	obchodní strategie prodeje vozů	75
Celkem		**325**

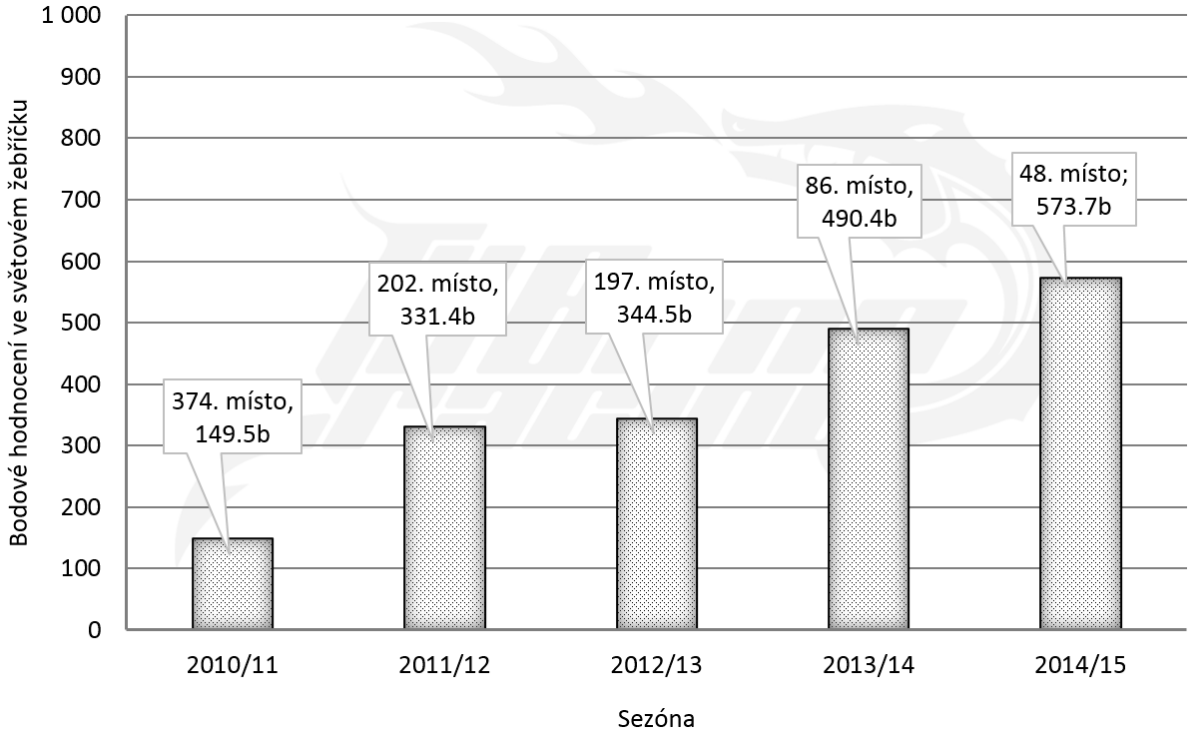
Tabulka 2 Dynamické disciplíny [6]

Dynamické disciplíny	Popis	Body
Skid Pad	průjezd tratě - osmičkou	50
Akcelerace	zrychlení na 75 m dlouhé dráze	75
Sprint	průjezd technickou tratí v délce cca. 1 km	150
Vytrvalostní závod	22 km dlouhý, v polovině výměna řidiče	300
Spotřeba paliva	spotřeba paliva při vytrvalostním závodě	100
Celkem		**675**

Soutěž nemusí vyhrát závodní tým s nejrychlejším vozem. Při vyhodnocení je zohledněna navržená konstrukce a dynamika vozu, jeho přijatelná cena a prezentovaný business plán. Vítězný tým vzejde z bodového hodnocení statické a dynamické disciplíny. Maximálně lze získat 1 000 bodů.

1.1 STUDENTSKÝ TÝM TU BRNO RACING

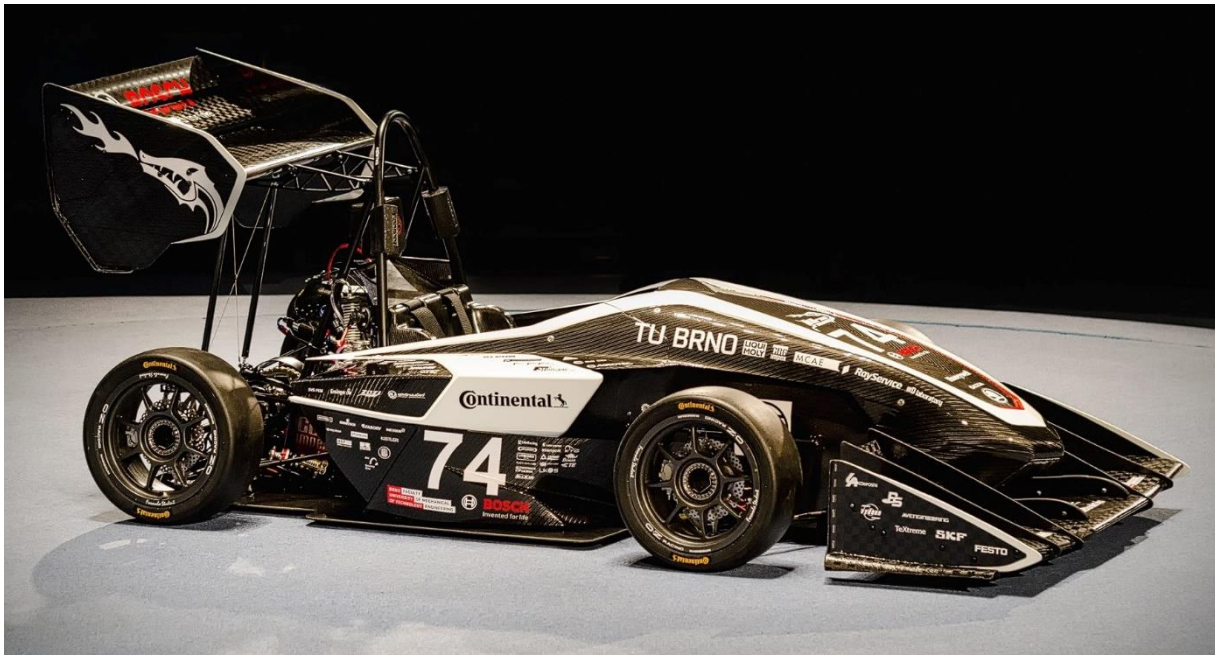
Konstrukční tým TU Brno Racing (Technical University Brno Racing) existuje na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně od roku 2010. Od té doby již sestavil 6 závodních prototypů s označením Dragon 1 až 6. Projektu se každoročně účastní 30 až 50 studentů, někteří z nich se vzdělávají i na jiných brněnských fakultách. Přestože dochází každoročně k obměně studentů, dosahuje tým stále lepších výsledků na mezinárodních soutěžích díky předávání získaných zkušeností novým členům týmu. Tuto skutečnost dokládá Obr. 3.



Obr. 3 Bodové hodnocení a pořadí ve světovém žebříčku [3]

V sezóně 2014/2015 bylo dosaženo velkého pokroku s vozem Dragon 5, který se zařadil mezi světovou špičku. Důkazem toho bylo 1. místo v konstrukční prezentaci na soutěži Formula Student Czech Republic, celkově 2. místo na soutěži Formula Student Italy a celkově 6. místo na soutěži Formula Student Hungary.

Od nového vozu Dragon 6 se očekávají ještě lepší výsledky, jelikož se snížila jeho hmotnost o 25 kg na hodnotu 174 kg. Vozidlo je poháněno jednoválcovým motorem Husqvarna 501 přeplňovaným turbodmýchadlem spalující Ethanol E85 s maximálním výkonem 63 kW a maximálním krouticím momentem 72 Nm. Převodovka je třístupňová a řazení se uskutečňuje pomocí pneumatického válce ovládaného pádly pod volantem. Vůz je vybaven dvojitým lichoběžníkovým zavěšením s 13 palcovými koly z magnéziové slitiny. Prostorový příhradový rám, zhotovený z ocelových trubek, je zakryt kapotáží z uhlíkových vláken. Podlaha a bočnice křídel jsou vyrobeny ze sendvičové sktruktury s použitým pěnovým jádrem. Samotné profily křídel jsou zkonstruovány z tenkého laminátu z uhlíkových vláken za použití nosníku a žeber. Z uhlíkových kompozitů jsou zhotoveny následující díly – nádrž, airbox, části sání, plynový pedál, volant, sedačka řidiče, část ochranné přepážky atd.



Obr. 4 Monopost Dragon 6 [7]

1.2 POUŽÍVANÉ TYPY RÁMŮ

Základním účelem rámu je spojení přední a zadní podvozkové části a dalších komponentů závodního monopostu. K rámu je upevněna pohonná soustava, tj. motor, převodovka, diferenciál atd. Hmotnost rámu a dalších komponentů přenáší na nápravy. Rám vozidla musí mít dostatečnou tuhost a pevnost při namáhání krutem i ohybem. Nízké hodnoty těchto parametrů mají negativní vliv na dynamiku vozu, zvláště při průjezdu zatáčkou. Důležité je také zajistit nízkou hmotnost šasi. V mezinárodních soutěžích Formule Student se používají nejčastěji příhradové trubkové rámy a moderní monokoky ze sendvičových struktur. Dále je možné najít i speciální konstrukce.

1.2.1 PROSTOROVÝ TRUBKOVÝ RÁM

Pro konstrukci formule je nejčastěji používán prostorový trubkový rám. Jde o příhradovou konstrukci, jež je složena z tenkostěnných ocelových profilů kruhového nebo čtvercového průřezu. Profily jsou k sobě svařovány a vytváří celkovou strukturu rámu. Tento typ rámu je volen především díky nízkým nákladům na výrobu. Spočívá především v principu tvarování trubek na příslušné rozměry a tvary. Cenově nejdostupnější variantou je zkracování zakoupených profilů úhlovou bruskou. Dražší, ale mnohem přesnější a rychlejší variantou, je využití laserového pálení. Tato technologie je navíc schopna popsat jednotlivé trubky metodou gravírování. Na povrchu se vytvoří požadovaný znak, jenž nemá žádný vliv na výslednou pevnost trubky. Pro další zvýšení přesnosti je nutné vytvořit tuhý přípravek, který zafixuje vypálené profily před samotným svařováním rámu. Jako vhodný přípravek lze použít pálené ocelové profily nebo desky spojené šroubovým nebo svarovým spojem. Další levnější možností je vytvoření přípravku z dřevěných profilů nebo překližek.

Pro výrobu trubkového rámu vozu Dragon 6 byla použita technologie laserového pálení s možností gravírového popisu jednotlivých trubek, jež byly následně umístěny do přípravku z pálených ocelových profilů. Celý rám byl svařen metodou TIG, což představuje velmi kvalitní obloukové svařování netavící wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu.

Obr. 5 Skládání rámu vozu Dragon 6 v přípravku [7]

Příhradové trubkové rámy dosahují omezené torzní tuhosti. Je možné ji zvýšit pouze vhodným uspořádáním trubek, poněvadž na jejich průřezy jsou kladeny požadavky dle pravidel. U tohoto typu konstrukce se vyskytuje obvykle nižší torzní tuhost v jeho střední části. Pro řešení uvedeného problému lze použít alternativní ocelový trubkový rám, u něhož se předpokládá vyšší náročnost na prokázání správnosti dle pravidel pro alternativní rámy (AF). Tyto rámy nejsou na některých závodech akceptovány. Dalším speciálním typem je hybridní trubkový rám, který je tvořen trubkami z oceli a z uhlíkových vláken spojených lepidlem. Účelem této koncepce je snížit hmotnost rámu při zachování jeho torzní tuhosti. Ovšem nevýhodou zmíněné metody je prokázání dostatečné pevnosti ve všech spojovaných uzlech formou statických a cyklických zkoušek. Tento koncept zatím nebyl využit na závodech. Kromě ocelových trubek lze použít i hliníkové profily o minimální tloušťce 3 mm. Ekvivalentní mez kluzu musí být posuzována podle svařovací příručky od AWS (American Welding Society). Pokud by byla použita při výpočtech vyšší mez kluzu, musí tým předložit náležitou dokumentaci o tepelném zpracování po svařování.

1.2.2 MONOKOK Z HLINÍKOVÝCH SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ

Šasi jsou vyrobeny ze sendvičového panelu, jenž tvoří hliníková voština a dva hliníkové potahy umístěné na obou stranách. Jsou přilepeny fóliovým lepidlem. Díky tomu je dosaženo lehké konstrukce spolu s vysokou tuhostí a pevností. Toto řešení využil například tým Oxford Brookes Racing, jejichž monokoky jsou zobrazeny na Obr. 6.

Obr. 6 Evoluce hliníkových monokoků týmu Oxford Brookes Racing [8]

Hliníkový panel lze zakoupit ve slepené podobě. Část jednoho z potahů musí být odstraněna, aby bylo možné panel v požadovaném místě ohnout a vytvarovat tak navržený monokok. Odstraněná oblast potahu může být přelaminována či zakryta hliníkovým plechem, který je k panelu přinýtován nebo přilepen. Pro spojování panelů lze využít taktéž lepení, nýtování, případně přelaminování. Hliníkové panely umístěné ve střední části rámu mohou zvýšit bezpečnost řidiče při bočním nárazu díky jejich schopnosti pohlcovat kinetickou energii. Vzhledem k omezeným výrobním možnostem je monokok z hliníkových panelů navrhován v jednoduchém tvarovém provedení, jež většinou není příliš esteticky zajímavý. Při volbě této konstrukce musí být vyřešeno přenášení sil od zavěšení. Panely jsou schopny odolávat poměrně vysokému zatížení, které nesmí být bodového charakteru, proto je potřeba rozložit síly na co největší plochu insertu.

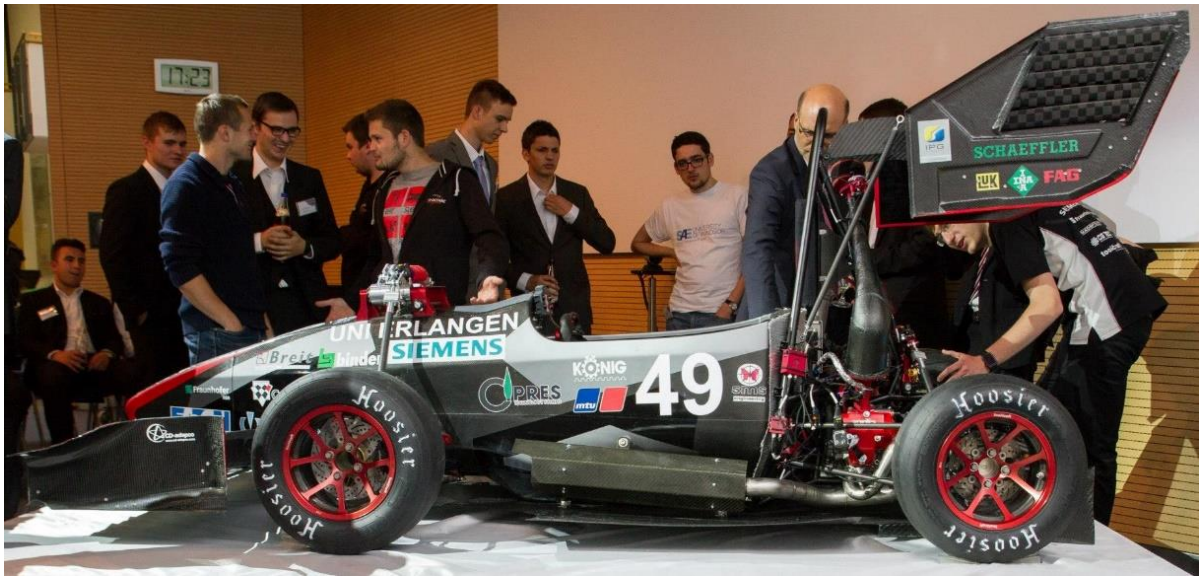
1.2.3 MONOKOK Z KOMPOZITNÍCH SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ

Po vzoru závodů Formule 1 se i v závodech Formule Student používá kompozitní monokok. V porovnání s hliníkovými voštinami je možné dosáhnout další zvýšení torzní tuhosti společně se snížením výsledné hmotnosti. Je možné vyrobit jednotlivé části monokoku, aby byla zajištěna co největší bezpečnost řidiče. Důležitou roli při vývoji monokoku hrají finanční prostředky a zkušenosti týmu s kompozitními materiály.

Monokoky se vyrábí kladením vrstev skelných vláken, uhlíkových nebo aramidových tkanin. Výztuže jsou spojeny pomocí epoxidové pryskyřice. Používají se pěnová jádra, nomexové nebo hliníkové voštiny. Technologií laminování je možné vyrobit téměř jakýkoliv požadovaný tvar. Pro výrobu jsou využívány buď pozitivní či negativní formy, které musí splňovat určité nároky na výslednou kvalitu povrchu. Ve Formuli Student jsou používány tyto základní konstrukce monokoků.

MONOKOK SE ZADNÍM TRUBKOVÝM RÁMEM

Při této hybridní variantě je monokok umístěn od přední přepážky až po hlavní ochranný oblouk. Zadní část šasi je tvořena ocelovými profily, ke kterým je připevněna pohonná soustava a zadní náprava. Na Obr. 7 lze zhlédnout spojení obou částí šasi. Ocelový hlavní oblouk je svařen se zadním prostorovým rámem. Spojení s monokokem je realizováno pomocí přivařeného úchytu a šroubových spojů. Největší výhodou této konstrukce je snadný přístup k motoru a jeho částem při kontrolách a opravách.



Obr. 7 Vůz týmu High-Octane Motorsports [9]

Zadní rám lze také zmenšit o podporu výztuhy hlavního oblouku, která je vyrobena z kompozitního panelu. Příhradový rám pak slouží k uchycení zadní části pohonné jednotky a zadní nápravy. Díky tomu může být použita kratší výztuha, což ve výsledku snižuje hmotnost celé konstrukce rámu. Hlavní oblouk s jeho výztuhou lze přišroubovat k panelům monokoku. Zadní prostorový rám je také připevněn šroubovými spoji k libovolnému místu podpory výztuhy hlavního oblouku, jak je možné vidět na Obr. 8.

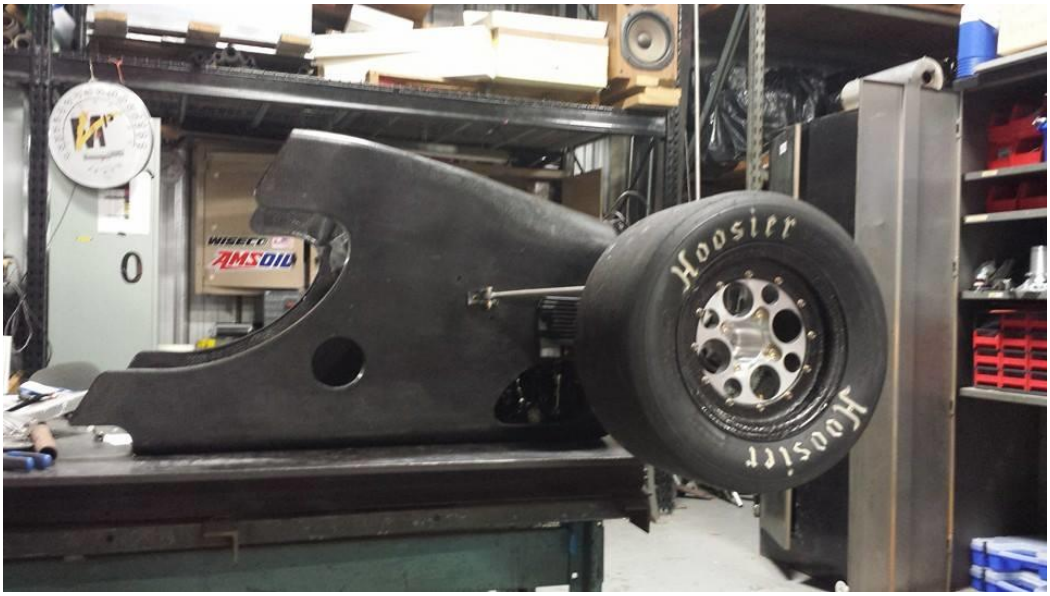
Obr. 8 Formule KIT 15 C týmu KA-RaceIng [10]

CELOMONOKOKOVÁ KONSTRUKCE

V tomto případě je přední a zadní náprava spojena pouze kompozitní konstrukcí. Tato koncepce dosahuje nejvyšší torzní tuhosti a nejnižší hmotnosti. Hlavní oblouk s jeho výztuhou je přišroubován k panelům monokoku. K motoru a jeho příslušenství je omezený přístup. Je nutné vyřešit uchycení motoru k monokoku vzhledem k jeho vibracím. Ukázku jednolitého monokoku dokládá Obr. 9.

Obr. 9 Kompozitní monokok týmu Formule ETS Montreal [11]

Modifikací již zmíněných koncepcí je použití děleného monokoku. Jde o první uvedenou variantu, u které se nacházejí v zadní části kompozitní panely. Tímto řešením je docílena nižší hmotnost než se zadním prostorovým rámem. Ve srovnání s jednolitým monokokem je hmotnost o něco vyšší, ale přístup k pohonné soustavě je daleko jednodušší.



Obr. 10 Zadní část vozu týmu Formula Buckeyes [12]

Obr. 11 Spojená přední a zadní část vozu vyrobená týmem Formula Buckeyes [12]

2 PRAVIDLA NÁVRHU FORMULE SAE

Podobně jako mnoho jiných motoristických sportů má i tato soutěž přesně stanovená pravidla. Pravidla Formule SAE lze považovat za hlavní. Mohou být částečně modifikována pro jednotlivé závody Formule Student. Pro účast v soutěži musí bez výjimky vyhovovat konstrukce každého vozu. Z bezpečnostního hlediska vymezují samotný návrh, týkají se všech konstrukčních částí. V opačném případě hrozí penalizace v podobě ztráty bodů, případně až diskvalifikace spjatá se zákazem startu na závodu. Soutěž se striktně řídí pravidly platnými pro aktuální rok. Současné znění těchto pravidel je dostupné na webu SAE. Pravidla se rozdělují do několika kategorií: [6]

- Administrativní předpisy (A)
- Obecné technické požadavky (T)
- Pravidla pro alternativní rámy (AF)
- Požadavky pro spalovací motory (IC)
- Požadavky pro elektrické vozy (EV)
- Předpisy statických zkoušek (S)
- Předpisy dynamických zkoušek (D)

Návrh rámů se řídí částí technických požadavků, jež obsahují mimo jiné pravidla pro návrh brzdového systému, pohonného ústrojí, aerodynamických a elektrických zařízení atd. V následujících podkapitolách bude popsána pouze technická část pravidel se zaměřením na konstrukci rámů.

2.1 CHARAKTERISTIKA ZÁKLADNÍCH ČÁSTÍ ŠASI

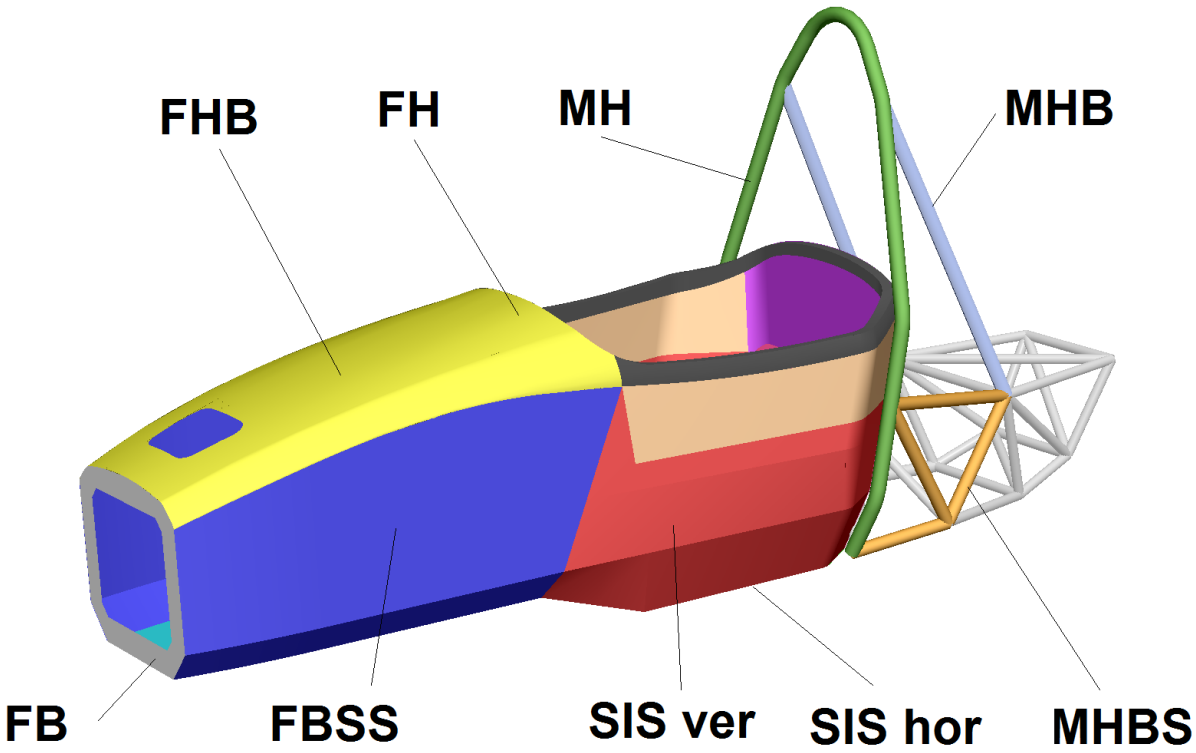
Tato část pojednává o primární sktruktuře rámu, která chrání řidiče v případě kolize. Z tohoto důvodu je nutné předcházet nadměrným deformacím v jednotlivých částech šasi. Primární struktura se skládá: [6]

HLAVNÍ OBLOUK - MH

Hlavní oblouk (Main Hoop) je jedním z bezpečnostních prvků sloužící k ochraně řidiče při případném převrácení. Je definován jako jednodílný profil z uzavřeného průřezu spojující nejnižší místo šasi na jedné a druhé straně. Uchycení hlavního oblouku k dalším částem rámu musí být od sebe z předního pohledu vzdáleno nejméně 380 mm. Sklon oblouku v bočním pohledu může být maximálně 10° od vertikální roviny. Jediným dovoleným materiálem je pouze legovaná či uhlíková ocel. Oblouk musí být mechanicky uchycen minimálně čtyřmi držáky ke struktuře monokoku. Úchyty oblouku musí být vyrobeny z ocelového plechu o tloušťce nejméně 2 mm.

VÝZTUHY HLAVNÍHO OBLOUKU - MHB

Dvě výztuhy hlavního oblouku (Main Hoop Bracing) zpevňují oblouk při případném převrácení vozu. Jsou uchyceny k monokoku nebo k trubkové konstrukci šasi. Je možné použít pouze ocelové trubky. Ve všech typech konstrukcí je definován minimální úhel 30° mezi obloukem a vzpěrami. Výztuha musí být upevněna k oblouku maximálně 160 mm od vrcholu oblouku. Je nutné, aby vzpěra byla zcela přímá bez jakéhokoliv ohybu, tím pádem by nemělo dojít k nechtěnému ohybovému namáhání.



Obr. 12 Popis jednotlivých částí šasi

PODPORY VÝZTUH HLAVNÍHO OBLOUKU – MHBS

Podpory výztuh hlavního oblouku (Main Hoop Bracing Support) se nacházejí mezi nejnižším bodem vzpěry po nejnižší bod hlavního oblouku. U ocelových trubek musí být provedena důsledná triangulace, aby se zabránilo ohybovému zatížení od výztuh v případě převrácení vozidla. Tato konstrukce pak musí splňovat požadavky na podpory vzpěr hlavního oblouku dle

Tabulka 4. Zatížení ze vzpěr nesmí být přenášeno na motor, převodovku či diferenciál a prvky odpružení. U skořepinové konstrukce je stanoveno, že součin EI panelu musí být ekvivalentní nebo vyšší než součin EI dvou podepírajících trubek.

PŘEDNÍ OBLOUK - FH

Přední oblouk (Front Hoop) je definován jako profil z uzavřeného průřezu spojující nejnižší místo šasi na jedné a druhé straně tak, aby chránil řidičovy ruce. Žádná část řízení nesmí být výše než jeho vrchol a vzdálenost od volantu nesmí překročit 250 mm v podélné rovině vozidla. Oblouk může být skloněn do 20° od příčné roviny vozidla. K monokoku musí být pevně přichycen stejně jako u hlavního oblouku nebo může být zcela zalaminován, pokud je prokázána ekvivalence k již zmíněným čtyřem držákům. Může být vyroben z ocelového nebo hliníkového polotovaru.

VÝZTUHY PŘEDNÍHO OBLOUKU - FHB

Dvě výztuhy předního oblouku (Front Hoop Bracing) splňují materiálové požadavky a velikosti průřezu uvedeny v

Tabulka *4*. Přední oblouk vyžaduje podepření v přední části vozu. Jejich účelem je chránit řidičovy nohy. Výztuhy musí být upevněny nejblíže k nejvyššímu bodu oblouku, maximálně však 50 mm od jeho vrcholu. Je nutné, aby vzpěra byla zcela přímá bez jakéhokoliv ohybu a spojena s přední přepážkou. Při naklonění hlavního oblouku o více než 10° v příčné rovině vozidla musí být následně opatřen výztuhami.

PŘEDNÍ PŘEPÁŽKA - FB

Přední přepážka (Front Bulkhead) chrání chodidla řidiče a další objekty před poškozením. Před přední přepážkou se nachází deformační člen, jenž pohlcuje nárazovou energii a snižuje deceleraci vozu. Musí být nejméně 100 mm vysoký, 200 mm široký a jeho tloušťka musí dosahovat minimálně 200 mm. Jelikož deformační člen je významným bezpečnostním prvkem, je v pravidlech SAE definován způsob jeho připojení k monokoku. Jeho pevnost musí odpovídat minimálně čtyřem metrickým šroubům M8 třídy 8.8. U monokoků může být laminována jako profil ve tvaru L, kde vzdálenost mezi zadní stěnou přepážky a koncem L profilu je maximálně 25,4 mm. Dále je požadováno, aby součin EI ve vertikální a podélné ose tohoto prvku byl roven minimálně součinu EI přepážky vyrobené z ocelového polotovaru popsanými pravidly. Navíc smyková pevnost přepážky musí odpovídat ocelovému plechu o tloušťce 1,5 mm.

PODPORY PŘEDNÍ PŘEPÁŽKY - FBSS

Podpory přední přepážky (Front Bulkhead Support Structure) se nacházejí mezi přední přepážkou a předním obloukem. Vyžadují dodržení triangulace. U monokoku jsou podpory přepážky porovnávány s ocelovou konstrukcí trubkového rámu. Součin EI monokoku v této oblasti musí být roven šestinásobku základního ocelového polotovaru. Pevnost ve střihu uvedeného panelu musí odpovídat zátěži 4 kN. Tyto skutečnosti musí být prokázány příslušným testem.

BOČNÍ NÁRAZOVÁ STRUKTURA - SIS

Boční nárazová struktura (Side Impact Structure) slouží k zachycení sil od bočního nárazu v případě nehody. Propojuje přední a hlavní oblouk a je tvořena nejméně třemi ocelovými profily na obou stranách vozidla. Dva profily musí být podélně umístěny. Horní profil musí být vzdálen 300 – 350 mm od země. U monokoku se nachází nárazová struktura do výšky 350 mm nad zemí a platí, že pevnost boční zóny musí být ekvivalentní se součinem EI tří ocelových polotovarů. Vertikální část boční nárazové struktury (**SIS ver**) musí být umístěna mezi horní plochou podlahy a výškou 350 mm od země. Součin EI a deformační energie při ohybu panelu musí odpovídat dvěma základním ocelovým profilům. Horizontální část boční nárazové struktury (**SIS hor**) náleží součinu EI jednoho ocelového profilu. Pevnost ve střihu tohoto panelu musí odolat zátěži 7,5 kN. Tyto skutečnosti musí být potvrzeny provedeným testem.

2.2 MATERIÁLOVÉ POŽADAVKY PŘÍHRADOVÝCH RÁMŮ

Při návrhu kompozitních monokoků je nutné respektovat několik pravidel společných pro všechny druhy formulových šasi. Primární struktura rámu musí splňovat i materiálové požadavky. Dodržování správné volby materiálu zajišťuje bezpečnost vozidla při jejím provozu a zamezuje výrobním defektům. Při ohýbání oblouků by měl být minimální poloměr ohybu třikrát větší než vnější průměr trubky. Pokud by byl poloměr ohybu menší, došlo by k nežádoucímu zhroucení stěny.

Tabulka 3 Parametry ocelových materiálů [6]

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 primární struktury [6]

Umístění	Rozměry profilů
hlavní a přední oblouk, uchycení ramenních pásů	Ø 1.0 palec (25,4 mm) x 0.095 palce (2,4 mm) nebo Ø 25,0 mm x 2,50 mm
boční nárazová struktura, přední přepážka, výztuha oblouků, uchycení dalších částí pásů	Ø 1.0 palec x 0.065 palce (1,65 mm) nebo Ø 25,0 mm x 1,75 mm nebo Ø 25,4 mm x 1,60 mm nebo □ 1.00 palec x 1.00 palec x 0.047 palce (1,20 mm) nebo □ 25,0 mm x 25,0 mm x 1,20 mm
podpora přední přepážky, podpora výztuhy hlavního oblouku	Ø 1.0 palec (25,4 mm) x 0.047 palce (1,20 mm) nebo Ø 25,0 mm x 1,5 mm nebo Ø 26,0 mm x 1,2 mm

V případě nedostupnosti zadaného polotovaru v daném regionu, je možné ho nahradit jiným. Ten musí mít stejný nebo větší průřez při zachování buď tloušťky stěny, nebo vnějšího průměru trubky.

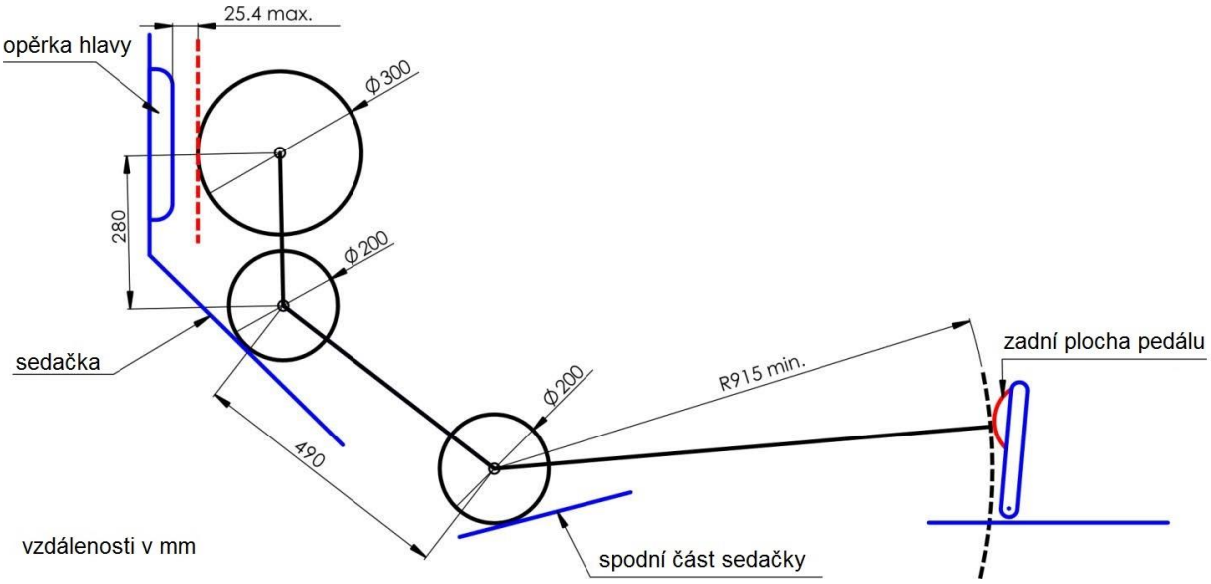
Pokud by byly použity hliníkové trubky, jejich minimální tloušťka stěny činí 3.0 mm. Po svaření rámu může být provedeno tepelné zpracování za účelem zvýšení pevnosti konstrukce. Tato operace vyžaduje doložení dokumentace o jejím provedení. [6]

2.3 GEOMETRICKÁ OMEZENÍ PRO ŠASI VOZIDLA

Pravidla Formule Student jsou typická řadou omezení zajišťujících bezpečnost řidiče a dalších účastníků závodů. Mnoho parametrů je posuzováno vzhledem k propozicím řidiče. Pakliže níže uvedené rozměry nejsou splněny, tým nedostane nálepku za technickou přejímku a následně se nezúčastní dynamických zkoušek.

ŠABLONA ŘIDIČE

Při návrhu rámu je potřeba brát v úvahu rozměry řidiče. K tomuto účelu slouží 95-ti procentní model muže tzv. Percy. Tento model má vytvořena i odborná porota, jež na soutěžích zkoumá a posuzuje bezpečnost navrženého rámu. Percy se vkládá do sedačky vozidla a měří se předepsané vzdálenosti, které jsou znázorněny na Obr. 13.



Obr. 13 Rozměrové parametry šablony řidiče [6]

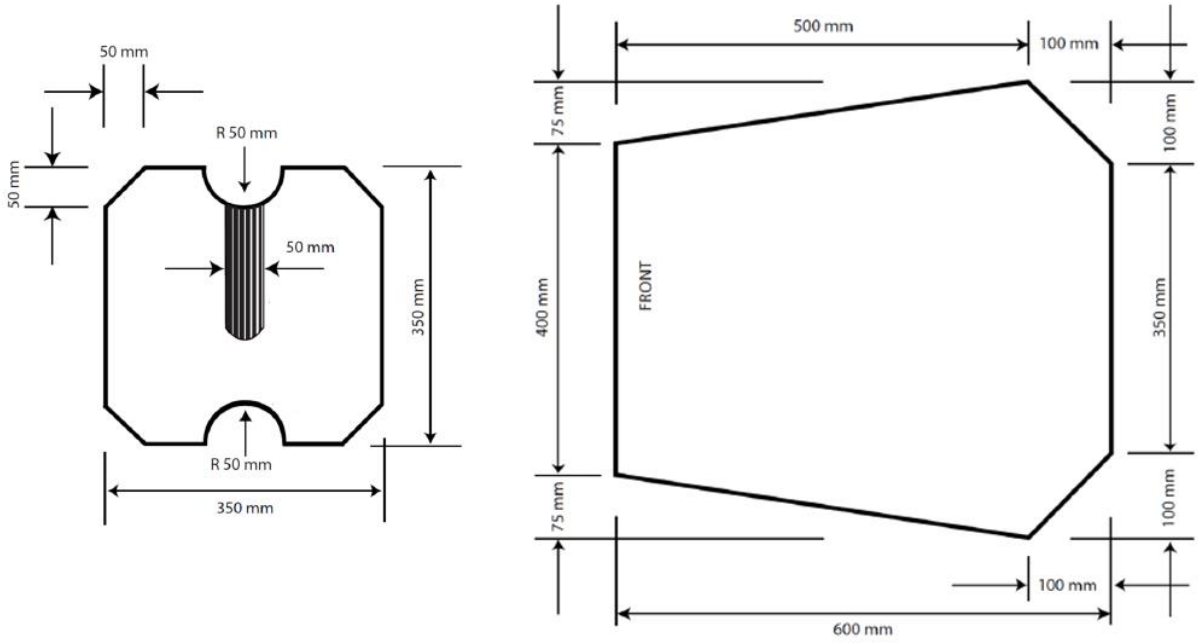
V případě převrácení vozu se nesmí dostat řidičova hlava i ruce do kontaktu s vozovkou. Toto je opatřeno dalšími rozměrovými požadavky, jež jsou měřeny při normálním usazení řidiče připoutaného bezpečnostními pásy. Minimální vzdálenost mezi fiktivní spojnicí vrcholu hlavního a předního ochranného oblouku a helmou řidiče je 50.8 mm. Pokud jsou výztuhy hlavního oblouku směřovány dozadu, vzdálenost mezi helmou řidiče a spojnicí mezi hlavním obloukem a koncem jeho výztuhy musí být rovněž 50.8 mm. Helma řidiče nemůže zasahovat za rovinu hlavního oblouku, jestliže výztuhy hlavního oblouku směřují vpřed.

PŘEDLOHA OTEVŘENÉHO KOKPITU

Slouží k zabezpečení dostatečného prostoru a k rychlému opuštění vozidla v případě nehody. Do prostoru řidiče se vkládá tato šablona, která je vložena přímo shora až do výšky 350 mm od země. Není dovoleno s ní pohybovat směrem dopředu a dozadu. Během kontroly může být vyjmuta sedačka a volant, ale nikoliv ochranná přepážka (Firewall). Nákres je zobrazen na Obr. 14.

ŠABLONA PRO NOHY

Poslední šablonou vkládanou do monopostu se testuje průchodnost přední části šasi. Ta musí být navržena takovým způsobem, aby měl řidič dostatek prostoru pro nohy, jež jsou chráněny v případě nárazu. Řidič musí být zároveň schopen vyskočit z vozidla do pěti vteřin. Šablona se vkládá od otevřeného kokpitu až do vzdálenosti 100 mm před nejvzdálenější pedál. Je opatřena výřezem pro části řízení. Během kontroly může být vyjmut volant, ale nikoliv sedačka.



Obr. 14 Šablona pro nohy a šablona otevřeného kokpitu [6]

2.4 SPECIÁLNÍ POŽADAVKY NA KOMPOZITNÍ MONOKOKY

PŘÍPOJNÉ BODY PRIMÁRNÍ STRUKTURY

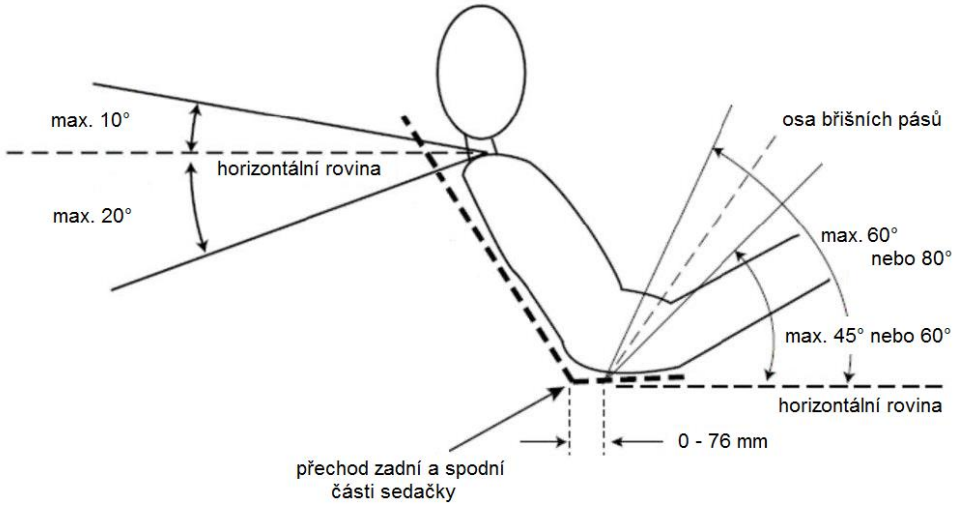
Každý přípojný bod mezi monokokem a jinou částí primární struktury musí být schopen přenést zatížení 30kN v jakémkoliv směru. Každé mechanické spojení vyžaduje minimálně dva šrouby M8 třídy 8.8. Držák musí být vyroben z ocelového plechu o tloušťce nejméně 2 mm. Trubkové prvky primární struktury, například výztuhy a podpory výztuh hlavního oblouku, mohou být připojeny k monokoku pouze jedním šroubem M10 třídy 8.8 přišroubovaným v ose připojované trubky. Nesmí dojít k zřetelnému poškození jádra kompozitu. [6]

UCHYCENÍ BEZPEČNOSTNÍCH PÁSŮ

Uchycení používaných šestibodových bezpečnostních pásů lze rozdělit na tři druhy. Prvním z nich jsou ramenní popruhy (Shoulder harness), druhým z nich jsou břišní popruhy (Lap belts). Uchycení těchto pásů musí odolávat zatížení 13 kN. Třetí druh představují mezinožní popruhy (Anti-submarine belts), které musí snést zatížení 6,5 kN. Další možností je použití jednoho uchycení pro břišní a mezinožní popruhy, tím pádem je požadavek na přenesené zatížení navýšen na 19,5 kN. Schopnost snášet předepsané zatížení musí být z důvodu bezpečnosti dokázána fyzickým testem. Hrany zkušebního zařízení musí být vzdáleny 125 mm od místa působící síly. Zkoušení je nutné provést pro nejhorší případ zatížení v rozsahu možných úhlů. Doporučuje se, aby způsob provedení testu co nejblíže odpovídal parametrům na voze. [6]

Ramenní popruhy musí být od sebe vzdáleny 178 mm až 229 mm. Uchycení těchto pásů by se mělo nacházet do 10° nad a do 20° pod horizontální rovinou, jak je zřejmé na Obr. 15. Kompozitní panel, ke kterému jsou přichyceny ramenní pásy, musí být ekvivalentní s ocelovou trubkou a anglicky se označuje Shoulder Harness Bar Equivalency (SHBE).

Uchycení břišních popruhů ovlivňuje pozice řidiče. Rozeznáváme vzpřímenou a sklopenou jízdní polohu. U první z nich se břišní popruhy nacházejí pod úhlem 45° až 60° v bočním pohledu, v druhém případě pak od 60° do 80°.



Obr. 15 Dovolené úhly bezpečnostních pásů [6]

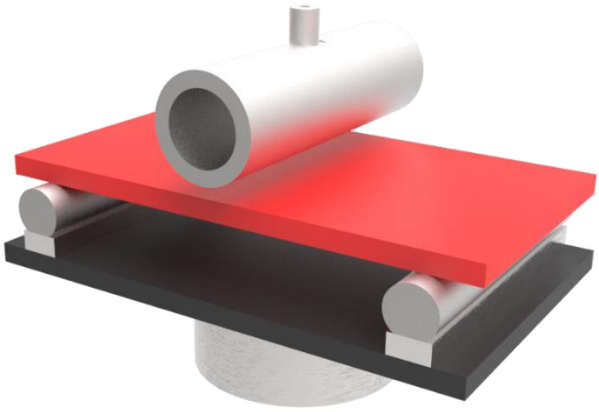
2.5 TESTOVÁNÍ SENDVIČOVÝCH PANELŮ MONOKOKU

Při testování sendvičových panelů monokoku je nutné, aby tuhost byla ekvivalentní s trubkovým rámem. V pravidlech je označována EI a jde o součin modulu pružnosti a kvadratického momentu průřezu k neutrální ose. Všechny ekvivalence musí být prokázány v dokumentu SES (Structural Equivalency Spreadsheet), jenž je zaslán ke kontrole na jednotlivé mezinárodní závody. Zkušební vzorky musí být poté předloženy na technických přejímkách.

TŘÍBODOVÁ OHYBOVÁ ZKOUŠKA

Vzorek reprezentující strukturu boční nárazové zóny monokoku musí být testován na tříbodový ohyb. Kovové těleso působící na panel má poloměr zaoblení 50 mm a přesahuje šířku zkoušeného vzorku. Není akceptováno, aby mezi působícím tělesem a vzorkem bylo cokoliv vloženo. Velikost vzorku činí 275 mm x 500 mm a musí prokázat stejné parametry jako dva ocelové profily určené pro tuto strukturu v klasické trubkové koncepci, tj. tuhost EI, pevnost a deformační energii. Data z testu i s fotografiemi se vkládají do dokumentu SES.

Za účelem ověření správnosti zkušebního zařízení je nutné provést i test dvou ocelových trubek. Zjišťuje se také deformační energie při průhybu o minimální hodnotě 12,7 mm.

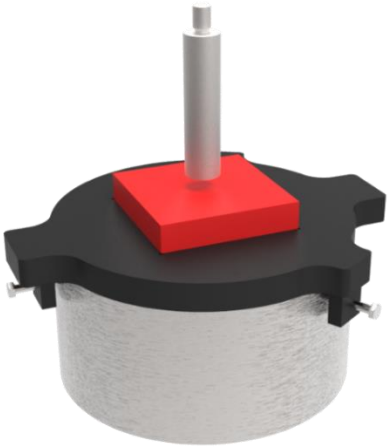


Obr. 16 Ukázka přípravku pro tříbodovou ohybovou zkoušku

Pokud jsou v primární struktuře rámu použity jiné skladby kompozitu než pro boční nárazovou strukturu, je nutné provést testování i těchto panelů. Vlastnosti sendvičových panelů s fotografiemi musí být opět zapsány v dokumentu SES.

SMYKOVÁ ZKOUŠKA

Při testování se zjišťuje pevnost potahu sendvičové struktury ve střihu. Vzorek musí mít minimální rozměr 100 mm x 100 mm. Do panelu o odpovídající skladbě určité části monokoku je vtlačen razník o průměru 25 mm. Pod vzorkem musí být otvor o průměru 32 mm, jenž je souosý s razníkem. Hrany mohou mít maximální poloměr zaoblení 1 mm. Získané údaje o působících silách musí být zaznamenány v dokumentu SES. První vrchol naměřené křivky je použit pro určení smykové pevnosti potahu. Tato hodnota musí být větší, než požadují pravidla pro určité části primární struktury rámu.

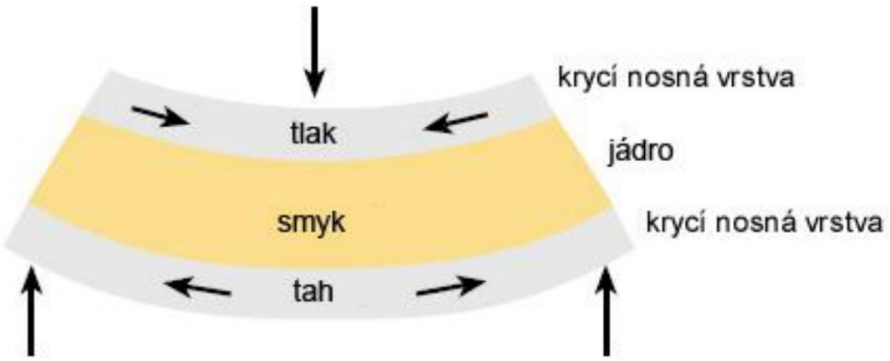


Obr. 17 Ukázka přípravku pro smykovou zkoušku

3 SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE

Sendvičové struktury řadíme k vrstevnatým konstrukcím. Ty jsou tvořeny rozdílnými typy jednoduchých či složených materiálů různého charakteru. Jejich spojení je vzájemně nerozebíratelné.

Strukturu sendviče tvoří dvě vnější vrstvy s vysokou pevností a tuhostí zatěžovanou tahovými a tlakovými silami. Jádro o relativně nízké hustotě přenáší smykové síly mezi těmito potahy. O pevnosti sendviče v tlaku ve směru jeho tloušťky rozhoduje především pevnost jádra v tlaku, ale i tuhost a tloušťka potahů. Pevnost v tlaku jádra roste s jeho hustotou. K dalším výhodám patří únavová odolnost, odolnost proti šíření trhlin, odolnost proti rázům, tepelná odolnost a odolnost proti ohni. Tyto vlastnosti jsou určeny převážně materiálem jádra. Při zvětšování tloušťky sendviče dochází ke zvýšení ohybové tuhosti sendviče a zároveň k velmi malému nárůstu jeho hmotnosti. Nejčastěji se mění pouze tloušťka lehkého jádra, jež obvykle mívá hustotu od 29 do 100 kg.m^{-3}. [14]



Obr. 18 Zatížení sendvičové konstrukce na ohyb [13]

3.1 POTAHY

Na vnější vrstvy sendvičových panelů se nejčastěji používají lamináty vyztužené skleněnými nebo uhlíkovými vlákny, popřípadě i kovové fólie. Pro optimální splnění funkce sendviče musí být potah k jádru dokonale spojen. Tento úkol splňují matrice potahu nebo speciální fóliová lepidla. Vzniklá konstrukce je velmi tuhá a je schopna odolat dynamickému namáhání a rázům.

Kompozitní materiály na bázi polymerů (FRP) jsou složené z matrice a výztuže. K již zmíněným vlastnostem lze přiřadit také tepelnou a chemickou odolnost, ohnivzdornost, nízkou tepelnou roztažnost, elektrickou i tepelnou vodivost.

3.1.1 MATRICE

Spojitá a obvykle poddajnější složka, jež zastává funkci pojiva výztuže, se nazývá matrice. Úkolem matrice je zaručení geometrického tvaru, zavedení a přenos sil i ochrana vláken. Přenáší namáhání na vlákna i mezi vlákny. Zajišťuje geometrické polohy vláken a udržuje

tvarovou stálost výrobků. Zároveň chrání vlákna před vlivy vnějšího prostředí. Nejpoužívanější matrice termosetů jsou nenasycené polyestery (UP), vinylestery (VE), epoxidy (EP).

Obecně dobré mechanické vlastnosti mají epoxidové pryskyřice. Polyesterové pryskyřice se vyznačují nízkou tepelnou odolností i nízkou cenou. Fenolické a polyamidové matrice odolávají vysokým teplotám. [15]

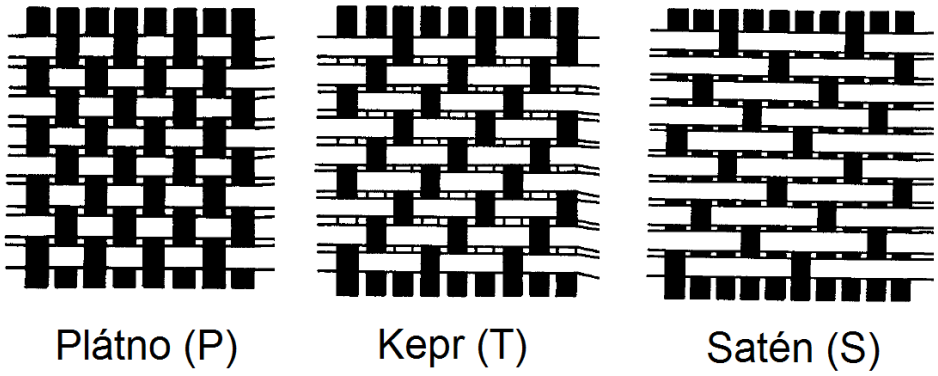
3.1.2 VÝZTUŽE

Tvrdší, tužší a pevnější nespojitá složka se nazývá výztuž. Přenáší zejména tahové napětí a z větší části určuje mechanické vlastnosti. Existují tři široce používané druhy vláken – skelné, uhlíkové a aramidové.

Skleněná vlákna se připravují tažením z taveniny v platinových pískách. Nejčastěji se používá bezalkalické E-sklo a vysokopevnostní S-sklo na bázi SiO_4 nebo AlO.

Nejvyužívanější jsou uhlíková vlákna, která jsou charakterizována vysokou pevností při nízké hmotnosti. Nejpoužívanějšími jsou karbonizovaná vlákna s vysokou pevností HS a vysokým modulem pružnosti HT. Dále je možné se setkat s vysokomodulovými grafitizovanými vlákny HM a s vysoce pevnými vlákny se středním modulem pružnosti IM.

Aramidové vlákno, často nazývané pod obchodním názvem Kevlar, je svým složením aromatický polyamid. Vyznačuje se vysokým poměrem pevnosti k hmotnosti. Vlákno je ohnivzdorné a samozhášivé. Má lepší hodnoty rázové houževnatosti, schopnost tlumení vibrací a horší vlastnosti v tlaku.



Obr. 19 Druhy vazeb [15]

Vlákna jsou uspořádána do pramenců o různém počtu vláken, jež jsou přímo užívána jako roving, jednosměrné pásy, nebo tkaniny. Ty se skládají z nejméně dvou pramenců (rovingů), které jsou tkané společně v podobě pramenců osnovy a útku. Jsou spleteny do tří vazeb. Nejpevnější a nejméně poddajná při tvarování je vazba plátnová *(Plain).* Jejich vlastnosti jsou v podélném a příčném směru stejné. Kombinací vlastností dobré pevnosti a snadného tvarování se vyznačuje vazba keprová *(Twill).* Tato vazba vytváří diagonální vzor. Nejméně pevnou vazbou je charakterizována vazba atlasová *(Satin).* Jednosměrné pásy *(Unidirectional Tape)* mají vlákna v jednom směru, jež jsou napříč spojeny, například skelnými vlákny nebo PES mřížkou.

3.2 JÁDRA

Voštinová jádra mají lepší mechanické vlastnosti než při stejné hustotě pěnová jádra. Při volbě vhodného jádra sendviče pro konkrétní aplikaci je důležité zohlednit nejen jeho použití a mechanické vlastnosti, ale i zvolenou výrobní technologii. Nejčastěji jsou aplikovány tuhé pěny nebo voštiny. [14]

3.2.1 PĚNOVÁ JÁDRA

Mezi nejčastěji používaná jádra sendvičových struktur náleží pěny. Mohou být vyráběny ze široké palety syntetických polymerů – PVC, PU, PEI, SAN aj. Jejich hustota se pohybuje v rozmezí od 40 kg/m^3 do 420 kg/m^3. Jsou vyráběny v tloušťkách od 2 do 50 mm podle požadavků zákazníků. Pěnový materiál je izotropní, což znamená, že jeho mechanické vlastnosti jsou ve všech směrech stejné. Pěny mají dobrý poměr tlakové pevnosti vzhledem k hmotnosti, jelikož obsahují v její struktuře plynové dutiny. Jsou charakterizovány schopností absorbovat rázovou energii a tlumit kmity. Některé z nich je možné tvarovat při zahřátí. Laminování pomocí infuze vyžaduje drážky v pěně, které umožňují lepší proudění pryskyřice. [19]

Obr. 20 Pěnová a balsová jádra [19]

POLYSTYRÉNOVÁ PĚNA - PS

Obvykle se používá při výrobě malých plavidel a surfu. Hustota se pohybuje okolo 40 kg/m^3. Jsou levné a lehce zpracovatelné. Mají špatné mechanické vlastnosti a nelze je použít v kombinaci s polyesterovými pryskyřicemi, neboť by došlo k jejich rozpuštění. Při zajištění nižšího podtlaku je vhodná pro ruční laminování s dodatečným vakuováním.

POLYURETANOVÁ PĚNA - PUR

Vyznačuje se průměrnými mechanickými vlastnostmi. Po delší době může dojít k odtržení jádra z důvodu zhoršené přilnavosti pryskyřice. Lze ji použít na výrobu rámu a žeber pro vyztužení dílu nebo jako tepelnou a zvukovou izolaci. Tato pěna je schopna pracovat i při zvýšených teplotách (150 °C). Je vhodná pro ruční laminování s dodatečným vakuováním. [19]

POLYETHYLENTEREFTALÁTOVÁ PĚNA - PET

Jde o recyklovatelný termoplast tvarovatelný za tepla. Je charakteristický svými dobrými mechanickými vlastnostmi. Je nehořlavý a dobře opracovatelný. Příkladem může být pěna s komerčním označením Airex T90 od společnosti 3A Composites. Je vhodná pro zmiňované technologie laminování.

POLYVINYLCHLORIDOVÁ PĚNA - PVC

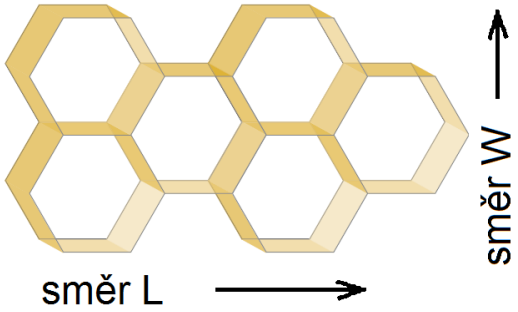
Tato pěna se nejčastěji využívá pro výrobu jader sendvičových konstrukcí. Nabízí vyváženou kombinaci statických a dynamických vlastností. Je odolná vůči absorpci vody a také vůči mnoha chemickým látkám. Lze ji použít do teploty 80 °C. PVC pěny jsou vysoce hořlavé. Příkladem může být pěna s komerčním označením Airex C70 od společnosti 3A Composites. Je vhodná pro uvedené technologie laminování.

POLYETHERIMIDOVÁ PĚNA - PEI

Vyznačuje se vynikající odolností vůči ohni s nízkou toxicitou a kouřivostí i výbornými dielektrickými vlastnostmi. Její předností je vysoká pevnost vůči nízké hmotnosti s dobrou únavovou a rázovou odolností a nízkou nasákavostí vlhkosti. Používá se při provozních teplotách do 160 °C. Využití nachází ve spojení s prepregy. [19]

3.2.2 VOŠTINY

Název je odvozen z podobnosti se šestihrannou strukturou včelí plástve. Voštinová jádra pro aplikaci v sendvičových strukturách jsou dostupná v rozmanitých materiálových variantách od lepenkových pro nenáročné aplikace, přes polymerní až po vysokopevnostní. Pro výrobu leteckých komponent se často využívají tuhá a velmi lehká jádra. Jejich hustota se pohybuje v rozmezí od 29 kg/m^3 do 600 kg/m^3. Jsou zhotovovány v tloušťkách od 3 do 254 mm podle požadavků zákazníků. Vyrábí se ve formě desek, ale i zakřivených panelů. Změny tvaru lze dosáhnout vlivem malé síly nebo zahřátím. Voštiny jsou ortotropní, což znamená, že její mechanické vlastnosti jsou jedinečné a nezávislé na směrech tří vzájemně kolmých os. Jsou především vhodné pro prepreg technologie, ale uplatnění najdou i při ručním laminování s dodatečným vakuováním.



Obr. 21 Podélný a příčný směr voštinového jádra [16]

HLINÍKOVÉ VOŠTINY

Nabízí jeden z nejvyšších poměrů pevnosti a hmotnosti pro konstrukční aplikace. Jejich vlastnosti lze také upravit změnou velikosti buněk a tloušťky fólie. Vyznačují se dobrými mechanickými vlastnostmi a relativně nízkou cenou. Hliníkovou voštinu je třeba používat s opatrností, například u velkých lodních konstrukcí, kde mohou nastat problémy s korozí vlivem slaného prostředí. Hliníková voština nemá tzv. mechanickou paměť. Při působení zatížení na sendvičový panel s hliníkovou voštinou dojde k deformaci jádra, avšak tuhý potah se vrátí do svého původního stavu. Poté má již panel horší mechanické vlastnosti. [16]

NOMEXOVÉ VOŠTINY

Jsou vyrobeny z papíru Nomex. Jde o komerční název papíru, jenž je tvořen aramidovým vláknem. Papírová voština se obvykle ponoří do fenolické pryskyřice. Tím vznikne voštinové jádro s vysokou pevností a dobrou ohnivzdorností. U letadel se často používají jako lehké interiérové panely. Vzhledem ke svým výborným mechanickým vlastnostem, nízké hustotě a dlouhodobé stabilitě nacházejí své uplatnění i v dalších odvětvích průmyslu. Jsou však cenově náročnější v porovnání s jinými jádrovými materiály. [16]

3.3 POUŽITÁ TECHNOLOGIE VÝROBY

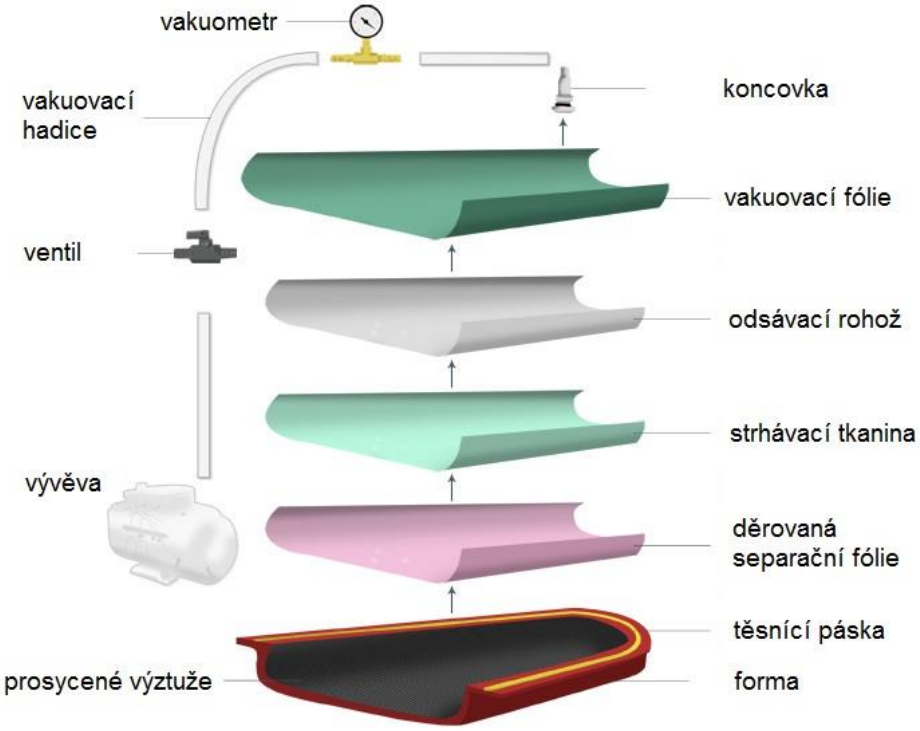
Kompozitní díly lze vyrábět mnoha způsoby, v zásadě určují konečné vlastnosti i ekonomiku výroby. Z tohoto důvodu je potřeba věnovat volbě technologie patřičnou pozornost. Výrobní postup je určen zejména charakterem výrobku a jeho volba se řídí několika zásadními faktory: [18]

- sériovost dílce
- velikost a členitost výrobku
- kvalita povrchu
- požadované vlastnosti, zejména pevnost a hmotnost
- limit nákladů

Pro výrobu monokoku formulového vozu by bylo možné použít ruční laminování s dodatečným vakuováním. Tato technologie je vhodná pro výrobu prototypů vzhledem k nízkým nákladům a nenáročnosti výroby. Pomocí vakuování lze získat větší obsah výztuže, a tudíž lepší mechanické vlastnosti. Také ji lze použít pro výrobu sendvičových konstrukcí.

3.3.1 RUČNÍ LAMINOVÁNÍ S DODATEČNÝM VAKUOVÁNÍM

Tato technologie vychází z klasického ručního laminování, jež představuje nejstarší a nejjednodušší metodu. Je vhodné ji použít pro nižší až střední série výrobků různých rozměrů. Problémy nepřinášejí složité tvary forem. Povrch zhotoveného výrobku většinou má drobné vady (neprosycená místa), proto se používá gel coat. Zajišťuje nejen estetickou stránku povrchu dílce, ale i tvoří ochranu vůči okolnímu prostředí. Vnější povrch dílu kopíruje strukturu strhávací tkaniny. Pokud je potřeba povrch výrobku upravit, je nutné ho nalakovat. Významný vliv na finální produkt má samotný pracovník, na něhož jsou kladeny vysoké nároky spjaté s kvalitní, poctivou, ale i rychlou prací. Díky dodatečnému vakuování má výrobek daleko nižší hmotnost a vyšší pevnost než u klasického ručního laminování. Dojde ke zvýšení obsahu výztuže a odsátí přebytečné pryskyřice. Je také vhodná pro výrobu sendvičových panelů s pěnovými nebo voštinovými jádry. Vzhledem k nenáročnosti a relativně nízkým nákladům je určena pro výrobu prototypů. Ve srovnání s ručním laminováním se tato metoda výroby prodražuje vzhledem k potřebě technologických materiálů a vývěvy. Nevýhodou této technologie je časová náročnost. [18]



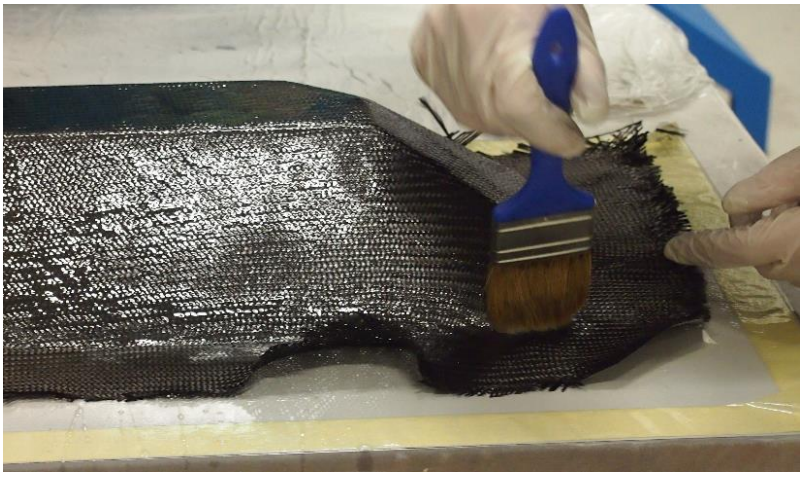
Obr. 22 Schéma ručního laminování s dodatečným vakuováním [20]

3.3.2 POSTUP LAMINOVÁNÍ

Při ruční laminaci je nutné používat ochranné pomůcky, např. latexové rukavice, ochranné brýle, respirátor a ochranný oděv.

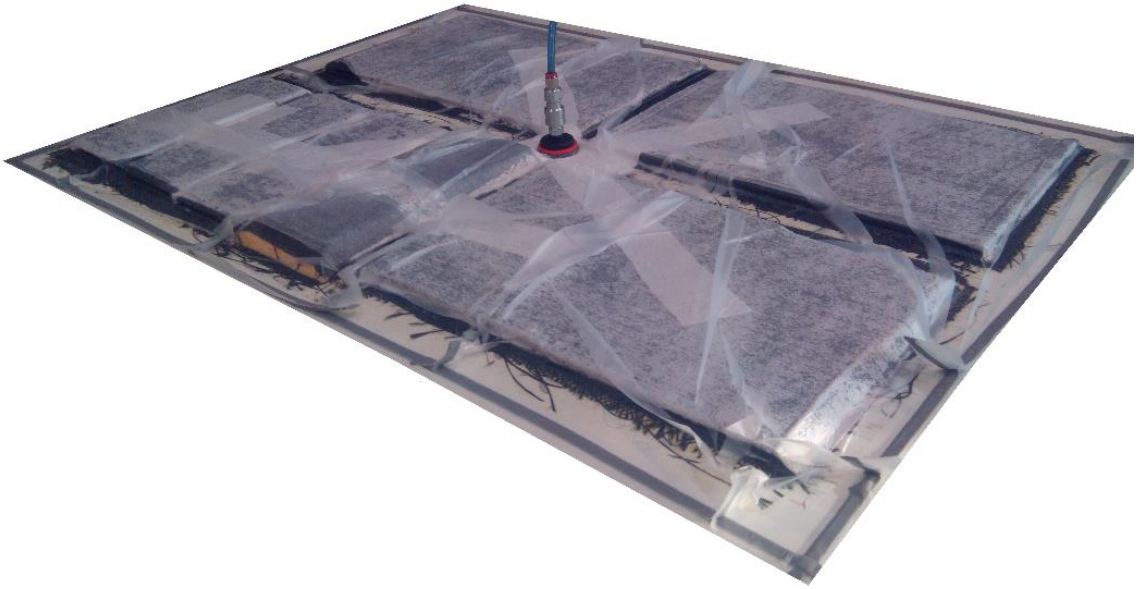
Připravená forma je nejprve očištěna a odmaštěna. Vyššího lesku lze dosáhnout za použití leštící pasty. Poté je nanesen separační prostředek. Mohou se použít separátory na bázi PVA (polyvinylalkohol), vosku a rozpouštědel. Tekuté separátory jsou rychle aplikovatelné v několika vrstvách. Nanáší se stříkáním nebo potíráním. Voskový separátor je vhodné použít k uzavření pórů ve formě a je nutné ho rozleštit. Kromě hlavního účelu, tj. oddělení výrobku od formy, dodává separátor povrchu i lesk. Pro zvýšení kvality výrobku je vhodné použít povrchovou pryskyřici – gel coat. Jde o barevnou nebo bezbarvou vrstvu o tloušťce 0.3 -1 mm, která se nanáší buď ručně, nebo pomocí lepší varianty - stříkáním. Nejčastěji se používá levnější polyesterový nebo dražší epoxidový gel coat. V rozmezí jedné až dvou hodin zgelovatí.

Po této době je možné začít pokládat výztuhy a prosycovat je pryskyřicí. Cenově nejvýhodnější výrobky jsou tvořeny skelnými vlákny a polyesterovou pryskyřicí. Pro lehké a pevné konstrukce se využívá uhlíkových vláken a epoxidové pryskyřice. Prosycení se provádí pomocí štětců nebo válečků. Vytlačení přebytečné pryskyřice a bublin je možné pomocí rýhovaného kovového válečku. Jednotlivé vrstvy výztuží jsou prosycovány a válečkovány.



Obr. 23 Ukázka prosycování pryskyřice štětcem

Po nanesení všech výztuží je možné položit strhávací tkaninu z nylonu. Tato látka je opatřena červenými nebo modrými vlákny, aby nedošlo k záměně se skelnou tkaninou. Jejím hlavním přínosem je snadné odstranění přebytečné pryskyřice nasáklé do odsávací rohože. Mezi strhávací tkaninu a odsávací rohož je možné umístit perforovanou fólii. Nakonec je forma zakryta vakuovací fólií, jež je velmi pružná. Pomocí těsnící pásky je uchycena k formě. K fólii se upevní koncový ventil, k němuž je připojena hadice od vakuové pumpy.

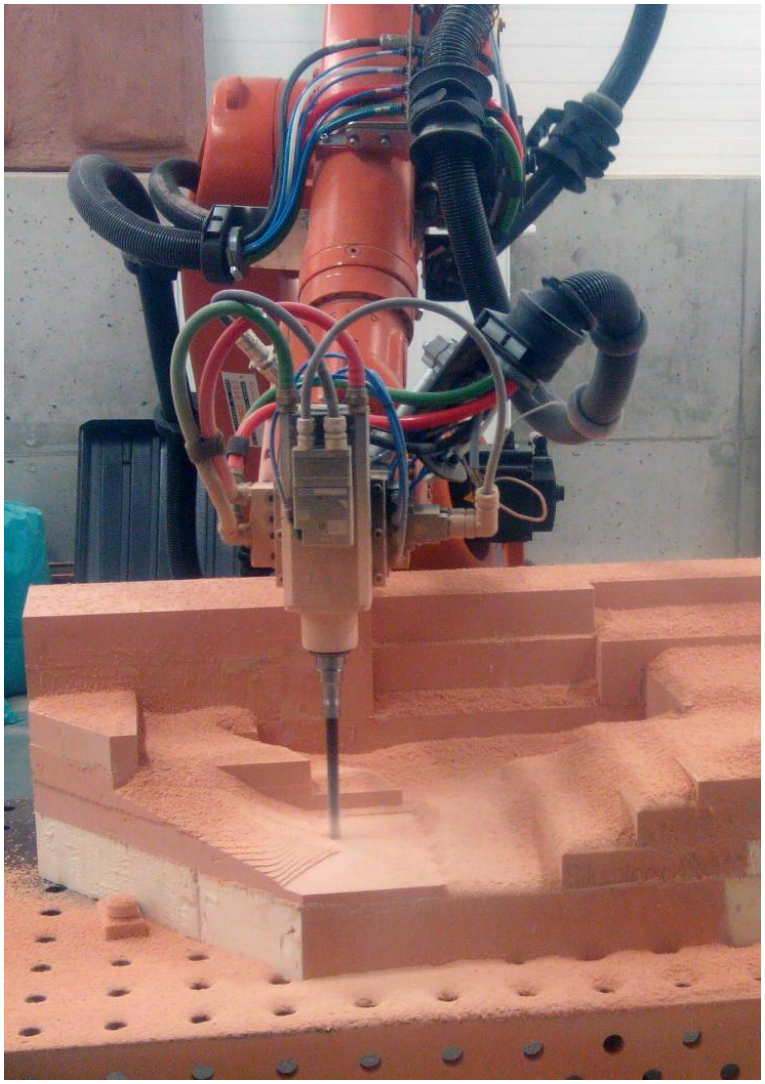


Obr. 24 Vakuování zkušebních sendvičových panelů

Vakuování probíhá při podtlaku 0,3 – 0,9 barů po dobu 8 – 15 hodin, záleží však na druhu pryskyřice a tvrdidla. Po vytvrzení je odstraněna strhávací tkanina a poté je hotový výrobek vyjmut z formy. Některé pryskyřice je možné temperovat, a tudíž se zkrátí doba vytvrzení a zvýší se tepelná odolnost hotového výrobku.

3.3.3 POŽADAVKY NA FORMY

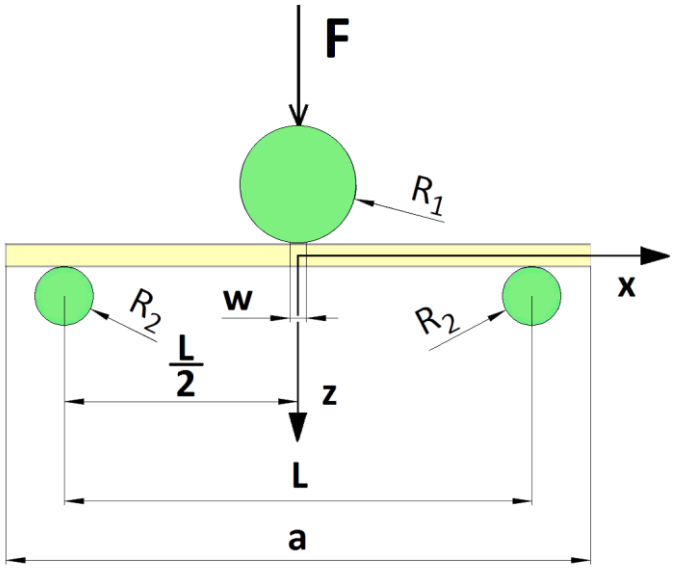
Při vytvrzování dílů za pokojové teploty nejsou kladeny na formy žádné speciální nároky. Forma může být vyrobena z extrudovaného polystyrénu, polyuretanové pěny (nazývané umělým dřevem) a sklolaminátu. Cenově nejdostupnější a nejjednodušší je vytvoření formy nebo jádra z polystyrénu, který má povrch zpevněn pryskyřicí. Při vytvrzování s tímto materiálem se doporučuje použít nižší podtlak, aby nedošlo k jejímu zdeformování. Pro přesnější účely je vhodné zvolit polyuretanovou pěnu o vyšší hustotě, jež lze snadno obrábět. Sklolaminátové formy mohou být vytvořeny jako obtisky modelů z polystyrénu nebo polyuretanu. Formy jsou dostatečně pevné a nedochází k zdeformování při působícím vakuu.



Obr. 25 Ukázka obrábění polyuretanové formy

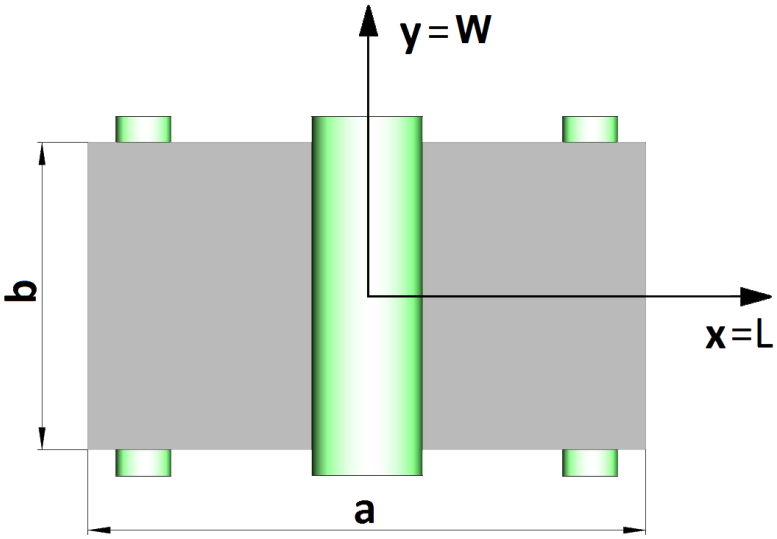
4 NÁVRH SENDVIČOVÝCH PANELŮ

Návrh sendvičových panelů monokoku pro vůz Formule Student vychází z tuhosti panelů vyplývající ze zkoušky tříbodovým ohybem. Nejprve je potřeba definovat používané veličiny. Síla F působí uprostřed panelu pomocí tělesa o poloměru R_1 = 50 mm, jak požadují pravidla FSEA. Dále vyžadují délku vzorku a = 500 mm a šířku vzorku b = 275 mm. Rozteč udává vzdálenost mezi dvěma podpěrami. V našem případě byla zvolena rozteč L = 400 mm a poloměry podpěr dosahují R_2 = 25 mm. Uvedené veličiny jsou znázorněny v Obr. 26 a Obr. 27. [21]



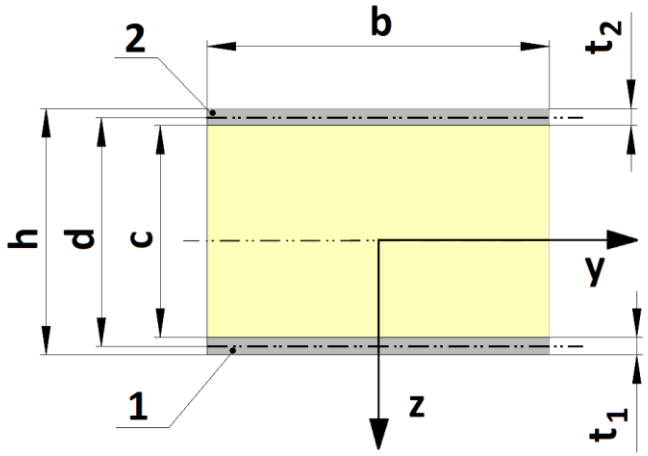
Obr. 26 Schéma tříbodové ohybové zkoušky v nárysu

Při použití voštinového jádra je upřednostňováno, aby podélný směr voštiny L byl totožný s osou x. V tomto směru mají voštiny nejvyšší smykovou tuhost a pevnost.



Obr. 27 Schéma tříbodové ohybové zkoušky v půdorysu

Při výpočtu tuhosti panelu jsou brány v úvahu různé skladby laminátů potahů, z čehož vyplývá použití rozdílných tlouštěk potahů sendvičových panelů. Potah č. 2 představuje vnější laminát monokoku a potah č. 1 se nachází uvnitř monokokové konstrukce. Celková výška panelu je označena písmenem h, efektivní výška panelu písmenem d, tloušťka jádra písmenem c.



Obr. 28 Schéma sendvičového panelu v řezu

Sendvičové panely primární struktury vozu Formule Student jsou navrhovány s přihlédnutím k ekvivalenci požadovaných ocelových profilů. Pevnostní parametry panelů musí být stejné nebo lepší než předepsaný počet a rozměr trubek v jednotlivých částech. Splnění těchto požadavků eviduje dokument SES.

4.1 VÝPOČTOVÝ DOKUMENT SES

Structural Equivalency Spreadsheet je dokument v programu Microsoft Excel, ve kterém se nachází 52 listů v nevyplněné podobě. Obsahuje informační listy, návody na správné vyplnění a přehled výsledků. Dále jsou v něm uvedena data s výsledky fyzických testů panelů, výpočty ekvivalence jednotlivých částí šasi, výpočty parametrů pro uchycení pásů aj. Do jednoho listu se vkládají obrázky šasi v základních pohledech s celkovými rozměry a natočením oblouků. Také se zde uvádějí skladby jednotlivých částí kompozitního monokoku.

Do materiálového listu lze vložit hodnoty modulu pružnosti, meze pevnosti a smykové pevnosti pouze na základě provedených fyzických zkoušek. Tyto parametry jsou použity za účelem prokázání ekvivalence s trubkovými profily, zjištění správnosti upevnění oblouků a bezpečnostních pásů. V následující části jsou podrobněji prezentovány pouze výpočty týkající se zjištěných parametrů ze zkoušek a porovnání vybraných parametrů panelu s ocelovými profily. Výpočty z dokumentu SES jsou využity ke kontrole správnosti navrženého panelu.

4.1.1 POROVNÁNÍ S OCELOVÝMI PROFILY

Tato část vysvětluje výpočet parametrů, které musí být stejné nebo větší ve srovnání s trubkovými profily. Každé části monokoku přísluší list v dokumentu SES. Jde o následující části: hlavní oblouk (MH), přední oblouk (FH), výztuhy hlavního oblouku (MHB), podpory výztuh hlavního oblouku (MHBS), podpory předního oblouku (FHB), přední přepážka (FB), podpory přední přepážky (FBSS), boční nárazová struktura (SIS) a uchycení ramenních pásů (SHBE). V dokumentu jsou zadávány údaje pouze pro jednu polovinu šasi (pravou nebo levou). Předpokládá se, že auto je symetrické v podélné rovině. Pokud je některá část nesymetrická, zadávají se obě poloviny šasi. List ověřující ekvivalenci panelu pro uchycení ramenních pásů je zobrazen na níže uvedeném obrázku.

Shoulder Harness Bar Equivalency

			Enter construction type	Composite only		
I	**Material Property**	**Baseline**	**Your Tube**	**Your Composite**	**Your Total**	
	Material type	Steel	Steel	Other 1		
	Tubing Type	Round	Round	N/A		
	Material name /grade	Steel	Steel	Your Mat. 1		
	Youngs Modulus, E	2.00E+11	2.00E+11	1.19E+11		
	Yield strength, Pa	3.05E+08	3.05E+08	3.46E+08		
	UTS, Pa	3.65E+08	3.65E+08	3.46E+08		
	Yield strength, welded, Pa	1.80E+08	1.80E+08	1.00E+00		
	UTS welded, Pa	3.00E+08	3.00E+08	1.00E+00		
II	Number of tubes	1	1			
	Tube OD, mm	25.4	25.4			
	Wall, mm	2.4	2.4			
III	Thickness of panel, mm h			15.32		
	Thickness of core, mm c			12.7		
	Thickness of inner skin, mm t_1			1.29		
	Thickness of outer skin, mm t_2			1.33		
	Panel height,mm b			200		
IV	OD, m	0.0254	No tubes			
	Wall, m	0.0024				
	I, m^4	1.16E-08		2.57817E-08	2.58E-08	
	EI	2.32E+03		3.06E+03	3.06E+03	131.8
	Area, mm^2	173.4		524.0	524.0	302.2
	Yield tensile strength, N	5.29E+04		1.81E+05	1.81E+05	342.8
	UTS, N	6.33E+04		1.81E+05	1.81E+05	286.4
	Yield tensile strength, N as welded	3.12E+04		1.81E+05	1.81E+05	580.8
	UTS, N as welded	5.20E+04		1.81E+05	1.81E+05	348.5
	Max load at mid span to give UTS for 1m long tube, N	1.33E+03		4.66E+03	4.66E+03	349.5
	Max deflection at baseline load for 1m long tube, m	1.20E-02		9.09E-03	9.09E-03	75.9
	Energy absorbed up to UTS, J	7.98E+00		7.40E+01	7.40E+01	927.1

Obr. 29 Ukázka zjištění ekvivalence SHBE v dokumentu SES [21]

Šedé buňky v tabulce není možné editovat. Žlutá pole lze editovat. V prvním bloku se nacházejí údaje o materiálu. Tyto parametry pro ocelové profily jsou pevně dané. Modul pružnosti (E) a mez pevnosti (UTS) kompozitního panelu jsou získané ze zkoušky tříbodovým ohybem.

Druhý blok udává počet, průměr a tloušťku trubek pro danou část monokoku.

Ve třetí části se zadávají rozměry sendvičového panelu odpovídající části monokoku. Na Obr. 29 jsou dopsány veličiny, které korespondují s definovanými rozměry panelu dle Obr. 26 a Obr. 27.

V poslední části jsou vypočítány všechny požadované ekvivalence. Pokud je vše správně, v pravém sloupci jsou zobrazeny procentuální rozdíly mezi kompozitním panelem a příslušnými ocelovými profily. Zelená pole potvrzují správnost navrženého panelu. Musí znázorňovat více než 100%, kromě průhybu, který musí být menší než 100%. Červená pole značí nový návrh panelu. Od 33% do 100% je pole vyplněno oranžovou barvou, jež umožňuje provést dodatečný výpočet, do něhož je zahrnut například přesný kvadratický průřez dané části monokoku přímo z CAD modelu.

Dále je proveden rozbor výpočtů čtvrté části, kde s indexem *t* jsou uvedeny výpočty pro trubky a s indexem *p* pro panely.

Kvadratický moment průřezu (I) v jednotkách m^4. S využitím Steinerovy věty lze získat přesnější kvadratický moment průřezu sendvičového panelu s odlišnými tloušťkami potahů, než uvádí následující jednoduchý vztah (59). D_t je vnější průměr trubkového profilu a t_t tloušťka stěny. Zdroj rovnic [21].

$$J_t = \pi \cdot \frac{D_t^4 - (D_t - 2 \cdot t_t)^4}{64} \tag{1}$$

$$J_p = J_{p1} + S_1 \cdot (s - x_1)^2 + J_{p2} + S_2 \cdot (s - x_2)^2 \tag{2}$$

$$kde\text{:}\ \ J_{p1} = \frac{b \cdot t_1^3}{12} \quad obdobně\text{:}\ \ J_{p2} = \frac{b \cdot t_2^3}{12} \tag{3}$$

$$S_1 = b \cdot t_1 \quad obdobně\text{:}\ \ S_2 = b \cdot t_2 \tag{4}$$

$$x_1 = \frac{t_1}{2} \quad a \quad x_2 = h - \frac{t_2}{2} \tag{5}$$

$$s = \frac{A_1 \cdot x_1 + A_2 \cdot x_2}{A_1 + A_2} \tag{6}$$

Tuhost (EI) je uvedena v jednotkách $N \cdot m^2$, kde n udává počet trubek:

$$EI_t = n \cdot E_t \cdot J_t \tag{7}$$

$$EI_p = E_p \cdot J_p \tag{8}$$

Průřez (Area) je uveden v jednotkách mm^2:

$$S_t = n \cdot \pi \cdot \frac{D_t^2 - (D_t - 2 \cdot t_t)^2}{4} \tag{9}$$

$$S_p = (h - c) \cdot b \tag{10}$$

Maximální zatížení (UTS) je uvedeno v jednotkách N. Další zatížení v tabulce se vypočítají stejně, mění se pouze napětí:

$$F_{UTS_t} = \sigma_{UTS_t} \cdot S_t \tag{11}$$

$$F_{UTS_p} = \sigma_{UTS_p} \cdot S_p \tag{12}$$

Maximální zatížení uprostřed trubky nebo panelu o rozteči podpor L = 1 m (Max load …) je uvedeno v jednotkách N:

$$F_{max_t} = n \cdot \frac{4 \cdot \sigma_{UTS_t} \cdot J_t}{\frac{L}{2} \cdot D_t} \tag{13}$$

$$F_{max_p} = \frac{4 \cdot \sigma_{UTS_p} \cdot J_p}{\frac{L}{2} \cdot h} \tag{14}$$

Průhyb od maximálního zatížení trubky (Max deflection at baseline load …) je uveden v jednotkách m:

$$\delta_t = \frac{F_{max_t} \cdot L^3}{48 \cdot EI_t} \tag{15}$$

$$\delta_p = \frac{F_{max_t} \cdot L^3}{48 \cdot EI_p} \tag{16}$$

Deformační energie až do meze pevnosti pro rozteč L = 1 m (Energy absorbed up to UTS) je uvedena v jednotkách J:

$$E_{\mathrm{def}_t} = \frac{1}{2} \cdot F_{max_t} \cdot \delta_t \tag{17}$$

$$E_{\mathrm{def}_p} = \frac{1}{2} \cdot F_{max_p} \cdot \delta_p \tag{18}$$

4.2 ANALYTICKÝ VÝPOČET PANELŮ

Tato část se zabývá analytickým výpočtem tuhosti kompozitního laminátového potahu a kontrolou jeho pevnosti pro případ zatížení tříbodovým ohybem. Poté je předložen výpočet tuhosti panelu pro tentýž případ zatížení a jeho následná kontrola.

4.2.1 VÝPOČET POTAHU PANELŮ KLASICKOU LAMINÁRNÍ TEORIÍ

Pro popis chování kompozitních potahů lze použít klasickou teorii laminátů. Tuto metodu lze realizovat v různých programech jako je Matlab, Mathcad nebo Microsoft Excel. Výpočet parametrů potahů panelů je proveden v programu Microsoft Excel. Další část je věnována zjištění modulu pružnosti v tahu laminátu. Uvedený výpočet je zjednodušen následujícími předpoklady: [15]

- Tloušťka laminátu je velmi malá ve srovnání s dalšími rozměry.
- Vrstvy jsou k sobě perfektně navázány.
- Normála zůstává kolmá k povrchu i při deformaci.
- Lamina i laminát jsou lineárně elastické.
- Poměrné deformace jsou po tloušťce laminátu lineární.
- Každá vrstva je ortotropní.
- Vliv teploty není do výpočtu zahrnut.

VSTUPNÍ DATA

Pro výpočet laminátu je nutné znát čtyři základní materiálové charakteristiky, tloušťku a jeho orientaci u jednotlivých vrstev:

E_1 - modul pružnosti v podélném směru vrstvy v MPa

E_2 – modul pružnosti v příčném směru vrstvy v MPa

G_{12} – modul pružnosti ve smyku v rovině vrstvy v MPa

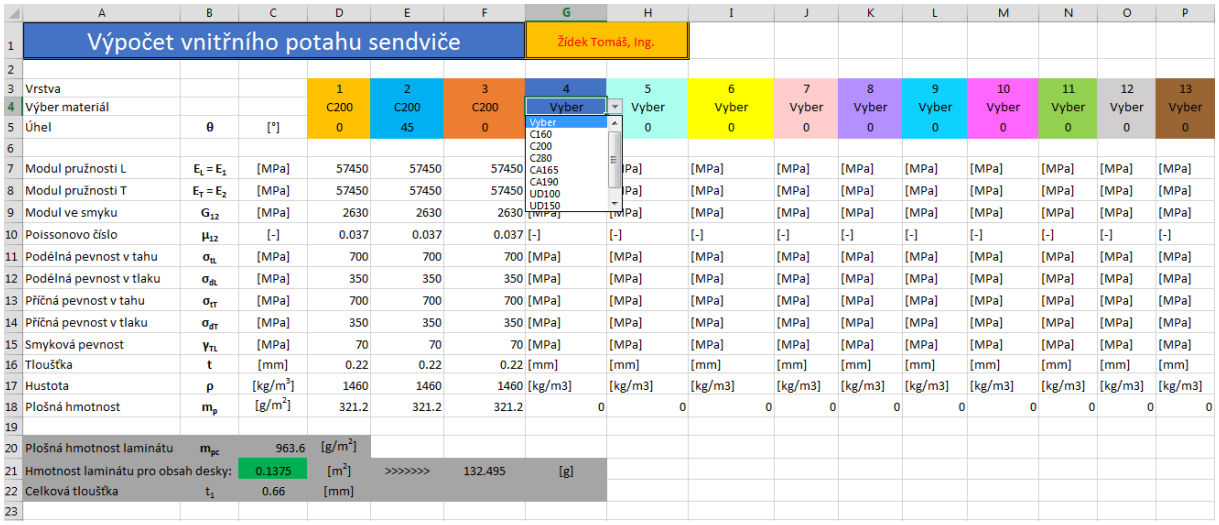
μ_{12} – Poissonovo číslo vrstvy

t_v – tloušťka vrstvy v mm

θ – úhel natočení vrstvy vůči definovanému směru

Tyto hodnoty lze stanovit výpočtem, odhadem ze zkušeností nebo nejlépe zkouškami vzorků jednotlivých druhů materiálů. Hodnoty zadávané pro výpočet jsou uvedeny v Tabulka 12.

V připraveném výpočtovém dokumentu postačí vybrat v seznamu buňky druh výztuže a zadat potřebný úhel natočení dané výztuže. Další materiálové hodnoty jsou automaticky vloženy z databáze pomocí funkcí INDEX a POZVYHLEDAT. Zobrazují se i hodnoty s jednotlivými pevnostmi, které jsou používány až v další části, kdy je laminát kontrolován pomocí poruchových kritérií. Je možné vytvořit laminát až s 13 vrstvami. Vzhled zadávacího panelu kompozitního potahu je uveden na Obr. 30.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Výpočet vnitřního potahu sendviče						Žídek Tomáš, Ing.									
2																
3	Vrstva			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
4	Výber materiál			C200	C200	C200	Vyber	Vyber	Vyber	Vyber	Vyber	Vyber	Vyber	Vyber	Vyber	Vyber
5	Úhel	θ	[°]	0	45	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
6																
7	Modul pružnosti L	$E_L = E_1$	[MPa]	57450	57450	57450		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
8	Modul pružnosti T	$E_T = E_2$	[MPa]	57450	57450	57450		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
9	Modul ve smyku	G_{12}	[MPa]	2630	2630	2630		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
10	Poissonovo číslo	μ_{12}	[-]	0.037	0.037	0.037	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
11	Podélná pevnost v tahu	σ_{tL}	[MPa]	700	700	700	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
12	Podélná pevnost v tlaku	σ_{dL}	[MPa]	350	350	350	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
13	Příčná pevnost v tahu	σ_{tT}	[MPa]	700	700	700	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
14	Příčná pevnost v tlaku	σ_{dT}	[MPa]	350	350	350	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
15	Smyková pevnost	γ_{TL}	[MPa]	70	70	70	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
16	Tloušťka	t	[mm]	0.22	0.22	0.22	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
17	Hustota	ρ	[kg/m³]	1460	1460	1460	[kg/m3]	[kg/m3]	[kg/m3]	[kg/m3]	[kg/m3]	[kg/m3]	[kg/m3]	[kg/m3]	[kg/m3]	[kg/m3]
18	Plošná hmotnost	m_p	[g/m²]	321.2	321.2	321.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19																
20	Plošná hmotnost laminátu	m_{pc}	963.6	[g/m²]												
21	Hmotnost laminátu pro obsah desky:		0.1375	[m²]	>>>>>>>	132.495	[g]									
22	Celková tloušťka	t_1	0.66	[mm]												
23																

Vyber
C160
C200
C280
CA165
CA190
UD100
UD150

Obr. 30 Ukázka zadávání jednotlivých vrstev laminátu

VÝPOČET MATICE TUHOSTI

Výpočet vychází z obecného Hookova zákona. Jde o lineární vztah mezi napětím a deformací. Pro výpočet laminy je použit jeho dvourozměrný tvar. Souřadnicové osy matice tuhosti se shodují s materiálovými osami vrstvy. Zdroje výpočtů klasické laminární teorie: [15], [25]

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1 & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \tag{19}$$

Symetrická matice tuhosti v jednotkách MPa má tvar:

$$\boldsymbol{Q} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{(1-\mu_{12}\,.\,\mu_{21})} & \frac{\mu_{21}\,.\,E_1}{(1-\mu_{12}\,.\,\mu_{21})} & 0 \\ \frac{\mu_{12}\,.\,E_2}{(1-\mu_{12}\,.\,\mu_{21})} & \frac{E_2}{(1-\mu_{12}\,.\,\mu_{21})} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \tag{20}$$

$$kde\colon\ \mu_{21} = \mu_{12} \cdot \left(\frac{E_2}{E_1}\right) \tag{21}$$

K matici tuhosti existuje inverzní matice poddajnosti, jež je označována písmenem **S**.

VÝPOČET TRANSFORMOVANÉ MATICE TUHOSTI VRSTVY

Transformační matice (T) přeměňují napěťové a deformační stavy lamina mezi materiálovým a obecným souřadnicovým systémem. Materiálový souřadnicový systém je shodný s orientací dané vrstvy a je označován čísly (1,2,3). Za obecný souřadnicový systém (x, y, z) se považuje systém celého laminátu. Při transformaci deformací je brán v úvahu kromě samotného úhlu natočení i tzv. inženýrský zkos, což představuje nelineární úhlové přetvoření. Transformace mezi souřadnými systémy napětí nebo deformace určují následující vztahy:

$$\boldsymbol{\sigma_{12}} = \boldsymbol{T} \cdot \boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{xy}} \tag{22}$$

$$\boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{xy}} = \boldsymbol{T^{-1}} \cdot \boldsymbol{\sigma_{12}} \tag{23}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon_{12}} = \boldsymbol{T^{T^{-1}}} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{xy}} \tag{24}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{xy}} = \boldsymbol{T^{T}} \cdot \boldsymbol{\varepsilon_{12}} \tag{25}$$

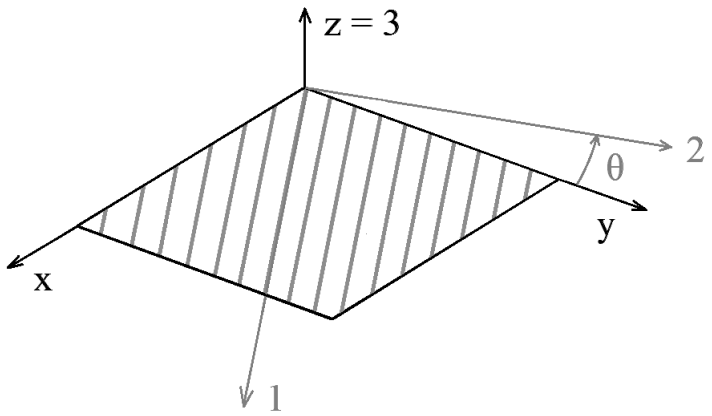
Transformační matice mají tento tvar:

$$\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & 2\cdot\sin\theta\cdot\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & -2\cdot\sin\theta\cdot\cos\theta \\ -\sin\theta\cdot\cos\theta & \sin\theta\cdot\cos\theta & \cos^2\theta-\sin^2\theta \end{bmatrix} \tag{26}$$

$$\boldsymbol{T^{-1}} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & -2\cdot\sin\theta\cdot\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & 2\cdot\sin\theta\cdot\cos\theta \\ \sin\theta\cdot\cos\theta & -\sin\theta\cdot\cos\theta & \cos^2\theta-\sin^2\theta \end{bmatrix} \tag{27}$$

$$\boldsymbol{T^{T^{-1}}} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & \sin\theta\cdot\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & -\sin\theta\cdot\cos\theta \\ -2\cdot\sin\theta\cdot\cos\theta & 2\cdot\sin\theta\cdot\cos\theta & \cos^2\theta-\sin^2\theta \end{bmatrix} \tag{28}$$

$$\boldsymbol{T^T} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & -\sin\theta\cdot\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & \sin\theta\cdot\cos\theta \\ 2\cdot\sin\theta\cdot\cos\theta & -2\cdot\sin\theta\cdot\cos\theta & \cos^2\theta-\sin^2\theta \end{bmatrix} \tag{29}$$



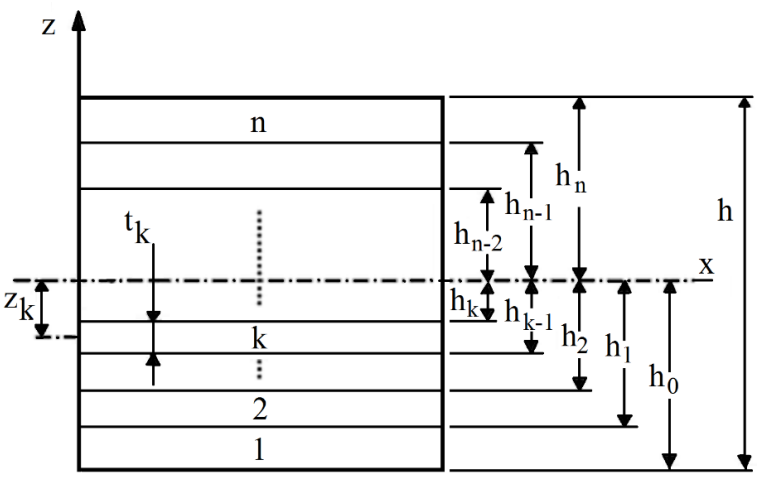
Obr. 31 Obecná a materiální souřadnicová soustava

Transformovaná matice tuhosti ($\bar{Q}$) dané vrstvy v obecné souřadnicové soustavě je definována součinem matic. V programu Excel existuje funkce SOUČIN.MATIC, ale pro správnou funkci je potřeba přidat složené závorky, například pomocí klávesové zkratky ctrl+shift+enter.

$$\boldsymbol{\bar{Q}} = \boldsymbol{T^{-1}}\cdot\boldsymbol{Q}\cdot\boldsymbol{T^{T^{-1}}} \tag{30}$$

ZADÁNÍ POLOHY VRSTVY V LAMINÁTU

Při sestavování laminátu předpokládáme, že se vrstvy nemohou po sobě posouvat a posuvy v podélném a příčném směru jsou spojité. Poté je potřeba určit vzdálenosti jednotlivých k-tých vrstev ke střední rovině laminátu, jak zobrazuje následující Obr. 32.



Obr. 32 Polohy jednotlivých vrstev laminátu

VÝPOČET MATICE TUHOSTI LAMINÁTU

Matice tuhosti laminátu je symetrická a má 6 x 6 prvků. Skládá se ze tří submatic A, B, D.

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{A} & \boldsymbol{B} \\ \boldsymbol{B} & \boldsymbol{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & B_{31} & B_{32} & B_{33} \\ B_{11} & B_{12} & B_{13} & D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} & D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} & D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \tag{31}$$

Matice A se nazývá matice membránové tuhosti. Popisuje tahovou tuhost ve střední rovině laminátu. Jednotlivé prvky transformované matice tuhosti k-té vrstvy jsou vynásobeny se vzdáleností mezi střední rovinou k-té vrstvy a střední rovinou laminátu. Výsledkem je součet jednotlivých součinů všech vrstev. Prvky matice jsou uvedeny v jednotkách N/mm.

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^{n} \left(\overline{Q_{ij}}\right)_k \cdot (h_k - h_{k-1}) \tag{32}$$

Matice B se nazývá matice vazebné tuhosti. Popisuje vztah mezi ohybem a deformací ve střední rovině laminátu. Pokud je laminát symetrický vůči jeho střední rovině, je matice B nulová. Prvky matice jsou uvedeny v jednotkách N.

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^{n} \left(\overline{Q_{ij}}\right)_k \cdot \left(h_k^2 - h_{k-1}^2\right) \tag{33}$$

Matice D se nazývá matice ohybové tuhosti. Popisuje ohybovou a krutovou tuhost ve střední rovině laminátu. Prvky matice jsou uvedeny v jednotkách N·mm.

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \cdot \sum_{k=1}^{n} \left(\overline{Q_{ij}}\right)_k \cdot \left(h_k^3 - h_{k-1}^3\right) \tag{34}$$

Matice poddajnosti laminátu je opět inverzní k matici tuhosti laminátu.

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{a} & \boldsymbol{b} \\ \boldsymbol{b} & \boldsymbol{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A} & \boldsymbol{B} \\ \boldsymbol{B} & \boldsymbol{D} \end{bmatrix}^{-1} \tag{35}$$

STANOVENÍ EKVIVALENTNÍ TUHOSTI LAMINÁTU

Pro výpočet tuhosti potahu sendviče pro tříbodovou ohybovou zkoušku je potřeba zjistit modul pružnosti v tahu laminátu v ose x obecného souřadnicového systému. K výpočtu potřebujeme matici tuhosti laminátu, respektive matici membránové tuhosti (A) a tloušťku celého laminátu (t_p). Při dodržení jednotek výpočtu a dosazení tloušťky v mm je získán modul pružnosti v MPa.

$$E_x = \frac{A_{11}}{t_p} \cdot \left(1 - \mu_{\mathrm{xy}} \cdot \mu_{\mathrm{yx}}\right) \tag{36}$$

$$kde:\ \mu_{xy} = -\frac{A_{12}}{A_{22}} \tag{37}$$

$$\mu_{yx} = -\frac{A_{12}}{A_{11}} \tag{38}$$

$$t_p = \sum_{k=1}^{n} t_{v_k} \tag{39}$$

4.2.2 KONTROLA POTAHU

Kontrola potahu je prováděna pro případ tahového působení na potah sendvičového panelu při zkoušce tříbodovým ohybem. Uvedený výpočet lze použít i pro jiné případy zatížení. Tento výpočet je proveden opět v programu Microsoft Excel. Ukázka je zachycena na Obr. 33.

Kontrola potahu formule (Facesheet failure)

q_x	90.93	[N/mm]
q_y	0	[N/mm]
q_{xy}	0	[N/mm]
m_x	0	[N.mm/mm]
m_y	0	[N.mm/mm]
m_{xy}	0	[N.mm/mm]

Přetvoření a zakřivení střední roviny laminátu

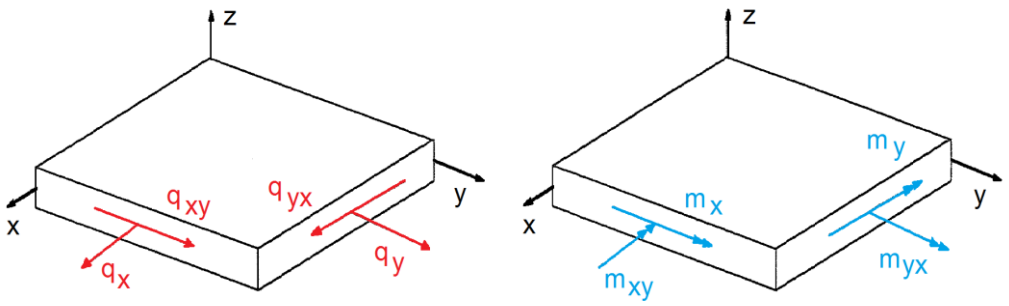
ε_{xo}	0.002935465	[mm]
ε_{yo}	-0.000625948	[mm]
γ_{xyo}	0	[mm]
k_x	0	[mm]
k_y	0	[mm]
k_{xy}	0	[mm]

Vrstva		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Deformace s obecném s.s.	[mm]	2.94E-03	2.94E-03	2.94E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
		-6.26E-04	-6.26E-04	-6.26E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Napětí v obecném s.s.	[MPa]	167.54	78.26	167.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		-29.76	59.52	-29.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Deformace v materiálovém s.s.	[mm]	2.94E-03	1.15E-03	2.94E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
		-6.26E-04	1.15E-03	-6.26E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
		0.00E+00	-3.56E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
napětí v materiálovém s.s.	[MPa]	167.54	68.89	167.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		-29.76	68.89	-29.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.00	-9.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Kritérium maximálního napětí		4.18	10.16	4.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
součinitel rezervy - RF		11.76	10.16	11.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.00	7.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pořadí poruch vrstev:		1	4	1										
		6	5	6										
			3											
minimum		1	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Napěťové kritérium Tsai-Wu	FI	0.0583	0.1596	0.0583										
Hoffmanovo kritérium	FI	0.0583	0.1596	0.0583										
Kvadratické kritérium Tsai-Hill	RF	1.90	4.20	1.90										

Obr. 33 Ukázka výpočtu kontroly potahu

DEFINOVÁNÍ ZATÍŽENÍ

Zatížení je zadáváno pomocí liniových sil (q) a liniových momentů (m). Jejich kladné směry jsou zobrazeny na Obr. 34.



Obr. 34 Kladné směry liniových sil a momentů

Liniová síla působící ve spodním potahu sendvičového panelu při tříbodové ohybové zkoušce se vypočítá podle následujícího vztahu. Jednotky liniové síly jsou uvedeny N/mm. Význam jednotlivých veličin vysvětluje Obr. 26.

$$q_x = \frac{F \cdot L}{4 \cdot b \cdot h} \tag{40}$$

NAPĚTÍ VE VRSTVÁCH LAMINÁTU

Níže je popsán postup pro určení napětí v jednotlivých vrstvách. Nejprve je nutné vypočítat deformaci (ε^0) a zakřivení (k) střední roviny laminátu. Výsledek je získán součinem matice poddajnosti laminátu s liniovým zatížením. Liniovou sílu v ose x je dosazena z předchozího vzorce, ostatní složky liniových sil a momentů jsou nulové.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ b & d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_{xy} \\ m_x \\ m_y \\ m_{xy} \end{bmatrix} \tag{41}$$

V dalším kroku je zjištěna deformace k-té laminy v obecné souřadnicové soustavě. Hodnota z_k vyjadřuje vzdálenost mezi střední rovinou k-té vrstvy a střední rovinou laminátu. Je znázorněna na Obr. 32.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z_k \cdot \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \tag{42}$$

Pomocí deformačně napěťových a transformačních vztahů lze získat napětí v jednotlivých vrstvách (σ_{12}).

- Napětí ve vrstvě v obecném souřadnicové soustavě:

$$\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{xy}} = \overline{\boldsymbol{Q}} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{xy}} \tag{43}$$

- Deformace laminy v materiálové souřadnicové soustavě:

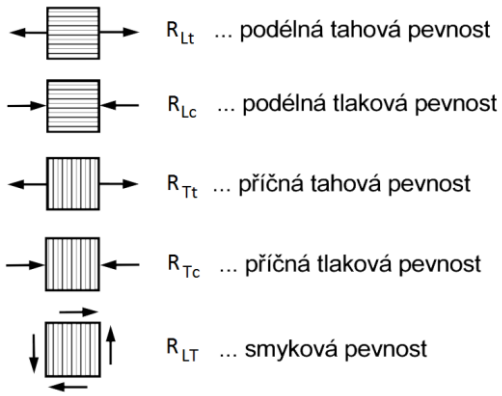
$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{12}} = \boldsymbol{T}^{\boldsymbol{T}^{-1}} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{xy}} \tag{44}$$

- Napětí ve vrstvě v materiálové souřadnicové soustavě:

$$\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{12}} = \boldsymbol{Q} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{12}} \tag{45}$$

PORUCHOVÁ KRITÉRIA

Napětí nebo deformace v jednotlivých vrstvách je možné porovnat s dovolenými hodnotami, jež je třeba znát. Na Obr. 35 jsou popsány všechny potřebné pevnosti. Pomocí poruchových kritérií jsou získány součinitelé rezervy (reserve factor) vůči rozhodujícímu meznímu stavu. Pro názornost jsou zde uvedeny jen dva druhy napěťových poruchových kritérií. [23], [25], [26]



Obr. 35 Vysvětlení dovolených hodnot pevností laminy [26]

Kritérium maximálního napětí

Jde o nejjednodušší kritérium, které je založeno na porovnávání tahových a tlakových pevností v podélném a příčném směru laminy a také ve smyku. Součinitel rezervy musí být větší než jedna. Hodnota s nejmenším součinitelem rezervy představuje nejvyšší riziko selhání. [15]

$$RF = \min\left(\frac{R_{Lt}}{\sigma_{1t}}, \left|\frac{R_{Lc}}{\sigma_{1c}}\right|, \frac{R_{Tt}}{\sigma_{2t}}, \left|\frac{R_{Tc}}{\sigma_{2c}}\right|, \frac{R_{LT}}{\tau_{12}}\right) > 1 \tag{46}$$

Kvadratické kritérium Tsai-Hill

Kvadratická kritéria většinou definuje FI (*Failure Indices*), který musí být menší jedna. Pokud se nachází ve vrstvě tlakové napětí, je nutné ve vztahu použít odpovídající tlakovou pevnost. Výsledek je také možné popsat součinitelem rezervy, jež má následující tvar pro toto kritérium: [26]

$$RF = \frac{1}{\sqrt{FI}} > 1 \tag{47}$$

$$FI = \left(\frac{\sigma_1}{R_L}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{R_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{R_{LT}}\right)^2 - \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{R_L^2} < 1 \tag{48}$$

4.2.3 VÝPOČET PANELŮ PRO TŘÍBODOVÝ OHYB

Pravidly FSAE je dána velikost vzorku, proto šířka panelu je b = 275 mm. Rozteč podpor L byla zvolena 400 mm. Rozměr t_1 odpovídá tloušťce vnitřního potahu a t_2 vnějšímu potahu. Tyto tloušťky jsou získány z navržených kompozitních laminátů. Pro úplnost je níže definován výpočet výšky panelu (h) a efektivní výšky (d). Všechny rozměry jsou znázorněny na **X.** Zdroje výpočtů tuhosti: [22], [24], [25]

$$\mathrm{h} = \mathrm{t}_1 + c + t_2 \tag{49}$$

$$\mathrm{d} = \frac{\mathrm{t}_1}{2} + c + \frac{\mathrm{t}_2}{2} \tag{50}$$

VÝPOČET TUHOSTI PANELU

Obecně ohybová tuhost panelu (D) se skládá ze tří dílčích tuhostí. Nejdůležitější je tuhost potahů vzhledem ke střední rovině panelu. Dále následuje tuhost potahu vůči své střední rovině a tuhost jádra vzhledem ke střední rovině panelu. Jednotky ohybové tuhosti jsou uvedeny v N·m^2 nebo N·mm^2.

$$D = E_p \cdot \frac{b \cdot t \cdot d^2}{2} + E_p \cdot \frac{b \cdot t^3}{6} + E_c \cdot \frac{b \cdot c^3}{12} \tag{51}$$

Pokud jsou považovány potahy za velmi tenké, je možné prostřední člen rovnice zanedbat. V případě použití lehkého jádra s nízkým modulem pružnosti lze také zanedbat i poslední člen rovnice. S tímto členem bude však dále počítáno. Následující výpočet ohybové tuhosti sendvičového panelu lze použít i pro panely s různými skladbami potahů. Modul pružnosti v tahu pro oba potahy sendvičového panelu je získán z výpočtu podle klasické teorie laminátů.

$$D = \frac{E_{p_1} \cdot t_1 \cdot E_{p_2} \cdot t_2 \cdot d^2 \cdot b}{E_{p_1} \cdot t_1 + E_{p_2} \cdot t_2} + \frac{E_c \cdot c^3 \cdot b}{12} \tag{52}$$

Jádro sendvičového panelu se na celkové tuhosti podílí hlavně smykovou tuhostí. Modul pružnosti ve smyku voštiny (G_c) byl ve výpočtech volen pro tužší směr L (G_L). Jednotky smykové pevnosti jsou uvedeny v N.

$$S = G_c \cdot \frac{b \cdot d^2}{c} \doteq G_c \cdot b \cdot d \tag{53}$$

V případě tříbodové ohybové zkoušky se průhyb uprostřed panelu vypočítá jako součet deformací tuhých potahů a jádra.

$$\delta = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot D} + \frac{F \cdot L}{4 \cdot S} \tag{54}$$

Úpravou předchozího vzorce je získán gradient působící síly na deformaci uprostřed panelu. Z tohoto důvodu již nepotřebujeme znát velikost působící síly. Jednotky mohou být uvedeny v N/mm.

$$\frac{\delta}{F} = \frac{L^3}{48 \cdot D} + \frac{L}{4 \cdot S} \tag{55}$$

$$Grad = \frac{F}{\delta} = \frac{1}{\frac{L^3}{48 \cdot D} + \frac{L}{4 \cdot S}} \tag{56}$$

Náhradní ohybová tuhost panelu se započtením smykové tuhosti jádra má tento tvar:

$$D_{pan} = \frac{Grad \cdot L^3}{48} \tag{57}$$

Modul pružnosti panelu lze získat dělením tuhosti panelu kvadratickým modulem průřezu potahů (I nebo J_x).

$$E_{pan} = \frac{D_{pan}}{J_x} \tag{58}$$

$$kde\colon\ J_x = \frac{b \cdot (h^3 - c^3)}{12} \tag{59}$$

Dle pravidel FSAE by měly být testovány dvě ocelové trubky reprezentující boční nárazovou strukturu vozu při tříbodové ohybové zkoušce. Porovnáním teoretické a testované tuhosti EI trubek lze získat korekci (RC), v dokumentu SES označovanou Rig Compliance v jednotkách N/mm. Pro další části primární struktury je možné testovat pouze jednu ocelovou trubku. Modul pružnosti panelu s touto korekcí lze vypočítat dle následujících vztahů:

$$Grad' = \frac{1}{Grad_{panel}^{-1} - RC^{-1}} \tag{60}$$

$$D'_{pan} = \frac{Grad' \cdot L^3}{48} \tag{61}$$

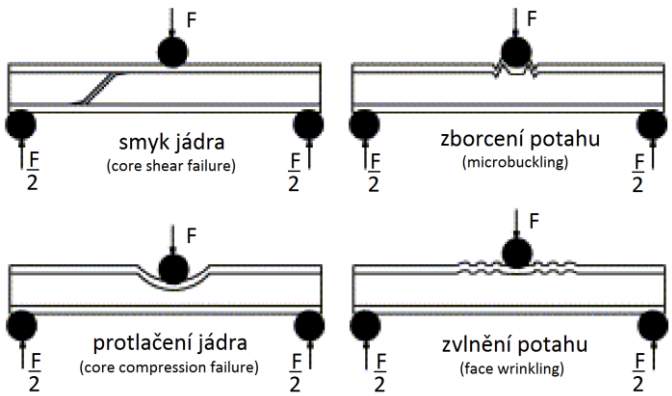
$$E'_{pan} = \frac{D'_{pan}}{J_x} \tag{62}$$

Ohybová tuhost porovnávána s tuhostí trubek EI pro jednotlivé části primární struktury formule se získá modifikací předchozích vztahů. Rozdíl mezi vzorkem a panelem monokoku je v jiné šířce panelu, popřípadě kvadratického momentu průřezu, pokud jsou zadávány údaje z CAD modelu.

$$D'_M = E'_{pan} \cdot \frac{b_M \cdot (h^3 - c^3)}{12} \tag{63}$$

4.2.4 KONTROLA SENDVIČOVÉHO PANELU

Sendvičové panely se kontrolují na několik případů poruch. Při řešeném případu zatížení panelu postačuje provést následující kontroly. Panely musí vydržet požadovaná zatížení. V opačném případě je nutné nevyhovující parametry panelu upravit. Zdroje výpočtů kontroly: [22], [25]



Obr. 36 Druhy poruch u tříbodové ohybové zkoušky [25]

KONTROLA JÁDRA SENDVIČOVÉHO PANELU

Smykové napětí v jádru panelu (core shear failure) musí být menší než smyková pevnost jádra, v tomto případu v podélném směru voštiny L.

$$\tau_c = \frac{F}{2 \cdot d \cdot b} \tag{64}$$

Protlačení jádra při lokálním tlakovém zatížení (core compression failure) musí být menší než pevnost jádra v tlaku. Součin šířky panelu a šířky w představuje styčnou plochu mezi zatěžujícím tělesem a panelem zobrazeným na Obr. 26.

$$\sigma_c = \frac{F}{b \cdot w} \tag{65}$$

Zvlnění potahu - kritické smykové napětí (Critical shear crimping stress) musí být větší než napětí v potahu.

$$\sigma_{cs} = \frac{G_c \cdot h}{t_1 + t_2} \tag{66}$$

KONTROLA POTAHU SENDVIČOVÉHO PANELU

Napětí v potahu (facing stress) se vypočítá dle následujícího vzorce. Kontrola pevnosti jednotlivých vrstev laminátu je provedena v kapitole 4.2.2.

$$\sigma_p = \frac{F \cdot L}{4 \cdot h \cdot b \cdot t} \tag{67}$$

Zvlnění potahu (face wrinkling) musí být větší než pevnost potahu.

$$\sigma_{kr} = \frac{1}{2} \cdot \left(E_p \cdot E_c \cdot G_c\right)^{\frac{1}{3}} \tag{68}$$

4.3 PARAMETRY NAVRŽENÝCH PANELŮ

Na základě předchozích vztahů jsou vypočítány parametry navržených sendvičových panelů s kompozitními potahy pro jednotlivé části monokokové struktury. Vybrané údaje jsou uvedeny v Tabulka 5. První část tabulky popisuje geometrické parametry panelu s označením použitého jádra, následují výsledné tuhosti, modul pružnosti a hmotnosti panelů. V závěru tabulky se pro porovnání uvádějí parametry ocelových trubek pro jednotlivé části monokoku.

Tabulka 5 Navržené parametry sendvičových panelů

Veličina	Ozn.	Jed.	FHB	FBSS	SIS ver	SIS hor
Výška panelu	h	mm	26,30	27,18	27,18	15,24
Efektivní výška panelu	d	mm	25,65	26,09	26,09	13,97
Tloušťka jádra	c	mm	25	25	25	12,7
Označení jádra		-	ECA 3,2-48	ECA 3,2-48	ECA 3,2-48	ECM 6,4-82
Tloušťka vnitřního potahu	t_1	mm	0,66	1,09	1,09	1,26
Tloušťka vnějšího potahu	t_2	mm	0,64	1,09	1,09	1,29
Šířka panelu formule	b_f	mm	230	350	300[1)]	200
Předběžná délka panelu	a_f	mm	830	940	500	500
Modul pružnosti vnitřního potahu (KLT)	E_{p1}	MPa	46 936	45 446	45 446	54 478
Modul pružnosti vnějšího potahu (KLT)	E_{p2}	MPa	40 698	45 446	45 446	58 105
Gradient	Grad	N/mm	1 238	1 738	1 738	1 359
Korigovaný gradient[2)]	Grad‘	N/mm	1 807	3 116	3 116	2 078
Modul pružnosti panelu	E'_{pan}	MPa	41 069	40 746	40 746	80 946
Tuhost zkušebního panelu	D'_{vzor}	$N \cdot m^2$	1 651	2 318	2 318	2 770
Tuhost panelu formule	D'_f	$N \cdot m^2$	2 015	5 288	4 533	2 014
Min. rozměry trubky		mm	Ø25,4x1,6	Ø25,4x1,2	Ø25,4x1,6	Ø25,4x1,6
Počet trubek		ks	1	3	2	1
Minimální tuhost podle požadovaných trubek	EI_t	$N \cdot m^2$	1702	4017	3404	1702
Porovnání tuhostí		**%**	**118**	**132**	**133**	**118**
Plošná hmotnost potahů	m_{pj}	g/m^2	1 870	3 106	3 106	3 612
Plošná hmotnost panelu	m_{panj}	g/m^2	3 070	4 306	4 306	4 653
Hmotnost vzorku	m_{vzor}	g	422	592	592	639
Hmotnost panelu formule	m_f	g	586	1 417	646	465

[1)] do SESu lze zapsat maximální rozměr 325 mm

[2)] korigováno hodnotou RC = 3932 N/mm - získaná testem dvou trubek

Tabulka 6 Navržené parametry sendvičových panelů

Veličina	Ozn.	Jed.	FB	SHBE	FF[1)]
Výška panelu	h	mm	28,28	15,28	16,88
Efektivní výška panelu	d	mm	26,64	14,00	15,94
Tloušťka jádra	c	mm	25	12,7	15
Označení jádra		-	C1 - 3,2-48	ECM 6,4-82	ECA 3,2-29
Tloušťka vnitřního potahu	t_1	mm	1,32	1,29	0,94
Tloušťka vnějšího potahu	t_2	mm	1,96	1,29	0,94
Šířka panelu formule	b_f	mm	100	200	160
Předběžná délka panelu	a_f	mm	-	220	940
Modul pružnosti vnitřního potahu (KLT)	E_{p1}	MPa	40 215	66 735	59 273
Modul pružnosti vnějšího potahu (KLT)	E_{p2}	MPa	42 408	66 735	59 273
Gradient	Grad	N/mm	1 871	1 609	654
Korigovaný gradient[2)]	Grad‘	N/mm	3 570	2 722	784
Modul pružnosti panelu	E'_{pan}	MPa	29 738	104 156	31 864
Tuhost zkušebního panelu	D'_{vzor}	$N \cdot m^2$	4 760	3 629	1 045
Tuhost panelu formule	D'_f	$N \cdot m^2$	3 537	2 640	608
Min. rozměry trubky		mm	Ø25,4x1,6	Ø25,4x2,4	Ø20x1[1)]
Počet trubek		ks	2	1	1
Minimální tuhost podle požadovaných trubek	EI_t	$N \cdot m^2$	3404	2318	540
Porovnání tuhostí		**%**	**104**	**114**	**113**
Plošná hmotnost potahů	m_{pj}	g/m^2	4 761	3 760	2 678
Plošná hmotnost panelu	m_{panj}	g/m^2	5 961	4 801	3 113
Hmotnost vzorku	m_{vzor}	g	820	660	428
Hmotnost panelu formule	m_f	g	370	206	468

[1)] rozměr trubky Ø20x1 je zvolen podle rámu Dragon 6, v dokumentu SES se tato položka nenachází

[2)] korigováno hodnotou RC = 3932 N/mm - získaná testem dvou trubek

Z uvedených výsledků vyplývá, že tuhosti navržených panelů jsou vyšší než tuhosti trubek. Při návrhu je bráno v úvahu, že testované vzorky mohou mít nižší tuhost, než je předpokládáno výpočtem. Z tohoto důvodu je zvolena vyšší výpočtová tuhost.

Voštiny byly vybírány vzhledem k nejnižší hmotnosti panelu pro dané tuhosti i s přihlédnutím k aktuální dispozici týmu TU Brno Racing. Parametry uvedených voštin jsou zobrazeny v Tabulka 7.

Tabulka 7 Parametry voštin

Označení voštiny	Zkratka	Velikost buňky	Hustota	Pevnost	Modul pružnosti	Smyková pevnost		Modul pružnosti ve smyku	
				V tlaku		Směr L	Směr W	Směr L	Směr W
		mm	kg/m³	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
C1 - 3,2-48	T	3,2	48	1,8	138*	1,35	0,8	42	25
ECA 3,2-48	U	3,2	48	2,1	138*	1,32	0,72	48	30
ECA 3,2-29	V	3,2	29	0,8	55*	0,62	0,38	27	16
ECM 6,4-82	W	6,4	82	4,5	1020**	2,4	1,4	430	220

* Hodnoty jsou získány z katalogu Hexcel pro obdobné voštiny HRH 10

** Hodnota je získána z katalogu Plascore pro obdobnou voštinu PCGA-XR1 3003

Skladba potahů pro jednotlivé části struktury monokoku je zaznamenána níže. Uvedené pořadí vrstev je zobrazeno od první kladené vrstvy do formy. Z toho vyplývá, že vnější potah je prvním položeným potahem. Pro zkrácení zápisu kódování voštiny jsou zvolena náhradní písmena TUVW. Materiálové a pevnostní údaje potahů se nacházejí v další kapitole.

Tabulka 8 Skladba navrhnutých panelů

Struktura	Vrstvení
FHB	$[\,0°_{C200} / 45°_{C200} / 0°_{CA165} / \boldsymbol{U} / 0°_{C200} / 45°_{C200} / 0°_{C200}\,]$
FBSS	$[\,45°_{C200} / (0°_{UDC150} / 90°_{UDC150})_2 / 45°_{CA165} / \overline{\boldsymbol{U}}\,]_S$
SIS ver	$[\,45°_{C200} / (0°_{UDC150} / 90°_{UDC150})_2 / 45°_{CA165} / \overline{\boldsymbol{U}}\,]_S$
SIS hor	$[\,45°_{C200} / 0°_{UDC150} / 0°_{CA165} / 0°_{UDC150} / 90°_{UDC150} / 0°_{UDC150} / 45°_{CA165} / \boldsymbol{W} /$ $/ 45°_{CA165} / (0°_{UDC150} / 90°_{UDC150})_2 / 0°_{UDC150} / 45°_{C200}\,]$
FB	$[\,45°_{C200} / 0°_{3\ C200} / 45°_{2\ C200} / 0°_{2\ C200} / 45°_{CA165} / \boldsymbol{T} /$ $/ 0°_{C200} / 45°_{2\ C200} / 0°_{2\ C200} / 45°_{C200}\,]$
SHBE	$[\,45°_{C200} / (0°_{UDC150} / 90°_{C160})_2 / 0°_{UDC150} / 45°_{CA165} / \overline{\boldsymbol{W}}\,]_S$
FF	$[\,45°_{C200} / 0°_{UDC150} / 0°_{C160} / 0°_{UDC150} / 45°_{CA165} / \overline{\boldsymbol{V}}\,]_S$

Vysvětlení: C160 a C200 – uhlíková tkanina o plošné hmotnosti 160 a 200 g/m²

CA165 – hybridní tkanina o plošné hmotnosti 165 g/m²

UDC150 – uhlíková jednosměrná vlákna o plošné hmotnosti 160 a 200 g/m²

5 TESTOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

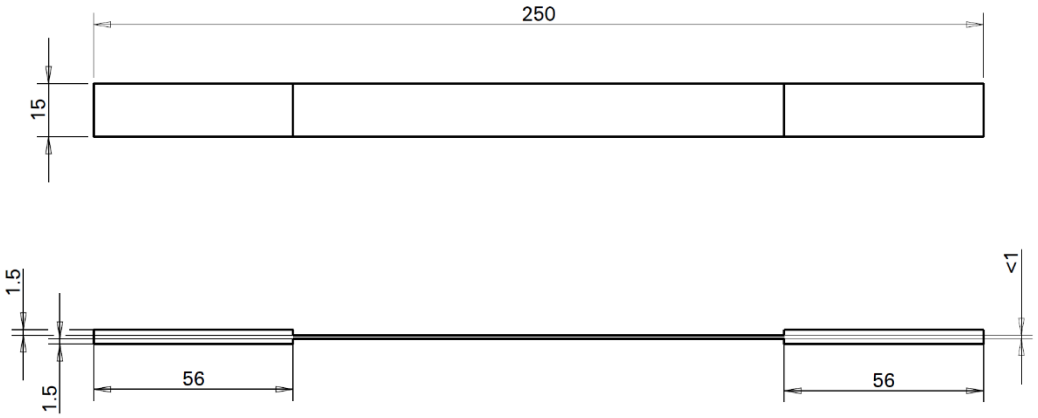
Tato kapitola věnuje pozornost zjištění pevnostních vlastností používaných kompozitních materiálů pomocí tahové zkoušky. Tyto parametry jsou používány pro výpočet tuhosti sendvičových panelů a také jsou aplikovány při určení torzní tuhosti pomocí MKP softwaru.

Dále se zabývá ověřením ohybové tuhosti analyticky navržených sendvičových panelů při tříbodové ohybové zkoušce. V závěru kapitoly jsou testovány vzorky sendvičových panelů pomocí smykové zkoušky, která je vyžadována pravidly FSAE pro kontrolu potahů panelů.

5.1 TAHOVÁ ZKOUŠKA KOMPOZITNÍCH VZORKŮ

Tato statická zkouška patří k základním metodám sloužícím k hodnocení mechanických vlastností materiálů. Používá se k určení modulu pružnosti v tahu a pevnosti v tahu, popřípadě Poissonova čísla. Zkouška spočívá v měření podélného prodloužení zkušebního tělesa ve vztahu k působící síle během tahové zkoušky, která je až do poruchy prováděná při konstantní rychlosti posuvu. Pro zjištění Poissonova čísla je zapotřebí měřit i příčné zúžení vzorku.

Tahová zkouška je provedena podle normy ASTM D3039/D3039M-14, jež uvádí postup zkoušky, rozměry vzorků a možné druhy poruch. Podle této normy byly zhotoveny vzorky dle předepsaných rozměrů.



Obr. 37 Rozměry normovaného vzorku

5.1.1 PŘÍPRAVA VZORKŮ

Nejprve jsou vyrobeny zkušební lamináty na rovné lamino desce pomocí technologie ručního laminování s dodatečným vakuováním. Touto technologií jsou také zhotoveny sendvičové panely a předpokládá se její využití při produkci monokoku. Během vytvrzování jsou modely udržovány při pokojové teplotě a podtlaku v rozmezí -0,73 až -0,87 kPa.

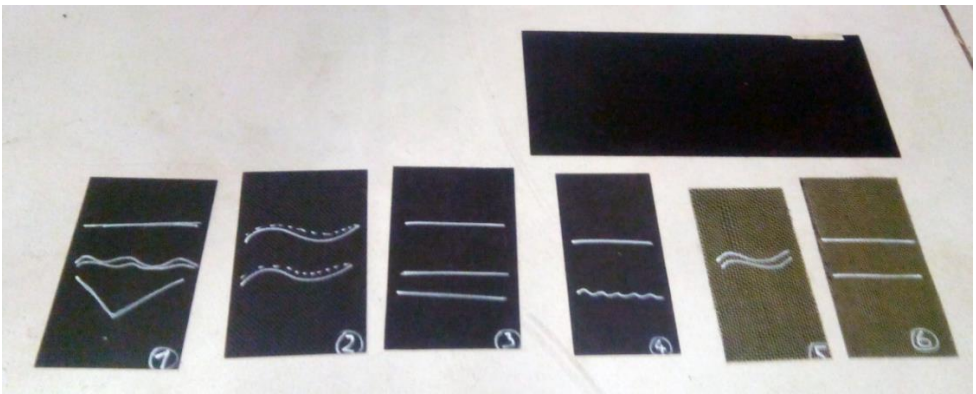
Je použita epoxidová pryskyřice Biresin CR 82 s tvrdidlem CH80-2 od německé společnosti Sika. Výztuže vzorků jsou uhlíkové tkaniny, uhlíková jednosměrná vlákna a hybridní tkaniny s různými plošnými hmotnostmi. Uvedené tkaniny jsou produkty Kordcarbon a jednosměrná vlákna pochází od společnosti SGL Group. Typy uhlíkových vláken tkanin nesou označení Toray T300 3K 200 tex, pro aramidová vlákna tkanin pak Twaron 2200 121 tex, pro uhlíková jednosměrná vlákna T700 SC 60E 12K 800 tex o plošné hmotnosti 100g/m^2 a pro uhlíková jednosměrná vlákna HTS40 F13 12K 800 tex o plošné hmotnosti 150g/m^2. Skladba jednotlivých vzorků je uvedena v Tabulka 9.

Tabulka 9 Skladby jednotlivých vzorků

Označení vzorků	Popis	Kódování
1	4 vrstvy uhlíkové tkaniny s plátnovou vazbou o plošné hmotnosti 160 g/m^2 pod úhlem 0°	$[\,0°_{C160\,P}]_4$
2	3 vrstvy uhlíkové tkaniny s keprovou vazbou o plošné hmotnosti 200 g/m^2 pod úhlem 0°	$[\,0°_{C200\,T}]_3$
3*	4 vrstvy uhlíkové tkaniny s keprovou vazbou o plošné hmotnosti 200 g/m^2 pod úhlem 2x 0° a 2x 90°	$[\,0°_{2\ \ C200\,T}\,/\,/\,45°_{2\ \ C200\,T}]$
4	2 vrstvy uhlíkové tkaniny s keprovou vazbou o plošné hmotnosti 280 g/m^2 pod úhlem 0°	$[\,0°_{C280\,T}]_2$
5	3 vrstvy hybridní tkaniny s keprovou vazbou o plošné hmotnosti 165 g/m^2 pod úhlem 0°	$[\,0°_{CA165\,T}]_3$
6	3 vrstvy hybridní tkaniny s keprovou vazbou o plošné hmotnosti 190 g/m^2 pod úhlem 0°	$[\,0°_{CA190\,T}]_3$
7	5 vrstev jednosměrných uhlíkových vláken s PES mřížkou o plošné hmotnosti 150 g/m^2 pod úhlem 0°	$[\,0°_{UDC150}]_5$
8	5 vrstev jednosměrných uhlíkových vláken s PES mřížkou o plošné hmotnosti 100 g/m^2 pod úhlem 0°	$[\,0°_{UDC100}]_5$

*Tato skladba byla volena pro ověření tuhosti a pevnosti možného potahu sendvičového panelu

Vylaminované vzorky jsou ořezány na rozměry 350 x 150 mm a 350 x 200 mm. Deska na příložky má rozměry 600 x 300 mm.

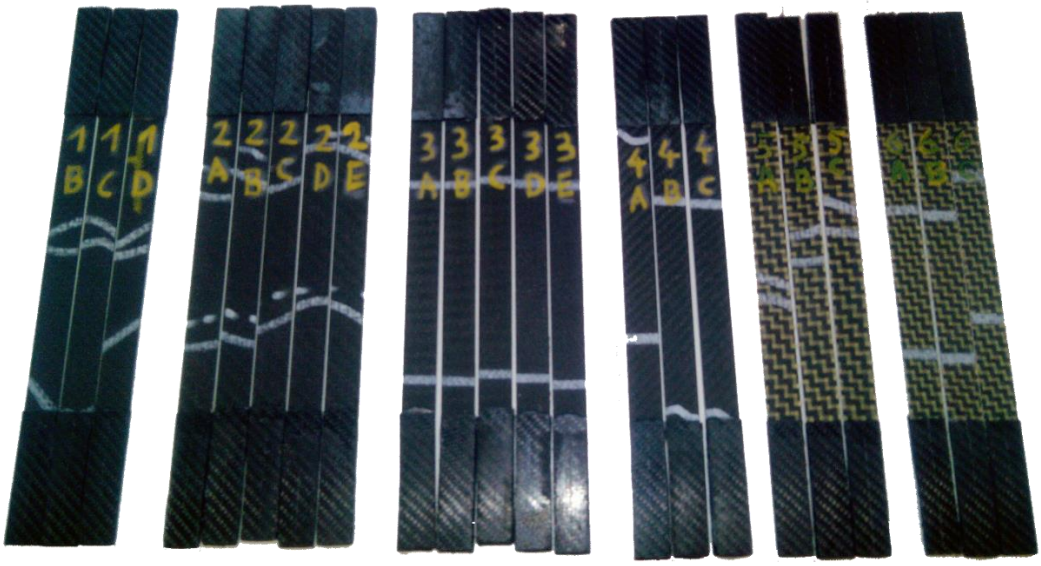


Obr. 38 Vylaminované a ořezané vzorky

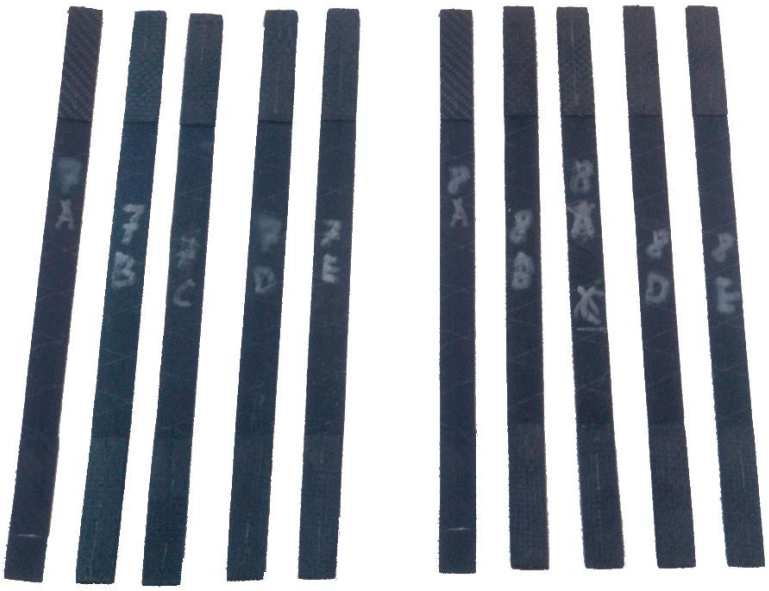
Normované vzorky jsou následně vyřezány vodním paprskem z uvedených laminátových desek společně s jejich příložkami. Tato metoda zaručuje nejmenší ovlivnění řezných hran. Celkem je získáno 34 obdélníkových vzorků a 136 příložek. Značení na laminátech zabraňuje záměně vzorků po jejich vyřezání.

Příložky jsou připojovány ke vzorkům pomocí lepidla Loctite 3090, což představuje dvousložkové vteřinové lepidlo. Díky jeho vlastnostem je možné relativně rychlé přilepení a navíc se vyznačuje dostatečnou pevností, aby nedocházelo k oddělení příložek během tahové zkoušky.

U všech vzorků je provedeno měření jejich tlouštěk a šířek na třech místech (nahoře, uprostřed a dole). Jejich průměrná hodnota je uvedena v Tabulka 10.



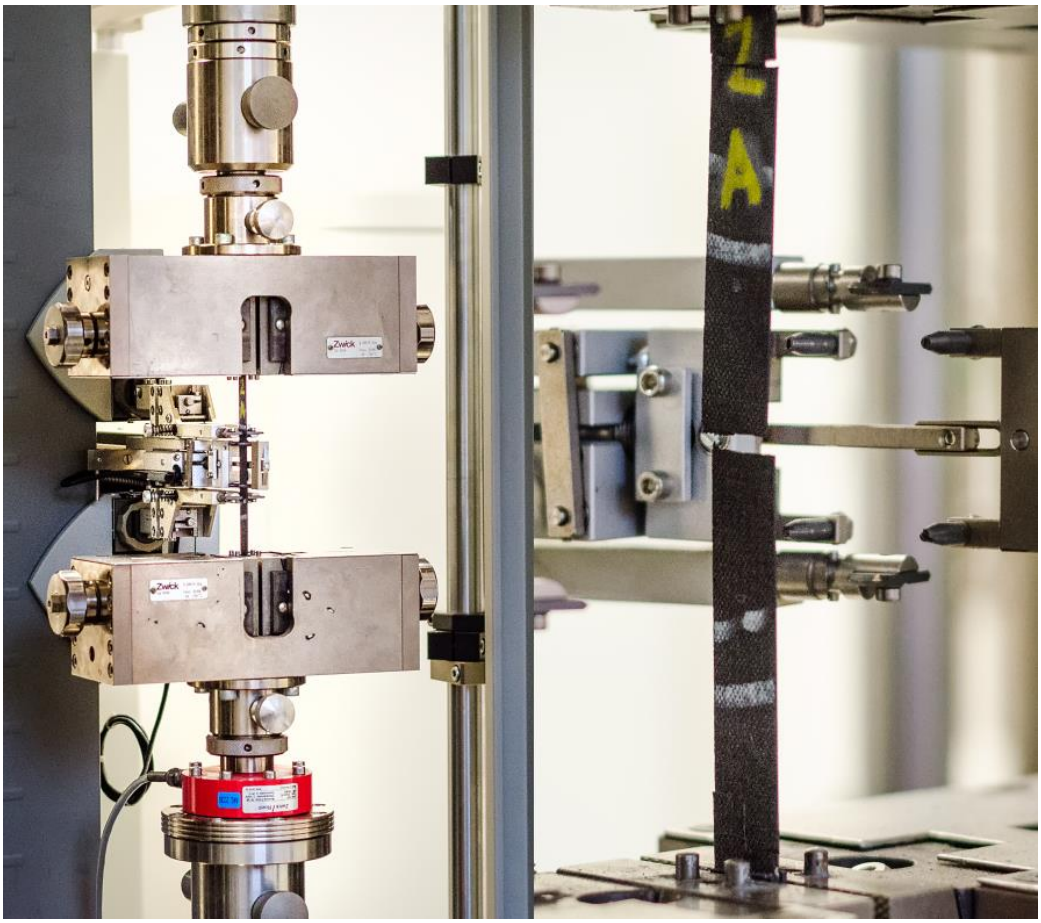
Obr. 39 Připravené zkušební vzorky 1 – 6



Obr. 40 Připravené zkušební vzorky 7 a 8

5.1.2 TESTOVÁNÍ VZORKŮ

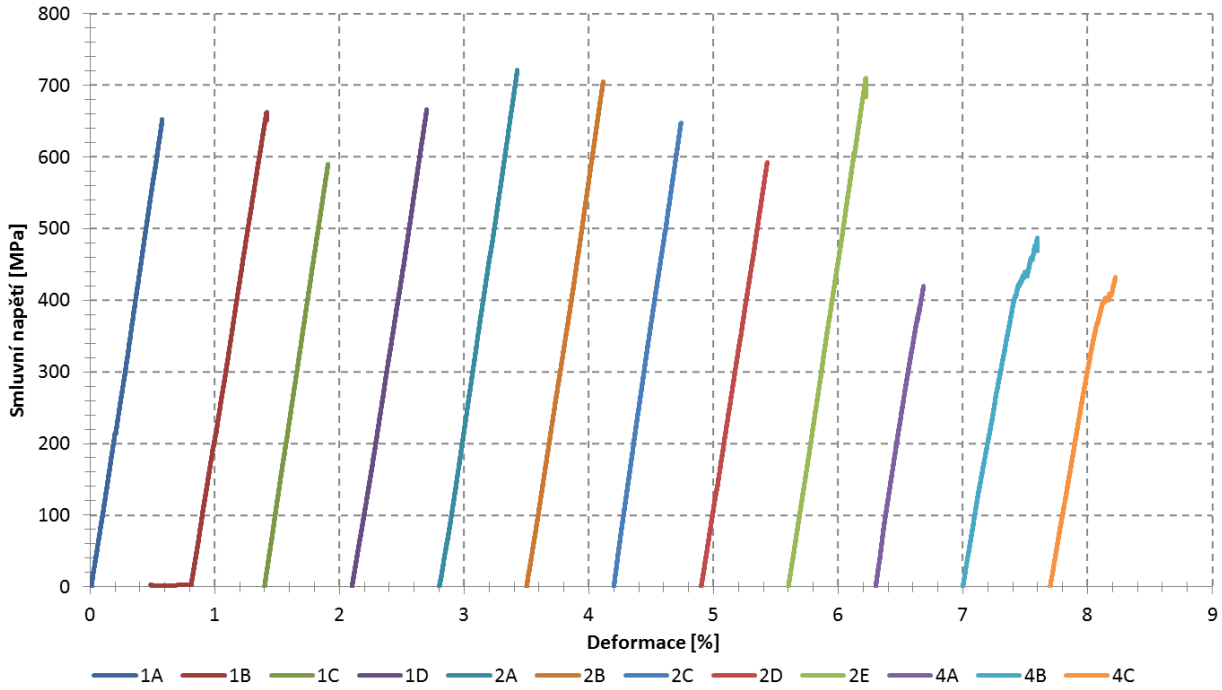
Zkoušení vyrobených sendvičových panelů se uskutečnilo na Ústavu materiálových věd a inženýrství, Fakulty strojního inženýrství, VUT v Brně. Zkoušení hotových vzorků proběhlo na zkušebním stroji Zwick Roell Z250 s dynamometry řady Xforce K pro nominální zatížení 50 kN. Pomocí rysek na kleštinách byly vzorky vystředěny, aby směr zatížení skutečně souhlasil se směrem vláken. Odchylka několika stupňů může vést ke značně nižším hodnotám. Testovací rychlost byla zvolena 2 mm/min, referenční hodnota pro prodloužení l_0 = 50 mm. Údaje zaznamenané při tahové zkoušce se skládají z působícího zatížení a přetvoření ve směru zatížení.



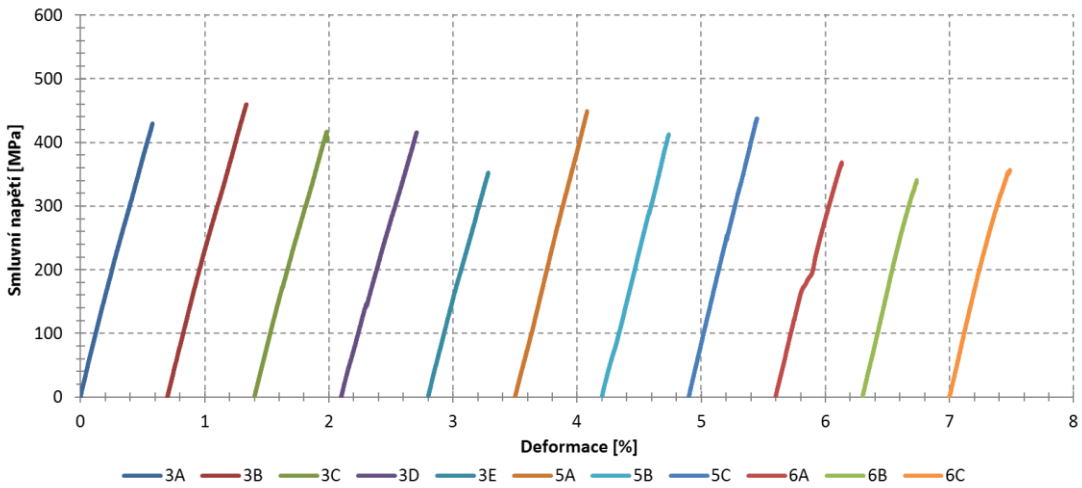
Obr. 41 Uchycení vzorku v kleštinách zkušebního stroje a detail porušeného vzorku

5.1.3 VÝSLEDKY TESTŮ

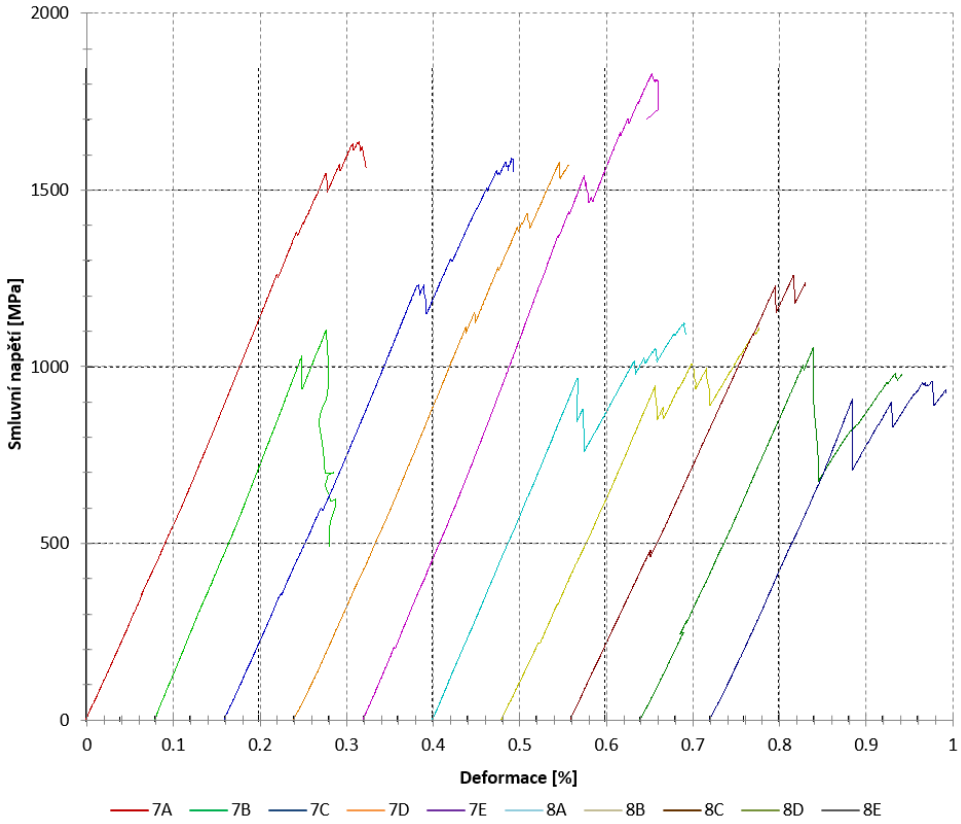
Z naměřených údajů byly sestaveny tahové diagramy, které zobrazují závislost smluvního napětí na poměrné deformaci v procentech. Dále byl určen modul pružnosti v tahu a smluvní mez pevnosti.



Obr. 42 Tahový diagram vzorků z uhlíkových tkanin 1, 2, 4

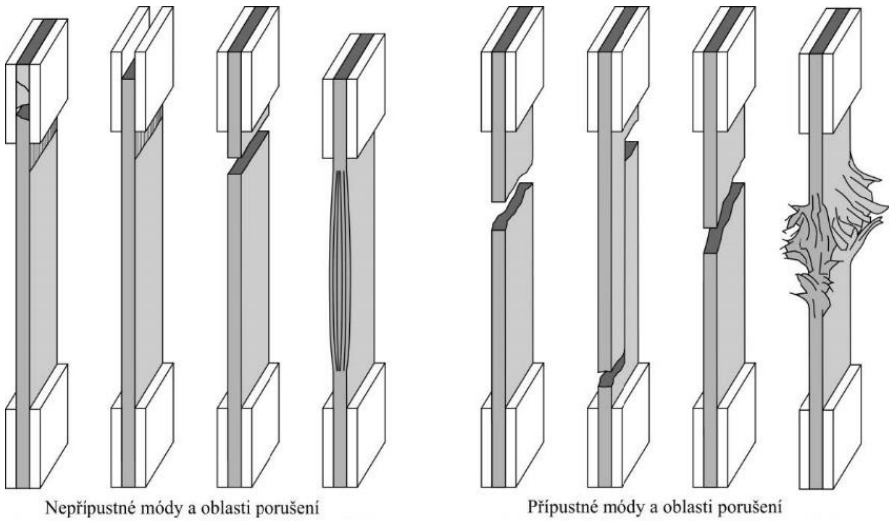


Obr. 43 Tahový diagram vzorků z uhlíkových a hybridních tkanin 3, 5, 6



Obr. 44 Tahový diagram vzorků z jednosměrných uhlíkových vláken 7 a 8

Norma ASTM D 3039 dále definuje přípustné a nepřípustné typy porušení, což je zachyceno na Obr. 45. Vzorky s nepřípustným porušením jsou vyznačeny oranžovou barvou v Tabulka 10.



Obr. 45 Nepřípustné a přípustné typy porušení vzorků při tahové zkoušce [23]

Obr. 46 Porušení zkušebních vzorků 1 - 6

Obr. 47 Explozivní porušení jednosměrných uhlíkových vláken 7 a 8

Tabulka 10 Hodnoty získané z tahové zkoušky

Materiál	Vzorek	a_0	b_0	S_0	E	F_m	R_m
		mm	mm	mm^2	GPa	N	MPa
C160 P	1A	0.73	14.97	10.93	56.77	7 135	653
	1B	0.75	14.97	11.23	54.22	7 436	662
	1C	0.74	14.97	11.08	57.84	6 531	590
	1D	0.74	14.97	11.08	55.01	7 386	667
C200 T	2A	0.67	15	10.05	58.99	7 244	721
	2B	0.66	15	9.90	56.21	6 975	705
	2C	0.67	15	10.05	60.31	6 513	648
	2D	0.66	15	9.90	55.40	5 870	593
	2E	0.67	15	10.05	57.45	7 130	710

C200 T*	3A	0.88	14.9	13.11	37.82	5 628	429
	3B	0.87	14.9	12.96	37.99	5 962	460
	3C	0.89	14.9	13.26	35.97	5 534	417
	3D	0.86	14.9	12.81	33.64	5 333	416
	3E	0.87	14.9	12.96	36.50	4 573	353
C280 T	4A	0.66	14.88	9.82	56.62	4 121	420
	4B	0.65	14.88	9.67	48.59	4 716	488
	4C	0.66	14.88	9.82	50.47	4 243	432
CA165 T	5A	0.6	14.93	8.96	40.36	4 023	449
	5B	0.59	14.93	8.81	39.29	3 633	412
	5C	0.59	14.93	8.81	41.09	3 855	438
CA190 T	6A	0.72	14.92	10.74	28.05	3 960	369
	6B	0.7	14.92	10.44	42.45	3 560	341
	6C	0.73	14.92	10.89	40.79	3 891	357
UDC150	7A	0.84	15.5	13.02	112.34	21326	1640
	7B	0.78	15.83	12.35	119.73	13633	1100
	7C	0.86	15.08	12.97	106.00	20629	1590
	7D	0.85	15.88	13.50	112.12	21339	1580
	7E	0.79	15.9	12.56	117.03	22991	1830
UDC100	8A	0.72	14.92	10.74	115.12	12076	1120
	8B	0.74	15.23	11.27	106.53	12524	1110
	8C	0.72	15.15	10.91	101.75	13732	1260
	8D	0.73	15.2	11.10	108.78	11688	1050
	8E	0.75	15.21	11.41	111.57	10943	959

kde: t_0 – průměrná tloušťka vzorku

b_0 – průměrná šířka vzorku

S_0 – průřez vzorku

$$S_0 = b_0 \cdot t_0 \tag{69}$$

E – modul pružnosti v tahu – lineární část diagramu podle Hookova zákona

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \tag{70}$$

F_m – maximální síla

R_m – smluvní mez pevnosti

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \tag{71}$$

Modul pružnosti a smluvní mez pevnosti byly statisticky zpracovány. Byla zjištěna jejich průměrná hodnota, směrodatná odchylka a variační koeficient. Do výpočtu nebyly zahrnuty nepřípustné vzorky. Po tomto zúžení výběru hodnot jsou u vzorku 6 pouze dvě hodnoty, což už nelze považovat za statistický údaj.

Tabulka 11 Statistický rozbor modulu pružnosti a pevnosti

Materiál	Vzorek	Parametr	x̄	s	V̄
			MPa	MPa	%
C160 P	1	E	55 890	1 427	2,55
		R_m	653	31,14	4,85
C200 T	2	E	57 452	1 792	3,11
		R_m	695	48,21	7,14
C200 T*	3	E	36 384	1 573	4,32
		R_m	431	17,65	4,10
C280 T	4	E	51 896	3 430	6,61
		R_m	446	29,55	6,62
CA165 T	5	E	40 248	741	1,84
		R_m	433	15,30	3,53
CA190 T	6	E	41 620	827	1,99
		R_m	356	11,41	3,21
UDC150	7	E	113 440	3 917	3,50
		R_m	1 660	100,75	6,07
UDC100	8	E	108 550	4 527	4,16
		R_m	1 100	98,47	8,51

kde: x̄ – průměrná hodnota

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \tag{72}$$

s – směrodatná odchylka

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} x_i^2}{n} - \bar{x}^2} \tag{73}$$

V – variační koeficient

$$V = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \tag{74}$$

5.1.4 DEFINOVÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Na základě statistických údajů z tahové zkoušky byly stanoveny mechanické vlastnosti použitých kompozitních materiálů. Tyto hodnoty byly následně zaokrouhleny. Modul pružnosti v příčném směru byl stanoven stejný jako v podélném směru. Obdobně to platí i pro pevnost v tahu. Byla zvolena poloviční pevnost v tlaku v podélném a příčném směru.

Naměřené hodnoty vzorku 4 s tkaninou C280 T nelze považovat za správné, jelikož vzorky 1 a 2 se stejnými uhlíkovými vlákny měly vyšší pružnost i pevnost. Z tohoto důvodu byla pevnost stanovena na stejnou hodnotu jako u C160 P. Modul pružnosti je vypočítán jako průměr vzorků 1 a 2. Zbylé hodnoty byly zadány s přihlédnutím k vlastnostem použitých materiálů a mechanickým parametrům podobným kompozitním laminátům. Tloušťka lamin je vypočítaná jako průměrná tloušťka tahových vzorků podělena počtem vrstev. Hustota laminy je získána jako průměrná hodnota ze zvážených a odměřených vzorků. Když jsou hodnoty tkaniny C200 T zadány do výpočtů podle klasické laminární teorii, vychází modul pružnosti

v tahu pro skladbu vzorku 3 na 40 215 MPa, což je o 10,5 % vyšší hodnota než průměrná a o 6,1% vyšší hodnota než u vzorku 3A. [27]

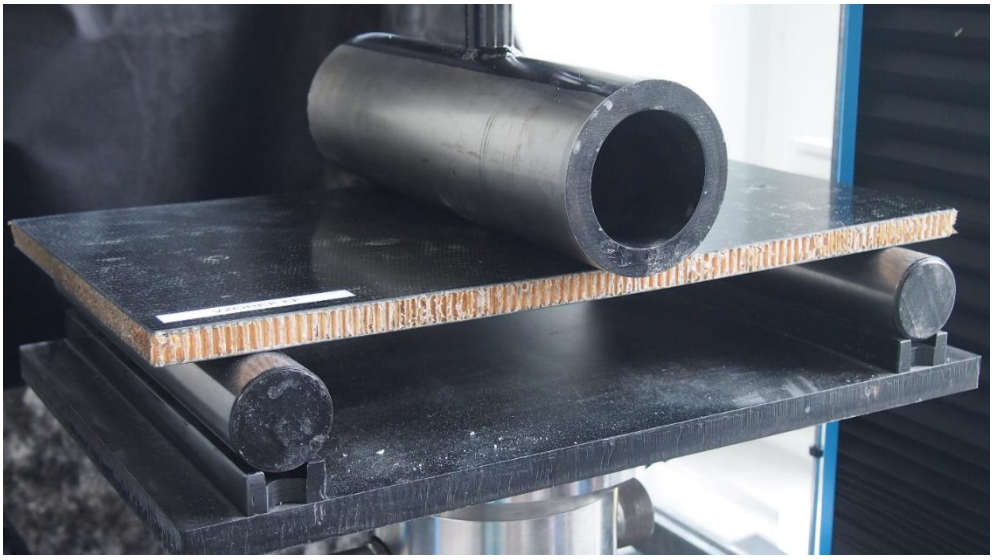
Tabulka 12 Mechanické parametry kompozitních materiálů

		Uhlíkové tkaniny			Hybridní tkaniny		Jednosměrná uhlíková vlákna	
Označení	**Jednotky**	**C160**	**C200**	**C280**	**CA165**	**CA190**	**UDC100**	**UDC150**
$E_L = E_1$	[MPa]	55 890	57 450	56 410	40 300	41 600	108 500	113 000
$E_T = E_2$	[MPa]	55 890	57 450	56 410	40 300	41 600	4 770	4 990
G_{12}	[MPa]	2 590	2 630	2 700	2 270	2 270	4 030	4 210
μ_{12}	[-]	0,037	0,037	0,037	0,1	0,1	0,28	0,28
R_{Lt}	[MPa]	650	700	650	440	350	1 100	1 660
R_{Lc}	[MPa]	325	350	325	220	180	555	795
R_{Tt}	[MPa]	650	700	650	440	360	50	50
R_{Tc}	[MPa]	325	350	325	220	180	200	200
R_{TL}	[MPa]	68	70	69	70	60	50	50
t	[mm]	0,185	0,220	0,330	0,197	0,240	0,146	0,168
ρ	[kg/m^3]	1460	1460	1460	1 340	1 340	1 440	1 440
m_p	[g/m^2]	270	321	482	264	322	210	242

5.2 TŘÍBODOVÁ OHYBOVÁ ZKOUŠKA SENDVIČOVÉHO PANELU

Sendvičové panely použité na monokokovou strukturu musí být fyzicky testovány dle pravidel FSAE a jejich tuhost musí být rovna či větší než tuhost ocelových profilů v dané části monokoku.

Jde o nejběžnější ohybovou zkoušku, která je vhodná pro křehké materiály, u nichž je průhyb měřítkem deformační schopnosti. Zkušební vzorek je zatížen silou, jež působí uprostřed mezi dvěma podporami. Ohybový moment vyvolaný touto silou způsobí v průřezu horního potahu tlakové napětí, v průřezu dolního potahu tahové napětí. Jádro přenáší smykové zatížení. Změnou vzdálenosti podpor lze dosáhnout velkých ohybových momentů i při malé zatěžující síle, což je předností této zkoušky. Schéma zkoušky je uvedeno na Obr. 26 a jeho rozměry jsou znázorněny nad tímto schématem. Velikost vzorku je dána 275 mm x 500 mm. Kovové těleso působí na panel a podpory přesahují šířku zkoušeného vzorku.



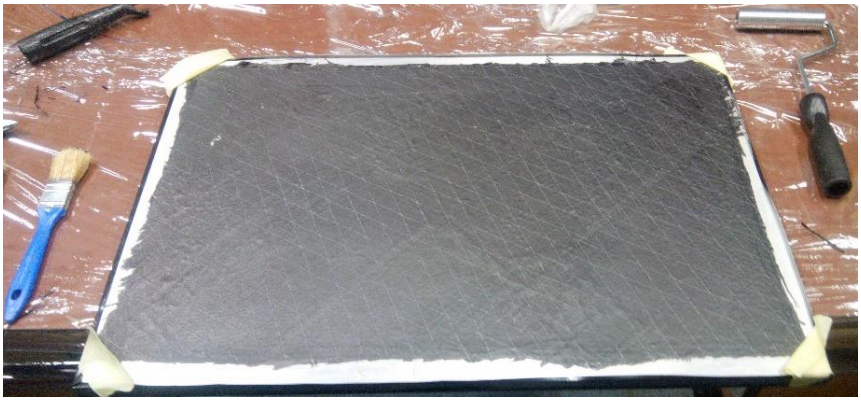
Obr. 48 Ukázka zkoušeného sendvičového panelu

5.2.1 PŘÍPRAVA VZORKŮ

Sendvičové panely jsou připraveny ve třech fázích. V první fázi je vyroben jeden vzorek SIS_ver_01, ve druhé vzorek FF_01 a ve třetí vzorky SIS_hor_01, SHBE_01 a FF_02. V každé z těchto fází je použit odlišný postup výroby. Technologie ručního laminování s dodatečným vakuováním je aplikována u všech vzorků. Podtlak je udržován v rozmezí -0,73 až -0,87 kPa. Opět je použita epoxidová pryskyřice Biresin CR 82 s tvrdidlem CH80-2 od německé společnosti Sika. Materiál potahů je vybírán z nabídky testovaných vzorků při tahové zkoušce.

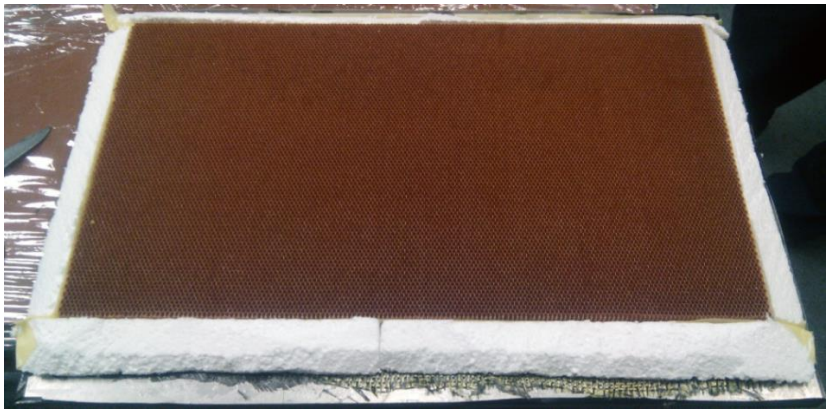
I. FÁZE

Výroba prvního vzorku SIS_ver_01 byla provedena s představou, že stejný postup se zvolí i při výrobě samotného monokoku. To znamená, že vylaminovat formu monokoku najednou je časově i fyzicky náročné, jelikož u první vrstvy je kladen značný požadavek na preciznost kvality pohledové vrstvy. Z tohoto důvodu byl panel vyroben ve třech krocích. Nejprve se vylaminovaly první čtyři vrstvy za pomocí vakua. Druhý den se odstranila strhávací tkanina a na ní se kladly dvě vrstvy, voštinové jádro a další dvě vrstvy. Třetí den byly stejným způsobem přidány zbylé vrstvy panelu. Třetí krok byl volen z důvodu snížení množství pryskyřice v oblasti voštiny za účelem snížení hmotnosti výsledného panelu. Skladba panelu je uvedena v Tabulka 13.

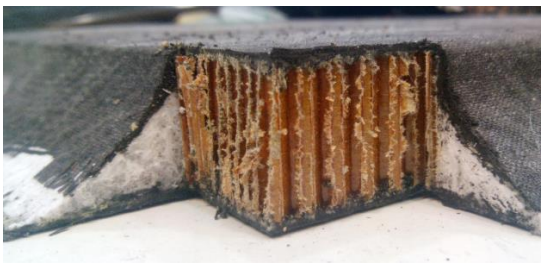


Obr. 49 Připravená plocha pro druhý krok laminování

Při laminování voštiny byly na jejich okrajích umístěny zkosené polystyrénové příložky, které zabraňují případnému bočnímu zborcení buněk voštiny. Tento způsob zkosení se doporučuje od tloušťky voštiny 10 mm. Vrstvy ve styku s voštinou jsou vybírány z hybridní tkaniny, aby na nich bylo dobře viditelné prosycení. U čistě uhlíkových vláken lze správné prosycení hůře rozeznat. Na závěr byl panel zarovnán na předepsaný rozměr a byla změřena jeho průměrná tloušťka z minimálně pěti míst. Tato úprava panelu byla realizována pomocí oscilační pily.



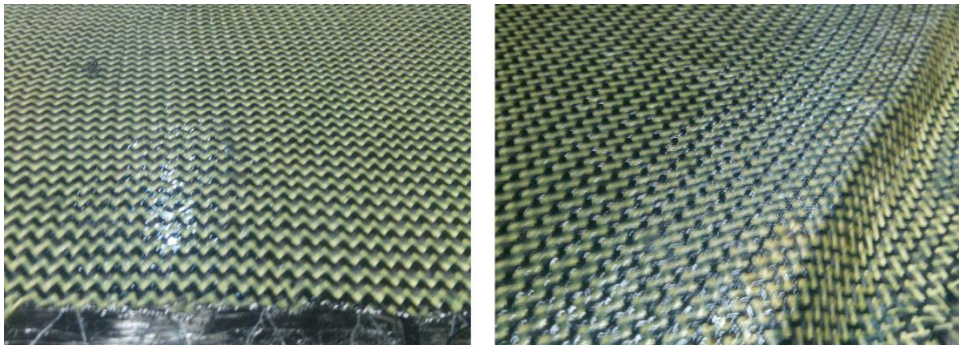
Obr. 50 Uložení polystyrénových příložek



Obr. 51 Ořezání vylaminovaného panelu

II. FÁZE

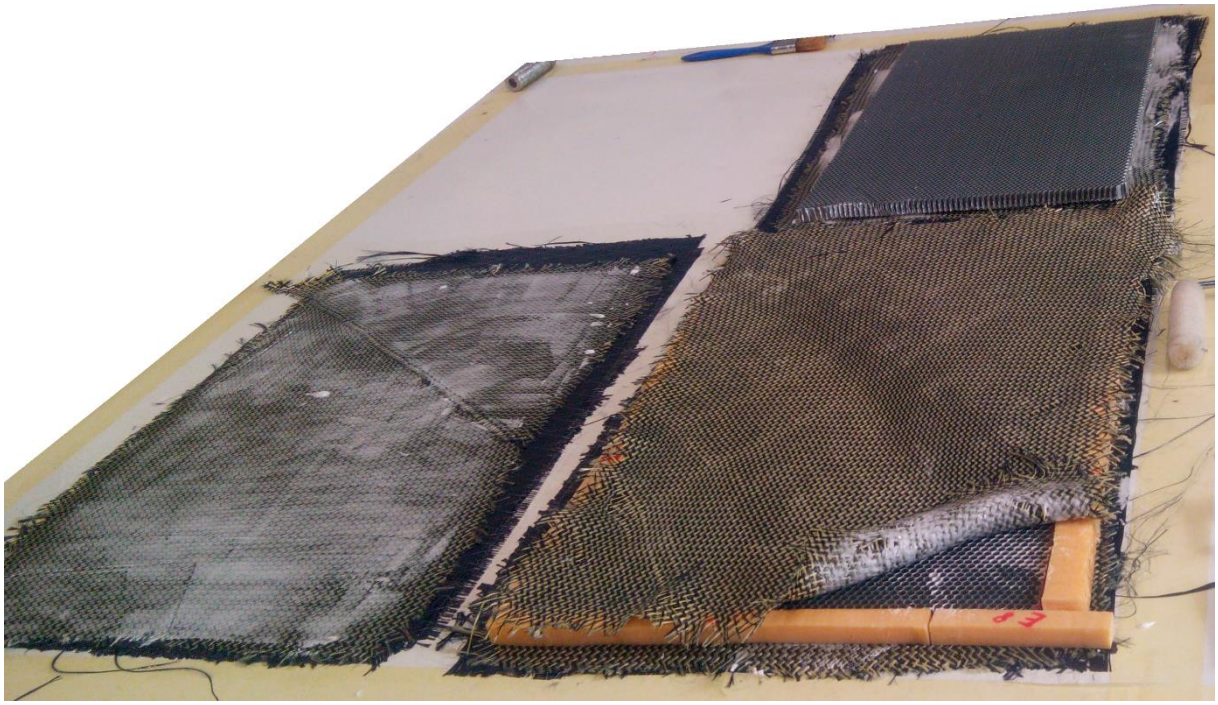
Po odzkoušení prvního panelu byla zjištěna nedostatečná přilnavost horního potahu k voštině. Po zkoušce bylo možné celý potah odstranit. Z tohoto důvodu byl další vzorek FF_01 vyroben pouze ve dvou krocích. Druhý a třetí krok z I. fáze byl sjednocen. Větší pozornost byla soustředěna na prosycení tkanin spojených s voštinou s cílem vytvořit větší můstky z pryskyřice mezi voštinou a vrstvou hybridní tkaniny.



Obr. 52 Prosycené hybridní tkaniny umístěné pod a nad voštinou

III. FÁZE

V této fázi byly vyrobeny tři vzorky: SIS_hor_01, SHBE_01 a FF_02. První dva uvedené vzorky obsahovaly hliníkovou voštinu. U těchto voštin je větší problém s přilnavostí k potahům. Nomexové voštiny jsou tvořeny fenolickým papírem, se kterým se pryskyřice lépe pojí. Pro lepší spojení hybridních tkanin a hliníkové voštiny byla použita pryskyřice zahuštěná odlehčenými mikrobalony s mletými bavlněnými vlákny.



Obr. 53 Výroba zkušebních vzorků ve III. fázi

Tabulka 13 Skladba vzorků pro tříbodovou zkoušku

Struktura	Vrstvení
SIS_ver_01	$[\,0°_{C200}\ /\ (\pm 45°_{UDC150})_2\ /\ 45°_{CA165}\ /\ \overline{\mathbf{90°}_{\boldsymbol{C1-3{,}2-48}\ (\boldsymbol{c=25\ mm})}}\ ]_S$
FF_01	$[\,0°_{C200}\ /\ \pm 45°_{UDC100}\ /\ 0°_{UDC100}\ /\ 45°_{CA165}\ /\ \mathbf{0°}_{\boldsymbol{ECA\ 3{,}2-29}\ (\boldsymbol{c=15\ mm})}\ /$ $/\ 45°_{CA165}\ /\ 0°_{UDC100}\ /\ 0°_{C200}\,]$
SIS_hor_01	$[45°_{C200}\ /\ 0°_{UDC150}\ /\ 0°_{CA165}\ /\ 0°_{UDC150}\ /\ 90°_{UDC150}\ /\ 0°_{UDC150}\ /\ 45°_{CA165}\ /$ $/\ \mathbf{0°}_{\boldsymbol{ECM\ 6{,}4-82}\ (\boldsymbol{c=12.7\ mm})}\ /\ 45°_{CA165}\ /\ (0°_{UDC150}\ /\ 90°_{UDC150})_2\ /\ 0°_{UDC150}\ /$ $/\ 45°_{C200}]$
SHBE_01	$[45°_{C200}\ /\ (0°_{UDC150}\ /\ 90°_{C160})_2\ /\ 0°_{UDC150}\ /\ 45°_{CA165}\ /$ $/\ \overline{\mathbf{0°}_{\boldsymbol{ECM\ 6{,}4-82}\ (\boldsymbol{c=12.7\ mm})}}\ ]_S$
FF_02	$[\,45°_{C200}\ /\ 0°_{UDC150}\ /\ 0°_{C160}\ /\ 0°_{UDC150}\ /\ 45°_{CA165}\ /\ \overline{\mathbf{0°}_{\boldsymbol{ECA\ 3{,}2-29}\ (\boldsymbol{c=15\ mm})}}\ ]_S$

5.2.2 TESTOVÁNÍ VZORKŮ

Zkoušení vyrobených sendvičových panelů bylo prováděno na Leteckém ústavu, Fakulty strojního inženýrství, VUT v Brně. Pro zatěžování sloužil univerzální elektromechanický zkušební stroj LabTest 6.500 umožňující vyvinout sílu do 500 kN. Pro testování těchto vzorků byl navržen speciální tuhý přípravek splňující požadavky pravidel FSAE. Vzorek byl vystředěn vůči podporám a zatěžovacímu tělesu, které přečnívaly přes okraje sendvičového panelu. Zatěžování probíhalo testovací rychlostí 2 mm/min do porušení panelu. Údaje zaznamenané při zkoušce se skládaly z působícího zatížení a deformace ve směru zatížení.

Nejprve je potřeba provést ověření správnosti zkušebního zařízení pomocí ocelových trubek. Dvě ocelové trubky jsou porovnávány se sendvičovým panelem reprezentující boční nárazovou strukturu (SIS_ver). Byl použit následující rozměr trubek: Ø25 x 2 - 500 mm. Pro ostatní části je možné zvolit opět tyto dvě ocelové trubky nebo může být testována pouze jedna. V tomto případě má stejný rozměr.

Obr. 54 Zkouška tříbodového ohybu ocelové trubky

5.2.3 VÝSLEDKY TESTŮ A JEJICH POROVNÁNÍ

URČENÍ KOREKCE ZKUŠEBNÍHO PŘÍPRAVKU

Z naměřených hodnot byly sestaveny diagramy znázorňující vliv zatížení na deformaci. Zatěžování probíhalo do průhybu 21 mm. U prvního testu byly provedeny zkoušky jedné a dvou trubek. Z diagramu byla určena směrnice lineární části. V dokumentu SES je tato směrnice označována $grad_{trubek}$. Dále je vypočítána tuhost EI_{test} testovaných ocelových trubek: [21]

$$Grad_{trubek} = \frac{F_2 - F_1}{z_2 - z_1} = 2267\ N/mm \tag{75}$$

$$EI_{test} = \frac{Grad_{trubek} \cdot L^3}{48} = 3022\ N \cdot m^2 \tag{76}$$

Následně byla vypočítána korekce mezi teoretickou a testovanou tuhostí trubek. Tato korekce je nazývána Rig Compliance (RC). Jestliže má testovaná ocelová trubka větší ohybovou tuhost než vypočtenou teoretickou tuhost, je RC = 0.

$$EI_{teor} = \frac{n \cdot \pi \cdot \left(D_o^4 - D_i^4\right) \cdot E_{ocel}}{64} = 7670\ N \cdot m^2 \tag{77}$$

$$RC = \left(\frac{1}{Grad_{trubek}} - \frac{L^3}{48 \cdot EI_{teor}}\right)^{-1} = 3741\ N/mm \tag{78}$$

Na základě těchto výpočtů byly stanoveny korekce pro oba případy. Pro uvedené analytické výpočty všech panelů byla použita korekce s dvěma trubkami, která je méně příznivá.

Tabulka 14 Korekční hodnoty pro tříbodovou zkoušku panelů

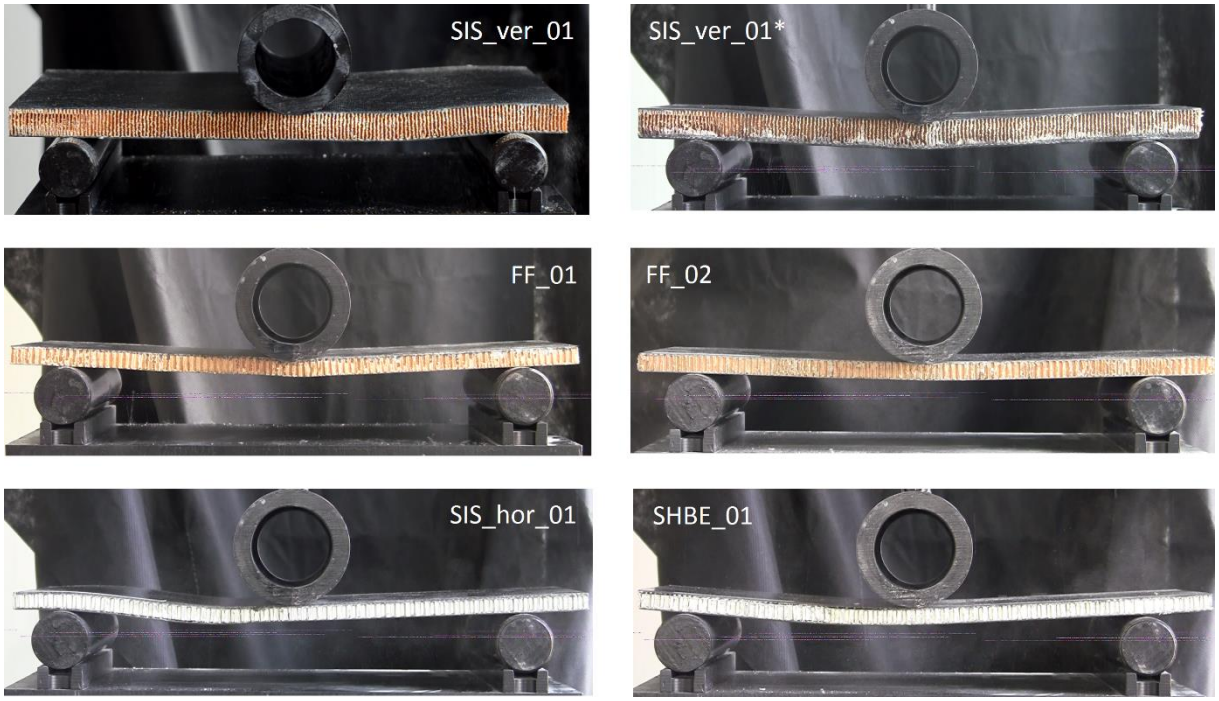
		1x Ø25 x 2 mm	2x Ø25 x 2 mm
$Grad_{trubek}$	N/mm	1 211	2 336
RC	N/mm	2 093	3 932

TESTOVANÉ SENDVIČOVÉ PANELY

Z grafu zatížení na deformaci byly zjištěny směrnice ($Grad_{panel}$) lineárních částí křivek, avšak nyní je do výpočtu zahrnuta korekce RC. Cílem této zkoušky bylo získat hodnoty modulu pružnosti E_{test} a meze pevnosti panelu σ_{UTS}. S těmito hodnotami je v dokumentu SES kontrolována ekvivalence s ocelovými profily. Pro sendvičový panel reprezentující boční nárazovou strukturu (SIS_ver) musí být maximální síla z ohybové zkoušky větší než 4 891 N. Tato hodnota odpovídá teoretickému zatížení dvou ocelových trubek o minimálním rozměru dle pravidel FSAE při zvolené rozteči podpor přípravku.

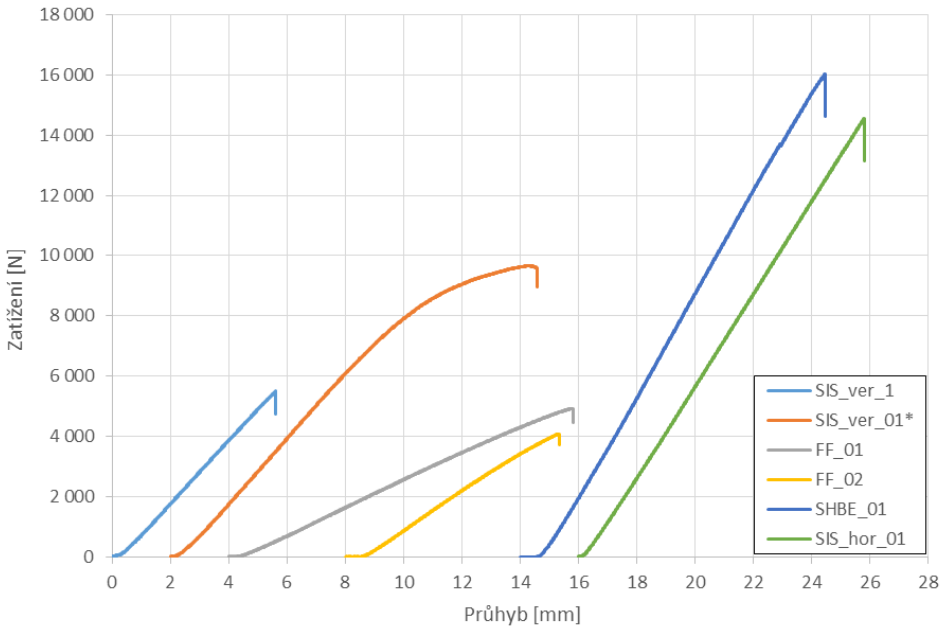
$$E_{test} = \frac{Grad' \cdot L^3}{48 \cdot J_{panelu}} \tag{79}$$

$$\sigma_{UTS} = \frac{F_{max} \cdot \frac{L}{2} \cdot (c + t_1 + t_2)}{4 \cdot J_{panelu}} \tag{80}$$



Obr. 55 Porušení zkoušených sendvičových struktur

U prvního vzorku SIS_ver_01 došlo k již zmíněnému odtržení potahu od voštinového jádra při nízkém zatížení. Důvodem byla příliš nízká přilnavost potahu, proto hodnota maximálního napětí není adekvátní. Po zkoušce byl původní horní potah odstraněn a v rámci druhé fáze byl přilaminován nový potah. U druhé zkoušky tohoto vzorku SIS_ver_01* došlo ke zborcení jádra pod zatěžujícím tělesem. Stejný případ nastal i u vzorku FF_01 a FF_02. U panelů SIS_hor_01 a SHBE_01 s hliníkovými voštinami nastalo částečné smykové porušení s následným odtržením potahů. Zkoušení většiny těchto vzorků bylo natáčeno kamerou. Okamžik poruch uvedených panelů je zdokumentován na Obr. 55.

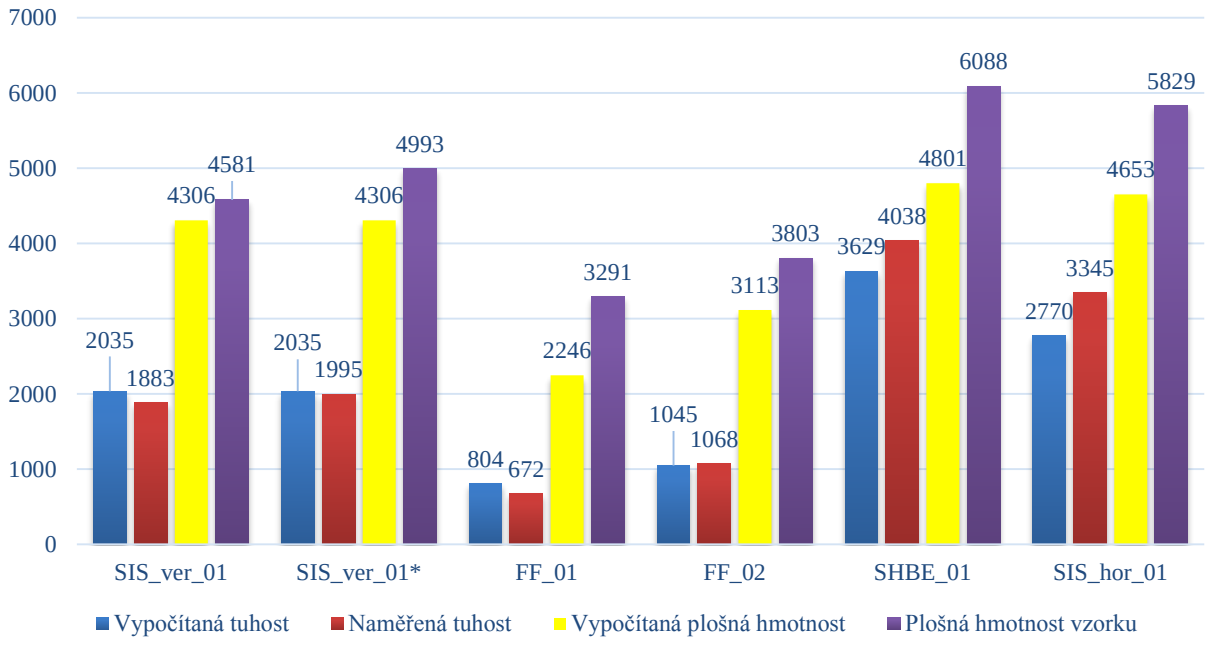


Obr. 56 Diagram z tříbodové ohybové zkoušky všech sendvičových panelů

Tabulka 15 Porovnání navržených a měřených parametrů

Ozn.	Jed.	SIS_ver_1	SIS_ver_1*	FF_01	FF_02	SHBE_01	SIS_hor_01
Navržené hodnoty							
h	mm	27,18	27,18	16,42	16,88	15,28	15,24
c	mm	25	25	15	15	12,7	12,7
t_1	mm	1,09	1,09	0,56	0,94	1,29	1,26
t_2	mm	1,09	1,09	0,86	0,94	1,29	1,29
b_f	mm	300	300	200	160	200	200
a_f	mm	500	500	940	940	220	500
E'_{pan}	MPa	19 958	19 958	33 409	31 864	104 156	80 946
D'_{vzor}	$N \cdot m^2$	2 035	2 035	804	1 045	3 629	2 770
D'_f	$N \cdot m^2$	2 405	2 405	560	608	2 640	2 014
TR	mm	Ø25,4x1,6	Ø25,4x1,6	Ø20x1[1)]	Ø20x1[1)]	Ø25,4x2,4	Ø25,4x1,6
Počet	ks	2	2	1	1	1	1
EI_t	$N \cdot m^2$	3404	3404	540	540	2318	1 702
m_{panj}	g/m^2	4 306	4 306	2 446	3 113	4 801	4 653
m_{vzor}	g	592	592	336	428	660	639
m_f	g	775	775	281	468	206	465
Naměřené hodnoty							
E'_{pan}	MPa	18 448	19 548	29 179	32 482	115 980	97 440
D'_{vzor}	$N \cdot m^2$	1 883	1 995	672	1 068	4 038	3 345
D'_f	$N \cdot m^2$	2 054	2 177	489	621	2 937	2 433
F_{max}	N	5 515	9 665	4 922	4 083	16 032	14 547
h	mm	27,3	27,31	16,49	17,00	15,75	15,50
m_{panj}	g/m^2	4 581	4 993	3 291	3 803	6 088	5 829
m_{vzor}	g	629,9	686,5	452,5	522,9	837,1	801,5
Procentuální porovnání [%]							
Tuhost vzorků		93	98	83	102	111	121
Tuhost formule		60	64	91	115	127	143
Plošná hmotnost vzorků		106	116	147	122	127	125

Z procentuálního vyjádření tuhosti vzorků vyplývá, že první tři vzorky měly nižší ohybovou tuhost, než bylo predikováno a naopak další tři vzorky dosáhly větší tuhosti. Ve druhém případě je porovnávána tuhost panelu formule s minimálními požadovanými tuhostmi trubek. Z důvodu příčné orientace voštiny a chyby ve výpočtovém dokumentu byla tuhost prvního panelu poměrně nízká. U posledních tří vzorků byla ohybová tuhost počítána s rezervou 12 – 18%. Poslední testovaný vzorek dosáhl vyšší hodnoty o 43% než je stanovené minimum. V posledním řádku Tabulka 15 je uveden poměr plošné hmotnosti vyrobených vzorku k odhadované plošné hmotnosti. Při přelaminování potahu prvního vzorku došlo k navýšení hmotnosti téměř o 10%. U posledních tří vzorků s použitým plnivem byla dosažena vyšší hmotnost o více než 20%. Průměrná hodnota hmotnosti panelu u všech vzorků vzrostla o 23% ve srovnání s odhadovanou hodnotou. Grafické porovnání výsledků je možné vidět na Obr. 57.

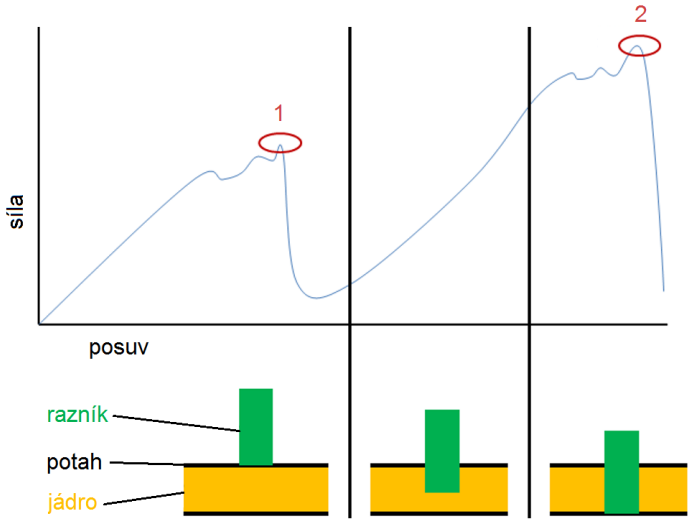


Obr. 57 Porovnání tuhostí a hmotností zkušebních vzorků

5.3 SMYKOVÁ ZKOUŠKA SENDVIČOVÉHO PANELU

Smyková zkouška (*Shear Test*) se také někdy nazývá *Pull-up Test*. Jde o zjištění pevnosti potahu sendvičového panelu. Razník o průměru 25 mm je vtlačován kolmo na plochu panelu. Pod panelem se nachází otvor o průměru 32 mm, jenž je souosý s razníkem.

Pro odlišné struktury použitých panelů musí být provedena smyková zkouška. Minimální rozměry vzorku jsou dány velikostí 100 x 100 mm. Od každé struktury panelu byly vyrobeny tři vzorky, celkem tedy 33 vzorků.

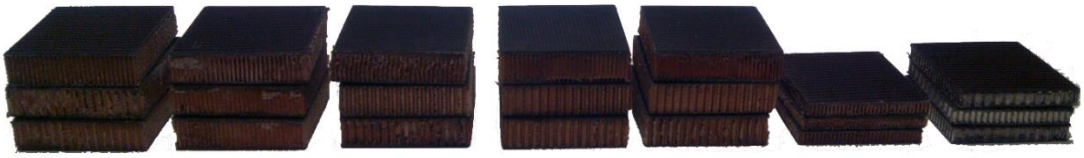


Obr. 58 Průběh smykové zkoušky [21]

5.3.1 PŘÍPRAVA VZORKŮ

Vzorky pro smykovou zkoušku byly vyrobeny ve dvou fázích. První fáze byla započata před produkcí vzorků pro tříbodovou ohybovou zkoušku z důvodu zjištění dostatečné pevnosti potahu pro panely reprezentující boční nárazovou strukturu (SIS), přední přepážky (FB) a podpory přední přepážky (FBSS). Výroba těchto vzorků nebyla tak časově náročná a spotřebovalo se při ní méně materiálu. Byly vyprodukovány vzorky pro 7 různých struktur označených 1 až 7. Od každé struktury byly vytvořeny tři vzorky označené písmeny A, B. C. V šesti případech byla využita nomexová voština a jedenkrát hliníkové voštinové jádro. Složení všech struktur je uvedeno v Tabulka 16. Vzorky byly zapraveny oscilační pilou a poté nařezány na požadované rozměry pomocí pásové pily.

Obr. 59 Pokládání jader sendvičových vzorků



Obr. 60 Nařezané vzorky pro smykovou zkoušku

Druhá fáze proběhla zároveň se zhotovováním vzorků pro tříbodovou ohybovou zkoušku III. fáze. Skladby tří různých struktur se ztotožňují se vzorky: SIS_hor_01, SHBE_01 a FF_02 a navíc byl vyroben vzorek FB_S1. Jeho skladba se nachází v Tabulka 16. Pro kvalitnější spojení hybridních tkanin a voštin byla opět aplikována pryskyřice zahuštěná odlehčenými mikrobalony s mletými bavlněnými vlákny. Vzorky byly také zapraveny oscilační pilou a pak nařezány na požadované rozměry pomocí pásové pily.

Obr. 61 Řez zkušebním vzorkem SHBE_S1

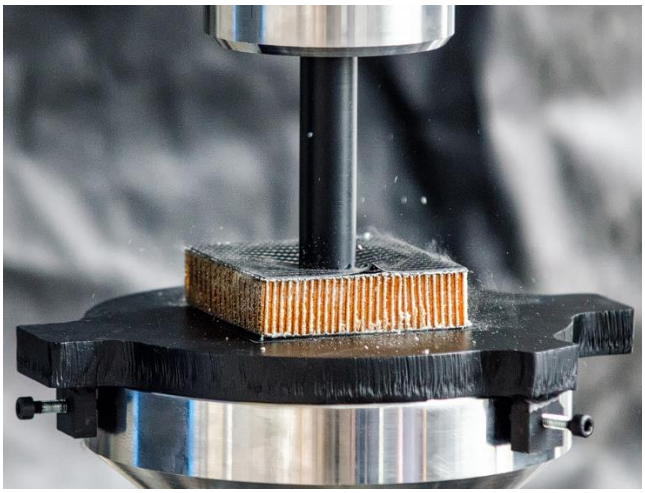
Tabulka 16 Skladba sendvičových vzorků pro smykovou zkoušku

Struktura	Vrstvení
1	$[45°_{C200}$ / $0°_{UDC150}$ / $90°_{UDC150}$ / $0°_{UDC150}$ / $45°_{CA165}$ / / $\mathbf{0°_{C1-3,2-48}}$ $(c=25\ mm)$/ $45°_{CA165}$ /$90°_{UDC150}$ / $0°_{UDC150}$ /$45°_{C200}]$
2	$[45°_{C200}$ / $0°_{UDC150}$ / $90°_{UDC150}$ / $0°_{UDC150}$ / $45°_{CA165}$ / $\overline{\mathbf{0°_{C1-3,2-48}}\ (c=25\ mm)}]_S$
3	$[45°_{C200}$ / $0°_{UDC150}$ / $0°_{C200}$ / $0°_{UDC150}$ / $45°_{CA165}$ / / $\overline{\mathbf{0°_{C1-3,2-48}}\ (c=25\ mm)}]_S$
4	$[45°_{2\ C200}$ / $0°_{2\ UDC150}$ / $0°_{2\ C200}$ / $0°_{UDC150}$ / $45°_{CA165}$ / / $\mathbf{0°_{C1-3,2-48}}$ $(c=25\ mm)$ / $45°_{CA165}$ / $0°_{2\ UDC150}$ / $45°_{C200}]$
5	$[45°_{C200}$ / $0°_{C160}$ / $0°_{UDC150}$ / $45°_{CA165}$/ $\overline{\mathbf{0°_{C1-3,2-48}}\ (c=25\ mm)}]_S$
6	$[45°_{C200}$ / $0°_{UDC150}$ / $0°_{CA165}$/ $0°_{2\ UDC150}$ / $45°_{CA165}$ / / $\mathbf{0°_{C1-3,2-48}}$ $(c=10\ mm)$ / $45°_{CA165}$ / $0°_{2\ UDC150}$/$0°_{C160}$/ / $0°_{UDC150}$ / $45°_{C200}$
7	$[45°_{2\ C200}$ / $0°_{2\ UDC150}$ / $0°_{2\ C200}$ / $0°_{UDC150}$ / $45°_{CA165}$ / / $\mathbf{0°_{ECM\ 6,4-82}}$ $(c=12.7\ mm)$ / $45°_{CA165}$ / $0°_{2\ UDC150}$ / $45°_{C200}]$

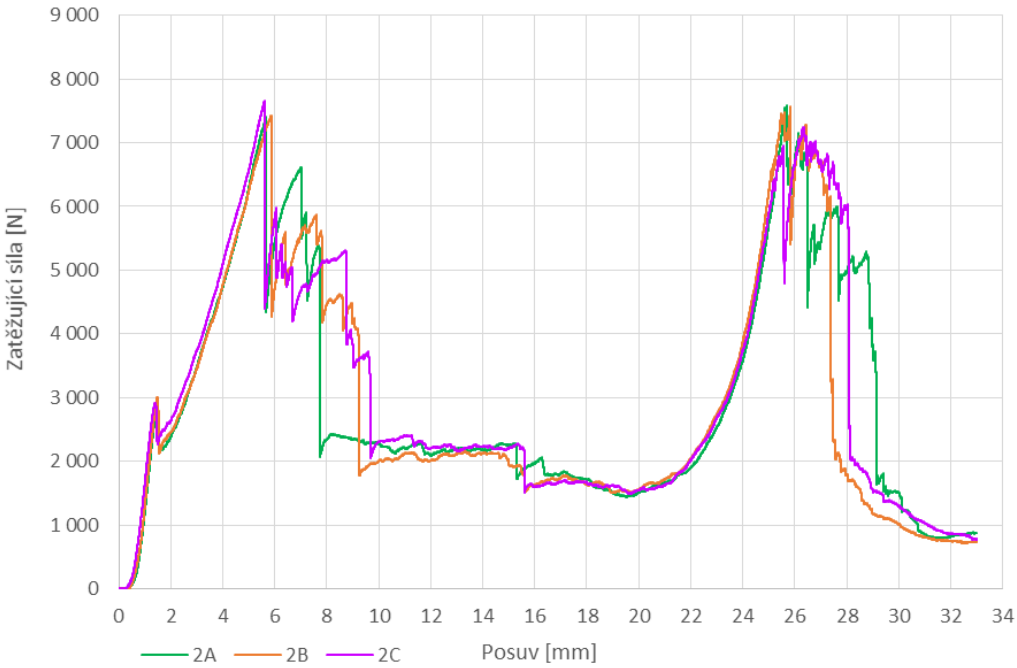
Vzorky 8 – 11 vzorku odpovídá struktuře SIS_hor, SHBE, FF a FB, které se nachází v Tabulka 8.

5.3.2 TESTOVÁNÍ VZORKŮ

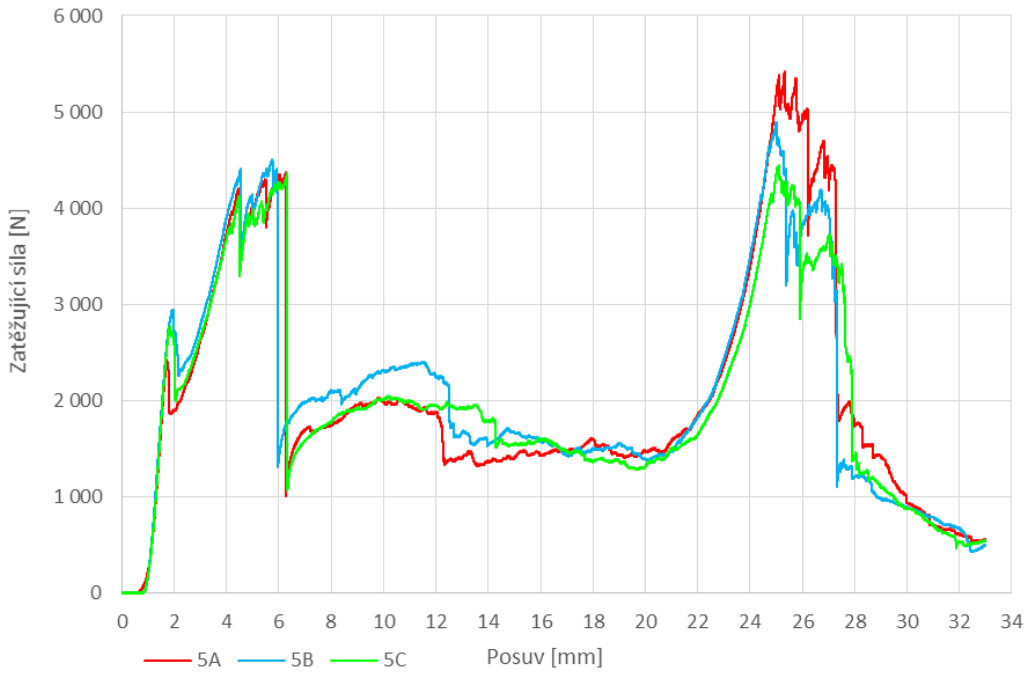
Zkoušení vyrobených sendvičových panelů pro smykovou zkoušku bylo také prováděno na Leteckém ústavu, Fakulty strojního inženýrství, VUT v Brně. Pro zatěžování sloužil rovněž univerzální elektromechanický zkušební stroj LabTest 6.500 umožňující vyvinout sílu do 500 kN. Pro testování těchto vzorků byl navržen speciální přípravek splňující požadavky pravidel FSAE. Přípravek byl vystředěn pomocí tří šroubů umístěných po 120° od sebe. Vzorek byl vložen na vyznačené místo. Zatěžování probíhalo do 5 mm pod testovaným vzorkem. Údaje zaznamenané při zkoušce se skládaly z působícího zatížení a posuvu ve směru zatížení. Diagramy reprezentující boční nárazovou strukturu a podporu přední přepážky dokumentuje Obr. 63 a Obr. 64.



Obr. 62 Smyková zkouška panelu FB_S1



Obr. 63 Smyková zkouška vzorků 2



Obr. 64 Smyková zkouška vzorků 5

Do dokumentu SES se vkládá zatížení z prvního a druhého vrcholu křivky zobrazené v diagramu zatěžující síly na posuvu. Druhý vrchol musí být větší než 4 000 N pro podporu přední přepážky (FBSS) a 7 500 N pro boční nárazovou strukturu (SIS). Dále se zadává tloušťka vnějšího potahu, což představuje první potah, který je tlačen razníkem. Dle následujícího vztahu se vypočítá smyková pevnost potahu. Uplatňuje se při výpočtech uchycení a smykové pevnosti přední přepážky. Uvádí se v jednotkách MPa. [21]

$$\sigma_{shear} = \sigma_1 = \frac{F_{max}}{\pi \cdot 25 \cdot t_2} \tag{81}$$

5.3.3 KONTROLA VÝSLEDKŮ

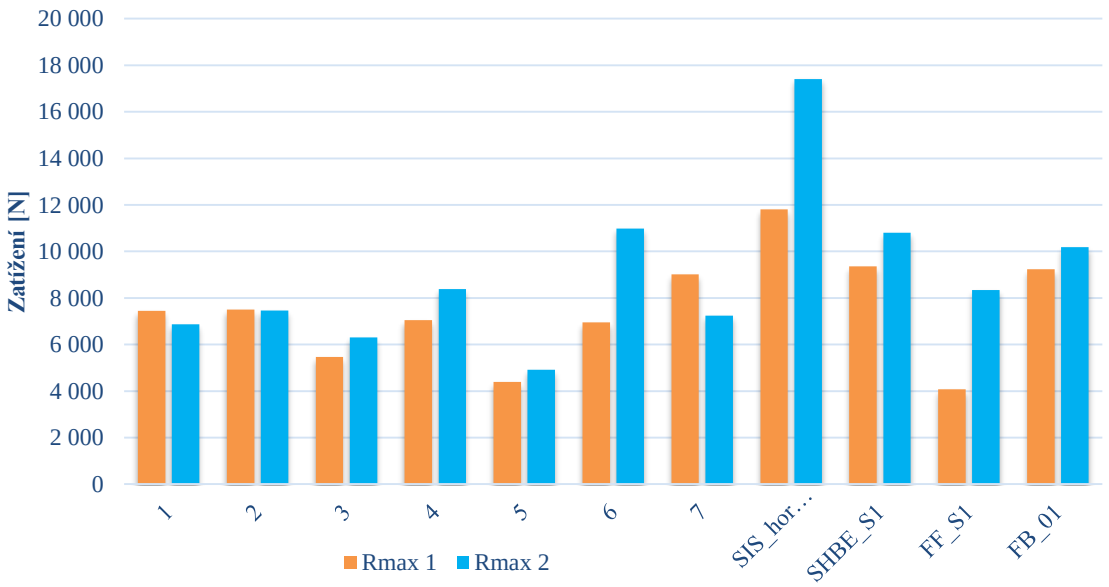
Na základě provedených smykových testů byla vytvořena následující tabulka zobrazující maximální zatížení panelů a maximální pevnost potahů.

Tabulka 17 Výsledky smykových zkoušek

Vzorek		R_{max} 1	R_{max} 2	$\overline{R_2}$	$\overline{\sigma_1}$	s	V
		N	N	N	MPa	MPa	%
1 SIS_ver	A	6 978	6 681	6 864	103,04	5,54	5,38
	B	7 403	6 948				
	C	7 956	6 962				
2 SIS_ver	A	7 409	7 580	7 464	103,78	1.60	1,54
	B	7 425	7 570				
	C	7 662	7 243				
3 FBSS	A	5 385	6 327	6 310	71,73	0,86	1,20
	B	5 545	6 414				
	C	5 464	6 188				
4 FB	A	6 883	7 796	8 379	56,74	0,95	1,67
	B	7 164	8 964				
	C	7 076	8 378				
5 FHB	A	4 336	5 418	4 920	72,71	1,18	1,62
	B	4 497	4 894				
	C	4 358	4 448				
6 SIS_hor	A	6 711	12 551	10 984	78,97	2,02	2,55
	B	7 139	10 576				
	C	6 989	9 825				
7 FB	A	9 046	7 006	7 234	72,65	1,16	1,60
	B	8 825	7 896				
	C	9 174	6 799				
SIS_hor_S1	A	11 778	18 550	17 409	116,52	2,28	1,96
	B	12 101	16 143				
	C	11 537	17 533				
SHBE_S1	A	8 766	8 554	10 797	92,42	4,26	4,61
	B	9 554	11 686				
	C	9 770	12 152				
FF_S1	A	3 932	8 172	8 334	55,29	2,23	4,03
	B	4 002	7 880				
	C	4 311	8 950				
FB_01	A	9 478	10 657	10 176	60,03	1,64	2,73
	B	8 891	10 753				
	C	9 352	9 119				

U druhého vzorku, který měl reprezentovat boční nárazovou strukturu (SIS ver), dosáhla průměrná pevnost u druhého potahu hodnoty 7 464 N, což je těsně pod minimem. Proto u dalších návrhů byla přidána další vrstva UDC 150. Průběh tohoto vzorku je zobrazen na Obr. 63. Na podporu přední přepážky lze zvolit skladbu z jakýchkoli testovaných vzorků. Nejméně vrstev bylo použito u 5. vzorku, ovšem tato oblast by měla být dostatečně tuhá, jelikož přenáší síly od zavěšení, a proto by bylo lépe zvolit více vrstev potahu, nebo vyztužit vnitřní část monokoku menší přepážkou.

Průměrné hodnoty zatížení potahů odečtené z vrcholů křivek z grafů jsou uvedeny na Obr. 65.



Obr. 65 Průměrné hodnoty zatížení potahů ze smykové zkoušky

6 URČENÍ TORZNÍ TUHOSTI POMOCÍ MKP

Na základě analyticky vypočítaných tuhostí jednotlivých sendvičových panelů monokoku je nutné pro ověření celé struktury skořepinové konstrukce provést analýzu torzní tuhosti.

Hodnota torzní tuhosti reprezentuje odolnost šasi vůči zkroucení kolem podélné osy formule. Určuje chování, kdy dochází k přenosu sil z jedné strany rámu na druhou, například při průjezdu vozidla zatáčkami a při přejezdu nerovnosti na vozovce. Cílem je dosáhnout co nejvyšší hodnotu torzní tuhosti s přihlédnutím k celkové hmotnosti konstrukce. Pokud má šasi příliš nízkou hodnotu torzní tuhosti, dochází vlivem sil k jeho deformaci, tím k ovlivnění nastavení odpružení formule. To má negativní vliv na jízdní vlastnosti, jež se stávají nepředvídatelnými.

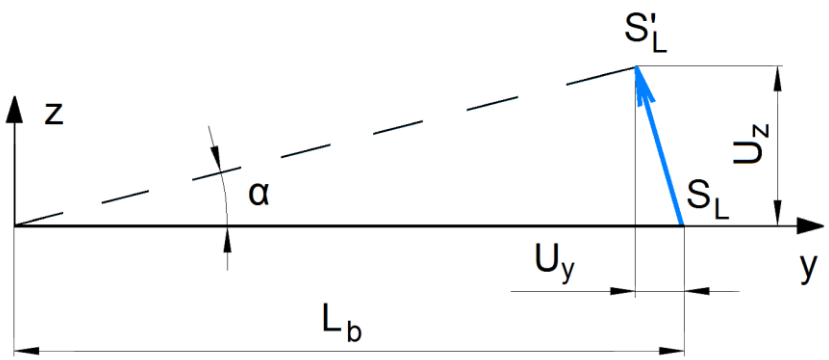
Z charakteru zatěžování plyne krouticí moment, kterým jsou rámy namáhány. Poté je zjištěn úhel natočení rámu vůči podélné ose vozu. Podílem těchto hodnot je zjištěna hodnota torzní tuhosti formule (C), jež je uvedena v jednotkách $N \cdot m \cdot deg^{-1}$. Na přední nápravu o velikosti rozchodu kol L_b je aplikováno zatížení působící ve středu levého předního kola. Zadní náprava vozidla je upevněna takovým způsobem, který předchází jeho natočení. Po zatížení dochází k pohybu středu levého předního kola. Tím nastává natočení osy celé přední nápravy vůči původní poloze o úhel α, který je vypočítán ze zjištěných posuvů Uy a Uz ze simulace v MKP programu. Pro porovnání šasi vozidel je vhodné určit poměr torzní tuhosti k jeho hmotnosti (K_C). Tímto parametrem lze zjistit výhodnost vyztužení rámu v kritických místech vůči nárůstu hmotnosti konstrukce a je uveden v jednotkách $N \cdot m \cdot deg^{-1} \cdot kg^{-1}$.

$$C = \frac{M_k}{\alpha} \tag{82}$$

$$K_C = \frac{C}{m_{vozu}} \tag{83}$$

$$kde:\ M_k = F_z \cdot L_b \tag{84}$$

$$\alpha = arctg \frac{U_z}{L_b - U_y} \tag{85}$$



Obr. 66 Určení úhlu natočení rámu z posuvů středu kola

6.1 TVORBA 3D MODELU MONOKOKU

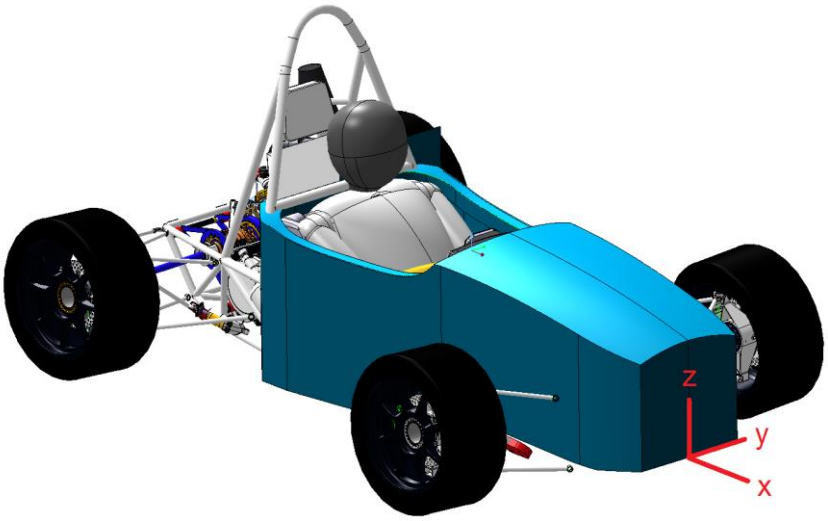
Koncept šasi vychází z posledního zkonstruovaného trubkového rámu studentského závodního týmu TU Brno Racing, konkrétně z vozu Dragon 6. Hlavním požadavkem je vytvořit návrh kompozitního monokoku, jenž splňuje pravidla FSAE s nízkou hmotností a vysokou tuhostí.

Z uvedených rámů používaných ve Formuli Student je zvolena hybridní varianta rámu. Předností této konfigurace je dobrá manipulativnost v blízkosti pohonné soustavy. Při použití celomonokokové struktury by se navíc objevil problém s odvětráním vznikajícího tepla. V přední části až po hlavní oblouk je umístěn monokok ze sendvičových struktur. Zadní část s pohonnou jednotkou je tvořena prostorovým ocelovým rámem z tenkostěnných profilů.

6.1.1 POPIS MODELOVÁNÍ

Při tvorbě modelu monokoku je účelné si nejprve promyslet postup, jakým bude geometrie tvořena. Správně zvolená koncepce umožní jednoduché změny již hotové geometrie s minimálním množstvím oprav. V opačném případě by mohla vést k situaci, že provedení změny na modelu by bylo časově velmi náročné. Pro snazší orientaci při práci s modelem je dobré prováděné příkazy pojmenovat - body, osy, pracovní roviny, náčrt aj. Seskupování prvků usnadní orientaci v bočním stromu příkazů a je jednodušší provést následné změny. Jelikož jde o koncepční návrh, existuje vysoká pravděpodobnost, že se bude muset geometrie monokoku měnit.

Pro zhotovení prvotního prostorového modelu monokoku a trubkového rámu je použit modelář Creo Parametric 3.0 ve verzi Academic Edition od společnosti Parametric Technology Corporation (PTC). Program slouží pro parametrické 3D modelování komponent (*.prt) a sestav (*.asm) v plošném či objemovém provedení. Tento CAD program je využíván konstrukčním týmem TU Brno Racing. Ve stejné verzi byl vytvořen i stávající vůz Dragon 6. Podle tohoto vozu je vytvořen jednoduchý plošný tvar možného monokoku s používaným globálním souřadnicovým systémem, jenž se nachází v rovině vozovky pod hlavním obloukem.



Obr. 67 Prvotní rozpracovaný návrh monokoku

MODEL MONOKOKU

Při tvorbě modelu je bráno v úvahu, že sendvičové panely monokoku budou tvořeny šestiúhelníkovými voštinovými jádry. Z tohoto důvodu je vhodné volit ideálně rovinné plochy, popřípadě s malým zakřivením. Při velkém zakřivení voštiny dochází k negativnímu zakřivení v druhém rovinném směru voštiny. Dále je žádoucí, aby vznikl co nejmenší počet rozdělených jader, tzn. vytvořit co největší jednolité plochy monokoku. Na rozhraní dílčích panelů jsou zvoleny velké poloměry. Malé poloměry jsou v modelu zanedbány.

Přední podlaha je rovná a její výška záleží na pozici hřebene řízení. Ten se nachází uvnitř monokoku a je uchycen hliníkovými držáky. Podlaha v oblastí boční nárazové struktury je umístěna v minimální vzdálenosti od země.

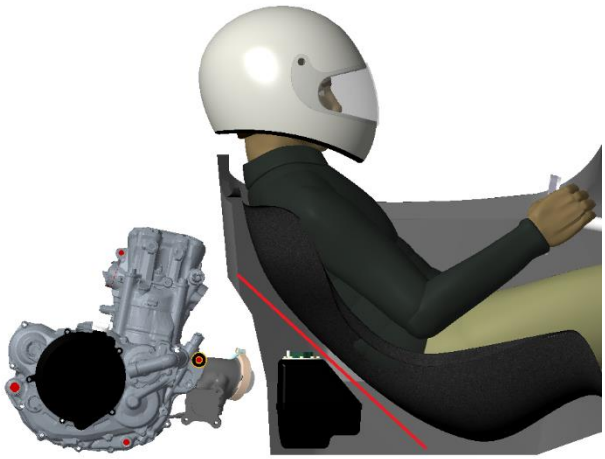
Boční podpora přední přepážky je v koncepčním návrhu vertikální a její směr určují body zavěšení přední nápravy převzaté z vozu Dragon 6. Při výrobě by bylo vhodné u této plochy vytvořit zkosení od horizontální dělící roviny, aby bylo snadnější vyjmutí výrobku z formy. Velikost šablony otevřeného kokpitu vyžaduje rozšíření plochy boční nárazové struktury monokoku. Plochu je možné zúžit v oblasti do 350 mm od země.

Obr. 68 Návrh velikosti monokoku

Na horní plochu nosu jsou kladeny designové požadavky, jelikož je tato část formulového vozu nejvíce viditelná. Je charakterizována zaobleným tvarem. Od přední podlahy musí být dostatečně vzdálena, aby byl dostatečný prostor pro nohy i pro šablonu. V přední části je umístěn otvor, který usnadňuje údržbu pedálové skupiny společně s otvorem v přední přepážce. V oblasti otevřeného kokpitu je vytvořen vyztužující lem, jenž přispívá k vyšší tuhosti monokoku.

Špička nosu monokoku, jež zakrývá deformační prvek, by byla vyráběna pouze z uhlíkového laminátu. Z tohoto důvodu může být vytvořena i ze složitějších designových tvarů.

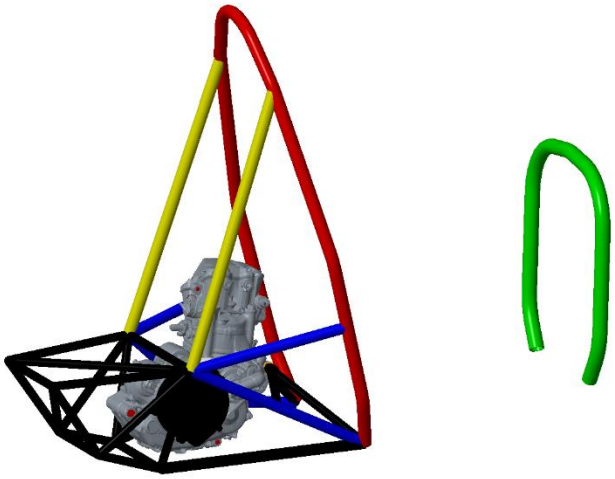
V horní části zadní stěny monokoku se nachází uchycení ramenních bezpečnostních pásů, které musí být umístěny v určité oblasti od ramen řidiče. Nižší část stěny vytváří dostatečný prostor pro výfukovou soustavu motoru. Vzhledem k umístění palivové nádrže uvnitř monokoku, snížení jeho hmotnosti a prostupu kabelů a hadic, vznikl otvor v zadní stěně monokoku. Mezi řidičem a nádrží musí být ochranná přepážka.



Obr. 69 Zadní část monokoku

ZADNÍ PROSTOROVÝ RÁM

K modelu monokoku je upraven trubkový rám v jeho zadní části. Z důvodu symetrického tvaru monokoku je turbodmýchadlo i s příslušenstvím posunuto více do zadní části vozidla. Tímto řešením však vzniká nesymetrie profilů v oblasti podpor výztuh hlavního oblouku (MHBS). Umístění motoru zůstává na stejném místě. Profily, které ho uchycují, jsou mírně upraveny. Hlavní oblouk je stejně vysoký jako u vozu Dragon 6, ale jeho tvar ve spodní části je upraven dle monokoku s určitou mezerou. Hlavní oblouk je k monokoku přichycen třemi úchyty po dvou šroubech M8 třídy 8.8 po obou stranách, jak uvádí pravidla. Zadní náprava je minimálně upravena a rozměry ocelových profilů jsou převzaty z nejnovější evoluce formule. Z důvodu snížení hmotnosti je přední ochranný oblouk volen z hliníkového materiálu, také přispěla i jeho menší délka. Tento oblouk je připevněn dvěma úchyty na obou stranách.



Obr. 70 Zadní trubkový rám s oblouky a motorem

Pro tvorbu modelu prostorového trubkového rámu je použit modelář Creo Parametric 3.0. Tento program podporuje využití referenčního partu tzv. skeleton modelu. Hlavní výhodou je možnost jednoduché editace celé sestavy. Lze jej využít pro snadnější skládání a tvorbu komponentů v sestavě. Provedené změny ve skeleton modelu se projeví ve všech modelech sestavy.

Skeleton model také slouží jako referenční model pro vytvoření různých profilů v aplikaci Framework. Jde o nástavbu uvedeného modeláře. V této aplikaci je možné vytvářet normalizované profily s použitím jedné úsečky, křivky nebo dvou bodů. Tato funkce vytvoří v sestavě pro každý profil nový part. Další předností je následná úprava spojů jednotlivých profilů setkávajících se v jednom bodě například vzájemné ořezy profilů. Tato aplikace ušetří mnoho času při samostatném modelování i při pozdějších editacích pomocí skeleton modelu.

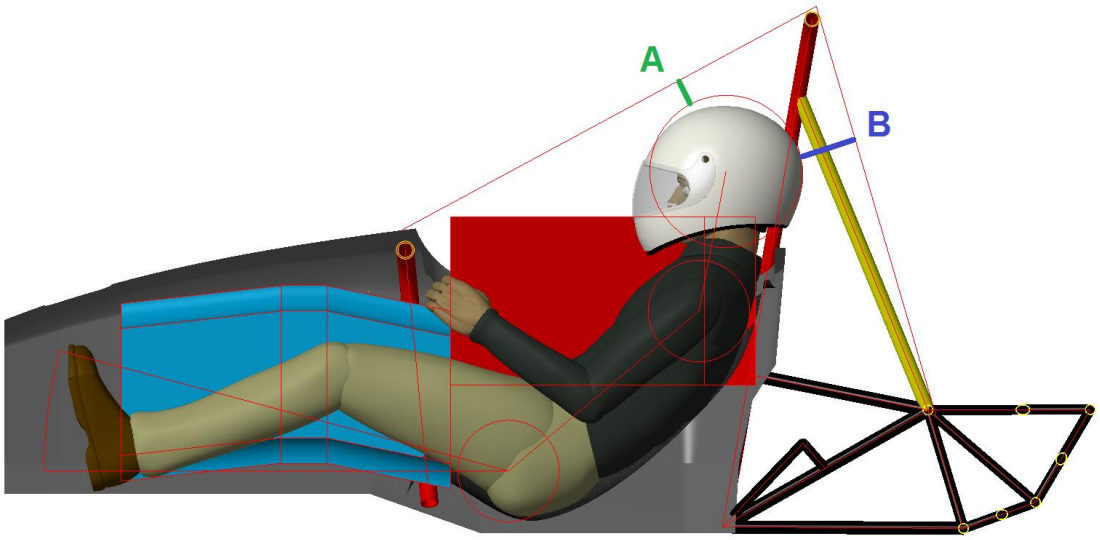
6.1.2 OVĚŘENÍ MODELU DLE PRAVIDEL FSAE

KONTROLA ROZMĚRŮ KOKPITU

V této části jsou ověřeny šablony minimálních rozměrů kokpitu, které vyžadují dodržení stanovených pravidel. Rozměry těchto šablon jsou uvedeny na Obr. 14. Tato kontrola je graficky znázorněna na Obr. 71. Červeně vyznačena je předloha otevřeného kokpitu, jež se vkládá vertikálně až do vzdálenosti 350 mm nad zemí. Modře je znázorněna šablona pro nohy. Kontrola probíhá protažením specifické šablony, otočením okolo řídící tyče a posunutím až do 100 mm od pedálové skupiny.

KONTROLA ROZMĚRŮ MEZI PŘILBOU ŘIDIČE A SPOJNICÍ OBLOUKŮ

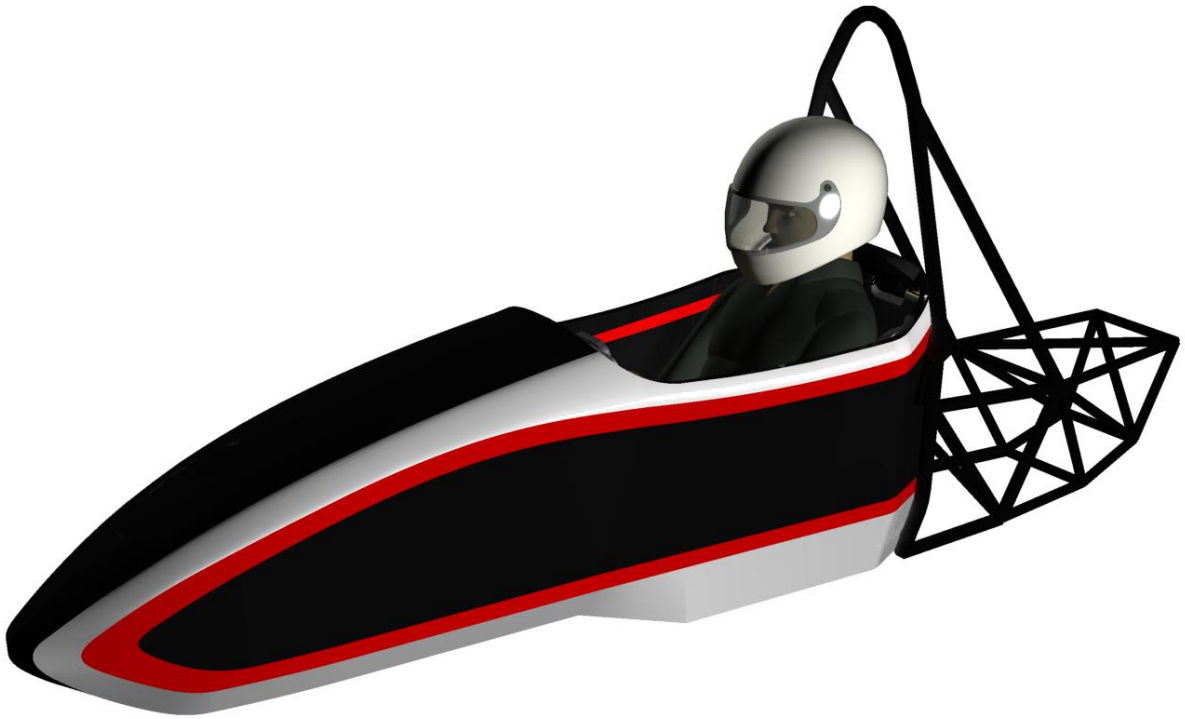
Dalším kontrolovaným rozměrem je vzdálenost mezi spojnicí vrcholu hlavního a předního oblouku od helmy řidiče. Také je kontrolována spojnice hlavního oblouku s uzlem upevnění výztuh hlavního oblouku. Minimální povolené vzdálenosti dosahují 50 mm. Naměřená hodnota pro první případ A = 53 mm a pro druhý případ B = 112 mm. Prověření pravidel je vyobrazeno na Obr. 71.



Obr. 71 Kontrola minimálních rozměrů

6.1.3 FINÁLNÍ KONCEPČNÍ NÁVRH ŠASI

Koncepční návrh splňuje základní požadavky pravidel FSAE. Níže je zobrazen jeho designový návrh, který je použit jako referenční model pro MKP analýzu.



Obr. 72 Finální koncepční návrh šasi

6.2 TVORBA VÝPOČTOVÉHO MODELU PRO NAVRŽENÉ ŠASI

Pro určení torzní tuhosti jsou vybrány programy Patran a Nastran od společnosti MSC Software.

6.2.1 VÝPOČETNÍ SOFTWARE

MSC Software je největším světovým dodavatelem systémů v oblasti řešení počítačové podpory inženýrských návrhů.

Program Patran je světově nejpoužívanějším pre/post-processing software pro analýzy metodou konečných prvků (MKP). Umožňuje vytvářet a upravovat geometrie, zadávat materiálové vlastnosti a okrajové podmínky a také nastavovat možnosti analýzy pro více řešitelů, například MSC Nastranu, Marc, Abaqus, LS-DYNA a ANSYS. V oblasti postprocesingu existují značné možnosti. Je možné vykreslit získané výsledky v podobě map průběhů vypočtených veličin a grafů. Získané výsledky lze také zobrazit v testové podobě, popřípadě je možno tyto výsledky uložit do externího souboru pro další zpracování. [28]

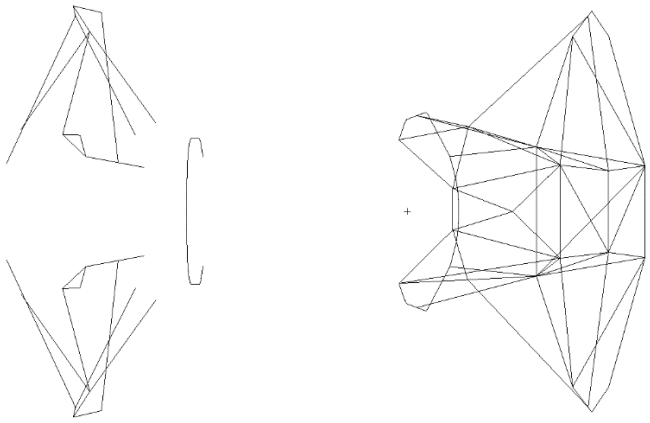
Software Nastran patří mezi světově nejpoužívanější konečno-prvkové programy. Je využíván ke zjištění potřebné pevnosti, tuhosti a životnosti konstrukčních systémů. Oblast výpočtů také zahrnují napěťové analýzy, dynamiku, vibrace, řešení komplexních systémů, lineární a nelineární analýzy, optimalizace aj. [28]

6.2.2 VYTVOŘENÍ VÝPOČETNÍ SÍTĚ

Správnou volbou výpočtového modelu lze ušetřit čas výpočtu spolu s hardwarovými nároky na použitou techniku. Pokud použijeme prutovou metodu, dojde v místech svaru k výpočetním nepřesnostem. Pro použití analýzy trubkového rámu připojeného k monokoku formulového vozu je tato metoda dostačující ve svém rozsahu i kvalitě. Tato metoda spočívá v náhradě 3D geometrie za pomocí bodů a křivek.

PRUTOVÁ SÍŤ

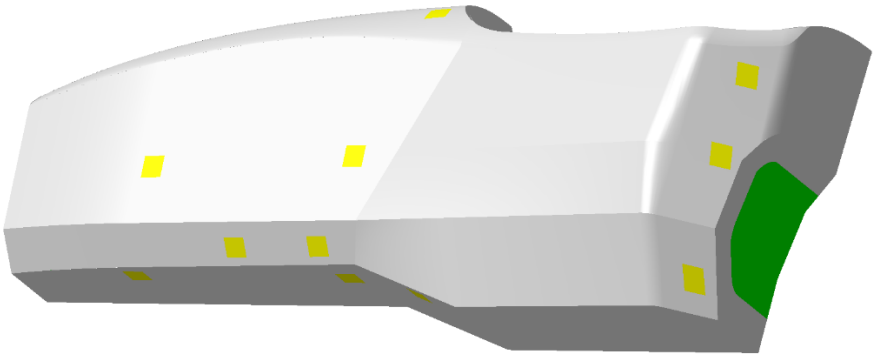
Nejprve je vytvořena databáze, do níž se zadá typ programu a metody pro pozdější řešení. Je zvolen výpočtový program Nastran a strukturální typ analýzy. Následně je importován drátový model z CAD programu. Je důležité si zkontrolovat jednotky modelu. Jednotlivé druhy trubek jsou rozděleny do skupin. Pomocí příkazu *Mesh Seed* jsou pruty rozděleny po 30 mm s výjimkou ramen a tyčí zavěšení. U nich je požadováno, aby byly tvořeny pouze jedním elementem. Následně jsou vytvořeny uzly a elementy křivek.



Obr. 73 Drátový model importovaných bodů a křivek

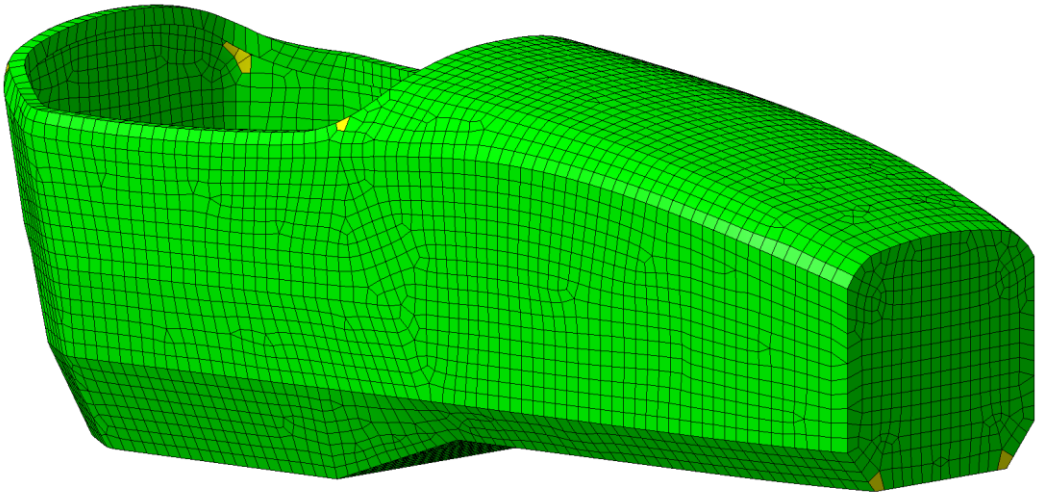
PLOŠNÁ SÍŤ

U plošného monokoku je nejprve provedena úprava modelu v programu Catia V5, která zahrnuje vyplnění otvorů v plochách. Na Obr. 74 jsou zobrazeny zelenou barvou. Vyplnění je nutné provést kvůli pokládání vrstev v MSC Patranu, poněvadž nedovede položit souvislou vrstvu na plochu s uzavřeným výřezem. Lem okolo otvoru kokpitu je rozdělen na dvě části. Místa uchycení ochranných oblouků a zavěšení jsou zvýrazněna žlutou barvou.



Obr. 74 Upravený plošný model monokoku pro vytvoření výpočetní sítě

Výpočetní síť je vytvořena v Catia V5 v modulu *Advances Meshing Tools*. Při vytváření sítě je respektováno pořadí jednotlivých částí sítě. Na hranici síťovaných ploch vznikají uzly, ke kterým jsou automaticky přichytávané uzly dalších vytvářených ploch. Z tohoto důvodu jsou nejprve síťovány čelní, horní, zadní a spodní plochy, následně boční plochy monokoku. Síť je realizována pomocí funkce *Surface Mesher*, kde v globálních parametrech je zvolena čtyřúhelníková síť o velikosti 20 mm. Dále je nutné zaškrtnout automatické přichytávání uzlů – *Mesh Capture*. Pro polovinu monokoku je síť rozdělena podle dílčích struktur sendvičových panelů. Pomocí zrcadlení je dotvořena druhá polovina sítě. Následně je provedena vizuální kontrola elementů pomocí funkce *Quality Visualization*, jež se nachází na Obr. 75. Pokud je síť v pořádku, lze ji exportovat do datového souboru. Exportují se všechny aktivované sítě. Jestliže je potřeba některou ze sítí při exportu vyloučit, musí být deaktivována.



Obr. 75 Kontrola kvality elementů sítě

Jednotlivé části sítě monokoku jsou vkládány přímo do aktivovaných skupin, jež jsou označeny příslušným názvem. Při importu jsou data vybírána ze zdroje *MSC Nastran Input*.

ÚPRAVA SÍTĚ ŠASI V PATRANU

U plošných sítí je potřeba zjistit návaznost vložených dílčích sítí. Pokud síť není spojena, na hranicích ploch lze zobrazit volné hrany. To je uskutečněno pomocí *Verify -> Element -> Boundaries -> Free Edges*. Další kontrola se zabývá orientací normál elementů. Všechny normály musí vést jedním směrem, v tomto případě dovnitř. To je zjištěno pomocí *Verify -> Element -> Normals*. Otočení některých elementů lze provést příkazem *Modify -> Element -> Reverse*.

Dále je provedena kontrola duplicitních uzlů týkajících se zvláště prutů. V místě spojů dvou prutů vznikne od každého jeden uzel. Je potřeba je sjednotit pomocí *Equivalence*, u které se zadává tolerance pro sjednocení. Dále musí být zkontrolované spoje mezi oblouky a další prutovou soustavou. Musí zde existovat společný uzel. V případě větších bar elementů na obloucích je možné je rozdělit pomocí *Modify -> Bar -> Split*.

6.2.3 ZADÁNÍ VLASTNOSTÍ MODELU

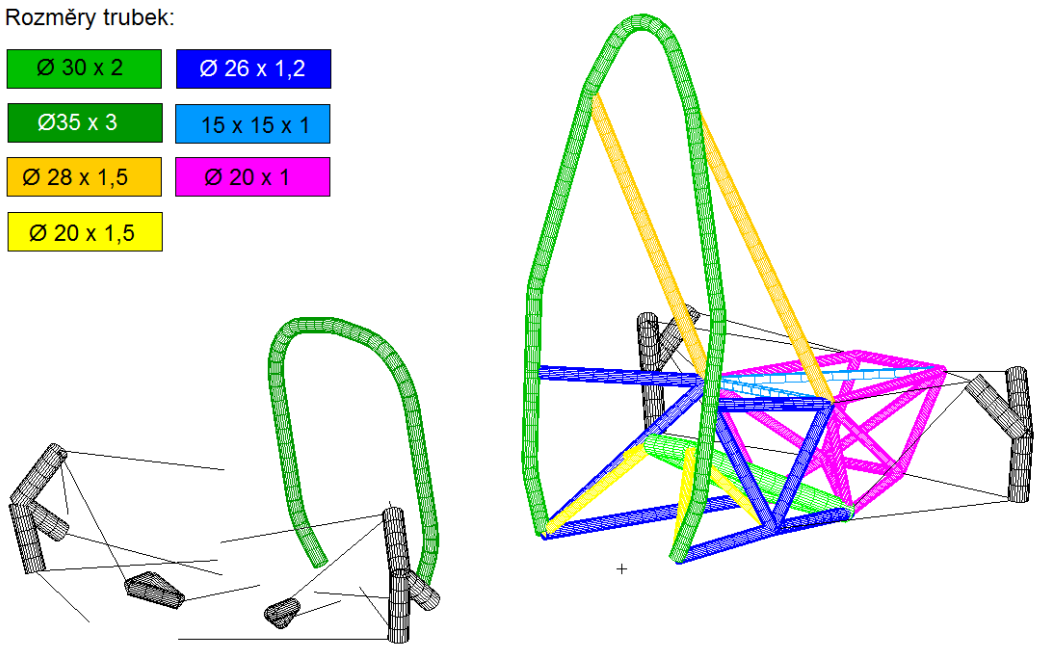
Nejprve jsou zadány vlastnosti použitých materiálů. Z izotropních materiálů lze jmenovat ocel a hliník. Pro tuhé části zavěšení, u kterých není vyžadováno jejich ovlivnění výsledků deformacemi, byl vytvořen vlastní tuhý materiál, jenž je 100x tužší než ocel.

Vlastnosti ortotropních materiálů, jako je uhlíkový nebo hybridní laminát, jsou vloženy z již uvedené Tabulka 12. Jelikož je použita plošná výpočtová síť monokoku, lze zadat parametry jader sendvičové struktury pouze v rovině. Parametry použitých jader jsou uvedeny v Tabulka 7.

ZADÁNÍ VLASTNOSTÍ OCELOVÝCH TRUBEK

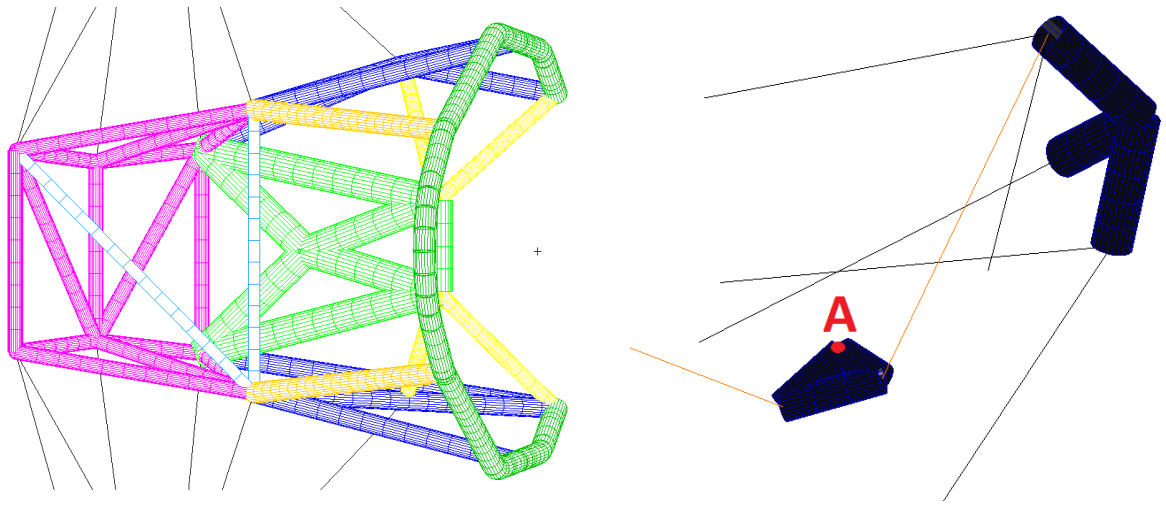
Pro aplikace s tenkostěnnými až silnostěnnými prutovými konstrukcemi je vhodný prvek BEAM. Je založen na prutové teorii podle Timošenka a zahrnuje v sobě i deformaci ve střihu. Jde o kvadratický nosník mající šest stupňů volnosti – posuvy ve směru osy x, y a z a také rotace kolem každé osy. Jejich počet je závislý na nastavení vlastností prvku. Za jednu z důležitých vlastností lze považovat možnost přiřazení prvků různé předdefinované nebo uživatelem definované průřezy. Tímto způsobem lze modelovat profily kruhových, čtvercových a dalších průřezů s různými velikostmi a tloušťkami stěn. Tento prvek vyhovuje k vytvoření všech částí konstrukce rámu s přiřazeným materiálem – ocel, nebo hliník pouze v případě předního oblouku.

Dalším používaným 1D prvkem je ROD. Jde o prostorový dvouuzlový element schopný přenášet napětí jen v jeho ose (tah-tlak). Na koncích těchto elementů se nacházejí sférické vazby. Tento element je použit na ramena náprav a soustavu odpružení. Kromě materiálových charakteristik vyžadoval tento prvek zadání hodnoty příčného průřezu. Byla zvolena hodnota 2 000 mm^2, aby opět nedocházelo k ovlivnění výsledků deformace rámu. V grafickém zobrazení je tento prvek znázorněn černou čárou.



Obr. 76 Zobrazení beamů a rodů barevně podle rozměrů profilů

Pro zlepšení výsledků výpočtů je vytvořena náhrada hliníkového motoru pomocí prvku beam a vybraného tuhého materiálu. V detailu je zobrazena světle zeleně na Obr. 77 vlevo. Stejným způsobem je definována náhrada těhlice a vahadel zavěšení. Spojuje body uchycení ramen zavěšení se středem kola. Prvky odpružení jsou zvýrazněny červenou čárou. Jsou opět vytvořeny prvkem rod. Mezi nimi se nachází vahadlo, jež se otáčí okolo bodu A. U všech prvků, které jsou spojeny s bodem A, je na druhém konci úsečky povolena rotace v jejich ose y.



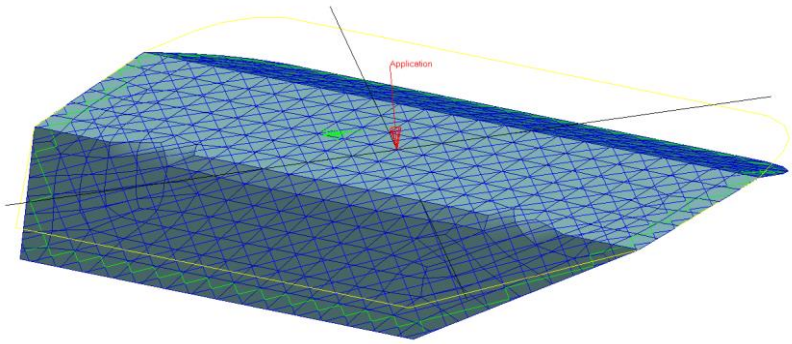
Obr. 77 Detail náhrady motoru a zavěšení předního levého kola vozu

VRSTVENÍ MONOKOKU POMOCÍ MODELÁŘE LAMINÁTŮ

Nejprve je vytvořen nový soubor vrstvení – *Layup File*, do něhož se uloží následující kroky vrstvení. Název souboru je zvolen podle anglické zkratky odpovídající názvům dílčích částí monokoku.

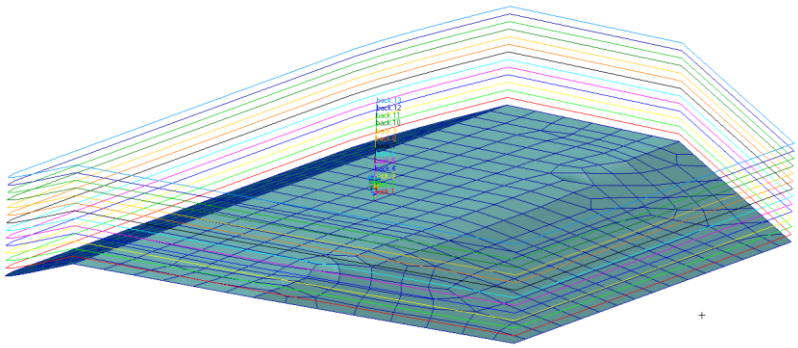
Dále je definován LM materiál, jenž přiřadí dříve nadefinovanému ortotropnímu materiálu tloušťku vrstvy nebo jádra. Je dobré podotknout, že je možné měnit úhel mezi osnovou a útkem tkaniny, která je standardně pod 90°.

V dalším kroku se zadávají k LM materiálům elementy sítě, na něž chceme danou LM vrstvu položit. Poté se stanoví pozice a směr pokládání, což je na obrázku vyznačeno červenou barvou. Následně je zvolen referenční směr, jenž reprezentuje podélný směr vrstvy. Úhel natočení pokládané vrstvy se vztahuje právě k tomuto směru, který je vyznačen zelenou barvou. Elementy plochy jsou vykresleny světle modrou barvou a směr položené vrstvy reprezentuje tmavě modrá barva.



Obr. 78 Ukázka definice vrstvy pod úhlem 45° vůči referenčnímu směru

LM vrstvení umožňuje definovat skladbu celého laminátu nebo sendviče. Střední rovinu tohoto vrstvení představují vybrané elementy LM vrstvy. Právě u sendvičového panelu je dobré použít odsazení první vrstvy, kterým je docíleno vrstvení od elementů sítě směrem dovnitř monokoku. To přesně reprezentuje skládání vrstev sendvičového panelu do formy monokoku. Odsazení se uskuteční tak, že se pro první vrstvu zadají stejné elementy a směr posunutí jako u LM vrstvy. Hodnota odsazení je nulová a zarovnání odsazení *Offset Flag* je zvoleno shora. Je možno zvolit hlavní, nebo vedlejší souřadnicový systém. Pokud je osa x kolmá na elementy, nejsou k elementům přiřazeny vlastnosti. Nakonec je potřeba v záložce volby zadat název vrstvení. S tímto názvem poté vzniknou v Patranu položky vlastností pro jednotlivá vrstvení.

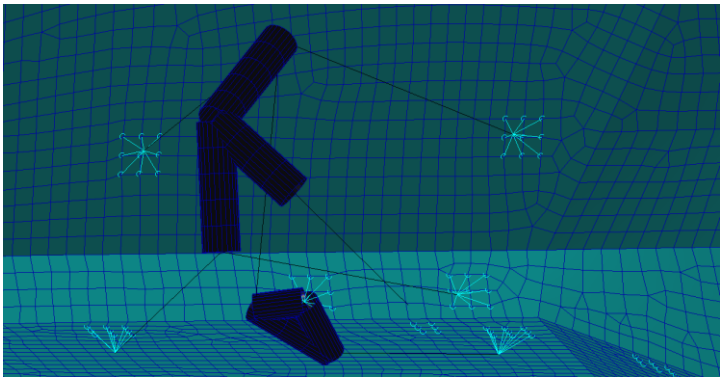


Obr. 79 Ukázka vrstvení sendvičového panelu s odsazením

Skladba sendvičových panelů pro jednotlivé části struktury monokoku je uvedena v Tabulka 8. Na základě analýzy byly stanoveny skladby pro místa monokoku, které nebyly dříve řešeny. Jejich vrstvení se nachází v Tabulka 20.

SPOJENÍ PLOŠNÉHO MONOKOKU A PRUTOVÉHO RÁMU

Spojení plošného modelu monokoku se zavěšením a zadním trubkovým rámem je realizováno pomocí tuhého prvku MPC, konkrétně RBE3. Jeden uzel na zavěšení či obloucích je připojen k devíti uzlům plošného modelu. Vazba mezi devíti uzly je pevná, to znamená, že uzly se vůči sobě nedeformují. Tento postup představuje rozložení zatížení působící na plochu monokoku. V místě upevnění budou u reálného monokoku použity tuhé inserty, které se vyznačují podobnou funkcí, čili rozložením bodových sil do struktury sendvičového panelu. Uchycení předního levého kola je zobrazeno na Obr. 80.



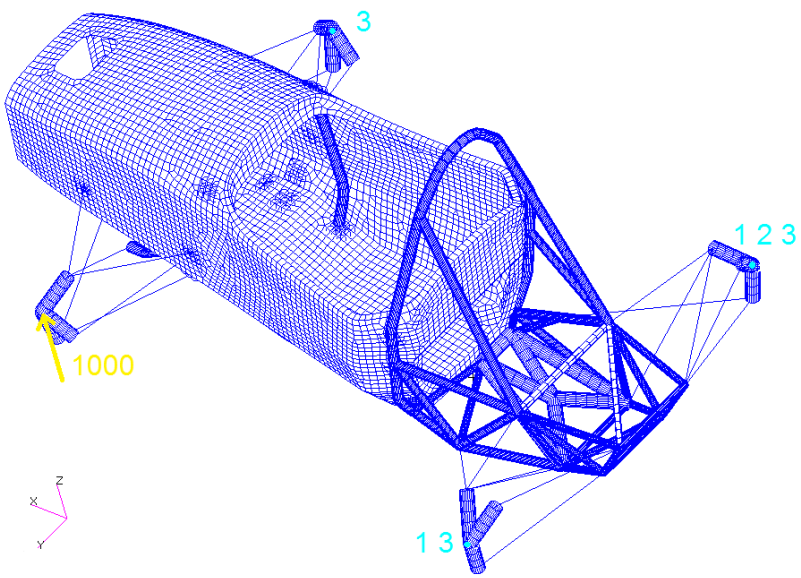
Obr. 80 Uchycení přední nápravy pomocí MPC prvků

6.2.4 ZADÁNÍ OKRAJOVÝCH PODMÍNEK

Hotový výpočtový model je dále zapotřebí umístit v prostoru prostřednictvím vazeb, jež mohou omezit počet stupňů volnosti. Těleso v prostoru disponuje šesti stupni volnosti. Jsou to translace v osách x, y, z a rotace okolo těchto os. Je důležité omezit pohyb zavěšení, který přenáší silové účinky na samotný rám. Tato omezení jsou stanovena z principu styku vozidla s vozovkou. Síla je aplikována ve středu předního kola a působí ve směru z globálního souřadnicového systému, jenž je u všech modelů šasi totožný. Pro osy x, y, z je předepsán nulový posun a rotace kolem těchto os jsou volné.

Tabulka 18 Okrajové podmínky pro výpočet torzní tuhosti rámu

Kolo	Posuv v ose x	Posuv v ose y	Posuv v ose z	Zatížení
Pravé přední	-	-	0	
Levé přední	-	-	-	Fz = 1 000 N
Pravé zadní	0	0	0	
Levé zadní	0	-	0	



Obr. 81 Zadání okrajových podmínek

6.2.5 ŘEŠENÍ VÝPOČTOVÉHO MODELU

Z programu MSC Patran je nejprve potřeba exportovat výpočtový model pomocí textového souboru *.bdf. Každý typ analýzy je označen jako sekvence řešení - *Solution Sequence* a představuje své kódové číslo. Statická lineární analýza je sekvence 101, která byla použita i pro výpočet torzní tuhosti. Do analýzy nejsou zahrnuty elementy otvorů.

Program MSC Nastran neposkytuje žádné grafické rozhraní, ani žádné funkce pro grafickou tvorbu modelu. Všechny vstupy a výstupy programu jsou zprostředkovány pomocí textových souborů. Po výpočtu je vygenerován výsledkový soubor s příponou *.f06. Obsahuje všechny výsledky, také varování a chybové zprávy v textové podobě. Při řešení dané úlohy je většinou výpočet zastaven chybovou zprávou o existenci mechanismu. Pro pokračování je důležité dopsat do souboru *.bdf pod řádek „PARAM POST 0“ následující výraz: „PARAM,BAILOUT,-1“. Výsledkové binární soubory typu *.xdb a *.op2 jsou upotřebeny k zobrazení výsledků programem MSC Patran. První typ se uplatňuje nejčastěji, ale pro zjištění FI laminátů je vybírán druhý typ *.op2.

6.3 ANALÝZA VÝSLEDKŮ A POROVNÁNÍ TORZNÍCH TUHOSTÍ

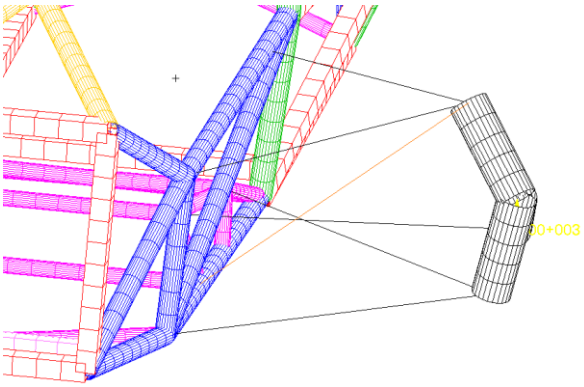
Skladby sendvičových panelů pravidly definovanými částmi primární struktury jsou převzaty z analytických výpočtů. Zbylé části monokoku jsou několikrát měněny v MKP programu za účelem zvýšení torzní tuhosti.

Připravený výpočtový model je simulován s navrženou strukturou monokoku se zadním ocelovým rámem. Z důvodu porovnání výsledků je vytvořen také výpočtový model rámu současného vozu Dragon 6.

6.3.1 VÝSLEDKY VÝPOČTOVÉHO MODELU RÁMU VOZU DRAGON 6

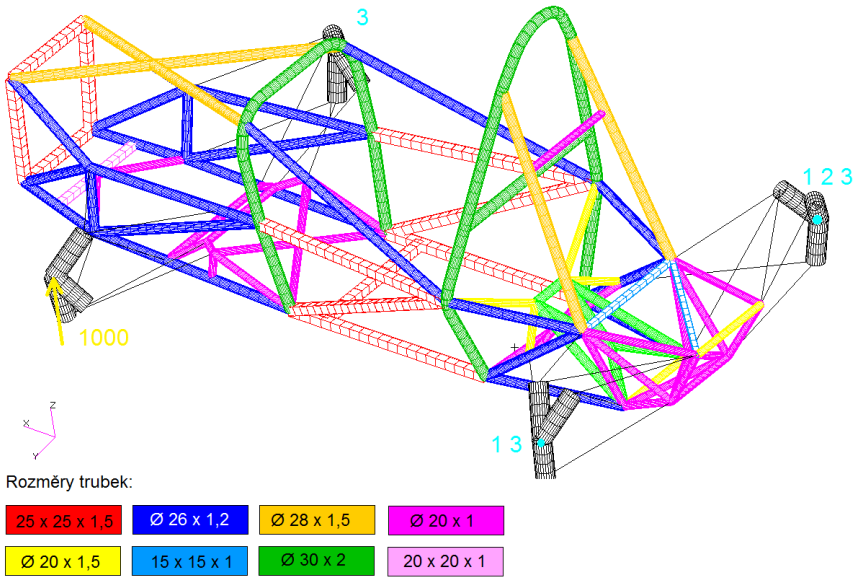
VÝPOČTOVÝ MODEL

Na základě uvedeného postupu je vytvořen výpočtový model příhradového rámu formule Dragon 6. Geometrie zavěšení je zjednodušena. Soustava odpružení je nahrazena jedním prvkem typu rod umístěného mezi těhlicí a uzlem rámu, k němuž je upevněn úchyt vahadel. Toto zjednodušení neovlivní konečný výsledek, poněvadž uvedené uchycení přebírá největší zatížení.



Obr. 82 Detail zjednodušení přední nápravy

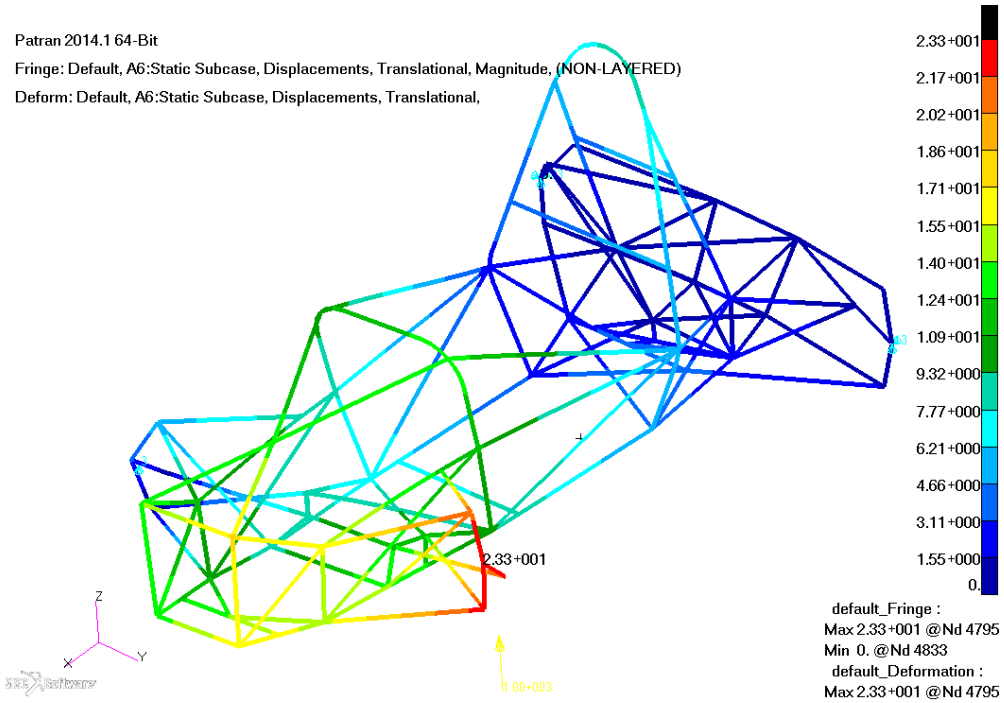
Rozměry a umístění zadávaných profilů jsou uvedeny na Obr. 83. Okrajové podmínky jsou shodné s uvedenými podmínkami dle Tabulka 18.



Obr. 83 Připravený výpočetní model vozu Dragon 6 s rozlišením rozměrů

ANALÝZA VÝSLEDKŮ

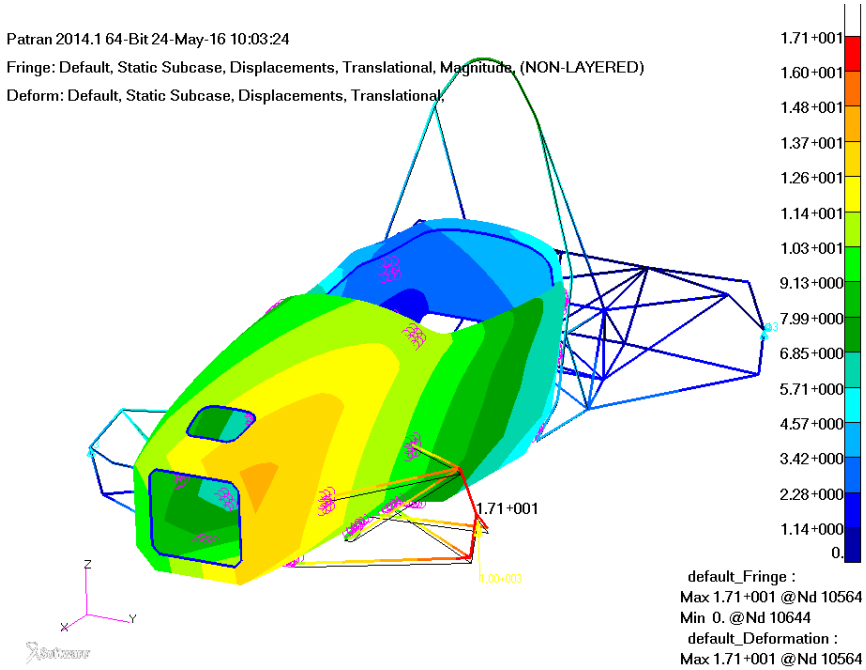
Výsledkem analýz bylo zjištění posuvů v ose y a z ve středu předního kola. Pomocí funkce kurzoru byly získány hodnoty deformací v uvedených osách. Simulovány byly dva případy a rozdíl mezi nimi spočíval v přidání tuhé náhrady motoru. Vliv této změny na tuhost je zobrazen v Tabulka 19. Ukázka výsledků simulace příhradového rámu s tuhou náhradou je uvedena níže.



Obr. 84 Výsledná deformace rámu Dragon 6 s motorovou náhradou

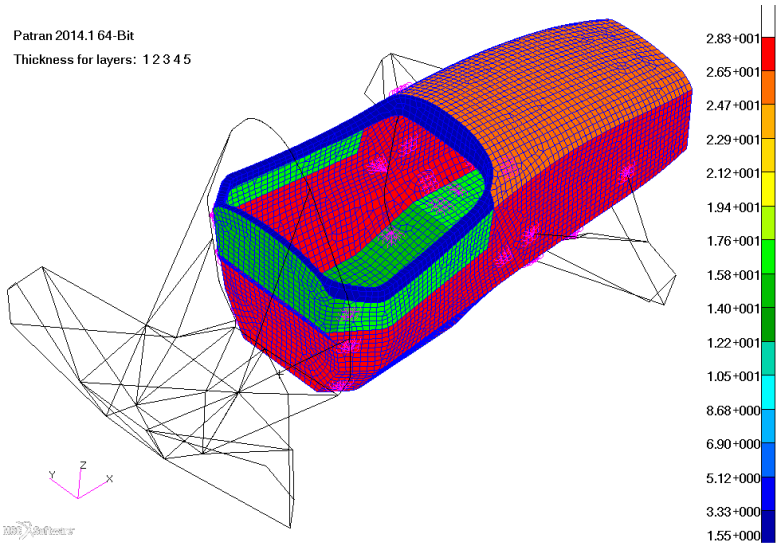
6.3.2 VÝSLEDKY VÝPOČTOVÉHO MODELU PRO NAVRŽENÉ ŠASI

Analýza byla uskutečněna s tuhou náhradou motoru. Z provedených změn na struktuře monokoku byly vybrány tři verze. V první verzi byla oblast nad boční nárazovou strukturou složena pouze z uhlíkových vláken bez jádra. Druhá verze zahrnovala vložení voštiny ECA 3.2-29 o tloušťce 15 mm a přidání uchycení předního oblouku z obou stran. Třetí verze navíc obsahovala záměnu panelů přední podlahy (FF) za panely podlahy v oblasti boční nárazové struktury (SIS hor). Torzní tuhosti těchto verzí jsou předloženy v Tabulka 19. Výsledek simulace uvedené druhé verze je zachycen na Obr. 85.



Obr. 85 Výsledek simulace torzní tuhosti s celkovou deformací

Pro ověřování správnosti zadaných vlastností panelu je možné zobrazit tloušťku navrženého monokoku.



Obr. 86 Kontrola správnosti zadaných panelů podle tloušťky

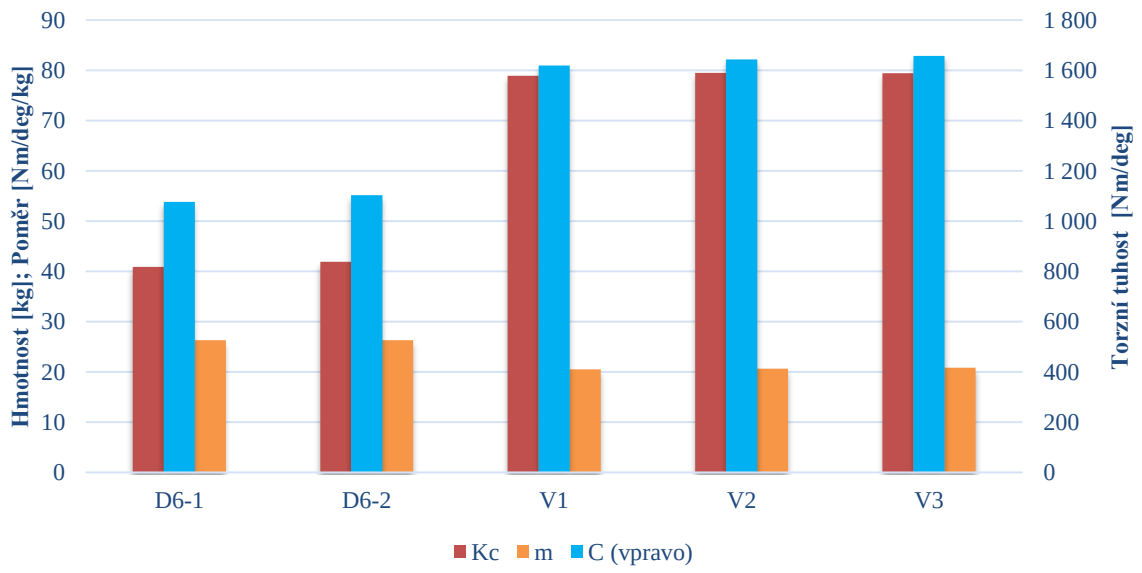
6.3.3 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

Na základě zjištěných posuvů v ose y a z byla vypočítána torzní tuhost a následně pak hodnota torzní tuhosti vzhledem k hmotnosti šasi.

Tabulka 19 Výsledky analýzy

Analyzované případy		D6-1	D6-2	V1	V2	V3
U_z	mm	23,654	23,071	15,735	15,500	15,365
U_y	mm	3,076	3,185	3,205	3,144	3,147
C	$N \cdot m \cdot deg^{-1}$	1 077	1 104	1 619	1 644	1 658
m_{vozu}	kg	26,34	26,34	20,52	20,67	20,87
K_C	$N \cdot m \cdot deg^{-1} \cdot kg^{-1}$	40,90	41,93	78,92	79,53	79,46

Hmotnosti uvedené v Tabulka 19 vycházejí z CAD modelu. Vliv použití motorové náhrady dosahoval minimálních rozdílů. Torzní tuhost monokokové konstrukce se zadním příhradovým rámem vzrostla o 46% a podíl torzní tuhosti k hmotnosti rámu byl téměř dvojnásobný. U variant s monokokem byla řešena rozdílná skladba. Varianta 1 obsahovala horní boční oblast monokoku (SU) pouze z uhlíkového laminátu. U varianty 2 byla v tomto místě přidána voština ECA 3.2-29 o tloušťce 15 mm. Změna u třetí varianty nastala v záměně voštiny v oblasti FF z původně navrhované ECA 3.2-29 o tloušťce 15 mm na ECM 6.4-82 o tloušťce 12,7 mm za účelem zvýšení tuhosti mezi uchycením vahadel zavěšení. Rozdíly mezi těmito variantami se ukázaly zanedbatelné, a proto byla zvolena střední varianta 2. To dokládá i grafické znázornění výsledných hodnot - Obr. 87. Skladby zbylých částí monokoku jsou zobrazeny v Tabulka 20.



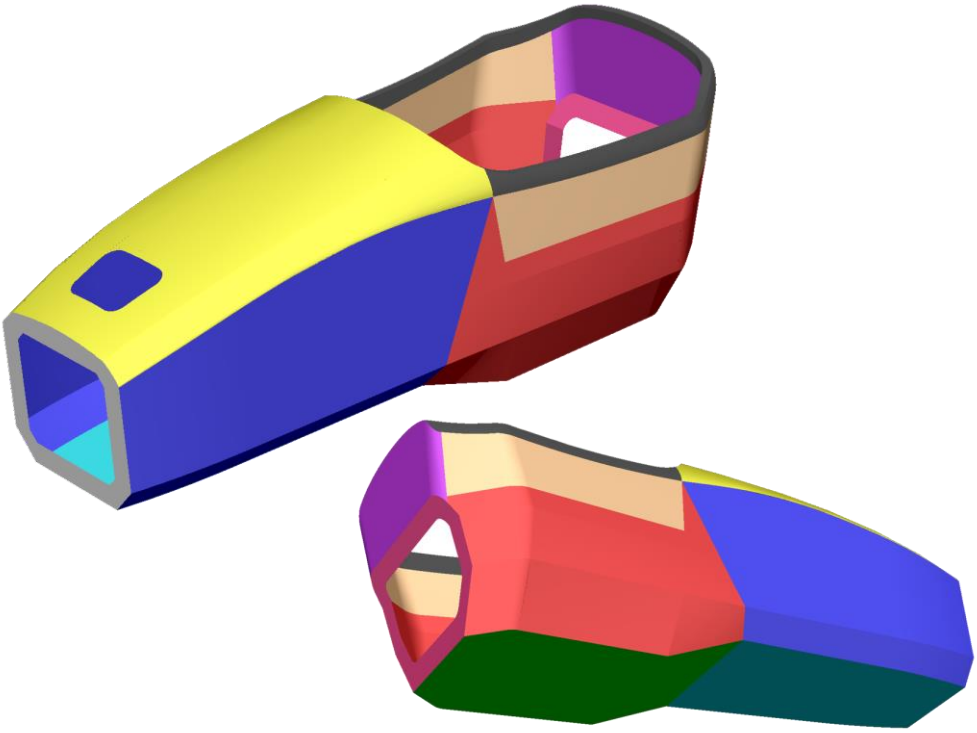
Obr. 87 Grafické porovnání výsledků z analýzy torzní tuhosti

Tabulka 20 Navržená struktura pro horní boční část monokoku a lem kokpitu

Struktura	Vrstvení
SU	$[45°_{C200}\ /\ 0°_{UDC150}\ /\ 90°_{UDC150}\ /\ 0°_{UDC150}\ /\ 0°_{CA165}\ /$ $/\ \overline{\mathbf{0}°_{\boldsymbol{ECA-3{,}2-29\ (c=15\,mm)}}}\ ]_S$
COC	$[0°_{C200}\ /\ 45°_{C200}\ /\ (0°_{UDC150})_2\ ]_S$

7 VÝSLEDNÝ KOMPOZITNÍ MONOKOK

Na základě zpracovaných údajů byl sestaven návrh výsledné skladby kompozitního monokoku. Některé navržené skladby byly ověřeny zkouškami, zbylé je nutné otestovat po dodání dalšího voštinového jádra. Jednotlivé části monokoku jsou zobrazeny na Obr. 88 a jejich navržené skladby jsou uvedeny níže v Tabulka 21.



Obr. 88 Jednotlivé části monokoku

Tabulka 21 Výsledná navržená skladba monokoku

Struktura	Vrstvení
FB	$[\,45°_{C200}\,/\,0°_{3\ C200}\,/\,45°_{2\ C200}\,/\,0°_{2\ C200}\,/\,45°_{CA165}\,/\,\boldsymbol{U}\,/$ $/\ 0°_{C200}\,/\,45°_{2\ C200}\,/\,0°_{2\ C200}\,/\,45°_{C200}\,]$
FHB	$[\,0°_{C200}\,/\,45°_{C200}\,/\,0°_{CA165}\,/\,\boldsymbol{U}\,/\,0°_{C200}\,/\,45°_{C200}\,/\,0°_{C200}\,]$
FBSS	$[\,45°_{C200}\,/\,(0°_{UDC150}\,/\,90°_{UDC150})_2\,/\,45°_{CA165}\,/\,\bar{\boldsymbol{U}}\,]_S$
FF	$[\,45°_{C200}\,/\,0°_{UDC150}\,/\,0°_{C160}\,/\,0°_{UDC150}\,/\,45°_{CA165}\,/\,\bar{\boldsymbol{V}}\,]_S$
SIS hor	$[\,45°_{C200}\,/\,0°_{UDC150}\,/\,0°_{CA165}\,/\,0°_{UDC150}\,/\,90°_{UDC150}\,/\,0°_{UDC150}\,/\,45°_{CA165}\,/\,\boldsymbol{W}\,/$ $/\ 45°_{CA165}\,/\,(0°_{UDC150}\,/\,90°_{UDC150})_2\,/\,0°_{UDC150}\,/\,45°_{C200}\,]$
SIS ver	$[\,45°_{C200}\,/\,(0°_{UDC150}\,/\,90°_{UDC150})_2\,/\,45°_{CA165}\,/\,\bar{\boldsymbol{U}}\,]_S$

SU	$[45°_{C200} / 0°_{UDC150} / 90°_{UDC150} / 0°_{UDC150} / 0°_{CA165} / \overline{V}\ ]_S$	
COC	$[0°_{C200} / 45°_{C200} / (0°_{UDC150})_2\ ]_S$	
SHBE	$[\ 45°_{C200} / (0°_{UDC150} / 90°_{C160})_2 / 0°_{UDC150} / 45°_{CA165} / \overline{W}\ ]_S$	
BK	$[\ 45°_{C200} / (0°_{UDC150} / 90°_{UDC150})_2 / 45°_{CA165} / \overline{U}\ ]_S$	
Použité voštiny – vždy pod úhlem 0°		
U - ECA 3,2-48 – 25 mm	V - ECA 3,2-29 – 15 mm	W - ECM 6,4-82 – 12,7 mm

Na základě uvedených skladeb monokoku a plošného 3D modelu bylo sestaveno minimální množství materiálu. Při výrobě je nutné počítat s větším množstvím materiálu pro střihy, což přibližně činí 10 – 20%. Nejvyšších hodnot dosáhla jednosměrná vlákna UDC 150.

Tabulka 22 Minimální množství materiálu

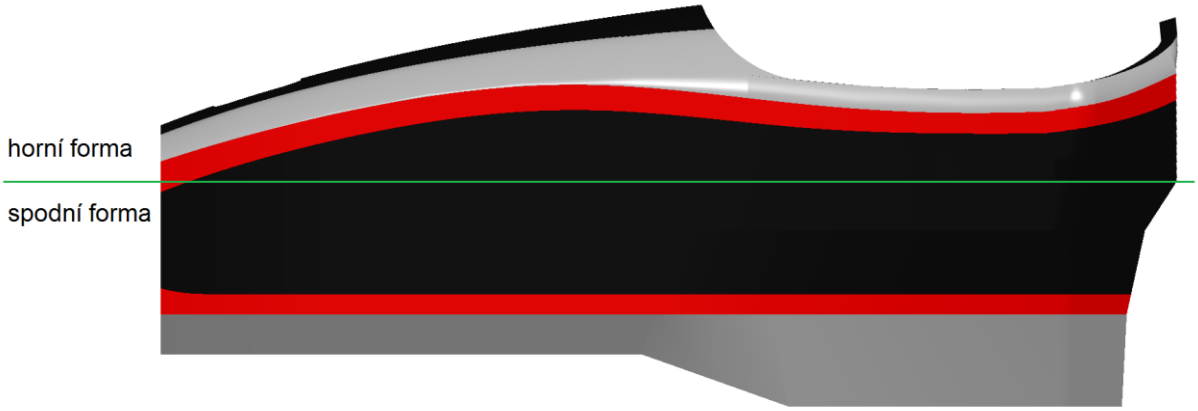
Materiál	Množství	Jednotky
C 160	0,92	m^2
C 200	7,59	m^2
CA 165	4,72	m^2
UDC 150	15,19	m^2
ECA 3,2-48	1,59	m^2
ECA 3,2-29	0,46	m^2
ECM 6,4-82	0,40	m^2
Celková plocha monokoku	2,64	m^2

Celková hmotnost monokokové struktury dle 3D modelu činí 10,3 kg. Zadní ocelový trubkový rám váží 10,37 kg. Minimální celková hmotnost šasi dosahuje 20,67 kg. Při výrobě monokoku za použití technologie laminování s dodatečným vakuováním lze počítat s nárůstem hmotnosti. U vyrobených panelu došlo k průměrnému navýšení hmotnosti o 23 %, a tudíž by minimální celková hmotnost šasi měla vzrůst na 23,04 kg. Reálná hmotnost monokoku ovšem ještě vzroste vlivem použitých insertů.

Tabulka 23 Výsledné hmotnosti určené z CAD modelů

	Hmotnost	Jednotky
D6	**26,34**	kg
Zadní rám s oblouky	10,37	kg
Monokok	10,30	kg
Navržené šasi	**20,67**	kg
Monokok s vyšší hmotností o 23%	12,67	kg
Navržené šasi s přihlédnutím na vyrobené panely	23,04	kg

Předpokládá se, že by vznikly dvě samostatné negativní formy s dělící rovinou zobrazenou na Obr. 89. Formy by byly vyrobeny z polyuretanové pěny, poněvadž při uvedené technologii výroby není zapotřebí zvýšená teplota. Jelikož jde o koncept tvaru monokoku, nebyly dosud vytvořeny jeho formy.



Obr. 89 Předpokládaná dělící rovina forem monokoku.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo aplikovat sendvičovou konstrukci na monokok formulového vozidla kategorie Formule Student vyhovující požadavkům mezinárodních pravidel FSAE. Byla zvolena varianta monokoku se zadní částí tvořenou ocelovým trubkovým rámem. Tato koncepce umožňuje snadnější údržbu pohonné soustavy. Zadní část rámu vychází z posledního zkonstruovaného vozu studentského závodního týmu TU Brno Racing, konkrétně z vozů Dragon 6.

Byly popsány sendvičové konstrukce a jejich materiály. Dále byla popsána technologie ručního laminování s dodatečným vakuováním, jež využívá konstrukční tým TU Brno Racing. Následně byl popsán postup při výpočtu ohybové tuhosti sendvičového panelu pro případ zatížení tříbodovým ohybem. Pro určení tuhosti potahů panelů byla použita klasická laminátová teorie. Na základě těchto výpočtů byly vyrobeny zkušební vzorky.

Nejprve byla provedena tahová zkouška uhlíkových a hybridních tkanin i uhlíkových jednosměrných vláken. Na jejich základě byla určena tuhost a pevnost používaných kompozitních materiálů. Tříbodová ohybová zkouška byla provedena podle požadavků pravidel FSAE. Tři testované vzorky by bylo možné použít do struktury monokoku, u zbylých zkušebních vzorků byla provedena úprava skladby panelů. Pro ověření dostatečné smykové pevnosti potahů vybraných sendvičových struktur byla provedena smyková zkouška opět dle požadavků pravidel FSAE. U dvou druhů potahů byl zjištěn minimální počet vrstev.

Následně byl vytvořen koncepční plošný model monokoku s upravenou zadní trubkovou částí a zavěšením přední nápravy. Tento návrh sloužil pro sestavení výpočtového modelu v programu Patran/Nastran za účelem zjištění dostatečné torzní tuhosti při navrhované skladbě sendvičových panelů monokoku. Z analýzy vyplývá, že torzní tuhost navržené konstrukce vzrostla o 46% ve srovnání s trubkovým rámem vozu Dragon 6.

Zároveň došlo ke snížení hmotnosti rámu o více než 20%, která byla zjištěna z 3D modelu. Hmotnost monokoku činí 10,3 kg. Vlivem výroby a použití insertů na přenos bodových sil do sendvičové struktury se hmotnost samotného monokoku zvýší. Při výrobě zkušebních vzorků pro tříbodovou ohybovou zkoušku dosáhlo průměrné navýšení hmotnosti o 23% ve srovnání s předpokládanou hmotností.

Použití monokokové konstrukce v rámci kategorie Formule Student představuje novou fázi vývoje. Dosahuje podstatně vyšších hodnot torzní tuhosti a nižší hmotnosti než při použití trubkového rámu. Pro zvolenou technologii výroby nejsou náklady příliš vysoké. Důležitým faktorem jsou dlouholeté zkušenosti s výrobním procesem kompozitních dílů v týmu TU Brno Racing. Při získání dalšího voštinového jádra je nutné uskutečnit tříbodovou ohybovou zkoušku pro neověřené části struktury monokoku. Dalším krokem bude navrhnout inserty do sendvičové struktury k upevnění komponentů.

.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

[1] Formula SAE Series [online]. 2016 [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: http://students.sae.org/cds/formulaseries/

[2] Formula Student [online]. 2016 [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: http://formulastudent.imeche.org/formula-student/

[3] Formula Student - World Ranking Lists [online]. 2016 [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: http://mazur-events.de/fs-world/

[4] Formula Student Germany [online]. 2016 [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: https://www.formulastudent.de/

[5] Formula Student Czech Republic [online]. 2016 [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: http://www.fsczech.cz/

[6] Formula SAE® Rules [online]. 2016 [cit. 2016-03-06]. Dostupné z: http://www.fsaeonline.com/content/2016_FSAE_Rules.pdf

[7] TU Brno Racing [online]. 2016 [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: http://www.tubrnoracing.cz/cs/

[8] Oxford Brookes Racing [online]. 2016 [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: https://obr.brookes.ac.uk/

[9] High-Octane Motorsports e.V. [online]. 2016 [cit. 2016-04-03]. Dostupné z: http://www.octanes.de/

[10] KA-RaceIng e.V. [online]. 2016 [cit. 2016-04-03]. Dostupné z: http://www.ka-raceing.de/

[11] Formule ETS Montreal [online]. 2016 [cit. 2016-04-03]. Dostupné z: http://formuleets.ca/

[12] Formula Buckeyes [online]. 2016 [cit. 2016-04-03]. Dostupné z: https://formulabuckeyes.engineering.osu.edu/

[13] STANĚK, Lukáš. *Návrh skladby sendvičového kompozitního materiálu pro dopravní a stavební aplikace*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2013, 83 s., 17 s. příloh. Dostupné také z: http://hdl.handle.net/10563/24934. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Rusnáková, Soňa.

[14] DMM Průmyslové spektrum. *Sendvičové konstrukce*. [online]. 2001 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/sendvicove-konstrukce.html

[15] JURAČKA, Jaroslav. *Kompozitní konstrukce v letectví*. 5. Brno, 2015.

[16] HEXCEL, *Honeycomb Attributes and Properties*. [online].[cit. 2016-04-10]. Dostupné z: http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb_Attributes_and_Properties.pdf

[17] HEXCEL, *Honeycomb Sandwich Design Technology*. [online].[cit. 2016-04-10]. Dostupné z: http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb_Sandwich_Design_Technology.pdf

[18] Havel Composites CZ s.r.o., *Technologie jejich popis a schémata*. [online].[cit. 2016-04-10]. Dostupné z: http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html

[19] GURIT. *Structural core materials*. [online]. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: Dostupné z: http://www.gurit.com/structural-cores.aspx

[20] Fiber Glast. *Vacuum Bagging Equipment*. [online]. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: Dostupné z: http://www.fibreglast.com/product/vacuum-bagging-equipment-and-techniques-for-room-temp-applications/Learning_Center

[21] Formula SAE® *Downloads for Competition* [online]. 2016 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: *http://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=5ade9b01-8903-4ae1-89e1-489a8a4f08d*9

[22] NALLAGULA, Sandeep, *"Behavior and Flexure Analysis of Balsa Wood Core Sandwich Composites: Experimental, Analytical and Finite Element Approaches"* (2006). University of New Orleans Theses and Dissertations. Paper 371.

[23] KRYSTEK, Jan. *Pevnostní kritéria pro kompozitní materiály* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2016-04-27]. Dostupné z: http://seminare.fav.zcu.cz/media/document/krystek_pevnostni-kriteria-pro-kompozitni-materialy.pdf. Fakulta aplikovaných věd, Západočeské univerzity v Plzni.

[24] BY E.F. BRUHN .. [ET AL.]. *Analysis and design of flight vehicle structures*. Philadelphie: G.W. Jacobs, 1973. ISBN 978-096-1523-404.

[25] NETTLES, Alan T. *Basic mechanics of laminated composite plates*. 1994. Dostupné z: http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19950009349.pdf

[26] CABRNOCH, Bohuslav. *Únosnost nosnost leteckých kompozitních konstrukcí: Metody hodnocení únosnosti kompozitních konstrukcí* [online]. In: . Praha, 2010, s. 21 [cit. 2016-04-27]. Dostupné z: http://www.csm-kompozity.wz.cz/Unosnost_leteckych_konstrukci.pdf

[27] Dimensionierungsrichtwerte für den Segel- und Motorsegelflugzeugbau, IDAFLIEG, 1988

[28] *MSC Software* [online]. [cit. 2016-04-27]. Dostupné z: http://www.mscsoftware.com/

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	[mm]	Délka panelu
AWS		American Welding Society
b	[mm]	Šířka panelu
c	[mm]	Tloušťka jádra
D	[mm]	Ohybová tuhost panelu
E	[MPa]	Modul pružnosti
EI	[N·m^2]	Ohybová tuhost
EP		Epoxidy
F	[N]	Zatěžovací síla
FB		Přední přepážka
FBSS		Podpory přední přepážky
FH		Přední oblouk
FHB		Výztuhy předního oblouku
FI		Failure Indices
G12	[MPa]	Modul pružnosti ve smyku
J	[m^4]	Kvadratický moment průřezu
L	[mm]	Rozteč podpor
MH		Hlavní oblouk
MHB		Výztuhy hlavního oblouku
MHBS		Podpory výztuh hlavního oblouku
q	[N/mm]	Liniová síla
Re	[MPa]	Mez kluzu
Rm	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
S	[mm^2]	Plocha
SES		Structural Equivalency Spreadsheet
SHBE		oblast uchycení ramenních pásů
SIS		Boční nárazová struktura
t	[mm]	Tloušťka potahu
UP		Polyestery
VE		Vinylestery
θ	[deg]	Úhel natočení
μ_{12}		Poissonovo číslo

$\boldsymbol{Q}$	[MPa]	Matice tuhosti
δ	[mm]	Posuv, deformace

SEZNAM PŘÍLOH

I. Protokoly z tahových zkoušek

Zwick / Roell

08.12.15

Test report

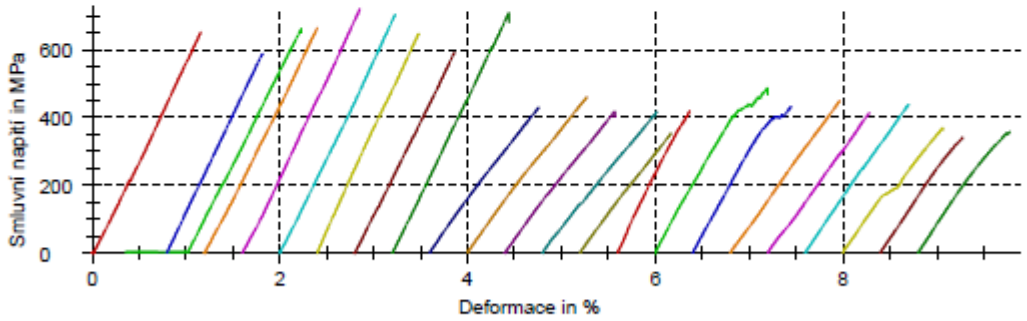
Customer : TU Racing Brno
Test standard : ASTM D3039/D3039M
Material : Carbon fiber
Tester : Ing. Josef Zapletal, Ph.D.
Machine data : Zwick Z250, Dynacell: 50 kN, Extensometer: MultiXtens

Pre-load : 2 MPa Speed, yield point : 2 mm/min
Speed, E-Modulus : 2 mm/min Test speed : 2 mm/min

Test results:

Legend	Nr	Specimen ID	a_0 mm	b_0 mm	Notes	S_0 mm^2	m_E GPa	μ	F_m N	R_m MPa	A_t %
	19	1	0,73	14,97	1-A	10,93	56,77	0,38	7135	653	1,2
	20	2	0,75	14,97	1-B	11,23	54,22	-7,90	7436	662	1,8
	21	3	0,74	14,97	1-C	11,08	57,84	0,07	6531	590	1,0
	22	4	0,74	14,97	1-D	11,08	55,01	0,16	7386	667	1,2
	23	5	0,67	15	2-A	10,05	58,99	0,02	7244	721	1,3
	24	6	0,66	15	2-B	9,90	56,21	0,08	6975	705	1,2
	25	7	0,67	15	2-C	10,05	60,31	-0,04	6513	648	1,1
	26	8	0,66	15	2-D	9,90	55,40	0,08	5870	593	1,1
	27	9	0,67	15	2-E	10,05	57,45	-0,00	7130	710	1,2
	28	10	0,88	14,9	3-A	13,11	37,82	0,74	5628	429	1,2
	29	11	0,87	14,9	3-B	12,96	37,99	0,78	5962	460	1,3
	30	12	0,89	14,9	3-C	13,26	35,97	0,66	5534	417	1,2
	31	13	0,86	14,9	3-D	12,81	33,64	0,64	5333	416	1,2
	32	14	0,87	14,9	3-E	12,96	36,50	0,85	4573	353	1,0
	33	15	0,66	14,88	4-A	9,82	56,62	0,25	4121	420	0,8
	34	16	0,65	14,88	4-B	9,67	48,59	-0,13	4716	488	1,2
	35	17	0,66	14,88	4-C	9,82	50,47	-0,13	4243	432	1,0
	36	18	0,6	14,93	5-A	8,96	40,36	0,28	4023	449	1,2
	37	19	0,59	14,93	5-B	8,81	39,29	-0,01	3633	412	1,1
	38	20	0,59	14,93	5-C	8,81	41,09	-0,36	3855	438	1,1
	39	21	0,72	14,92	6-A	10,74	28,05	0,22	3960	369	1,1
	40	22	0,7	14,92	6-B	10,44	42,45	-0,18	3560	341	0,9
	41	23	0,73	14,92	6-C	10,89	40,79	-0,40	3891	357	1,0

Series graph:



Zapletal - TU Racing, tah kompozit.zs2

Page 1/1

Zwick / Roell

26.01.16

Test report

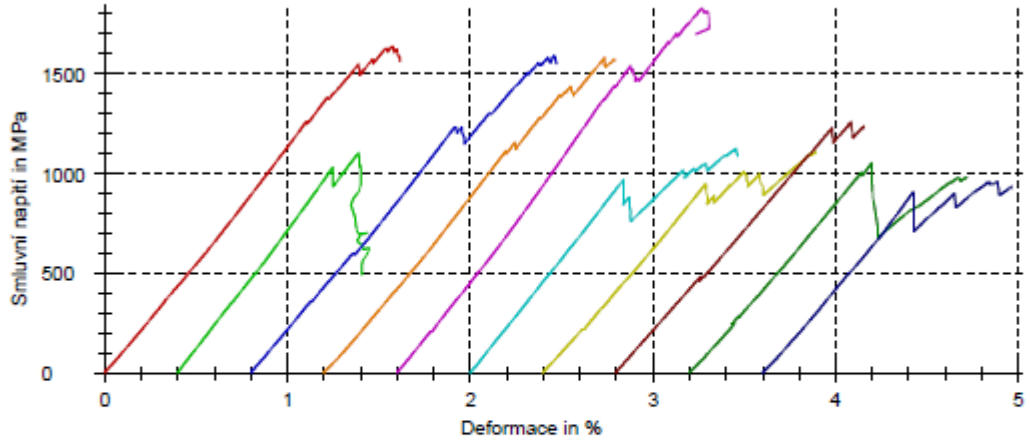
Customer : TU Racing Brno
Job no. :
Test standard : ASTM D3039/D3039M
Type and designation :
Material : Carbon fiber
Tester : Ing. Josef Zapletal, Ph.D.
Machine data : Zwick Z250, Dynacell: 50 kN, Extensometer: MultiXtens

Pre-load : 2 MPa Speed, yield point : 2 mm/min
Speed, E-Modulus : 2 mm/min Test speed : 2 mm/min

Test results:

Legend	Nr	Specimen ID	Notes	a_0 mm	b_0 mm	S_0 mm^2	L_0 mm	m_E GPa	$R_{p0.2}$ MPa	Fm N	R_m MPa	A_t %
	42	1	7A	0,84	15,5	13,02	50,00	112,34	1580	21326	1640	1,6
	43	2	7B	0,78	15,83	12,35	50,00	119,73	959	13633	1100	1,0
	44	3	7C	0,86	15,08	12,97	50,00	106,00	1560	20629	1590	1,7
	45	4	7D	0,85	15,88	13,50	50,00	112,12	-	21339	1580	1,6
	46	5	7E	0,79	15,9	12,56	50,00	117,03	1750	22991	1830	1,6
	47	6	8A	0,72	14,92	10,74	50,00	115,12	777	12076	1120	1,5
	48	7	8B	0,74	15,23	11,27	50,00	106,53	966	12524	1110	1,5
	49	8	8C	0,72	15,15	10,91	50,00	101,75	-	13732	1260	1,4
	50	9	8D	0,73	15,2	11,10	50,00	108,78	857	11688	1050	1,5
	51	10	8E	0,75	15,21	11,41	50,00	111,57	831	10943	959	1,4

Series graph:



Zapletal - TU Racing, tah kompozit, Žídek.zs2 **Page 1/1**