



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

KONSTRUKČNÍ NÁVRH KOMPOZITNÍHO BATTERY PACKU PRO FORMULI STUDENT

FORMULA STUDENT COMPOSITE BATTERY PACK

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matej Hagara

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Janoušek, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Matej Hagara**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojírenství
Vedoucí práce: **Ing. Michal Janoušek, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

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 bakalářské práce:

Konstrukční návrh kompozitního battery packu pro Formuli Student

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro návrh úspěšného monopostu Formule Student je klíčová nízká hmotnost. Využití kompozitních materiálů je jednou z možností, jak snížit hmotnost vozu při zachování potřebných mechanických vlastností součástí. Cílem práce je navrhnout kompozitní battery pack, tak aby splňoval pravidla soutěže a vyhovoval potřebám týmu.

Cíle bakalářské práce:

Provést rešerši problematiky battery packu v soutěži Formula Student.
Vypracovat konstrukční návrh battery packu s ohledem na zástavbu v monopostu.
Provést mechanické testování vybraných kompozitních struktur použitých při konstrukci boxu.

Seznam doporučené literatury:

ASM Handbook: Volume 21, Composites, ASM International, The Material Information Company, 2001.

NIU, C. Y. M.: Composite Airframe Structure, Hong Kong Conmilit Press Ltd., 664 stran, 2005.

Formula Student Germany All FSAE Teams. Formula Student Germany [online]. 2020 [cit. 2020-09-22]. Dostupné z: <http://www.formulastudent.de/fsc/>.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Hlavným zameraním tejto bakalárskej práce je návrh a riešenie problematiky konštrukčného návrhu kompozitného battery packu (akumulátorového kontajneru) a jeho následnej zástavby do monopostu študentskej formule Dragon eD2. Úvodná časť práce popisuje základné pravidlá FSAE, ktoré súvisia s návrhom danej súčasti a zároveň zreteľne a presne vymedzuje pole konštrukčného návrhu tak, aby bola zaistená maximálna bezpečnosť pilota. V teoretickej časti sú prezentované základné konvenčné typy a technologické postupy výroby kompozitných materiálov, pričom je dôraz kladení najmä na zvolenú technológiu výroby – „metódu suchého prepregu“. Uvedené poznatky boli v druhej časti práce implementované do série výpočtov a mechanických skúšok. Na základe získaných dát a poznatkov boli prispôsobené pevnostné simulácie pre jednotlivé kompozitné štruktúry tak, aby bola zachovaná jednoduchosť a účelovosť návrhu. Dôraz je predovšetkým kladení na ľahkú servisnú prístupnosť, požadovanú tuhosť a nízku hmotnosť. Záver práce zhodnocuje dosiahnuté výsledky, pričom ponúka optimálny návrh výroby a možného zabudovania s ohľadom na ekonomickosť riešenia a následnú malosériovú výrobu.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Formula Student, FSAE, kompozitný battery pack, teória laminátov, statická skúška ťahom, skúška trojbodovým ohybom, skúška strihom, MKP

ABSTRACT

The main goal of the presented thesis is the design and solution to a riddle of a constructive design of a „battery pack“ (battery container) and its installation into the student formula Dragon eD2. The introduction part of the thesis describes the basic FSAE rules, with a focus on the design of the above-mentioned component regarding the pilot's safety. The main aim of the theoretical part is to introduce the essential and convectional typology and manufacturing processes of composite material's production, while special attention is given to prepreg technology. The knowledge that was derived from the first part was used to perform a set of mechanical tests and analytical computations. Based on gathered data and information the following simulations were adjusted with intention of maintaining simplicity and efficiency. The emphasis is places on easy and maintainable design, good structural strength, and low weight. The final part of the thesis offers the conclusion based on the obtained results and presents theoretically optimal design in terms of production and installation for low-cost production in small series.

KEYWORDS

Formula Student, FSAE, composite battery pack, lamination theory, static tensile strength test, three-point bend test, shear test, structural analysis, MKP

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

HAGARA, Matej. *Konštrukční návrh kompozitního battery packu pro Formuli Student Brno*, 2022. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 100 s. Vedoucí bakalářské práce Michal Janoušek.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojim pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Michala Janouška, Ph.D. a s použitím informačných zdrojov uvedených v zozname.

V Brne dňa 20. mája 2022

.....

Matej Hagara

POĎAKOVANIE

V prvom rade by som chcel poďakovať Ing. Michalovi Janouškovi, Ph.D. za odborné vedenie tejto bakalárskej práce a cenné rady počas celého štúdia a pôsobenia v tíme TU Brno Racing.

Špeciálne poďakovanie patrí aj mojej rodine, ktorá ma počas celého vysokoškolského štúdia aktívne podporovala a poskytovala ako psychologickú, tak aj finančnú podporu.

V neposlednom rade by som chcel poďakovať všetkým, ktorý akoukoľvek formou prispeli k napísaniu tejto záverečnej práce, menovite Dr. Zoranovi Pelagíčov, Ing. Janovi Šplíchalovi, Ph.D. a členom sekcie chassis DX, eD1 a eD2.

OBSAH

Úvod.....	11
1 Formula Student.....	12
1.1 História.....	12
1.2 Súčasnosť.....	12
1.3 Disciplíny Formuly Student.....	12
1.4 Tím TU Brno Racing.....	13
2 Battery pack.....	14
2.1 Battery pack v motoršporte.....	14
2.1.1 Formula 1.....	15
2.1.2 Formula E.....	16
2.2 Battery pack vo Formuly Student.....	17
2.2.1 Technické náležitosti kompozitného battery packu.....	17
2.2.2 Konštrukčné materiály pre návrh battery packu vo Formuly Student.....	18
2.2.3 Výroba kompozitného battery packu vo Formuly Student.....	21
2.2.4 Uloženie battery packu vo Formuly Student.....	21
3 Battery pack eD1.....	23
3.1 Konceptné riešenie battery packu eD1.....	23
3.2 Presnosť výroby battery packu eD1.....	25
3.3 Bezpečnosť battery packu eD1.....	26
4 Kompozitné materiály.....	29
4.1 Matrice.....	29
4.1.1 Organické (polymérne) matrice.....	29
4.1.2 Epoxidy.....	29
4.1.3 Epoxidy – spomaľovače horenia.....	30
4.2 Výstuže.....	30
4.2.1 Častice a vločky.....	30
4.2.2 Vlákná.....	30
4.2.3 Sklené vlákna.....	33
4.2.4 Aramidové vlákna.....	33
4.2.5 Uhlíkové vlákna.....	33
4.2.6 Hybridné tkaniny.....	35
4.3 Materiály sendvičových štruktúr.....	35
4.3.1 Peny.....	36
4.3.2 Voštiny.....	37
4.3.3 Zalievacie zmesi (Potting compound).....	38
4.4 Technológia výroby kompozitných dielov.....	38
4.4.1 Prepreg.....	39
4.4.2 OOA Prepreg (Out of Autoclave prepreg) & Semipreg.....	40
4.4.3 Debulking.....	40
5 Konštrukcia battery packu eD2.....	41
5.1 Zástavba do monopostu eD2.....	41
5.2 Konštrukcia segmentu.....	43

5.2.1	Kompresia článkov	43
5.2.2	Uchytenie článkov.....	44
5.2.3	Chladienie článkov.....	46
5.3	Konštrukcia battery packu.....	47
5.3.1	Uchytenie battery boxu k monokoku.....	48
5.3.2	Demontáž battery packu z monopostu eD2	48
5.3.3	Návrh insertu.....	49
6	Selekcia kompozitných materiálov	50
6.1	Voľba matrice.....	50
6.1.1	ER 88 FR (Preliminary prototype).....	50
6.1.2	Letoxit Foil® LFX 056	50
6.2	Test nehorľavosti UL94-V0	51
6.3	Skúška ťahom pre PMCs.....	52
6.3.1	Výroba vzoriek.....	53
6.3.2	Testovanie vzoriek	54
6.3.3	Charakteristika poškodenia	55
6.3.4	Analýza výsledkov skúšky ťahom (Vzorky v orientácii 0° a 90°)	56
6.3.5	Analýza výsledkov skúšky ťahom (Vzorky v orientácii 45°)	58
6.3.6	Definovanie materiálových charakteristík	60
6.4	Voľba jadra.....	63
7	Návrh kompozitných štruktúr	65
7.1	Vplyv galvanickej korózie na výsledné vlastnosti štruktúry.....	65
7.2	Návrh kompozitnej skladby.....	66
7.3	Stanovenie maximálneho hmotnostného objemu (T3.4.3).....	69
8	Mechanické skúšky	70
8.1	Skúška trojbodovým ohybom.....	71
8.2	Skúška strihom	73
9	Vplyv voľby materiálu na celkovú cenu produktu	77
9.1	Cyklus vytvrdzovania.....	77
9.2	Cena materiálu.....	78
	Záver	79
	Použité informační zdroje	81
	Zoznam použitých skratiek a symbolov.....	88
	Zoznam obrázkov a grafov.....	96
	Zoznam tabuliek.....	99
	Zoznam príloh	100

ÚVOD

Globálna obmena automobilového priemyslu, je úzko spojená so zintenzívňovaním ekologických regulácií, ktoré prinášajú zvyšujúci sa počet motorových vozidiel disponujúcich elektrickou pohonnou jednotkou. Obdobná premena značne vplýva aj na oblasti motoršportu v rámci ktorých dochádza k vzniku nových súťažných tried a odrôd stávajúcich kategórii, medzi ktoré sa radí aj Formula Student Electric.

Predložená bakalárska práca sa zaoberá návrhom kompozitného battery packu pre monopost formulového typu Dragon eD2 tímu TU Brno Racing, spadajúceho pod medzinárodnú súťaž Formula Student. Koncipovaný návrh je úzko prepojený so získanými poznatkami z debutovaného monopostu eD1, v prípade ktorého bol návrh zacielený na jednoduchosť, účelovosť a komplexnú funkčnosť pri súčasnom nadobudnutí fundamentálnych znalostí zo širokej škály technických oblastí.

Úvodná časť bakalárskej práce sa plne zaoberá rešeršnou problematikou kompozitného battery packu vo Formule Student a zároveň prepojuje poznatky z kráľovských kategórii motoršportu - Formuly E a Formuly 1. Dôraz je predovšetkým kladený na ucelený prehľad a oboznámenie čitateľa so zmienenou problematikou ako aj vytýčenie odborných pojmov. Rešeršný výklad je následne doplnený dôkladnou analýzou problematiky stávajúceho konštrukčného riešenia a krokmi, ktoré viedli k odstráneniu vzniknutých problémov a zamedzeniu ich opätovného vzniku.

Priamym prepojením jednotlivých oblastí tak vzniká ucelený konštrukčný návrh pri zachovaní limitných náležitosti ustanovených súborom technických pravidiel. Konceptné riešenie má zásadný vplyv na výšku ťažiska, moment zotrvačnosti a rozloženie váhy, ktoré významne ovplyvňujú chovanie a stabilitu monopostu. Dôraz je z tohto hľadiska predovšetkým kladený na zástavbu battery packu do navrhovaného celo-kompozitnom monokoku a prijateľnú formu následnej demontáže a servisnej prístupnosti.

Ústredná časť práce je zameraná na voľbu kompozitných materiálov s ohľadom na preferované druhy aplikácie a splnenie podmienky nehorľavosti. Zvolené materiály sú podrobené statickej skúške ťahom a výsledné dáta sú následne zahrnuté do procesu dimenzovania skladby potťahov kompozitných štruktúr. Rozmanitosť použitých materiálov umožňuje z konštrukčného hľadiska osobitný návrh diametrálne odlišných skladieb a následnú minimalizáciu nežiadúcej hmotnosti.

Určenie konečného rozloženia individuálnych kompozícií skladieb je založené na výsledkoch simulácii v prostredí Ansys Workbench a stanovení módov zlyhania uvažovaných štruktúr. Tie, sú následne vyrobené a osobitne otestované v sérii mechanických skúšok, ktoré deklarujú naplnenie bodov pravidiel a preukazujú nadobudnutie minimálnej požadovanej bezpečnosti v porovnaní s ekvivalentným materiálom.

Záver práce pojednáva a zhodnocuje dosiahnuté výsledky ako aj prípadnú ekonomickosť výroby s ohľadom na použité materiály. Zároveň dochádza k stanoveniu oblastí, ktoré poskytujú možnosť nastávajúcej optimalizácie s cieľom zjednodušiť predložený návrh.

1 FORMULA STUDENT

Formula Student je medzinárodná súťaž vysokoškolských a univerzitných tímov, ktorých cieľom je navrhnuť a skonštruovať jednomiestny prototyp závodného monopostu formulového typu v časovom horizonte jedného roku [1].

1.1 HISTÓRIA

Jej vznik sa datuje do roku 1980, kedy profesor Ron Matthews z UT (The University of Texas at Austin) založil organizáciu SAE (Society of Automotive Engineers) a následne v roku 1981 zorganizoval historicky prvý závod Formuly Student na pôde tejto univerzity. Zároveň dochádza k integrácii prvých spoločností ako GM (General Motors), Ford atď., ktoré v roku 1994 vytvárajú konzorcium na čele s tzv. Veľkou Detroitskou trojkou (General Motors, Ford, Chrysler Corporation) a investujú značnú časť financií na udržanie a spopularizovanie tejto súťaže medzi jednotlivými univerzitami v Spojených štátoch amerických [2, 3].

Vďaka zviditeľneniu a masívnej popularizácii medzi univerzitami a prevažne spoločnosťami so strojným a automobilovým zameraním sú v roku 1998 zorganizované prvé závody Formuly Student na území mimo Severnú Ameriku a to vo Veľkej Británii. Tento trend viedol k vzniku ďalších obdobných závodov a v súčasnosti je možné zúčastniť sa 20 závodov na 5 kontinentoch vrátane domáceho podujatia Formula Student Czech Republic na okruhu v Mostě [3].

V roku 2006 dochádza ku vzniku novej kategórie Formula Student Hybrid (FSH) na Dartmouth College. V nadväznosti na popularizáciu a postupnú elektrifikáciu v automobilovom priemysle dochádza v roku 2013 ku vzniku kategórie pre čisto elektrické formule – Formula Student Electric (FSE). Následne v roku 2017 predstavili organizátori Formuly Student Germany (FSG) ako organizátori neoficiálnych majstrovstiev sveta závodov SAE novú kategóriu Formula Student Driverless (FSD), ktorá má v roku 2022 čiastočne nahradiť stávajúcu kategóriu Formula Student Combustion (FSC) [4, 5].

1.2 SÚČASNOSŤ

V súčasnosti je na svete približne 800 tímov, z nich prevažná väčšina pochádza z Európy a nemeckých univerzít. Zároveň sú 3 / 4 z celkového počtu tímov sústredené na stavbu monopostov so spaľovacím pohonom [6, 7]. Súbežne z postupným pribúdaním jednotlivých podujatí došlo k významnému rozšíreniu členskej základne organizátorov a spoluorganizátorov z radov firiem, ako aj k ustanoveniu organizácií, ktoré zabezpečujú rozvoj znalostí študentov prostredníctvom podujatí, na ktorých čele stoja rečníci z významných svetových firiem a motoristických tímov. Medzi tieto organizácie patria Audi Hungaria Faculty of Automotive Engineering at Széchenyi István University, ktorá každoročne organizuje vzdelávacie semináre v rámci akcie Formula Student Symposium, Formula Student Germany organizujúca Formula Student Academy a mnoho ďalších [8, 9].

1.3 DISCIPLÍNY FORMULY STUDENT

Jednotlivé tímy z celého sveta súťažia medzi sebou v disciplínach statických a následne disciplínach dynamických. Tie majú za účel preveriť kvalitu a spoľahlivosť konštrukčného návrhu v plnom závodnom tempe. Dynamické disciplíny môžu absolvovať iba tie tímy, ktoré spĺňajú bezpečnostné náležitosti. Ku ich overeniu dochádza počas mechanickej inšpekcie, skúškou náklonu (Tilt test), skúškou brzd (Brake test) a testom hlučnosti (Noise test). Pre elektrické monoposty je mechanickej inšpekcia doplnená o inšpekciu akumulátoru

(Accumulator inspection), kontrolu elektrických súčiastok (Electrical inspection) a otestovanie monopostu proti prenikaniu vody do priestoru elektrických komponentov (Rain test). Každé vozidlo je zároveň po úspešnom absolvovaní Endurance podrobené opätovnej inšpekcii (Post event inspection).

V rámci statických disciplín je každý návrh hodnotený individuálne na základe znalostí a kvalít, ktoré preukážu členovia jednotlivých tímov. Medzi tieto disciplíny sa radí predstavenia podnikateľského plánu (Business plan presentation), interpretácia necenenia výrobných procesov (Cost and Manufacturing) a prezentácia konštrukčného návrhu (Engineering design). Tieto disciplíny zároveň ponúkajú šancu na úspech aj tímom, ktoré neprejdú mechanickou previerkou alebo nie je v ich finančných a personálnych možnostiach postaviť konkurencieschopný monopost.

Dynamické disciplíny ponúkajú šancu na výhru v jednotlivých kategóriách tým tímom, ktoré sa zamerajú na špecifickú kategóriu a vybalansujú závodný monopost na úkor výsledkov v ostatných disciplínach. Jednotlivé tímy sa môžu zúčastniť kategórií Acceleration, Skidpad, Autocross a v neposlednom rade kategórie Endurance & Efficiency, ktorá preverí monopost na trati dlhej 22 km [10].

1.4 TÍM TU BRNO RACING

Tím TU Brno Racing (viď. obr. 1) bol založený v roku 2010 pod záštitou Vysokého učení technického v Brně na Fakulte strojního inženýrství. V priebehu dvanásťročného pôsobenia postavil tím celkovo desať spaľovacích a jeden elektrický monopost pod rovnomenným označením Dragon. Tím sa skladá zo študentov bakalárskeho a magisterského študijného programu naprieč všetkými fakultami zmienenej univerzity pod dohľadom a záštitou Ústavu automobilového a dopravního inženýrství [11]. V aktuálnej sezóne 2021 / 2022 dochádza k významnej reprofilizácii tímu (na základe popularizácie elektromobility a umelej inteligencie), zúčastňujúceho sa kategórie FSC na kategóriu FSE s implementovaním prvkov a spôsobenou zástavbou pre budúci prechod na kategóriu FSD.



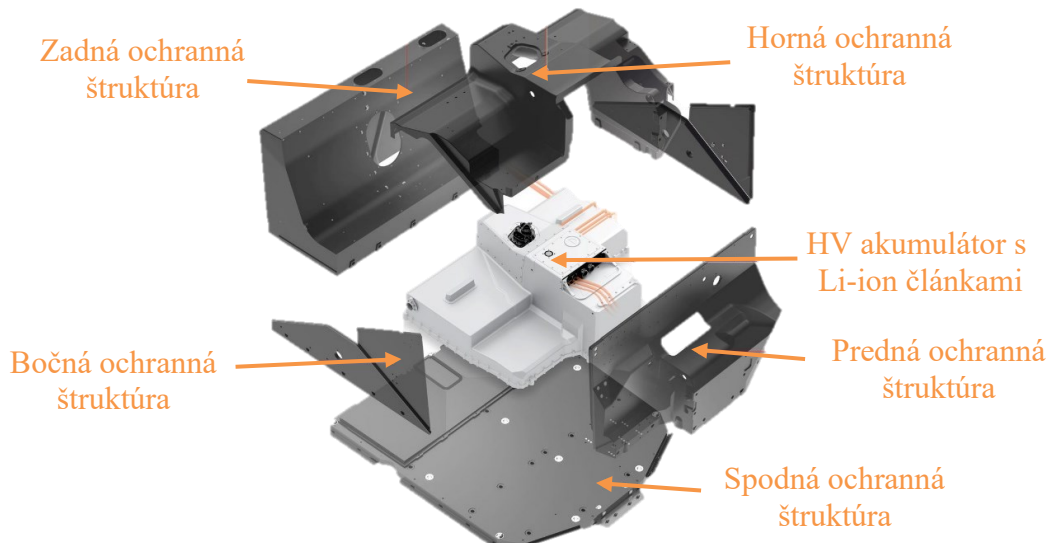
Obr. 1 Tím TU Brno Racing [12]

2 BATTERY PACK

V súčasnosti sa môžeme stretnúť s rozličnými typmi batérií. Líšia sa tvarom, konštrukciou, kapacitou, ale predovšetkým metódou využitia v praktickom svete. Na rozdiel od sveta praktického, by v ideálnom svete technológie cielene viedli ku vzniku optimálnej batérie, ktorá by umožnila aplikáciu v širokej sfére konvenčného využitia, bez ohľadu na parametre zaťaženia, kapacitu, atď. . V reálnom svete závisí využiteľnosť batérie od predom definovaných parametrov a nie je tak napríklad možné využívať plný potenciál danej batérie v špecifických podmienkach. Čiastkové riešenie predkladajú takzvané battery packs, ktoré ponúkajú optimálnu výkonnosť, nadpriemernú bezpečnosť, vysokú mieru variability a to nie len vo frapantnom prostredí závodných monopostov [13].

2.1 BATTERY PACK V MOTORŠPORTE

Základnou funkciou battery packu v motoršporte je zabezpečiť maximálnu bezpečnosť elektrických komponentov a zamedziť vzniku potenciálneho rizika, ktoré by v prípade fyzického poškodenia alebo havárie mohlo viesť k ohrozeniu života a zdravia posádky daného závodného automobilu. Zároveň musí daný produkt plniť ochrannú funkciu v prípade mimoriadnej situácie (napr. požiar v dôsledku porušenia palivovej bunky po havárii) a poskytovať príslušným záchranným zložkám potrebný čas pre výkon nevyhnutných úkonov k záchrane ľudského života. Na obr. 2 sú prezentované jednotlivé carbon - zylonové štruktúry, ktoré chránia vysoko napäťové Li-ion články dakarského špeciálu RS Q e-tron pred prípadným poškodením [14].



Obr. 2 HV battery pack Audi RS Q e-tron [14]

Základným stavebným prvkom battery packu sú jednotlivé batérové články, ktoré tvoria primárne podjednotky, ktoré svojim tvarom a usporiadaním udávajú následný tvar obalu. V rámci návrhu tak prebieha súbežný proces dizajnu elektrického rozhrania a dizajnu mechanických súčastí a komponentov [15].

Významným aspektom, ktorý priamo ovplyvňuje výsledný tvar obálky a rozloženie jednotlivých článkov je tepelný manažment. Zvolený systém na základe charakteristického využívania akumulátora určuje výsledný systém odvádzania prebytočného tepla z článkov,

čím významne pozmeňuje celkový dizajn daného battery packu s ohľadom na zástavbu vodných chladiacich systémov, výmenníkov tepla a odvodných trás v prípade užitia konvekcie pomocou núteného prúdenia vzduchu [15].

2.1.1 FORMULA 1

Významná časť batériových boxov v motoršporte je tvorená kompozitnými vláknami alebo hliníkovými zliatinami. Medzi tieto zariadenia patrí aj ESS (Energy storage system) osádzaný do monopostov Formuly 1 (vid'. obr. 3).



Obr. 3 Formula 1 - Energy storage system [16]

Na rozdiel od battery boxov používaných v súťaži Formula Student, musia byť obálky segmentov, invertorov, DC / DC meničov ako aj príslušných súčiastok Formuly 1 a Formuly E hermeticky uzavreté, aby došlo k zabráneniu kondenzácie vlhkosti a následnému poškodeniu zabudovaných komponentov. Každý box je preto podrobený pretlakovému testu s využitím inertného plynu v dôsledku preukázania ochrany IP67 [16].

Súčasťou trakčného systému Formuly Student, medzi ktoré patrí aj battery box, musia byť na rozdiel od Formuly 1 chránené pred vlhkosťou v podobe dažďa. Každý battery box je preto podrobený takzvanému „rain testu“, kedy je po dobu 120 sekúnd povrch monopostu vystavený kontinuálnemu kropeniu dažďovými kvapkami a následne po dobu 120 sekúnd prebieha pozorovanie v rámci ktorého nesmie monitorovacie zariadenie preukázať chybu zapríčinenú porušením elektronických súčastí vodou alebo vlhkosťou. Pokiaľ monopost disponuje akumulátormi (napr. vreckové články), ktoré by v dôsledku neodbornej manipulácie alebo poškodenia mohli produkovať výbušný plyn, daný box musí disponovať systémom, ktorý pomocou vetrania zabráni dosiahnutiu explozívnej koncentrácie zmieneneho plynu [10].

Relevantným faktorom bezpečnosti v prípade Li-polymérových batérií používaných vo Formule 1 je naplnenie certifikácie UN 38.3 preukazujúcej bezpečnosť na základe testov a štandardov pre transport nebezpečných nákladov. Jednotlivé testy vystavujú batérie a battery packy nárazovým testom, vibračným testom, nízkym a vysokým teplotným cyklom, testom prebitia a núteného vybitia, aby bola zaistená maximálna bezpečnosť prepravy batérií (zároveň je tak umožnené prepravovať jednotlivé battery packy pomocou leteckej dopravy). V prípade, že daný battery pack obsahuje viac ako 24 batériových článkov alebo každý segment obsahuje

viac než 12 batérií, battery pack je vystavený testu na pádovej veži z výšky 1,2 m v ľubovoľnej orientácii [16, 17].

2.1.2 FORMULA E

Monoposty Formuly E patria do kategórie závodných disciplín, ktorých prvoradým cieľom je vyvíjať hardvér, softvér a zároveň neplytvať zdrojmi pre vývoj komponentov, medzi ktoré patrí chassis a battery pack. Monoposty sú preto vyvinuté v rámci takzvaného výberového konania na štyri sezóny s plánovanou úpravou chassis a vylepšenia battery packu v horizonte dvoch rokov.

Batériový box označovaný ako RESS (Rechargeable energy storage system) verzia Gen2 (viď. obr. 4) o celkovej hmotnosti 385 kg sa nachádza v centrálnej časti monopostu a pozostáva z cylindrických článkov zoskupených do modulov, ktoré sú osadené do príslušného boxu [18].



Obr. 4 Formula E - Rechargeable energy storage system Gen2 [18]

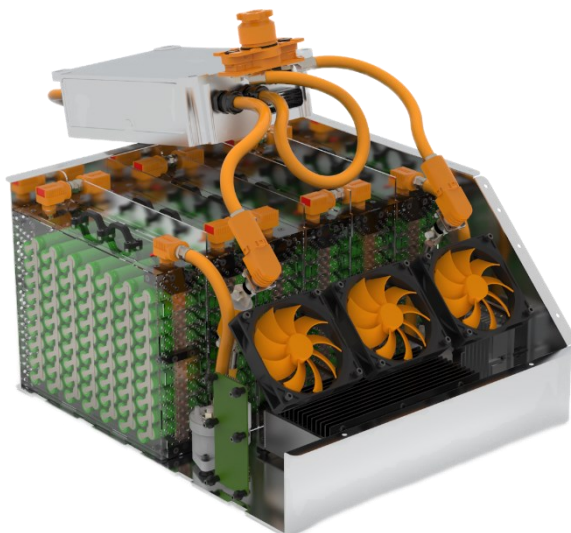
Uchytenie batérie zabezpečujú skrutky, pomocou ktorých dôjde k ucelenému spojeniu monokoku a batériového boxu: hlavných štrukturálnych častí v prípade elektrických monopostov. Jednotlivé segmenty sú zároveň vďaka špecifickému umiestneniu chránené battery boxom a kompozitným chassis, ktoré súčasne poskytuje prístup k dátovému rozhraniu, chladiacemu okruhu a jednosmernému pripojeniu batériu vďaka servisným otvorom [18, 19].

Chladienie jednotlivých článkov je zabezpečené striedavým usporiadaním chladiacich dosiek a ich prislúchajúcich chladiacich vetiev napojených na obklopujúce chladiace potrubie. Daný systém je plnený dielektrickou chladiacou kvapalinou z dôvodu zabránenia skratu v prípade porušenia vonkajšieho krytu v dôsledku havárie [18].

„Keďže batéria zostane pod napätím aj keď dôjde ku nehode, riziko úderu elektrickým prúdom pre vodiča a maršalov je veľmi vysoké. Kryt je preto vyrobený zo silných uhlíkových vlákien s vonkajšími Xylonovými panelmi a vnútornými izolačnými vrstvami zo sklenených vlákien, ktoré bránia prerazeniu obálky battery box-u“ [18]. K preukázaniu spôsobilosti a bezpečnosti je daný box podrobený sérii mechanických, systémových a nárazových testov na základe protokolov FIA [19].

2.2 BATTERY PACK VO FORMULY STUDENT

Battery pack (vid'. obr. 5), označovaný ako TSAC („Tractive System Accumulator Container“), slúži ako ochranná schránka všetkých článkov uschovávajúcich elektrickú energiu. Táto energia je následne distribuovaná a využitá každou súčiastkou, ktorá je elektricky pripojená k motorom alebo k danému battery packu [10].



Obr. 5 Battery pack tímu ECU Tacing z Edith Cowan University [20]

2.2.1 TECHNICKÉ NÁLEŽITOSTI KOMPOZITNÉHO BATTERY PACKU

Konštrukciu a tvar kompozitného battery packu ovplyvňujú požiadavky tímu vychádzajúce z cieľov sezóny, konštrukčného riešenia jednotlivých sekcií a vo veľkej miere práve technických náležitosti, ktoré popisujú dokumenty vydané vedením medzinárodnej dizajrovej súťaže Formula Student Germany a obdobnými organizáciami. Cieľom týchto dokumentov je zaisťiť maximálnu bezpečnosť pilota monopostu a zreteľne vymedziť pole konštrukčnej voľnosti tímu v rámci návrhu a následne aj samotnej výroby monopostu.

FSG RULES

Je hlavný, každoročne aktualizovaný dokument, ktorý definuje a popisuje jednotlivé pravidlá pre monoposty kategórií CV, EV a DV. Je medzinárodne uznaný organizáciami usporadujúcimi jednotlivé závody Formuly Student. Vzhľadom na komplexnosť a rozsah pravidiel, ktoré priamo a nepriamo súvisia s návrhom kompozitného akumulátorového kontajneru, uvádzam výťažok najdôležitejších pravidiel v prílohe č.1.

SES - STRUCTURAL EQUIVALENCY SPREADSHEET

Jedná sa o súbor technických dát a záznamov preukazujúcich splnenie publikovaných pravidiel pre oblasť chassis, do ktorej spadá aj TSAC. Všetky tímy sú povinné odovzdať a následne predložiť schválenú dokumentáciu spoločne s SESA (Structural Equivalence Spreadsheet Approval) dokumentom pri technickej previerke [21]. Dokument obsahuje minimálne požiadavky pre konštrukciu battery packu, ktoré môžu byť v prípade nejasností doplnené o doložkové výpočty na základe žiadosti zo strany kontrolóra, ktorým je inšpekčná organizácia (napr. DEKRA v prípade dokumentu SESA) alebo člen organizačnej skupiny oficiálneho podujatia (napr. FSG) [10].

Predkladaný dokument musí obsahovať modelové schéma a výpočty, ktoré v prípade TSAC preukazujú [22]:

1. Uchytenie článkov k segmentu
2. Uchytenie segmentov ku kontajneru
3. Oddelenie batériových segmentov vertikálnou stenou
4. Uchytenie vnútorných vertikálnych stien ku dnu (preukázané na základe ručného výpočtu)
5. Uchytenie (mechanizmu) poklopu boxu
6. Oddelenie AIR a poistky
7. Uchytenie TSAC k chassis (preukázané na základe ručného výpočtu)
8. Rozdelenie segmentov a ich hmotnosť

2.2.2 KONŠTRUKČNÉ MATERIÁLY PRE NÁVRH BATTERY PACKU VO FORMULY STUDENT

Materiálové možnosti v rámci návrhu battery packu podliehajú plne pravidlám Formuly Student. V oblasti návrhu battery packu zo zliatin hliníku a ocele dochádza k uplatneniu pravidla EV 5.5.4.



Obr. 6 Formula Student team Illini Electric - oceľový battery pack [23]

V prípade návrhu kompozitného battery packu musí každý tím preukázať príslušnú ekvivalenciu voči obdobnému konceptu, ktorý je vyrobený z predpísaného materiálu. Týmto materiálom je oceľ s preddefinovanými materiálovými charakteristikami.

K preukázaniu danej ekvivalencie dochádza otestovaním skúšobných kompozitných panelov pomocou skúšky trojbodovým ohybom. Rozmery testovacích panelov pre kompozitné štruktúry s jadrom o hrúbke viac ako 5 mm činia 275 x 500 mm. Rozmery testovacích panelov pre kompozitné štruktúry s jadrom o hrúbke menej ako 5 mm činia 275 x 150 mm. Súčasne dochádza v prípade použitia menšieho skúšobného vzorku ku skráteniu vzdialenosti medzi podperami testovacieho panelu z 400 mm na minimálnu prípustnú hodnotu 200 mm. Polomer kovového aplikátora zaťaženia sa v danej konfigurácii zmenší z rádiusu 50 mm na minimálnu prípustnú hodnotu rádiusu 5mm. Pravidlá T 3.5.5 a T3.5.6 (príloha č.1) sa v prípade použitia menších vzoriek neuplatňujú.

Druhou preukazujúcou skúškou je skúška strihom. Pri tejto skúške je oceľový aplikátor tvaru valca pretláčaný cez testovací panel s rovnakou štruktúrou, voči panelom určeným pre skúšku ohybom, o minimálnom rozmere 100x100mm. K pretlačeniu je použitý aplikátor o priemere 25 mm, ktorý prechádza oceľovým podstavcom s koaxiálne zarovnanou dierou o priemere 32 mm. Získané dátové údaje z jednotlivých skúšok a príslušná fotodokumentácia sa následne uvedie v dokumente SES a predloží počas priebehu technickej inšpekcie [10].

BATTERY PACK ZO ZLIATIN OCELI

Medzi zriedkavo používané materiály v oblasti konštrukcie a návrhu batériových boxov patria zliatiny ocelí, pre ich vysokú hmotnosť a elektrickú vodivosť. Na obr. 6 je prezentovaný battery pack monopostu GEMINI tímu Illini Electric vytvorený v spolupráci s firmou Protocase. Hlavným konštrukčným materiálom je ohýbaný oceľový plech spojený pomocou technológie zvárania. [23]

BATTERY PACK ZO ZLIATIN HLINÍKU

Battery packy vyrobené zo zliatin hliníku patria medzi najpoužívanejšie v rámci prvo - koncepčných monopostov kategórie FSE a FSD. Návrh využíva preddefinované parametre, akými sú minimálna hrúbka stien a medzi priečok (uvedené v prílohe č.1). Medzi významné benefity patrí jednoduchá obrobiteľnosť, nízka cena a dobrá dostupnosť materiálu v porovnaní s kompozitnými materiálmi. Hlavnou nevýhodou je nízky pomer pevnosti vzhľadom ku hmotnosti a elektrická vodivosť hliníkových zliatin. Na obr. 7 je prezentovaný hliníkový battery pack tímu TU Graz Racing.



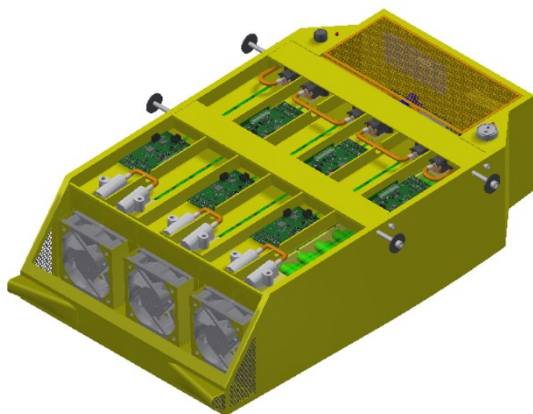
Obr. 7 Formul Student team TUG – hliníkový battery pack [24]

KOMPOZITNÝ BATTERY PACK ZO SKLENÝCH VLÁKIEN

Spoločne s battery packmi z hliníkových zliatin patrí medzi cenovo najdostupnejšie riešenia z pohľadu počiatkových investícií do použitých materiálov. Významnou výhodou použitých sklenených vlákien sú dielektrické vlastnosti, jednoduchá spracovateľnosť a dobrá absorpcnosť polymérnych matric. Naproti tomu sa vyznačuje v porovnaní s kompozitnými battery packmi z aramidových a uhlíkových vlákien nižším pomerom pevnosti a húževnatosťou voči hmotnosti, a preto patrí medzi najmenej praktizované koncepty.

KOMPOZITNÝ BATTERY PACK Z ARAMIDOVÝCH VLÁKIEN

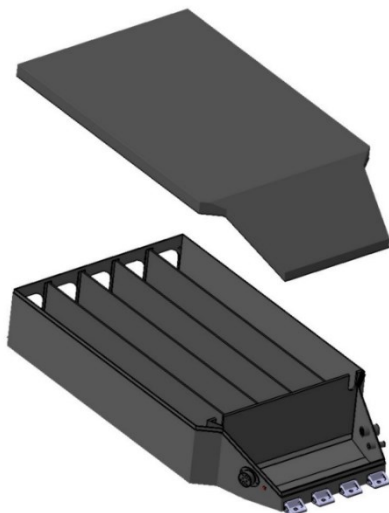
Aramidové vlákna sa vyznačujú nízkou hmotnosťou a dobrými dielektrickými vlastnosťami. Súčasne poskytujú vysokú rázovú odolnosť, dobrú absorpciu polymérnych matric a na rozdiel od vlákien uhlíkových prepúšťajú rádiovlnové vlny. Nevýhodou kompozitných panelov z aramidových vlákien je nízka tuhosť a značná problematika obrábania (dochádza k extrémnemu opotrebeniu nástrojov), pri ktorej dochádza k rozstrapateniu okrajov obrobku a vzniku prípadným mikrotrhlinám na rozhraní jednotlivých vrstiev. Na obr. 8 je prezentovaný battery pack monopostu FSE.08 tímu eForce FEE Prague Formula.



Obr. 8 Aramidový battery pack tímu eForce FEE Prague Formula [25]

KOMPOZITNÝ BATTERY PACK Z UHLÍKOVÝCH VLÁKIEN

Kompozitné battery packy z uhlíkových vlákien dominujú najvyššiu tuhosťou a pevnosťou pri zachovaní minimálnej hmotnosti. Medzi ich výhody patrí taktiež schopnosť tlmiť vibrácie a dobrá chemická inertnosť a korózná odolnosť. Ich hlavnou nevýhodou je vysoký merný elektrický odpor, ktorý bráni prenosu rádiovlnových signálov. Zároveň musí dôjsť k odizolovaniu ich povrchu pomocou izolačných materiálov, náterov alebo fólií, ktoré však daný box plne nechránia pred lokálnym porušením celistvosti povrchu. Na obr. 9 je vyobrazený battery pack z uhlíkových vlákien izolovaný pomocou Kaptonovej pásky, ktorý bol navrhnutý tímom Squadra Corse Polito [26].



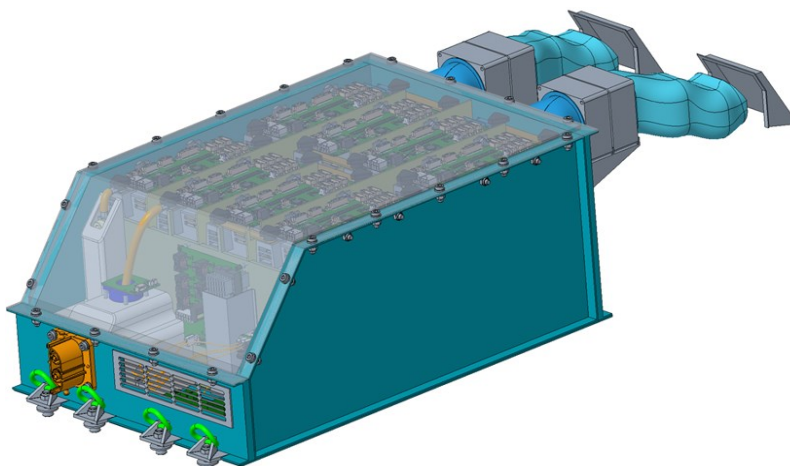
Obr. 9 Formula Student team Squadra Corse Polito - battery pack z uhlíkových vlákien [26]

2.2.3 VÝROBA KOMPOZITNÉHO BATTERY PACKU VO FORMULY STUDENT

Zvolený typ postupu výroby kompozitného battery packu vo Formule Student má zásadný dopad na celkový tvar a konštrukciu battery packu. V projekte Formula Student rozlišujeme dva základné druhy postupy výroby.

Obvyklým postupom je výroba kompozitného boxu pomocou lepenia kompozitných štruktúr. Táto metóda umožňuje úpravu návrhu v neskorých fázach projektu a vyznačuje sa nižšími výrobnými nákladmi. Nevýhodou tohto riešenia, v prípade použitia kompozitných štruktúr s voštinovým jadrom, je nevyhnutnosť uzatvorenia obvodu panelu pomocou penových sendvičov. Použitím týchto materiálov dochádza k stabilizácii voštiny a rozšíreniu lepenej plochy na oblasť medzi jednotlivými poťahmi. Súčasne je však potrebné preukázať ekvivalencie v prípade oboch vzniknutých štruktúr (uvedené v kapitole 2.2.2). Koncept lepeného battery boxu tímu TU Brno Racing je uvedené na obr. 10.

Druhým typom produkcie je výroba celistvého kompozitného boxu, ktorý je formovaný za použitia negatívnych, prípadne pozitívnych foriem. Uvedená metóda poskytuje základné predpoklady pre zavedenie sériovej výroby, vyššiu kvalitu a v neposlednom rade predpoklady pre preukázanie nárazových testov na základe protokolov FIA, ktoré sú vyžadované pri leteckej preprave (uvedené v kapitole 2.1.2). Hlavnou nevýhodou je značný nárast ceny v prípade kusovej výroby a predpoklad hlbšej znalosti v oblasti kompozitných materiálov.



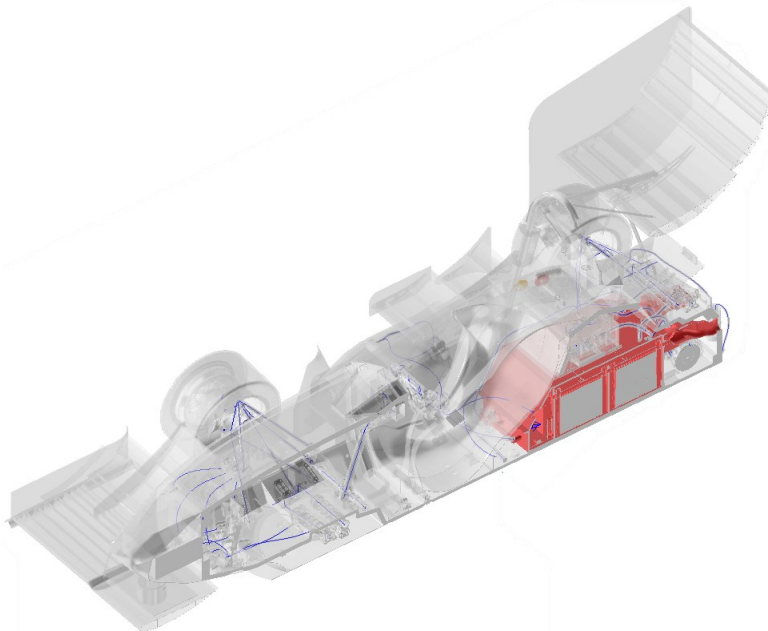
Obr. 10 Koncept lepeného battery packu Dragona eD2 - Tím TU Brno Racing [22]

2.2.4 ULOŽENIE BATTERY PACKU VO FORMULY STUDENT

Uložením trakčných komponentov do priestoru monokoku je značne ovplyvnená priestorová dispozícia za požiarou priehradkou. Zároveň nastáva významné zredukovanie priestoru pri osadení elektromotorov do oblasti zadnej nárazovej štruktúry. Popisovaný stav ma za následok principiálny vplyv na výsledné rozmery battery packu ako aj rozdelenie segmentov a spôsob chladenia individuálnych článkov. Zároveň musí byť battery pack ľahko demontovateľný z dôvodu pravidelného nabíjania, ktoré je umožnené iba vo vymedzenej zóne mimo priestor závodného monopostu.

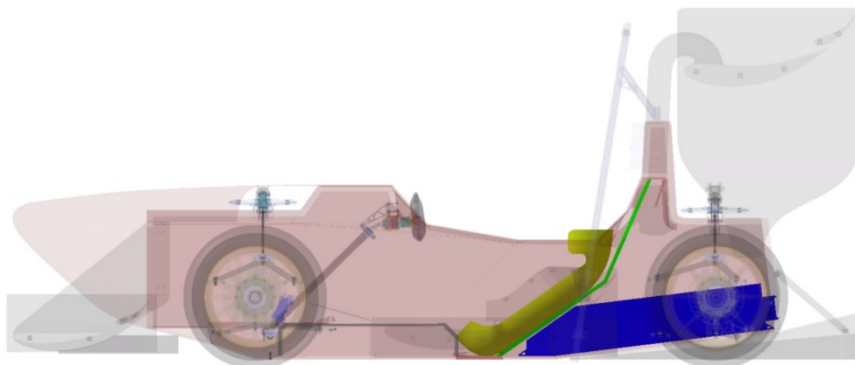
Monoposty s elektromotormi osadenými priamo v monokoku ako aj monoposty, ktoré majú osadené trakčné komponenty v rámovej konštrukcii, nedisponujú konštrukčnou zástavbou umožňujúcou demontáž battery packu zo zadnej časti monopostu. V dôsledku uloženia zmienovaných komponentov a konštrukčných prvkov dochádza k demontáži battery packu

po vybratí sedačky skrz výrez v protipožiarnej ohrádke. Tento koncept je typický pre celo - kompozitné monokoky s motormi plne osadenými v bočných štruktúrach monokoku (viď. obr. 11). V prípade hybridného chasis je demontáž umožnená odstránením rozperných prvkov v prízemnej časti rámovej konštrukcie a následným vytiahnutím medzi hlavnými profilmi rámu.



Obr. 11 Uloženie battery packu tímu TU Brno Racing do celo-kompozitného chasis

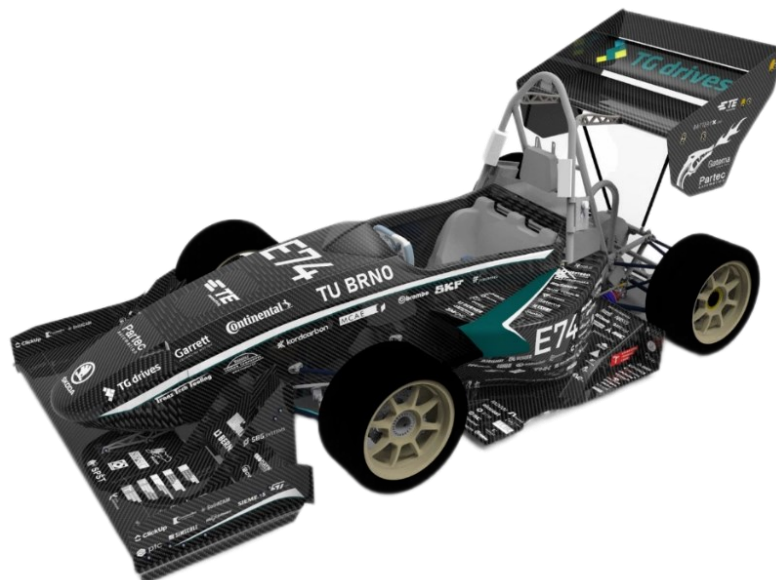
Monoposty disponujúce kompozitným chasis a elektromotormi osadenými v nábojoch kôl volia koncepčné riešenie prezentujúce na obr. 12. Battery pack je príznačne umiestnený v tesnej blízkosti pozície pilota monopostu, oddeleného pomocou protipožiarnej priehradky. Charakteristickou črtou popisujúceho battery packu je podlhovastý tvar a pozdĺžne radenie segmentov (viď. obr. 8 a obr. 9). Prívod vyžadovaného objemu chladiacej vzdušiny je štandardne zabezpečený pomocou symetrických náfukov, ktoré sú umiestnené v tesnej blízkosti opierky hlavy. Následnú distribúciu zabezpečujú zlúčené potrubné vetvy. Battery pack je v danom uložení typicky osadený na pojazdoých koľajniciach a demontovaný prostredníctvom odnímateľnej zadnej nárazovej štruktúry.



Obr. 12 Uloženie battery packu tímu Squadra Corse Polito do celo-kompozitného chasis [26]

3 BATTERY PACK ED1

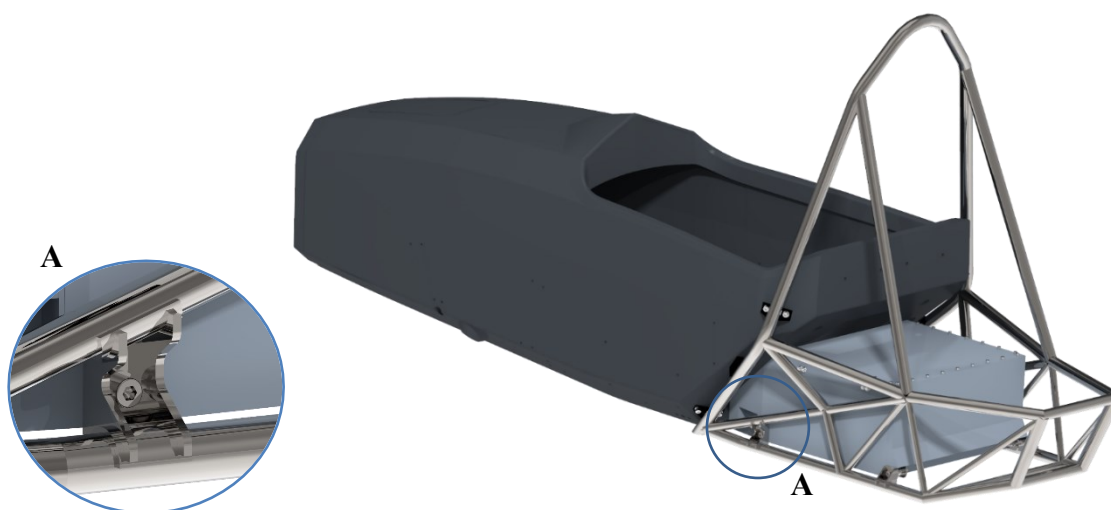
V sezóne 2020/2021 vznikol prvý čisto elektrický monopost Dragon eD1 (viď. obr. 13) s hybridným chassis, pozostávajúcim z kompozitného monokoku a trubkového rámu. Hliníkový battery pack bol zasadený do zadnej rámovej konštrukcie monopostu.



Obr. 13 Monopost Dragon eD1 [27]

3.1 KONCEPČNÉ RIEŠENIE BATTERY PACKU ED1

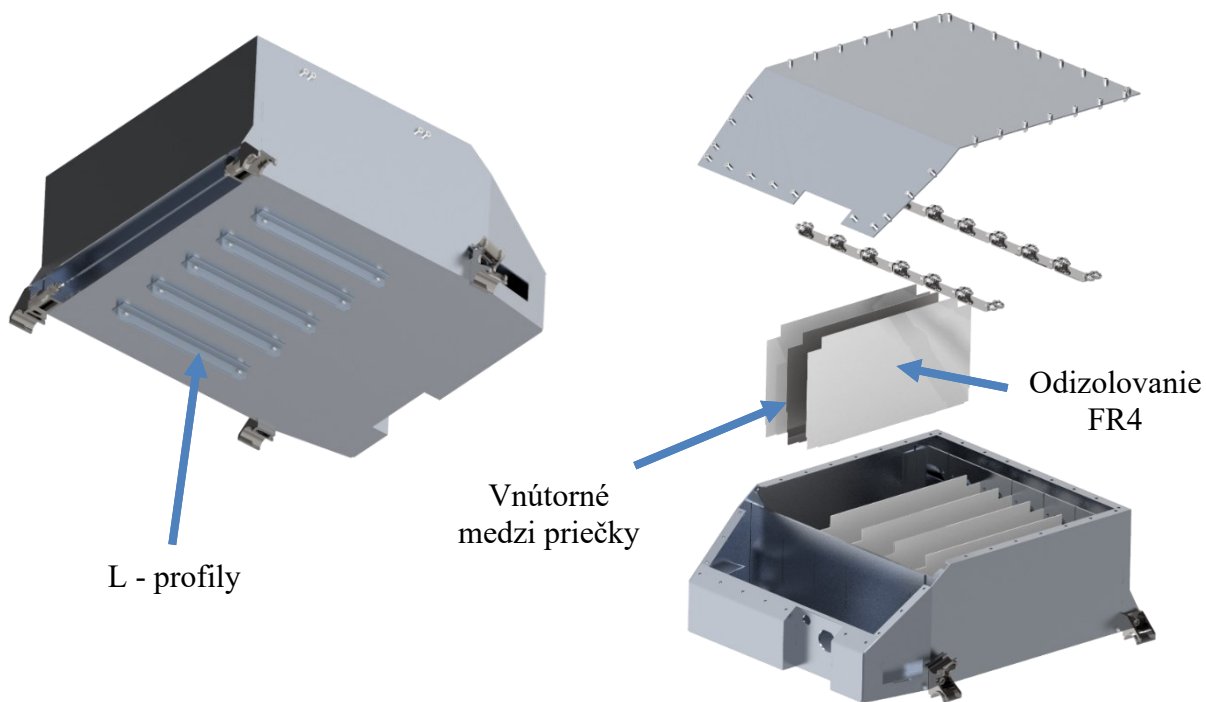
S ohľadom na zástavbu a presnosť výroby rámovej konštrukcie, ako aj neznalosť danej problematiky došlo k uprednostneniu hliníkovej zliatiny pred kompozitnou štruktúrou. Použitým materiálom boli plechy z precipitačne tvrdenej hliníkovej zliatiny EN AW 6082 T6, ktoré v neskoršej fáze stavby poskytovali možnosť rýchlej úpravy a optimalizácie vzhľadom na nedokonalosť koncepčného návrhu.



Obr. 14 Uloženie battery packu eD1 v rámovej konštrukcii

Montáž a demontáž boxu bola zaistená pomocou štyroch šesťhranných lícovaných skrutiek M8 pevnostnej triedy 8.8. Upevňovacie prvky battery packu spoločne so spodnou časťou batériového boxu plne suplemtovali spodnú podpornú rámovú konštrukciu, ktorá bola odstránená z dôvodu významného zásahu do jazdnej výšky monopostu. K výrobe jednotlivých uchytení bola použitá nízko legovaná ušľachtilá chróm – molybdénová oceľ 25CrMo4 a dané zaťaženie bolo prenášané do zadných a predných párov uchytení, ktoré boli zasadené do uzlov rámovej konštrukcie (vid'. obr. 14).

Vnútorne steny TSAC boli vyrobené z vysokopevnostného ocelového konštrukčného plechu materiálu S275J2 a rozdeľovali vzniknutý priestor do šiestich sekcií pre segmenty o hmotnosti 7 kg. Jednotlivé steny zároveň disponovali dvoma prečnievajúcimi úchytmi na spodnej strane steny, ktoré zapadali medzi dva hliníkové L-profilu (vid'. obr. 15) umiestnené na vonkajšej strane dna akumulátorového kontajneru. Daný návrh zaisťoval ustavenie jednotlivých segmentov a zároveň poskytoval pomerne jednoduchú demontáž a prístup k jednotlivým komponentom. S ohľadom na pravidlo EV 5.5.7 boli jednotlivé vnútorné priečky odizolované pomocou sklolaminátových platní triedy FR-4, ktoré boli dodatočne certifikované ako spomaľovače horenia pre normu UL94 V-0 o minimálnej hrúbke materiálu 1 mm.



Obr. 15 Kompozícia battery packu eD1

Segmenty monopost Dragona eD1 boli osadené Li-ionovými článkami Sony Murata VTC6 3000 mAh (vid'. obr. 16). Uchytenie jednotlivých cylindrických článkov bolo zabezpečené pomocou dvoch aramidových vymedzovacích dosiek, ktoré tvorili hlavnú konštrukciu segmentu. Povrch článkov bol chránený sklolaminátovými doskami triedy FR4 s dodatočnou certifikáciou pre normu UL 94V-0 o minimálnej hrúbke materiálu 0,5mm, ktoré boli spojené pomocou kaptonovej pásky.

Krytie battery packu od priestoru vodiča a LV elektrických komponentov zabezpečoval hybridný firewall. Materiálová kompozícia pozostávala z hliníkovej zliatiny EN AW-2017A

a sklolaninátového potáhu sýteného epoxidom LEXAN™ FR Resin BFL4000U – PC FR certifikovaným normou UL 94-V0 pre hrúbku 1,5 mm [28].

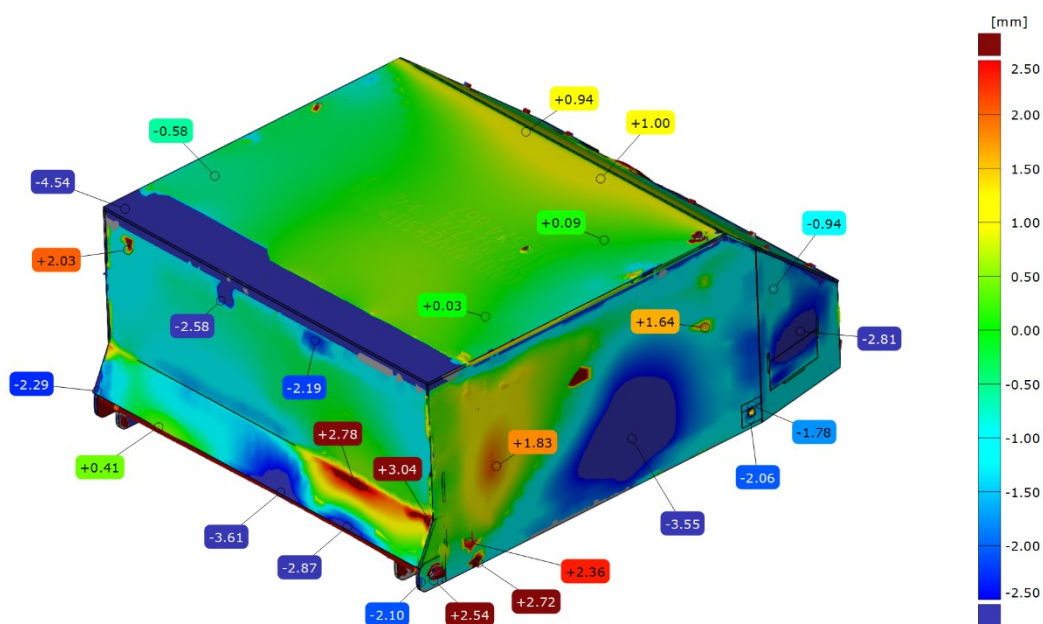


Obr. 16 Segmenty monopostu Dragona eD1 [29]

3.2 PRESNOŠŤ VÝROBY BATTERY PACKU ED1

Najzávažnejším problémom battery packu eD1 bola presnosť a kvalita výroby. Hliníkový box nedisponoval na rozdiel od rámovej konštrukcie špecifickým zväracím prípravkom, ktorý by bránil deformáciám vznikajúcim pri procese zvarovania. Podstatným faktorom ovplyvňujúcim kvalitu boxu bola aj hrúbka hliníkového plechu a nízky bod tavenia hliníkovej zliatiny, ktoré viedli ku vzniku lokálnych pretavení a následnému vzniku pórov a trhlín vo zvarovej húsenici. Z dôvodu nutnosti vodotesnosti battery packu boli následne jednotlivé nevyhovujúce zvary obnovené, čo viedlo k dodatočnému vzniku ďalších deformácií.

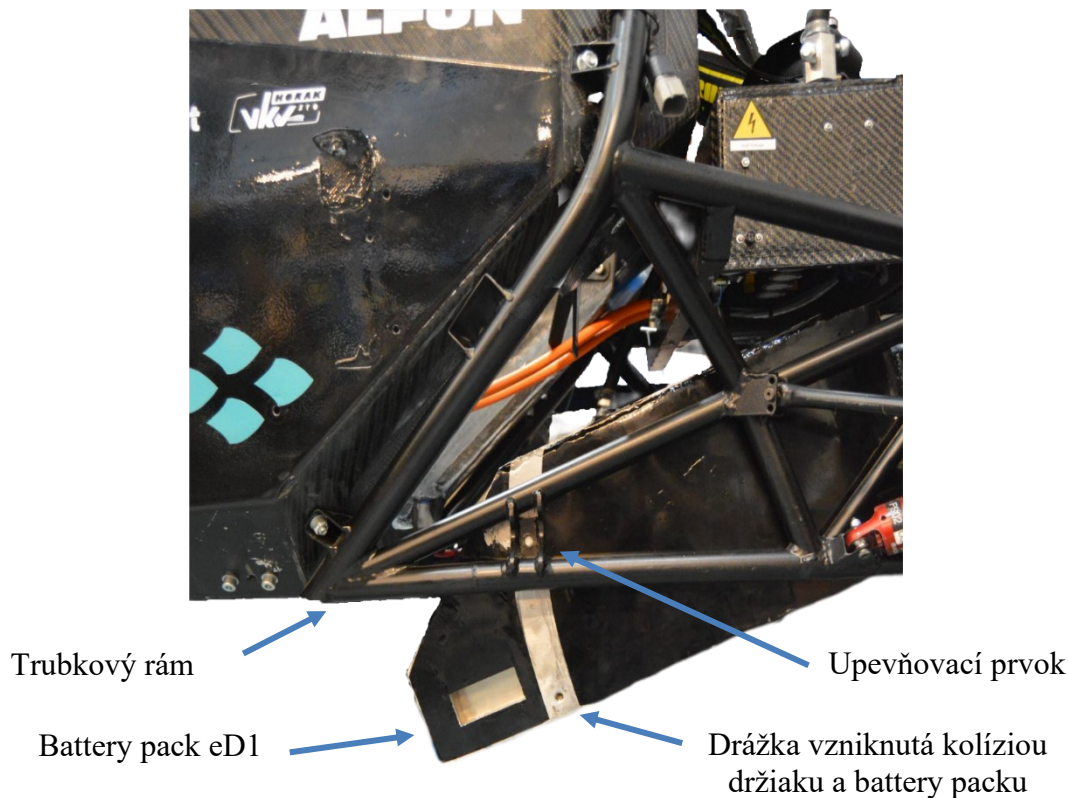
Zvolenou metódou validácie, pre overenie kvality výroby hliníkového boxu, bola metóda 3D skenovania. Z dôvodu časového sklzu v priebehu sezóny bola samotná validácia vykonaná až po sezóne 2020 / 2021. Na základe tejto skutočnosti preto nebolo možné jednotlivé nedostatky priebežne odstrániť.



Obr. 17 3D mapa deviácií battery boxu Dragona eD1

Skenovaním a následnou digitalizáciou objemových prvkov, došlo k vytvoreniu digitálnej geometrie battery packu. Získané dáta boli následne preložené v prostredí softvéru GOM Inspect s 3D modelom vytvorením v prostredí Creo Parametric na základe referenčnej plochy, ktorou bolo veko battery boxu. Výsledná mapa deviácií je vyobrazená na obr. 17.

Priemerná odchýlky modelu od vyrobeného battery packu dosahuje hodnotu 2,84 mm. Najvýraznejší vplyv nepresnosti výroby predstavuje nesúlad hodnôt modelu s hodnotami battery packu v oblasti predných upevňovacích prvkov, kde dosahuje priemernú hodnotu 1,84 mm a v oblasti zadných upevňovacích prvkov, kde dosahuje priemernú hodnotu 1,12 mm. V praxi sa táto deviácia ukázala ako nadmerná a spôsobila kolíziu samotného battery boxu s držiakmi, ktoré boli umiestnené v rámovej konštrukcii. Napriek následnej úprave a eliminácii vzniknutého presahu dochádzalo v prípade demontáže battery boxu k jeho samovoľnému zakliesneniu v rámovej konštrukcii tak, ako je uvedené na obr. 18.

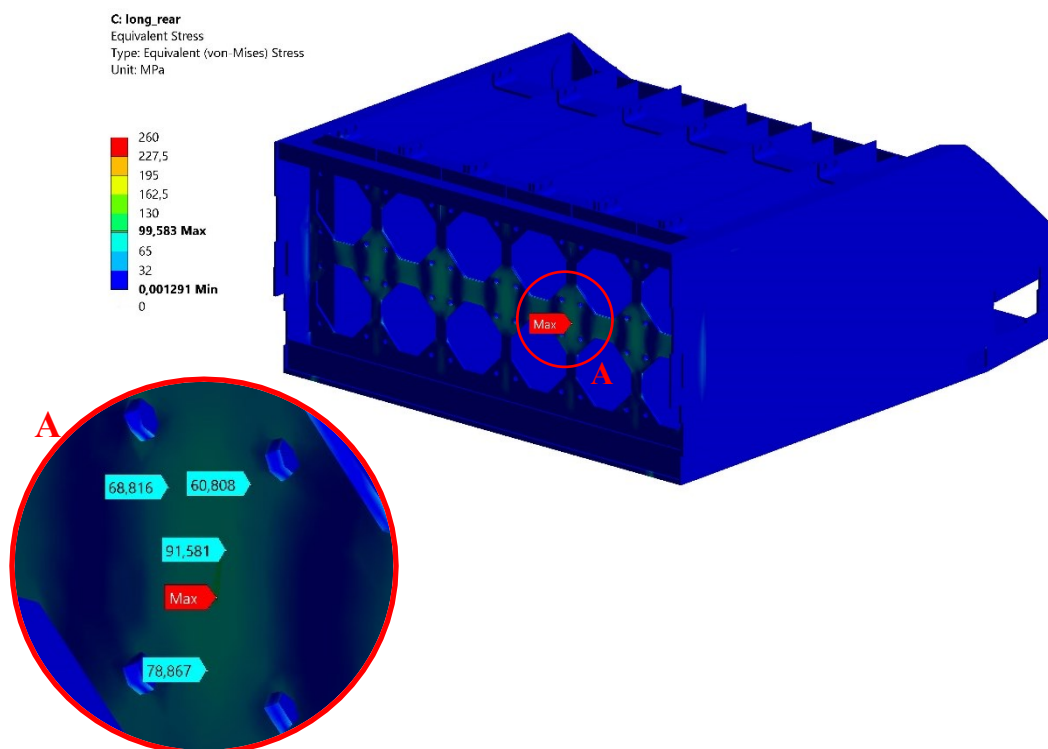


Obr. 18 Zakliesnenie battery boxu v rámovej konštrukcii pri demontáži

3.3 BEZPEČNOSŤ BATTERY PACKU ED1

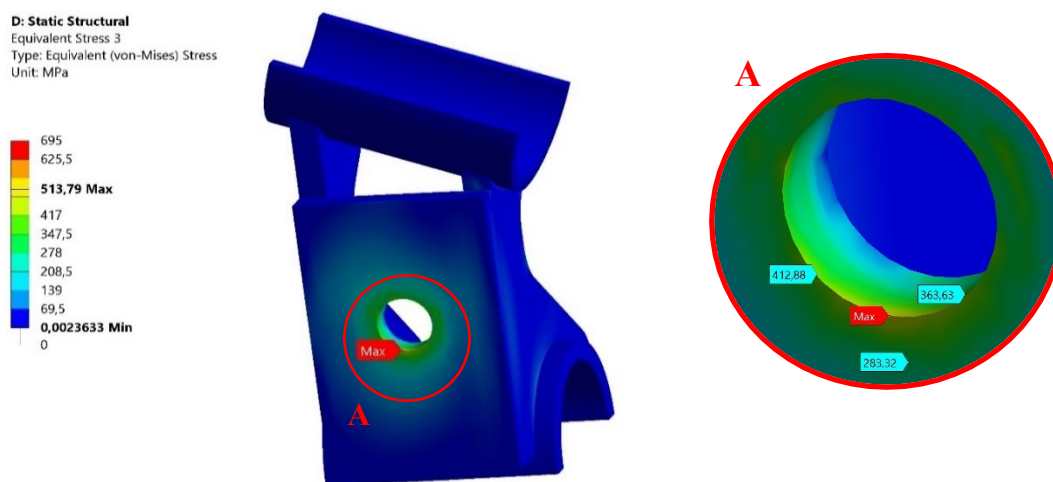
Battery pack eD1 bol koncipovaný s ohľadom na prislúchajúce vydanie pravidiel Formuly Student a splnenie bezpečnostných náležitostí. Pravidlo EV 5.5.4 (uvedené v prílohe č.1) stanovilo minimálne základné požiadavky: hrúbku použitých hliníkových a ocelových plechov. Na rozdiel od kompozitných štruktúr preto nebolo potrebné preukazovať príslušnú pevnostnú ekvivalenciu. Bezpečnosť návrhu bola preukázaná na základe simulácií v prostredí Ansys Workbench, so zameraním na splnenie pravidla EV 5.5.9. Pre zníženie času potrebného pre priebeh jednotlivých simulácií bol samotný model zjednodušený a následne vystavený preťaženiu v pozdĺžnom, bočnom a vertikálnom smere.

Battery box eD1 vykazoval najvyššiu hodnotu napätie pri pôsobení 40g v pozdĺžnom smere voči smeru jazdy monopostu (viď. obr. 19). Napätie je v danej oblasti rozložené rovnomerne na zadnú stenu, v ktorej sú osadené vnútorné vertikálne medzi priečky a ventilátory. Maximálna hodnota napätia dosahuje 99,583 MPa.



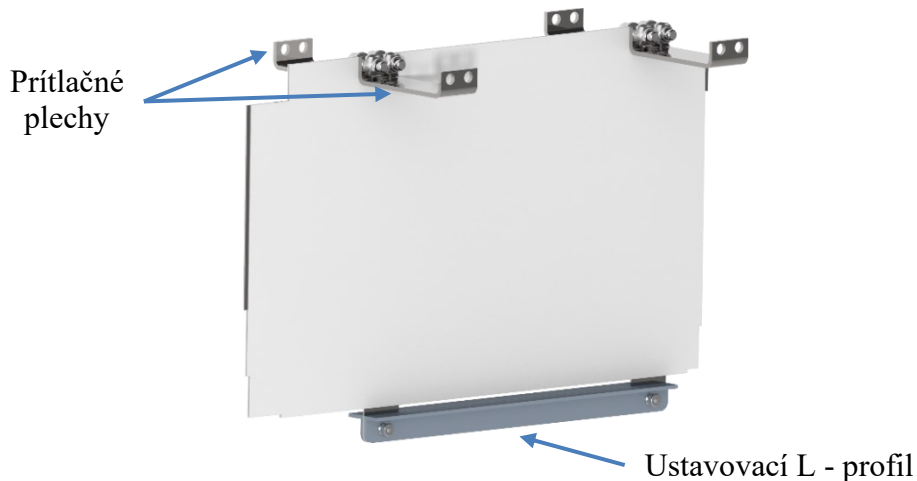
Obr. 19 Rozloženie napätí na battery boxe pri zaťažujúcom stave (40g v pozdĺžnom smere)

Najvyššiu náchylnosť na pôsobiacie zaťaženie vykazoval predný pár držiakov. Hodnota napätia dosahovala maximálne hodnoty 513,79 MPa (viď. obr. 20) z dôvodu vzniku singularity v hranách osadenia skrutky. Pri pôsobení 40g v pozdĺžnom smere voči smeru jazdy monopostu a súčasnom potlačení nežiadúceho stavu dosahovala maximálna hodnota napätia 403,17 MPa.



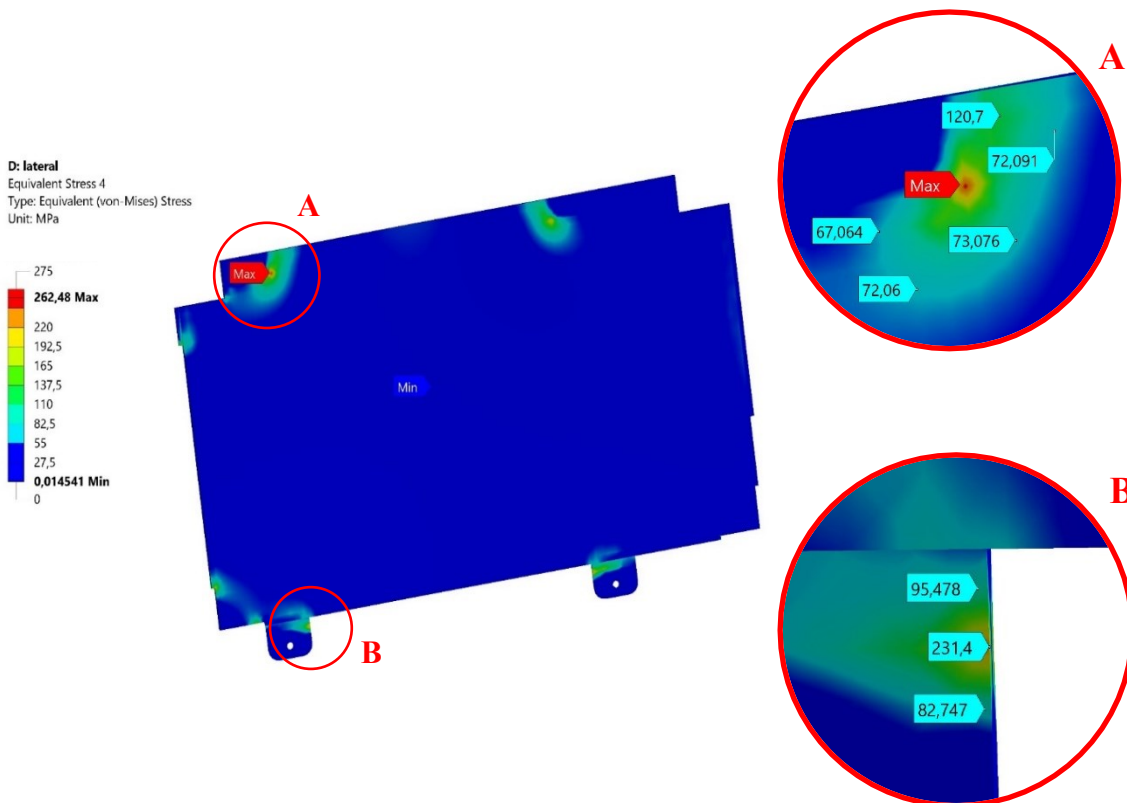
Obr. 20 Rozloženie napätí na prednom držiaku pri zaťažujúcom stave (40g v pozdĺžnom smere)
[29, upravené]

Návrh uchytenia jednotlivých segmentov voči vnútorným vertikálnym medzi priečkam vykazoval značné nedostatky. Z uvedeného dôvodu bol odmietnutý a s pripomienkami vrátení k prepracovaniu. Nový návrh disponoval odolnejšími prítlačnými plechmi a ustavovacími L - profilmi tak, ako je uvedené v kapitole 3.1.



Obr. 21 Uchytenie vnútorných vertikálnych medzi priečok eD1

Hraničné hodnoty napätie o hodnote 262,49 MPa vznikali na rozhraní prítlačných plechov segmentov a vnútorných vertikálnych medzi priečok pri pôsobení bočného pret'azenia o hodnote 40g (vid'. obr. 22). Hodnota bezpečnosti v uvedenej lokalite a zároveň najnižšia bezpečnosť battery packu je 1,06.



Obr. 22 Rozloženie napätí na vertikálnej medzi priečke pri zaťažujúcom stave (40g v bočnom smere)

4 KOMPOZITNÉ MATERIÁLY

Kompozitné materiály sú tvorené minimálne dvoma zložkami s výrazne odlišnými chemickými a fyzikálnymi vlastnosťami. Spoločne s pokročilými kompozitnými materiálmi (advanced composites) patria medzi anizotropné materiály, ktoré sú vhodné najmä pre štruktúrnu aplikáciu v oblastiach vyžadujúcich vysoký pomer pevnosti a tuhosti, voči výslednej hmotnosti. Dosiahnutie týchto parametrov umožňuje individuálne umiestnenie a orientácia dostatočného množstva výstuž v kombinácii s kompatibilnou maticou, ktoré sú systematicky lokalizované do oblastí s predpokladom pôsobiaceho zaťaženia [30].

4.1 MATRICE

Primárnou funkciou matric v kompozitných materiáloch je vzájomné udržanie jednotlivých elementov (napr. vlákien) výstuží a zabránenie ich nožnej dislokácii z dôvodu zabezpečenia správneho prenosu silového pôsobenia medzi jednotlivými elementmi. Táto skutočnosť je bezprostredne závislá od zabezpečenia chemickej kompatibility oboch zložiek daného kompozitu. Významnou úlohou matric je aj zabezpečenie ochrany jednotlivých elementov pred mechanickým opotrebením (prevažne abráziou), chemickou koróziou, oxidáciou a vlhkosťou [30, 31].

Vo všeobecnosti, matrice definujú limitné parametre kompozitného materiálu, a teda aj výsledné mechanické a chemické vlastnosti (teplotná odolnosť), po stránke oboch zainteresovaných zložiek. Z tohto hľadiska zastávajú matrice významné postavenie v prípade vnútro-laminárnej šmykovej pevnosti v kompozitnom materiáli, ako aj pevnosti v tlaku [30].

- Delenie matric:**
1. Polymérne matrice
 2. Kovové matrice
 3. Keramické matrice
 4. Uhlíkové matrice

4.1.1 ORGANICKÉ (POLYMÉRNE) MATRICE

Dominantnými maticami v oblasti kompozitných materiálov sú matrice polymérne. Obsahujú typy termo-plastické (reverzibilný cyklus tvrdnutia: vplyvom pôsobiacej teploty dochádza ku zmene mechanických a fyzikálnych vlastností) a termo-setické (reakto-plasty: vplyvom pôsobiacej teploty dochádza ku následnej degradácii matrice) [32].

Medzi matrice termo-setické, ktoré tvoria viac ako 80% súčasne používaných matric, patria epoxidové, polyesterové a vinyl-esterové živice. Jednotlivé systémy sa vyznačujú schopnosťou ľahko impregnovat' vlákna a súčasne sa ich použitím dosahuje vysoká tuhosť siete. Vo veľkej miere sú jednotlivé typy tvorené dominantnou zložkou, ktorou je živica a kompatibilným tužidlom. Na základe spoločnej chemickej interakcie zmienených zložiek, ktorej výsledkom je exotermická reakcia, dochádza k započatiu procesu vytvrdzovania [30, 31].

4.1.2 EPOXIDY

Hlavným zástupcom v kategórii nízkoteplotných aplikácií (do 120 °C) so všestrannosťou spracovania pre oblasti letectva a ľahkých konštrukcií sú epoxidové živice. Umožňujú kombináciu vlastností v širokej škále fyzikálnych foriem, prispôsobených obsiahlemu spektru

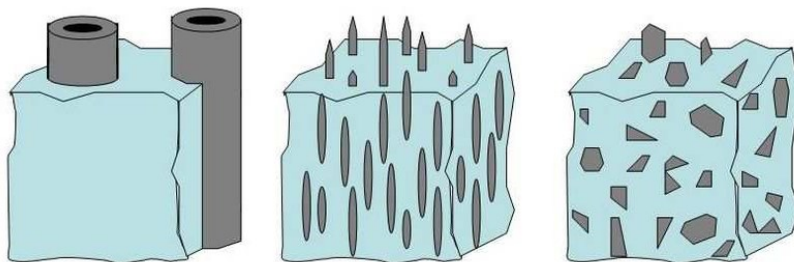
procesu aplikácie, vyznačujúceho sa vysokou pevnosťou, objemovou stabilitou, elektrickou izoláciou a odolnosťou voči chemickým rozpúšťadlám. Zároveň majú tendenciu, na rozdiel od polyesterových a vinyl-esterových živíc, ľahko zmäčať povrchy všetkých bežných výstuží [32].

4.1.3 EPOXIDY – SPOMAĽOVAČE HORENIA

Epoxidové živice patria medzi vysoko horľavé látky. Následkom tejto skutočnosti je nevyhnutné doplnenie matrice o tzv. retardéry horenia (napr. halogénové prvky) v technických oblastiach vyžadujúcich vlastnosti spomaľovačov horenia. Medzi tieto oblasti patrí aj battery pack Formuly Student. Stanovené normy odolnosti voči šíreniu plameňa a spomaľovačov horenia sú uvedené v kapitole 6.2. Ku doplneniu matric dochádza priamo pri ich vytvorení, kedy je zadefinovaná charakteristika spomaľovača horenia alebo následným pridaním plnív (trihydrát oxidu hlinitého, hydroxid horečnatý), ktoré znížia rýchlosť uvoľnenia tepla, zvýšia endotermický rozklad a uvoľnenie vodnej pary, avšak zlomkovo ovplyvnia aj mechanické vlastnosti vzniknutého kompozitu [32].

4.2 VÝSTUŽE

Výstuže patria medzi fundamentálny komponent systémov využívajúcich nielen polymérne matrice [32]. V kompozitnom materiáli sú zodpovedné za štrukturálne vlastnosti ako pevnosť a tuhosť, ktorá priamoúmerne narastá so znižujúcim sa prierezom použitej výstuže. Medzi základne typy výstuží patria častice, vločky a vlákna (vid'. obr. 23) [30].



Obr. 23 Typy výstuží: z ľava vlákna, vločky a častice [33]

4.2.1 ČASTICE A VLOČKY

Častice a vločky slúžia predovšetkým ako plnivá, kedy vzhľadom na ich geometrickú morfológiu môžu byť použité do maximálneho pomeru 1:1 voči matriciam polymérnym. Týmto krokom je možné výrazne znížiť výrobné náklady vzhľadom na ich nízku cenu a dobrú dostupnosť. Súčasne ich implementovaním v rámci výrobnéj fázy matrice dochádza ku ovplyvneniu fyzikálnych a chemických vlastností [31].

4.2.2 VLÁKNA

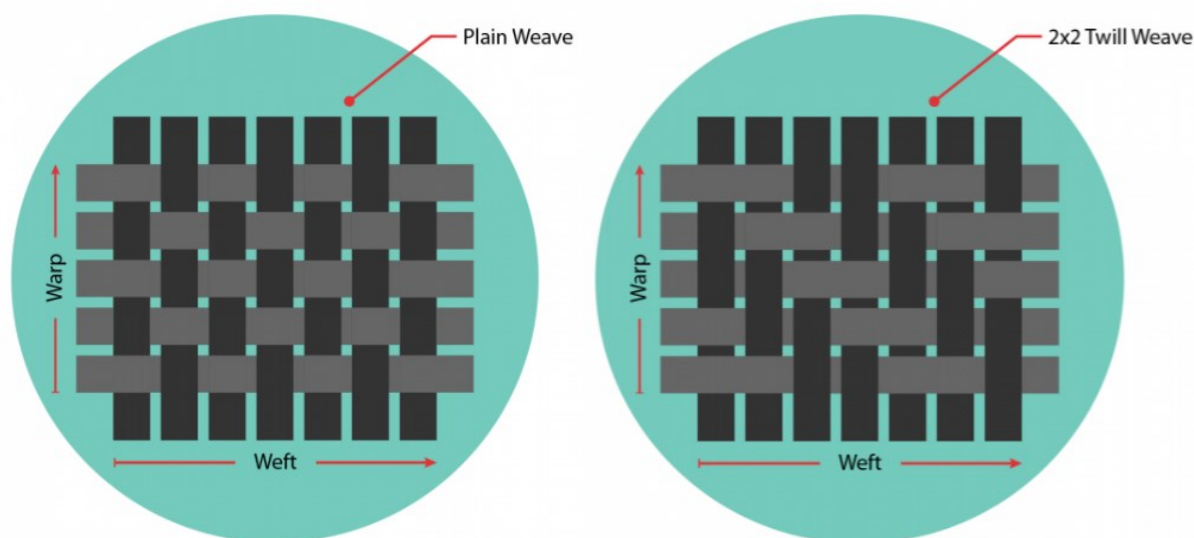
Vlákna sa vyznačujú dĺžkou mnohonásobne väčšou ako je ich samotný priemer a tvoria najväčšiu a najdiferencovanejšiu skupinu výstuží. Kvalitatívnym faktorom je modul pružnosti v ťahu, hustota a veľkosť prierezu vlákna [32]. V praxi platí, že čím je prierez vlákna menší, tým je tkanina plochejšia a nedochádza k narušeniu krížiacich sa prameňov vlákien. Dochádza tak k vytvoreniu celistvého tkaného materiálu a súčasne nedochádza ku nadbytočnej kumulácii matrice v oblastiach prekrývajúcich sa vlákien, čo vedie k významnému zníženiu hmotnosti výsledného kompozitu.

Základné rozdelenie člení vláknovej výstuže podľa orientácie na spojité a diskontinuálne, z nich minoritné postavenie majú vlákna diskontinuálne [32]. Tie sú, na rozdiel od skupiny vlákien orientovaných, využívané v oblastiach, kde nie je kladený dôraz na špecifický prenos silového zaťaženia a je tak možné využiť vlákna s rôznou dĺžkou, ktoré sú spájané prevažne za pomoci vzájomného zlisovania.

Do triedy spojitých vlákien spadajú sekundárne typy ako rovingy, pančuchy a pásy, ktoré majú využitie v rámci lokálnych vystužení a pre potreby kumulácie materiálu v oblastiach akými sú napr. prechodové hrany. Hlavnú skupinu spojitých vlákien tvoria tkaniny, ktoré sú výsledkom procesu tkania jednotlivých priadzí (prameňov: osnov a útkov) najčastejšie v kombinácii smerov 0° a 90° [31].

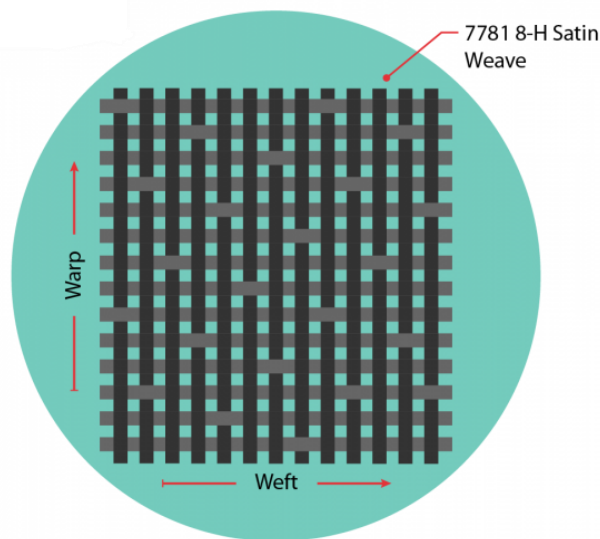
Medzi základné štýly väzby tkanín patrí väzba plátňová (plain weave), ktorá je tvorená rovnomerným pretkávaním čo vytvára mriežku formátu 1 x 1 (viď. obr. 24). Konečná pevnosť vzniknutej látky je tak limitovaná vzhľadom ku frekvencovanosti pretkávania. Vhodná je primárne pre súvislé plochy s absenciou rádiusov a výčnelkov vzhľadom na jej nízku poddajnosť a zabiehavosť. Kladnou vlastnosťou plátnovej väzby je vysoká stabilita väzby oproti iným štýlom väzieb.

Kontrastom ku väzbe plátnovej je väzba kepr (twill), ktorá je tvorená plávajúcimi osnovnými prameňmi (osnov) voči vyplňovaným prameňom (útkov), čo vytvára vizuálne posunutú mriežku formátu 2 x 2, 4 x 4, prípadne 2 x 4 (viď. obr. 24). Prednosťou väzby keprovej je dobrá tvarovateľnosť, pre ktorú patrí k najpoužívanejším typom väzieb v rámci odvetví zaoberajúcich sa výrobou kompozitných produktov [34].



Obr. 24 Zľava väzba plátnová a väzba keprová [35]

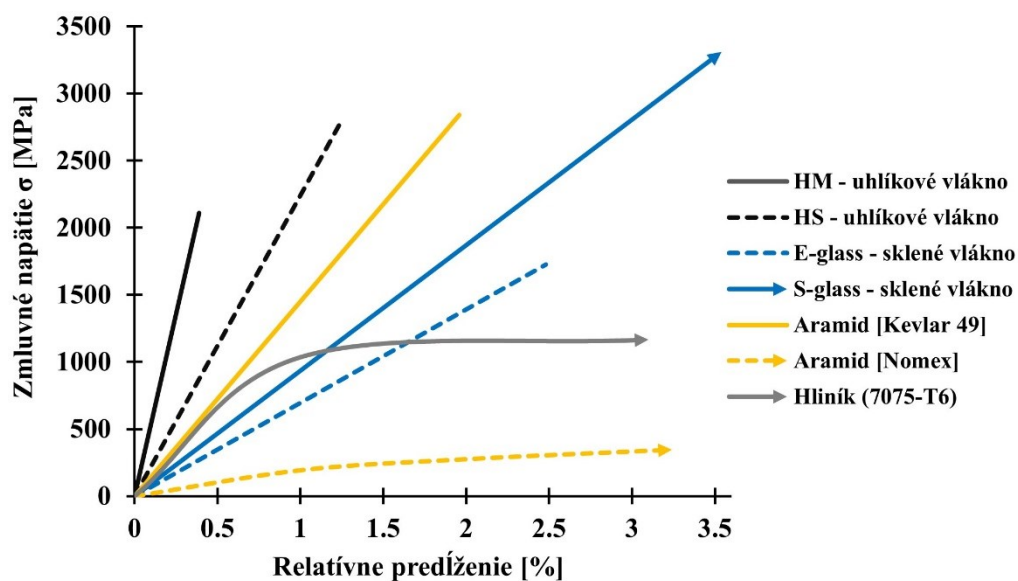
Väzba atlasová (satin weave) je tvorená hustou mriežkou na základe útku, ktorý prechádza ponad viacero osnov (viď. obr. 25), čím vzniká plochá väzba s dobrým krytím a významne lepšou poddajnosťou ako je tomu v prípade väzby keprovej. Využíva sa v oblastiach, ktoré disponujú zložitými krivkami a zakrivenými plochami, ktorým sa dobre prispôbuje bez toho, aby došlo k nadmernej dislokácii vlákien vo väzbe alebo nutnosti suplementácie adhézneho prvku [34, 35].



Obr. 25 Vázba atlasová [35]

Charakteristickou skupinou tkanín sú tkaniny jednosmerné (UD – unidirectional weave), s prameňmi viazanými iba v smere osnovy. Súdržnosť vlákien je zabezpečená všitou mriežkou alebo prípadným zlisovaním. Uplatnenie tohto typu tkaniny je v prípade štruktúr vyžadujúcich dominantný prenos silového zaťaženia v jednom smere, ktorým je smer osnovy danej väzby [34], v ktorom je modul pružnosti vyšší než v smere kolmom na danú osnovu.

Použitie výstuží v kompozitných štruktúrach závisí najmä od konštrukčného účelu daného produktu, ktorý explicitne ovplyvňuje forma pretkávania a typ použitej výstuže. Rôznorodosť použitých materiálov výstuží preto ovplyvňuje výsledné fyzikálne, chemické a mechanické vlastnosti vzniknutej štruktúry. Porovnanie jednotlivých typov výstuží voči hliníkovej zliatine je uvedené na obr. 26.



Obr. 26 Graf zmluvného závislosti napätia na relatívnomu predĺžení jednotlivých typov výstuží a hliníkovej zliatiny 7075-T6 [30, upravené]

4.2.3 SKLENÉ VLÁKNA

Sklené vlákna (GFRP – glass fiber reinforced plastic) patria medzi dominantnú komoditu v rámci komerčnej aplikácie kompozitných materiálov, z dôvodu nízkej obstarávacej ceny, mechanickej a chemickej odolnosti, nekovovým vlastnostiam, rádiovfrekvenčnej transparentnosti a všeobecnej stability [30]. Proces výroby zahŕňa tavenie SiO_2 spoločne s minerálnymi oxidmi Al_2O_3 a B_2O_3 a následným zvlákňovaním roztaveného skla cez platinové puzdro. Následne dochádza k aplikácii ochranných povlakov (napr. organo - silánové kopulačné činidlá), ktoré bránia mechanickému oderu a minimalizujú degradáciu pevnosti vlákna pri procese tkania a zároveň slúžia ako spojovacie činidlá medzi výstužou a matricou.

Na základe množstva a typu prímiesových minerálov rozlišujeme niekoľko variácií sklenených vlákien, z nich viac ako 90% tvoria vlákna pre všeobecné použitie medzi ktoré patrí tzv. E-glass (E-sklo) [32]. Medzi jeho charakteristické vlastnosti patrí únavová odolnosť, chemická a korózna rezistencia, značná pevnosť v ťahu (do 3450MPa) a nízka elektrická vodivosť (elektrický izolant).

Druhou kategóriou sklenených vlákien je tzv. S-glass (S-sklo), ktorý disponuje o 40% vyššou vyšším modulom a nižšou hustotou. Na základe zmienovaných vlastností ako aj stálosti za zvýšených teplôt sa využívajú v konštrukciách s požiadavkou na vysokú pevnosť [31].

4.2.4 ARAMIDOVÉ VLÁKNA

Aramidové vlákna (AFRP – aramid fiber reinforced plastic) distribuované pod obchodnými názvami ako Kevlar, Twaron a Nomex sú organické vlákna tvorené aromatickými polyamidmi. Proces výroby zahŕňa výrobu a následne zvlákňovanie polyméru, ktorý vzniká na základe reakcie medzi amínovou a halogénovou skupinou, ktorá zabezpečuje termálnu stabilitu za zvýšených teplôt [32].

Medzi popredné vlastnosti aramidových vlákien patrí vysoká húževnatosť voči dynamickej a statickej únave a schopnosť absorpcie energie na balistickej úrovni bez porušenia kontinuity vlákna [30]. Súčasne sa tieto vlákna vyznačujú vysokou špecifickou pevnosťou v ťahu, chemickou odolnosť, dielektrickými vlastnosťami a teplotou skleneného prechodu ($T_g = 350^\circ C$), ktorá je vyššia ako degradačná teplota [31].

Hlavnou nevýhodou aramidových vlákien je vysoká obstarávacia cena v porovnaní so sklenými a uhlíkovými vláknami, degradácia vplyvom vzdušnej vlhkosti a nízka pevnosť v tlaku [30]. Zásadným faktorom aplikácie akýchkoľvek vlákien je osobitne následná obrobiteľnosť, ktorá je v prípade aramidových vlákien vzhľadom ku ich húževnatosti značne problematická [31].

Využitie tohto typu vlákien je predovšetkým v oblasti balistickej ochrany (pasívny pancier, nepriestrelné vesty) a v aplikáciách vyžadujúcich ohňovzdornosť a stálosť za zvýšených teplôt (závodné a hasičské kombinézy).

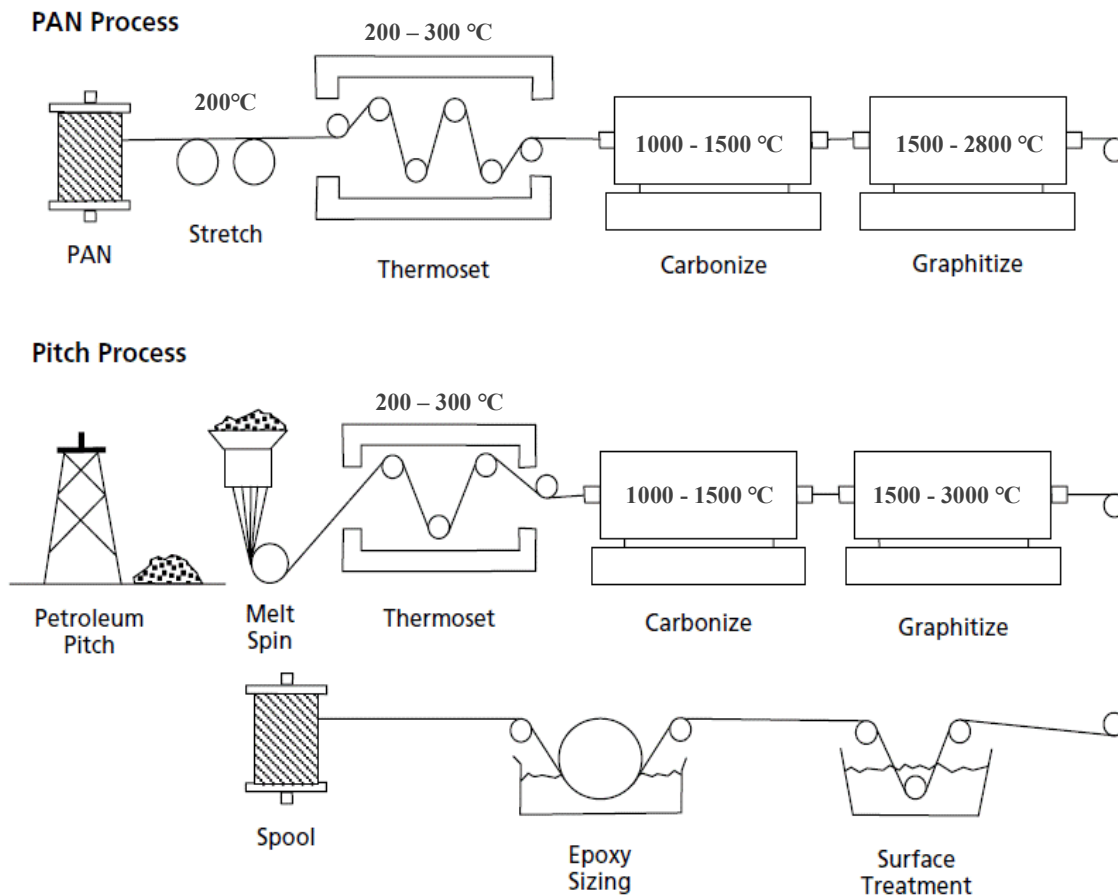
4.2.5 UHLÍKOVÉ VLÁKNA

Uhlíkové a grafitové vlákna (CFRP – carbon fiber reinforced plastic) reprezentujú poprednú skupinu formy akrylových vlákien, ktorá dominuje prvotriednymi vlastnosťami v kombinácii s matricovými systémami, vzhľadom ku oblasti komerčne dostupných vlákien. Príznačnými vlastnosťami sú mimoriadna špecifická tuhosť, vysoká pevnosť v ťahu a tlaku, korózna a únavová odolnosť, rovnako ako aj minimálna tepelná rozťažnosť [31, 32]. Medzi hlavné

nevýhody patrí podpriemerná rázová húževnatosť, krehkosť, náchylnosť ku galvanickej korózii (uvedené v kapitole 4.3.2) a klesajúca pevnosť v tlaku s narastajúcim modulom, následkom poklesu pevnosti vlákien v šmyku [31].

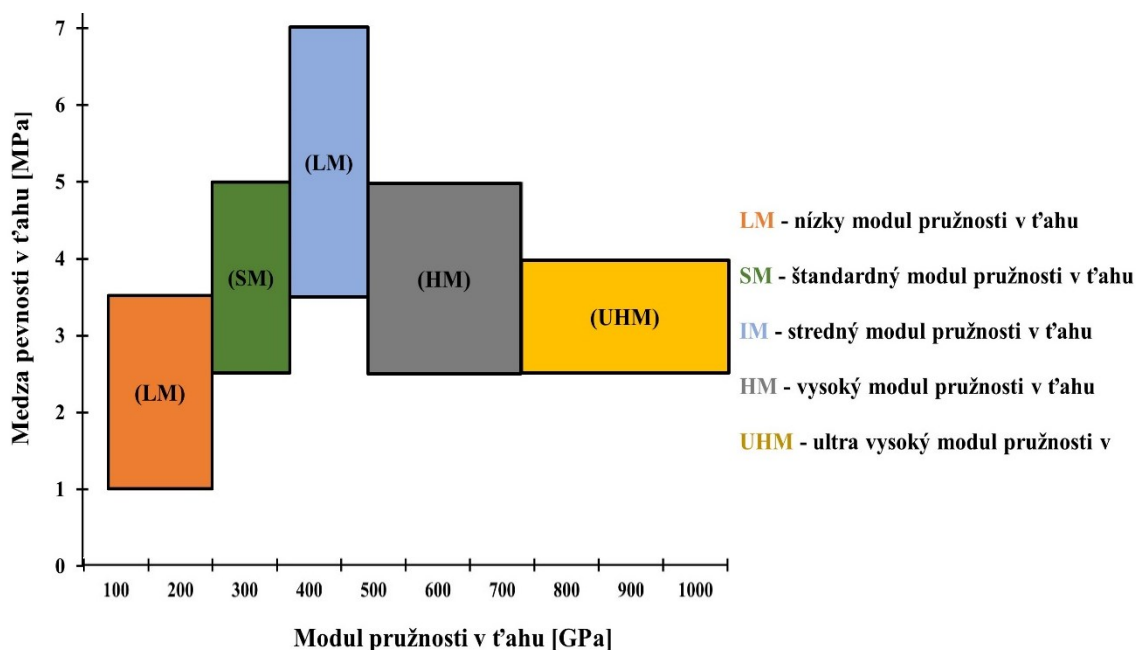
V súčasnom období sa na trhu vyskytujú tri variácie vlákien, ktoré sú vyrobené z rozličných prekurzorov stabilizáciou, karbonizáciou a grafitizáciou. Zmienené výrobné postupy súčasne zahŕňajú aj proces pyrolýzy v inertnej atmosfére (viď. obr. 27).

Najpočetnejšiu skupinu tvoria polyakrylonitrilové vlákna (PAN), ktoré ďalej nasledujú vlákna vyrobené na báze medzifázového rozostupu aromatických hydrocarbonov z ropných derivátov (pitch - based fibers) a do najmenej početnej skupiny spadajú vlákna vyrobené z umelého hodvábu (rayon fibers). Zhotovené vlákno podstupuje pred následnou manipuláciou proces povrchovej úpravy elektronickou oxidáciou a glejením, ktoré zabezpečia ucelenosť matricových väzieb so samotným vláknom a jeho ochranu pred abráziou [32].



Obr. 27 Proces výroby carbonového a grafitového vlákna metódou PAN a PITCH [32, upravené]

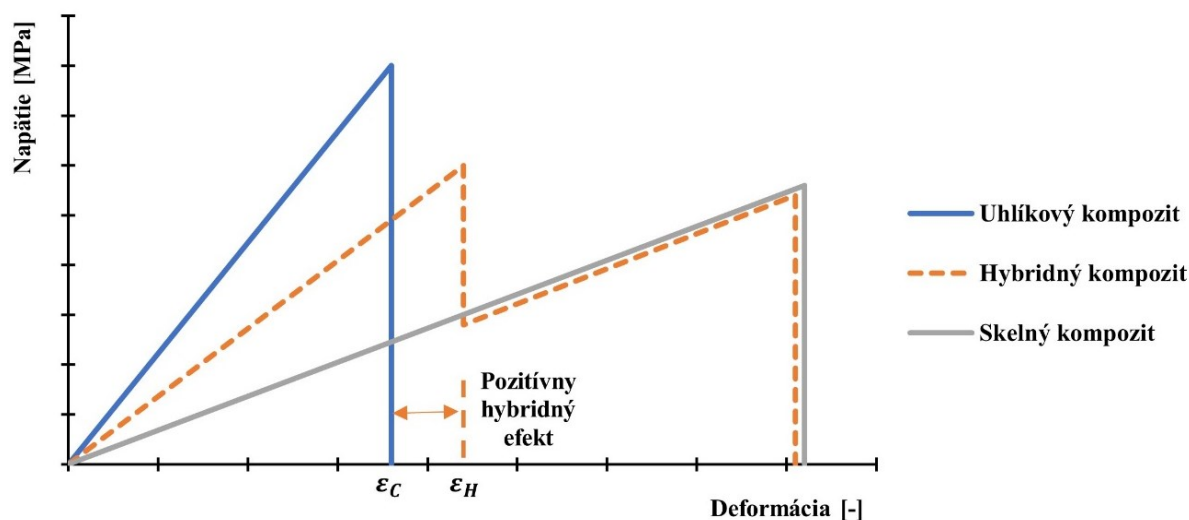
Na základe zvoleného produkčného postupu delíme vlákna do jednotlivých základných foriem vo vzťahu k ich výslednému modulu pružnosti (uvedené na obr. 12). Vlákna vyrobené procesom PAN sa vyznačujú nízkym, štandardným a stredným modulom pružnosti s priemernou pevnosťou. Ak došlo v procese PAN ku samotnej grafitizácii, vznikajú vlákna vysokopevnostné. Prvotriedne vlákna vyrábané procesom PITCH disponujú po grafitizácii ultravysokým modul [32, 36].



Obr. 28 Typologizácia uhľikových a grafitových vlákien podľa výsledného modulu v pružnosti [36, upravené]

4.2.6 HYBRIDNÉ TKANINY

Hybridné tkaniny pozostávajú z minimálne dvoch typov výstuží, s dôrazom kladeným na kombináciu špecifických vlastností jednotlivých výstuží. Cieľom je dosiahnuť optimálne vlastnosti, nižšiu cenu a paralelne poskytnúť flexibilitu pri voľbe návrhu [32]. Na obr. 29 je znázornení synergetický efekt, popisujúci zvýšenie deformácie štandardného vlákna v hybridnom kompozite voči identickému vláknu v monolitnom kompozite. Tento efekt platí predovšetkým pri objemovom podiele 50 / 50 [37].



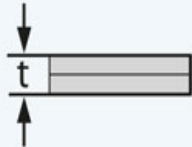
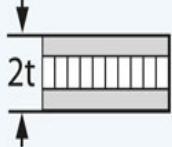
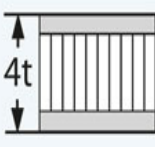
Obr. 29 Graf hybridného efektu pre uhľikový, sklený a hybridný kompozit [37, upravené]

4.3 MATERIÁLY SENDVIČOVÝCH ŠTRUKTÚR

Sendvičové štruktúry tvoria významnú skupinu materiálov, ktoré poskytujú značnú úsporu váhy, v kombinácii so špecifickou tuhosťou a pevnosťou voči bežným konštrukčným

materiálom. Štandardná kompozícia sendvičovej štruktúry je tvorená dvoma protiľahlými vysoko-pevnostnými poťahmi, ktoré sú za pomoci komplementárnych adhéznych prvkov kombinované so zreteľne ľahším a vyšším jadrom. Výsledné zoskupenie vytvára štruktúru, v ktorej jednotlivé poťahy prenášajú ťah a tlak (ohybové zaťaženie) a jadro pôsobí ako šmyková sieť, prenášajúca šmykové zaťaženie. Dôležitým ukazovateľom v prípade aplikácie sendvičových štruktúr s narastajúcou hrúbkou jadra je z tohto dôvodu parameter šmykovej tuhosti jadra. Súčasne dochádza zvýšením hrúbky jadra ku enormnému nárastu tuhosti panelu za minimálneho nárastu hmotnosti (viď. tab. 1) a zjednodušeniu osadenia upevňovacích prvkov [31, 32].

Tab. 1 Nárast parametrov sendvičovej štruktúry voči homogénemu materiálu [38, upravené]

Materiál	Homogénny materiál	Sila panela 1t	Sila panela 4t
Schéma			
Tuhosť panelu	1	7	37
Pevnosť v ohybe	1	3,5	9,2
Hmotnosť	1	1,03	1,06

4.3.1 PENY

Penové jadrá tvoria najrozšírenejšiu skupinu sendvičových jadier pre komerčnú aplikáciu. Ich hlavnými benefitmi sú nákladová a obstarávacía efektívnosť, izotropické mechanické vlastnosti a schopnosť absorbovať rázové namáhanie vzhľadom ku celistvej kontaktnej ploche. Súčasne dochádza použitím penových jadier k zamedzeniu zvlňenia a porušeniu poťahu s ohľadom na šmykový modul a pevnosť v tlaku [39].

Štruktúra penových produktov je sporadicky tvorená spájanými otvorenými bunkami (open cells), vzhľadom ku nadmernej absorpcii maticových systémov. Dominantnou formou je preto uzavretá nespojitá bunčná štruktúra (closed cells), ktorá s technologickou a typovou variačnosťou umožňuje rozsiahlu aplikáciu v oblasti kusovej a sériovej výroby [31]. Nepriaznivým faktorom ovplyvňujúcim aplikovateľnosť istých typov penových jadier je nežiaduce produkcie interných plynov pri cyklickom vytvrdzovaní za zvýšenej teploty pri procese výroby metódou prepregu a semipregu [40].

PVC (POLYVINYLCHLORID)

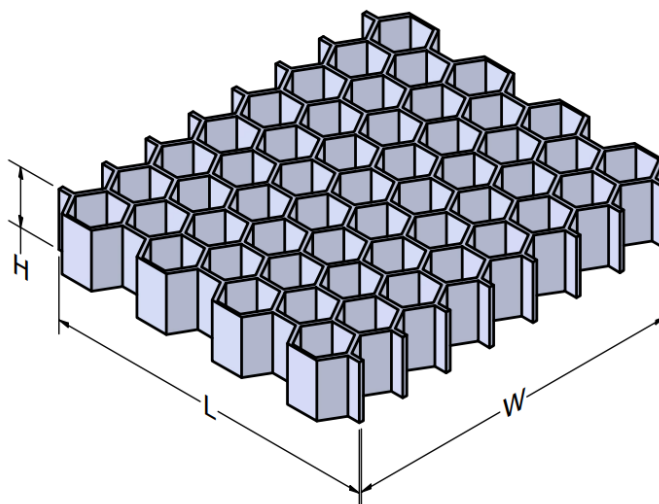
PVC peny vo forme termo-plastov a termo-setov ponúkajú vlastnosti pre všetky kľúčové aplikácie na čele s výrobou ľahkých sendvičových konštrukcií. Výhodou termo-plastických pien je odolnosť voči únave, ako aj možnosť formovania a tepelného tvarovania. Termo-setické peny sú vhodné pre všetky maticové systémy a s nimi spojené procesy spracovania. Vyznačujú sa konzistentnými mechanickými vlastnosťami, vysokou tuhosťou a priaznivou cenou. Zástupcami jednotlivých PVC pien sú produkty typu AIREX® a HEREX® [31].

PMI (POLYMETHACRYLIMIDE)

PMI peny dominujú v oblasti mechanických vlastností a tepelnej odolnosti, vďaka čomu je možné ich použiť v procese výroby vysoko výkonných kompozitných štruktúr, ktoré vyžadujú proces vytvrdzovania za zvýšených teplôt. Štruktúra PMI pien je tvorená zosieťovanými uzavretými a polouzavretými bunkami. PMI peny je možné tvarovať po lokálnej aplikácii tepla a súčasne sú vhodné pre počítačom riadené obrábacie stroje. Medzi PMI peny patrí expandovaná pena ROHACELL® [31].

4.3.2 VOŠTINY

Voštinové štruktúry sa uplatňujú v širokej sfére technologických odvetví. Základovým materiálom pre ich výrobu je hliníková zliatina triedy 5052 a 5056, aramidový a nomexový papier, thermo-plastické a akrylové materiály. Výroba prebieha aplikáciou adhézií na epoxidovej báze a následným zlisovaním za zvýšenej teploty. V prípade hliníkových voštín je spojenie buniek zabezpečené spájkovaním. Proces výroby uzatvára expanzia do požadovaných rozmerov a následné chemické oštiepenie. Najúčinnším tvarom voštín je hexagonálna štruktúra, ktorá dosahuje najväčšiu pevnosť v šmyku a modul v smere L (viď. obr. 30). Jej nevýhodou je nízka tvarovateľnosť, pre ktorú býva v prípade zložitejších štruktúr nahradzovaná konfiguráciou buniek Flex-Core. Zásadnou nevýhodou voštinových štruktúr je nutnosť aplikácie zalievacích zmesí (uvedené v kapitole 4.3.3) v prípade ich spájania, nákladová NDT štúdia a zlá opraviteľnosť v prípade poškodenia [32].



Obr. 30 Základne značenie rozmerov ekstrudovaných voštín

HLINÍKOVÉ VOŠTINY

Hliníkové voštiny ponúkajú najlepší pomer pevnosti ku hmotnosti, excelentnú špecifickú tuhosť a odolnosť voči tlakovému zaťaženiu. V porovnaní s aramidovými voštinami sú cenovo dostupné a vyznačujú sa dobrými vlastnosťami prenosu tepla a elektromagnetického tienenia. Vyskytujú sa v neperforovanom a perforovanom stave (ako absorbátor rázovej energie). Pre ochranu voči zvýšením teplotám a nežiaducemu prostrediu je ich povrch oštiepený procesom eloxovania kyselinou fosforečnou [32].

Významnou nevýhodou hliníkových voštín je vznik galvanickej (bimetalickej) korózie v prípade štruktúry pozostávajúcej z dvoch odlišných metalických zložiek s rozdielnym elektrickým potenciálom v elektrickom kontakte (uhlíkové vlákno – hliníková

voština – uhlíkové vlákno). K zamedzeniu vzniku galvanickej korózie slúžia materiály zabezpečujúce elektrickú izoláciu oboch zmienených zložiek. Medzi tieto materiály radíme sklené vlákna a suplementárne adhézne vrstvy [41].

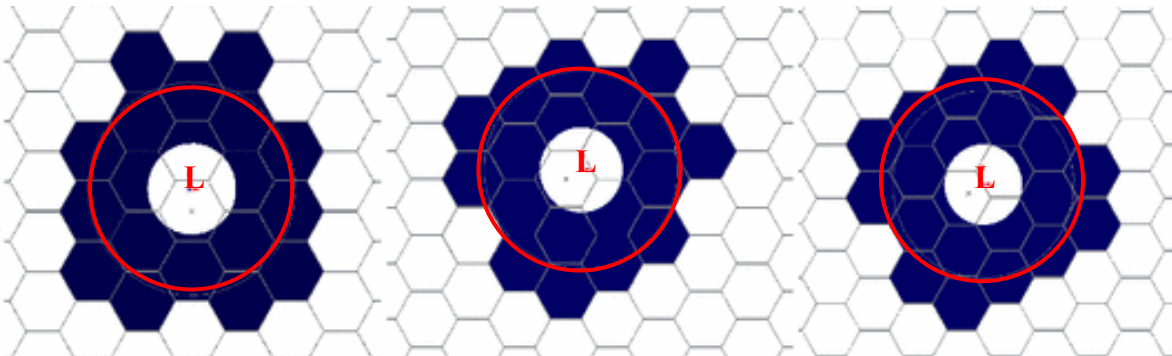
ARAMIDOVÉ A NOMEXOVÉ VOŠTINY

Základnými metaloidnými materiálmi pre výrobu vysokovýkonných voštín sú papiere z para a meta-aramidových (NOMEX®)vlákien. Ku zvýšeniu odolnosti a stabilizácii štruktúry dochádza po samotnej expanzii ku máčaniu a následnej absorpcii fenolových a epoxidových matric [42].

Zmienené typy voštín sa vyznačujú nadpriemernou tuhosťou a excelentnými mechanickými vlastnosťami, ktoré si udržujú za zvýšených teplôt vďaka tepelnej stabilite. Podstatnými parametrami týchto voštín sú korózna odolnosť, dielektrické vlastnosti (elektrický izolant), ohňovzdornosť a dlhá životnosť. V oblasti konštrukčnej aplikácie sa využívajú ako tepelné a hlukové izolátory [30, 42].

4.3.3 ZALIEVACIE ZMESI (POTTING COMPOUND)

Zalievacie zmesi slúžia na prepojenie oddelených panelov voštín, v prípade rozmerných kompozitných dielov a stabilizáciu zložitých tvarových prechodov náchylných na poruchy vplyvom pôsobiaceho zaťaženia. Súbežne dochádza k ich využitiu aj v rámci integrácie vložiek úchyto do samotnej kompozitnej štruktúry. Na obrázku č. 24 je vyobrazené zjednotenie hliníkovej voštiny a insertu s využitím zalievacieho systému, ktorý stabilizoval voľné bunky voštiny v tesnej blízkosti povrchu insertu [30].



Obr. 31 Distribúcia zalievacej zmesi do voľných buniek v okolí insertu [43, upravené]

Zalievacie zmesi sa vyskytujú vo forme filmov a pást. Filmové lepidlá vplyvom teploty znásobujú svoj objem až na trojnásobok a používajú sa predovšetkým v spojitosti s výrobou kompozitných dielov v autoklávoch a peciach. Pastové peny tvorené kombináciou epoxidovej matricou a plniva po aplikácii expandujú do okolitej štruktúry a súčasne je ich možné aplikovať automatizovane [31].

4.4 TECHNOLÓGIA VÝROBY KOMPOZITNÝCH DIELOV

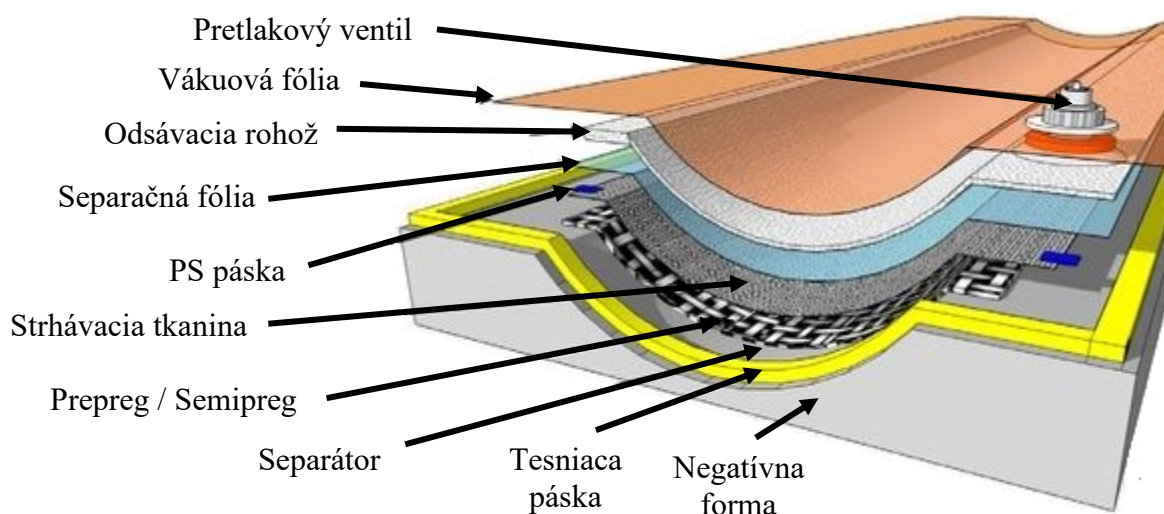
Odvetvie kompozitných materiálov ponúka diferencielne odlišné postupy laminácie, určené pre široké spektrum výrobných procesov a odvetví. Medzi tradičné technologické postupy využívané v oblastiach ručnej výroby patrí technológia ručnej laminácie (hand lamination), ktorá je pri rozmerných dieloch nahradená technológiou postupnej vákuovej infúzie (vacuum infusion process).

Obe zmienené metódy sa vyznačujú minimálnou finančnou investíciou avšak na rozdiel od pokročilých procesov nedisponujú optimálnym pomerom matrice ku výstuži, čo vedie ku zvýšenej hmotnosti dielu. Tieto procesy taktiež neumožňujú použitie voštín, z dôvodu kumulácie matrice v jej dutinách a popritom sa vyznačujú nižšou kvalitou finálnych výrobkov. Súčasne nie sú tieto procesy vhodné pre rozsiahlu sériovú výrobu a preto sa používajú v oblasti pridruženej výroby. Na základe týchto skutočností sú pre výrobu kompozitného battery packu vhodné predovšetkým pokročilé procesy laminácie, medzi ktoré patrí využitie pred - impregnovaných tkanín.

4.4.1 PREPREG

Využitie pred - impregnovaných tkanín (prepregov) patrí medzi technologické postupy využívané v odvetviach, ktoré vyžadujú vysokú kvalitu výroby, optimálny pomer presýtenia vlákien (priemerne 45 - 48 %), konzistentnú lineárnosť vlákien a jednoduchosť aplikácie. Tieto vlastnosti sú dosiahnuté pri tavnom procese výroby (hot melt process), pri ktorom dochádza k spojeniu predhriateho matricového substrátu a zvolenej výstuže za pomoci tlaku, čím dôjde k samotnej impregnácii výstuže. Nevýhodou pred impregnovaných tkanín je nutnosť skladovania za zníženej teploty (približne $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$), sterilitnosť prostredia pri procese kladenia a disponovanosť vysokotlakovým pecným zariadením (autoklávom) [32, 44].

Proces výroby laminátu z pred impregnovaných tkanín a ich následné vytvrdzovanie možno rozdeliť do niekoľkých postupových fáz, začínajúcich predprípravou a definíciou zvolenej skladby (lay-up). Tá je následne, za pomoci šablón a automatizovaných rezacích strojov s ohľadom na cenu materiálu, optimálne rozložená a narezaná. Takto pripravené výrezky sú po aplikácii separačných chemických prostriedkov kladené do predprípravenej formy (viď. obr. 32), ktorá definuje následný trvalý tvar finálneho dielu. Výsledné mechanické parametre sú plne závislé na zabezpečení presného uloženia tkanín, čo vedie k uplatňovaniu laserových projektorov, ktoré zásadne redukujú čas potrebný pre presné pokladanie jednotlivých vrstiev nadimenzovanej skladby. Vzniknutá kombinácia tkanín je následne podrobená fyzikálnej zmene procesom vytvrdzovania v autokláve. Tento proces zahŕňa rovnomernú distribúciu tepla, ktorá vyvolá chemickú reakciu pri súčasne pôsobiacom tlaku na povrch produktu.



Obr. 32 Schéma výroby kompozitného dielu z prepregu do negatívnej formy [45]

V prípade zložitejších kompozitných štruktúr sa uplatňuje rozčlenenie zmieneného procesu na tri základné fázy, z dôvodu úplného spojenia vložiek a jadier s jednotlivými poťahmi. Počas prvej fázy dochádza k samotnému vytvrdzovaniu vonkajšieho poťahu (outer lay-up). Etapovite, počas druhej fázy, dochádza k vytvrdzovaniu na rozhraní jednotlivých adhézných vrstiev so štruktúrnymi a upevňovacími prvkami. V poslednom kroku dochádza k uzavretiu procesu výroby vytvrdzením vnútorného poťahu (inner lay-up). Pri jednoduchých kompozitných štruktúrach je možné jednotlivé procesy zlúčiť do jediného procesu [32].

4.4.2 OOA PREPREG (OUT OF AUTOCLAVE PREPREG) & SEMIPREG

OOA prepregy a semipregy patria medzi pred impregnované tkaniny určené pre procesy suchej laminácie a následného vytvrdzovania za zvýšenej teploty vo vákuových peciach. Tieto materiály sú vhodné predovšetkým pre komponenty, ktorých rozmery neumožňujú vytvrdzovanie v autokláve (raketové nosiče, aerodynamické hlavice), alebo by ich výroba bola s pohľadom investovaných financií značne neefektívna [46].

OOA PREPREGY

Tento typ pred impregnovaných tkanín disponuje mechanickými vlastnosťami, identickými so štandardnými prepregovými tkaninami. Hlavným rozdielom je vyšší obsah matrice a nižšia teplota vytvrdzovacieho cyklu, ktorá umožňuje lepší súlad medzi koeficientami teplotnej rozťažnosti tkaniny a formy. Zásadným rozdielom pri procese výroby je absencia použitia autoklávy, ktorý nahrádzajú pece a lisy. Pri využití teplotnej pece je minimálny požadovaný vákuový tlak na úrovni desiatich milibarov. Medzi OOA prepregy patrí Xpreg, vyrábaný spoločnosťou Easy composites [46, 47].

SEMIPREGY

Semipregy sú, na rozdiel od OOA prepregov, sytené jednostranne pomocou fóliových matric. Realizovateľná je taktiež aplikácia suchých tkanín a samostatných fóliových matric, čím je zabezpečená všestrannosť použitých výstuží pri nízkych výrobných nákladoch. Táto aplikácia vyžaduje použitie suplementárnych adhézných prvkov. Výhodou semipregov je vysoká variabilita kompozície, ktorá umožňuje aplikáciu tam, kde sú vyžadované zvýšené teplotné odolnosti, špecifické mechanické vlastnosti a splnenie normy pre bezpečnosti horľavosti. Medzi semipregy patria produkty od spoločnosti 5M, s.r.o. [48].

4.4.3 DEBULKING

Výroba kompozitných dielov z pred impregnovaných tkanín je vysoko náchylná na tvorbu lokálnych vzduchových dutín. Ich výskyt vedie k narušeniu celistvosti štruktúry, čo vedie ku zvýšenej náchylnosti na delamináciu. K ich zamedzeniu je možné využiť zmäkčenie pokladanej vrstvy zvýšením teploty alebo procesom debulkingu.

Debulking proces je aplikovaný medzi jednotlivými vrstvami pokladaného poťahu tak, aby hrúbka vrstvy nepresahovala 0,5 až 2 mm s ohľadom na hrúbku pokladanej tkaniny. Štandardne je tento proces do postupu laminácie zaradený po uložení 2-3 vrstiev tkaniny. Po dosiahnutí zmienenej hrúbky dochádza k odsatiu vzduchu z laminovanej plochy, čo vedie ku priláčeniu tkaniny a zvýšeniu zabiehavosti jednotlivých vlákien do miest náchylných na vznik lokálnych vzduchových dutín [32].

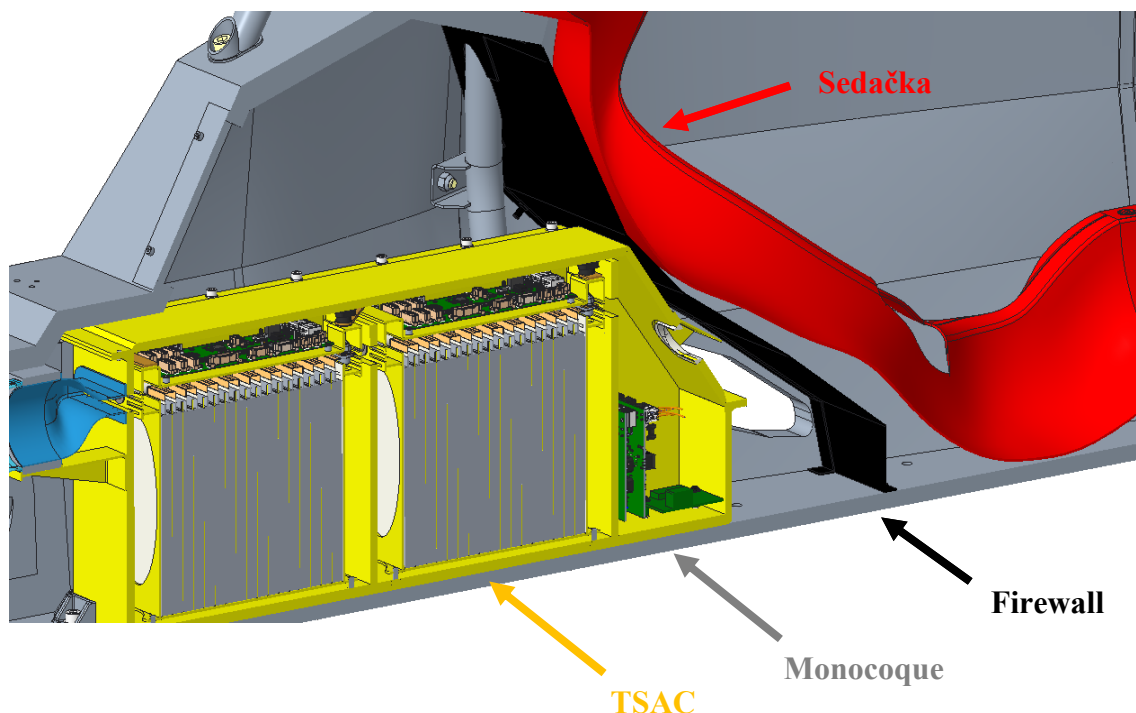
5 KONŠTRUKCIA BATTERY PACKU ED2

Konštrukcia batériového boxu významne ovplyvňuje návrh chassis, ako aj celkovú koncepciu monopostu Dragona eD2. Výsledný návrh celo-kompozitného battery packu je koncipovaný, s ohľadom na zástavbu do celo - kompozitného chassis, pri súčasnom zachovaní nízkej hmotnosti a prijateľnej servisnej prístupnosti.

5.1 ZÁSTAVBA DO MONOPOSTU ED2

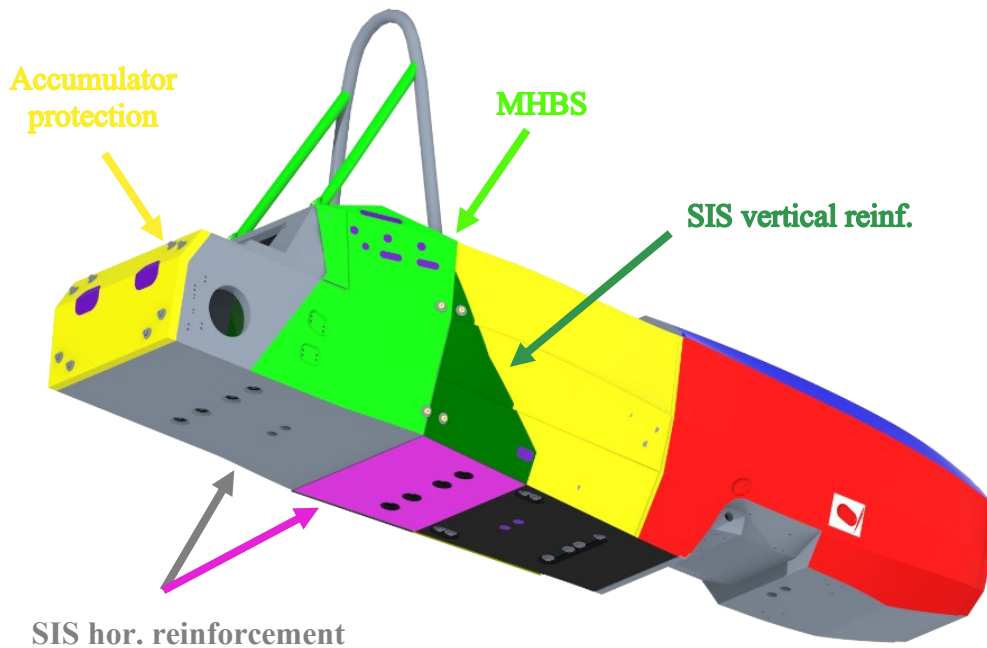
Umiestnenie akumulátorového boxu má významný vplyv na správanie a jazdnú dynamiku monopostu. S ohľadom na stabilizáciu jazdných parametrov a minimalizáciu momentu zotrvačnosti bol battery pack Dragona eD2 umiestnený v tesnej blízkosti protipožiarnej priehradky (firewall-u) tak, aby nebola ovplyvnená pozícia a ergonómia pilota (vid'. obr. 33).

Pozíciu battery packu súčasne ohraničuje uloženie elektromotorov, ktoré sú osadené za štruktúrou (Accumulator Protection), ktorá chráni battery pack pri náraze do zadnej časti monopostu (vid'. obr. 34). Súbežne tak dochádza ku optimálnemu rozloženiu celkovej hmotnosti na prednú a zadnú nápravu v pomere 50 % (predná náprava) a 50 % (zadná náprava).



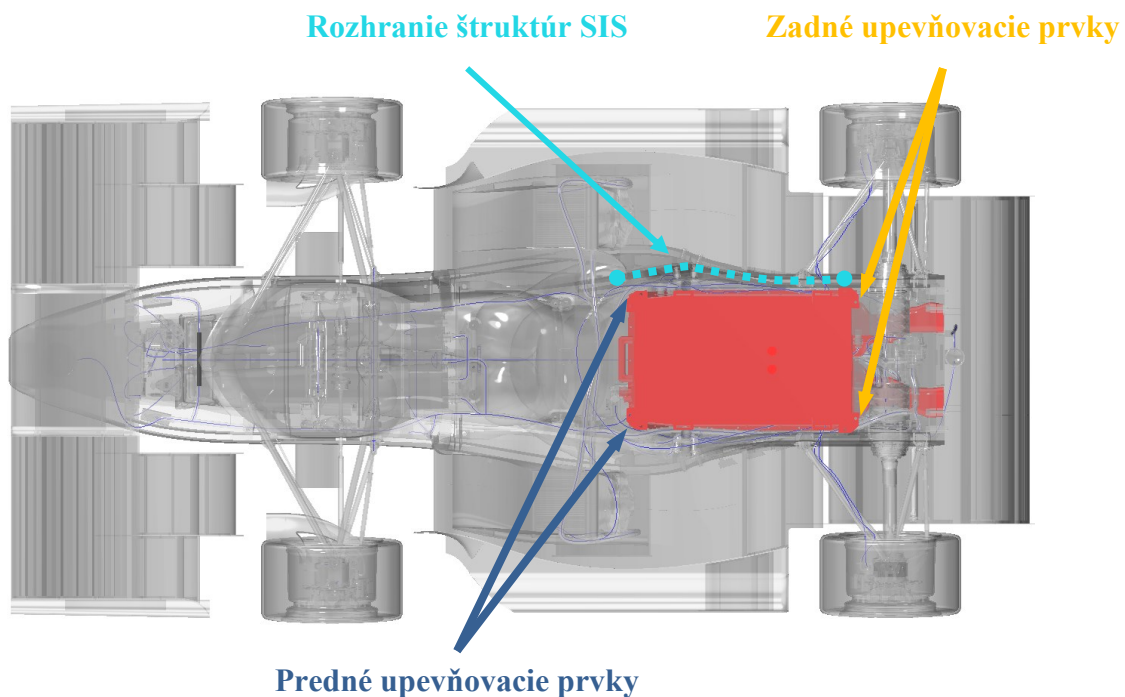
Obr. 33 Zástavba battery boxu do celo-kompozitného chassis eD2

Vzhľadom na značnú hmotnosť zostavy battery packu dochádza jej uložením do monopostu k významnému ovplyvneniu celkovej výšky ťažiska. Odstránením difúzoru a zjednotením horizontálnej štruktúry voči ochrane pred bočným nárazom (SIS hor.) spoločne s nadväzujúcimi štruktúrami do jednotnej štruktúry (SIS hor. reinforcement) (vid'. obr. 34) došlo k optimálnemu uloženiu celej zostavy battery packu v zadnom priestore monokoku. Zároveň viedol tento krok ku definovaniu minimálnej hrúbky podlahového panelu monokoku s ohľadom na bezpečnostné pravidlá vzťahujúce sa ku zmienenej kompozitnej štruktúre chassis.



Obr. 34 Rozloženie štruktúr monokoku eD2 [22]

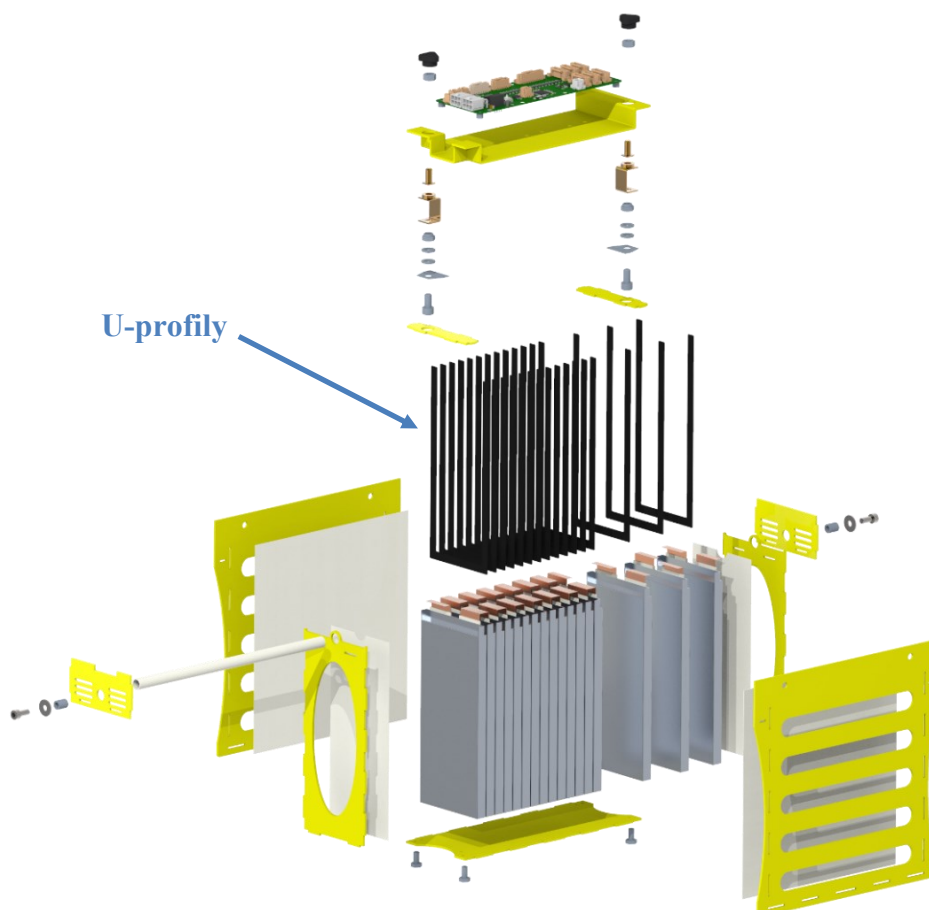
Umiestnením upevňovacích prvkov boxu k rozhraniu štruktúr SIS hor. reinforcement, SIS vertical reinf. a MHBS (viď. obr. 34 a obr. 35) dochádza ku spevneniu celkovej konštrukcie chassis. Výsledná zostava akumulátorového kontajnera z tohto dôvodu slúži v danom uložení ako vystužujúci člen chassis.



Obr. 35 Uchytenie battery packu Dragon-a eD2 v blízkosti rozhrania štruktúr

5.2 KONŠTRUKCIA SEGMENTU

Monopost Dragon eD2 pozostával z ôsmich segmentov osadených Li-po článkami Grepow A175175 16800 mAh. Jednotlivé zoskupenia článkov sú voľne zabudované do konštrukcie samotného segmentu, pričom je umožnená ich prípadná demontáž. Každý segment obsahuje dovedna 17 kusov vreckových článkov (pouch cells).



Obr. 36 Zostava uloženia článkov v segmente akumulátoru eD2

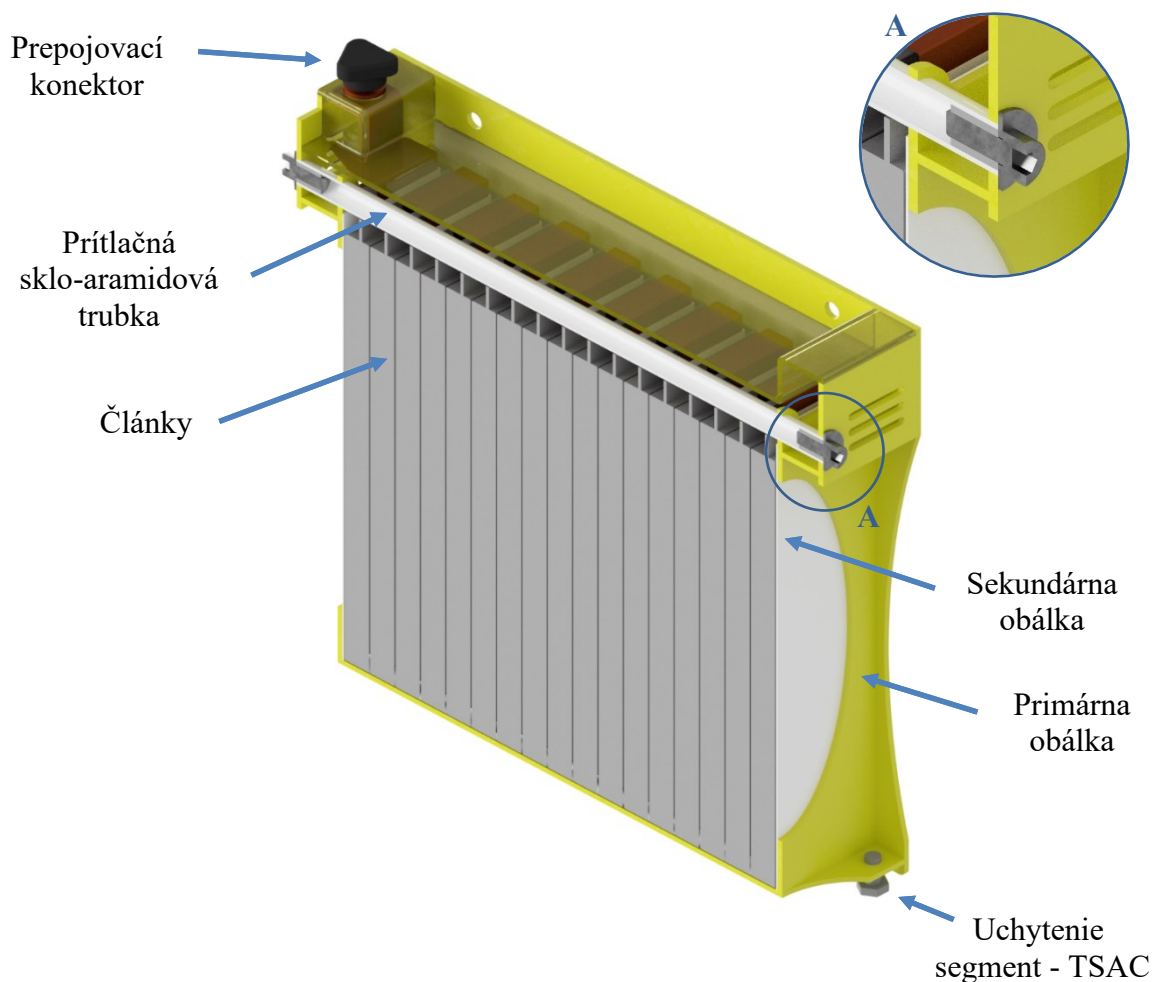
5.2.1 KOMPRESIA ČLÁNKOV

Systém uloženia vymedzuje a definuje polohu jednotlivých článkov pomocou kompresných podložiek (compression pad), ktoré pripúšťajú rozmerové zmeny pozdĺž hrúbky článku. Zmiený proces rozmerovej zmeny (expanzie) puzdra článku nastáva v priebehu každého nabíjacieho cyklu a priebežne v rámci celkovej životnosti batérie, najmä však v dôsledku vysokého zaťaženia a za extrémnych teplôt. Dôležitou úlohou kompresných podložiek v popisovanom zoskupení je aj tlenie vibrácií a absorpcia rázov evokovaných v priebehu jazdy.

Na základe zmienených faktov boli kompresné podložky uložené medzi všetky články, aby bola zabezpečená maximálna odolnosť voči deformácii článku za súčasnej prípustnosti stlačiteľnosti kompresnej podložky. Tvar kompresnej podložky má tvar U - profilu (viď. obr. 36), z dôvodu umožňovania teplotných únikov a taktiež, z dôvodu minimalizovania hmotnosti v dôsledku vysokej hustoty materiálu nehorľavých kompresných podložiek.

5.2.2 UCHYTENIE ČLÁNKOV

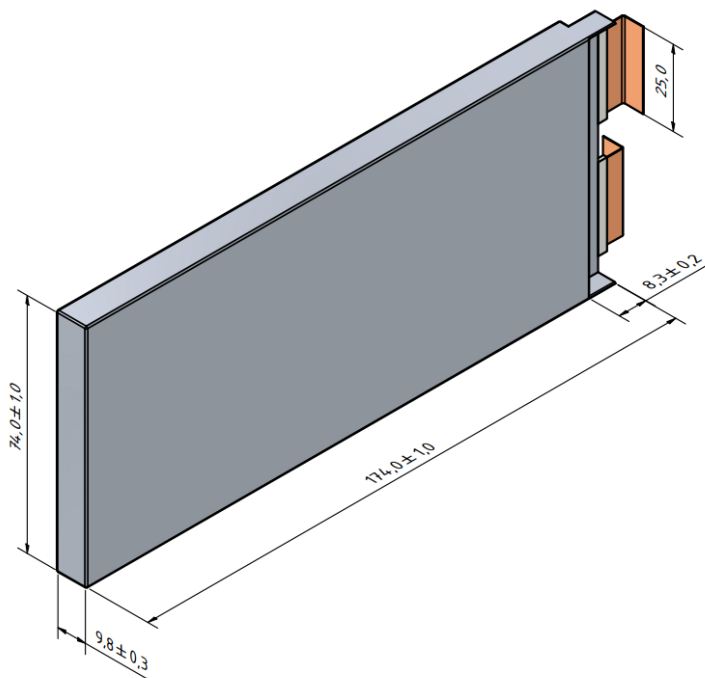
Uchytenie jednotlivých vreckových článkov je zabezpečené pomocou prítlačnej sklo - aramidovej trubky (viď. obr. 37), ktorá dosadá do oblasti rozhrania vystupujúcich konektorov. Tento demontovateľný konštrukčný prvok je osadený v bočných stenách segmentu a zaistený pomocou dvoch skrutiek s vnútorným šesťhranom, ktoré sú osadené vo vlepovaných hliníkových vložkách (viď. obr. 37). Tento typ skrutiek je využívaný z dôvodu prepojenia susedných upevňovacích prvkov pomocou metódy positive locking. Použitím tak dochádza k zabráneniu ich samovoľného uvoľnenia.



Obr. 37 Rez segmentu battery boxu eD2

Celková dispozícia uloženia je prispôbena zásadným rozmerovým toleranciam použitých vreckových článkov. Priemerná rozmerová tolerancia nadobúda pri výške článku hodnotu ± 1 mm (viď. obr. 38) [49]. Ku korekcii tejto nežiaducej odchýlky dochádza zmieneným použitím prítlačnej sklo-aramidovej trubky.

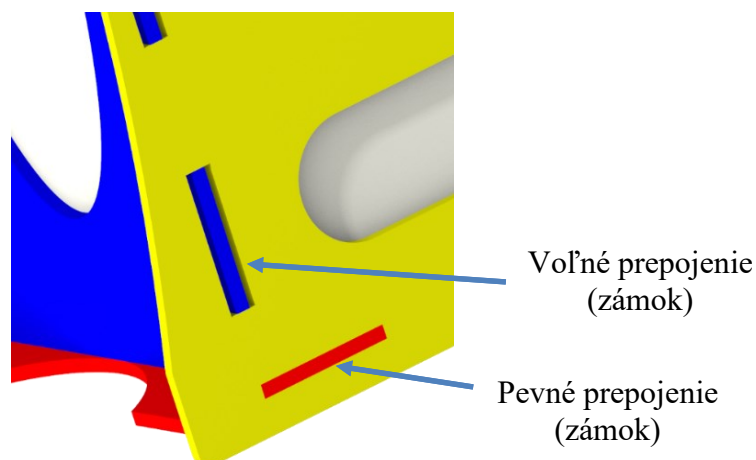
K vymedzeniu zvyšných rozmerových tolerancií dochádza použitím „zámkovej metódy“ v prípade primárnej obálky segmentu (viď. obr. 39). Zároveň je umožnené dimenzovanie hrúbky v prípade sekundárnej obálky segmentu, ktorá zjednodušuje vyberanie zoskupených článkov a zabezpečuje ich ochranu pred poškodením.



Obr. 38 Rozmerová tolerancia článku Grepow A175175 16800mAh [49]

Kľúčovým parametrom, pri návrhu konštrukcie segmentu, je výsledná hodnota tolerancie celkovej šírky uložených vreckových článkov. Vzhľadom na uloženie až sedemnástich kusov článkov dosahuje táto tolerancia hodnotu $\pm 5,1$ mm.

Popisovaný rozmerový stav je korigovaný pomocou rozmerových zámok (viď. obr. 39), ktoré upravujú výsledný rozmer segmentu v tolerancii ± 3 mm (modrá štruktúra) tak, aby nedošlo k narušeniu celkového rozmeru segmentu a polohy upevňovacích bodov. Zároveň je umožnené dosiahnuť úpravu rozmeru bočných stien sekundárnej obálky v tolerancii ± 1 mm. Predstavené konštrukčné riešenie tak v konečnom dôsledku pokrýva výrobné tolerancie vreckových článkov v rozsahu 78,5 %.

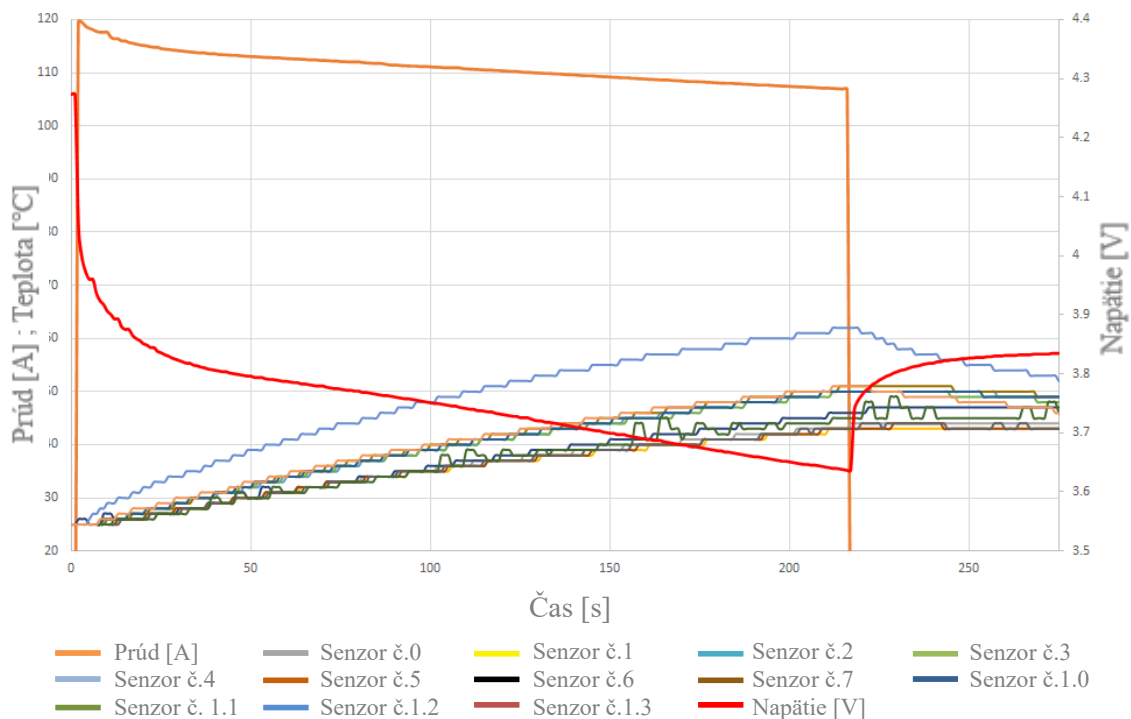


Obr. 39 Prepojenie stien segmentu pomocou „zámkou“

Výsledný konštrukčný návrh uloženia článkov poskytuje v priebehu kompletizovania značnú mieru adaptability, zabezpečujúcu bezproblémové zloženie všetkých súčiastok do jednotného celku. Jednotlivé články sú pevne uložené v segmente bez toho, aby z dôvodu systému ich uloženia prenášali konektory článkov akékoľvek mechanické zaťaženie (uvedené v prílohe č.1).

5.2.3 CHLADENIE ČLÁNKOV

Chladienie článkov akumulátora eD2 bolo navrhnuté s ohľadom na pravidlo EV 5.8.4 (uvedené v prílohe č.1), ktoré definuje maximálnu povolenú teplotu o hodnote 60 °C, meranú na zápornom póle príslušného článku [10]. Na základe vykonaného merania, pri ktorom bol vreckový článok umiestnený v izolovanom puzdre a napojený na záťaž došlo k maximálnemu nárastu teploty v oblasti kladného pólu batérie (Senzor č.2) na hodnotu 62 °C (viď. obr. 40). Výsledná maximálna hodnota teploty bola diametrálne odlišná od priemerných hodnôt v dôsledku nekvalitného kontaktu, čo viedlo k zvýšeniu kontaktného odporu. Maximálna teplota na póle zápornom činila 51,5 °C. Na základe uvedeného merania bolo ako optimálne chladienie s ohľadom na jednoduchosť zástavby a nízku hmotnosť zvolené chladienie pomocou nútenej konvekcie vzduchu.

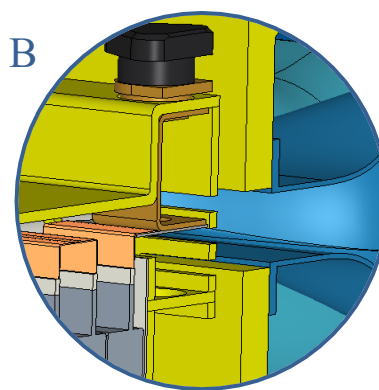
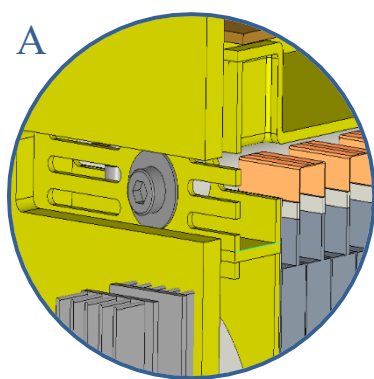
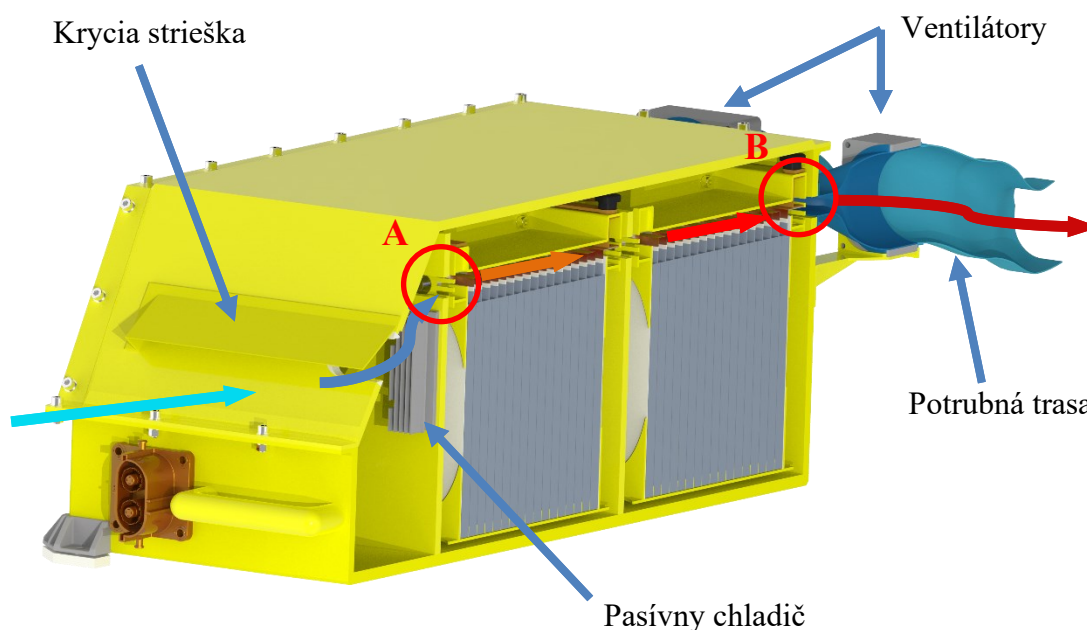


Obr. 40 Meranie teploty pri vysoko prúdovom teste vybijania článkov Grepow 16800 mAh [50]

Články akumulátora eD2 sú chladené dvoma axiálnymi ventilátormi o príkone 46,5 W a prietoku 220 m³/h, pričom každému z ventilátorov prislúchajú dva rady segmentov. Objem chladiacej vzdušiny je privádzaný do priestoru batériového boxu prostredníctvom sidepodu a integrovaného náfuku, ktorý je umiestnený na ľavej strane monokoku.

Vtok vzdušiny do batériového boxu regulujú dva vstupné otvory na nábežnej strane veka batériového boxu, ktoré sú prekryté aramidovou strieškou brániacou stekaniu akejkoľvek kvapaliny do priestoru elektronických komponentov. S ohľadom na osadenie pasívneho

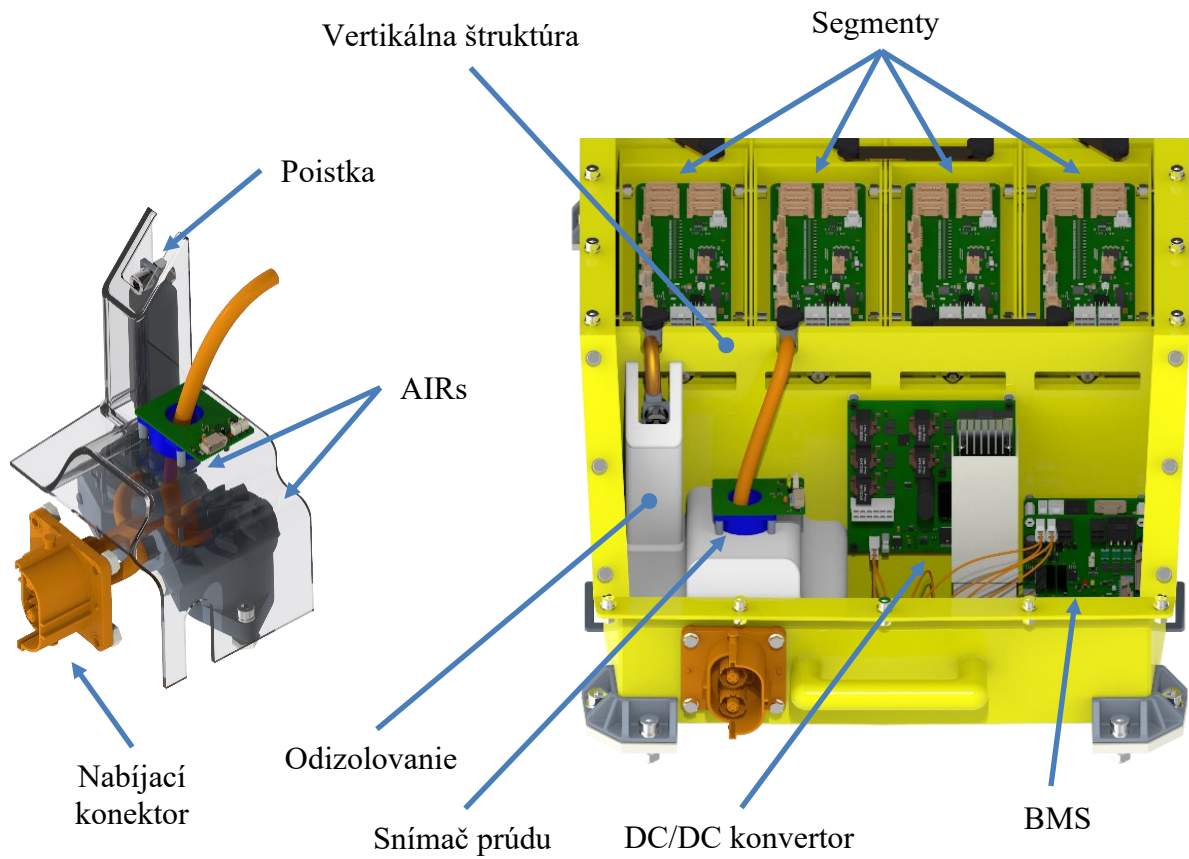
chladiča v pravej časti priestoru umiestnenia elektronických komponentov, je v tejto oblasti privádzaný väčší objem vzdušniny s dôrazom na optimálne chladenie daného komponentu (viď. obr. 41). Privedená vzdušnina je následne nasávaná vstupnými otvormi na jednotlivých segmentoch s ohľadom na celkovú chladiacu trasu, ktorá je navrhnutá tak, aby nebol významne obmedzený prietok vzdušniny a súčasne došlo k minimalizovaniu vradených odporov. Odsávaná vzdušnina je následne vyvedená z priestoru batériového boxu do okolitého priestoru pomocou dvoch separátnych potrubných trás.



Obr. 41 Chladiaca trasa článkov akumulátoru eD2

5.3 KONŠTRUKCIA BATTERY PACKU

Battery pack Dragona eD2 pozostáva zo štruktúrného boxu a veka. Priestor elektronických komponentov a segmentov je oddelený samotnou vertikálnou štruktúrou (viď. obr. 42), ktorá je súčasne použitá aj k rozdeleniu segmentov na prednú a zadnú radu. Priestor medzi segmentmi je vyplnený samostatnými aramidovými vertikálnymi stenami, ktoré sú zasadené do vnútorných vertikálnych štruktúr battery packu.



Obr. 42 Umiestnenie elektrických komponentov & krytie AIRs

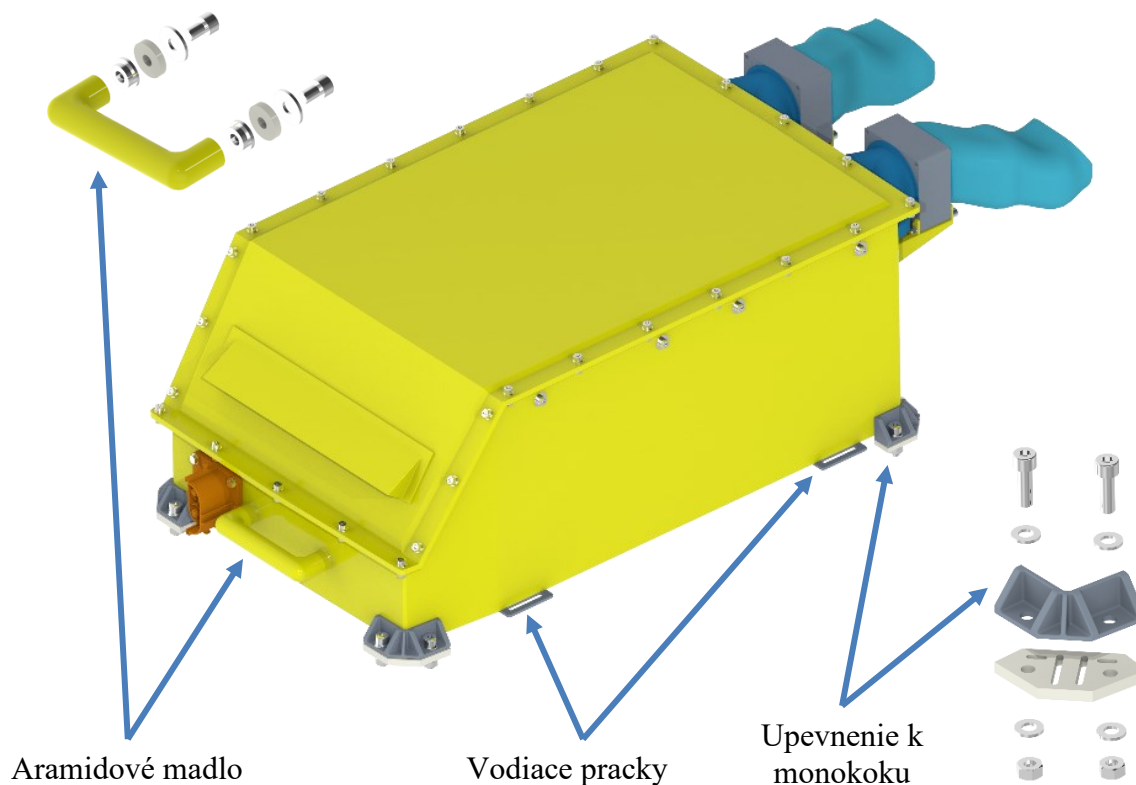
5.3.1 UCHYTENIE BATTERY BOXU K MONOKOKU

Uchytenie batériového boxu je zabezpečené pomocou štyroch držiakov z hliníkovej zliatiny EN AW 7075 a ôsmich metrických skrutiek M8 pevnostnej triedy 8.8. Jednotlivé držiaky sú zapustené do dna segmentu v rohoch boxu, aby došlo k využitiu maximálnej lepenej plochy pri zachovaní nízkej hmotnosti samotného držiaku.

5.3.2 DEMONTÁŽ BATTERY PACKU Z MONOPOSTU ED2

S ohľadom na maximálny počet štyroch prípustných osôb v dynamickej zóne, vrátane pilota monopostu, definovaný pravidlom D 1.2.3 [10], boli z dôvodu zjednodušenia manipulácie umiestnené na povrchu battery packu manipulačné prvky (viď. obr. 43). Pre samotné vysunutie battery packu z upevňovacej pozície do pozície transportnej, ako aj spätné vsunutie boxu do pozície upevnenia battery packu k monokoku je na prednej strane boxu umiestnené aramidové madlo. K demontáži battery packu z oblasti monokoku, v ktorej sú umiestnené trakčné komponenty, sú na spodnej strane battery boxu zapustené vodiace pracky z hliníkovej zliatiny EN AW 7075 pre pozdĺžne vedenie dvoch popruhov.

Využitím manipulačných prvkov dochádza k urýchleniu demontáže battery packu v rámci technickej previerky, ako aj k rovnomernému rozloženiu záťaže na osoby vykonávajúce demontáž. Dochádza tak k predchádzaniu možného úrazu jednotlivých študentov, z dôvodu nadmernej záťaže, ako aj k prevencii možného vylúčenia, z dôvodu neprimerane veľkého časového rámca potrebného k demontáži battery packu.

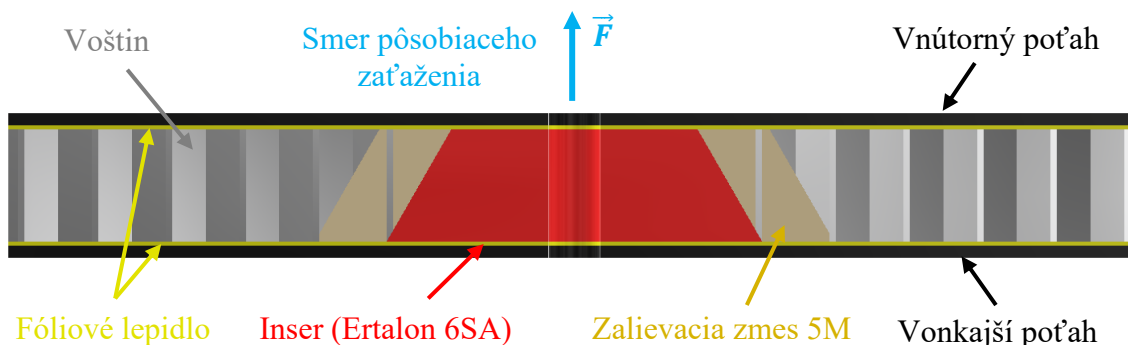


Obr. 43 Upevňovacie prvky battery packu eD2

5.3.3 NÁVRH INSERTU

Tvarový návrh insertov vychádza z nadobudnutých znalostí o insertoch pri výrobe monokoku Dragon DX. Bežne používané kruhové inserty boli vo všetkých prípustných prípadoch nahradené insertami tvarovými, aby sa zabránilo ich možnému pretáčaniu z dôvodu prípadnej delaminácie na rozhraní insertu, voštiny a poťahu. Použitý materiál je extrudovaný Ertalon 6SA dodávaný v plošných formátoch, ktorý je následne vyrezaný vodným paprskom alebo obrobený pomocou CNC frézok..

Inserty zabezpečujú uchytenie battery packu do zlúčenej štruktúry, ktorá je zároveň lemovaná zalievacou zmesou dodávanou ako film od spoločnosti 5M. Táto zmes zabezpečuje prepojenie a zlúčenie použitej voštiny a samotného insertu (viď. obr. 44).



Obr. 44 Uloženie tvarovaných insertov v kompozitnej štruktúre eD2

6 SELEKCIA KOMPOZITNÝCH MATERIÁLOV

Pre správnu funkčnosť navrhovaných komponentov je nutné, aby zvolené materiály dosahovali dobré mechanické a fyzikálne vlastnosti. Zároveň je potrebné preukázať parametre súvisiace s bezpečnosťou návrhu kompozitného battery packu, medzi ktoré sa radí aj test nehorľavosti UL94-V0.

6.1 VOĽBA MATRICE

Voľba matrice má zásadný vplyv na výsledné charakteristiky vzniknutého kompozitu, ako aj spracovateľnosť a jednoduchosť pokladania jednotlivých vrstiev výstuží. Pre výrobu kompozitných dielov battery packu boli zvolené dva diametrálne odlišné matricové systémy.

6.1.1 ER 88 FR (PRELIMINARY PROTOTYPE)

HOT-MELT pred-impregnovaný epoxidový systém ER 88 FR je aplikovaný poťahovaním na príslušnú vrstvu materiálu. Následnou kombináciou tepla a tlaku, ktorý je vyvíjaný prostredníctvom valcovania dochádza k trvalému spojeniu a vytvoreniu finálneho produktu, ktorým je prepreg. Popisovaný systém sa vyznačuje dlhou životnosťou a priaznivou príľnavosťou, ktorá zabezpečuje užívateľsky nenáročné pokladanie jednotlivých vrstiev prepregu.

Systém ER 88 FR je certifikovaný pre použitie pod normou UL94-V0, avšak výrobca nestanovuje príslušnú minimálnu hrúbku materiálu, pre ktorú táto certifikácia platí. Nesmiernou výhodou zmieneného systému je variabilnosť cyklov vytvrdzovania v rozmedzí teplôt 100 - 145 °C [51]. Použitím nízkotepelných cyklov vytvrdzovania je realizovateľná aplikácia cenovo dostupných materiálov pre výrobu negatívnych foriem na rozdiel od materiálov toolingových, ktoré cenovo prevyšujú nákupnú hodnotu štandardného prepregu. Materiálové parametre epoxidovej matrice ER 88 FR sú uvedené v tab. 2.

Tab. 2 Materiálové charakteristiky epoxidového systému ER 88 FR [51]

Ohybová pevnosť [MPa]	135-150
Modul pružnosti v ohybu [GPa]	2,9-3,1
Sýtenie [%]	42-45
Cyklus vytvrdzovania:	135 min. pri 100°C Ohrev: 2-4°C/min. Chladnutie: 2-5°C/min.

6.1.2 LETOXIT FOIL® LFX 056

Epoxidový fóliový systém Letoxit® Foil LFX 056 je primárne určený pre patentovanú technológiu suchej laminácie (LF TECHNOLOGY) a súčasne je využívaný v rámci výroby semipregov s ľubovoľnou výstužou, vrátane jednosmerných a 3D tkanín. Uvedený systém popritom nachádza využitie na rozhraní sendvičových štruktúr a štandardných prepregov. Pri uvedenej aplikácii je však nutné zabezpečiť kompatibilitnosť oboch matricových systémov.

Systém Letoxit® Foil LFX 056 je certifikovaný pre použitie pod normou FAR Part 25.853(a)(1)(i) [52], ktorá figurovala v pravidlách FSG do verzie pravidiel 0.9 2022.

Použitie uvedenej normy je v rámci verzie pravidiel 1.0 2022 umožnené po preukázaní príslušnej ekvivalencie k norme UL94-V0, ako aj definovaním minimálnej hrúbky použitého materiálu.

Hlavnou výhodou fóliového systému LFX 056 je možnosť individualizácie skladby a celkového pomeru presýtenia matrice voči použitým výstužiam. Medzi popredné vlastnosti tohto systému patrí široká škála cyklov vytvrdzovania a úspora finančných nákladov oproti nákupu, skladovaniu a vytvrdzovaniu štandardných prepregov.

K výpočtu optimálneho množstva matricového systému LFX 056 pri použití ľubovoľného množstva výstuží slúži nasledujúca rovnica [52]:

$$\frac{m_{LF}}{\rho_{LF}} + \frac{m_R}{\rho_R} = t_C, \quad (1)$$

kde m_{LF} je plošná hmotnosť epoxidovej fóliovej matrice LFX 056, m_R je plošná hmotnosť použitej výstuže, ρ_{LF} je hustota epoxidovej fóliovej matrice LFX 056, ρ_R je hustota použitej výstuže a t_C značí celkovú hrúbku použitej výstuže [52].

Tab. 3 Materiálové charakteristiky fóliového epoxidového systému Letoxit® Foil LFX 056 [52]

Ohybová pevnosť [MPa]	95-110
Modul pružnosti v ohybu [GPa]	3,3-3,7
Sýtenie [%]	voliteľné
Cyklus vytvrdzovania:	200 min. pri 90°C Ohrev: 0,5-1°C/min. Chladnutie: 0,5-1°C/min.

6.2 TEST NEHORĽAVOSTI UL94-V0

Na základe pravidiel EV 5.4.6, EV 5.5.3 a EV 5.5.8 musia všetky časti battery packu pozostávať z materiálov, ktoré sú certifikované ako spomaľovače horenia. Preddefinovaná norma UL94 V0 a prípustná ekvivalencia k iným normám je uvedená v rámci pravidla T 1.2.1 (uvedené v kapitole 2.2.1) [10].

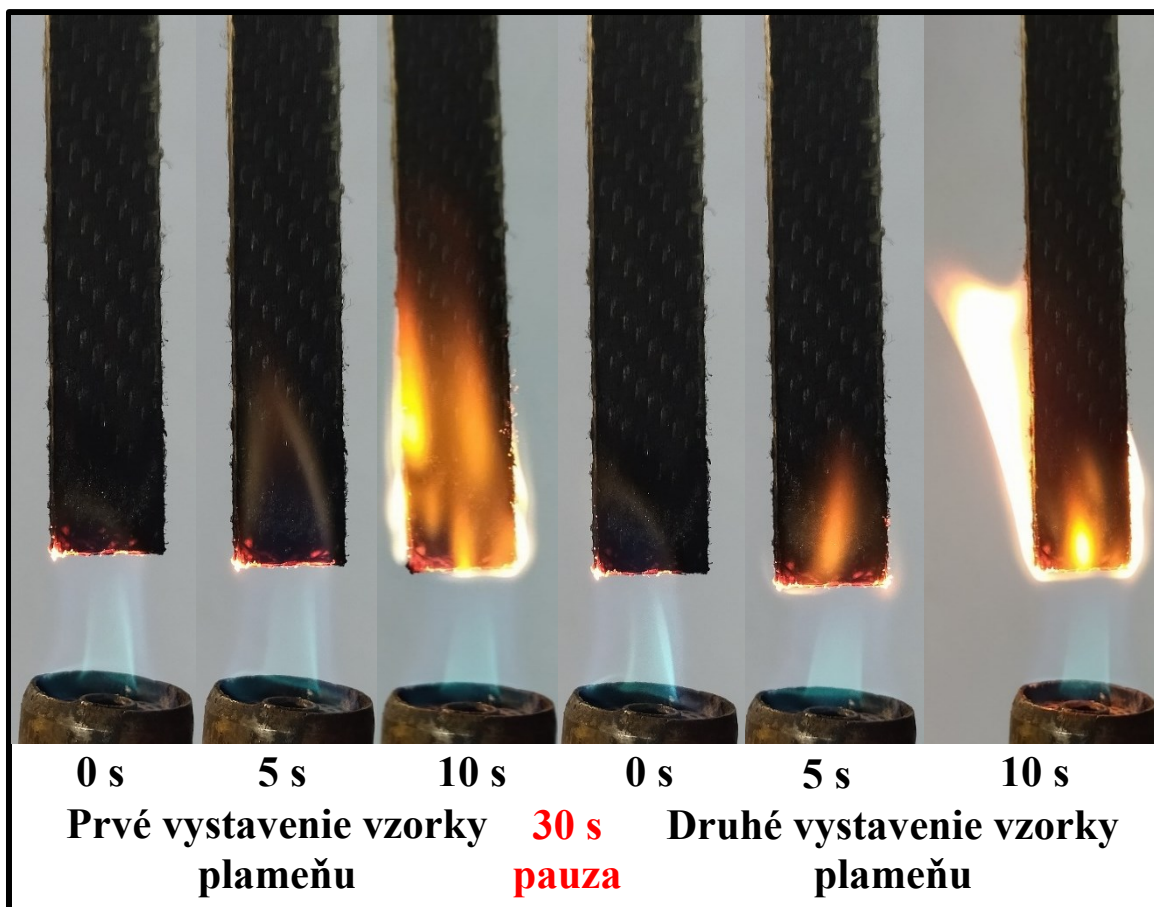
V rámci overenia normy UL94 -V0 epoxidového systému ER 88FR a overenia ekvivalencie normy FAR Part 25.853(a)(1)(i) epoxidového systému Letoxit® Foil LFX 056 k norme UL94 – V0 bolo uskutočnené testovanie v štyroch zvolených hrúbkach materiálov v rozmedzí 0,25 – 1,5 mm (viď. tab. 4).

Tab. 4 Výsledky testu ekvivalencie epoxidových matric ku norme UL 94 - V0

Matrica	Hrúbka materiálu [mm]			
	0,25	0,5	1,0	1,5
ER 88 FR	Spĺňa	Spĺňa	Spĺňa	Spĺňa
Letoxit® Foil LFX 056	Nespĺňa	Spĺňa	Spĺňa	Spĺňa

Pre jednotlivé hrúbky materiálov bolo súhrnne vyrobených desať vzoriek, z nich polovica bola vystavená pôsobeniu teploty 70 °C po dobu siedmich dní. Druhá polovica vzoriek bola vystavená pôsobeniu teploty 23 °C po dobu 48 hodín pri 50 % relatívnej vlhkosti.

Vzorky vystavené týmto exaktným podmienkam boli následne podrobené vertikálnemu testu odolnosti voči šíreniu plameňa. Jednotlivé vzorky boli vystavené pôsobeniu plameňa Bunsenovho horáku po dobu 10s. Tento proces sa následne opakuje po uplynutí tridsiatich sekúnd, kedy je vzorka opätovne vystavená pôsobeniu plameňa po dobu desiatich sekúnd (viď. obr. 45). Počas celej doby testu nie je akceptovateľné siahanie plameňa do výšky úchopu vzorky a akékoľvek odkvapkávanie častíc, ktoré by mohlo spôsobiť zapálenie chirurgickej bavlny umiestnenej 305 mm pod testovacou vzorkou. [53]



Obr. 45 Test odolnosti proti šíreniu plameňa UL94 - V0 epoxidového systému ER 88FR

6.3 SKÚŠKA ŤAHOM PRE PMCs

Základnou statickou testovacou metódou pre stanovenie materiálových charakteristík kompozitných výstuží, sýtených polyméromou maticou (PMCs) je skúška ťahom, definovaná normou ASTM D3039/D3039M – 17. Popisovaná norma definuje vstupné parametre a rozmery jednotlivých vzoriek, ako aj priebeh samotného testovania. Pre stanovenie odozvy na šmyk v rovine kompozitov, orientovaných v uhle 45°, platí norma D3518/D3518M – 18.

Cieľom experimentu, v rámci ktorého dochádza pôsobením monotónneho zaťaženia za stálej rýchlosti posuvu k pozdĺžnemu predlžovaniu upnutého telesa, je získanie mechanických vlastností kompozitných materiálov. Medzi tieto vlastnosti patria medza pevnosti v ťahu,

modul pružnosti v ťahu, medzné pretvorenie a Poissonov pomer, ktoré slúžia k následnej špecifikácii vstupných údajov konštrukčných analýz.

6.3.1 VÝROBA VZORIEK

Výroba vzoriek započína zvolením materiálu výstuže a následnou kombináciou s kompatibilnou epoxidovou matricou. Pre matricový systém ER 88 FR od spoločnosti MEEM, s.r.o. došlo po vzájomnom rozanalyzovaní problematiky k zvoleniu aramidovej výstuže o plošnej hmotnosti 220 g/m². Táto výstuž pozostáva z Twaronových vlákien, ktoré sú tkané do keprovej väzby.

Pre matricový systém Letoxit[®] Foil LFX 056 boli zvolené bežne užívané výstuže v rámci zázemia tímu TU Brno Racing. Aramidová výstuž o plošnej hmotnosti 170 g/m² spoločne s jednosmernou uhlíkovou výstužou o plošnej hmotnosti 150 g/m² boli dodané spoločnosťou GRM Systems s.r.o. . Uhlíková tkanina o plošnej hmotnosti 245 g/m² a hybridná tkanina o plošnej hmotnosti 170 g/m² boli dodané spoločnosťou Kordcarbon, a.s. . Vysokopevnostná plošná tkanina Textreme bola dodaná švédskou spoločnosťou Oxeon AB. Prehľad jednotlivých typov výstuží, vlákien a typov tkania je uvedený v tab. 5.

Tab. 5 Špecifikácia zvolených materiálových výstuží

Označenie výstuže	Typ vlákna	Typ matrice	Štýl tkania
A 220g/m ²	Twaron, Dtex 1620	ER 88 FR	[T2/2]
A 170g/m ² Style 284	Kevlar 49, 127tex	Letoxit [®] Foil LFX 056	[T2/2]
CC 245g/m ²	Toray 3K, 200tex	Letoxit [®] Foil LFX 056	[T2/2]
CK 170g/m ² (2:1)	Toray 3K, 200tex (2:1) Kevlar 49, 127tex (1:2)	Letoxit [®] Foil LFX 056	[T2/2]
UD CST 150g/m ²	SIGRATEX, 800tex	Letoxit Foil [®] LFX 056	[UD]
TeXtreme 160g/m ²	Tenax UTS50 12k, 800tex	Letoxit Foil [®] LFX 056	[P, HT]

Určením jednotlivých kombinácií výstuží a matricových systémov dochádza k výrobe plošných laminátov. Následne sú jednotlivé vzorky postupne vyrezané vodným lúčom. Odporúčané rozmery a minimálne hrúbky vzoriek sú uvedené v tab. 6.

Tab. 6 Doporučené rozmery vzoriek výstuží sytených polymérou matricou [54]

Orientácia výstuže	Šírka vzorky [mm]	Dĺžka vzorky [mm]	Hrúbka vzorky [mm]
Jednosmerná [0°]	15	250	1,0
Jednosmerná [90°]	25	175	2,0
Symetrická	25	250	2,5

Zvolená metóda na rozdiel od CNC obrábania a rezania laserovým lúčom zamedzuje ovplyvneniu výsledných hodnôt z dôvodu vystavenia matricového systému zvýšeným teplotám. Z dôvodu kompenzácie vzniknutého podrezávania došlo pri procese rezania k natočeniu trysky a následnému vedeniu dvoch samostatných rezov po identickej trajektórii.

V prvej fáze výroby disponovala každá kombinácia zvolenej výstuže, matrice a orientácie výstuže celkovo ôsmimi vzorkami. Po následnej selekcii vzoriek poškodených pri procese rezania vodným lúčom dosiahol finálny počet vzoriek hodnotu 68 kusov. Všetky vzorky boli následne opatrené uhlíkovou príložkou v uhle 45° proti pôsobeniu silového zaťaženia, ktorá bráni poškodeniu vzorky v mieste jej uchopenia.

Jednotlivé príložky boli postupne prilepené pomocou dvojzložkového, rýchlo vytvrdzujúceho lepidla LOCTITE® 3090. Pre stanovenie minimálnej dĺžky lepeného spoja príložky bola použitá nasledujúca rovnica [54]:

$$L_{min} = \frac{F^{tu} \cdot h_p}{2 \cdot F^{su}}, \quad (2)$$

kde L_{min} je minimálna požadovaná dĺžka lepeného spoja príložky, F^{tu} je medza pevnosti v ťahu testovaného materiálu, h_p je hrúbka lepenej príložky a F^{su} je najnižšia pevnosť v šmyku z jednotlivých materiálov (vzorka, príložka a lepidlo) [54].

Pred samotným trvalým spojením vzorky a príložky bolo uskutočnené meranie hrúbky a šírky každej vzorky v krajných hodnotách, v strede a v oblasti pretvorenia (uvedené v prílohe č.2). Hodnoty nominálnej a priemernej hrúbky kompozitu sú uvedené v tab. 7. Komplexné výsledky merania sú uvedené v prílohe č.3.

Tab. 7 Výsledky merania rozmerových parametrov vzoriek

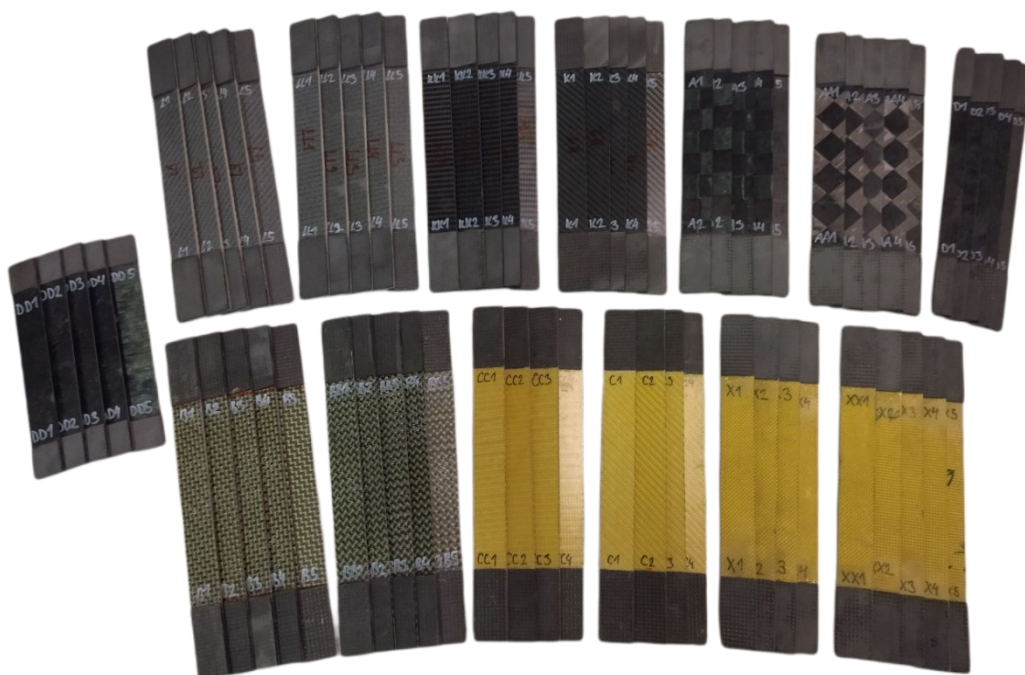
Označenie výstuže	Nominálna hrúbka vrstvy [mm]	Počet vrstiev	Priemerná hrúbka vzorku 0° [mm]	Priemerná hrúbka vzorku 45° [mm]	Označenie výstuže v skladbe
A 220g/m ²	0,30	8	2,289	2,216	A 220
A 170g/m ²	0,30	7	2,014	2,021	A 170
CC 245g/m ²	0,30	5	1,398	1,430	CC 245
CK 170g/m ²	0,25	8	2,027	1,954	CK 170
UD CST 150g/m ²	0,22	7	1,531	-	UD 150
TeXtreme 160g/m ²	0,26	5	1,174	1,055	T 160

6.3.2 TESTOVANIE VZORIEK

Testovanie kompozitných vzoriek (viď. obr. 46) bolo uskutočnené na skúšobni C3a Leteckého ústavu Fakulty strojnínho inžinierstva VUT v Brně. K stanoveniu parametrov bol použitý elektromechanický skúšobný stroj LabTest 6.500SP1-VM so silovým snímačom o maximálnej prípustnej vyvinutej záťaži 500kN. Súčasne bol v rámci merania použitý aj extenzometer Mercury 2.4 [55].

Pred samotným upnutím vzorky do klieštín došlo k jej zarovnaniu v smere pôsobiacej sily. Konštantná rýchlosť posuvu 2 mm/min bola zvolená v súlade s použitou normou ASTM D3039/D3039M – 17 [54]. Pre vzorky s orientáciou vlákien v 0°, bola zvolená referenčná

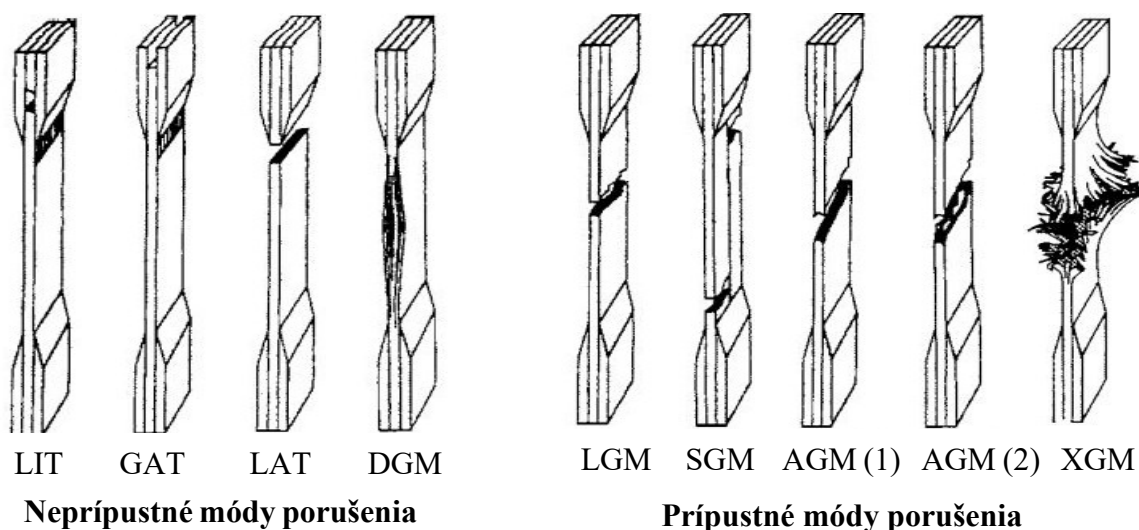
hodnota vzorky 60 mm v smere zaťaženia. Pre vzorky s orientáciou vlákien v 45° bola zvolená referenčná hodnota 20 mm v smere zaťaženia a v smere kolmom na smer zaťaženia.



Obr. 46 Skúšobné vzorky kompozitných materiálov

6.3.3 CHARAKTERISTIKA POŠKODENIA

Pre vyhodnotenie priebehu skúšky je potrebné získať štatisticky významné množstvo dát. K týmto účelom je štandardne možné použiť iba vzorky s prípustnými módmi porušenia (viď. obr. 47). Do merania je zároveň možné zahrnúť vzorky, ktoré vykazujú hraničné stavy neprípustného poškodenia a nedochádza pri nich k významnému rozptylu nameraných dát v porovnaní so zvyšnými vzorkami [54].



Obr. 47 Prípustné a neprípustné módy porušenia kompozitných vzoriek [54]

6.3.4 ANALÝZA VÝSLEDKOV SKÚŠKY ŤAHOM (VZORKY V ORIENTÁCII 0° A 90°)

Zo získaných dát boli vytvorené diagramy zmluvnej závislosti napätie na pomernom predĺžení (vid'. obr. 48). Pre výpočet jednotlivých zmluvných napätí slúži rovnica:

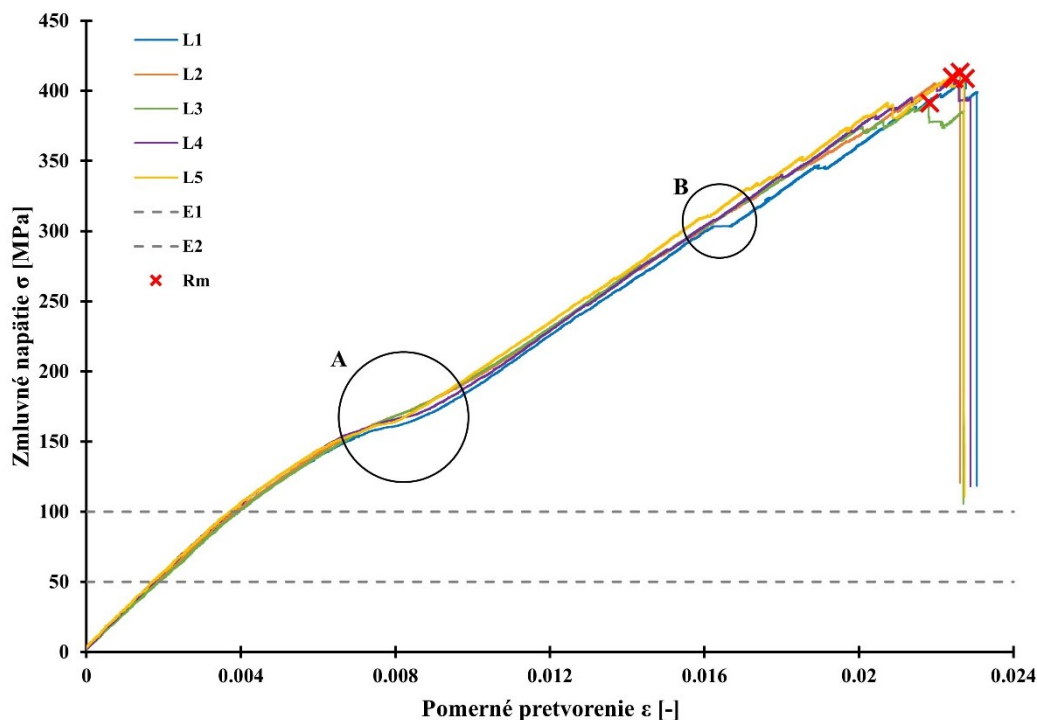
$$\sigma = \frac{F}{S_0}, \quad (3)$$

kde σ je hodnota zmluvného napätia, F je hodnota okamžitej aplikovanej sily v jednotlivých časových bodoch merania a S_0 je hodnota počiatočného prierezu vzorku.

Pre výpočet pomerného predĺženia slúži rovnica:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L-L_0}{L_0}, \quad (4)$$

kde ε je hodnota pomerného predĺženia, ΔL je hodnota rozdielu okamžitého predĺženia skúšobnej vzorky z počiatočnej hodnoty L_0 na hodnotu okamžitej dĺžky L skúšobnej vzorky.



Obr. 48 Graf ťahovej skúšky vzoriek L1-L5 v orientácii 0° a 90°

Zároveň došlo v priebehu merania k zaznamenaniu maximálnej hodnoty aplikovanej sily, na základe ktorej bola spočítaná zmluvná medza pevnosti podľa rovnice:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, \quad (5)$$

kde R_m je hodnota zmluvnej medze pevnosti, F_m je hodnota maximálnej aplikovanej sily a S_0 je hodnota počiatočného prierezu vzorky.

Modul pružnosti v ťahu bol vypočítaný na čo najväčšej elastickej oblasti grafu, v ktorej dochádza k najlineárnejšiemu priebehu zaťažovania skúšobného telesa. V tejto súvislosti je následne umožnené uplatnenie Hookovho zákona. Popisovaná zúčjomová oblasť bola

definovaná zhodne pre všetky vzorky rovnakého zloženia a na grafoch je vyznačovaná ako oblasť E1 – E2 (vid'. obr. 48). K výpočtu modulu pružnosti v ťahu slúži rovnica [54]:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}, \quad (6)$$

kde E je modul pružnosti v ťahu, $\Delta\sigma$ je hodnota rozdielu zmluvných napätí v krajných bodoch lineárnej oblasti a $\Delta\varepsilon$ je hodnota rozdielu pomerného predĺženia vzorky v krajných bodoch lineárnej oblasti [54].

VZORKY L1-L5

Na obr. 48 je predstavený graf aramidovej výstuže z twaronových vlákien v orientácii 0° (A220 g/m²). Tento prepregový systém je sýtený matricovým systémom ER88FR. Grafy ako aj fotky pretrhnutých zvyšných vzoriek v orientácii 0° a 90° sú uvedené v prílohe č.4.

V priebehu ťahovej skúšky došlo k atypickému správaniu materiálu ako aj k vzniku anomálií, ktoré sú vyznačené ako záujmové oblasti A a B (vid'. obr. 48). V oblasti A a v jej tesnej blízkosti bola zaznamenaná počiatočná degradácia matricového systému a následné rovnanie výstuží z dôvodu odchýlky v súmernosti kompozície, ktoré zapríčinilo pokles zmluvného napätia. Po popustení jednotlivých vlákien bolo následne aplikované zaťaženie prenášané rovnomerne v osi jednotlivých vlákien.

V záujmovej oblasti B došlo v prípade vzoriek L1 a L5 k trvalému porušeniu krajných vlákien, ktoré viedlo vo finálnej časti ťahovej skúšky k totálnemu zlyhaniu matricového systému a následnému zlyhaniu povrchových vrstiev výstuží. Tento stav je možné zaznamenať aj v prípade vzoriek L2 až L4 a následne opakovane aj v prípade vzorky L1.

Výsledný stav vzorky je možné označiť ako kombináciu okrajového intralaminárneho šírenia lomu a následnej viacnásobnej explózií [M(x,y)XGM] v oblasti na rozmedzí príložiek (vid'. obr. 49). Dané výsledky poukazujú na markantnú krehkosť matrice, pričom nie je možné jednoznačne určiť jednotnú lomovú plochu vzorky. S ohľadom na výsledky z uvedenej skúšky ako aj zo skúšky v orientácii 45° v kapitole 6.3.5 bol daný materiál vyradený zo zoznamu použitých materiálov a jeho skúmanie bude predmetom ďalších meraní.



Oblasť intralaminárneho šírenia delaminácie

Obr. 49 Skúšobné telesá L1-L5 po pretrhnutí

Dosiahnuté výsledky boli následne štatisticky spracované (viď. tab. 8), pričom bola vyčíslená priemerná hodnota modulu pružnosti a priemerná hodnota zmluvnej medze pevnosti podľa rovnice [56]:

$$\bar{x} = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)}{n}, \quad (7)$$

kde \bar{x} je priemerná hodnota meranej záujmovej veličiny, n je počet vzoriek a x_i je meraná záujmová veličina [56].

V prípade uvedených hodnôt došlo zároveň k stanoveniu štandardnej smerodajnej odchýlky podľa rovnice [56]:

$$s_{n-1} = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2)}{(n-1)}}, \quad (8)$$

kde s_{n-1} je štandardná smerodajná odchýlka vzorky, n je počet vzoriek, x_i je meraná záujmová veličina a \bar{x} je priemerná hodnota meranej záujmovej veličiny [56].

Tab. 8 Štatistický rozbor mechanických vlastností vzoriek L1-L5

	E [GPa]	\bar{x} E [GPa]	s_{n-1} E [GPa]	R_m	\bar{x} R_m [GPa]	s_{n-1} R_m [GPa]	Typ porušenia
L1	23 924,358	24 924,358	± 567,123	408,657	406,350	± 8,687	XGM
L2	25 097,600			413,257			XGM
L3	25 063,620			391,170			XGM
L4	25 287,290			408,783			XGM
L5	25 248,940			409,881			XGM

6.3.5 ANALÝZA VÝSLEDKOV SKÚŠKY ŤAHOM (VZORKY V ORIENTÁCII 45°)

Zo získaných dát boli vytvorené zmluvné diagramy závislosti šmykového napätia na pomernom šmykovom pretvorení (viď. obr. 50). Pre výpočet jednotlivých smykových napätí slúži rovnica:

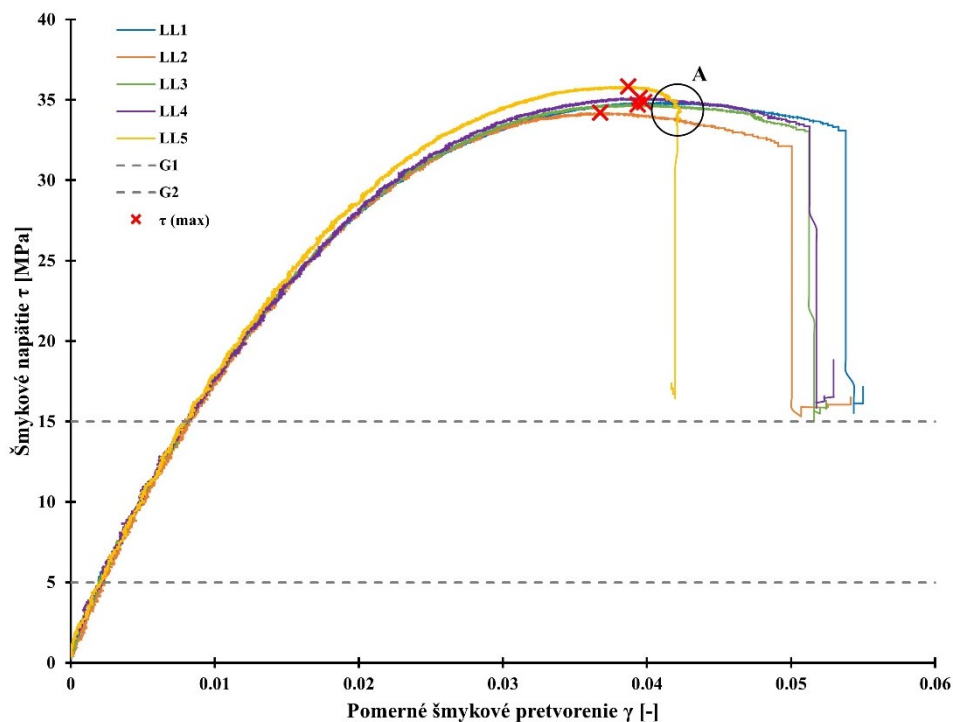
$$\tau = \frac{\sigma}{2}, \quad (9)$$

kde τ je hodnota šmykového napätia a σ je hodnota zmluvného napätia.

Pre výpočet šmykového pretvorenia slúži rovnica [56]:

$$\gamma = \varepsilon_x - \varepsilon_y = \frac{L_x - L_0}{L_0} - \frac{L_y - L_0}{L_0}, \quad (10)$$

kde γ je hodnota šmykového pretvorenia, ε_x je hodnota pomerného predĺženia v smere pôsobiaceho zaťaženia (axiálna deformácia), ε_y je hodnota pomerného skrátenia v smere kolmom na pôsobiace zaťaženie (pričná deformácia) [56], L_x je hodnota okamžitého predĺženia v smere zaťaženia, L_y je hodnota okamžitého skrátenia v smere kolmo na pôsobiace zaťaženie a L_0 je hodnota počiatkovej dĺžky a šírky skúšobnej vzorky.



Obr. 50 Graf ťahovej skúšky vzoriek LL1-LL v orientácii 45

Zároveň došlo k zaznamenaniu maximálnej hodnoty aplikovanej sily, na základe ktorej bola spočítaná medza pevnosti v šmyku podľa rovnice:

$$\tau_{max} = \frac{R_m}{2}, \quad (11)$$

kde τ_{max} je medza pevnosti v šmyku a R_m je hodnota zmluvnej medze pevnosti.

Modul pružnosti v šmyku bol vypočítaný obdobne ako v prípade rovnice č. 6. Popisovaná záujmová oblasť, bola definovaná zhodne pre všetky vzorky rovnakého zloženia a na grafoch je vyznačovaná ako oblasť G1 – G2 (viď. obr. 50). K výpočtu modulu pružnosti v šmyku slúži rovnica [56]:

$$G = \frac{\Delta\tau}{\Delta\gamma}, \quad (12)$$

kde G je modul pružnosti v šmyku, $\Delta\tau$ je hodnota rozdielu zmluvných šmykových napätí v lineárnej oblasti a $\Delta\gamma$ je hodnota rozdielu pomerného smykového pretvorenia vzorky v lineárnej oblasti [56].

VZORKY LL1-LL5

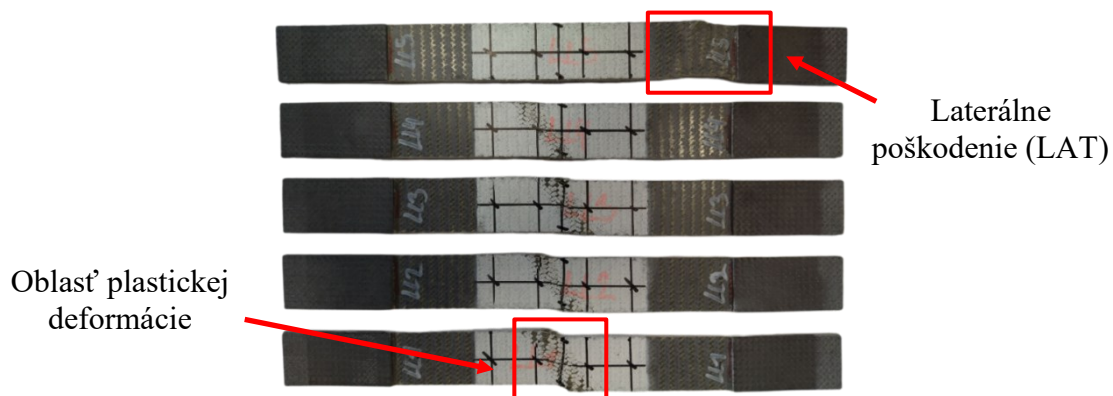
Na obr. 50 je predstavený graf aramidovej výstuže z twaronových vlákien v orientácii 45° (A220 g/m²). Grafy ako aj fotky pretrhnutých zvyšných vzoriek v orientácii 45° sú uvedené v prílohe č.5.

V rámci ťahovej skúšky vzoriek LL1 - LL4 dochádza k uhlovej plastickej deformácii v strede meranej oblasti (viď. obr. 50). V prípade vzorky LL5 dochádza po dosiahnutí medze pevnosti v šmyku ku laterálnemu poškodeniu nad meranou zónou v oblasti rozhrania vzorky a príložky (LAT) (viď. obr. 51). Dané poškodenie vedie k poklesu pomerného smykového pretvorenia

(uvedené ako detail A na obr. 50) a je spôsobené vzniknutou koncentráciou napätia v danej oblasti.

Priebeh skúšky a získané dáta sa vyznačujú veľmi nízkym smykovým napätím a značnou plastickou deformáciou, ktorá paradoxne nenastáva v celom objeme telesa (viď. obr. 51). Opätovne dochádza k viditeľnému rovnaniu vlákien, ktoré sú následne porušené vplyvom šmyku. V porovnaní so vzorkami L1 - L5 nedochádza k obdobnej degradácii matricového systému a pôsobiace zaťaženie je distribuované do osi vlákien a súčasne do matricového systému.

Vplyvom podpriemerného rozhrania vlákna a matrice z dôvodu krehkosti matricového systému ako aj rezistencie aramidových výstuží nenastalo plné roztrhnutiu predložených vzoriek. Zároveň nebolo možné určiť hodnotu inžinierskeho šmykového napätia na úrovni 5% šmykového napätia. Pri prekročení tejto hodnoty nastáva neprípustné natočenie vlákien a ich následný strih [56].



Obr. 51 Skúšobné telesá LL1-LL5 po ukončení pôsobiaceho zaťaženia

Dosiahnuté výsledky boli opätovne spracované za pomoci rovníc 7 a 8 (viď. tab. 9). Do štatistických hodnôt nebola započítaná vzorka LL5 z dôvodu neprípustného laterálneho poškodenia v oblasti príložky.

Tab. 9 Štatistický rozbor mechanických vlastností vzoriek LL1-LL5

	τ_{max} [MPa]	\bar{x} τ_{max} [MPa]	s_{n-1} τ_{max} [MPa]	G [MPa]	\bar{x} G [MPa]	s_{n-1} G [MPa]	Typ porušenia
LL1	34,854	34,732	$\pm 0,382$	1 637,920	1 641,155	$\pm 9,254$	AGM (2)
LL2	34,217			1 639,250			AGM (2)
LL3	34,727			1 633,010			AGM (2)
LL4	35,120			1 654,440			AGM (2)
LL5	35,846	-	-	1 710,290	-	-	LAT

6.3.6 DEFINOVANIE MATERIÁLOVÝCH CHARAKTERISTÍK

Na základe výsledkov skúšky ťahom boli dopočítané jednotlivé parametre mechanických vlastností použitých výstuží v kombinácii s použitým matricovým systémom. Pre symetrické

výstuže bol stanovený totožný modul pružnosti v ťahu pre priečny a pozdĺžny smer. V prípade jednosmernej tkaniny bol modul pružnosti v ťahu stanovený pre priečny a pozdĺžny smer na základe dvoch samostatných meraní.

ANALYTICKÝ VÝPOČET POISSONOVHO ČÍSLA

Hodnotu Poissonovho čísla nie je možné stanoviť na základe numerického výpočtu z dôvodu chýbajúceho priečného zúženia pri vzorkách v orientácii 0°. K absencii danej hodnoty dochádza vzhľadom na použitie video extenzometrov v porovnaní s lepenými tenzometrami, ktoré sa aplikujú na povrch vzorky. Numerické stanovenie Poissonovho čísla je možné určiť pre vzorky v orientácii 45°, avšak daný výsledok je zavádzajúci vzhľadom na príslušnosť k skladbe v orientácii 45° a hodnotu v oblasti $0,5 < \mu_{LT} > 1$.

Na základe zmienených dôvodov a s ohľadom na disponovanosť potrebných materiálových vlastností (viď. tab. 10 a tab. 11) bola hodnota Poissonovho čísla dopočítaná analytickým výpočtom s využitím zmiešavacieho pravidla podľa rovnice [57, 62]:

$$\mu_{LT} = \mu_f \cdot v_f + \mu_m \cdot v_m, \quad (13)$$

kde μ_{LT} je hodnota Poissonovho čísla v pozdĺžnom smere, μ_f a μ_m sú hodnoty Poissonovho čísla použitej matrice (index m) a výstuže (index f) a v neposlednom rade v_f a v_m sú hodnoty objemového podielu použitej matrice voči použitej výstuži [57, 62].

Tab. 10 Materiálové vlastnosti použitých výstuží [51, 58, 59, 60, 61]

Typ výstuže	Modul pružnosti v ťahu E_f [GPa]	Objemový podiel v [-]	Poissonovo číslo μ [-]
Kevlar 49, 127tex	112,4	0,56	0,360
Toray 3K, 200tex	230,0	0,56	0,198
SIGRATEX, 800tex	225,0	0,56	0,280
Tenax UTS50 12k, 800tex	245,0	0,56	0,285
Twaron, Dtex 1620	85,0	0,58	0,491

Objemový podiel vlákien voči matricovému systému Letoxit® Foil LFX 056 (viď. tab. 10) bol stanovený na základe objemových podielov bežne dodávaných presýtených tkanín a rovnice č.1, pre výpočet potrebného množstva matricového systému. Poissonovo číslo jednotlivých matricových systémov bolo určené ako priemerná hodnota konvenčne dodávaných epoxidových matricových systémov disponujúcich totožným modulom pružnosti v ťahu E_m .

Tab. 11 Materiálové vlastnosti použitých matricových systémov [51, 52]

Typ matrice	Modul pružnosti v ťahu E_m [GPa]	Objemový podiel v [-]	Poissonovo číslo μ [-]
Letoxit® Foil LFX 056	3,8	0,44	0,30
ER 88 FR	3,2	0,42	0,30

MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY ZVOLENÝCH ŠTRUKTÚR

V tab. 12 je uvedený prehľad získaných materiálových charakteristík jednotlivých prepregových a semipregových kompozícií. Hodnoty hrúbky jednotlivých materiálov boli získané z technických listov kompozitných vlákien použitých v danej väzbe. Plošná hmotnosť sýtených tkanín bola stanovená na základe získanej hodnoty po zväžení vzoriek.

Tab. 12 Mechanické parametre sýtených kompozitných výstuží

		A220	A170	CK170	CC245	UD CST 150	TeXtreme 160
E_L	[MPa]	24 924	23 451	34 538	51 118	66 436	76 581
E_T	[MPa]	24 924	23 451	34 538	51 118	5 690	76 581
G_{LT}	[MPa]	1 641	1 550	2 007	2 405	3 308	2 572
μ_{LT}	[-]	0,411	0,333	0,311	0,243	0,289	0,292
R_m	[MPa]	406	341	356	531	712	1 114
ρ	[kg/m ³]	1 320	1 375	1 455	1 535	1 545	1 545
m_p	[g/m ²]	420	324	375	476	277	185
t	[mm]	0,30	0,30	0,25	0,30	0,22	0,26

Namerané hodnoty je možné posudzovať ako hodnoty správne. Je však potrebné prihliadať na pomerne neobvykle nízku hodnotu modulu pružnosti v ťahu a v šmyku, predovšetkým v prípade jednosmernej tkaniny UD CST150.

Získané hodnoty modulu pružnosti v ťahu boli overené pomocou analytického výpočtu a údajov z tab. 10 a tab. 11 pomocou rovnice [62]:

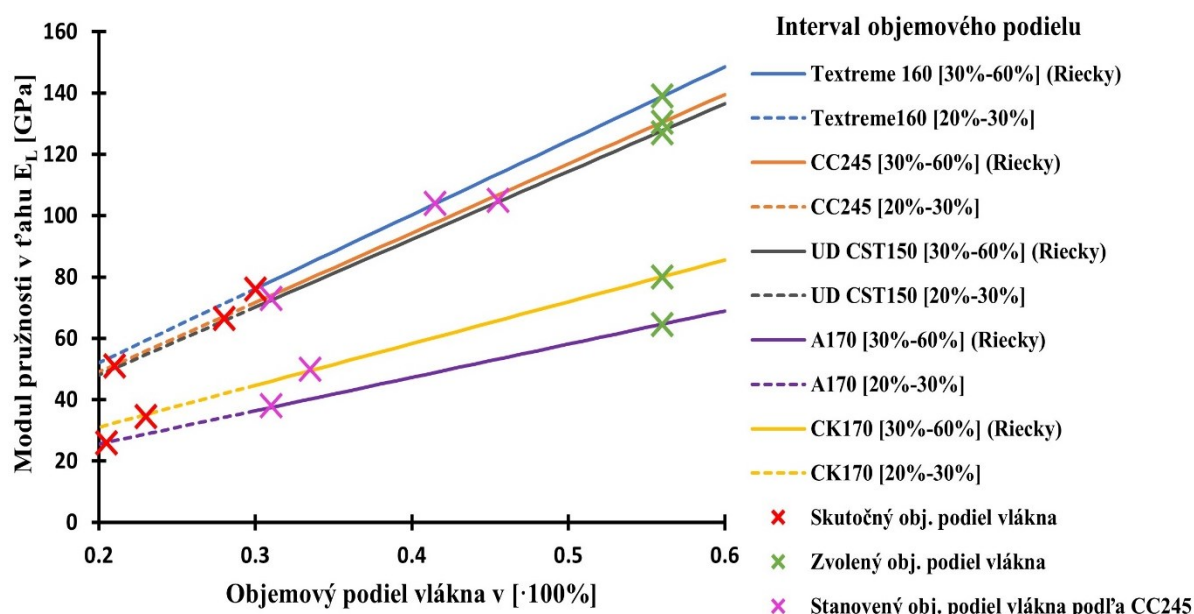
$$E_L = E_f \cdot v_f + E_m \cdot v_m, \quad (14)$$

kde E_m a E_f sú modulu pružnosti v ťahu uvažovaných výstuží (f) a matric (m) [62].

Z uskutočnených výpočtov bol zistený značný nesúlad medzi hodnotami nameranými a analyticky vypočítanými. V rámci spätného overenia vstupných parametrov došlo k zisteniu rozporu medzi plošnou hodnotou uvádzanou v jednotlivých materiálových listoch použitého matricového systému. Na základe tejto hodnoty bol následne chybné stanovený objemový pomer výstuží voči matrici.

S ohľadom na zistené diametrálne odlišné hodnoty, bol vytvorený graf modulu pružnosti v ťahu voči zmene objemového podielu (viď. obr. 52) v dvoch samostatných intervaloch. Interval objemového podielu 30 % - 60 % platí pre štandardné sýtenie laminátov, pričom je maximálna hodnota stanovená na úrovni 60 %, z dôvodu poklesu kvalitatívnych vlastností laminátu po prekročení tejto hodnoty. Interval 20 % - 30 % platí pre nadpriemerne (nežiaduco) sýtené lamináty tak ako je to v prípade uvedených testovacích vzoriek [63].

Z daného diagramu je rozpoznateľný značný nárast modulu pružnosti v prípade všetkých výstuží sýtených matricovému systému Letoxit® Foil LFX 056. Tieto hodnoty sú v grafe označené zeleným krížikom a predstavujú zvolený objemový podiel, ktorý mal byť dosiahnutý. Hodnotu zvoleného objemového podielu je však nutné znížiť z dôvodu uvažovania dokonalej adhézie na rozhraní matrice a výstuže, ako aj uvažovaného totožného pozdĺžneho pretvorenia.



Obr. 52 Graf modulu pružnosti v ťahu a objemového pretvorenia homogénizovaných laminátov

Z tohto dôvodu došlo k opätovnému otestovaniu vybranej tkaniny CC245, so správne stanoveným objemovým podielom. Z výsledkov (viď. tab. 13) je evidentný 42,8 % nárast modulu pružnosti v ťahu, ako aj nárast zvyšných hodnôt. Na základe uvedených zistení a z využitím databázy obsahujúcej merania z predošlých sezón došlo k navýšeniu získaných hodnôt uhlíkových a hybridných tkanín o 45 %, k navýšeniu hodnôt aramidových tkanín o 38 % a navýšeniu hodnôt jednosmernej tkaniny UD CST 150 o 55 %.

Tab. 13 Mechanické parametre sýtenej kompozitnej výstuže CC245 - meranie č.2

	$E_L = E_T$	G_{LT}	μ_{LT}	R_m	ρ	m_p	t
	[MPa]	[MPa]	[-]	[MPa]	[kg/m ³]	[g/m ²]	[mm]
CC245	73 013	4 549	0,243	775	1 535	426	0,30

6.4 VOLBA JADRA

Pre výrobu kompozitného battery packu boli zvolené jadrá od spoločnosti Plascore®, ktorými tím TU Brno Racing disponuje od sezóny 2020 / 2021. Hliníkové voštiny sú vyrobené z hliníkovej zliatiny 5056 a ich povrch je opatrený ochranným chrómovým povlakom zabraňujúcim ich korózii. Aramidová voština PN-1 je vyrobená z meta-aramidového papiera a jej povrch je opatrený ochranným potahom z fenolovej živice [64, 65]. Para-aramidová voština Gilcore® HK-1/8-4.0 od spoločnosti The Gill Corporation bola zakúpená v sezóne

2018 / 2019 a je opatrená obdobným ochranným fenolovým povlakom ako aramidová voština PN-1. Vlastnosti použitých jadier sú uvedené vid'. tab. 14.

Tab. 14 Vlastnosti hliníkových a aramidových voštín [64, 65, 66]

	Veľkosť bunky [mm]	Hrúbka h [mm]	Hustota ρ [$g \cdot cm^{-3}$]	Pevnosť v tlaku [MPa]	Pevnosť v šmyku L [MPa]	Pevnosť v šmyku W [MPa]	Značenie
PAMG-XR1 5056	3,2	5	50	2,41	1,95	1,01	XR1
PN-1	3,2	5	48	1,88	1,22	0,62	PN-1
HK-1/8-4.0	3,2	5	64	3,98	2,49	1,42	HK

7 NÁVRH KOMPOZITNÝCH ŠTRUKTÚR

Kompozitné štruktúry battery packu eD2 boli navrhované s využitím softvéru Ansys Workbench s modulom ACP a pomocou analytických výpočtov v rámci klasickej teórie laminátov, pri súčasnom naplnení náležitostí pravidiel Formuly Student. Pri dimenzovaní jednotlivých skladieb dochádza k využitiu materiálových charakteristík uvedených v kapitole 6.3.6.

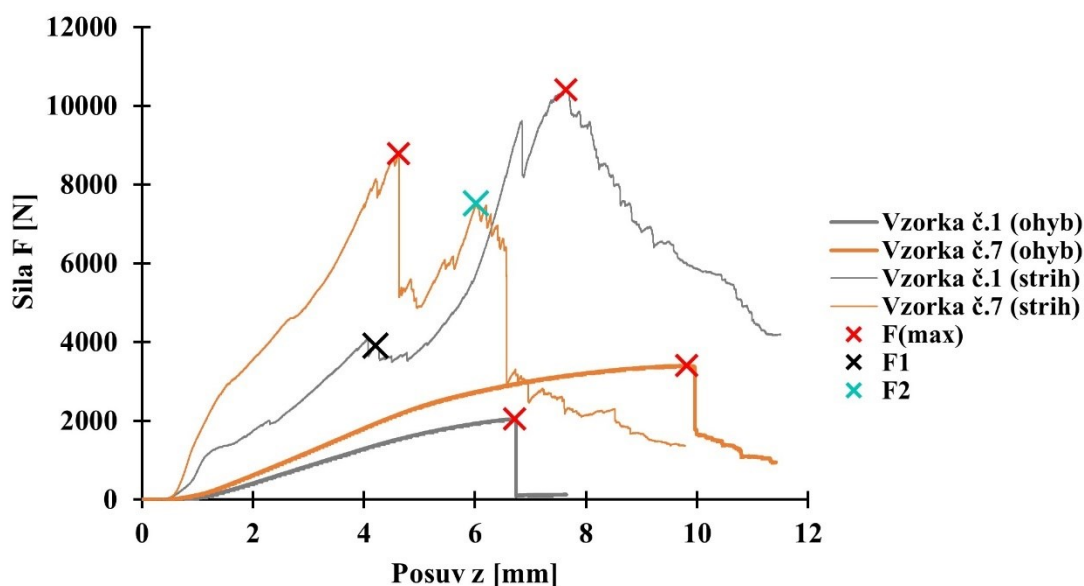
Z predložených kompozitných materiálov bola na základe získaných dát vyradená uhlíková plochá tkanina TeXtreme. K vyradeniu zmienenej výstuže došlo na základe cenovej a výkonnostnej bilancie použitých výstuží s ohľadom na sériovú výrobu. V porovnaní so štandardnými tkaninami je popisovaná výstuž 2,5 – 6 krát drahšia a zároveň nie je vhodná pre výrobu komplexne tvarovaných produktov.

7.1 VPLYV GALVANICKEJ KORÓZIE NA VÝSLEDNÉ VLASTNOSTI ŠTRUKTÚRY

V prípade kompozície, ktorej súčasťou sú uhlíkové vlákna a hliníková voština, dochádza k vzniku galvanickej korózie (uvedené v kapitole 4.3.2), ktorá priamo, ale aj nepriamo vplyva na výsledné vlastnosti kompozitnej štruktúry. Nepriamy vplyv galvanickej korózie zahŕňa implikovanie izolačnej vrstvy. Najčastejšie sa jedná o výstuže aramidové a sklené, prípadne o ich kombináciu.

Pri skúške trojbodovým ohybom je sila aplikovaná na vonkajší poťah kompozitnej štruktúry testovacieho panelu. Tento poťah je následne vystavený tlakovému pôsobeniu na rozdiel od poťahu vnútorného, ktorý je vystavený pôsobeniu ťahom. Jednotlivé nosné vrstvy poťahu je preto nutné dimenzovať s ohľadom na silové pôsobenie a prednostné vlastnosti použitých materiálov.

Na základe zmienených skutočností bola do kompozície zahrnutá sklená výstuž o hmotnosti 200 g/m² v konfigurácii Twill. Uvedená výstuž nahradila aramidovú výstuž A170 vo vonkajšom poťahu z dôvodu vyššej pevnosti v tlaku, ktorá v prípade aramidového dosahuje približne len 1/10 pevnosti v ťahu.

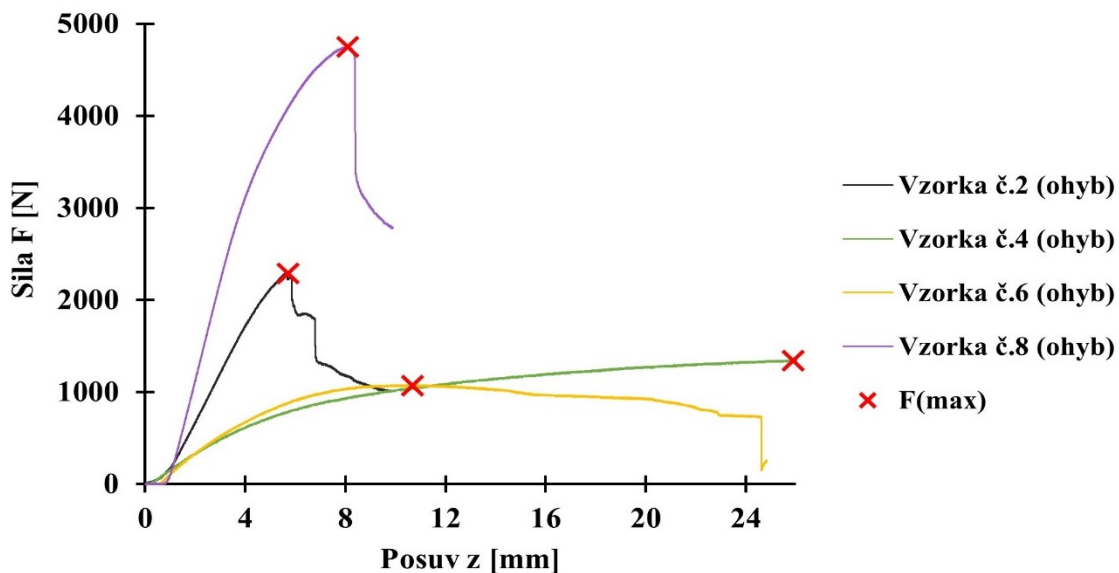


Obr. 53 Graf skúšky trojbodového ohybu a strihu pre vzorky č. 1 a č. 7

Z dôvodu optimalizácie vonkajšej skladby č.1 na skladbu č.7 bolo uskutočnené overenie popisovaných stavov pomocou skúšky trojbodovým ohybom a skúšky strihom (vid'. obr. 53). Zmienená úprava spôsobila nárast hmotnosti panelu o 4,89 % a nárast maximálnej aplikovanej sily v prípade skúšky trojbodovým ohybom o 37,62 %. Zároveň však došlo k poklesu rázovej odolnosti kompozitnej štruktúry a poklesu maximálnej aplikovanej sily v prípade skúšky šmykom o 16,53 %. Tento pokles je spôsobený strihom vonkajšieho poťahu a následným strihom poťahu vnútorného v krátkom časovom slede. V prípade vzorky č. 1 dochádza k významnej rezistencii vonkajšieho poťahu, ktorá ma za následok stlačenie voštiny, porušenie adhézných väzieb a následný paralelný strih oboch poťahov.

Na základe predložených výsledkov došlo v prípade použitia hliníkovej voštiny v kompozitnej štruktúre k nahradeniu stávajúcej aramidovej výstuže vo vonkajšom poťahu za výstuž sklenú (označenie v skladbe G 200). Materiálové vlastnosti sklenej výstuže boli stanovené na základe materiálových listov.

Vplyvu galvanickej korózie je možné predísť použitím PVC a PMI pien. Tieto izotropné materiály sa vyznačujú dobrou pevnosťou v tlaku a v istých smeroch aplikácie nahrádzajú a prevyšujú voštinové jadrá (uvedené v kapitole 4.3.1). Ich hlavnou nevýhodou v prípade štruktúrnej aplikácie namáhanej ohybom je nízka odozva na pôsobiace zaťaženia. Pri identickej skladbe použitých poťahov pre hliníkovú voštinu (vzorka č.2 a č.8) a PMI jadro (vzorka č.4 a č.6) je tak možné zaznamenať v prípade uhlíkového poťahu a PMI peny (vzorka č.4) až 247 % pokles maximálnej hodnoty zaťažujúcej sily a v prípade aramidového poťahu a PMI peny (vzorka č.6) 104 % pokles maximálnej hodnoty zaťažujúcej sily (vid'. obr. 54). Z dôvodu nadobudnutia maximálnych parametrov kompozitných panelov boli následne ako jadrá použité iba hliníkové a aramidové typy voštín.

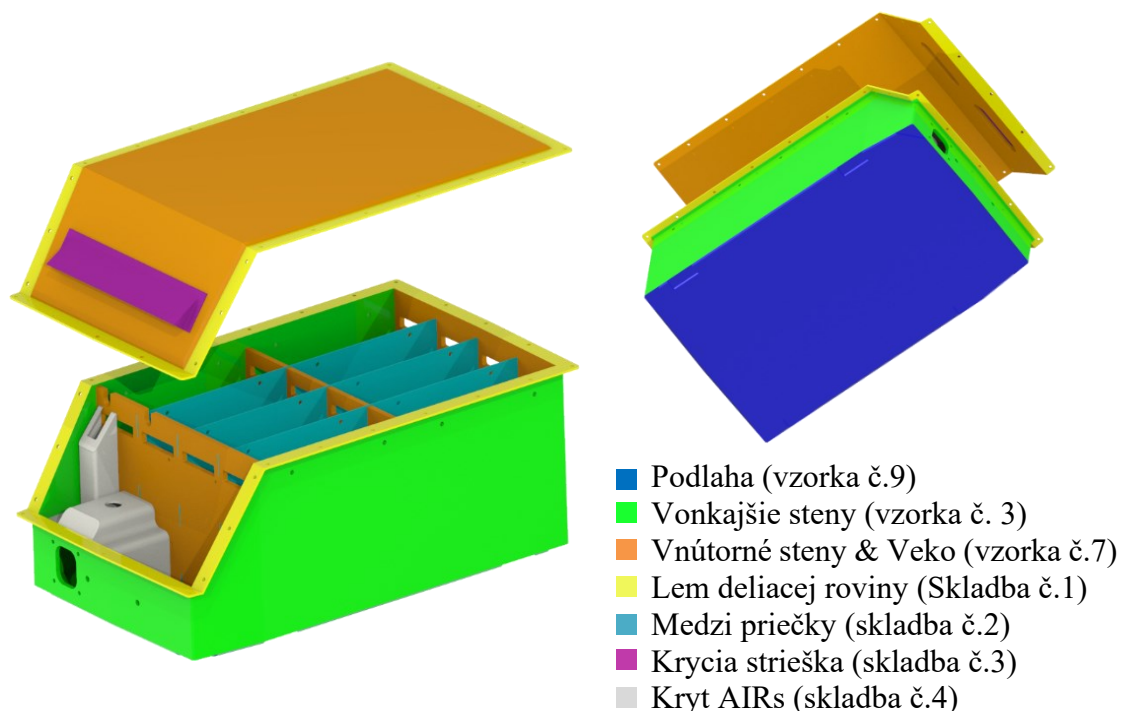


Obr. 54 Graf skúšky trojbodového ohybu pre vzorky s penovým a voštinovým jadrom

7.2 NÁVRH KOMPOZITNEJ SKLADBY

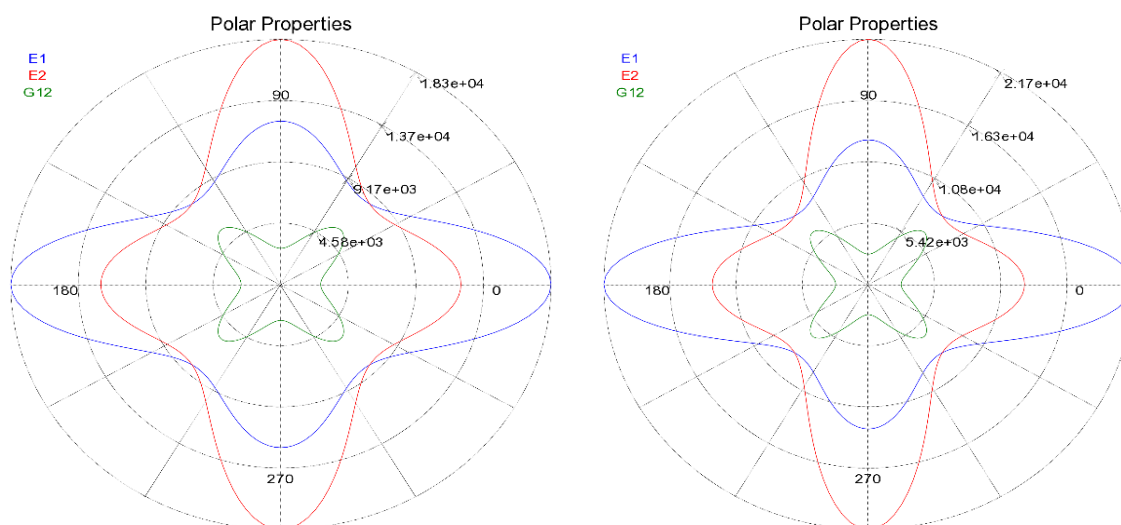
Kompozitná skladba bola navrhnutá obdobne ako v prípade monopostov Formuly 1 a Formuly E. Povrch obálky battery packu tvorí izolačná vrstva z aramidových vlákien, ktorá je nasledovaná uhlíkovými vláknami v rozličných variáciách a následnej sekundárnej izolačnej vrstve, ktorá je implementovaná v prípade použitia hliníkových voštín.

Celková kompozícia je rozčlenená na oblasti, ktoré majú priradenú individuálnu kompozitnú štruktúru/skladbu (viď. obr. 55). Rozčlenenie štruktúr vyplýva zo samotného konštrukčného riešenia, pôsobiaceho zaťaženia a adekvátnych mechanických vlastností, ktoré by nadobudol obdobný battery pack z preddefinovanej zliatiny oceli.



Obr. 55 Rozčlenenie štruktúr battery packu eD2

Individuálne návrhy štruktúr sú následne vyhodnotené v module Ansys ACP. Dôraz je predovšetkým kladený na maximálnu možnú redukciu výslednej hmotnosti panelu pri nadobudnutí minimálnej požadovanej bezpečnosti a výsledných hodnôt modulov pružnosti v pozdĺžnom a priečnom smere, ako aj hodnoty smykového modulu štruktúry (viď. obr. 56).



Obr. 56 Moduly pružnosti a šmykový modul, zľava vzorka č.3 a vzorka č.7

Vo všetkých uvažovaných prípadoch nastal vplyvom pôsobiaceho zaťaženia stav označený kritériom CF (core failure), ktorý predstavuje zlyhanie kompozitnej štruktúry na základe indikovaného zlyhania jadra (voštiny). Daný stav je prezentovaný na vzorke č.7 na obr. 57 a bol porovnaný s analytickým výpočtom maximálneho šmykového napätia v použiteľnom jadre (pre pozdĺžny smer L podľa parametrov uvedených v tab. 15) voči šmykovej pevnosti uvažovaného jadra podľa rovnice:

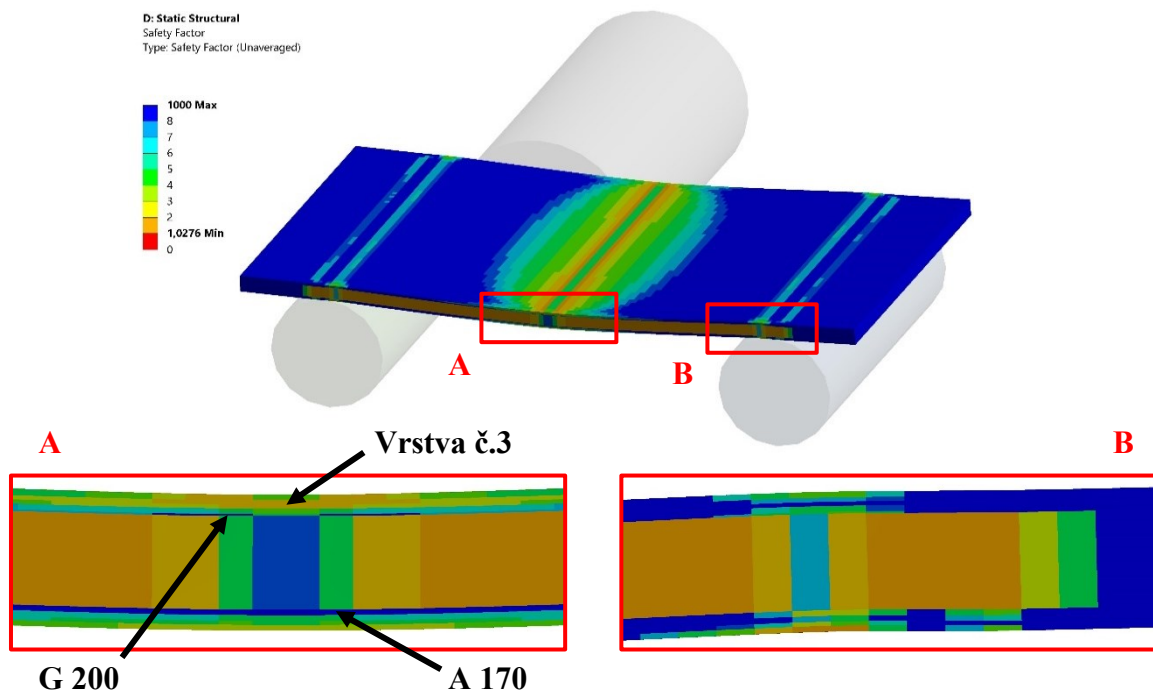
$$\tau_c > \tau_{c(max)} = \frac{F_{(max)}}{2 \cdot d \cdot b}, \quad (15)$$

kde τ_c je šmyková pevnosť jadra, $\tau_{c(max)}$ je maximálne šmykové napätie v jadre, $F_{(max)}$ je maximálna aplikovaná sila, d je efektívna výška štruktúry a b je šírka skúšobného panelu [67].

Tab. 15 Parametre efektívnej výšky panelu a maximálnej aplikovanej sily jednotlivých štruktúr

	d [mm]	τ_c [MPa]	$F_{(max)}$ [N]
Vzorka č.3	6,095	1,22	2230,77
Vzorka č.7	6,280	1,95	3673,80
Vzorka č.9	6,940	2,49	4960,08

Zároveň bolo možné zaznamenať počiatočné porušenie vrstvy č.3 (viď. detail obr. 57). Po navýšení aplikovanej sily nastáva v prípade vrstvy č.3 stav označený ako slc(3) (stress in direction 1, compression, ply 3), ktorý predstavuje pôsobenie nadmerného napätia a zlyhanie tretej vrstvy poťahu vplyvom nadmerného namáhania na tlak. Veľmi priaznivé výsledky naopak dosahujú vrstvy v kontakte s jadrom, a to konkrétne vrstvy G 200 namáhaná tlakom a vrstvy A 170 namáhaná ťahom, u ktorej nedochádza k výraznému prejavu pôsobiaceho zaťaženia.



Obr. 57 Simulácia bezpečnosti trojbodového ohybu vzorky č.7

Výsledný lay-up (uvedené v tab. 16 a tab. 17) kompozitných skladieb bol významne ovplyvnení nízkymi parametrami použitých voštín PN-1 a PAMG-XR1 5056, ktoré boli k dispozícii v rámci tímu TU Brno Racing. Dosiagnuté hodnoty zo simulácie boli v prípade použitia odolnejšej voštiny (para-aramidová voština HK-1/8-4.0, ktorá prekonáva parametre hliníkovej voštiny PAMG-XR1 5056) násobne vyššie a súčasne tak došlo k maximálnemu využitiu potenciálu dimenzovanej skladby. Dispozícia danej voštiny bola žiaľ v čase písania tejto bakalárskej práce obmedzená, a preto došlo ku jej použitiu iba v prípade štruktúry podlahy battery packu, ktorá vyžaduje vyššie parametre než iné štruktúry.

Tab. 16 Výsledný lay-up skladieb jednotlivých štruktúr battery packu eD2

Štr.	Vonkajšia skladba	t_1 [mm]	Jadro	Vnútoraná skladba	t_2 [mm]
	A 170 [45] ₁ , UD 150 [0] ₂ , *, CC 245 [0] ₃ , A 170 [45] ₁	1,94	PN-1	A 170 [45] ₁ , CC 245 [0] ₃ , *, UD 150 [0] ₂ , A 170 [45] ₁	1,94
	A 170 [45] ₁ , UD 150 [0] ₂ , *, CC 245 [0] ₁ , G 200 [45] ₁	1,14	XR1	A 170 [45] ₁ , CC 245 [0] ₁ , *, UD 150 [0] ₂ , A 170 [0] ₁	1,34
	A 170 [0] ₁ , UD 150 [0] ₁ , *, CC 245 [0] ₁ , *, CC 245 [45] ₁	1,12	HK	CK 170 [45] ₁ , CC 245 [0] ₁ , *, UD 150 [0] ₁ , A 170 [0] ₁	1,07

Do výsledného lay-upu bola zahrnutá medená sieťka (viď tab. 16 symbol *), ktorá bola umiestnená medzi každé dve individuálne karbónové a hybridné výstuže. Náplňou pridanej vrstvy je zníženie výsledného odporu štruktúry, ktorá by sa mohla stať elektricky vodivou v prípade poškodenia (napr. narušenie celistvosti izolačnej aramidovej vrstvy). Výsledný odpor nesmie presiahnuť hranicu 5 Ω na základe pravidla EV 3.1.2.

Tab. 17 Výsledný lay-up vnútorných vertikálnych medzi priečok, lemu a krytu AIRs battery packu eD2

Laminát	Skladba
	A 170 [0] ₂ , A 170 [45] ₃ , A 170 [0] ₂
	A 170 [0] ₃ , A 170 [45] ₄ , A 170 [0] ₃
	A 170 [0] ₁ , G 200 [0] ₁ , G 200 [45] ₁ , A 170 [0] ₁
	G 200 [0] ₁ , G 200 [45] ₁ , G 200 [0] ₁

7.3 STANOVENIE MAXIMÁLNEHO HMOTNOSTNÉHO OBJEMU (T3.4.3)

Návrh individuálnych poťahov významne ovplyvňuje pravidlo T3.4.3, ktoré zabráňuje použitiu poťahov s usporiadaním vlákien v jednom smere. Aplikovaním zmieneneho pravidla dochádza k prevencii pred návrhom jednotlivých konfigurácií poťahov, ktoré sú navrhované iba pre potreby mechanického testovania a zníženia výslednej hmotnosti dielu na úkor bezpečnosti. Preukázanie naplnenia pravidla T3.4.3 je uvedené v prílohe č.6.

8 MECHANICKÉ SKÚŠKY

Údaje z jednotlivých mechanických testovanií určených pre výrobu kompozitného battery packu sú porovnané k ekvivalentnému battery packu z preddefinovanej zliatiny oceli, ktorej vlastnosti sú v tab. 18. Hrúbka ekvivalentných oceľových stien je stanovená na základe minimálnych parametrov uvedených v pravidle EV 5.5.4. Minimálne rozmerové požiadavky skúšobných panelov, ako aj parametre prípravkov sú popísané v kapitole 2.2.2. Testovanie bolo uskutočnené na zariadení LabTest 6.500SP1-VM s obdobnou rýchlosťou posuvu ako v prípade ťahovej skúšky (viď. kapitola 6.3.2).

Tab. 18 Mechanické vlastnosti preddefinovanej oceli podľa dokumentu SES [22]

Veličina	Hodnota
E [GPa]	200
R_e [MPa]	305
R_m [MPa]	365
τ [MPa]	219

Smernica lineárnej oblasti dát z testovania kompozitných dielov battery packu je rovnako, ako v prípade testovania kompozitných dielov monokoku, upravená pomocou korekčného faktoru rig compliance (EI). Výsledný rozdiel, medzi nameranými a teoretickými hodnotami tuhosti testovacieho telesa (oceľovej trubky danej pravidlami), pozmeňuje hodnotu gradientu, čím dochádza k upresneniu hodnoty modulu pružnosti. Určenie korekcie je definované v pravidle T 3.4.1. Súčasne je dané stanovenie označené ako „voliteľné“ v dokumente SES. Na základe uvedenej voliteľnosti a z dôvodu nulovej interferencie s výslednými výpočtami preukazujúcich bezpečnosti, nebola daná korekcia stanovená (v rámci výpočtu je tento stav definovaný ako nulová korekcia z dôvodu vyššej ohybovej tuhosti testovacieho telesa).

V rámci výpočtov v dokumente SES je nutné uvádzať rozmerové hodnoty jednotlivých stien battery packu (viď. tab. 19). Tieto rozmerové hodnoty spôsobujú rast výsledného momentu zotrvačnosti ako nárast výslednej hodnoty v prípade výpočtu maximálneho dovoleného zaťaženia panelu. Konečný vplyv pri výpočte bezpečnosti jednotlivých panelov nenastáva z dôvodu obdobjných rozmerov v prípade ekvivalentných oceľových plechov voči uvažovaným štruktúram.

Tab. 19 Rozmery battery packu eD2

Rozmer	Hodnota
Šírka panelu podlahy [mm]	450
Výška vonkajších vertikálnych stien [mm]	239
Výška vnútorných vertikálnych stien [mm]	216
Šírka veľa battery packu [mm]	385

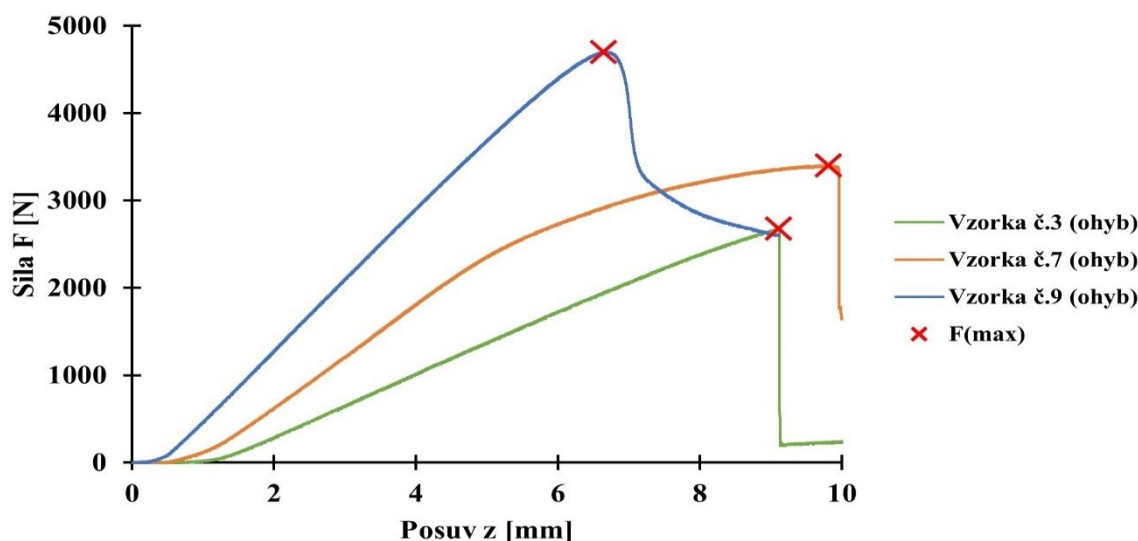
Na základe pravidla EV 5.5.7 je nutné preukázať oddelenie jednotlivých segmentov pomocou vnútorných vertikálnych stien o výške, ktorá činí minimálne 75 % výšky vonkajších

vertikálnych stien. Z údajov v Tab. 19 je zrejme že došlo k naplneniu uvedeného pravidla a výška vnútorných vertikálnych stien dosahuje 90,4 % výšky vonkajších vertikálnych stien.

8.1 SKÚŠKA TROJBODOVÝM OHYBOM

Pri skúške trojbodovým ohybom nastáva trvalé poškodenie skúšobného telesa vplyvom distribúcie pôsobiaceho zaťaženia v okolí neutrálnej osy. Vplyv dimenzovania poťahu na odolnosť voči pôsobiacemu zaťaženiu, ako aj vplyv jednotlivých výstuží na výslednú tuhosť panelu, je popísaný v kapitole 7.1. Stanovenie šmykovej pevnosti jadra je uvedené v kapitole 7.2.

Zo závislosti silového pôsobenia a posuvu v smere pôsobiacej sily bol zostavený výsledný diagram (viď. obr. 58). Získané hodnoty viedli k následnému vypočítaná medza pevnosti a modulu pružnosti, ktoré boli v ďalšom kroku zahrnuté do výpočtu bezpečnosti jednotlivých panelov.



Obr. 58 Diagram trojbodovej ohybovej skúšky kompozitných panelov č.3, č.7 a č.9

Pre potreby stanovenia medze pevnosti a modulu pružnosti panelu je potrebné určiť hodnotu momentu zotrvačnosti a gradientu kompozitnej štruktúry. Tieto hodnoty slúžia k preukázaniu príslušnej ekvivalencie v dokumente SES. Výpočet momentu zotrvačnosti je stanovený na základe rozmerov panelov a ich poťahov podľa rovnice:

$$I_{(kompozit)} = \frac{h \cdot [(b + t_1 + t_2)^3 - b^3]}{12}, \quad (16)$$

kde $I_{(kompozit)}$ je hodnota momentu zotrvačnosti kompozitnej štruktúry, h je šírka skúšobného panelu, b je hrúbka jadra, t_1 je hrúbka vnútornej vrstvy poťahu a t_2 je hrúbka vonkajšej vrstvy poťahu.

Hodnota gradientu je stanovená na lineárnej oblasti grafu nameraných dát, bez korekcie pomocou rig compliance, na základe rovnice:

$$\text{Gradient}_{(kompozit)} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \quad (17)$$

kde y_1 a y_2 sú hodnoty minimálnej a maximálnej sily v lineárno-elastickej oblasti grafu a x_1 a x_2 sú hodnoty posuvu pri danej sile v smere pôsobiacej sily.

Stanovenie hodnoty modulu pružnosti kompozitného panelu je tak určené na základe rovnice:

$$E = \frac{\text{Gradient}_{(\text{kompozit})} \cdot l^3}{48 \cdot I_{(\text{kompozit})}}, \quad (18)$$

kde E je modul pružnosti a l je vzdialenosť medzi osami podperných telies.

Výsledná hodnota medze pevnosti v ohybe bola stanovená na základe rovnice:

$$\sigma_{UTS(\text{kompozit})} = \frac{F_{(\text{max}(\text{kompozit}))} \cdot l \cdot 0,5 \cdot (b+t_1+t_2)}{4 \cdot I_{(\text{kompozit})}}, \quad (19)$$

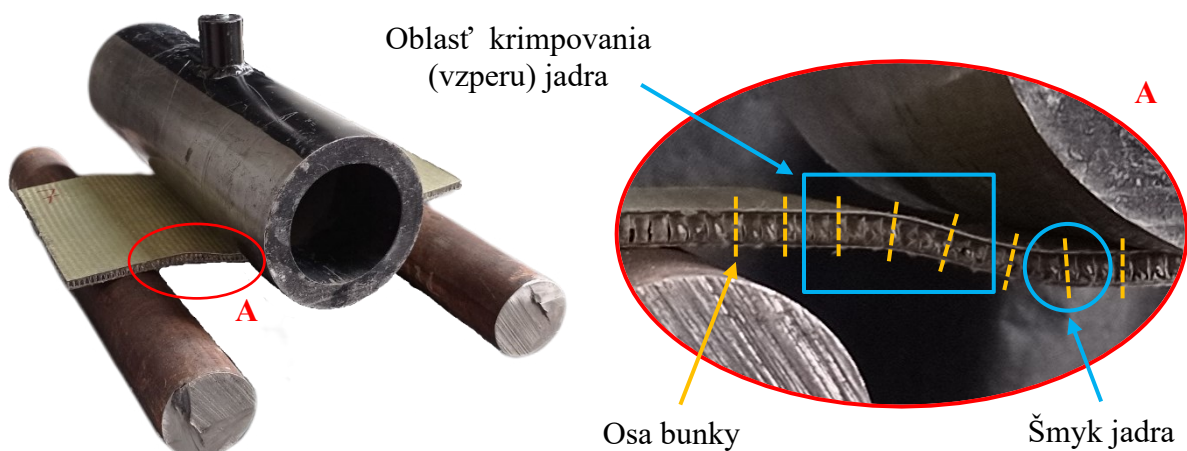
kde $\sigma_{UTS(\text{kompozit})}$ je medza pevnosti v ohybe skúšobného panelu [22].

Z vypočítaných a nameraných dát (viď. tab. 20) je možné vidieť, že vzorka č. 3 a vzorka č.7 zlyhali v tesnej blízkosti analyticky stanovenej hodnoty maximálneho šmykového napätia v jadre (viď. tab. 15). V prípade vzorky č.9 bola táto hodnota presiahnutá o 239,92 N, čo tvorí nárast o 5,38 %. Dané prekročenie kritickej hodnoty, môže byť spôsobené nepatrne vyšším objemovým podielom matrice, ktorá pri procese vytvrdzovania vytvorila povlak na stenách buniek, čím došlo k navýšeniu šmykovej pevnosti jadra.

Tab. 20 Výsledné dáta z trojbodovej skúšky ohybom

	$Z_{(\text{max}(\text{kompozit}))}$ [mm]	$F_{(\text{max}(\text{kompozit}))}$ [N]	$I_{(\text{kompozit})}$ [mm ⁴]	E [GPa]	$\sigma_{(\text{max}(\text{kompozit}))}$ [MPa]
Vzorka č.3	9,11	2680,00	3084	19,35	156,22
Vzorka č.7	9,81	3403,50	3669	27,30	173,47
Vzorka č.9	6,64	4700,00	7190	18,87	145,11

Na obr. 59 je prezentované porušenie vzorky č. 7, počas skúšky trojbodovým ohybom v oblasti medzi aplikátorom a podperou pri dosahovaní predikovanej kritickej hodnoty. Tento obdobný stav bol zaznamenaný aj v prípade simulácie trojbodového ohybu (viď. obr. 57). V rámci priebehu skúšky nastal vzper jadra a následný šmyk jadra vo vyznačených oblastiach.



Obr. 59 Porušenie skúšobného panelu č. 7 pri skúške trojbodovým ohybom

Pre výpočet ekvivalentnej hodnoty maximálneho dovoleného zaťaženia ocelového plechu je využitá rovnica:

$$F_{(dovolené (ocel))} = R_{m(ocel)} \cdot S_{(ocel)}, \quad (20)$$

kde $R_{m(ocel)}$ je medza pevnosti ocele a $S_{(ocel)}$ je plocha prierezu ocelového plechu.

Hodnota maximálneho dovoleného zaťaženia kompozitnej štruktúry je získaná obdobne ako v prípade ekvivalentného ocelového plechu:

$$F_{(\max (kompozit))} = \sigma_{(\max (kompozit))} \cdot S_{(kompozit)}, \quad (21)$$

kde $\sigma_{(\max (kompozit))}$ je hodnota maximálnej medze pevnosti v ohybe a $S_{(kompozit)}$ je plocha prierezu potáhov.

Výsledná bezpečnosť je stanovená ako pomer maximálneho zaťaženia kompozitného panelu a dovolenému zaťaženiu ekvivalentného ocelového plechu podľa rovnice [22]:

$$k_{(\min)} = \frac{F_{(\max (kompozit))}}{F_{(dovolené (ocel))}}, \quad (22)$$

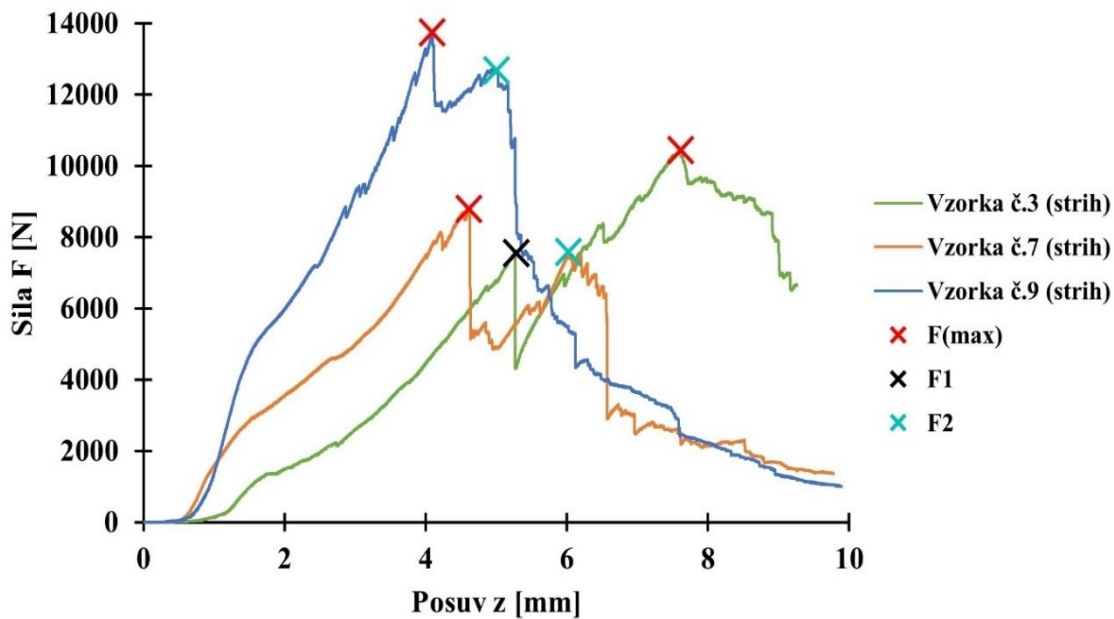
Najnižšiu bezpečnosť z testovacích štruktúr vykazovala vzorka č.3. Táto hodnota zároveň odpovedala výslednej hodnote bezpečnosti zo simulácie v prostredí Ansys Wokbench pri identickom zaťažení simulovaného vzorku (vid'. tab. 21). V prípade bezpečnosti pri vzorke č.7 je zreteľný nárast výslednej hodnoty o 27,18 %. Nízka hodnota bezpečnosti u vzorky č.7 je spôsobená vyšším podielom aramidovej výstuže v kompozitnej skladbe. Tento zvýšení percentuálny podiel výstuže vedie k náchylnosti vnútornej skladby na zvýšené tlakové pôsobenie, ktoré nastáva v dotykovej ploche medzi panelom a podperou. Vzniknutý stav popisuje výsledná krivka na obr. 58, ktorá nedisponuje výraznou lineárnou oblasťou tak, ako je tomu v prípade vzoriek č.3 a č.9. Rozdiel medzi meranými a simulovanými hodnotami je zároveň spôsobený nízkym počtom testovaných vzorkou, ako aj nepresnosťou danej simulácie z dôvodu úpravy vstupných parametrov, ktoré boli získané zo statickej skúšky ťahom.

Tab. 21 Koefficienty bezpečnosť štruktúr battery packu eD2

	Vzorka č.3	Vzorka č.7	Vzorka č.9
$k_{(\min-ANSYS)} [-]$	1,00	1,03	1,11
$k_{(\min-vzorok)} [-]$	1,04	1,31	1,23

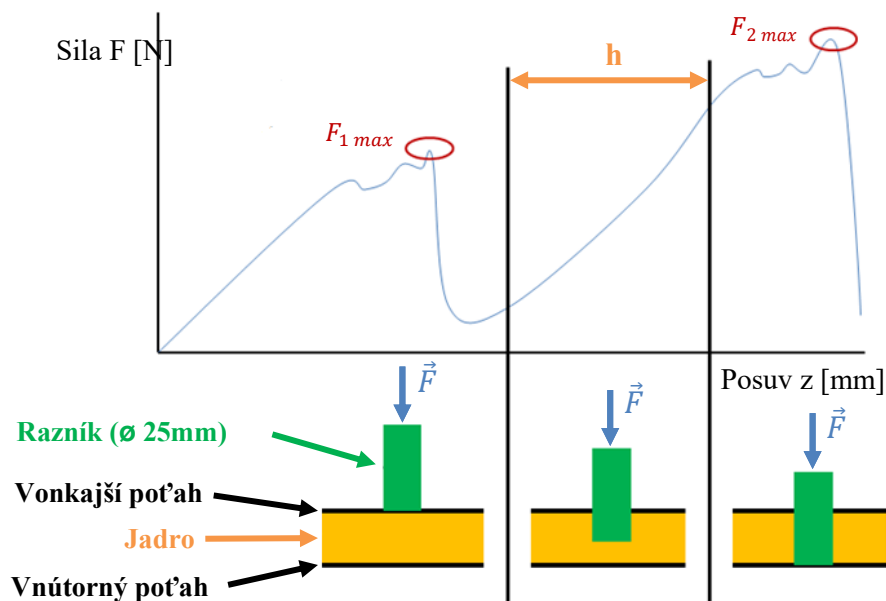
8.2 SKÚŠKA STRIHOM

Druhou skúškou preukazujúcou ekvivalenciu kompozitnej štruktúry voči ocelovému plechu je skúška strihom. Priebeh skúšky je bližšie popísaný v kapitole 2.2.1. Rýchlosť posuvu ako aj parametre skúšobného zariadenia sú popísané v kapitole 6.3.2. Získaný pracovný diagram jednotlivých štruktúr popisujúci priebeh aplikovanej sily a pretlačenia vzorky je uvedený na obr. 61.

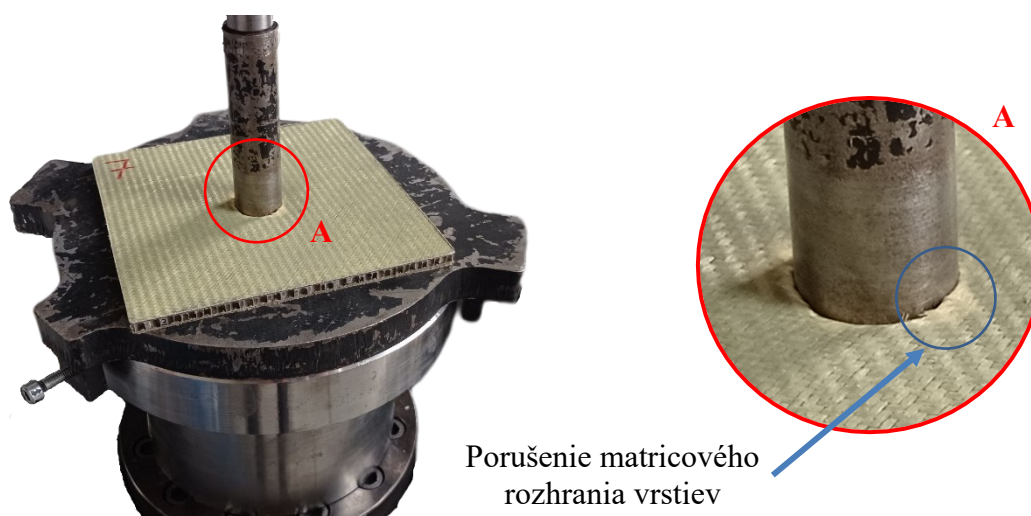


Obr. 61 Diagram skúšky strihom kompozitných panelov č.3, č.7 a č.9

Na diagrame skúšky strihom je viditeľný značný nesúlad medzi teoretickým priebehom skúšky (viď. obr. 60) a maximálnou dosiahnutou silou pri strihu jednotlivých poťahov (viď. obr. 61). Z uvedených záznamov meraní vyplýva, že samotnému strihu vonkajšej vrstvy poťahu predchádzalo pretlačenie jadra a následný strih oboch poťahov v krátkom časovom horizonte. Tento jav je výrazný pri vzorke č.9, kedy medzi jednotlivými poťahmi nastal posuv o hodnote $\frac{1}{4}$ hrúbky „h“ použitej voštiny (viď. obr. 61). Spätným odpružením vonkajšieho poťahu vzniklo lokálne porušenie matricového systému na rozhraní izolačnej vrstvy a zvyšných vrstiev poťahu (viď. obr. 62).



Obr. 60 Teoretický priebeh skúšky strihom [22, upravené]



Porušenie matricového rozhrania vrstiev

Obr. 62 Porušenie skúšobného panelu č. 7 pri skúške strihom

Výpočet maximálneho šmykového napätia je určený z výsledkov skúšky strihom na základe rovnice:

$$\tau_{(\max(\text{kompozit}))} = \frac{F_{(\max)}}{25 \cdot \pi \cdot t_2}, \quad (23)$$

kde $\tau_{(\max)}$ je medza pevnosti v šmyku, $F_{(\max)}$ je maximálna sila v momente porušenia vnútornej vrstvy poťahu a t_2 je hrúbka vnútornej vrstvy testovacieho panelu z kompozitnej štruktúry.

Výsledná bezpečnosť je stanovená ako pomer medze pevnosti v šmyku kompozitného panelu a medzi pevnosti v šmyku ekvivalentného oceľového plechu podľa rovnice [22]:

$$k_{(\min)} = \frac{R_{ms(\text{kompozit})}}{R_{ms(\text{ocel})}} = \frac{[t_1(\text{kompozit}) + t_2(\text{kompozit})] \cdot \tau_{(\max(\text{kompozit}))}}{\tau_{(\max(\text{ocel})}) \cdot t_{(\text{ocel})}}, \quad (24)$$

Z tab. 22, ktorá prezentuje výsledky skúšky strihom je zreteľná nízka hodnota bezpečnosti, ktorú dosiahla vzorka č.7. Do kompozície vzorky č.7 bola zahrnutá hliníková voština PAMG XR1 5056, ktorá sa vyznačuje vyššou pevnosťou v tlaku než aramidová voština použitá pri vzorke č.3. Hrúbka vonkajšieho poťahu bola pri oboch zmienených vzorkách približne rovnaká, čo viedlo k mierne vyššej hodnote maximálnej sily pri strihu vonkajšieho poťahu pri vzorke č.7.

Z pracovného diagramu (viď. obr. 61) je možné usúdiť, že jednotlivé vrstvy vnútorného poťahu vzorky č.7 obsahovali nižší pomer presýtenia než bolo predpokladané, alebo sa v týchto miestach vytvorili lokálne mikropóry, ktoré viedli k vzniku interlaminárnej delaminácie. Po dosiahnutí prvej hodnoty maximálnej sily u vzorky č.7, tak nastala krátkodobá stabilizácia na novom lokálnom minime (4 600 N) podporovaná poškodením laminátu, čo viedla k strate homogénnosti poťahu a následnej tvorbe nového nižšieho lokálneho maxima na hodnote 6 700 N.

Tab. 22 Výsledné dáta zo súšky strihom

	Vzorka č.3	Vzorka č.7	Vzorka č.9
$F_{(\max(\textit{kompozit}))}$ [N]	10 451	8 790	13 745
$\tau_{(\max(\textit{kompozit}))}$ [MPa]	118,81	86,09	92,11
$k_{(\min\text{-vzorok})}$ [–]	1,31	1,08	1,32

9 VPLYV VOĽBY MATERIÁLU NA CELKOVÚ CENU PRODUKTU

Neoddeliteľnou súčasťou projektu Formula Student je vypracovanie podnikateľského plánu a interpretácia necenenia výrobných procesov (uvedené v kapitole 1.3). Na obe zmienené kategórie má zásadný vplyv výsledná cena výroby monopostu v prípade malosériovej produkcie, ktorú do značnej miery ovplyvňuje aj výroba kompozitného battery packu. Pri jeho návrhu boli uvažované dva odlišné výrobné postupy s využitím kombinácií prepreg + autokláv a OOA prepreg (semipreg) + pec.

9.1 CYKLUS VYTVRDZOVANIA

Pre výrobu kompozitného akumulátorového boxu je potrebné aplikovať dva samostatné procesy vytvrdzovania. Prvý proces prislúcha vonkajšiemu poťahu a následne finálny proces prislúcha použitému jadrú a vnútornému poťahu. Priebeh oboch cyklov vytvrdzovania je totožný. Uvažovaná priemerná cena za spotrebu elektrickej energie dosahovala na území českej republiky k dňu 20.04.2022 cenu 7,15 Kč/kWh [68].

Uvažovaný VBO autokláv Econoclave EC3Xp-150P450F disponuje pracovným priestorom o rozmeroch 914 x 692 x 1524 mm (pojme tri kusy battery packov). Popisovaný autokláv patrí medzi zariadenia s najnižšou spotrebou elektrickej energie na globálnom trhu. Príkion zariadenia dosahuje hodnotu 27 kW [69]. Štandardný príkon autoklávov o totožných rozmeroch dosahuje hodnotu 85-120 kW. Celková spotreba energie v rámci jedného cyklu bola pre fázu udržiavania teploty a následného chladenia predpokladaná na hodnote 25 %.

Uvažovaný cyklus (ohrev 2 °C/min po dobu 50 min, následná výdrž na teplote 100°C po dobu 135 min a ochladenie 2 °C/min po dobu 50 min) o celkovej dĺžke 4hod [51].

Tab. 23 Cena procesu vytvrdzovania (autokláv Econoclave EC3Xp-150P450F)

Dĺžka cyklu [h]	4
Priemerná spotreba el. energie [kW/h]	11,81
Cena za proces vytvrdzovania [Kč/ks]	337,84

Uvažovaná priemyselná OOA pec Witzel PO1200 disponuje použiteľným pracovným priestorom o rozmeroch 1000 x 620 x 1200 mm (pojme tri kusy battery packov). Príkion tohoto zariadenia dosahuje hodnoty 9,9 kW [70]. Celková spotreba energie v rámci jedného cyklu bola pre fázu udržiavania teploty a následného chladenia predpokladaná na hodnote 25 %.

Uvažovaný cyklus (ohrev 2 °C/min po dobu 50 min, následná výdrž na teplote 100°C po dobu 135 min a následné ochladenie 2 °C/min po dobu 50 min) o celkovej dĺžke 5 hod [52].

Tab. 24 Cena procesu vytvrdzovania (priemyselná OOA pec Witzel PO1200)

Dĺžka cyklu [h]	5
Priemerná spotreba el. energie [kW/h]	3,96
Cena za proces vytvrdzovania [Kč/ks]	141,57

Vytvrdzovanie materiálov v prostredí uvažovaného autoklávu je na rozdiel od priemyselnej pece približne 2,4násobne drahšie (viď. tab. 23 a tab. 24). Výsledná cena za vytvrdzovanie 1 ks battery packu však môže narásť až na 30násobok uvádzanej ceny vytvrdzovania v priemyselnej peci, v prípade použitia energeticky náročnejších zariadení. S ohľadom na možnosť použitia semipregov ,OOA prepergov a zároveň aj štandardných prepergov pre výrobu battery packu, je ekonomicky výhodnejšie použitie priemyselných pecí.

9.2 CENA MATERIÁLU

Porovnanie výsledných cien použitých materiálov (viď. tab. 25) je značne závislé na odberanom množstve materiálu a od veľkosti produkcie dodávateľskej spoločnosti, ktorú ovplyvňujú prevažne makroekonomické faktory. Pri prepočte výslednej ceny je uvažovaný kurz 1€ = 24,64 Kč, ku dňu 10.05.2022 [71].

Tab. 25 Prehľad cien materiálov [51, 72]

	ER 88 FR	LFX 056 + A170 (semipreg)		OOA prepeg
Šírka role [mm]	1 000	1 000	1 000	1000
Min. odberné množstvo [bm]	50	70	-	50 - 100
Cena [€/m ²]	26,20	-	-	27 - 35
Cena [Kč/m ²]	645,57	531,00	560,00	665,28 – 862,40
Výsledná cena [Kč/m ²]	645,57	1 091,00		763,84

Najnižšiu cenu v prepočte na 1 m² ponúka aramidový prepeg s matricovým systémom ER 88FR. Pôvod takto nízkej ceny je do istej miery ovplyvnení stavov „predbežného prototypu“. Prijateľnú cenu, ktorá je o 18 % vyššia než pri prepregu ER 88FR ponúkajú firmy, ktoré na globálnom trhu presycujú a vyrábajú štandardné OOA prepregy. Pri oboch popisovaných typoch však nastáva značná problematika dostupnosti a dlhej dodacej doby, ako aj mimoriadne nízka možnosť individualizácie typu a hmotnosti použitej výstuže z dôvodu použitia nehorľavého matricového systému.

Nadpriemerne vysoká cena pri semipregu je spôsobená patentovanou výrobou a nízkym dopytom v prípade nehorľavého matricového systému LFX 056. Výhodou tohoto systému je v porovnaní so štandardnými prepregami a OOA prepregmi možnosť odberu samotnej matrice v stave fólie a následná kombinácia s neobmedzenou škálou výstuží. Relevantným faktorom v prípade uvažovanej sériovej výroby je aj umiestnenie produkčno-vývojového strediska na území Českej republiky.

ZÁVĚR

Náplňou predloženej bakalárskej práce bol návrh kompozitného battery packu, určeného pre zástavbu do celo-kompozitného chassis študentskej formuly eD2. Konceptný návrh vychádzal bezprostredne z predošlého hliníkového battery packu eD1, ktorý predstavoval vstupný krok tímu TU Brno Racing do kategórie elektricky poháňaných monopostov. Zároveň tento návrh poukazoval na významné konštrukčné nedostatky predchádzajúceho projektu.

Úvodný konštrukčný návrh bol riešený s ohľadom na získané poznatky z oblastí motoršportu popísaných v rešeršnej časti bakalárskej práce, ktoré stanovili smerovanie výsledného návrhu. Na základe získaných znalostí, bol výsledný koncept priklonený k hybridnej kompozitnej skladbe s využitím rôznorodého spektra jadier tak, ako je tomu aj v prípade monopostu Formuly 1 a Formuly E. Uvažovaný smer mal za cieľ stanoviť minimálnu hmotnosť na úrovni hodnoty hranice bezpečnosti, pri zachovaní čo najnižších počiatočných finančných investícií.

Značná pozornosť bola venovaná účelovosti návrhu a zabezpečeniu optimálnej servisnej prístupnosti ako aj jednoduchosti manipulácie pri demontáži z priestoru monokoku. Z uvedeného dôvodu boli do štruktúr battery packu zakomponované manipulačné prvky, ktorými nedisponoval stávajúci battery pack eD1.

Kľúčové faktory ovplyvňujúce návrh, spoločne s významnými výrobnými toleranciami vreckových článkov viedli k začleneniu „zámkovej metódy“ do finálneho návrhu segmentu. Súčasne nastalo zabezpečenie optimálnej kompresie článkov prostredníctvom využitia tvarových kompresných podložiek. Výsledná zostava uloženia článkov zároveň disponovala demontovateľnou prítlačnou sklo-aramidovou trubkou, ktorá poskytovala stály prístup do priestoru ich uloženia. Za nežiadúci možno považovať pozdĺžny nárast rozmerov segmentu z dôvodu zdvojeného vedenia zmieneného demontovateľného prvku, ktorý viedol k nárastu celkových rozmerov battery packu o 50 mm.

Neoddeliteľnou súčasťou vznikajúceho návrhu bolo rozvrhnutie trasy privádzanej vzdušiny, ktorá mala za cieľ znížiť prípadné zvýšenie teploty na záporných póloch článkov. Navrhnuté pasívne chladenie bolo rozdelené do štyroch vetiev, ktoré poskytovali ustálené prúdenie pri uchovaní nízkych energetických výdajov. Odvedenie naakumulovanej prehriatej vzdušiny z priestoru battery packu bolo zabezpečené pomocou dvoch potrubných trás, ktoré mali značne nežiadúci vplyv na zredukovanie servisného priestoru v oblasti uloženia pohonných jednotiek.

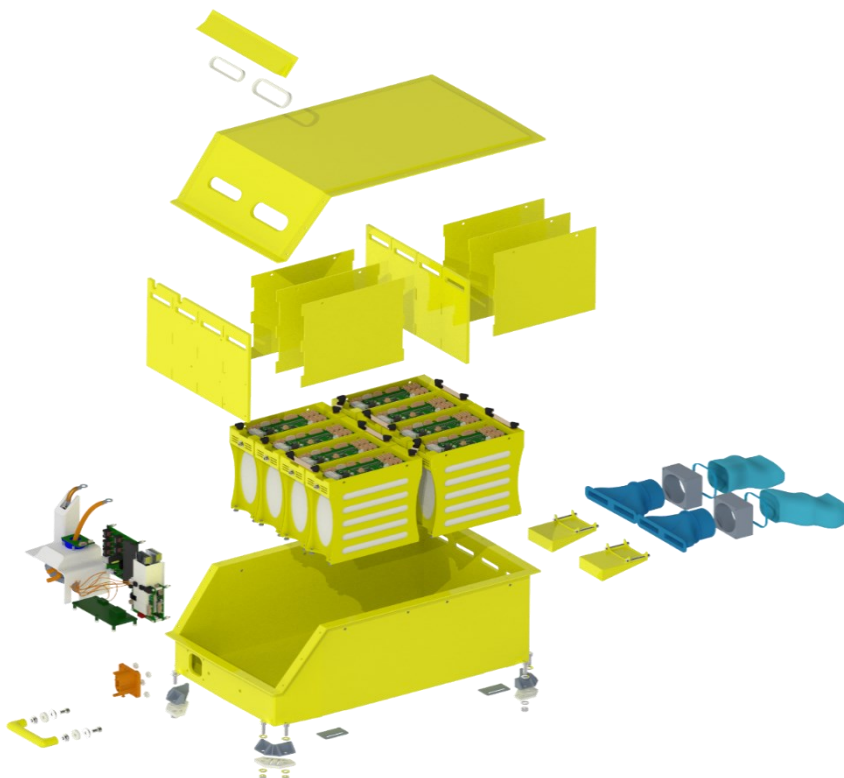
Primárnym materiálom, ktorý bol uvažovaný pre stavbu battery packu eD2, bola aramidová tkanina od spoločnosti MEEM impregnovaná epoxidovou matricou ER88 FR. Výsledný prepreg však vykazoval nežiadúce atypické správanie, ktoré bolo odhalené pri statickej skúške ťahom. Nadmerné intralaminárne šírenie spôsobené totálnou degradáciou matricového systému viedlo k vyradeniu daného materiálu zo zoznamu uvažovaných materiálov a jeho skúmanie je predmetom ďalších meraní s cieľom stanoviť a pochopiť príčinu vzniku daného správania.

Ako náhrada zmieneného systému bol použitý semipregový systém Letoxit® Foil LFX 056, ktorý umožňoval splnenie stanovených požiadavok na kombinácie viacerých druhov výstuží. Pri stanovení materiálových charakteristík bol spozorovaný značný nesúlad medzi nameranými a analyticky stanovenými hodnotami. Dôvodom zisteného nesúladu bol chybné určený objemový podiel výstuží na základe rozporuplnej hodnoty plošnej hmotnosti vedenej vo výrobnej a internej dokumentácii. Získané dáta tak boli z dôvodu zmienenej chyby pozmenené pri zohľadnení predošlých meraní.

Navrhnutie skladieb panelov battery packu plne podliehalo simuláciám kompozitných štruktúr ako aj kontrolám poťahov a jadier z dôvodu stanovenia prípadných porúch. Ako limitný faktor daných kompozícií sa ukázala nízka šmyková pevnosť aramidových a hliníkových voštín. Porovnaním limitných hodnôt a nameraných dát bola overená presnosť simulácií a presnosť stanovených limitných hodnôt. Výsledné členenie kompozitných panelov tak možno považovať za maximálne optimálne s ohľadom na parametre dostupných materiálov.

Predpokladaná hmotnosť battery packu na základe hmotnosti testovaných štruktúr vykazuje 50 % úsporu hmotnosti v porovnaní s predošlým konceptom. Túto hmotnosť je však aj naďalej možné znížiť o predpokladaných 8 – 10 %, pri využití špičkových leteckých voštín a vysoko-modulových plochých tkanín. Daná úspora sa však v porovnaní s rapidným nárastom finančných investícií ukazuje ako značne neekonomická. Na efektívnosť výroby vplyva zásadným spôsobom aj prechod z procesu vytvrdzovania v prostredí autoklávu do prostredia priemyselných pecí na základe využitia OOA prepregov a semipregov. Tieto materiály ponúkajú vysokú škálu optimalizácie a priaznivú dostupnosť na území Českej republiky. Principiálnou nevýhodou je však 70 % nárast ceny oproti štandardným prepregom.

Z výsledkov bakalárskej práce je možno usúdiť, že boli naplnené všetky požiadavky vznesené tímom TU Brno Racing a stanovené v zadaní tejto bakalárskej práce. Výsledný návrh kombinuje nízku hmotnosť pri splnení bezpečnostných požiadaviek stanovených pravidlami Formuly Student a predstavuje primárny zdroj poznatkov, ktoré budú využité pri návrhu kompozitného battery packu monopostu eD3, z dôvodu uprednostnenia lepeného konceptu battery packu eD2. Preferovaný spôsob výroby ponúkal 19 % úsporu hmotnosti a dôvodom jeho zvolenia bola značná vyťaženosť členov tímu zabezpečujúcich výrobu kompozitných dielov.



Obr. 63 Celková zostava návrhu battery packu eD2

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Formula Student. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2022 [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Formula_Student
- [2] RYBECKÝ, Vladimír. Před 90 lety vznikla Velká trojka. *AUTOWEEK.cz* [online]. 2018, 03.08.2018 [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: https://www.autoweek.cz/cs-aktuality-pred_90_lety_vznikla_velka_trojka-7665
- [3] History of Formula SAE ... *FORMULA SAE: history* [online]. Warrendale: SAE International [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: <https://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=c4c5195a-60c0-46aa-acbf-2958ef545b72>
- [4] About Formula SAE Series. *SAE INTERNATIONAL: attend: student events? Formula SAE north: overview: about* [online]. Warrendale: SAE international, ©2022 [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: <https://www.sae.org/attend/student-events/formula-sae-north/about>
- [5] Formula Driverless. *FORMULA-ATA: formula ATA: formula driverless* [online]. Torino: ANFIA [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: <https://www.formula-ata.it/formula-driverless/>
- [6] Formula Student Combustion - World Ranking List. *Fs-world: WRL-C* [online]. 2020, 13.10.2021 [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: <https://fs-world.org/C/>
- [7] Formula Student Electric - World Ranking List. *Fs-world: WRL-E* [online]. 2021, 13.10.2021 [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: <https://fs-world.org/E/>
- [8] FORMULA STUDENT SYMPOSIUM. *FSSymposium: about* [online]. Gyor, ©2022 [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: <https://fssymposium.ticketninja.io/>
- [9] Academy on Site - FSG2021. *FORMULA STUDENT GERMANY: academy: academy on site – FSG2021* [online]. 2021 [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/academy/academy-on-site/academy-on-site-fsg2021/>
- [10] Formula Student rules 2022 V1.0. *FORMULA STUDENT GERMANY: competition: rules & documents: rules for FSG 2022* [online]. 2021, 21.11.2021 [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2022/rules/FS-Rules_2022_v1.0.pdf
- [11] HOUSKA, Filip. Unikátní formule z brněnského VUT. Nahlédni do nitra TU Brno Racing!. In: *Red Bull* [online]. Brno: Red Bull, ©2021, 21.03.2020 [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://www.redbull.com/cz-cs/motorsports-tu-brno-racing-studentske-formule-vut-josef-jelinek-rozhovor>
- [12] Chceš se přidat do našeho týmu?. In: *TU Brno racing: články* [online]. Brno: TU Brno racing, 2021, 16.09.2021 [cit. 2022-01-30]. Dostupné z: <https://tubnoracing.cz/chces-se-pridat-do-naseho-tymu/?fbclid=IwAR1kgEsQGDbh8aupGfaoklh5tB0WkuiXtAewERQD0eVOjieYPpKiES8TaxE>

- [13] Custom battery packs. In: *BOLD:blog* [online]. Barcelona: BOLD [cit. 2022-01-17]. Dostupné z: <https://boldvaluable.tech/blog/custom-battery-packs/>
- [14] Innovative for sure: Audi sets safety standards at the Dakar Rally: all. In: *AUDI MediaCenter: motorsportler: Dakar Rally* [online]. Neuburg a. d. Donau: Audi, 2021, 11.02.2021 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: <https://www.audi-mediacycenter.com/en/press-releases/innovative-for-sure-audi-sets-safety-standards-at-the-dakar-rally-14361>
- [15] Custom battery pack design with lithium ion cells. In: *BOLD:blog* [online]. Barcelona: BOLD [cit. 2022-01-18]. Dostupné z: <https://boldvaluable.tech/blog/custom-battery-pack-design-lithium-cells/>
- [16] Formula 1 ESS and battery technology. In: *BOLD:blog* [online]. Barcelona: BOLD [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: <https://boldvaluable.tech/blog/formula-1-ess-batteries/>
- [17] UN38.3 Certification of Li Polymer Battery. In: *+LiPol Battery* [online]. Shenzhen, ©2022 [cit. 2022-01-30]. Dostupné z: <https://www.li-polymer-battery.com/whats-the-un38-3-certification-of-li-polymer-battery/>
- [18] SCARBOROUGH, Craig. In-depth: the Formula E powertrain explained. In: *Car: home: electric: Formula E powertrain* [online]. London, 2020, 30.7.2020 [cit. 2022-01-23]. Dostupné z: <https://www.carmagazine.co.uk/electric/formula-e-powertrain/>
- [19] NATHAN, Stuart. Power and performance: the Formula E battery. In: *THE ENGINEER* [online]. London, 2014, 16.09.2014 [cit. 2022-01-27]. Dostupné z: <https://www.theengineer.co.uk/power-and-performance-the-formula-e-battery/>
- [20] MCGELLIN, Rockwell. HOW TO BUILD AN ELECTRIC RACECAR: CELLS LIKE VISTORY. In: *Particle: tech* [online]. 2020, 20.08.2020 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://particle.azureedge.net/app/uploads/2020/08/Motorsport-Project-Report3.Accumulator-Iso.png>
- [21] Structural Equivalency Spreadsheet. In: *Fswiki* [online]. 2021, 16.11.2021 [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: https://fswiki.us/Structural_Equivalency_Spreadsheet
- [22] JANEČKA, Jiří, Tomáš VELFL a Matej HAGARA. *SES_E74_TUBrnoRacing_V1.1*. Brno, 2022. Technická dokumentácia eD2 TU Brno Rading - Nепublikováno
- [23] Illini Electric - Formula SAE Competition. In: *PROTOCASE: community: student sponsorships* [online]. New York: Protocase, ©2022 [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: https://www.protocase.com/community/sponsorship/illini-electric/ife18_accu_side.jpg
- [24] ZELLEN PATEN SCHAFT. In: *Instagram* [online]. Graz: TU Graz Racing Team, 2021 [cit. 2022-01-08]. Dostupné z: <https://www.instagram.com/p/CKeuc6LxPV/>
- [25] Představení nového monopostu FSE.08: battery pack. In: *EFORCE FEE PRAGUE FORMULA: novinky* [online]. Praha, 2019, 12.08.2019 [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: <https://eforce.cvut.cz/wp-content/uploads/2019/08/Obr%C3%A1zek1.png>
- [26] LEOTTA, Francesco. *Design of a Battery Pack for a Formula SAE Racing Car* [online]. Torino, 2020, 93 s. [cit. 2022-01-08]. Dostupné z:

- <https://webthesis.biblio.polito.it/15660/1/tesi.pdf>. Master degree thesis. Politecnico di Torino. Supervisor Prof. Andrea Tonoli
- [27] DVOŘÁK, Daniel. *EDVP_eDI: Vehicle performance - Design TU Brno eRacing*. Brno, 2021, 16 s. Design prezentácia TU Brno Racing - Nepublikováno.
- [28] LEXAN™ FR Resin BFL4000U. In: *CAMPUS* [online]. Frankfurt am Main, © 2022 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.campusplastics.com/campus/en/datasheet/LEXAN%E2%84%A2+FR+Resin+BFL4000U/SABIC/658/d38001e9>
- [29] MATĚJČEK, Ondřej, Matej HAGARA a Ondřej NEUMAN. *DragonE1_SES_v1*. Brno, 2021. Technická dokumentácia eD1 TU Brno Rading - Nepublikováno.
- [30] NIU, Michael Chun-Yung. *Composite airframe structures: practical design information and data*. 4th published. Hong Kong: Hong Kong Conmilit Press, 2005, 664 s. ISBN 962-7128-06-6.
- [31] CAMPBELL JR, Flake C a F C CAMPBELL. *Manufacturing Processes for Advanced Composites*. Oxford: Elsevier Science & Technology, 2003, 517 s. ISBN 1856174158. Dostupné z: doi:10.1016/B978-1-85617-415-2.X5000-X
- [32] *ASM Handbook. Volume 21, Composites*. Materials Park: ASM International, 2001, 1201 s. ISBN 0-87170-703-9.
- [33] DIERINGA, Hajo a Karl Ulrich KAINER. Magnesium matrix composites: State-of-the-art and what's the future. In: *Advanced Materials Research* [online]. 2012, s. 275-278 [cit. 2022-02-16]. ISBN 9783037853160. ISSN 1022-6680. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.410.275
- [34] Fabric Weave Styles. In: *COMPOSITE ENVISIONS* [online]. Wausau, ©2022 [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: <https://compositeenvisions.com/fabric-weave-styles/>
- [35] ABBASIAN, Tala. Tips for Working with Satin Weaves. In: *Coventive Composites: home: coventive explains* [online]. Chesterfield: Coventive Composites, 2020, 11.12.2020 [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: <https://coventivecomposites.com/explainers/tips-for-working-with-satin-weaves/>
- [36] Type of Carbon Fiber Products and their Special Features: Types by Mechanical Properties. *The Japan Carbon Fiber Manufacturers Association: material: type of carbon fiber* [online]. ©2002-2022 [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: <https://www.carbonfiber.gr.jp/english/material/type.html>
- [37] RAJPUROHIT, Ashok, Sébastien JOANNÈS, Vicky SINGERY, Philippe SANIAL a Lucien LAIARINANDRASANA. Hybrid effect in in-plane loading of carbon/glass fibre based inter-and intraply hybrid composites. *Journal of Composites Science* [online]. MDPI, 2020, 05.01.2020, 4(1), 6 [cit. 2022-03-05]. ISSN 2504-477X. Dostupné z: doi:10.3390/jcs4010006
- [38] Forlit & Metal: sendvičové panely. *Forlit & Metal* [online]. Hodonín, ©2018 [cit. 2022-03-06]. Dostupné z: <https://www.fmetal.cz/img/srovnani-tuhosti.png>

- [39] BLACK, Sara. Getting To The Core Of Composite Laminates. *CompositesWorld* [online]. Cincinnati, 2003, 10.01.2003 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/getting-to-the-core-of-composite-laminates>
- [40] SLOAN, Jeff. Core for composites: Winds of change. *CompositesWorld* [online]. Cincinnati, 2010, 06.01.2010 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/core-for-composites-winds-of-change>
- [41] DarkAero, Inc., GALVANIC CORROSION: CARBON FIBER + ALUMINIUM What is it? How we prevent it on the DarkAero 1!. In: *Youtube* [online]. 28. 09. 2020 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=yRpMZaU8zKw>
- [42] PN2 Aerospace Grade Aramid Fiber Honeycomb: description: Features. In: *PLASCORE: home: products: light honeycomb cores: aramid fiber: PN2 Meta-Aramid* [online]. Michigan, ©2008-2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.plascore.com/download/datasheets/honeycomb_data_sheets/PLA_PN2_4-6-2021.pdf
- [43] SLIMANE, S, S KEBDANI, A BOUDJEMAI a A SLIMANE. Effect of position of tension-loaded inserts on honeycomb panels used for space applications. *International journal on interactive design and manufacturing* [online]. Paris: Springer Paris, 2017, 12(2), 393-408 [cit. 2022-03-14]. ISSN 1955-2513. Dostupné z: doi:10.1007/s12008-017-0383-2
- [44] THOMAS, Gary. Composite Prepregs - Manufacturing, Benefits and Applications. In: *AZO MATERIALS* [online]. Manchester, 2013, 16.04.2013 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8353>
- [45] Airtech Auxiliär Materials. In: *AERO CONSULTANTS AG: products: Airtech Auxiliär Materials: vacuum Bagging and Composite Tooling* [online]. Nänikon [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.aero-consultants.ch/view/data/3285/Aero%20Consultings/Produkte/vakuumaufbau.jpg>
- [46] GARDINER, Ginger. Out-of-autoclave prepregs: Hype or revolution?: Why OOA prepreg?. *CompositesWorld* [online]. Cincinnati, 2011, 01.01.2011 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/out-of-autoclave-prepregs-hype-or-revolution>
- [47] Easycomposites: home: reinforcement & prepregs: prepregs. *Prepregs Component Prepreg* [online]. Stoke on Trent, ©2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.easycomposites.eu/xcl110-210g-22-twill-3k-prepreg-carbon-fibre>
- [48] SEMIPREGY: home: produkty: semipregy. 5M [online]. Kunovice, 2011 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.5m.cz/produkty/semipregy>
- [49] POPPY. Re: TU Brno Racing batteries [emailová komunikácia]. 25. 03. 2022 05:38 [cit. 2022-04-03]

- [50] MACKO, Maroš, Antonín KRMÍČEK a Matej HAGARA, ŽŮREK, Michal, ed. *Baterie_chladzeni: Informace o bateriích*. Brno, 2021. Interné poznámky TU Brno Racing - Nепublikováno.
- [51] BISKUP, Patrik. Re: Poptávka prepregu TU Brno Racing, VUT FSI [e-mailová komunikácia]. 05. 11. 2021 10:22 [cit. 2022-04-03]
- [52] TECHNICKÝ LIST Letoxit® LFX056. In: *5M: home: produkty: epoxidové pryskyřice: foliové epoxidové pryskyřice: přehled foliových pryskyřic LETOXIT* [online]. Verze: 15. prosinec 2011. Kunovice, 2011, 15.12.2011 [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://www.5m.cz/wp-content/uploads/2017/01/tl-lfx-056-cz.pdf>
- [53] UL94 V-0, V-1, & V-2 Flammability Standard. In: *RTP Company: home: technical information: UL recognition and flammability ratings: UL94 V-0, V-1, & V-2 flammability standard* [online]. Winona, © 2022 [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://www.rtpcompany.com/technical-info/ul-recognition-and-flammability-ratings/ul94-v-0-v-1-v-2-flammability-standard/>
- [54] ASTM D3039/D3039M - 17. *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. West Conshohocken: ASTM International, 2017, 13 s. DOI: 10.1520/D3039_D3039M-17. Dostupné také z: https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CD3039_D3039M-17%7Cen-US&proxycl=https%3A%2F%2Fsecure.astm.org&fromLogin=true
- [55] ŠPLÍCHAL, Jan. Re: TU Brno Racing – zoznam vzorkov [e-mailová komunikácia]. 03. 29. 2022 7:55 [cit. 2022-04-04]
- [56] ASTM D3518/D3518M - 18. *Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a ±45° Laminate*. West Conshohocken: ASTM International, 2018, 8 s. DOI: 10.1520/D3518_D3518M-18. Dostupné také z: https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CD3518_D3518M-18%7Cen-US&proxycl=https%3A%2F%2Fsecure.astm.org&fromLogin=true
- [57] AGARWAL, Bhagwan D., Lawrance J. BROUTMAN a K. CHANDRASKEHHARA. *Analysis and Performance of Fiber Composites*. 3rd edition. New Delhi: Sai Printo Pack Pvt., © 2006, 562 s. ISBN 978-81-265-3636-8.
- [58] DuPont™ Kevlar® 49 Aramid Fiber. In: *MatWeb: search: other engineering material: composite fibers: polymer: thermoset: aramid* [online]. Blacksburg, © 1996-2022 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=77b5205f0dcc43bb8cbe6fee7d36cbb5&ckck=1>
- [59] T300 Standard Modulus Fiber: Technical Data Sheet. In: *Toray: resources: data sheets: carbon fiber* [online]. Tacoma, © 2022 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://www.toraycma.com/wp-content/uploads/T300-Technical-Data-Sheet-1.pdf.pdf>
- [60] PDS Tenax™ filament yarn (EU). In: *TEIJIN: home: downloads: product data sheets* [online]. Version 1.3. 2021, 15.10.2021 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z:

https://www.teijinarbon.com/fileadmin/PDF/Datenbl%C3%A4tter_neu_2022/Product_Data_Sheet_TSG01en__EU_Filament_.pdf

- [61] HAGARA, Matej. *Knižnica datasheetov*. Brno, 2020. Zoznam materiálových charakteristík TU Brno Racing - Nepublikováno.
- [62] VRBKA, Jan. MECHANIKA KOMPOZITŮ. In: *VUT* [online]. Brno, 2008 [cit. 2022-04-21]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340
- [63] RIECKY, Daniel. *Aplikácia bezsieťových metód pre analýzu kompozitných dosiek vystužených jednosmernými vláknami*. Žilina, 2012, 138 s. Dizertačná práca. Žilinská univerzita v Žiline. Vedoucí práce Milan Žmindák.
- [64] PAMG-XR1 5056 Aluminium Honeycomb. In: *PLASCORE: home: products: light honeycomb cores: aluminum: PAMG-XR1 5056* [online]. Michigan, ©2008-2022 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: https://www.plascore.com/download/datasheets/honeycomb_data_sheets/PLA_PAMG-XR1-5056_4-6-2021.pdf
- [65] PN1 Commercial Grade Meta-Aramid Fiber Honeycomb. In: *PLASCORE: home: products: light honeycomb cores: aramid fiber: PN1 Commercial* [online]. Michigan, ©2008-2022 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: https://www.plascore.com/download/datasheets/honeycomb_data_sheets/PLA_PN1_4-6-2021.pdf
- [66] Gillcore® HK Honeycomb: performance properties, typical. *THE GILL CORPORATION: products: honeycomb core* [online]. El Monte, 2019, 12.01.2019 [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: https://www.thegillcorp.com/datasheets/Gillcore_HK_Honeycomb.pdf
- [67] NALLAGULA, Sandeep. *Behavior and Flexure Analysis of Balsa Wood Core Sandwich Composites: Experimental, Analytical and Finite Element Approaches*. New Orleans, 2006, 371 s. Dostupné také z: <https://scholarworks.uno.edu/td/371/>. Theses and Dissertations. University of New Orleans.
- [68] Aktuální (průměrná) cena 1 kWh elektřiny. *Energie123.cz: úvodní stránka: elektřina: ceny: cena 1 kWh* [online]. © 2011-2022 [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://www.energie123.cz/elektrina/ceny-elektricke-energie/cena-1-kwh/>
- [69] Econoclave EC3X5: EC3X5-150P450F. *ASC Process Systems: home: products: autoclaves: standard models: Econoclave EC3X5* [online]. Valencia (CA): ASC Process Systems, © 2022 [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <http://www.aschome.com/index.php/en/econoclave-ec3x5>
- [70] Pre-Preg Oven PO1200. *Witzel Vacupress: products: po - pre-preg convection ovens: pre-preg oven PO1200* [online]. Essen: Witzel Vacupress [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://www.vacupress.de/en/pre-preg-convection-ovens/pre-preg-oven-po1200>
- [71] Kurzy historie, kurzovní lístek ČNB 4.5.2022, historie kurzů měn. *Kurzycz: kurzy.cz: kurzy měn: historie kurzů* [online]. 2022, 4.5.2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.kurzycz.cz/kurzycz-men/historie/ceska-narodni-banka/D-4.5.2022/>

- [72] HOLOMEK, Jakub. Re: Poprávka epoxidové fóliové přiskyřice EFX 056 [e-mailová komunikácia]. 10. 05. 2022 8:36 [cit. 2022-05-10]

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV

ΔL	[mm]	Hodnota rozdielu okamžitého predĺženia skúšobnej vzorky z počiatočnej hodnoty L_0 na hodnotu okamžitej dĺžky L skúšobnej vzorky
$\Delta\gamma$	[-]	Hodnota rozdielu pomerného smykového pretvorenia vzorky v lineárnej oblasti
$\Delta\varepsilon$	[-]	Hodnota rozdielu pomerného predĺženia vzorky v krajných bodoch lineárnej oblasti
$\Delta\sigma$	[MPa]	Hodnota rozdielu zmluvných napätí v krajných bodoch lineárnej oblasti
$\Delta\tau$	[MPa]	Hodnota rozdielu zmluvných šmykových napätí v lineárnej oblasti
b	[mm]	Šírka skúšobného panelu
d	[mm]	Efektívna výška štruktúry
E	[GPa]	Modul pružnosti v ťahu
E_1	[GPa]	Počiatočná hodnota modulu pružnosti v ťahu (lineárna oblasť grafu)
E_2	[GPa]	Konečná hodnota modulu pružnosti v ťahu (lineárna oblasť grafu)
E_f	[GPa]	Modul pružnosti v ťahu (výstuž)
E_m	[GPa]	Modul pružnosti v ťahu (matrica)
E_L	[MPa]	Modul pružnosti v ťahu v pozdĺžnom smere (sýtená výstuž)
E_T	[MPa]	Modul pružnosti v ťahu v priečnom smere (sýtená výstuž)
F	[N]	Hodnota okamžitej aplikovanej sily v jednotlivých časových bodoch merania
$F_{(dovolené (ocel))}$	[N]	Maximálne dovolené zaťaženie ocelového plechu
$F_{(max)}$	[N]	Maximálna aplikovaná sila
$F_{(max (kompozit))}$	[N]	Maximálna aplikovaná sila (kompozitný panel)
F_m	[N]	Maximálna aplikovaná sila

F^{su}	[MPa]	Najnižšia medza pevnosti v šmyku z jednotlivých materiálov (vzorka, príložka a lepidlo)
F^{tu}	[MPa]	Medza pevnosti v ťahu (testovaný materiál)
G	[GPa]	Modul pružnosti v šmyku
$G1$	[GPa]	Počiatočná hodnota modulu pružnosti v šmyku (lineárna oblasť grafu)
$G2$	[GPa]	Konečná hodnota modulu pružnosti v šmyku (lineárna oblasť grafu)
G_{LT}	[MPa]	Modul pružnosti v šmyku (sýtená výstuž)
h	[mm]	Hrúbka voštiny
h_p	[mm]	Hrúbka lepenej príložky
$I_{(kompozit)}$	[mm ⁴]	Moment zotrvačnosti kompozitnej štruktúry
$k_{(min)}$	[-]	Minimálna bezpečnosť
$k_{(min-vzorok)}$	[-]	Minimálna bezpečnosť kompozitného panelu (Mechanické testovanie)
$k_{(min-ANSYS)}$	[-]	Minimálna bezpečnosť kompozitného panelu (ANSYS)
l	[mm]	Vzdialenosť osí podperných telies
L	[mm]	Okamžitá dĺžka skúšobnej vzorky
L_{min}	[mm]	Minimálna požadovaná hodnota dĺžky lepeného spoju príložky
L_o	[mm]	Počiatočná dĺžka a šírka (skúšobná vzorka)
L_x	[mm]	Okamžité predĺženie v smere zaťaženia
L_y	[mm]	Okamžité skrátenie v smere kolmom na smer pôsobiaceho zaťaženia
m_p	[g · m ²]	Plošná hmotnosť (sýtená výstuž)
m_r	[g · m ⁻²]	Plošná hmotnosť (výstuž)
m_{LF}	[g · m ⁻²]	Plošná hmotnosť (epoxidová fóliová matrica LFX 056)
n	[-]	Počet vzoriek

R_e	[MPa]	Medza klzu
$R_{m(ocel)}$	[MPa]	Medza pevnosti (ocelový plech)
R_m	[MPa]	Zmluvná medza pevnosti
$R_{ms(kompozit)}$	[MPa]	Medza pevnosti v šmyku (kompozitný panel)
$R_{ms(ocel)}$	[MPa]	Medza pevnosti v šmyku (ocelový plech)
S_{n-1}	[-]	Štandardná smerodajná odchýlka
$S_{(kompozit)}$	[mm ²]	Prierez plochy (kompozitný panel)
$S_{(ocel)}$	[mm ²]	Prierez plochy (ocelový plech)
S_o	[m ²]	Počiatočný prierez vzorku
t	[mm]	Hrúbka výstuže
$t_{(ocel)}$	[mm]	Hrúbka (ocelový plech)
$t_{1(kompozit)}$	[mm]	Hrúbka skladby vonkajšieho poťahu
t_1	[mm]	Hrúbka vonkajšej skladby
t_2	[mm]	Hrúbka vnútornej skladby
$t_{2(kompozit)}$	[mm]	Hrúbka skladby vnútorného poťahu
t_c	[mm]	Celkovú hrúbku (výstuž)
T_g	[°C]	Teplota skleneného prechodu
v	[-]	Objemový podiel
v_f	[-]	Objemový podiel (výstuž)
v_m	[-]	Objemový podiel (matrica)
\bar{x}	[-]	Priemerná hodnota meranej záujmovej veličiny (napr. modul pružnosti)
x_1	[mm]	Hodnota posuvu č.1 v lineárno-elastickej oblasti grafu
x_2	[mm]	Hodnota posuvu č.2 v lineárno-elastickej oblasti grafu
x_i	[-]	Meraná záujmová veličina (napr. modul pružnosti)

y_1	[N]	Hodnota minimálnej sily v lineárno-elastickej oblasti grafu
y_2	[N]	Hodnota maximálnej sily v lineárno-elastickej oblasti grafu
$Z_{(\max (kompozit))}$	[mm]	Maximálny priehyb vzorky (kompozitný panel)
γ	[-]	Smykové pretvorenie
ε	[-]	Pomerné predĺženie
ε_x	[-]	Pomerné predĺženia v smere pôsobiaceho zaťaženia (axiálna deformácia)
ε_y	[-]	Pomerné skrátania v smere kolmom na pôsobiace zaťaženie (pričná deformácia)
ε_C	[-]	Carbon composites strain
ε_H	[-]	Hybrid composite strain
μ	[-]	Poissonovo číslo
μ_f	[-]	Poissonovo číslo (výstuž)
μ_m	[-]	Poissonovo číslo (matrica)
μ_{LT}	[-]	Poissonovo číslo pre pozdĺžny smer (laminát)
ν	[-]	Objemový podiel
ρ	$[kg \cdot m^{-3}]$	Hustota sýtenej výstuže
ρ_{LF}	$[g \cdot cm^{-3}]$	Hustota epoxidovej fóliovej matrice LFX 056
ρ_R	$[g \cdot cm^{-3}]$	Hustota použitej výstuže
σ	[MPa]	Zmluvné napätie
$\sigma_{(\max (kompozit))}$	[MPa]	Medza pevnosti (kompozitný panel)
$\sigma_{UTS(kompozit)}$	[MPa]	Medza pevnosti v ohybe (kompozitný panel)
τ	[MPa]	Šmykové napätie
$\tau_{(\max (kompozit))}$	[MPa]	Medza pevnosti v šmyku (kompozitný panel)
$\tau_{(\max (ocel))}$	[MPa]	Medza pevnosti v šmyku (ocelový plech)
τ_{max}	[MPa]	Medza pevnosti v šmyku

τ_c	[MPa]	Šmyková pevnosť jadra
$\tau_{c(max)}$	[MPa]	Maximálne šmykové napätie v jadre

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK

3D	Three-dimensional
ACP	Ansys Composite PrepPost
AFRP	Aramid fiber reinforced plastic
AGM	Angled – Gage – Middle
AIR	Accumulator Isolation Relay
BMS	Battery Management System
CC	Carbon-Carbon
CFRP	Carbon fiber reinforced plastic
CK	Carbon.Kevlar
CNC	Computer Numerical Control
CV	Combustion Vehicle
DC/DC	Direct curretn to direct current
DEKRA	Deutscher Kraftfahrzeug Überwachungs Verein
DGM	edge Delamination – Gage – Middle
Dtex	Decitex
DV	Driverless Vehicle
DX	Dragon X
eD1	Dragon e1
eD2	Dragon e2
E-glass	Electrical glass
EI	Rig Compliance
EN AW	Europion wroughth product

ESS	Energy Storage System
EV	Electric Vehicle
FEE	Faculty of Electrical Engineering
FR-4	Flame retardant type 4
FSAE	Formula Society of Automotive Engineers
FSC	Formula Student Combustion
FSD	Formula Student Driverless
FSE	Formula Student Electric
FSG	Formula Student Germany
FSH	Formula Student Hybrid
GAT	Grip/Tab – At grip/tab – Top
Gen2	Generation 2
GFRP	Glass fiber reinforced plastic
GM	General Motors
HM	Vysoký modul
HS	Hight-strength
HT	High Tenacity
IP	Ingress protection
LAT	Lateral – At grip/tab – Top
LF	Letoxit Foil
LGM	Lateral – Gage – Middle
Li-po	Lithium-polymér
LIT	Lateral – Inside Grip/tab – Top
LM	Nízky modul
LV	Low Voltage

M	Metric
MHBS	Main Hoop Bracing Support
MKP	Metóda konečných prvkov
NDT	Nedeštruktívne testovanie
OOA	Out of Autoclave
PAN	Polyacrylonitrile
PMCs	Polymer Matrix Composite Materials
PMI	Polymetakrylimid
PVC	Polyvinylchlorid
RESS	Reverse energy storage system
SAE	Society of Automotive Engineers
SES	Structural Equivalency Spreadsheet
SESA	Structural Equivalency Spreadsheet Approval
S-glass	Strength glass
SGM	long. Splitting – Gage – Middle
SIS hor.	Side impact structure horizontal
SM	Štandardný modul
TSAC	Tractive System Accumulator Container
TSAC-s	Tractive System Accumualtor Storage system
TU	Technische Universität (University of Technology)
UD	Unidirectional
UHM	Ultra vysoký modul
UM	Stredný modul
UN	United Nations standard
UT	The University of Texas at Austin

VBO	Vacuum bag only
VUT	Vysoké učení technické v Brně
XGM	eXplosive – Gage – Middle
L	Linear
W	Width

ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV

Obr. 1 Tím TU Brno Racing [12]	13
Obr. 2 HV battery pack Audi RS Q e-tron [14]	14
Obr. 3 Formula 1 - Energy storage system [16].....	15
Obr. 4 Formula E - Rechargeable energy storage system Gen2 [18]	16
Obr. 5 Battery pack tímu ECU Tacing z Edith Cowan University [20]	17
Obr. 6 Formula Student team Illini Electric - oceľový battery pack [23].....	18
Obr. 7 Formul Student team TUG – hliníkový battery pack [24].....	19
Obr. 8 Aramidový battery pack tímu eForce FEE Prague Formula [25].....	20
Obr. 9 Formula Student team Squadra Corse Polito - battery pack z uhlíkových vlákien [26]	20
Obr. 10 Koncept lepeného battery packu Dragona eD2 - Tím TU Brno Racing [22]	21
Obr. 11 Uloženie battery packu tímu TU Brno Racing do celo-kompozitného chassis	22
Obr. 12 Uloženie battery packu tímu Squadra Corse Polito do celo-kompozitného chassis [26]	22
Obr. 13 Monopost Dragon eD1 [27]	23
Obr. 14 Uloženie battery packu eD1 v rámovej konštrukcii.....	23
Obr. 15 Kompozícia battery packu eD1.....	24
Obr. 16 Segmenty monopostu Dragona eD1 [29].....	25
Obr. 17 3D mapa deviácií battery boxu Dragona eD1	25
Obr. 18 Zakliesnenie battery boxu v rámovej konštrukcii pri demontáži.....	26
Obr. 19 Rozloženie napätí na battery boxe pri zaťažujúcom stave (40g v pozdĺžnom smere) 27	
Obr. 20 Rozloženie napätí na prednom držiaku pri zaťažujúcom stave (40g v pozdĺžnom smere) [29, upravené]	27
Obr. 21 Uchytenie vnútorných vertikálnych medzi priečok eD1	28
Obr. 22 Rozloženie napätí na vertikálnej medzi priečke pri zaťažujúcom stave (40g v bočnom smere).....	28
Obr. 23 Typy výstuží: z ľava vlákna, vločky a častice [33]	30

Obr. 24 Zľava väzba plátňová a väzba keprová [35].....	31
Obr. 25 Väzba atlasová [35].....	32
Obr. 26 Graf zmluvného závislosti napätia na relatívnomu predĺžení jednotlivých tipov výstuží a hliníkovej zliatiny 7075-T6 [30, upravené]	32
Obr. 27 Proces výroby carbonového a grafitového vlákna metódou PAN a PITCH [32, upravené]	34
Obr. 28 Typologizácia uhlíkových a grafitových vlákien podľa výsledného modulu v pružnosti [36, upravené].....	35
Obr. 29 Graf hybridného efektu pre uhlíkový, sklený a hybridný kompozit [37, upravené] ..	35
Obr. 30 Základne značenie rozmerov ekstrudovaných voštín	37
Obr. 31 Distribúcia zalievacej zmesy do voľných buniek v okolí insertu [43, upravené]	38
Obr. 32 Schéma výroby kompozitného dielu z prepregu do negatívnej formy [45]	39
Obr. 33 Zástavba battery boxu do celo-kompozitného chasis eD2.....	41
Obr. 34 Rozloženie štruktúr monokoku eD2 [22]	42
Obr. 35 Uchytenie battery packu Dragon-a eD2 v blízkosti rozhrania štruktúr.....	42
Obr. 36 Zostava uloženia článkov v segmente akumulátoru eD2	43
Obr. 37 Rez segmentu battery boxu eD2.....	44
Obr. 38 Rozmerová tolerancia článku Grepow A175175 16800mAh [49].....	45
Obr. 39 Prepojenie stien segmentu pomocou „zámkou“	45
Obr. 40 Meranie teploty pri vysoko prúdovom teste vybíjania článkov Grepow 16800 mAh [50]	46
Obr. 41 Chladiaca trasa článkov akumulátoru eD2	47
Obr. 42 Umiestnenie elektrických komponentov & krytie AIRs	48
Obr. 43 Upevňovacie prvky battery packu eD2	49
Obr. 44 Uloženie tvarovaných insertov v kompozitnej štruktúre eD2	49
Obr. 45 Test odolnosti proti šíreniu plameňa UL94 - V0 epoxidového systému ER 88FR.....	52
Obr. 46 Skúšobné vzorky kompozitných materiálov	55
Obr. 47 Prípustné a neprípustné módy porušenia kompozitných vzoriek [54]	55

Obr. 48 Graf ťahovej skúšky vzoriek L1-L5 v orientácii 0 ° a 90 °	56
Obr. 49 Skúšobné telesá L1-L5 po pretrhnutí	57
Obr. 50 Graf ťahovej skúšky vzoriek LL1-LL v orientácii 45	59
Obr. 51 Skúšobné telesá LL1-LL5 po ukončení pôsobiaceho zaťaženia.....	60
Obr. 52 Graf modulu pružnosti v ťahu a objemového pretvorenia homogenizovaných laminátov	63
Obr. 53 Graf skúšky trojbodého ohybu a strih pre vzorky č. 1 a č.7	65
Obr. 54 Graf skúšky trojbodého ohybu pre vzorky s penovým a voštinovým jadrom	66
Obr. 55 Rozčlenenie štruktúr battery packu eD2	67
Obr. 56 Moduly pružnosti a šmykový modul, zľava vzorka č.3 a vzorka č.7	67
Obr. 57 Simulácia bezpečnosti trojbodového ohybu vzorky č.7	68
Obr. 58 Diagram trojbodovej ohybovej skúšky kompozitných panelov č.3, č.7 a č.9	71
Obr. 59 Porušenie skúšobného panelu č. 7 pri skúške trojbodovým ohybom	72
Obr. 60 Teoretický priebeh skúšky strihom [22, upravené]	74
Obr. 61 Diagram skúšky strihom kompozitných panelov č.3, č.7 a č.9	74
Obr. 62 Porušenie skúšobného panelu č. 7 pri skúške strihom.....	75
Obr. 63 Celková zostava návrhu battery packu eD2.....	80

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1 Nárast parametrov sendvičovej štruktúry voči homogénemu materiálu [38, upravené]	36
Tab. 2 Materiálové charakteristiky epoxidového systému ER 88 FR [51]	50
Tab. 3 Materiálové charakteristiky fóliového epoxidového systému Letoxit® Foil LFX 056 [52]	51
Tab. 4 Výsledky testu ekvivalencie epoxidových matric ku norme UL 94 - V0	51
Tab. 5 Špecifikácia zvolených materiálových výstuží	53
Tab. 6 Doporučené rozmery vzoriek výstuží sýtených polymérou matricou [54]	53
Tab. 7 Výsledky merania rozmerových parametrov vzoriek	54
Tab. 8 Štatistický rozbor mechanických vlastností vzoriek L1-L5	58
Tab. 9 Štatistický rozbor mechanických vlastností vzoriek LL1-LL5	60
Tab. 10 Materiálové vlastnosti použitých výstuží [51, 58, 59, 60, 61]	61
Tab. 11 Materiálové vlastnosti použitých matricových systémov [51, 52]	61
Tab. 12 Mechanické parametre sýtených kompozitných výstuží	62
Tab. 13 Mechanické parametre sýtenej kompozitnej výstuže CC245 - meranie č.2	63
Tab. 14 Vlastnosti hliníkových a aramidových voštín [64, 65]	64
Tab. 15 Parametre efektívnej výšky panelu a maximálnej aplikovanej sily jednotlivých štruktúr	68
Tab. 16 Výsledný lay-up skladieb jednotlivých štruktúr battery packu eD2	69
Tab. 17 Výsledný lay-up vnútorných vertikálnych medzi priečok, lemu a krytu AIRs battery packu eD2	69
Tab. 18 Mechanické vlastnosti preddefinovanej oceli podľa dokumentu SES [22]	70
Tab. 19 Rozmery battery packu eD2	70
Tab. 20 Výsledné dáta z trojbodovej skúšky ohybom	72
Tab. 21 Koeficienty bezpečnosť štruktúr battery packu eD2	73

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha č.1	Výber pravidiel Formuly Student	I
Príloha č.2	Výsledky rozmerovej kontroly kompozitných vzoriek	II
Príloha č.3	Priemerné rozmery kompozitných vzoriek	III
Príloha č.4	Grafy ťahových skúšok (vzorky v orientácii 0 ° a 90 °)	IV
Príloha č.5	Grafy ťahových skúšok (vzorky v orientácii 45 °)	V
Príloha č.6	Preukázanie splnenia pravidla T 3.4.3	VI

PRÍLOHA Č.1

I Pravidlá priamo obmedzujúce návrh TSAC [10]:**1. EV 3.1.2**

Časti vozidla, ktoré sa môžu stať elektricky vodivými (napr. potiahnuté kovové diely, diely z uhlíkových vlákien, atď.) vo vzdialenosti do 100 mm od TS komponentov, musia mať výsledný odpor menší, než je hodnotou odporu 5Ω , k LVS uzemneniu.

2. EV 5.3.2

Každý segment TS akumulátoru nesmie presiahnuť maximálne statické napätie o hodnote 120 VDC, a maximálnu energiu o hodnote 6 MJ (vid'. EV 5.1.2), a maximálnu hmotnosť 12 kg.

3. EV 5.4.6

Každý segment TS akumulátoru musí byť elektrický izolovaný pomocou vhodného nehorľavého (vid'. T 1.2.1) celistvého materiálu, ktorý je umiestnený medzi segmentami a na vrchnej časti segmentu, čím zabráňuje vzniku oblúkových výbojov, spôsobených kontaktom medzi segmentami, alebo náhodným spadnutím dielu / nástroja do kontajneru TS počas jeho údržby.

4. EV 5.5.1

Všetky TSAC-s musia ležať vo vnútri chassis a byť uchytené k primárnej štruktúre chassis, alebo inej dodatočnej štruktúre, ktorá je pevne pripevnená k primárnej štruktúre chassis, ktorá spĺňa minimálne špecifikácie pre bočnú štruktúru (SIS), nie vyššie ako je najvyšší bod bočnej štruktúry, uvedené v T 1.1.16..

5. EV 5.5.2

Akumulátorový kontajner musí byť chránený pred bočným a zadným nárazom, pomocou štruktúry, ktorá je ekvivalentná k štruktúre definovanej pravidlom T 3.2. Kontajner zároveň nesmie byť súčasťou tejto štruktúry.

6. EV 5.5.3

Všetky TSAC materiály musia byť nehorľavé (spomaľovače horenia). Tento stav je definovaný v pravidle T 1.2.1.

7. EV 5.5.4

TSACs musí byť vyrobené z ocele alebo hliníku. Zároveň tieto materiály musia spĺňať nasledovné požiadavky:

- Hrúbka spodne časti TSAC musí dosahovať najmenšiu prípustnú hrúbku 1,25 mm (pokiaľ je vyrobená z ocele) a 3,2 mm (pokiaľ je vyrobená z hliníku).
- Vnútorne a vonkajšie vertikálne steny, kryty a viečka musia byť najmenej 0,9 mm hrubé (pokiaľ sú vyrobené z ocele) a 2,3 mm hrubé (pokiaľ sú vyrobené z hliníku).
- Alternatívne materiály sú povolené, pokiaľ sa preukáže ich ekvivalenciu k pravidlu T3.3, alebo v prípade použitia kompozitných materiálov (vid'. EV 5.5.5). Táto konštrukčná zmena musí byť zahrnutá do dokumentu SES. Pokiaľ tím použije alternatívne materiály, musí predložiť testovacie vzorky v rámci technickej inšpekcie.

8. EV 5.5.5

Kompozitný battery pack musí spĺňať nasledujúce požiadavky:

- Údaje, ktoré boli získané z trojbodovej ohybovej skúšky a skúšky strihom (vid'. T 3.5), musia byť použité v rámci návrhu a preukazovať dostatočnú pevnosť.

- Každý bod uchytenia si vyžaduje zakomponovanie oceľových podložiek, s minimálnou hrúbkou o hodnote 2 mm. Alternatívne materiály môžu byť použité, pokiaľ tím preukáže príslušnú ekvivalenciu.
- Výpočty a výsledky fyzických testov musia byť obsiahnuté v dokumente SES.

9. EV 5.5.6

Podlaha a steny TSAC musia byť spojené metódou zvarovania, lepenia alebo pomocou skrutiek.

10. EV 5.5.7

TSAC musí pozostávať z elektricky nevodivých vnútorných vertikálnych stien s minimálnou výškou o hodnote 75 % výšky vonkajších vertikálnych stien, ktoré rozdeľujú TSAC do sekcií o maximálnej hmotnosti 12 kg.

11. EV 5.5.8

Segmenty akumulátoru (viď. **EV 5.3.2**) musia byť oddelené pevnou, elektricky nevodivou a ohňovzdornou bariérou (viď. **T 1.2.1**).

12. EV 5.5.9

Battery pack (TSAC), uchytenie TSAC ku chassis a uchytenie každého článku ku TSAC musí byť navrhnuté tak, aby zvládlo nasledujúce zrýchlenia:

- 40 g v pozdĺžnom smere (dopredu/dozadu)
- 40 g v bočnom smere (doprava/dol'ava)
- 20 g vo vertikálnom smere (nahor/nadol)

Výpočty, alebo testy, musia byť zdokumentované v dokumente SES. Všetky uvažované body uchytenia TSAC musia spĺňať pravidlo **EV 5.5.13**. TSAC-s vyrobené z materiálov, ktoré sú vedené v pravidle **EV 5.5.4**, alebo v pravidle **EV 5.5.5**, môžu vyžadovať dodatočné vystuženie z dôvodu naplnenia tohoto pravidla.

13. EV 5.5.10

Konektory vreckových článkov (pouch cells) nesmú prenášať mechanické zaťaženie.

14. EV 5.5.11

Všetky spojovacie prvky použité v rámci návrhu battery packu, alebo ku jeho uchyteniu, musia spĺňať pravidlo **T 10**. Spojovacie prvky nachádzajúce sa v akumulátore, ktoré sú použité ako nekonštrukčné spojovacie prvky (napr. PCB) nemusia spĺňať pravidlo **T10** a môžu disponovať ľubovoľným rozmerom, pokiaľ sú vyrobené z nevodivých materiálov, alebo pokiaľ spĺňajú pravidlo **T 10.1.2**.

15. EV 5.5.12

AIR a hlavná poistka musia byť oddelené pomocou nevodivého a ohňovzdorného materiálu od zvyšku akumulátoru. Vzduch sa v tomto prípade neuvažuje ako vyhovujúci izolačný materiál.

16. EV 5.5.13

Všetky konzoly použité k uchyteniu TSAC, musia byť vyrobené z ocele o hrúbke 1,6 mm alebo z hliníku o hrúbke 4 mm a mať spojovacie platne (klíny), ktoré prenesú ohybové napätie. Každý bod prepojenia vrátane konzol, podložiek a insertov musí byť schopný odolať pôsobeniu sily o hodnote 20 kN v ľubovoľnom smere.

17. EV 5.5.14

Vnútorné a vonkajšie otvory TSAC sú povolené len pre káblové zväzky, vetranie, chladenie alebo spojovacie prvky. TSAC musí byť stále v súlade s ostatnými pravidlami, obzvlášť s tými, ktoré sa týkajú jeho konštrukčných požiadavkou. Vonkajšie otvory musia byť utesnené podľa pravidla **EV 4.5**.

18. EV 5.5.16

Akýkoľvek battery pack, ktorý by mohol pri svojom fungovaní vypúšťať plyny, u ktorých hrozí následná explózia, musí disponovať ventilačným systémom, ktorý zabezpečí odvod plynu a zabráni dosiahnutiu kritickej koncentrácie pre vznik explózie.

19. EV 5.5.17

Každý battery pack, ktorý je plne utesený, musí byť vybavený ventilom pre prípadné uvoľnenie tlaku, z dôvodu zabránenia zvýšenia tlaku v danom battery packu.

20. EV 5.5.18

Návrh battery packu a prislúchajúcich komponentov musí byť zahrnutý v dokumente SES, vrátane uvedených použitých materiálov, nákresov, fotiek, pozícií skrutiek, váhy segmentov a umiestnenia článkov a segmentov.

21. EV 5.8.4

Maximálna prípustná teplota článkov je 60 °C, alebo limitný stav, ktorý je uvedený v technickom liste článku, pokiaľ je jeho hodnota nižšia než 60 °C.

I Pravidlá vzťahujúce sa k TSAC [10]:

1. T 1.1.10

Primárna štruktúra sa skladá z nasledujúcich komponentov:

- Hlavný oblúk
- Predný oblúk
- Výstuhy a podpery hlavných oblúkov
- Bočná nárazová štruktúra
- Predná priehradka
- Podpera prednej priehradky
- Všetky prvky chassis, ktoré prenášajú zaťaženie zo zádržného systému vodiča do vyššie uvedených komponentov primárnej štruktúry.

2. T 1.1.16.

Obálka povrchu: je povrch definovaný hornou časťou ochranného oblúku a vonkajšími okrajmi štyroch pneumatík

3. T 1.2.1

Spomaľovač horenia – materiál spĺňajúci jeden z uvedených štandardov:

- UL94 V-0 pre minimálnu hrúbku použitého materiálu
- FAR 25.753(y)(1)(i)

Ekvivalentné štandardy sú akceptovateľné iba vtedy, ak tím preukáže ekvivalenciu a tá je schválená vedením príslušného podujatia.

4. T 3.4.1

Pokiaľ sú v rámci primárnych štruktúr alebo štruktúr TSAC použité kompozitné štruktúry, musí byť stanovená príslušná ohybová tuhosť štruktúr (EI) pomocou nástrojov a vzťahov uvedených v dokumente SES. Aktuálne rozmery a zakrivenia panelov, môžu byť zahrnuté do úvahy výpočtu, v prípade stanovenia hodnoty hlavného oblúku, vzpery predného oblúku, podpery prednej priehradky a štruktúry ramenných bezpečnostných pásov. Pre zvyšné plochy je EI vypočítané ako EI panelu vo vzťahu k jeho neutrálnej osi. Tento panel musí disponovať rovnakou kompozíciou ako štruktúra, ktorá je použitá v rámci chassis.

5. T 3.4.3

Pre akýkoľvek laminát v primárnej štruktúre alebo TSAC je maximálny hmotnostný obsah rovnobežných vlákien vzhľadom ku hmotnosti všetkých vlákien v lamináte

limitovaný na hodnotu 50 %. Všetky vlákna položené s akoukoľvek orientáciou v rozmedzí $\pm 10^\circ$ sa v tomto prípade považujú za rovnobežné.

6. T 3.5.5

Vzdialenosť medzi podperami testovacieho panelu musí byť najmenej 400 mm.

7. T 3.5.6

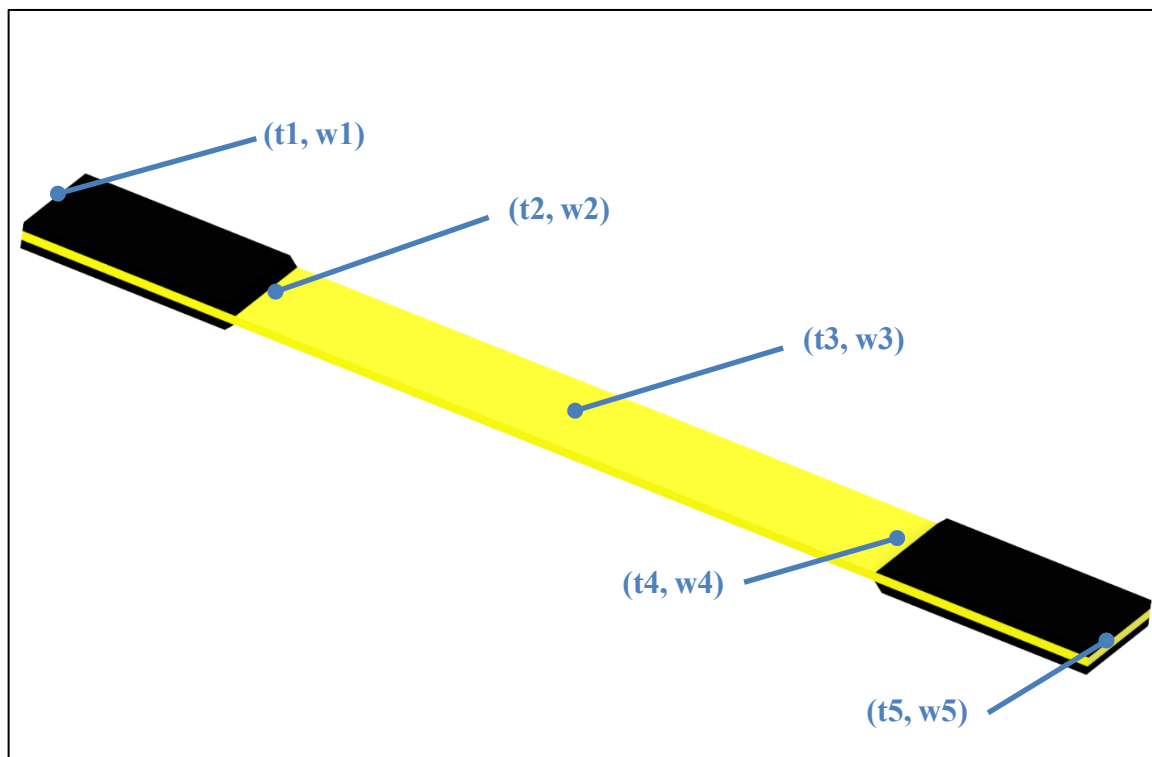
Aplikátor prenášajúci silové pôsobenie na testovací panel musí byť vyrobený z ocele a disponovať rádiusom o minimálnom rozmere 50 mm.

8. D 1.2.3

Vstup do dynamickej zóny je povolený maximálne štyrom členom tímu vrátane pilota monopostu.

PRÍLOHA Č.2

II Oblasti kontrolovaných rozmerov



II Oblasti kontrolovaných rozmerov (hrúbka vzorky)

ASTM D3039/D3039M-17			t1	t2	t3	t4	t5
Označenie výstuže	Orientácia vláknien	Označenie vzorku	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
TeXtreme 160g/m ²	0°	A1	1.10	1.117	1.142	1.177	1.13
		A2	1.03	1.145	1.171	1.238	1.09
		A3	1.11	1.168	1.220	1.204	1.12
		A4	1.02	1.068	1.186	1.055	1.05
		A5	1.07	1.215	1.275	1.222	1.06
	45°	AA1	1.00	1.068	1.069	1.073	1.00
		AA2	1.02	1.039	1.071	0.993	1.01
		AA3	1.03	1.086	1.044	1.066	1.09
		AA4	1.10	1.051	1.009	1.035	1.09
		AA5	1.06	1.080	1.087	1.050	1.09
CK 170g/m ² (2:1)	0°	B1	2.01	2.083	2.055	2.011	2.02
		B2	2.05	1.986	1.966	1.993	2.04
		B3	2.01	2.049	2.030	2.059	2.02
		B4	2.00	2.015	2.011	2.038	1.99
		B5	2.03	2.051	2.035	2.020	1.97
	45°	BB1	1.98	1.931	1.938	1.942	1.99
		BB2	1.93	2.000	1.993	2.002	1.95
		BB3	1.98	1.951	1.935	2.005	1.92
		BB4	1.92	2.003	1.904	1.885	1.94
		BB5	1.99	1.954	1.948	1.913	1.96
A 170g/m ² Style 284	0°	C1	1.99	2.047	1.970	1.998	1.97
		C2	1.97	2.028	1.984	1.972	2.01
		C3	2.00	2.036	2.003	2.010	2.00
		C4	2.02	2.044	2.032	2.043	2.03
	45°	CC1	1.98	2.062	2.056	2.005	2.05
		CC2	2.00	2.000	1.974	1.969	2.03
		CC3	1.99	2.001	2.001	2.005	1.96
		CC4	2.01	2.081	2.078	2.020	2.02
UD CST 150g/m ²	0°	D1	1.51	1.575	1.557	1.564	1.55
		D2	1.53	1.521	1.512	1.529	1.52
		D3	1.61	1.502	1.520	1.483	1.53
		D4	1.51	1.543	1.527	1.524	1.49
		D5	1.53	1.523	1.529	1.549	1.55
A220g/m ²	0°	L1	2.24	2.290	2.290	2.281	2.23
		L2	2.24	2.302	2.293	2.280	2.27
		L3	2.23	2.279	2.312	2.313	2.19
		L4	2.25	2.288	2.278	2.267	2.24
		L5	2.28	2.293	2.269	2.294	2.29
	45°	LL1	2.16	2.217	2.232	2.212	2.14
		LL2	2.19	2.198	2.212	2.226	2.19
		LL3	2.18	2.219	2.216	2.220	2.19
		LL4	2.22	2.219	2.210	2.203	2.21
		LL5	2.23	2.235	2.211	2.215	2.22
CC 245g/m ²	0°	K1	1.37	1.414	1.413	1.387	1.41
		K2	1.00	1.410	1.418	1.396	1.39
		K3	1.36	1.391	1.399	1.398	1.37
		K4	1.37	1.383	1.404	1.389	1.41
		K5	1.51	1.372	1.414	1.388	1.51
	45°	KK1	1.48	1.422	1.423	1.429	1.48
		KK2	1.46	1.438	1.471	1.431	1.47
		KK3	1.41	1.425	1.442	1.422	1.38
		KK4	1.43	1.432	1.413	1.417	1.4
		KK5	1.43	1.438	1.420	1.425	1.41

II Oblasti kontrolovaných rozmerov (šírka vzorky)

ASTM D3039/D3039M-14			w1	w2	w3	w4	w5
Označenie výstuže	Orientácia vlákien	Označenie vzorku	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
TeXtreme 160g/m ²	0°	A1	24.81	24.818	24.795	24.970	24.72
		A2	24.80	24.828	24.808	24.815	24.83
		A3	24.92	24.799	24.810	24.802	24.90
		A4	24.78	24.820	24.834	24.828	24.81
		A5	24.80	24.901	24.903	24.865	24.82
	45°	AA1	24.72	24.760	24.746	24.765	24.82
		AA2	24.86	24.823	24.819	24.805	24.96
		AA3	24.82	24.715	24.734	24.708	24.92
		AA4	24.83	24.732	24.708	24.696	24.90
		AA5	24.88	24.811	24.762	24.758	24.91
CK 170g/m ² (2:1)	0°	B1	25.08	25.195	25.182	25.131	25.18
		B2	25.13	25.132	25.084	25.097	25.21
		B3	25.11	25.122	25.147	25.146	25.13
		B4	25.06	25.147	25.118	25.114	24.91
		B5	25.08	25.138	25.124	25.133	25.11
	45°	BB1	25.03	25.131	25.062	25.019	25.04
		BB2	25.10	25.156	25.133	25.073	25.12
		BB3	25.12	25.119	25.098	25.092	25.13
		BB4	25.10	25.131	25.134	25.140	25.10
		BB5	25.11	25.101	25.119	25.032	25.13
A 170g/m ² Style 284	0°	C1	25.22	25.234	25.256	25.278	25.19
		C2	25.20	25.259	25.255	25.229	25.24
		C3	24.51	24.106	24.238	24.364	23.70
		C4	25.20	25.325	25.473	25.418	25.21
	45°	CC1	25.10	25.307	25.331	25.268	25.15
		CC2	25.20	25.362	25.330	25.293	25.27
		CC3	25.31	25.409	25.482	25.397	25.30
		CC4	25.17	25.196	25.210	25.128	25.12
UD CST 150g/m ²	0°	D1	15.10	14.920	14.910	14.877	15.04
		D2	15.00	14.863	14.870	14.874	15.01
		D3	15.01	14.828	14.838	14.847	14.93
		D4	15.00	14.933	14.950	14.961	14.95
		D5	15.08	14.950	14.951	14.940	14.88
A220g/m ²	0°	L1	25.08	25.263	25.221	25.205	25.11
		L2	25.09	25.277	25.178	25.237	25.13
		L3	25.17	25.241	25.229	25.224	25.18
		L4	25.18	25.311	25.248	25.371	25.19
		L5	25.07	25.318	25.236	25.279	25.15
	45°	LL1	25.09	25.223	25.224	25.244	25.22
		LL2	25.22	25.248	25.195	25.262	25.17
		LL3	25.19	25.195	25.135	25.278	25.16
		LL4	25.11	25.177	25.212	25.141	25.13
		LL5	25.19	25.230	25.225	25.260	25.22
CC 245g/m ²	0°	K1	24.73	24.776	24.804	24.786	24.84
		K2	24.75	24.785	24.781	24.773	24.78
		K3	24.78	24.785	24.818	24.789	24.78
		K4	24.75	24.757	24.765	24.761	24.80
		K5	24.80	24.778	24.794	24.802	24.80
	45°	KK1	24.78	24.776	24.774	24.767	24.80
		KK2	24.79	24.732	24.781	24.787	24.82
		KK3	24.75	24.769	24.748	24.763	25.00
		KK4	24.80	24.801	24.789	24.785	24.90
		KK5	24.80	24.772	24.775	24.748	24.80

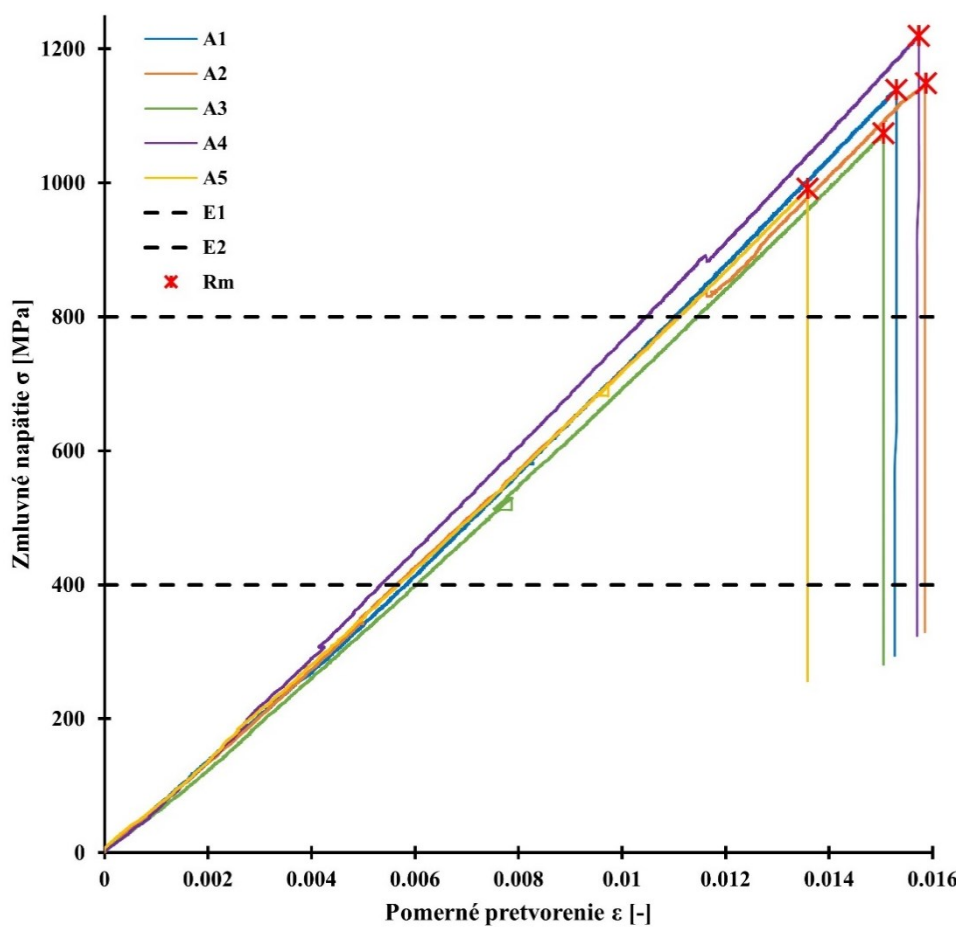
PRÍLOHA Č.3

III Oblasti kontrolovaných rozmerov (priemerné hodnoty a prierez plochy)

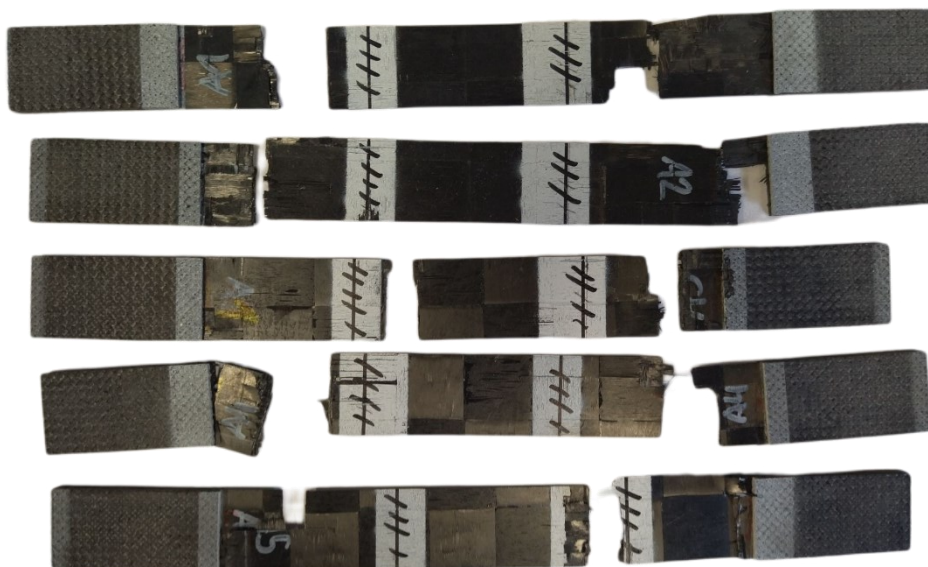
ASTM D3039/D3039M-14			$\bar{\tau}$	$\bar{\tau}$	\bar{w}	\bar{w}	S_0
Označenie výstuže	Orientácia vláknien	Označenie vzorku	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]
TeXtreme 160g/m ²	0°	A1	1.145	1.174	24.861	24.840	28.474
		A2	1.185		24.817		29.400
		A3	1.197		24.804		29.698
		A4	1.103		24.827		27.385
		A5	1.237		24.890		30.797
	45°	AA1	1.070	1.055	24.757	24.756	26.490
		AA2	1.034		24.816		25.668
		AA3	1.065		24.719		26.334
		AA4	1.032		24.712		25.495
		AA5	1.072		24.777		26.569
CK 170g/m ² (2:1)	0°	B1	2.050	2.027	25.169	25.134	51.589
		B2	1.982		25.104		49.748
		B3	2.046		25.138		51.433
		B4	2.021		25.126		50.789
		B5	2.035		25.132		51.151
	45°	BB1	1.937	1.954	25.071	25.103	48.562
		BB2	1.998		25.121		50.203
		BB3	1.964		25.103		49.294
		BB4	1.931		25.135		48.527
		BB5	1.938		25.084		48.621
A 170g/m ² Style 284	0°	C1	2.005	2.014	25.256	25.036	50.638
		C2	1.995		25.248		50.361
		C3	2.016		24.236		48.868
		C4	2.040		25.405		51.818
	45°	CC1	2.041	2.021	25.302	25.309	51.642
		CC2	1.981		25.328		50.175
		CC3	2.002		25.429		50.918
		CC4	2.060		25.178		51.858
UD CST 150g/m ²	0°	D1	1.565	1.531	14.902	14.901	23.327
		D2	1.521		14.869		22.611
		D3	1.502		14.838		22.281
		D4	1.531		14.948		22.890
		D5	1.534		14.947		22.924
A220g/m ²	0°	L1	2.287	2.289	25.230	25.256	57.700
		L2	2.292		25.231		57.820
		L3	2.301		25.231		58.066
		L4	2.278		25.310		57.648
		L5	2.285		25.278		57.768
	45°	LL1	2.220	2.216	25.230	25.217	56.020
		LL2	2.212		25.235		55.820
		LL3	2.218		25.203		55.908
		LL4	2.211		25.177		55.657
		LL5	2.220		25.238		56.038
CC 245g/m ²	0°	K1	1.405	1.398	24.789	24.784	34.820
		K2	1.408		24.780		34.890
		K3	1.396		24.797		34.617
		K4	1.392		24.761		34.467
		K5	1.391		24.791		34.493
	45°	KK1	1.425	1.430	24.772	24.771	35.292
		KK2	1.447		24.767		35.829
		KK3	1.430		24.760		35.399
		KK4	1.421		24.792		35.221
		KK5	1.428		24.765		35.356

PRÍLOHA Č.4

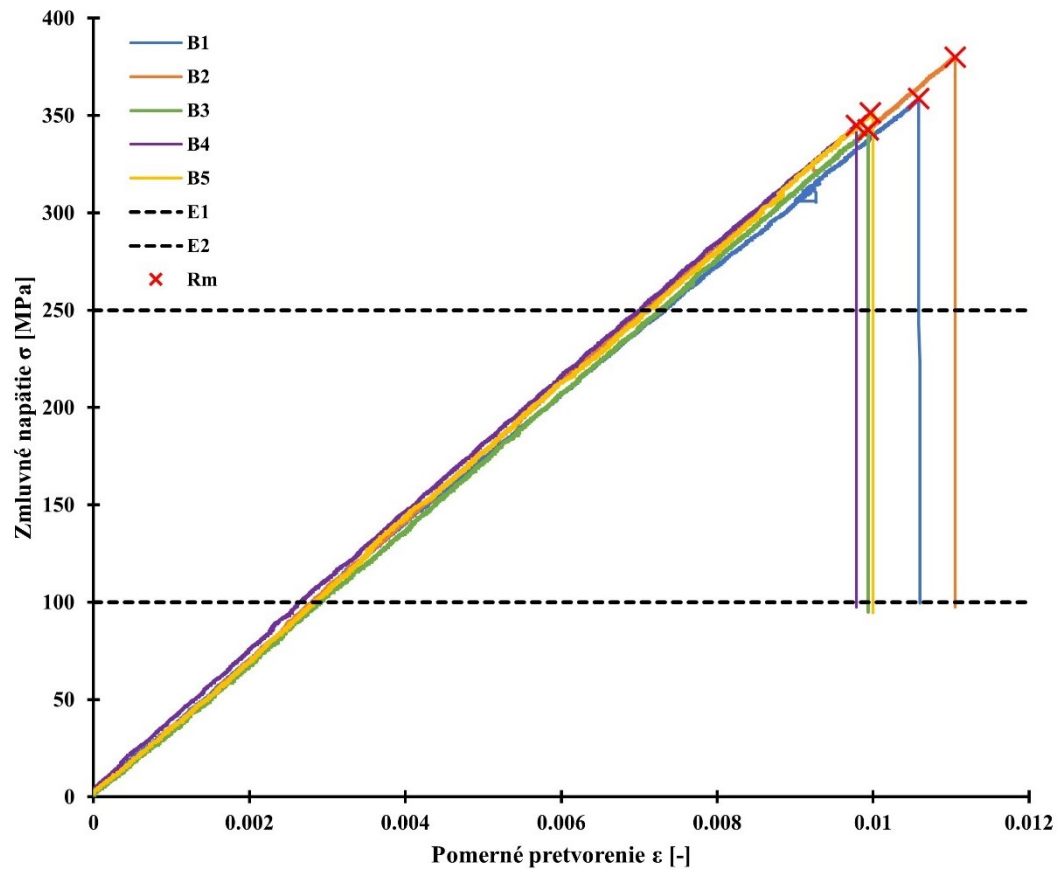
IV Vzorka A (graf)



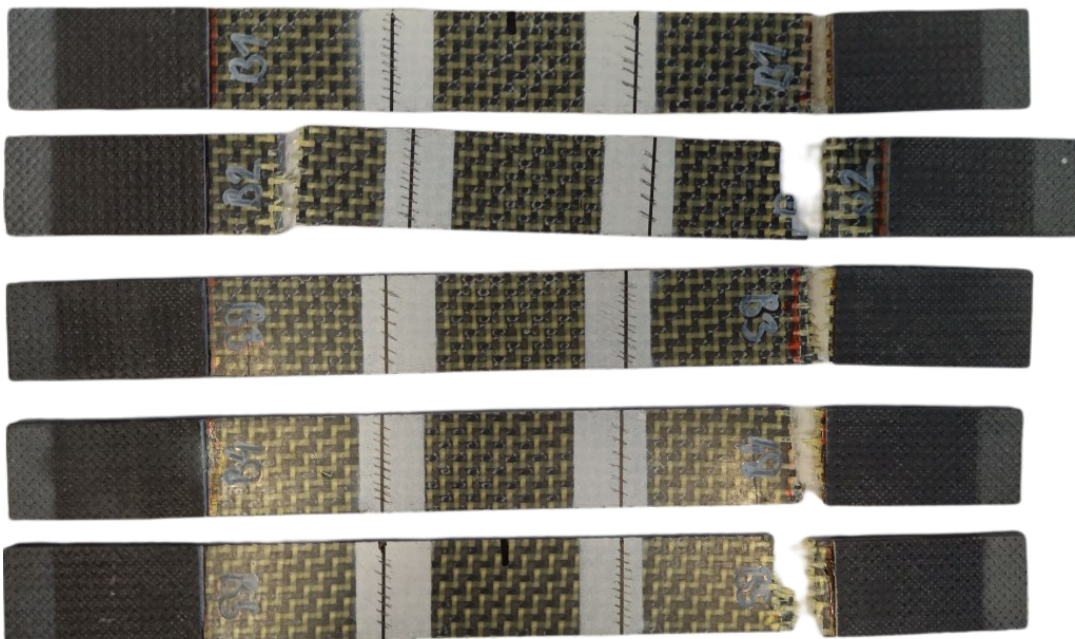
IV Vzorka A (po ukončení pôsobiaceho zaťaženia)



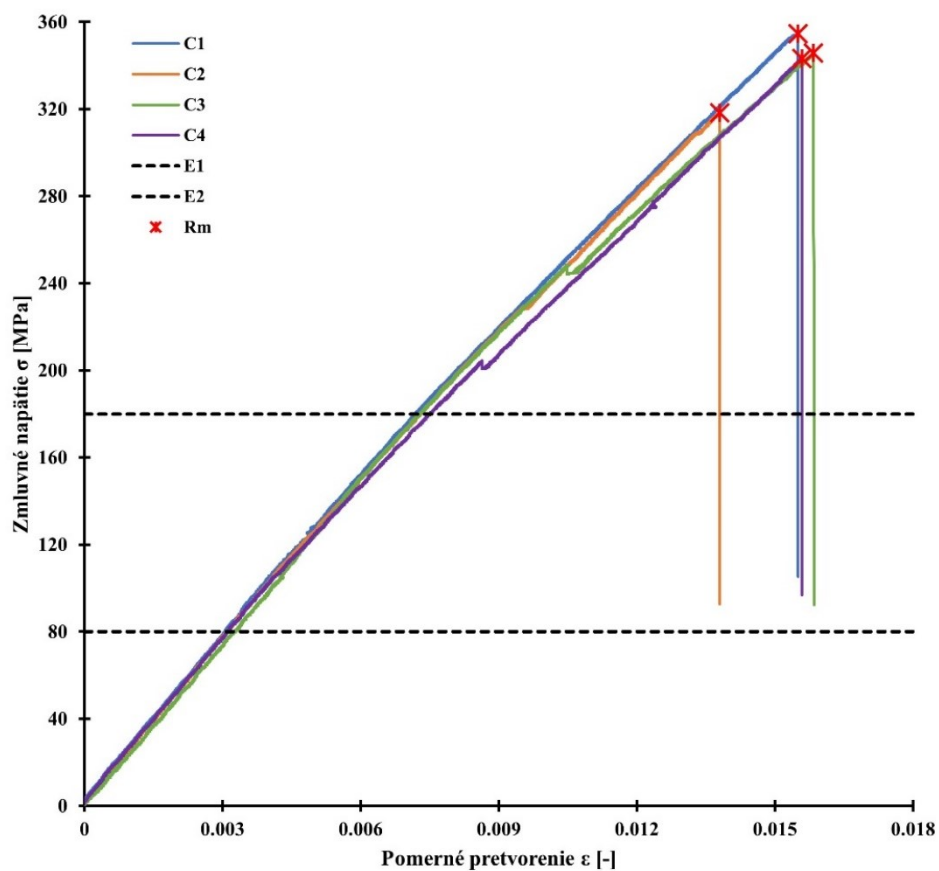
IV Vzorka B (graf)



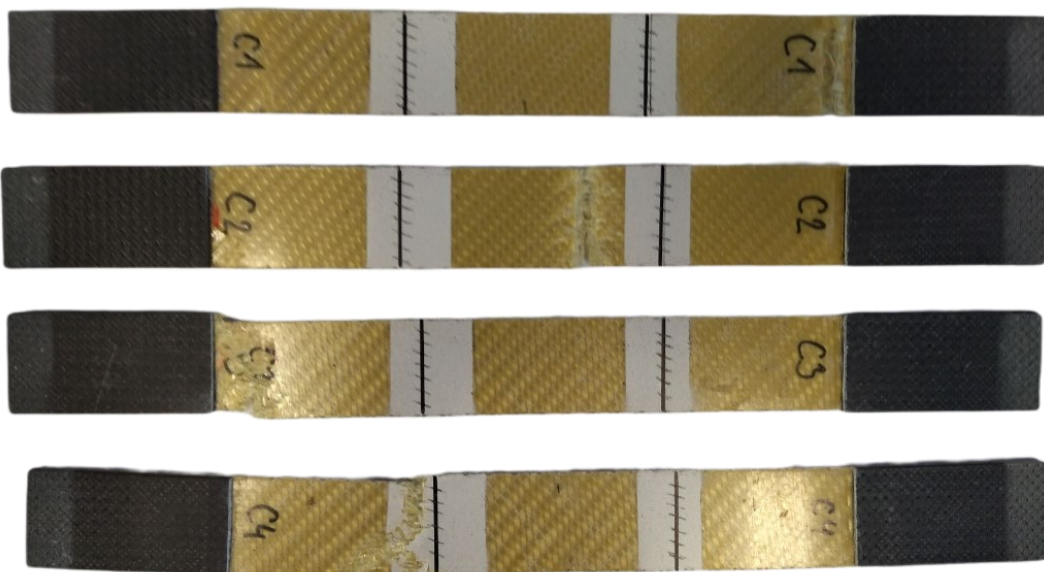
IV Vzorka B (po ukončení pôsobiaceho zat'azenia)



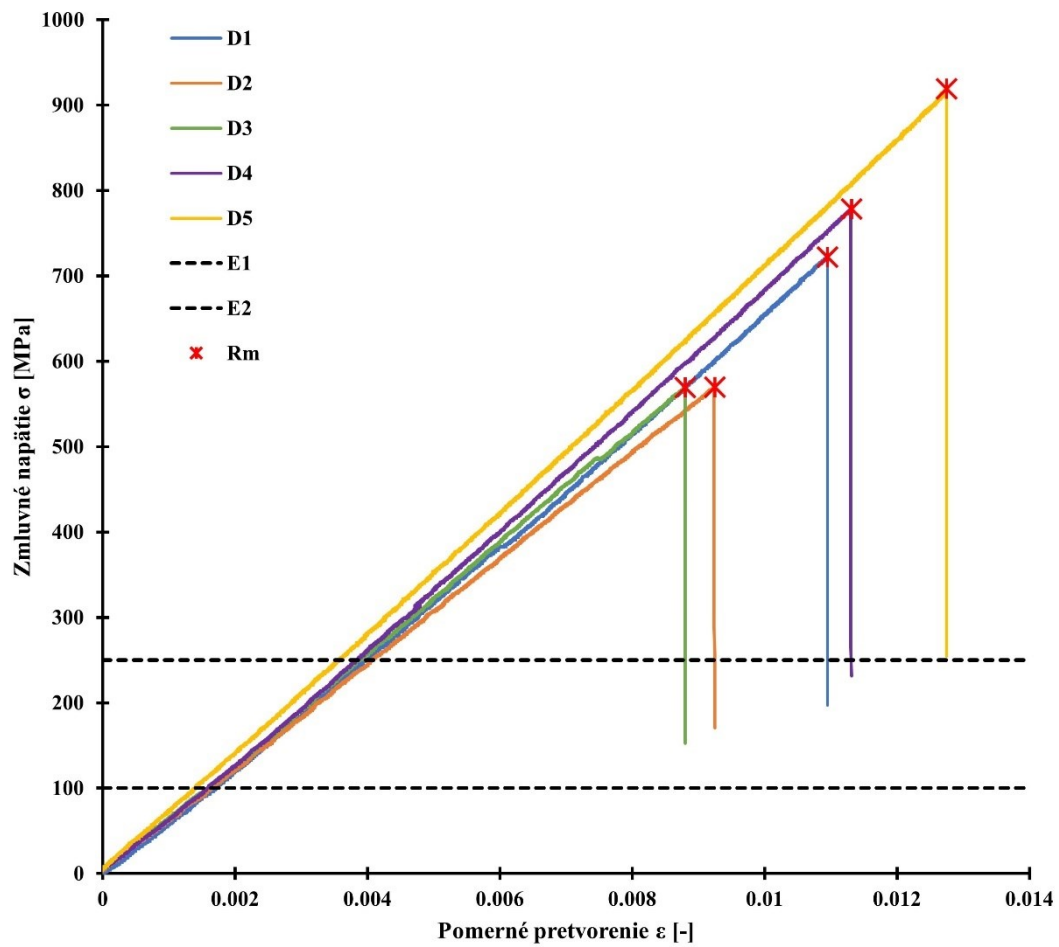
IV Vzorka C (graf)



IV Vzorka C (po ukončení pôsobiaceho zaťaženia)



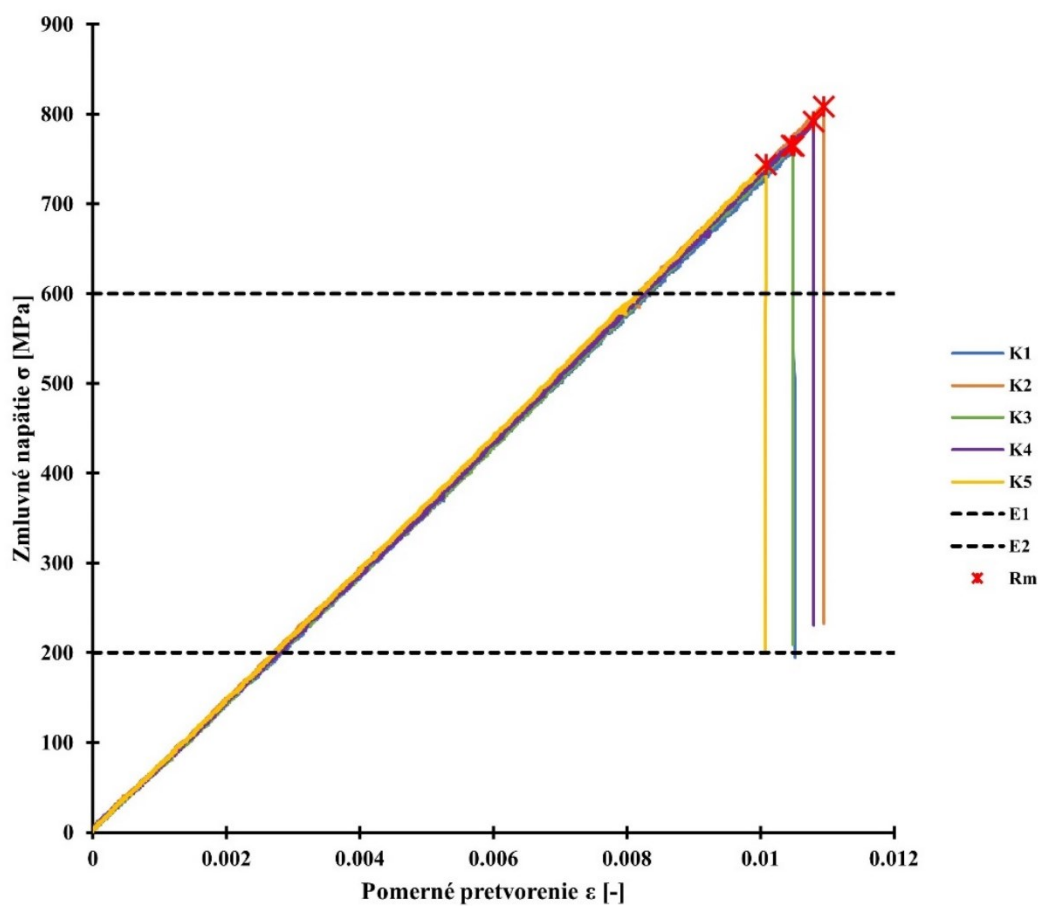
IV Vzorka D (graf)



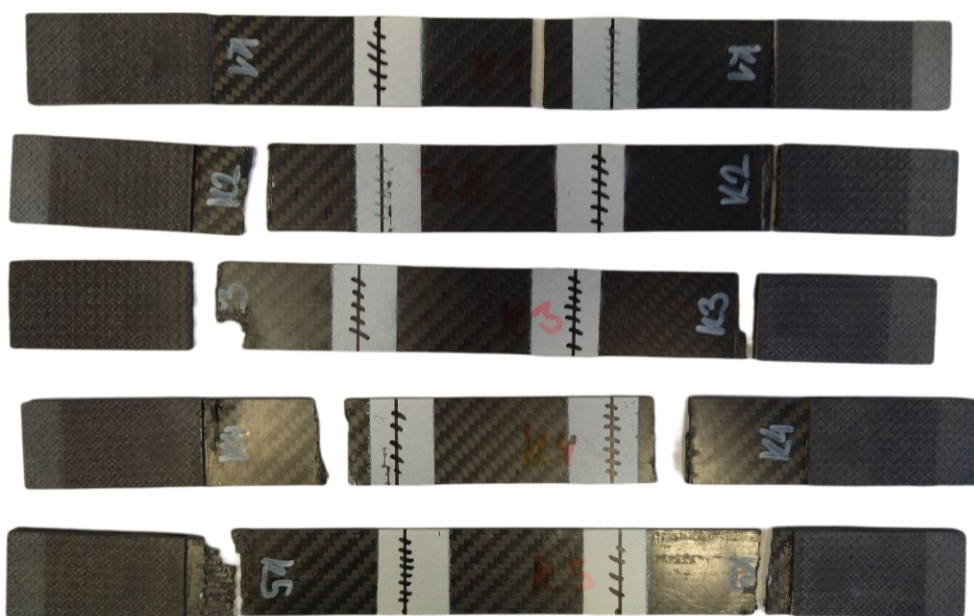
IV Vzorka D (po ukončení pôsobiaceho zaťaženia)



IV Vzorka K (graf)



IV Vzorka K (po ukončení pôsobiaceho zaťaženia)

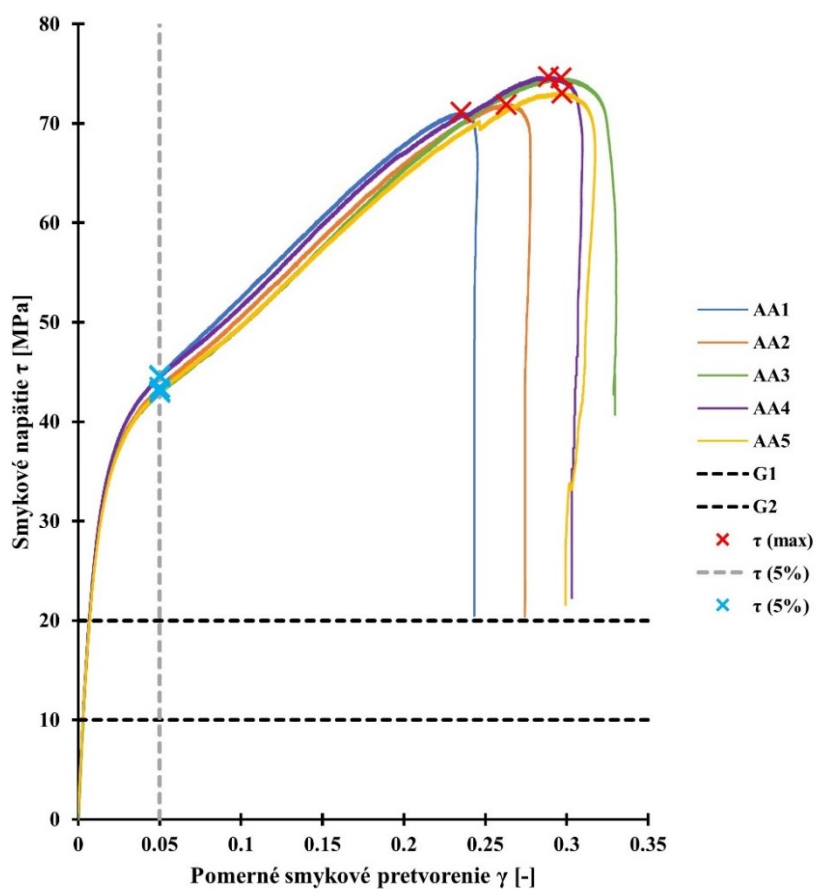


IV Rozbor mechanických vlastností vzoriek v orientácii 0 ° a 90 °

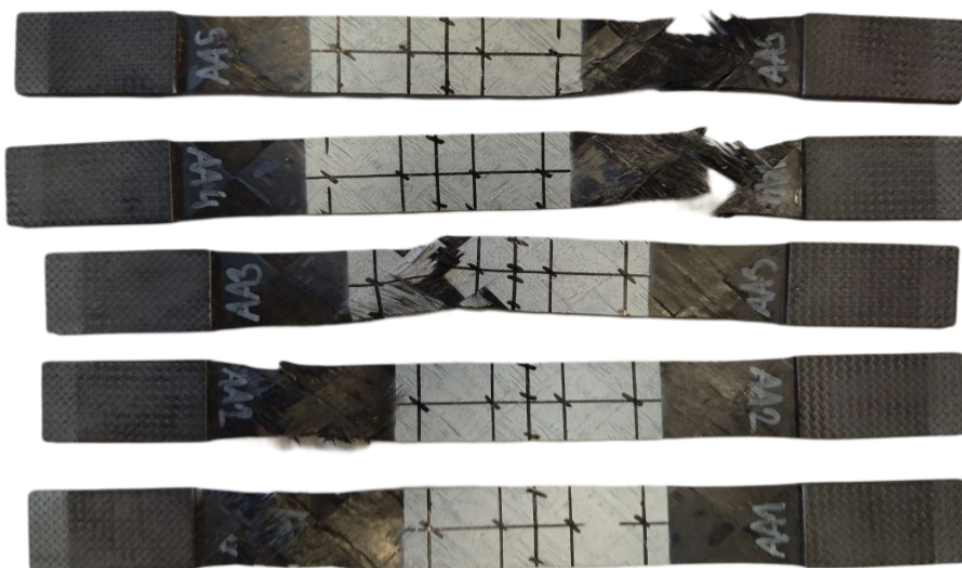
ASTM D3039/D3039M-17		Označenie vzorku	E [GPa]	E (x) [GPa]	s (n-1) [GPa]	Rm [MPa]	Rm (x) [MPa]	s (n-1) [MPa]
Označenie výstuže	Orientácia vlákien							
TeXtreme 160g/m ²	0°	A1	76 978,440	76 580,960	+-2 838,994	1 138,407	1 114,381	85,802
		A2	73 575,940			1 148,690		
		A3	73 903,160			1 074,045		
		A4	78 245,540			1 219,189		
		A5	80 201,730			991,574		
CK 170g/m ² (2:1)	0°	B1	33 117,290	34538,044	+-864,722	358,788	355,562	+-15,055
		B2	35 474,551			380,045		
		B3	34 621,060			342,766		
		B4	34 684,198			344,799		
		B5	34 793,122			351,411		
A 170g/m ² Style 284	0°	C1	23 948,331	23 450,961	+-796,577	354,694	340,540	+-15,553
		C2	23 629,900			318,391		
		C3	23 948,133			345,727		
		C4	22 277,489			343,346		
UD CST 150g/m ²	0°	D1	64 764,320	66 435,750	+-3 603,045	722,039	711,636	+-148,403
		D2	61 816,890			569,656		
		D3	65 426,320			569,095		
		D4	69 593,050			778,200		
		D5	70 548,180			919,189		
A220g/m ²	0°	L1	23 924,358	24 924,358	+-567,123	408,657	406,350	+-8,687
		L2	25 097,600			413,257		
		L3	25 063,620			391,170		
		L4	25 287,29			408,783		
		L5	25 248,940			409,881		
CC.245g/m ²	0°	K1	72 619,550	73 012,840	+-649,587	764,704	774,741	+-25,458
		K2	72 364,580			808,570		
		K3	72 726,030			764,913		
		K4	73 404,600			791,772		
		K5	73 949,429			743,745		

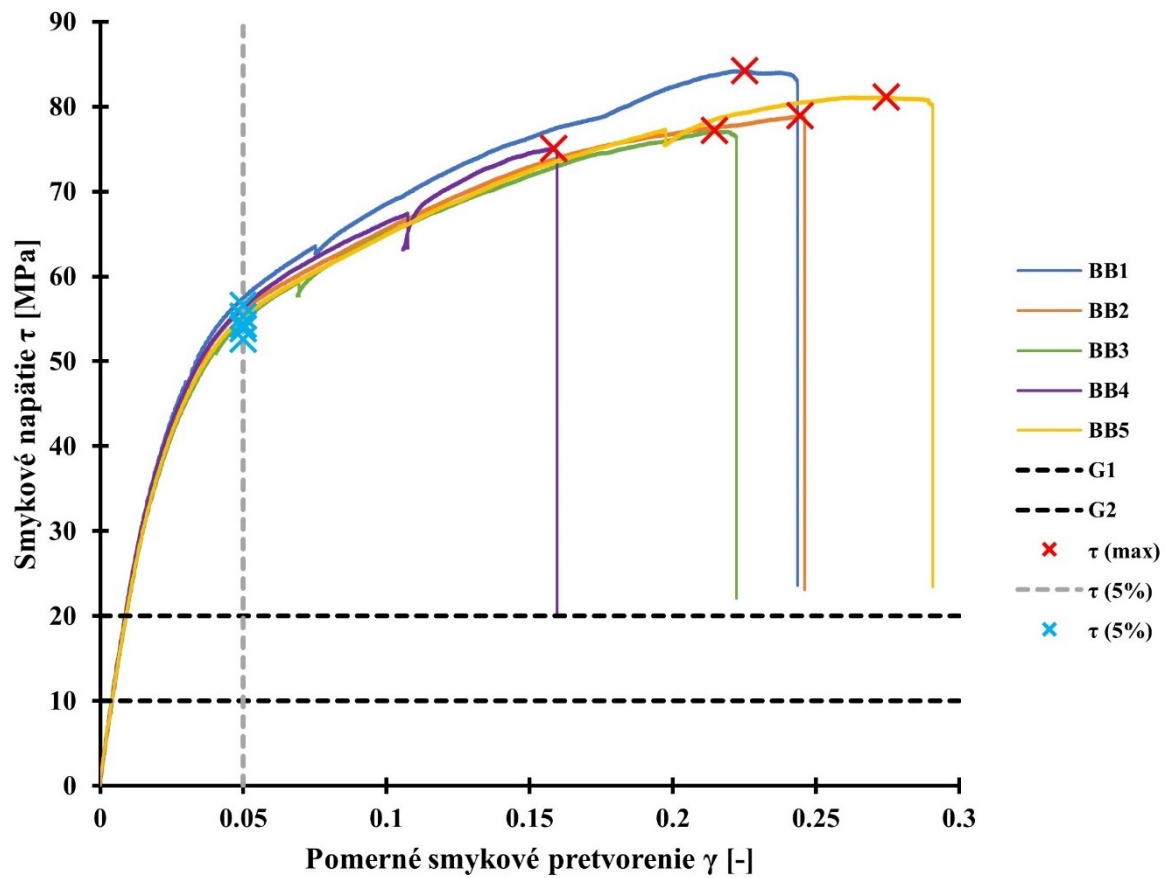
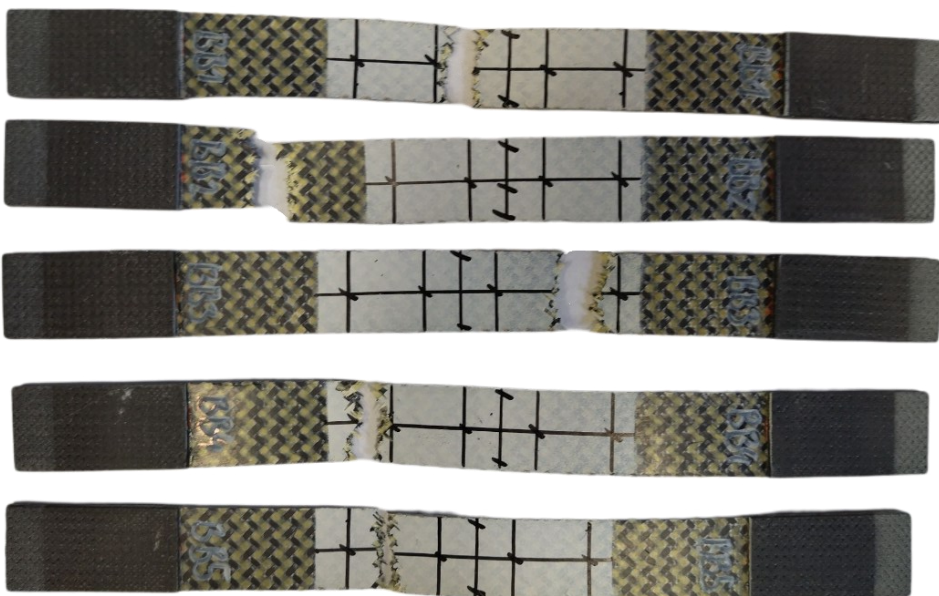
PRÍLOHA Č.5

V Vzorka AA (graf)

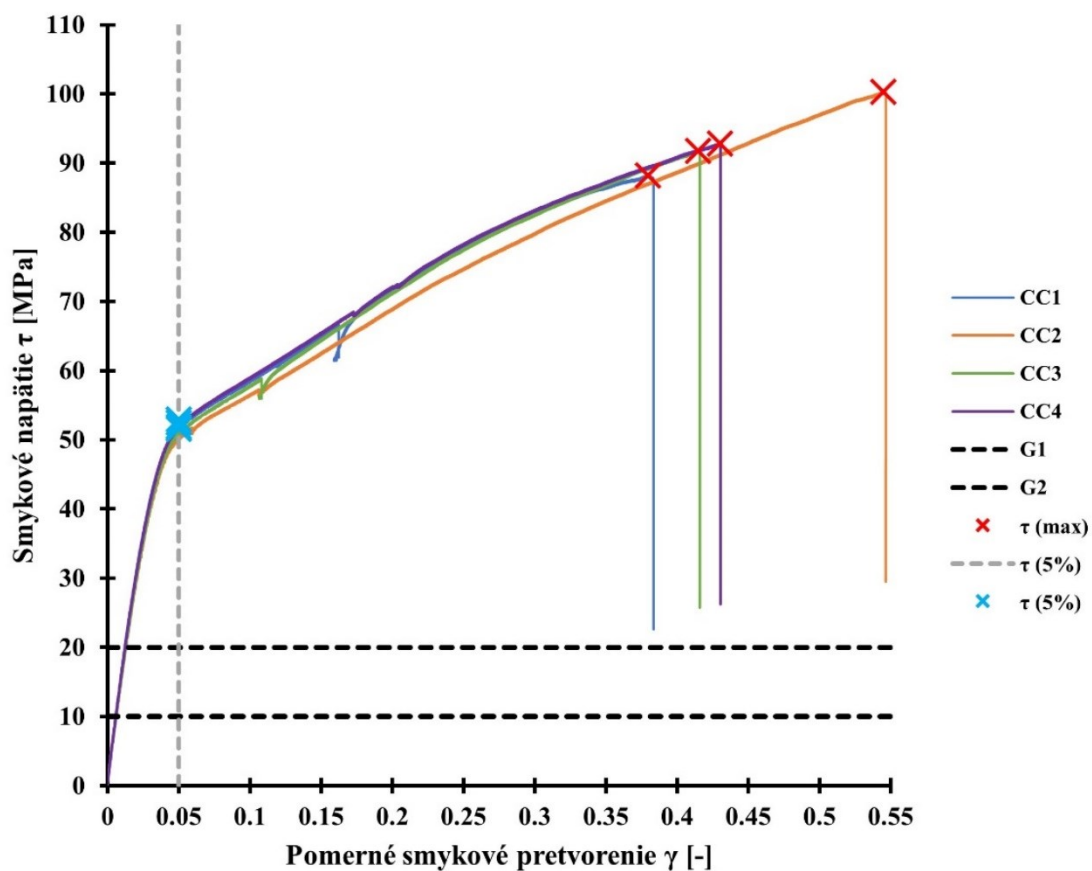


V Vzorka AA (po ukončení pôsobiaceho zaťaženia)

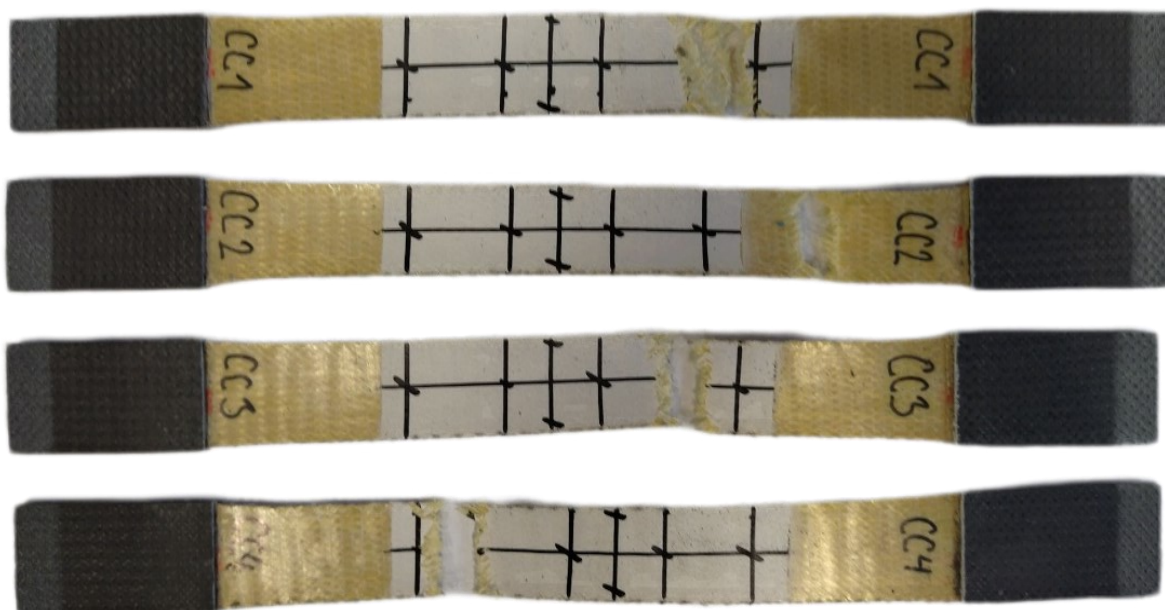


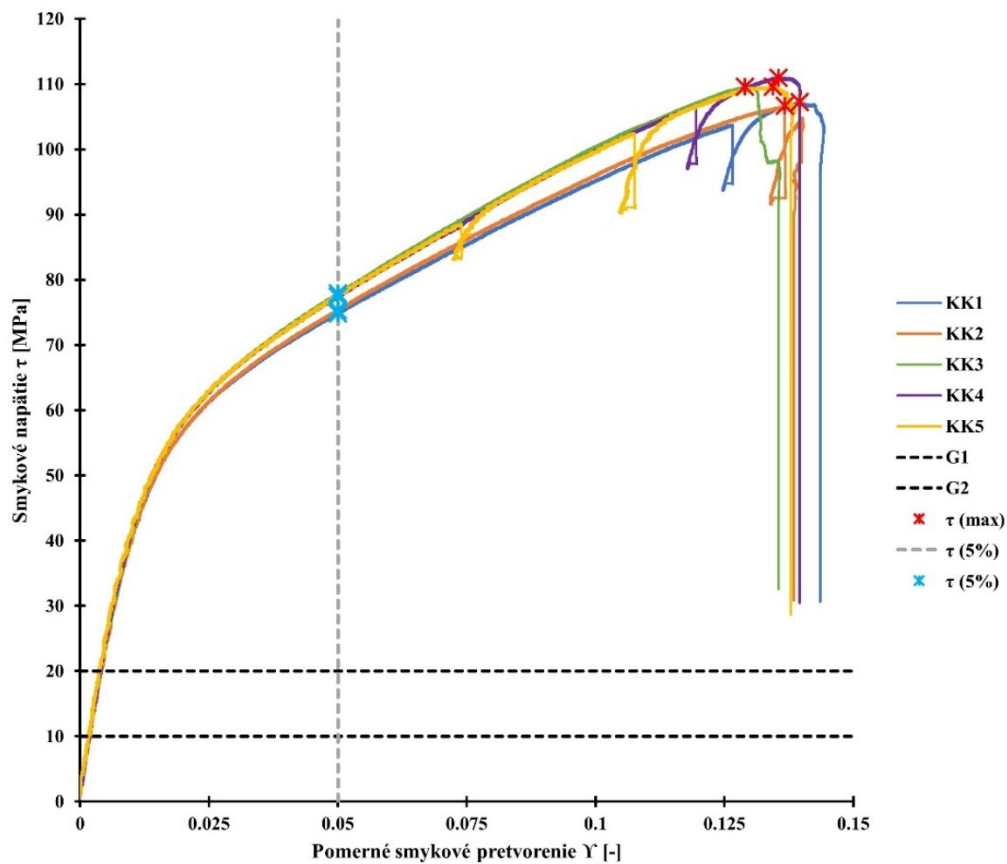
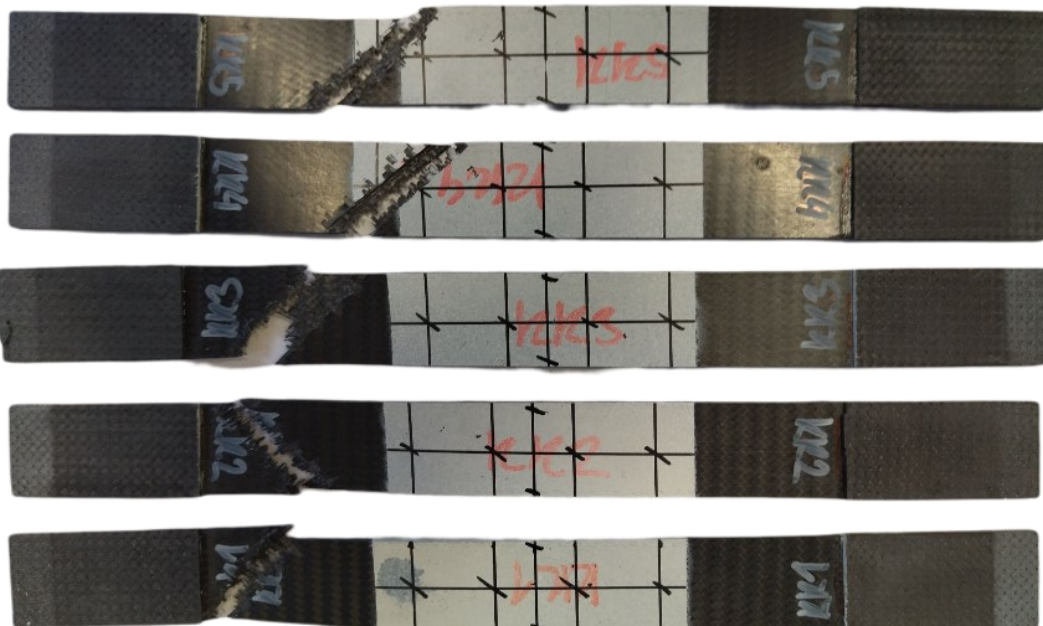
V Vzorka BB (graf)

V Vzorka BB (po ukončení pôsobiaceho zaťaženia)


V Vzorka CC (graf)



V Vzorka BB (po ukončení pôsobiaceho zaťaženia)



V Vzorka KK (graf)

V Vzorka KK (po ukončení pôsobiaceho zaťaženia)


V Rozbor mechanických vlastností vzoriek v orientácii 45 °

ASTM D3518/D3518M - 18		Orientácia vlákién	Označenie vzorku	Tau 5%	Tau 5% (x̄)	s(n-1)	Tau max	Tau max (x̄)	s(n-1)	G	G (x̄)	s(n-1)
Označenie výstuže	[MPa]			[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
TexTreme 160g/m ²	AA1	45°	AA1	44,654	43,737	+0,809	71,131	73,073	+1,584	2 643,391	2571,96	+75,011
	AA2			43,472			71,918			2 527,463		
	AA3			42,941			74,571			2 560,433		
	AA4			44,540			74,711			2 651,367		
	AA5			43,080			73,036			2 477,161		
CK 170g/m ² (2:1)	BB1	45°	BB1	54,360	54,560	1,494	84,258	79,324	3,558	1959,51	2 007,394	86,162
	BB2			56,591			78,940			2116,37		
	BB3			52,638			77,195			1889,51		
	BB4			53,871			75,056			2032,83		
	BB5			55,340			81,169			2038,75		
A 170g/m ² Style 284	CC1	45°	CC1	52,460	52,225	+0,594	88,239	93,272	+5,059	1627,011	1550,255	+51,581
	CC2			51,890			100,270			1533,790		
	CC3			52,940			91,760			1521,129		
	CC4			51,610			92,821			1519,088		
CC 245g/m ²	LL1	45°	LL1	-	-	-	34,854	34,732	+0,382	1 637,92	1641,155	9,254
	LL2			-			34,217			1639,25		
	LL3			-			34,727			1633,01		
	LL4			-			35,120			1654,44		
	LL5			-			35,846			1710,29		
CC 245g/m ²	KK1	45°	KK1	74,820	76,584	1,400	107,234	108,807	+1,806	4403,84	4 548,721	128,463
	KK2			75,340			106,659			4646,86		
	KK3			77,920			109,586			4426,94		
	KK4			77,450			110,992			4576,59		
	KK5			77,390			109,564			4689,37		

PRÍLOHA Č.6

Preukázanie splnenia pravidla T 3.4.3

Splnenie pravidla T3.4.3						
Štruktúra	Typ počahu	Hmotnosť vlákien v lamináte [g]	Orientácia vlákien v lamináte [°]	Maximálny podiel paralelných vlákien voči všetkým vláknam v danom lamináte	Maximálny podiel v štruktúre	
Vzorka č.3	Vonkajší	33,41	0	14,74 g	44,13 %	46,27 % [°]
			90	8,57 g	25,63 %	
			45	5,05 g	15,12 %	
			-45	5,05 g	15,12 %	
Vzorka č.3	Vnútorň	30,33	0	14,75 g	48,64 %	46,27 % [°]
			90	8,56 g	28,22 %	
			45	3,51 g	11,57 %	
			-45	3,51 g	11,57 %	
Vzorka č.7	Vonkajší	37,74	0	17,43 g	46,18 %	47,28 % [°]
			90	5,05 g	13,38 %	
			45	7,63 g	20,22 %	
			-45	7,63 g	20,22 %	
Vzorka č.7	Vnútorň	30,32	0	14,75 g	48,64 %	47,28 % [°]
			90	8,55 g	28,20 %	
			45	3,51 g	11,58 %	
			-45	3,51 g	11,58 %	
Vzorka č.9	Vonkajší	56,72	0	27,54 g	48,55 %	48,55 % [°]
			90	15,16 g	26,73 %	
			45	7,01 g	12,36 %	
			-45	7,01 g	12,36 %	
Vzorka č.9	Vnútorň	56,72	0	27,54 g	48,55 %	48,55 % [°]
			90	15,16 g	26,73 %	
			45	7,01 g	12,36 %	
			-45	7,01 g	12,36 %	