

# Experimentální a modelové studium mechanického chování sendvičových stěn

Bc. Pavol Šatka

---

Diplomová práce  
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2017/2018

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavol Šatka**  
Osobní číslo: **T16271**  
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Experimentální a modelové studium mechanického chování sendvičových stěn**

Zásady pro vypracování:

1. Sestavte lineární studii na dané téma
2. Vytvořte program pro výpočet ohybové napjatosti v závislosti na materiálových a geometrických parametrech sendvičové struktury
3. Na základě vytvořeného programu stanovte teoretické závislosti stupně bimodularity nosných laminátových potahů, počtu lamin a tuhosti jádra
4. Experimentálně vyšetřete hodnoty ohybové únosnosti s vyloučením vlivu indentace v místech podpor a vlivu smykové poddajnosti jádra
5. Dosažené výsledky vyhodnoťte

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího diplomové práce**

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Oldřich Šuba, CSc.**

Ústav výrobního inženýrství

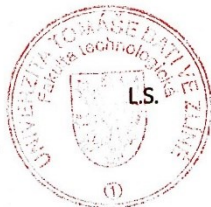
Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **18. května 2018**

Ve Zlíně dne 1. února 2018



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.  
*děkan*



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

Příjmení a jméno: Šatka Pavol

Obor: VI

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 17. 5. 2018



<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Diplomová práca sa zaoberá štúdiou medzných stavov - únosností daných komerčných sendvičových štruktúr. Zistené hodnoty únosnosti boli konfrontované s analytickými výsledkami a s konečneprvkovými modelmi.

Práca je zložená z dvoch častí. Teoretická časť je venovaná základnému rozdeleniu, zloženiu a vlastnostiam sendvičových štruktúr. Ďalej sú v tejto časti popísané najčastejšie používané výrobné technológie. Teoretická časť je zakončená zhrnutím určitých druhov testov, ktorými sa zisťujú mechanické vlastnosti sendvičových štruktúr.

Praktická časť je venovaná samotnému meraniu pevnosti v ohybu sendvičových vzoriek a zachytávaniu ich chovania vysokorýchlostnou kamerou. Výsledky sú ďalej vyhodnotené a porovnávané s výsledkami vypočítaných z FEM modelov, ktoré zobrazujú teoretické chovanie sendvičov s ideálnou súdržnosťou vrstiev.

**Kľúčové slová:** Sendvičový panel, štvorbodový ohyb, únosnosť, deformácia, stabilita

## **ABSTRACT**

The diploma thesis contains study of limit strength of given commercial sandwich structures. The values of strength were compared with analytical results and with finite-element models.

Thesis consist of two parts. The theoretical part is devoted to the basic properties and composition of sandwich structures. Furthermore, the most commonly used production technologies are described. The theoretical part is finished with summary of mechanical testing methods of sandwich structures.

The practical part is focused on measuring the strength of sandwich samples and capturing their behavior with a high-speed camera. The results are further evaluated and compared with the results calculated from the FEM model, which shows theoretical behavior of sandwich with ideal layer – core bonding.

**Keywords:** Sandwich structure, four-point bending, strength, deformation, buckling

Touto cestou by som rád poďakoval svojmu vedúcemu diplomovej práce doc. Ing. Oldřichovi Šubovi, CSc. za vynikajúce odborné poradenstvo, ochotu a čas, ktorý mi venoval pri písaní tejto diplomovej práce. Ďalej by som rád poďakoval doc. Dr. Ing. Vladimírovi Patovi za jeho pomoc pri testovaní a vyhodnocovaní nameraných výsledkov testovania. Taktiež by som rád poďakoval svojej snúbenici za jej podporu pri písaní tejto práce.

Prehlasujem, že odovzdaná verzia diplomovej práce a verzia elektronická nahraná do IS/STAG sú totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>11</b>
<b>1 CHARAKTERISTIKA SENDVIČOVÝCH ŠTRUKTÚR.....</b>	<b>12</b>
1.1 VLASTNOSTI SENDVIČOVÝCH ŠTRUKTÚR .....	12
1.1.1 Mechanické vlastnosti a druhy porušení .....	13
1.2 VONKAJŠIE VRSTVY SENDVIČOVÝCH ŠTRUKTÚR .....	14
1.2.1 Kovové materiály pot'ahov.....	14
1.2.2 Nekovové materiály pot'ahov.....	16
1.3 DRUHY SENDVIČOVÝCH JADIER.....	18
1.3.1 Jadro z balzového dreva .....	18
1.3.2 Voštinové jadro .....	20
1.3.3 Jadro z polymérnych pien .....	23
<b>2 SPÔSOBY VÝROBY SENDVIČOVÝCH ŠTRUKTÚR.....</b>	<b>28</b>
2.1 RUČNÉ LAMINOVANIE .....	28
2.2 LISOVANIE PREPREGOV .....	29
2.3 ADHÉZNE SPOJENIE VONKAJŠICH VRSTIEV S JADROM .....	31
2.4 KONTINUÁLNA VÝROBA .....	32
<b>3 TESTOVANIE SENDVIČOVÝCH ŠTRUKTÚR.....</b>	<b>34</b>
3.1 OHYBOVÁ SKÚŠKA .....	34
3.1.1 Trojbodová skúška ohybom .....	35
3.1.2 Štvorbodová skúška ohybom .....	36
3.2 SKÚŠKA ODLUPOVANIA VONKAJŠICH VRSTIEV .....	36
3.2.1 Skúška odlupovania pomocou navíjacieho bubnu .....	37
3.2.2 Single Cantilever Beam – SCB .....	38
3.2.3 Testovanie pomocou tlaku vzduchu .....	38
3.3 TLAKOVÁ SKÚŠKA.....	39
3.4 SKÚŠKA NÍZKO-RÝCHLOSTNÝM PRIERAZOM.....	40
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>42</b>
<b>4 CIELE DIPLOMOVEJ PRÁCE.....</b>	<b>43</b>
<b>5 VYTVORENIE PROGRAMU .....</b>	<b>44</b>
<b>6 TESTOVANIE SENDVIČOVÝCH PANELOV .....</b>	<b>45</b>
6.1 SKÚŠKA TLAKOM .....	45
6.1.1 Skúšobné vzorky .....	46
6.1.2 Priebeh merania.....	46
6.1.3 Namerané hodnoty .....	47
6.2 ŠPECIÁLNA SKÚŠKA ŠTVORBODOVÝM OHYBOM .....	48
6.2.1 Skúšobné vzorky .....	51
6.2.2 Postup merania .....	52



6.2.3	Výsledky merania.....	54
6.3	TEORETICKÝ VÝPOČET .....	72
6.3.1	Vzorka č. 1 .....	72
6.3.2	Vzorka č. 2 .....	73
6.3.3	Vzorka č. 3 .....	73
6.4	VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV .....	74
6.5	DISKUSIA VÝSLEDKOV .....	77
<b>ZÁVER .....</b>		<b>78</b>
<b>ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY .....</b>		<b>79</b>
<b>ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK.....</b>		<b>83</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>		<b>84</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>		<b>88</b>

## ÚVOD

V dnešnej dobe sú kompozitné materiály stále viac využívané vo všetkých odvetviach priemyslu. Je to hlavne vďaka tomu, že sendvičová konštrukcia dosahuje jeden z najlepších pomerov hmotnosti k pevnosti a hmotnosti k tuhosti. Základným predpokladom vytvorenia sendvičovej konštrukcie je použitie tenkého, pevného a hustého materiálu na vonkajšie vrstvy, ktoré sú spojené s ľahkým jadrom vyrobeným z dreva (balza), papieru (voštiny) alebo polymérnych pien. Sendviče všeobecne poskytujú množstvo výhod, ako napríklad dobré mechanické vlastnosti, nízke dielektrické vlastnosti, nízku tepelnú vodivosť, dobré akustické vlastnosti, malú plochu prierezu a mnoho ďalších.

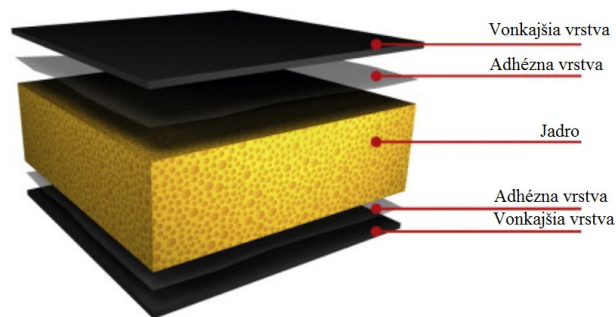
V teoretickej časti je priblížené základné rozdelenie a vlastnosti, či už vonkajších vrstiev alebo jadier sendvičových štruktúr. Okrem toho sú spomenuté aj niektoré základné technológie výroby ale aj základné druhy mechanického testovania.

Praktická časť sa zaoberá meraním medzného momentu – únosnosti sendvičových vzoriek pri testovaní pomocou špeciálnej skúšky štvorbodovým ohybom a porovnávaním výsledkov s teoretickými hodnotami získanými z FEM modelu. Zároveň je hodnotená aj kvalita sendvičových vzoriek pomocou snímkov zachytenými vysokorýchlostnou kamerou. Výsledky sú zhodnotené na konci praktickej časti a v závere tejto práce.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 CHARAKTERISTIKA SENDVIČOVÝCH ŠTRUKTÚR

Sendviče sú vo všeobecnosti ponímané ako tvarové, ľahké materiály pre rôzne konštrukcie použiteľné v rôznych odvetviach priemyslu. Skôr ako materiály s jedinečnými mechanickými vlastnosťami sú to štruktúry, ktoré musia byť navrhnuté pre konkrétne použitie. Ich zloženie je obmedzené len dostupnosťou materiálov a vynaliezavosťou inžiniera. Základnou koncepciou sendvičovej konštrukcie je použitie tenkých, tuhých vonkajších vrstiev spojených s hrubším ale zároveň ľahkým jadrom (Obr. 1). [1, 2]



Obr. 1: Sendvičová konštrukcia [3]

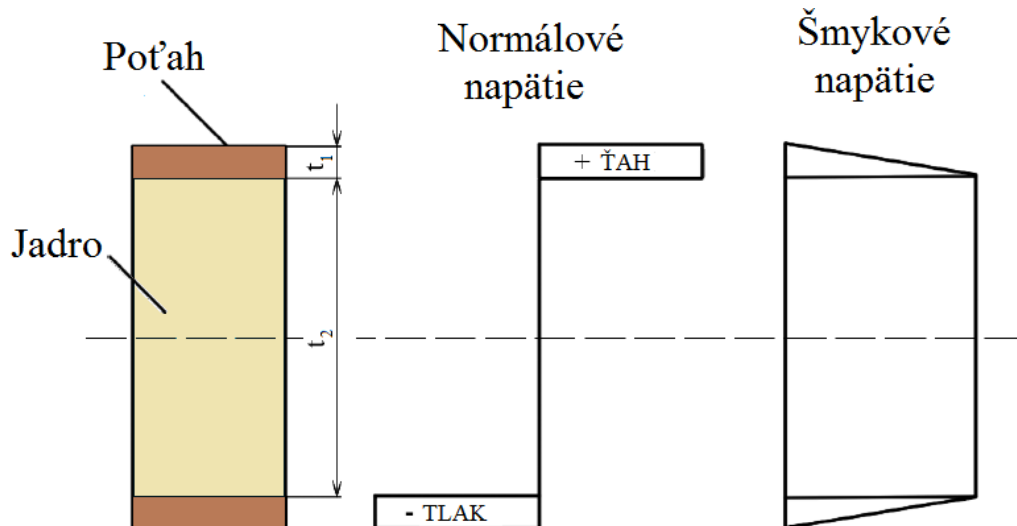
Každá časť sendvičovej konštrukcie je sama o sebe relatívne slabá a pružná. Spojenie týchto častí dohromady však vytvorí extrémne tuhú, pevnú a ľahkú štruktúru. V týchto konštrukciách sa predpokladá, že vonkajšie vrstvy prenášajú ohybové zaťaženie (jedna strana je namáhaná na tlak, druhá na ťah) a jadro šmykové zaťaženie. Vonkajšie vrstvy bývajú najčastejšie vyrobené z rovnakého materiálu (drevo, plasty, kovy), majú rovnakú orientáciu vlákien a hrúbku. Najdôležitejšie materiály pre výrobu jadier sú balza, voština alebo polymérna pena. Jednotlivé časti konštrukcie sú najčastejšie spojené pomocou epoxidovej adhéznej vrstvy, ktorá je nanosená medzi jadrom a vonkajšími vrstvami. Sendvičové štruktúry sa používajú v rôznych aplikáciách ako sú napríklad satelity, lietadlá, lode, automobily, interiéry železničných vozňov, veterné elektrárne a mostných konštrukciách. [1, 2, 4]

### 1.1 Vlastnosti sendvičových štruktúr

Vlastnosti sendvičových štruktúr určuje prevažne materiál jadra. Najväčšou výhodou sendvičových konštrukcií je ich vysoká ohybová pevnosť a tuhosť pri relatívne nízkej hmotnosti. Medzi ďalšie výhody však patrí ich únavová odolnosť, odolnosť proti rázom a šíreniu trhlín, tepelná odolnosť a ohňovzdornosť, tlmenie hluku alebo tepelná a akustická izolácia. [2, 5]

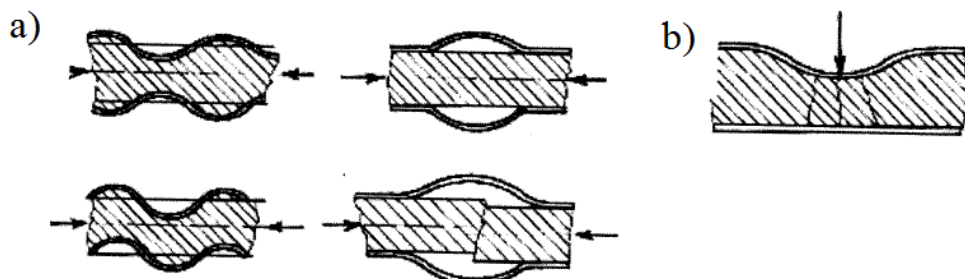
### 1.1.1 Mechanické vlastnosti a druhy porušení

Na rozdiel od homogénnych výrobkov nie je výsledná únosnosť sendviču v ohybe daná iba materiálou charakteristikou – pevnosťou, ale je výslednicou zložitého mechanického chovania sendvičovej štruktúry.



Obr. 2: Rozloženie napätia po priereze (za predpokladu  $E_c \ll E_f$  a  $t_f \ll t_c$ ) [6]

Únosnosť sendvičov závisí na geometrických, materiálových a technologických parametroch. Je obmedzená poruchami rôzneho typu. Vonkajšie nosné vrstvy sendviču predstavujú v podstate tenkostenné prvky, uložené na pružnom poklade jadra. Sú teda náchylné k určitým formám straty stability. Tieto porušenia môžu nastať separáciou nosných vrstiev a jadra a ich vzájomným porušením (Obr. 3a). Pri pôsobení osamelých priečnych zaťažení môže dochádzať k miestnym poškodeniam v dôsledku stlačenia, prípade porušenia jadra. Tým sa zníži únosnosť sendviču v týchto miestach (Obr. 3b). [7]



Obr. 3: Druhy porušení sendvičových štruktúr [7]

Za určitých podmienok je podľa literatúry [7] ohybová tuhosť sendvičových prvkov daná výrazom (1). Prvá podmienka hovorí, že modul pružnosti pot'ahu  $E_l$  musí byť oveľa väčší

ako modul pružnosti jadra  $E_2$ . Druhá podmienka hovorí, že hrúbka jadra  $t_2$  musí byť výrazne väčšia ako hrúbka vonkajších vrstiev (poťahov)  $t_1$ .

$$K_0 = E_1 \cdot \frac{b \cdot h^2 \cdot t_1}{2} \quad (1)$$

Celková deformácia sendvičových štruktúr je však zložená jak zo zložky ohybovej, tak zo zložky šmykovej. Ohybová zložka deformácie je závislá na veľkosti modulu pružnosti v tlaku/táhu poťahov  $E_1$  a šmyková zložka je závislá na module pružnosti v šmyku jadra  $G_2$ . Celkový priehyb nosníku je tak daný vzťahom (2). [7]

$$y = y_M + y_T = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot K_0} + \frac{F \cdot l}{G_2 \cdot b \cdot t_2} \quad (2)$$

## 1.2 Vonkajšie vrstvy sendvičových štruktúr

Poťahy sú vonkajšími vrstvami sendvičových štruktúr. Sú tenké, ale veľmi tuhé v porovnaní s jadrom. Ako vonkajšie vrstvy sú vystavené účinkom vonkajšieho prostredia a z tohto dôvodu musia spĺňať určité požiadavky ako napríklad:

- Vysoká tuhosť v ohybe a vysoká pevnosť v ťahu a tlaku
- Odolnosť a vhodná povrchová úprava vzhľadom k prostrediu (oxidácia, teplo, atď.)
- Odolnosť voči nárazu a opotrebeniu

Poťahové materiály môžu byť rozdelené do dvoch skupín – kovové a nekovové materiály alebo ich kombinácia (hybridné lamináty). [2, 8]

### 1.2.1 Kovové materiály poťahov

Najbežnejšie používané materiály pre kovové poťahy sú ocele, nerezové ocele a zliatiny hliníka. Medzi výhody tohto typu poťahov patrí vysoká tuhosť a pevnosť, nízka cena, kvalitný povrch a vysoká odolnosť proti nárazu. Nevýhodou je hlavne vysoká hustota s čím súvisí zvýšená hmotnosť sendvičového panelu.

#### Oceľové zliatiny

Tenké oceľové plechy patria medzi najpoužívanejšie kovové poťahové materiály. Vo všeobecnosti by sa mali používať len plechy s kovovým i organickým (plastovým) povlakom. Samotná oceľ sa zvyčajne valcuje za studena po predbežnom pokovovaní, ktoré slúži ako ochrana voči korózii. Na pokovovanie sa najčastejšie používa zinok alebo zliatina zinku a hliníku. Nevýhodou zinkového pokovovania však je nedostatočná ochrana voči korózii

a nekvalitný vzhľad. Zároveň je ťažké získať spoľahlivé spojenie medzi jadrom a kovovým poťahom. Z tohto dôvodu sa zvyčajne pridávajú ďalšie organické povlaky, ktoré chránia kovové vrstvy pred mechanickým a chemickým opotrebovaním. Zliatiny oceli môžu byť vyrobené s rôznou tvrdosťou a poskytovať vysokú pevnosť. [8]

#### Hliníkové zliatiny

Sendvičové panely s hliníkovými poťahmi vyrobenými z čistého hliníku sú používané v aplikáciách, kde sú kladené špeciálne požiadavky na odolnosť voči korózii alebo hygienu (napr. pri výrobe alebo skladovaní potravín). Hrúbka jednej vrstvy býva zvyčajne v rozmedzí od  $0,7 \pm 1,2$  mm. Hrúbka 0,7 mm sa často považuje za minimálnu, aby sa zabránilo lokálnemu poškodeniu pri manipulácii. Niekedy sa však používa aj vrstva z hrúbkou 0,5 mm. Odporúčané zliatiny sú AlMn (mangán legovaný v hliníku), AlMg (zliatina horčíka) a AlMnMg (legované aj mangánom aj horčíkom). Zliatiny hliníka sa líšia hlavne rôznymi pevnostnými vlastnosťami pri zachovaní podobnej tuhosti. Typická zliatina môže mať pevnosť v ťahu v rozmedzí  $200 \pm 250$  N.mm<sup>-2</sup>. Rovnako ako v prípade oceľových poťahov majú tieto poťahy problém v relatívne slabom spojení s jadrom. Pre zlepšenie priľnavosti sú hliníkové plechy podrobené povrchovej úprave, či už mechanického alebo chemického charakteru. [8]

#### Poťahy z nerezovej oceli

Nerezové poťahy môžu byť použité v budovách s vysokými nárokmi na hygienickú čistotu alebo v prípade potreby odolnosti voči agresívnemu internému prostrediu. Ich výhodou je, že v porovnaní s poťahmi z bežnej oceli nepotrebujú dodatočnú ochranu voči korózii. [8]



Obr. 4: Sendvičový panel s poťahom z nerezovej oceli (vľavo) a s poťahom zo zliatiny hliníku (vpravo) [9, 10]

### 1.2.2 Nekovové materiály potáhov

Druhá, väčšia, skupina vonkajších vrstiev sú potáhy vyrobené z nekovového materiálu. Do tejto skupiny sa radia materiály ako papierová lepenka, drevo, plasty a vláknové kompozity. Práve kompozity sú veľmi používané, pretože ponúkajú podobné alebo dokonca lepšie vlastnosti ako u kovov, aj keď majú nižšiu tuhosť. [2, 11]

Lamináty s vláknovou výstužou sú materiály, ktoré sú zložené z najmenej dvoch vrstiev vláknových kompozitov nasýtených živicom. Takto nasýtené vlákna sú následne vytvrdené do jedného plošného útvaru. Prídavné zložky môžu tvoriť spevňujúce častice alebo ďalšie aditíva, ktoré môžu prispievať k zlepšeniu vlastností ako napríklad zlepšenie pevnosti rozhrania vlákno-matrica, odolnosť proti UV žiareniu, odolnosť voči únave atď. Vláknové kompozity môžu byť rozdelené do skupín: [11, 12]

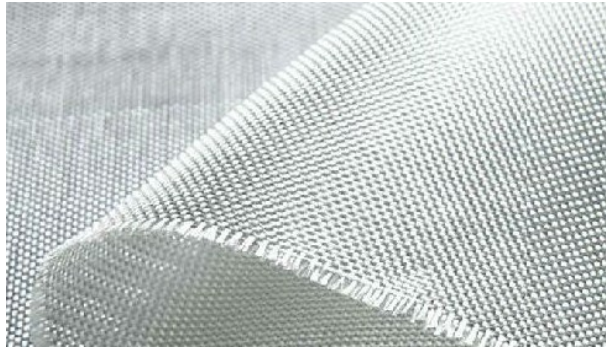
- Jednovrstvové - Dlhovláknové (jednosmerne, dvojsmerne orientované vlákna)
  - Krátkovláknové (náhodne orientované, orientované vlákna)
- Viacvrstvové - Lamináty
  - Hybridy

Najčastejšie používané vlákna ako výstuž kompozitných materiálov sú sklenené, uhlíkové, bórové, polymérne a keramické ( $\text{SiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). V prípade matrice kompozitov môžu byť prírodné (bio-polymery), polymérne, kovové, sklenené, sklokeramické, keramické a uhlíkové. [12]

#### Sklenené vlákna

Sklenené vlákna majú silikátový základ ( $\text{SiO}_2$ ). Vyrábajú sa ťahaním taveniny zmesi oxidov Si a väčšinou s malým podielom oxidov alkalických kovov Na a K. Potrebného priemeru vlákien sa dosiahne dĺžením prúdu skla tečúceho platino-rhodiými tryskami s priemerom trysky 1 mm. Konečný priemer vlákna je daný rozdielom medzi rýchlosťou vytekania skloviny a rýchlosťou odťahu vlákna. Vlákna majú priemer od 3,5 do 20  $\mu\text{m}$ . Naraz sa ťahá 51 až 408 vlákien. Vlákna majú dobré mechanické vlastnosti, odolnosť voči vplyvu prostredia a relatívne nízku cenu. Ich hlavnou nevýhodou je, že modul pružnosti je pomerne nízky a hustota je vyššia ako u iných výstuh. [2, 11, 12]

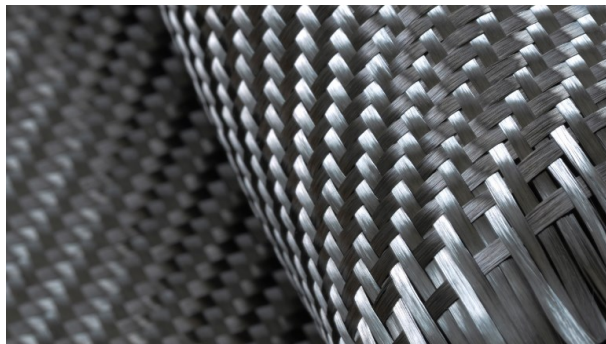




Obr. 5: Sklenené vlákna [13]

### Uhlíkové vlákna

V uhlíkových vlákna sa spája vysoká pevnosť, modul pružnosti a tepelná odolnosť s pomerne nízkou hustotou ( $1,8 - 2 \text{ g.cm}^{-3}$ ). Tieto vlákna sú vyrobené z viskózových alebo polyakrylonitrilových vlákien a alternatívne aj z tzv. anizotropnej smoly zvlákňovanej v tavenine. Sú zostavené z dlhých molekulárnych reťazcov uhlík – uhlík, majú nízky koeficient tepelnej rozťažnosti a dobré trecie vlastnosti. Vlákna získané pri  $900 - 1500 \text{ °C}$  sú pevnejšie, inak nazývané aj vysokopevnostné. Ďalšou karbonizáciou vysokopevnostných vlákien pri teplote  $2000 - 2800 \text{ °C}$  sa získajú grafitové vlákna, ktoré majú nižšiu ťahovú pevnosť, ale vynikajú vyšším modulom pružnosti v ťahu. Ich nevýhodou je však vysoká cena. [11, 12]



Obr. 6: Uhlíkové vlákna [14]

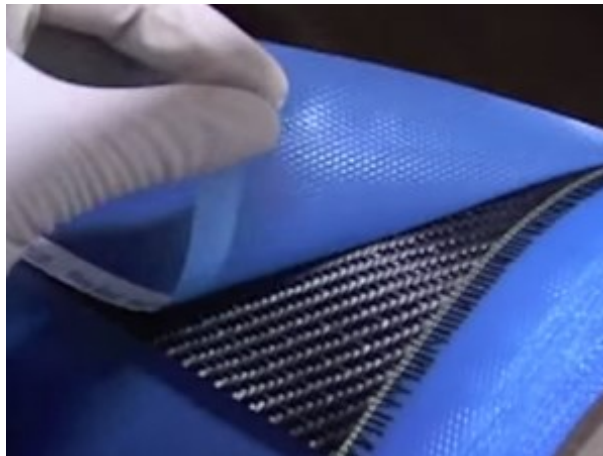
### Prepregy

Sú to rôzne široké kotúče, obsahujúce buď paralelne usporiadané rovingy, tkaninu alebo rohož a polovytvrdenú reaktoplastickú alebo termoplastickú matricu. Prepreg je chránený z jednej strany tzv. nosnou a z druhej strany separačnou fóliou. Prepregy s reaktívnym reaktoplastickým spojivom sa musia skladovať pri teplotách približne  $-20\text{°C}$  po dobu maximálne 6 mesiacov. Tieto polotovary je možné na seba vrstviť do požadovanej hrúbky a vo

formách ich následne vytvarovať a vytvrdiť pôsobením tepla a tlaku. Za normálnej teploty má prepreg ľahko lepivý povrch. Výhodné sú taktiež samolepiace prepregy, ktoré nepotrebujú dodatočnú adhéznú vrstvu pre spojenie s jadrom. Medzi ich výhody patrí napríklad vysoký podiel vláknovej výstuže, minimálny podiel dutín v kompozite a rovnomerná kvalita. Nevýhodou je však ich vyššia cena a nutnosť skladovania pri nízkych teplotách. [12, 15]

Prepregy môžu byť rozdelené aj podľa geometrie výstuže na:

- Jednosmerný prepreg – vyrobený s rovinogov a určený pre mechanicky namáhané diely vyrábané ručným kladením alebo pultrúziou. Dodáva sa v kotúčoch rôznej šírky s pomerne malou hrúbkou ( 0,1 – 0,15 mm).
- Viacvrstvové prepregy – v tomto type prepregov sú jednosmerne vystužené vrstvy voči sebe vzájomne pootočené a spojené prešitím polyesterovou niťou.
- Kombinované prepregy – vrstvy s rohožou, ktoré majú väčší podiel živice sa dávajú na stranu vystavenú korozívnemu prostrediu. Únosnejšie vrstvy s tkaninovou výstužou sa dávajú na mechanicky viacej namáhanú stranu (pri namáhaní na ohyb na ťahanú stranu). [12, 15]



Obr. 7: Prepreg chránený separačnou a nosnou fóliou [16]

### 1.3 Druhy sendvičových jadier

#### 1.3.1 Jadro z balzového dreva

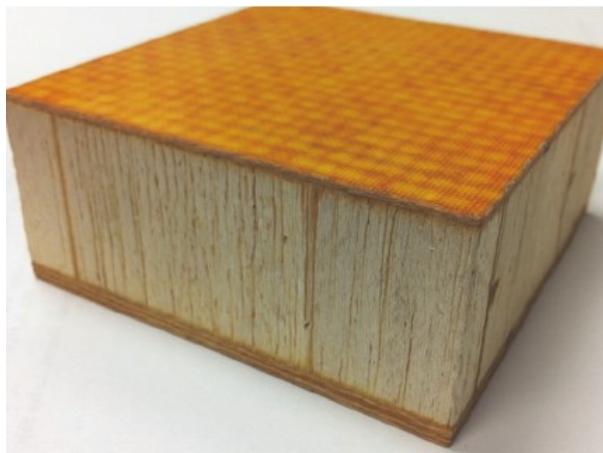
Balzové drevo je ľahké priemyselné tvrdé drevo, ktoré sa používa v mnohých aplikáciách vrátane tepelnej izolácie, obalového materiálu a ako jadro sendvičových kompozitných štruktúr. Balzové drevo do jadier sa získava z balzových stromov (Ochroma pyramidale).

Proces spracovania čistého dreva do finálnej podoby je nenáročný. Odrezaný dospelý strom sa nareže na štvorcové časti a ďalej sa suší v rúre. Drevo je po vysušení triedené podľa kvality, fyzikálnych vlastností a špecifickej hustoty. Následne sú tieto štvorcové časti dreva zlepené, čím sa vytvoria veľké bloky, ktoré sú ďalej narezané na potrebné veľkosti. V nasledujúcej tabuľke (Tab. 1) sú zobrazené vlastnosti bežných balzových jadier. [17, 18]

Tab. 1: Vlastnosti balzových jadier so štandardnou a vysokou hustotou [17]

	Testovacia metóda	Jednotka	Štandardná hustota	Vysoká hustota
Menovitá hustota	ASTM C-271	Kg/m <sup>3</sup>	151	244
Pevnosť v tlaku	ASTM C-365	N/mm <sup>2</sup>	12,67	25,8
Modul pružnosti v tlaku	ASTM C-365	N/mm <sup>2</sup>	3921	7840
Pevnosť v ťahu	ASTM C-297	N/mm <sup>2</sup>	13	23,18
Modul pružnosti v ťahu	ASTM C-297	N/mm <sup>2</sup>	3518	5688
Pevnosť v šmyku	ASTM C-273	N/mm <sup>2</sup>	2,94	4,85
Modul pružnosti v šmyku	ASTM C-273	N/mm <sup>2</sup>	157	302
Tepelná vodivosť	ASTM C-177	W/mK	0,066	0,084
Maximálna teplota		°C	180	180

Balzové jadrá sa vyznačujú vysokým pomerom tuhosti a pevnosti k hmotnosti, odolnosťou voči horeniu, širokou prevádzkovou teplotou, odolnosťou voči únave materiálu a dobrou zvukovou a tepelnou izoláciou. Vzhľadom na fakt, že balzové stromy sú najrýchlejšie rastúcimi stromami na svete, kde dospelý strom dosahuje výšky až 30 m a v priemere má približne 45 cm v priebehu 5 až 7 rokov, môžeme medzi výhody zaradiť aj obnoviteľnosť zdroja. Nevýhodou týchto jadier však je ich minimálna hustota, ktorá sa pohybuje okolo 100 kg/m<sup>3</sup>. Tento problém je zhoršený tým, že balza dokáže pri laminovaní absorbovať veľké množstvo živice. Preto sa použitie balzy obmedzuje zvyčajne na projekty, kde sa nevyžaduje optimálna úspora hmotnosti alebo v miestach, ktoré sú lokálne vysoko namáhané. [18, 19]



Obr. 8: Sendvičový panel s jadrom z balzového dreva [20]

Sendvičové panely s balzovým jadrom sú v dnešnej dobe veľmi rozšírené v rôznych odvetviach priemyslu, ako napríklad v námorníctve (trupy, paluby, vnútorne vybavenie lodí), železničnom priemysle (podlahové, strešné a bočné panely), vo veterných elektrárňach, kozmonautike, armáde a rôznych odvetviach športu (lyže, snowboardy, kajaky). [19]

### 1.3.2 Voštinové jadro

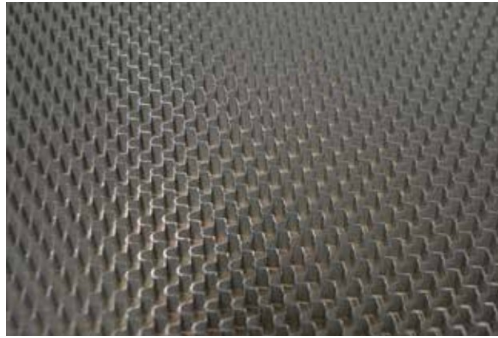
Voštinové jadrá sa skladajú z radov otvorených buniek v tvare n-uholníkov (najčastejšie v hexagonálnom tvare), vytvorených z tenkých vrstiev vzájomnej spojeného materiálu. Názov dostali pre svoju podobnosť s včelími plástmi. Voštiny sa používajú pre jadrá sendvičov s rôznou veľkosťou, tvarom a výškou buniek. [2, 1]

#### Materiály voštín

Pre výrobu voštinových jadier sa v dnešnej dobe používa veľký rozsah materiálov. Môžeme ich rozdeliť na železné materiály, ako napríklad hliník, alebo na neželezné materiály ako sú Nomex (aramid), Kevlar alebo rôzne druhy termoplastov. [2]

- **Hliníkové voštiny**

Tento typ voštín patrí medzi jeden z najlepších konštrukčných materiálov, vzhľadom k pevnostnému a hmotnostnému pomeru. Existujú rôzne konfigurácie adhéznych spojení hliníkovej fólie, čo má za následok množstvo geometrických tvarov buniek, z ktorých sú najčastejšie používané bunky s hexagonálnym tvarom. Ich vlastnosti môžu byť riadené zmenou hrúbky fólie a zmenou veľkosti bunky. [21, 22]

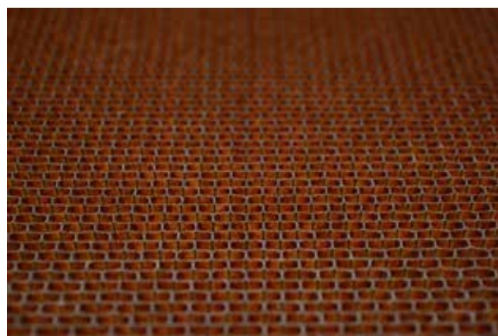


Obr. 9: Hliníková voština [21]

Napriek svojim dobrým mechanickým vlastnostiam a relatívne nízkej cene, sa hliníkové voštiny musia v niektorých prípadoch používať s opatrnosťou, napríklad v námorníctve, kde môže dôjsť k problémom s koróziou v prostredí slanej vody. Ďalšiu nevýhodu, ktorá môže mať vplyv na výrazné zníženie mechanických vlastností, je možné pozorovať pri deformácii nárazom, kedy sa odolný plášť vráti do pôvodného stavu, ale voštinové jadro zostane trvale deformované. Dá sa teda povedať, že hliníkové voštiny nemajú "mechanickú pamäť". [22]

- **Nomexové voštiny**

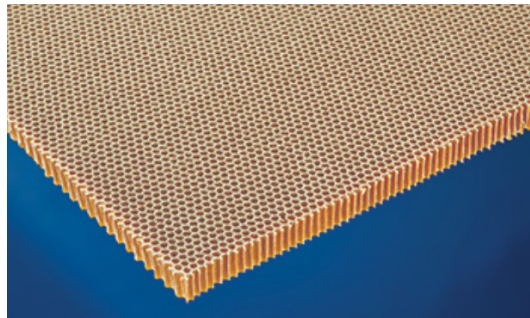
Základom aramidových voštín je nomexový papier, ktorý je tvorený kevlarovým alebo celulóзовým vláknom. Vytvorená papierová voština je namáčaná do fenolickej živice, čím vznikne voštinové jadro s vysokou pevnosťou a veľmi dobrou odolnosťou proti ohňu. Tento typ voštín má široké uplatnenie v rôznych priemysloch, napríklad v dopravnom priemysle, kde sa vďaka svojej malej hmotnosti používajú ako panely v interiéroch lietadiel. Niektoré druhy nomexových voštín sú pre zníženie horľavosti usporodované tak, že jednotlivé bunky jadra sú vyplnené fenolickou penou, čím sa tiež zväčší styčná adhézna plocha, a systém potom funguje ako izolácia. Vďaka svojim vynikajúcim mechanickým vlastnostiam, nízkej hustote a dlhodobej stabilite, sú tieto voštiny stále viac používané v leteckých komponentoch. [22]



Obr. 10: Nomexová (aramidová) voština [21]

- **Kevlarové voštiny**

Tento typ voštín patrí medzi najnovšie druhy materiálov. Vykazujú zlepšené vlastnosti v oblasti hmotnosti (40% ľahšie), pevnosti (4-násobne pevnejšie), tuhosti a únavy materiálu c porovnaní s Nomex voštinami. Medzi ďalšie výhody patrí odolnosť proti vlhkosti, vysoká húževnatosť a vynikajúca tepelná stabilita. Sú vyrobené z para-aramidového vláknového papiera, ktorý je impregnovaný v tepelne odolnej fenolickej živici. [22]



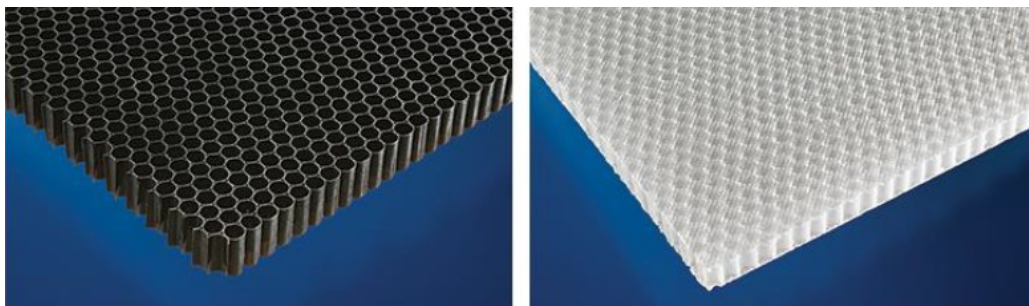
Obr. 11: Kevlarová voština [23]

- **Termoplastické voštiny**

Termoplastické materiály jadier majú nízku hmotnosť a poskytujú niekoľko užitočných vlastností a prípadne aj možnosti pre ľahšiu recykláciu. Ich hlavnou nevýhodou je náročné dosiahnutie dobrého spojenia medzi voštinou a vonkajším plášťom, a relatívne nízka tuhosť. Sú zriedkavo používané vo veľmi namáhaných konštrukciách, ale môžu byť užitočné v jednoduchých interiérových paneloch.

Najbežnejšie používané polyméry pre výrobu voštín sú:

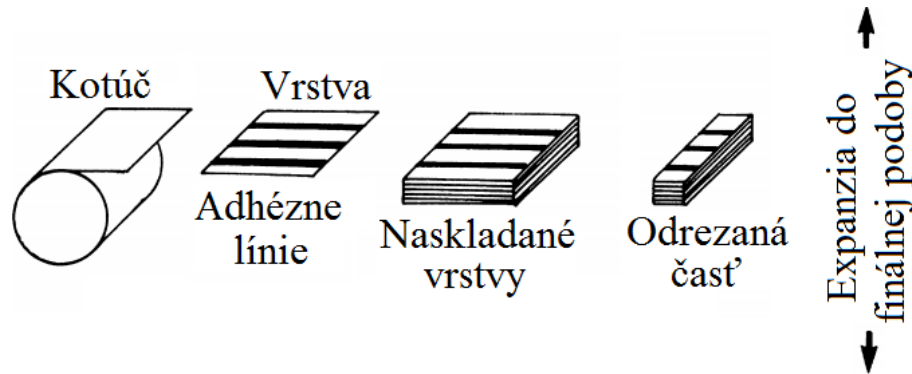
- **ABS (AkrylonitrilButadienStyrén):** kvôli svojej tuhosti, rázovej pevnosti, húževnatosťi, tvrdosti povrchu a rozmerovej stabilite
- **PC (Polykarbonát):** kvôli svojej UV-stabilite, vynikajúcej svetelnej priepustnosti, dobrej tepelnej odolnosti a samozhášavé vlastnosti.
- **PP (Polypropylén):** kvôli svojej dobrej chemickej odolnosti
- **PE (Polyetylén):** kvôli svojej univerzálnosti a nízkej cene materiálu. [22, 24]



Obr. 12: Polykarbonátová a polypropylénová voština [24]

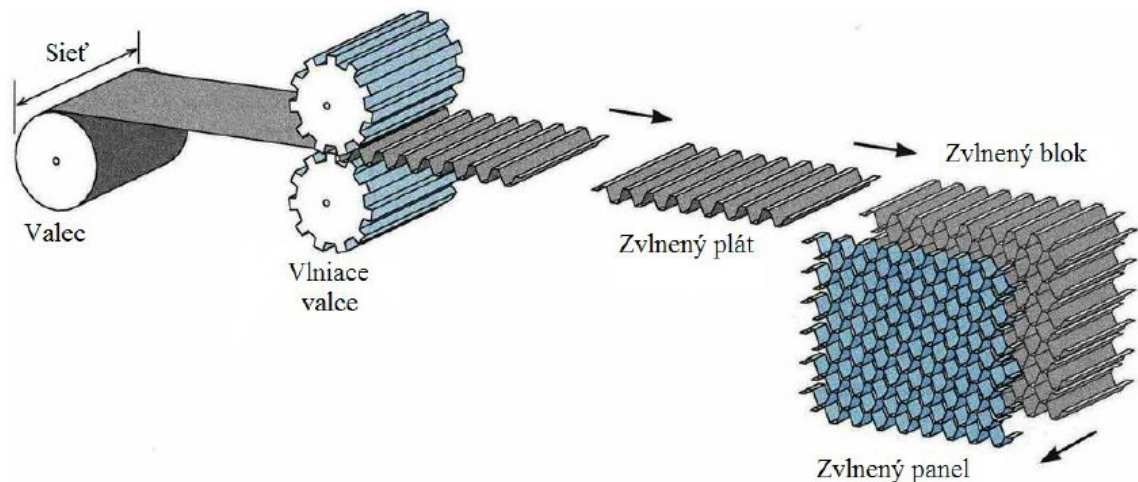
Výroba voštín

Jadrá so šesťhrannou štruktúrou – voštiny, patria dnes medzi najpoužívanejšie. Voštinové jadrá sa primárne vyrábajú expanznou metódou znázornenou na obrázku (Obr. 9). Proces začína stohovaním vrstiev z hliníka alebo iných materiálov, na ktoré boli nanesené adhézne línie. V ďalšom kroku sa bloky narežú na požadovaný rozmer, ktorý predstavuje hrúbku jadra. Voštinové jadro sa potom získa rozšírením v zvislom smere. [1]



Obr. 13: Expanzná metóda výroby voštinových jadier [1]

Pri jadrách s vyššou hustotou sú listy najskôr zvlnené, adhézna vrstva sa nanesie do vlnitých uzlov a následne sa vrstvy naskladajú do blokov. Nakoniec sa jadrové panely narežú z týchto blokov na požadovanú hrúbku (Obr. 10). [1]

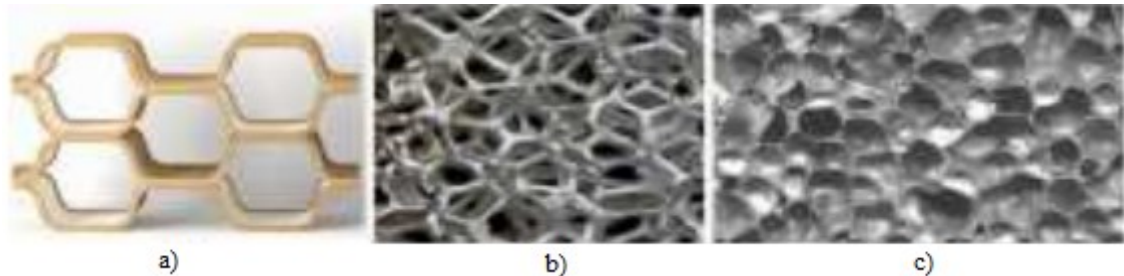


Obr. 14 voštinového jadra metódou vrapovania [2]

### 1.3.3 Jadro z polymérnych pien

Peny sú dvojfázové systémy so spojitou termoplastickou alebo reaktoplastickou matricou, v ktorej je v značnom objemovom podiele (50 až 90%) dispergovaná polymérna fáza. Vy-

rábajú sa vákuovou expanziou, vytlačovaním taveniny polyméru do vákuovej komory alebo jednoduchým miešaním či tlakovým fúkaním plynu do taveniny polyméru. Štruktúra polymérnych pien je tvorená buď uzatvorenými alebo otvorenými bunkami. [2, 3]



Obr. 15: Štruktúry polymérnych pien: a) voština, b) pena s otvorenými bunkami, c) pena s uzatvorenými bunkami [2]

Vlastnosti bunkových penových sendvičov sú výsledkom kombinácie vlastností bunkovej štruktúry a vlastností materiálu použitého na jeho výrobu. Spolu s relatívnou hustotou bunkových telies sú tieto dva faktory určujúcimi parametrami fyzikálnych a mechanických vlastností. [3]

#### Fyzikálne vlastnosti

Nízka hustota a hmotnosť bunkových telies je daná bunkovou štruktúrou. Obsahom dutín v polymérnych penách je zvyčajne plyn. Dôležitým parametrom pri porovnávaní bunkových telies je ich tzv. relatívna hustota:

$$\rho_{rel} = \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (3)$$

Relatívna hustota predstavuje podiel hustoty pevného materiálu  $\rho^*$  a hustoty materiálu, z ktorého je pena vyrobená  $\rho_s$ . Mieru voľného miesta vyplneného plynom alebo kvapalinou charakterizuje pórovitosť:

$$\phi = 1 - \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (4)$$

Bunkové materiály majú relatívnu hustotu menšiu ako 0,3. Ultraľahké peny dokonca až 0,003. Hustota a zmena hustoty sa využíva na dosiahnutie požadovaných vlastností, ktoré sú požadované pre danú aplikáciu použitia polymérnych pien. [25]

Vodivosť (elektrická a tepelná) je nižšia ako u plných materiálov z dôvodu nízkeho podielu materiálu stien a hrán v objeme buniek a vysoký pomer plynových dutín v objeme poly-

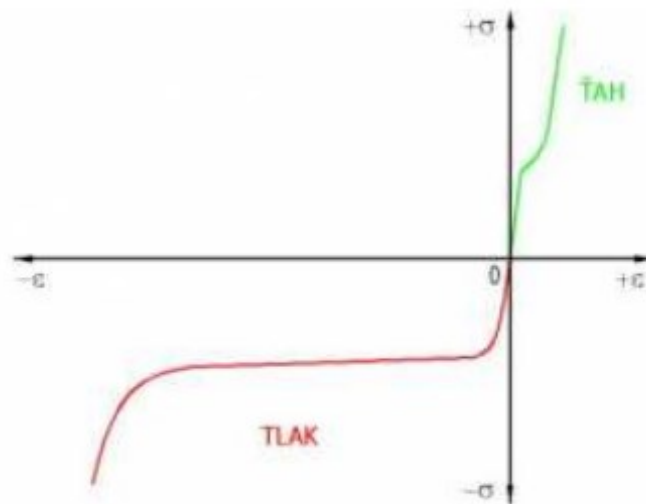


mérnej sendvičovej konštrukcie. Z toho vyplýva, že zvyšovaním hustoty narastá ich vodivosť.

Zvukové vlny sa v penách odrážajú od ich nepravidelnej štruktúry. Vibračná energia, ktorá spôsobuje deformáciu stien buniek sa v priebehu mení na tepelnú energiu, vďaka čomu intenzita odrazeného zvuku klesá. Absorpčný stupeň pohltienia je možné zvýšiť jemným a homogénnym rozložením buniek v objeme materiálu. [25]

### Mechanické vlastnosti

Podľa pracovných diagramov je chovanie polymérnych pien v ťahu a tlaku rozdielne. V tlaku je výrazná oblasť tzv. plató, kde deformácie rýchlo narastajú pri minimálnej zmene napätia. Vďaka tomu sa zvyšuje ich schopnosť pohlcovať energiu, ktorá sa využíva pri použití pien ako absorpčný alebo ochranný materiál. V ťahu je táto oblasť veľmi málo výrazná. [25]



Obr. 16: Ťahový a tlakový diagram zaťaženia polymérnych pien [25]

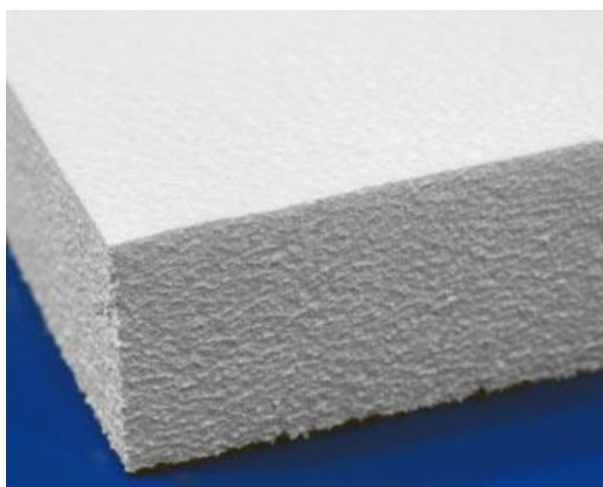
### Materiály na výrobu polymérnych pien

**Polyvinylchlorid (PVC)** - Tento typ polymérnych pien môžeme rozdeliť na sieťované a nesieťované. Nesieťované sú v porovnaní so sieťovými tuhšie a ohybnejšie, no majú nižšie mechanické vlastnosti pri rovnakej hustote a tiež majú nižšiu odolnosť proti zvýšeným teplotám. Všeobecne majú PVC peny dobrú odolnosť proti absorpcii vody a vyvážené statické a dynamické vlastnosti. [26]



*Obr. 17: PVC pena [26]*

**Polystyrén (PS)** – Polystyrénové peny sa vo veľkej miere používajú na výrobu plachetníc alebo surfov, kde je veľmi dôležitá ich nízka hustota ( $40 \text{ kg.m}^{-3}$ ) a nízke výrobné náklady. Napriek tomu sa len zriedka používajú pre výrobu zložitých konštrukčných prvkov kvôli ich nízkym mechanickým vlastnostiam. Taktiež nemôžu byť použité v spojení s polyesterovými živcami, pretože by boli rozpustené styrénom, ktorý živica obsahuje. [26]



*Obr. 18: Polystyrénová pena [27]*

**Polyuretán (PUR)** - Ich konštrukčné aplikácie sú väčšinou obmedzené na výrobu rámov z dôvodu slabších mechanických vlastností. Môžu byť však použité v menej zaťažovaných sendvičových paneloch, ktoré sú často používané ako tepelná izolácia. Sú ľahko spracovateľné a obrobené do požadovaných tvarov a profilov. [26]



*Obr. 19: PUR pena [22]*

**Styrén-akrylonitril (SAN)** - SAN peny sú veľmi podobné tvrdeným sieťovaným PVC penám. Majú väčšinu statických vlastností PVC jadier, no majú oveľa vyššiu húževnatosť a pružnosť. Sú preto schopné absorbovať väčšie nárazové sily než konvenčné alebo dokonca aj spevnené PVC peny. Húževnatosť sa nebude výrazne meniť vekom z dôvodu nepoužívania zmäkčovadiel na spevnenie polyméru. [26]

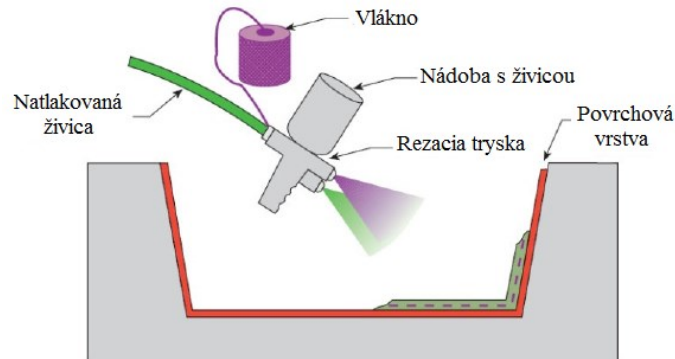
## 2 SPÔSOBY VÝROBY SENDVIČOVÝCH ŠTRUKTÚR

Sendvičové komponenty (panely a celé konštrukcie) môžu byť vyrobené pomocou niekoľkých výrobných postupov. Medzi najčastejšie používané patrí:

- Ručné laminovanie
- Lisovanie prepregov
- Adhézne spojenie vonkajších vrstiev a jadra
- Kontinuálna výroba

### 2.1 Ručné laminovanie

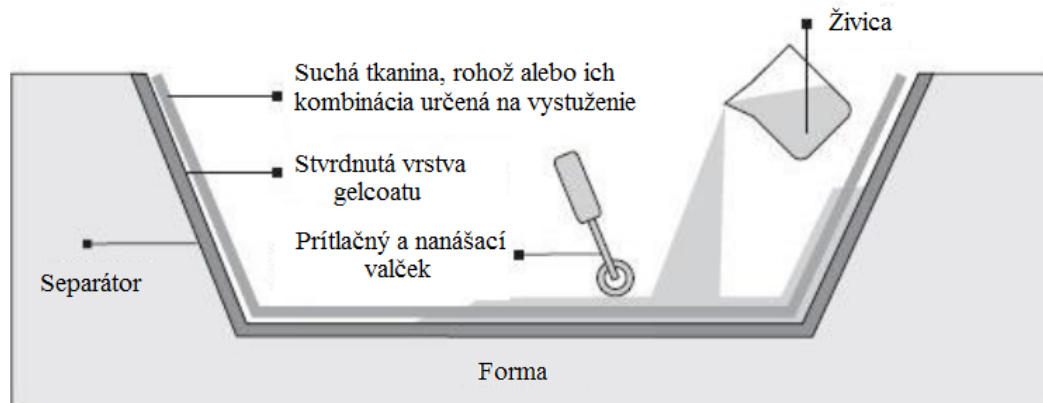
Ručné laminovanie je jednou z najstarších, ale stále jednou z najpoužívanejších metód na výrobu sendvičových komponentov s kompozitnými vonkajšími vrstvami. Táto metóda je spoľahlivá ale pracovne náročná, preto je vhodná pre krátke výrobné série veľkých konštrukcií. Tento spôsob laminovania môže byť použitý aj na výrobu vonkajších vrstiev sendvičových komponentov. Vo väčšine prípadov sú vonkajšie vrstvy laminované priamo na jadro, ktoré má funkciu formy. [29, 30]



Obr. 20: Výroba laminátu rozstrekaním [30]

Táto metóda výroby môže byť realizovaná buď ručným nanesením alebo rozstrekaním živice. Rozstrekaním sa rozumie nanášanie rozsekaných vlákien zmiešaných s živicou pomocou striekacej pištole (Obr. 21). Vlákna bývajú najčastejšie sklenené a živica polyesterová. Pri ručnom kladení musí byť pred začiatkom laminácie forma, na ktorú budú kladené vrstvy laminátu a živice ošetrená separačnou vrstvou pre lepšie vyňatie výrobku po vytvrdnutí. Okrem toho sa ďalej naniesie vrstva gelcoatu o hrúbke 0,3 až 1 mm, ktorá má dobrú odolnosť voči vonkajšiemu prostrediu a vytvára hladký a jemný povrch. Gelcoatová vrstva taktiež zakrýva výstužnú štruktúru, ktorá by inak mohla byť viditeľná a tým zlepšuje vonkajší vzhľad výrobku. [29, 30]

Po vytvrdnutí sa na hornú časť formy aplikuje primerané množstvo živice, na ktorú sa umiestni suchá výstuž, zvyčajne vo forme rohože alebo textílie. Živica sa do výstuže vnáša pomocou valčeka, ktorým sa vyplňajú prázdne miesta a vytvára sa kompaktná vrstva laminátu. Po vytvrdnutí jednej nanesej vrstvy sa tento krok opakuje, kým sa dosiahne požadovaná hrúbka laminátu. Laminovanie je často ukončené vrchným náterom, ktorý má podobnú funkciu ako gelcoatová vrstva (Obr. 22).



Obr. 21: Princíp ručného laminovania [2]

Medzi výhody tejto metódy patrí napríklad použitie živice, ktoré vytvrdzujú aj pri izbovej teplote pri atmosférickom tlaku a ktoré sú tolerantné voči zmenám spracovateľskej teploty, efektívnosť čo sa týka nákladov pri výrobe krátkych výrobných sérií a prototypov, vhodnosť pre výrobu nadrozmerných výrobkov. Medzi nevýhody patrí nutnosť vysokej zručnosti pracovníkov a škodlivé výpary z živice (hlavne pri rozstrekaní), ktoré môžu mať negatívny dopad na zdravie pracovníkov. Výrobky vyrobené ručným laminovaním nachádzajú uplatnenie v motorových jachtách, plachtenciach alebo osobných lodiach. [29]

## 2.2 Lisovanie prepregov

Lamináty a sendvičové štruktúry vyrobené pomocou prepregov sú najčastejšie používané v pokročilejších aplikáciách, napr. pre závodné jachty, letectvo a kozmonautika. Použitie týchto predimpregnovaných laminátov zaručuje dobrú impregnáciu výstuže a poskytuje výhodu v použitej živici, ktorá má zvyčajne lepšie vlastnosti ako živica, použitá pri ručnej laminácii. Na druhú stranu však pre súdržnosť vrstiev prepregy vyžadujú kontrolované podmienky, ako napríklad zvýšenie teploty nad izbovú teplotu, prípadne aj zmena tlaku.

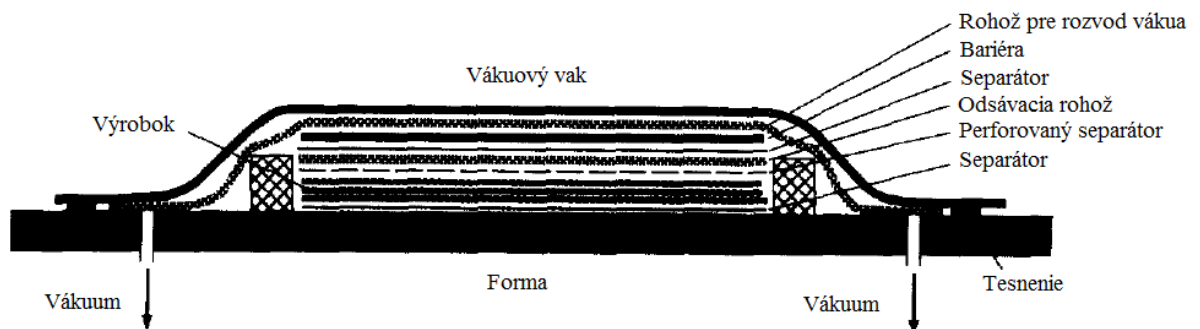
Výroba sendvičových komponentov s vonkajšími vrstvami vyrobenými z predimpregnovaných laminátov môže byť uskutočnená dvoma spôsobmi. Za dodržania

určitých podmienok môže byť laminát položený priamo na jadro podobným spôsobom, ako sa používa pri ručnej laminácii. Druhým spôsobom je výroba laminátov z prepregu mimo sendvičového jadra a následné adhézne spojenie týchto častí dohromady. [29]

#### *Kladenie prepregov priamo na jadro sendvičovej konštrukcie*

Takmer všetky druhy živíc používaných v prepregoch vyžadujú pre dosiahnutie požadovaných vlastností kontrolovanú teplotu a tlak. Preto zvyčajne vytvrdzovanie týchto prepreg-sendvičových konštrukcií prebieha vo vákuovom vaku pri teplotách nad 100 °C, prípadne pre zložité výrobky vytvrdzujú v autokláve. [12, 29]

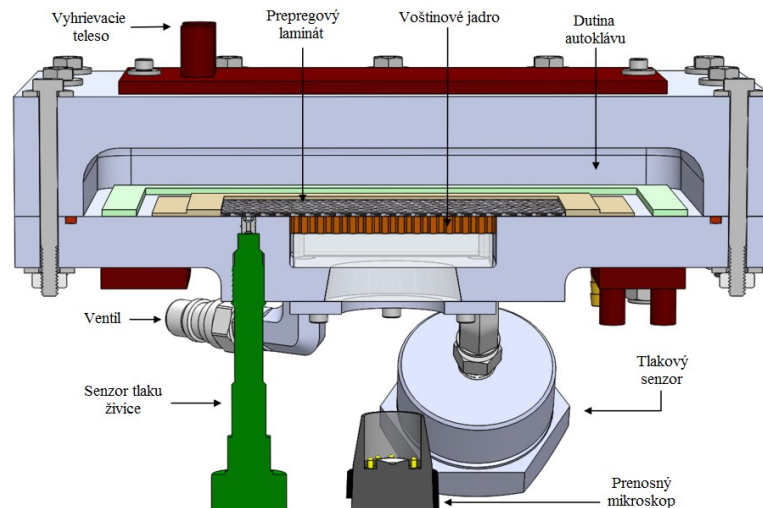
Na prípravu výroby vo vákuovom obale je potrebné na formu naniesť vrstvu separátora, na ktorý sú ďalej kladené vrstvy prepregov, separátor, vrstva pre odvod prebytočnej živice, bariéra a vrstva pre rozvod vákua (Obr. 23). Separáčna vrstva zaisťuje uvoľnenie výrobku, zatiaľ čo prebytočnú živicu absorbuje vrstva pre odvod prebytočnej živice. Bariéra zabráňuje rozptýleniu živice do vrstvy pre rozvod vákua, ktorá zabezpečuje rovnomerné rozloženie tlaku vo vákuovom vaku. [12, 29]



*Obr. 22: Pripravený vákuový vak na výrobu sendvičovej konštrukcie [29]*

Po dokončení prípravy celý proces výroby začína evakuáciou vaku. Následne je aplikovaný tlak a zvyšuje sa teplota na špecifikovanú hodnotu, pri ktorej vytvrdzuje použitá živica. Táto teplota sa potom udržiava až po ukončenie vytvrdzovania. Ďalej sa uvoľní vákuum a tlak s teplotou sa postupne znižuje. Podmienky spracovania sa líšia v závislosti od použitých materiálov. [29]

Medzi výhody prepreg-sendvičových konštrukcií patria napríklad vynikajúce mechanické vlastnosti, nízky obsah dutín vo vonkajších vrstvách a vysoká kvalita výrobkov. Medzi nevýhody patrí vysoká cena materiálu a nutnosť použitia ďalšieho technologického zariadenia (autokláv, vytvrdzovacia pec, zariadenie na rezanie prepregu atď.). [29]

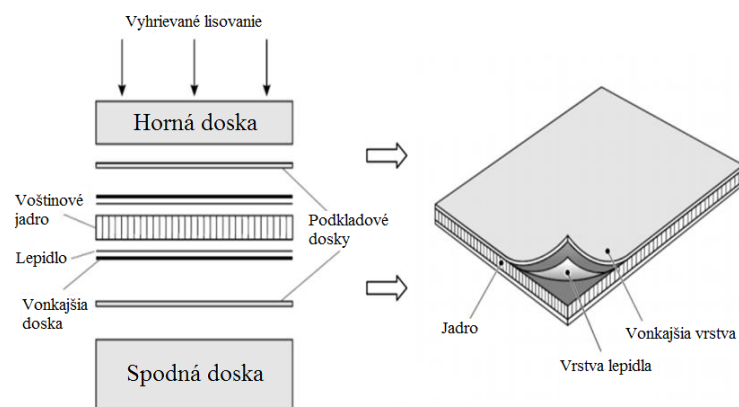


Obr. 23: Prierez autoklávom pri výrobe sendvičovej konštrukcie [32]

### 2.3 Adhézne spojenie vonkajších vrstiev s jadrom

Výroba sendvičových konštrukcií v jednom kroku môže byť veľa krát z ekonomického a výrobného hľadiska nežiadúca. V takýchto prípadoch môžu byť vonkajšie vrstvy a jadro spojené v oddelenom výrobnom kroku. Táto metóda sa používa hlavne v prípadoch, keď materiál vonkajších vrstiev nie je na báze polyméru a teda neexistuje žiadna alternatíva, než adhézne spojenie týchto dvoch častí. [12, 29]

Proces spojenia vonkajších vrstiev a jadra je pomerne jednoduchý a nezávislý na použitých materiáloch. Adhézne vrstvy sú vložené medzi vonkajšie vrstvy a jadro a následne je celá zostava vystavená zvýšenej teplote a tlaku, ktorých veľkosť závisí na použitej adhéznej živici. Pre dokončenie spojenia sa sendvičová konštrukcia ochladí. Pre náročnejšie výrobky sa proces uskutočňuje v autokláve, zatiaľ čo pre menej náročné je postačujúce použitie vákuového obalu alebo hydraulického lisu. [29]



Obr. 24: Výroba sendvičového panelu vyhrievaným lisovaním [22]

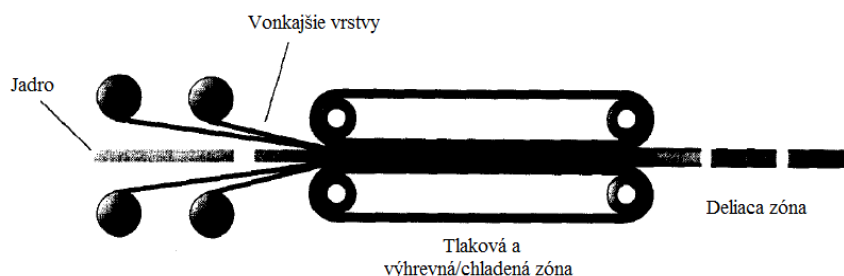
Aby vzniklo pevné spojenie medzi spájanými plochami, je potrebné ich určitým spôsobom pripraviť. V prípade laminátových vonkajších vrstiev je vhodné odstrániť odtrhovú tkaninu bezprostredne pred lepením, čím sa zaisťujú čistota lepenej plochy. Povrch by taktiež nemal byť dokonale hladký. Povrch kovových vonkajších vrstiev musí byť taktiež drsnejší a odmastený alebo inak chemicky upravený pre zlepšenie priľnavosti. [29]

Medzi výhody sendvičových konštrukcií vyrobených touto metódou patria napríklad vynikajúce mechanické vlastnosti a kvalita povrchu. Medzi nevýhody však patrí problém so spojením zakrivených častí sendviču z dôvodu geometrického nesúladu medzi vonkajšími vrstvami a jadrom, náročnosť práce a vysoké náklady pri použití vytvrdzovania v autokláve.

## 2.4 Kontinuálna výroba

Z ekonomického hľadiska je prirodzene výhodnejší kontinuálny proces výroby sendvičových konštrukcií. Vhodnou výrobnou metódou je použitie dvojitého pásového lisu. S týmto typom lisu je možné materiál ohrievať aj chlaďiť a súčasne ho podrobiť špecifikovanému tlaku, čo ho robí veľmi užitočným zariadením pre impregnáciu a laminovanie kompozitov.

Pri použití dvojitého pásového lisu na výrobu sendvičových komponentov sú vonkajšie vrstvy navinuté na dvoch kotúčoch, z ktorých sa odvíjajú a vedú medzi pásmi lisu (Obr. 26). Jadro sa vkladá medzi vonkajšie vrstvy spolu s adhéznymi vrstvami. Ďalej dochádza k spojeniu použitím tepla a tlaku. Pre dokončenie je sendvičová konštrukcia ochladzovaná pod tlakom. Pri kontinuálnej výrobe sendvičov sa ako vonkajšie vrstvy používajú sklenené tkaniny a rohože naimpregnované polyesterovou živicom a polymérne penové jadrá. [12, 29]



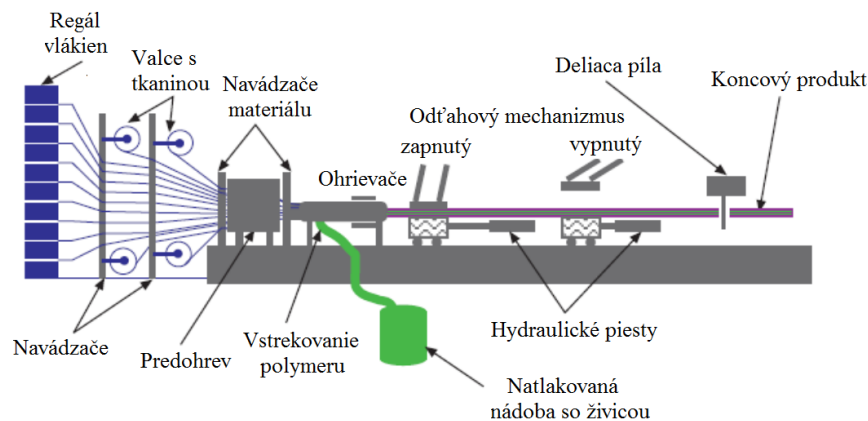
Obr. 25: Výroba sendvičových konštrukcií pomocou dvojitého pásového lisu [29]



Po zahriatí autoklávu na požadovanú teplotu, ktorá sa zvyčajne pohybuje v rozmedzí 120 až 200 °C, nastáva vytvrdzovanie živice. Jednotlivé vrstvy prepregu sú k sebe následne pritlačované nízkym pretlakom (desatiny MPa), čím sa zaručí minimálny obsah živice. [29]

Táto technológia sa používa pre výrobu mostových konštrukcií, nosníkov a rebríkov. Medzi výhody samozrejme patrí ekonomická výroba a tým aj vysoká rýchlosť výroby. Nevýhodou však môže byť vysoká zriaďovacia cena linky. [31]

Ďalším spôsobom kontinuálnej výroby sendvičovej konštrukcie je pultrúzia. Postup výroby je nasledovný: tkaniny sú spoločne s jadrom odvíjané z valcov cez vaňu alebo vstrekovaciu hlavu, v ktorých sa nachádza matrica, do indukčne alebo mikrovlnne vyhrievanej vytvrdzovacej tvarovacej hlavy (Obr. 27). Stvrdnutý profil sa odťahuje pomocou pásov a následne je narezaný na požadované rozmery. [12, 29]



Obr. 26: Princíp výroby sendvičovej konštrukcie pultrúziou [2]

Jadrá sendvičovej konštrukcie sa pri tejto metóde výroby používajú výhradne penové, z dôvodu možného zaplnenia buniek voštiny živicom. Medzi výhody tejto technológie patrí produktivita výroby (podľa zložitosti profilu 1 až 5 metrov za minútu). Nevýhodou je vysoká cena výrobného zariadenia, náročný rozbeh výrobného cyklu a potreba výmeny pultrúznej hlavy pre rôzne prierezy. [12, 31]

### 3 TESTOVANIE SENDVIČOVÝCH ŠTRUKTÚR

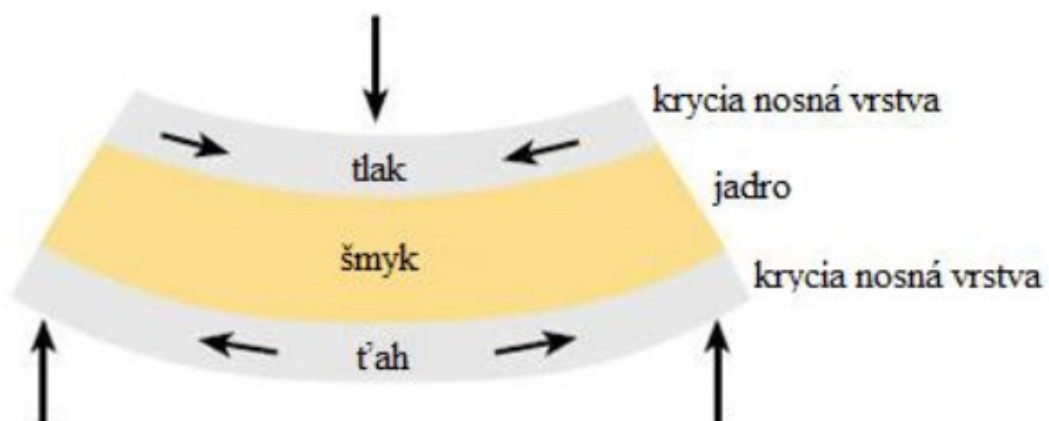
Aby mohla byť určená vhodnosť použitia sendvičových štruktúr v praxi, musia byť určené mechanické vlastnosti daného materiálu. Tieto vlastnosti sa štandardne určujú testovaním. Z hľadiska pôsobenia sily na skúšobné teleso môžu byť mechanické skúšky rozdelené do dvoch základných skupín:

- Statické skúšky – prebiehajú za znížených, normálnych alebo zvýšených teplôt
- Dynamické skúšky – ktoré sú rozdelené na rázové a cyklické

Mechanickými skúškami môžu byť sledované rôzne ciele, či už je to získavanie dát pre konštruktérov aby mohli správne voliť materiál pre danú funkciu, alebo môžu byť použité na vyhodnotenie a dôkaz kvality skúšaného materiálu. Výsledky môžu byť uplatnené aj vo výskume materiálov, pre pochopenie a štruktúrne vysvetlenie mechanického chovania daného materiálu a jeho konkrétnych mechanických vlastností. [36, 37]

#### 3.1 Ohybová skúška

Tento typ skúšky patrí do skupiny statických skúšok a môže byť robená za normálnej alebo zvýšenej teploty. Ohybový moment vyvedený od prierečníku spôsobí v horných vláknach prierezu tlak, v dolných vláknach prierezu ťah (Obr. 26) Ak je prierez symetrický, je neutrálna vrstva v osi skúšobného telesa. To však platí iba v prípade, že materiál má rovnaké vlastnosti v ťahu aj tlaku. V prípade, že tomu tak nie je sa neutrálna os posúva smerom k tuhšej strane, kde je pri danom namáhaní vyššia pevnosť. [37]



Obr. 27: Zaťaženie sendvičovej konštrukcie na ohyb [2]

Pre húževnaté materiály má skúška ohybom menší význam ako ostatné mechanické skúšky. Je to z toho dôvodu, že telesá sa deformujú ale nikdy nedôjde k lomu, čo znemožňuje

stanovit' výslednú pevnosť materiálu. Preto sa skúška ohybom zvyčajne používa len pre krehké materiály, kde je možné určiť deformačnú schopnosť, ktorú pri skúške ťahom nie je možné určiť, pretože sa napätím vyvolá len nepatrné a ťažko merateľné predĺženie. [36, 37]

### 3.1.1 Trojbodová skúška ohybom

V trojbodovej ohybovej skúške je skúšobné teleso podporené ako nosník s dvoma podpormi a prehýbané konštantnou rýchlosťou tŕňom (pričnikom), ktorý pôsobí v strede rozpätia podpier (Obr. 27) tak dlho, pokým nastane lom skúšobného telesa alebo dokedy deformácia nedosiahne predom stanovené hodnoty.

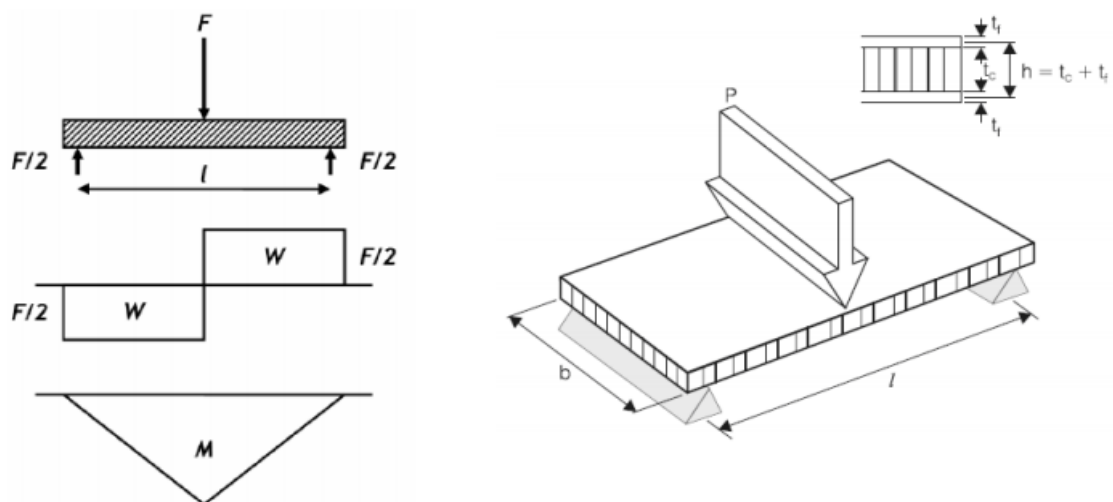
Ak pôsobí na stred skúšobného telesa sila  $F$ , pri vzdialenosti podpier  $l$  je maximálny ohybový moment daný vzťahom:

$$M_{O \max.} = \frac{F \cdot l}{4} \quad (5)$$

Najväčšie napätie sa potom stanoví zo vzťahu:

$$\sigma_{O \max.} = \frac{M_{O \max.}}{W_O} \quad (6)$$

Kde  $W_O$  je modul prierezu v ohybe. [34]



Obr. 28: Priebeh a schéma ohybového momentu v trojbodovej ohybovej skúške [34, 35]

### 3.1.2 Štvorbodová skúška ohybom

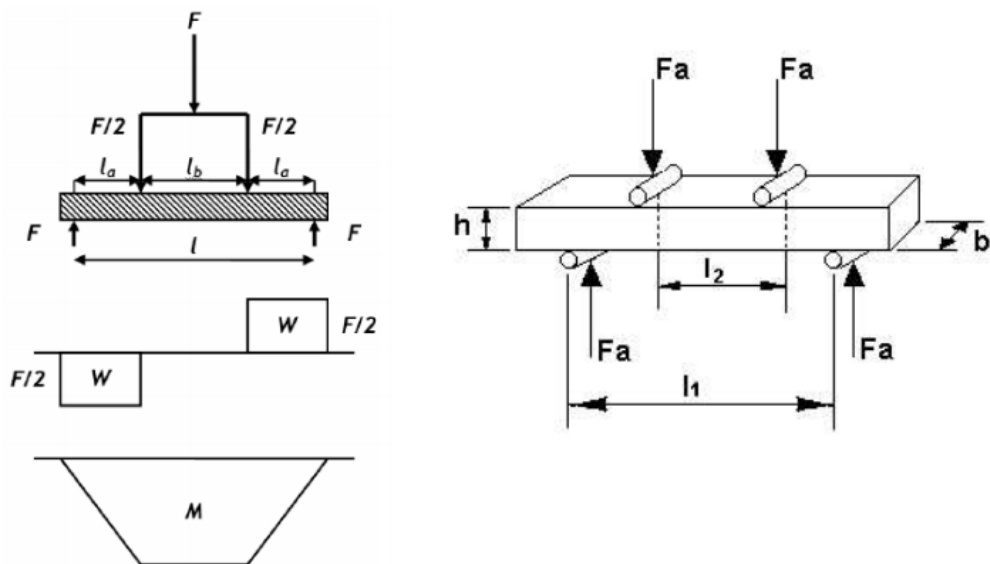
Štvorbodová skúška sa od trojbodovej líši v tom, že skúšobné teleso je v tomto prípade prehýbané dvoma ťmami namiesto jedného. Teleso je prehýbané v jednej tretine dĺžky od podpier z jednej aj druhej strany. Taktiež hodnoty pevností v ohybe sú nižšie a je aj iné rozloženie ohybového momentu (Obr. 28). Rovnomernejšie pôsobenie v celej dĺžke skúšobného telesa viedlo k tomu, že modul pružnosti bude určený vzťahom:

$$M_{O \max.} = \frac{F \cdot l_a}{2} \quad (7)$$

Najväčšie napätie sa potom stanoví zo vzťahu:

$$\sigma_{O \max.} = \frac{M_{O \max.}}{W_O} \quad (8)$$

Kde  $W_O$  je modul prierezu v ohybe. [34, 36]



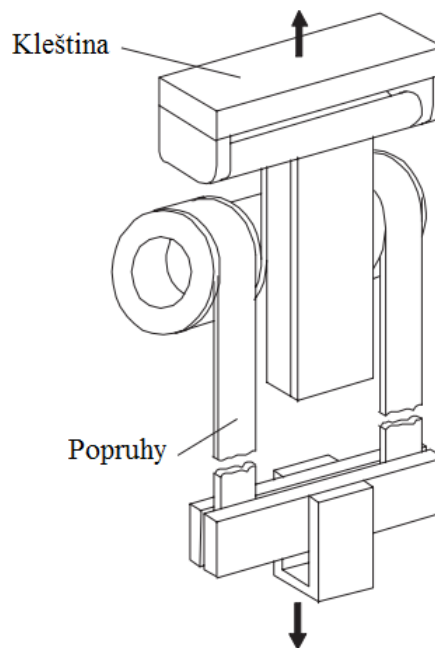
Obr. 29: Priebeh a schéma ohybového momentu v štvorbodovej ohybovej skúške [34, 36]

## 3.2 Skúška odlupovania vonkajších vrstiev

Skúškami odlupovania sa zisťuje odolnosť lepených spojov medzi vonkajšou vrstvou a jadrom sendvičovej štruktúry za stanovených skúšobných podmienok. Existujú tri základné typy testovania: skúška odlupu pomocou navijacieho bubnu (angl. Climbing drum peel test), ktorá je vhodná pre testovanie relatívne tenkých vonkajších vrstiev. Ďalšou metódou testovania je skúška odlupom konzolou v ťahu (angl. Single Cantilever Beam – SCB), ktorá je spolu s testom využívajúcim tlakový vzduch k delaminácii vhodná aj pre väčšie hrúbky vonkajších vrstiev. [32]

### 3.2.1 Skúška odlupovania pomocou navíjacieho bubnu

Priebeh tejto skúšky je taký, že vonkajšia plocha je na spodnom konci bezpečne upnutá k bubnu a horný koniec je upnutý v kleštine. Následne je aplikované zaťaženie pri konštantnej rýchlosti a zo skúšobnej zostavy sa stanovuje odolnosť proti odlupovaniu po dĺžke aspoň 150 mm. Odporúčané rozmery skúšobného vzorku sú: šírka 76 mm, dĺžka najmenej 305 mm, vrátane 25 mm presahu vonkajšej plochy na každom konci. Testovaná vzorka sa nesmie ohýbať v priebehu odlupovania vonkajšej vrstvy. [32]



Obr. 30: Climbing drum test [32]

V priebehu testovania sa dosiahne priemerná konštantná hodnota krútiaceho momentu potrebná na odstránenie adhézneho spojenia. Táto hodnota však bude obsahovať množstvo krútiaceho momentu potrebného na odlupnutie celej vonkajšej vrstvy. Preto sa priemerný odlupovací krútiaci moment môže vypočítať podľa vzťahu:

$$T = \frac{(R_o - R_i) \cdot (F_o - F_i)}{W} \quad (9)$$

Kde:  $R_o$  – Rádus obruby páskov vrátane jednej polovice hrúbky zaťažených páskov

$R_i$  – Rádus bubnu

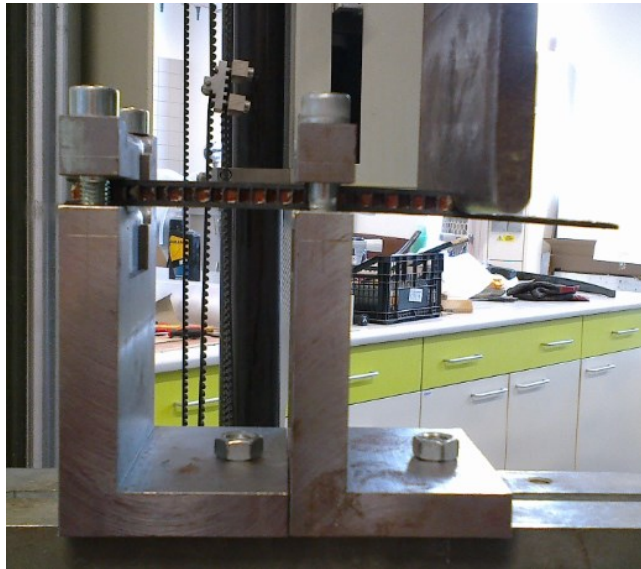
$F_o$  – Namerané priemerné zaťaženie

$F_i$  – Zaťaženie potrebné na ohnutie a odlupnutie vonkajšej vrstvy

$W$  – Šírka skúšobného vzorku [32]

### 3.2.2 Single Cantilever Beam – SCB

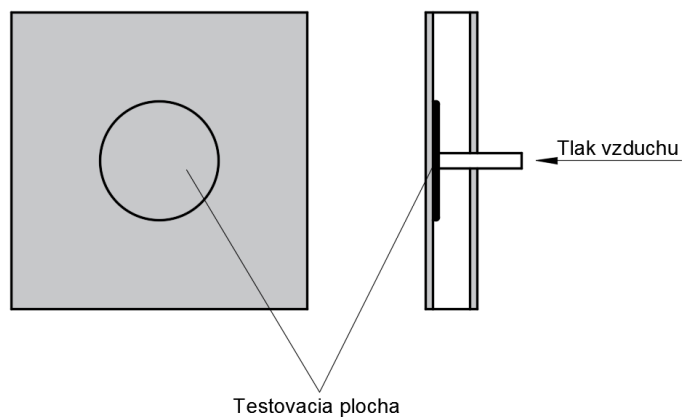
Jadro testovacieho vzorku je vyfrézované a upnuté smerom dole, tzn. Vonkajšia vrstva vytvára previs, na ktorom pôsobí zaťaženie. V tejto metóde nerozhoduje hrúbka jadra, aj keď testovacia vzorka je viazaná k tuhej oceľovej doske, aby sa zabránilo ohybu sendvičového vzorku, zatiaľ čo dochádza k odlupu vonkajšej vrstvy. [37]



Obr. 31: Single Cantilever Beam - SCE testovanie

### 3.2.3 Testovanie pomocou tlaku vzduchu

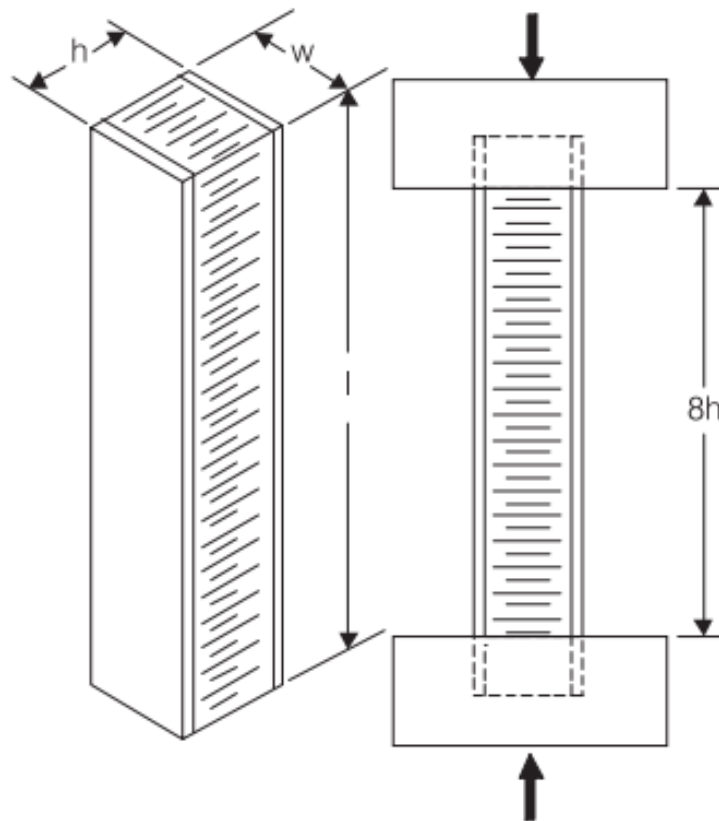
Test je robený na vzorke s počiatočnou kruhovou delamináciou v strede. Na jadre je vytvorená tenká teflónová vrstva, ktorá vytvorí počiatočnú delamináciu. K tenkej vrstve je privedená trubička, pomocou ktorej je dovnútra sendviču privádzaný tlakový vzduch. Tlak je riadený redukčným ventilom. Hodnota tlaku bude zaznamenaná v okamihu odlupovania vonkajšej vrstvy od jadra. [33]



Obr. 32: Testovanie odlupovania pomocou tlaku vzduchu

### 3.3 Tlaková skúška

Skúška pevnosti v tlaku je podobná ako skúška v ťahu. Skúšobná vzorka je zaťažená dvoma rovnako veľkými silami  $F$ , ktoré na teleso pôsobia v pozdĺžnej osi vzorky. Vzorka by mala byť aspoň 2,5 cm široká  $h$  a dĺžka by mala byť aspoň osemnásobkom sendvičovej hrúbky. Aby bolo zabránené predčasnému porušeniu vzorky je potrebné, aby bola vzorka plochá na koncoch. Počas testovania je vhodné dbať na to, aby vzorka bola rovná a rovnobežná s smerom zaťaženia, čím sa predchádza ďalšiemu možnému predčasnému porušeniu. [32]



Obr. 33: Zaťaženie skúšobnej vzorky pri skúške tlakom [32]

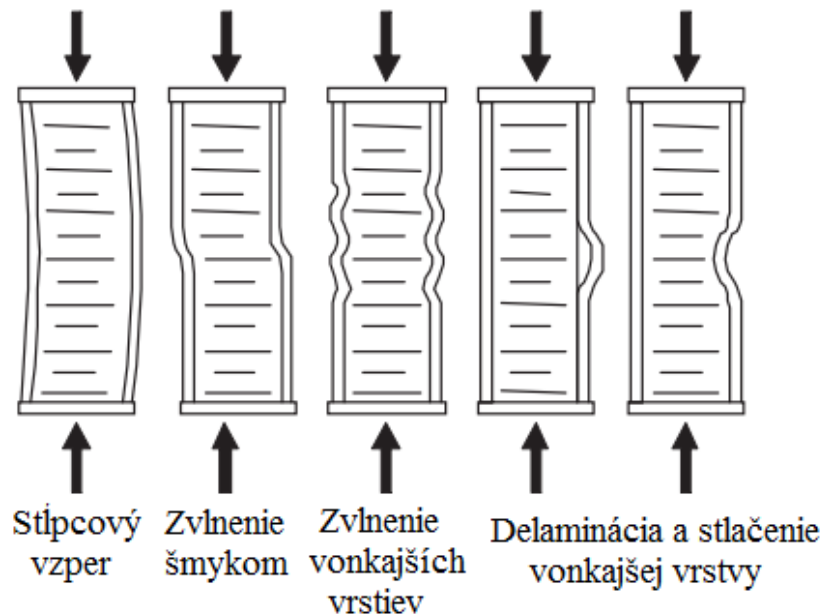
Priemernú pevnosť v tlaku je možné určiť nasledujúcim vzťahom:

$$\sigma = \frac{P}{2 \cdot t \cdot w} \quad (10)$$

kde  $P$  – medzné zaťaženie,  $t$  – hrúbka vonkajších vrstiev,  $w$  – šírka vzorky.

Existuje niekoľko možných modelov porúch, ktoré môžu vzniknúť behom testovania (Obr. 34). Je to napríklad stĺpcový vzper (Column Buckling), zvlnenie šmykom (Shear Crim-

ping), zvlnenie vonkajších vrstiev (Face Dimping) a delaminácia alebo stlačenie vonkajšej vrstvy (Face Wrinkling). [32]



Obr. 34: Možné poruchy pri skúške tlakom [32]

### 3.4 Skúška nízko-rýchlostným prierazom

Táto skúška pracuje na princípe voľne padajúceho telesa s ľubovoľne veľkou kinetickou energiou. Veľkosť kinetickej energie  $E$  závisí na hmotnosti telesa a na počiatočnej výške a je daná vzťahom:

$$m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (11)$$

Kde:  $m$  – hmotnosť telesa [kg],  $h$  – výška dopadu [m],  $v$  – okamžitá rýchlosť pádu telesa [m/s]

Skúška sa robí pri kontrole hotových výrobkov, napríklad laminátov, kde nechávame na vhodne upevnenú časť spadnúť oceľovú guľičku alebo padacie čidlo, ktoré umožňuje zvyšovať hmotnosť nasadením ďalšieho závažia.

Nárazník má tvar oceľovej pologule, do ktorej je votknutá tyč pre uchytenie elektromagnetu. Tyč slúži súčasne k uchyteniu prídavného závažia. Teleso je zavesené vo vzdialenosti 66 cm od upnutej vzorky. V prípade ak skúšobná vzorka pri dopade nárazníku nepraskne, zvýši sa hmotnosť. Pri každej hmotnosti sa skúša 10 vzoriek, až kým sa nenájde hmotnosť nárazníku, pri ktorej praskne 50% vzoriek. Výsledky sa vyhodnocujú tak, že počet pras-



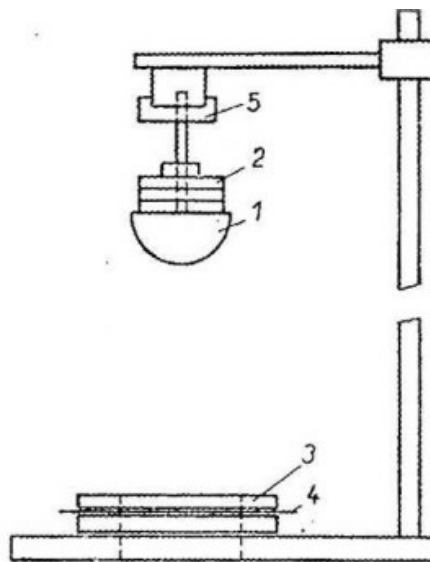
knutých vzoriek pri jednotlivých hmotnostiach telesa je vyjadrený v percentách. Hmotnosť pre výpočet zahrnuje hmotnosť nárazníku a súčet hmotností pridávaných závaží. [37]

Hmota, pri ktorej praskne 50% vzoriek, je určená nasledujúcim vzťahom:

$$G_{50} = G_{100} - \Delta G \cdot \left( \frac{S}{100} - \frac{1}{2} \right) \quad (12)$$

Kde:  $G_{50}$  – hmotnosť 50% porušení [kg],  $G_{100}$  – najmenšia hmotnosť, pri ktorej prasknú všetky vzorky [kg],  $\Delta G$  – hmotnosť prídavných závaží [kg],  $S$  – súčet percentuálnych hodnôt všetkých jednotlivých zložiek

Pomocou padostroja sa meria tvrdosť dosiek, napríklad Umakartu, tak, že sa na vzorku umiestni kopírovací papier smerom k ďalšej vložke čistého papieru. Tvrdosť sa potom hodnotí podľa priemeru odtlačku, kde tvrdší povrch skúšobného tele zanechá menší odtlačok než mäkkí materiál. Schéma padostroja je zobrazená na obrázku (Obr. 34).



Obr. 35: Schéma padostroja

1 – nárazník, 2 – závažie, 3 – upínacie čeľuste, 4 – skúšobné teleso, 5 - elektromagnet

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 CIELE DIPLOMOVEJ PRÁCE

Cieľom tejto diplomovej práce je zostrojenie špeciálnej skúšky štvorbodovým ohybom a vyhodnotenie výsledkov nameraných pri testovaní komerčných sendvičových panelov.

Jednotlivé ciele sú formulované takto:

1. Vytvorenie programu pre analytický výpočet ohybovej napätosti a závislosti na materiálových a geometrických parametroch sendvičovej štruktúry.
2. Vykonanie skúšky tlakom pre zistenie efektívneho modulu pružnosti v tlaku jednotlivých typov vzoriek.
3. Vykonanie špeciálnej štvorbodovej ohybovej skúšky pre zistenie únosnosti daných vzoriek a sledovanie deju porušenia vysokorýchlostnou kamerou.
4. Vytvorenie FEM modelov pre zistenie teoretickej únosnosti daných sendvičových vzoriek.
5. Porovnanie výsledkov nameranej únosnosti s teoretickou a vyhodnotenie kvality výrobkov.

## 5 VYTVORENIE PROGRAMU

Pre výpočet ohybovej napätosti a závislosti na materiálových a geometrických parametroch sendvičovej štruktúry bol vytvorený program v softvéri Microsoft Excel (Obr. 36). Pomocou tohoto programu môžu byť riešené všetky výpočty medzných ohybových momentov, efektívneho modulu pružnosti v tlaku, redukovaného kvadratického momentu plochy k neutrálnej ose, maximálne ohybové napätie apod.. Vytvorený program zohľadňoval odlišné hodnoty modulu pružnosti v ťahu a tlaku, tzv. bimodularitu.

OHYBOVÁ TUHOSŤ SENDVIČE - BIMODULARITA							
Vstupní parametry:			<b>SANDWICH</b>				
$E_1$	22 000	MPa					
$E_2$	70	MPa					
$E_3$	15 000	MPa					
$h$	20	mm					
$t_1$	0,23	mm					
$t_2$	19,54	mm					
$e$	8,388826459	mm					
$J_R$	39	mm <sup>4</sup>					
$E_{ef}$	1 274	MPa					
$M$	7 729	Nmm					
$\sigma_+$	1 679	MPa					
$\sigma_-$	1 585	MPa					
$\Omega$	147	N/mm <sup>3</sup>					
$i$	$b_i$	$h_i$	$y_i$	$S_i$	$U_i$	$J_t$	$S_i y_i^2$
1	1	0,23	0,115	0,23	0,02645	0,001	0,003
2	0,003181818	19,54	10	0,0621727	0,6217273	1,978	6,217
3	0,681818182	0,23	19,885	0,1568182	3,1183295	0,001	62,008
$\Sigma$	x	x	x	0,4489909	3,7665068	70,208	

Obr. 36: Výpočtový program vytvorený v softvéri Microsoft Excel

Do programu boli zadané nasledujúce hodnoty:

- $E_+$  - modul pružnosti v tlakovej strane
- $E_2$  – modul pružnosti jadra
- $E_-$  - modul pružnosti v ťahovej strane
- $h$  – celková hrúbka sendviču
- $t_1$  – hrúbka vonkajšej vrstvy sendviču
- $M$  – vypočítaný medzný ohybový moment.

## 6 TESTOVANIE SENDVIČOVÝCH PANELOV

### 6.1 Skúška tlakom

Testovanie skúšobných telies na tlak bolo prevedené v laboratórnom centre fakulty technologickej v Zlíne. K testovaniu bol použitý univerzálny skúšobný stroj ZWICK 1456. Vyhodnotenie dát prebehlo v softvéri TestXpert v2.1, ktorý sa nachádza v počítači pripojenom k stroju.



*Obr. 37: Skúšobný stroj ZWICK 1456*

Testovanie skúšobných vzoriek na tlak prebiehalo podľa normy ASTM C-364. Do stroja boli upevnené klieštiny s rozpätím 130 mm, do ktorých boli upevnené testované vzorky. Celkovo bolo testovaných 9 vzoriek, tzn. 3 vzorky od každého typu sendvičového panelu. Všetky vzorky boli testované rovnakým spôsobom pri izbovej teplote. Meraním bol zisťovaný efektívny modul pružnosti v tlaku  $E_{ef}$ .

### 6.1.1 Skúšobné vzorky

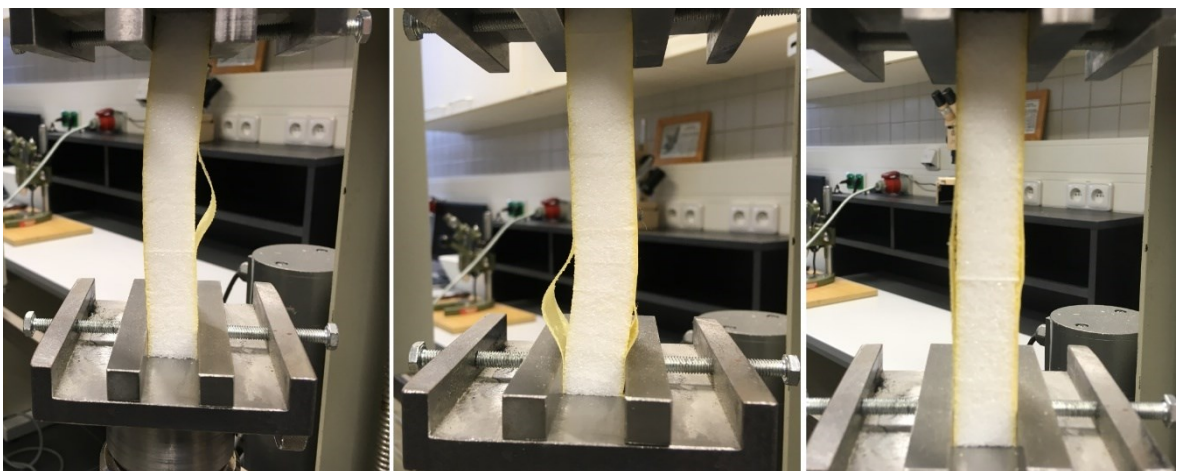
V skúške tlakom boli použité vzorky s penovým jadrom. Vonkajšie vrstvy tvoril rôzny počet fenolických prepregov. Hrúbka jednej vrstvy je 0,23 mm. Testované boli tri druhy vzoriek, ktoré sa líšili v počte prepregov použitých na vonkajšie vrstvy. Pre naše potreby boli teda vyrobené vzorky z 1, 2 a 3 prepregmi tvoriacimi vonkajšiu vrstvu. Výška penového jadra je 20 mm. Dĺžka sendvičového panelu je 130 mm a jeho šírka 30 mm. Skúšobná vzorka po testovaní je zobrazená na obrázku (Obr. 38).



*Obr. 38: Skúšobná vzorka s vonkajšími vrstvami zloženými z 1 prepregu*

### 6.1.2 Priebeh merania

Ako bolo už spomenuté v kapitole 3.3, v priebehu testovania sendvičových prvkov tlakom môže vzniknúť niekoľko možných modelov porúch. Niektoré z nich boli v tejto kapitole zobrazené aj na obrázku (Obr. 34). Behom nášho testovania sendvičových vzoriek sa skutočne niektoré tieto poruchy prejavili, ako napríklad stĺpcový vzper spolu s delamináciou vonkajšej vrstvy (vľavo a v strede) alebo obojstranná delaminácia (vpravo) (Obr. 39).



*Obr. 39: Príklady porušenia sendvičového panelu pri skúške tlakom*

### 6.1.3 Namerané hodnoty

V nasledujúcich tabuľkách sú zapísané namerané hodnoty pre 3 vzorky z každého druhu testovaného sendviču. Následne sú namerané hodnoty efektívneho modulu pružnosti v tlaku  $E_{ef}$  použité na výpočet skutočného modulu pružnosti v tlaku  $E$ . Vypočítané a namerané hodnoty budú slúžiť v ďalších kapitolách pre výpočty medzných ohybových momentov a napätí v programe Microsoft Excel 2016.

- **Vzorky s vonkajšou vrstvou zloženou z 1 prepregu**

Tab. 2: Namerané a vypočítané hodnoty vzoriek s vonkajšou vrstvou z 1 prepregu

n	$E_{ef}$ [MPa]	$\sigma_p$ [MPa]	$E_{1-}$ [MPa]
1	348	2,18	15 130
2	333	2,09	14 478
3	340	2,45	14 783

Vzorový výpočet:

$$E_{1-} = \frac{E_{ef} \cdot S_0}{2 \cdot t_1 \cdot b} = \frac{348 \cdot 600}{2 \cdot 0,23 \cdot 30} = 15\,130 \text{ MPa} \quad (13)$$

kde:  $S_0$  [mm<sup>2</sup>] je prierez telesa kolmý na pôsobiacu silu,  $t_1$  [mm] je hrúbka vonkajšej vrstvy a  $b$  [mm] je šírka sendviču.

- **Vzorky s vonkajšou vrstvou zloženou z 2 prepregov**

Tab. 3: Namerané a vypočítané hodnoty vzoriek s vonkajšou vrstvou z 2 prepregov

n	$E_{ef}$ [MPa]	$\sigma_p$ [MPa]	$E_{2-}$ [MPa]
1	636	7,01	14 172
2	681	8,04	15 174
3	807	7,61	17 982

Vzorový výpočet:

$$E_{2-} = \frac{E_{ef} \cdot S_0}{2 \cdot t_1 \cdot b} = \frac{636 \cdot 600}{2 \cdot 0,46 \cdot 30} = 14\,172 \text{ MPa} \quad (14)$$

- Vzorky s vonkajšou vrstvou zloženou z 3 prepregov

Tab. 4: Namerané a vypočítané hodnoty vzoriek s vonkajšou vrstvou z 3 prepregov

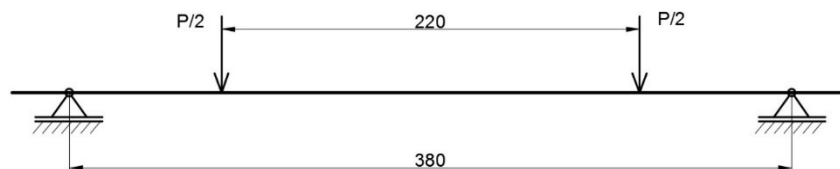
n	$E_{ef}$ [MPa]	$\sigma_p$ [MPa]	$E_{3-}$ [MPa]
1	939	12,1	14 425
2	904	11,6	13 888
3	983	11,3	15 101

Vzorový výpočet:

$$E_{3-} = \frac{E_{ef} \cdot S_0}{2 \cdot t_1 \cdot b} = \frac{939 \cdot 600}{2 \cdot 0,69 \cdot 30} = 14\,425 \text{ MPa} \quad (15)$$

## 6.2 Špeciálna skúška štvorbodovým ohybom

Tak isto ako tlaková skúška bolo aj testovanie štvorbodovým ohybom prevedené v priestoroch laboratórneho centra fakulty technologickej v Zlíne. Skúška bola robená za účelom zistenia maximálneho ohybového momentu, a tým teda únosnosti daných sendvičových vzoriek a pozorovanie javov, ktoré sprevádzajú porušenie sendviču. Pre testovanie boli vyrobené špeciálne prípravky, do ktorých bola testovacia vzorka uložená. Vzďialenosť medzi pôsobiacimi silami a podperami je znázornená na nasledujúcom obrázku (Obr. 40).

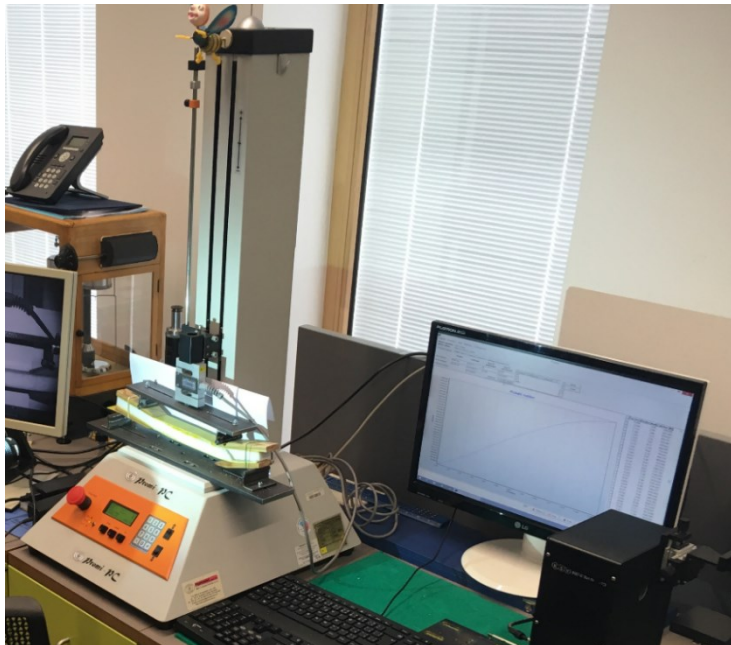


Obr. 40: Vzďialenosť pôsobiacich síl a podpier pri štvorbodovom ohybe

Na samotné meranie bol použitý počítačovo riadený univerzálny skúšobný prístroj PROMI PC 3000 určený pre skúšky v ťahu, tlaku, ohybe, pre testovanie pružín a ďalšie typy skúšok. Systém sa skladá zo skúšobného stojanu s digitalizovaným motorickým posuvom



a z riadiacej jednotky na báze PC, ktorý je dimenzovaný na maximálne zaťaženie 3 kN. Jednotka je ovládaná počítačom s operačným prostredím Windows a nadstavbovým softvérom Promi-PC (Obr. 41).



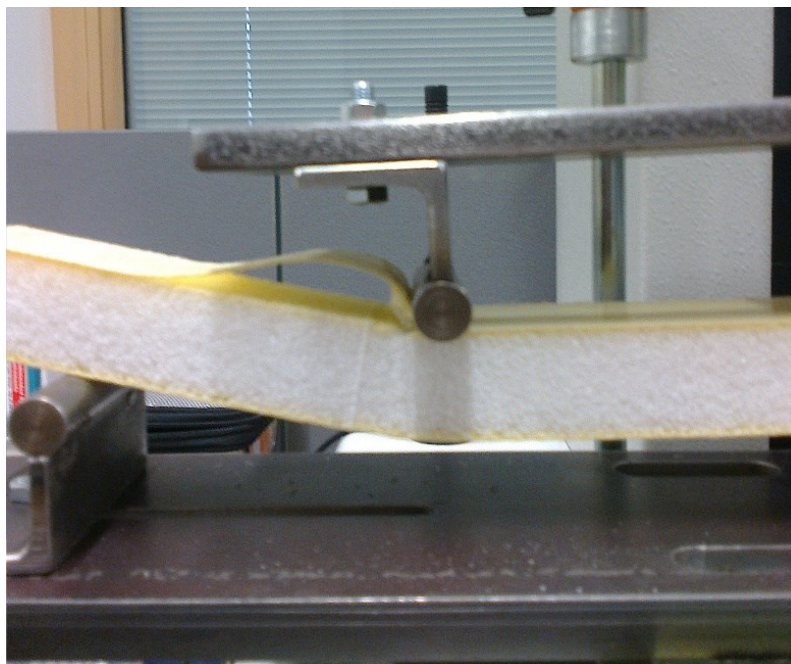
*Obr. 41: Skúšobný prístroj PROMI PC 3000*

Pre zachytenie mechanického chovania sendviču zaťaženého štvorbodovým ohybom bola použitá vysokorýchlostná kamera Olympus i-Speed 2 (Obr. 42), ktorá je vhodná pre snímání veľmi rýchlych dejov. Kamera bola pripojená k notebooku a ovládaná pomocou príslušného softvéru, v ktorom sa zaznamenávalo video priebehu merania a následne spracovávali zachytené dáta. Snímání bolo nastavené na 500 snímok za sekundu. Pre zlepšenie viditeľnosti bol na kameru pripevnený endoskop, ktorý svietil kolmo na testované vzorky.

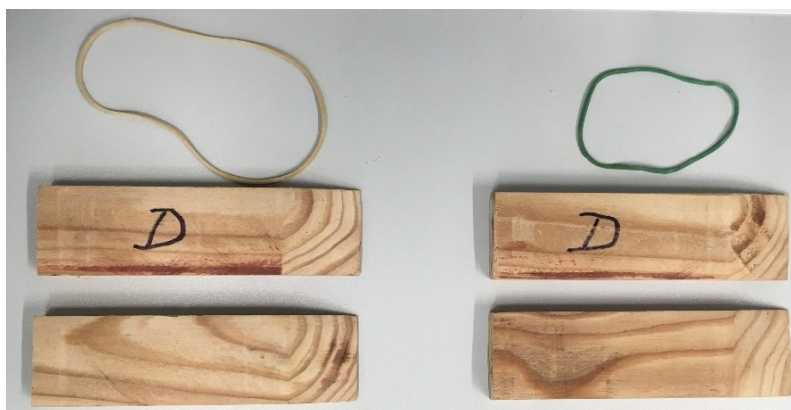


*Obr. 42: Vysokorýchlostná kamera Olympus i-Speed 2*

Aby bolo zabránené nežiadúcej vplyvom v miestach indentácie, ako je to zobrazené na obrázku (Obr. 43), boli vyrobené špeciálne doštičky, ktoré boli uchytené pomocou gumičky v miestach pôsobenia síl a podpier na skúšobnej vzorke. Tieto doštičky súžia ako ochrana pred porušením v mieste pôsobenia sily. Z toho dôvodu neboli adhézne spojené k testovanému sendviču. Prilepením by mohla byť ovplyvnená aj tuhosť skúšobnej vzorky.



*Obr. 43: Nežiadúce praskanie sendvičového vzorku v mieste pôsobenia sily*



*Obr. 44: Doštičky slúžiace na ochranu pred prasknutím pod pôsobiskami síl*

K notebooku ovládajúcemu vysokorýchlostnú kameru bol pripojený monitor, na ktorom bolo vidieť spomalený záber ohybu a deformácie skúšobnej vzorky pri nahrávaní videa do pamäte. Celá zostava použitá k meraniu je zobrazená na nasledujúcom obrázku (Obr. 45).



Obr. 45: Meracie prístroje a technika použitá pri skúške štvorbodovým ohybom

### 6.2.1 Skúšobné vzorky

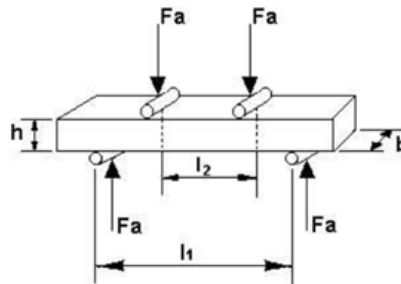
Pre testovanie boli rovnako ako pri tlakovej skúške použité sendvičové vzorky s penovým jadrom a vonkajšími vrstvami z fenolického prepregu s hrúbkou 0,23 mm. Testované boli tri druhy vzoriek, ktoré sa líšili v počte prepregov použitých na vonkajšie vrstvy. Dĺžka sendvičového panelu je 400 mm a jeho šírka 30 mm. Výška penového jadra je 20 mm.



Obr. 46: Sendvičová testovacia vzorka s tromi prepregmi

### 6.2.2 Postup merania

Na konce skúšobnej vzorky boli pomocou gumičky pripevnené doštičky. Takto pripravená vzorka bola položená na nepohyblivú časť testovacieho zariadenia podľa schémy štvorbodového ohybu (Obr. 47).

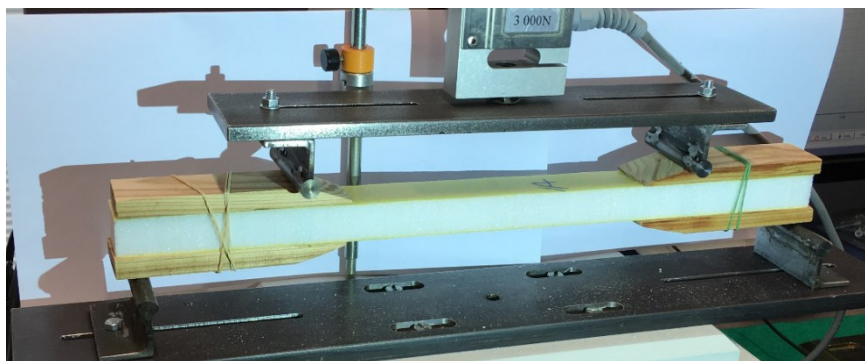


Obr. 47: Schéma štvorbodového ohybu

Po uložení skúšobnej vzorky sa začala pomaly pohybovať pohyblivá časť smerom k výrobku tak, aby nastal jemný dotyk s doštičkou, čím sa zabráni pohybu vzorku pri testovaní. Na počítači si zvolíme zostavený program s požadovanými hodnotami. V tomto meraní bola použitá rýchlosť zaťaženia 200 mm/min a pohyb pohyblivej časti bol nastavený tak, aby sa zastavil pri poklese sily o 20 %, tzn. pohyb sa zastaví v čase porušenia.

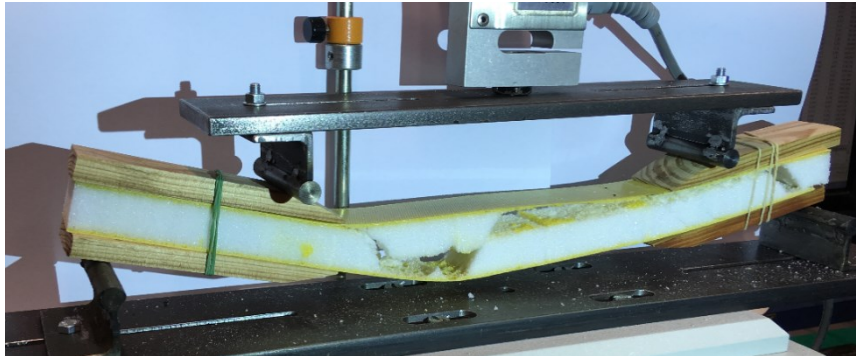
Skúšobný program pozostával zo siedmych bodov:

1. Zmazanie načítaných dát
2. Nulovanie polohy
3. Nulovanie času
4. Nulovanie sily
5. Štart načítavania dát
6. Posun (rýchlosť 200 mm/min, zastaviť pokles = 20 %)
7. Zastavenie zariadenia



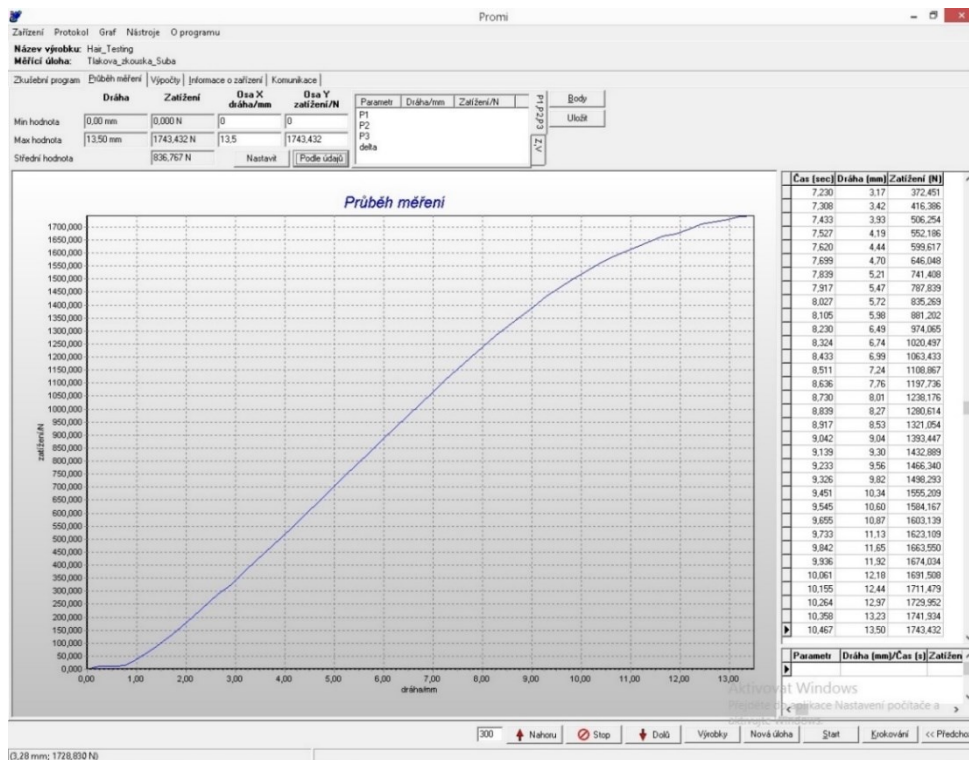
Obr. 48: Vzorka pripravená na testovanie

Vzorka na obrázku (Obr. 48) je připravená na testovanie. Testovanie začalo spustením vysokorýchlostnej kamery, po ktorom nasledovalo spustenie zaťažujúcej sily, ktorá pôsobila až do jej poklesu o 20 %, čím sa meranie ukončilo.



Obr. 49: Vzorka po ukončení merania

Po ukončení sa v softvéri PROMI PC zobrazili dáta a závislosť zaťažujúcej sily na dráhe, ktorú vykonala. Na notebooku sa medzitým začali nahrávať dáta, resp. snímky, ktoré zachytila vysokorýchlostná kamera. Po nahratí a uložení videa do pamäte sa posuvná časť vzdialila od testovanej vzorky, doštičky boli nasadené na novú vzorku a meranie sa opakovalo.



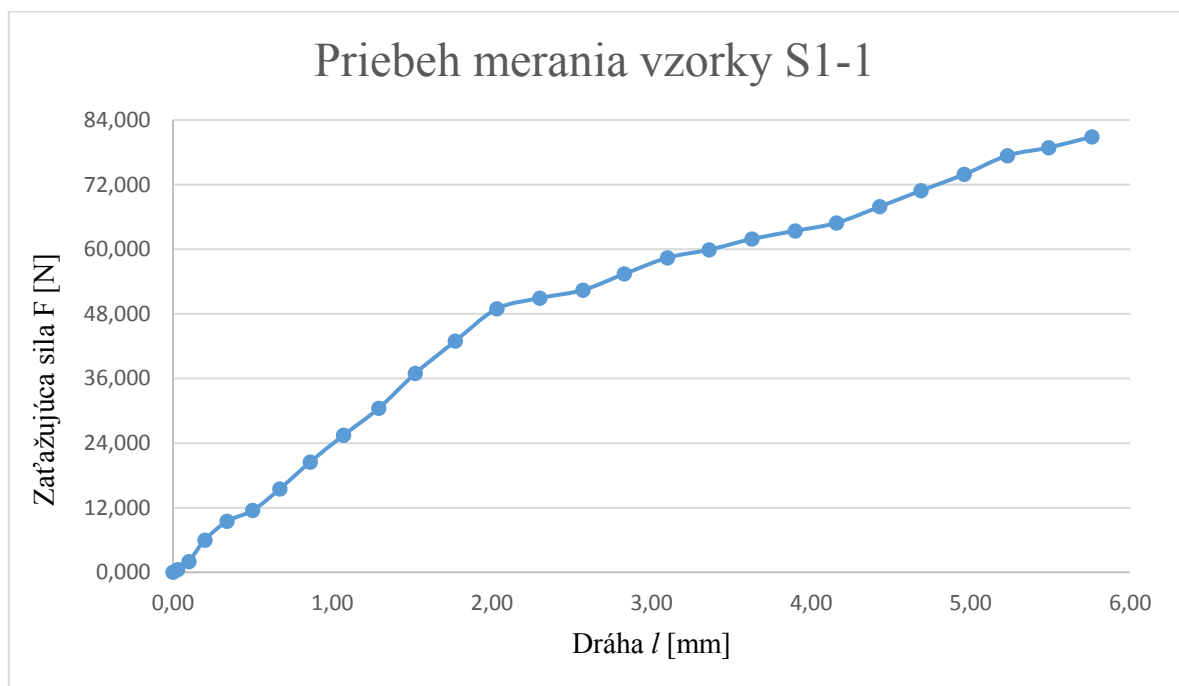
Obr. 50: Ukážka výsledkov z prostredia programu PROMI PC

### 6.2.3 Výsledky merania

Z každého typu vzorky, ktoré ako už bolo spomenuté sa líšili počtom prepregov použitých na vonkajšie vrstvy, sa podarilo vykonať 3 merania. V tejto kapitole bude vyhodnotená každá vzorka zvlášť, preto boli pre prehľadnosť špeciálne označené, napr. S1-1. Písmeno S znamená, že sa jedná o vzorku pre skúšku štvorbodovým ohybom. Číslo za písmenom znamená počet prepregov použitých vo vonkajších vrstvách danej vzorky a číslo za pomlčkou znamená číslo merania. Rovnaký postup vyhodnotenia bol dodržaný pri všetkých meraných vzorkách.

- **Namerané hodnoty a vyhodnotenie merania pre S1-1**

Pri meraní vzorky s označením S1-1 bola nameraná maximálna zaťažujúca sila  $F_{S1-1}$ , ktorej hodnota je 80,88 N. Priebeh merania je zobrazený v nasledujúcom obrázku (Obr. 51).

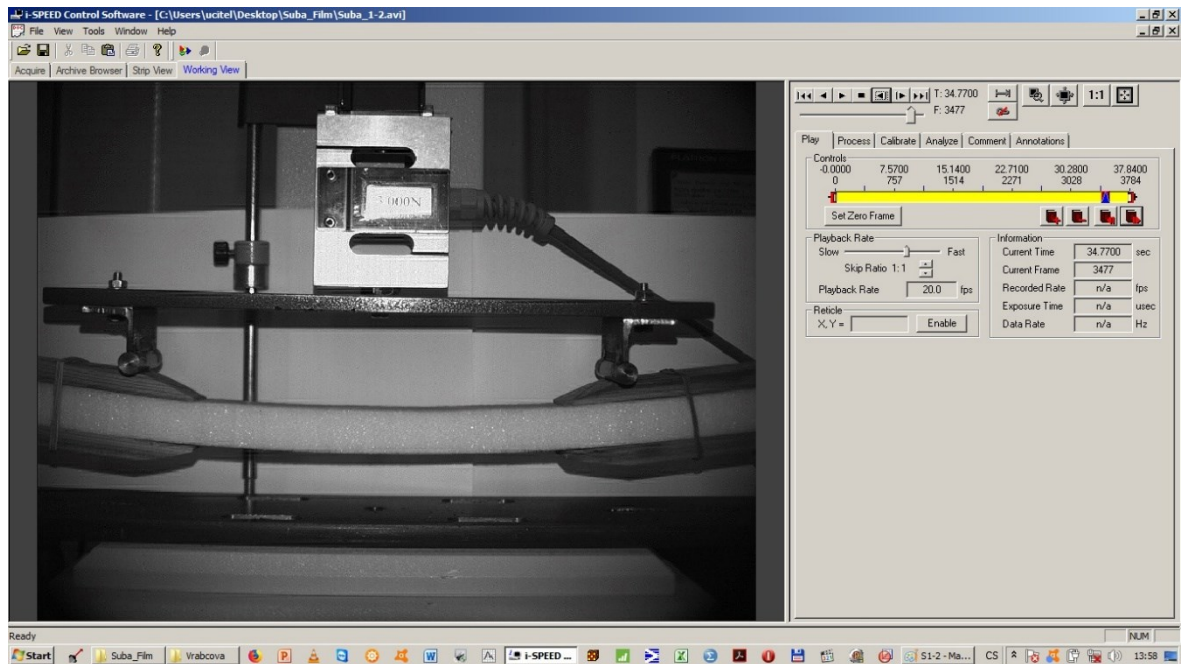


Obr. 51: Priebeh merania vzorky s označením S1-1

Pomocou nasledovného vzťahu bol vypočítaný medzný ohybový moment meranej vzorky:

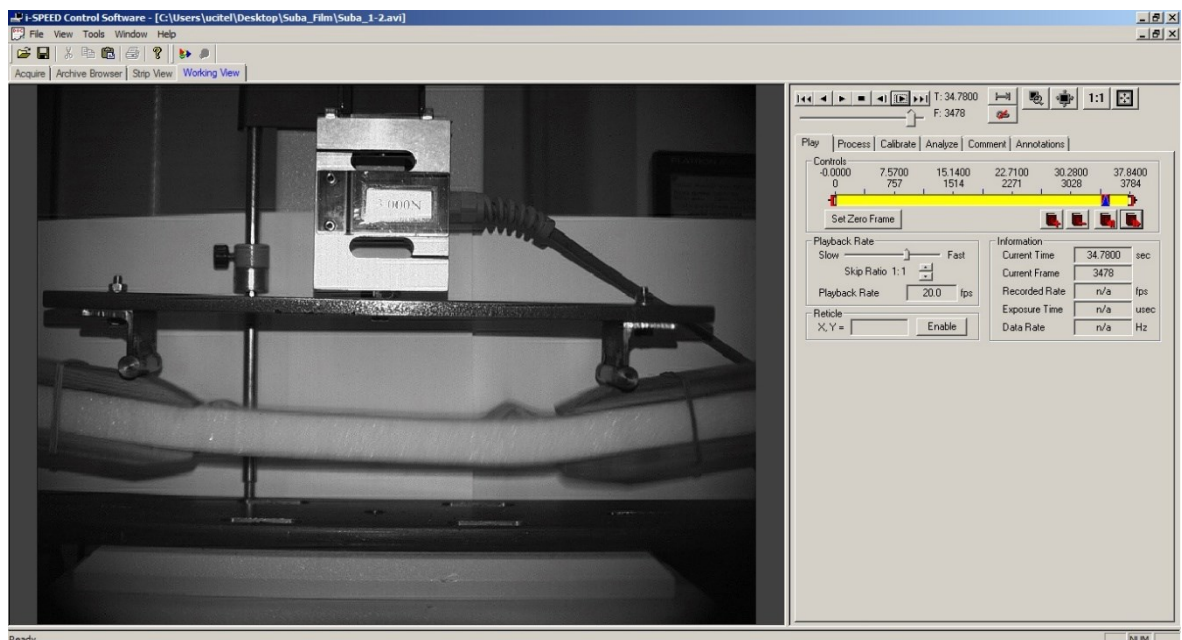
$$M_{S1-1} = \frac{F_{S1-1}}{2} \cdot c = 3235,2 \text{ Nmm} \quad (16)$$

kde  $c$  je vzdialenosť ramena pôsobiacej sily. Okrem merania zaťažujúcej sily a výpočtu medzného momentu bol pomocou vysokorýchlostnej kamery sledovaný dej tesne pred okamihom a v okamihu porušenia vzorky. Aké bolo mechanické chovanie testovaného sendviču je zobrazené na nasledujúcich obrázkoch.



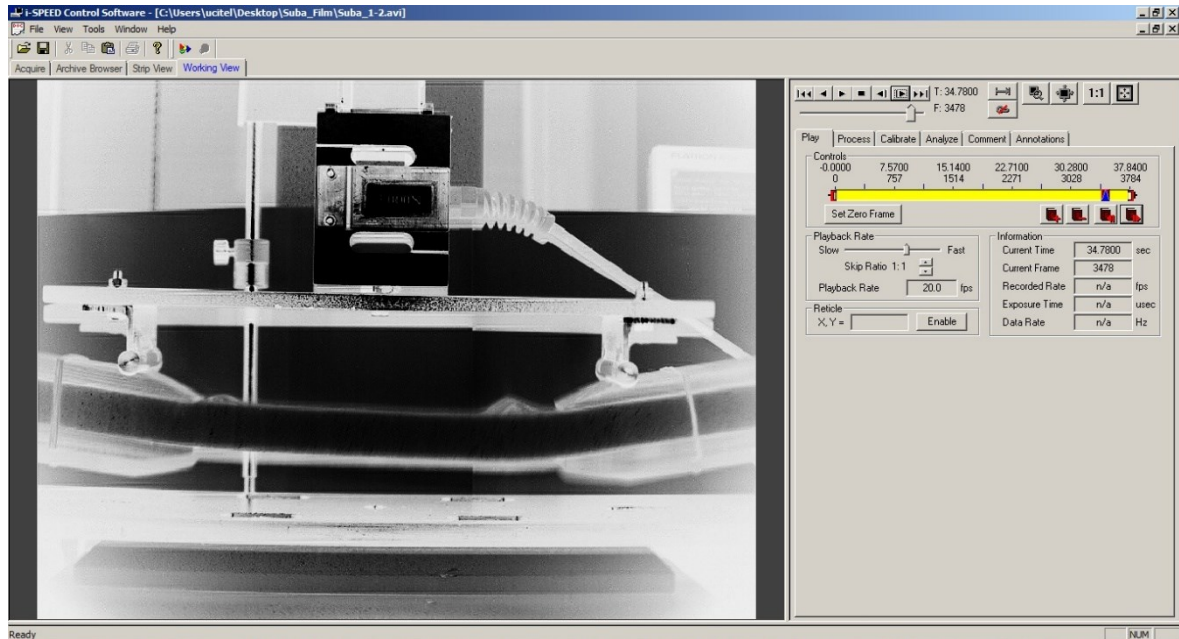
Obr. 52: Mechanické chovanie vzorky S1-1 0,05 sekundy pred porušením

Vyhodnotenie prebehlo u každého vzorku v softvéri, ktorý ovládal vysokorýchlostnú kameru. Najskôr sa video posunulo na snímku, ktorá zachytáva chovanie sendviču 0,05 sekundy pred jeho porušením (Obr. 52). Následne bolo video posunuté o snímku ďalej, kde je zachytené porušenie vzorky (Obr. 53).



Obr. 53: Mechanické chovanie vzorky S1-1 v začiatku porušenia

Snímky boli upravené prevrátením farieb a zmenou jasnosti a kontrastu, pre lepšie znázornenie vzniknutej deformácie alebo straty stability pred vzniknutou deformáciou (Obr. 54).

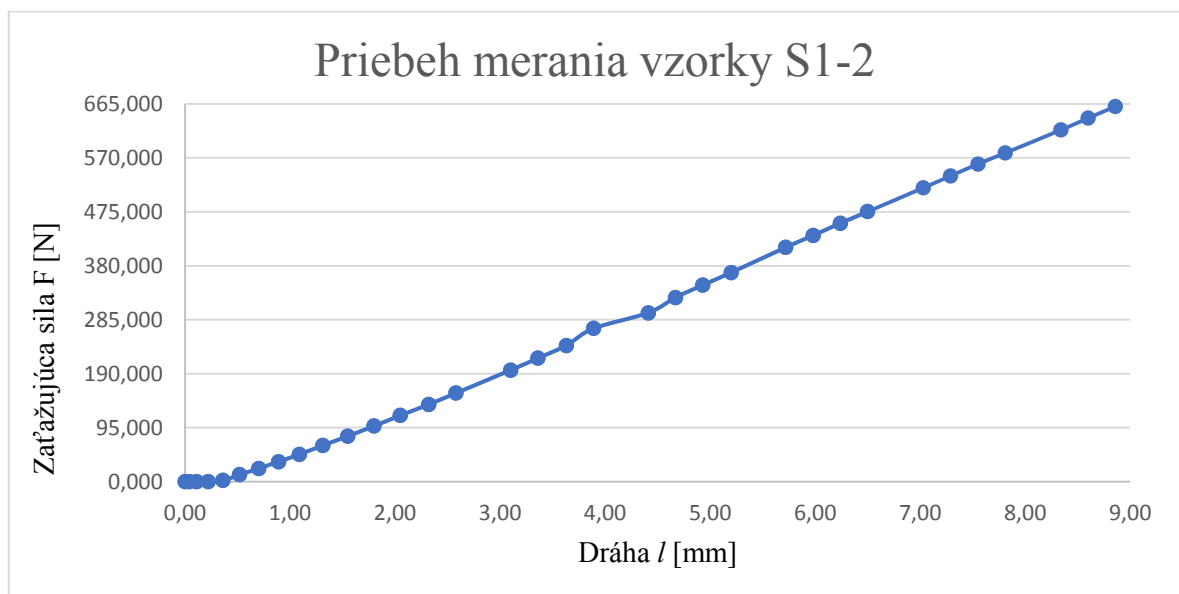


Obr. 54: Upravená snímka porušenia vzorky S1-1

Z týchto snímok bolo zhodnotené, že sa strata stability neobjavila. Mohlo to byť spôsobené nedostatočným adhéznym spojením vonkajších vrstiev s jadrom. V tomto prípade súdržnosť bola veľmi slabá a vonkajšia vrstva sa od jadra odlepila skôr, ako stihol sendvič stratiť stabilitu. Vzorka teda bola veľmi nekvalitná.

- **Namerané hodnoty a vyhodnotenie merania pre S1-2**

Rovnako ako v predošlom prípade bola nameraná maximálna zaťažujúca sila  $F_{S1-2}$ , ktorej hodnota je 660,53 N. Priebeh merania je zobrazený v nasledujúcom obrázku (Obr. 55).



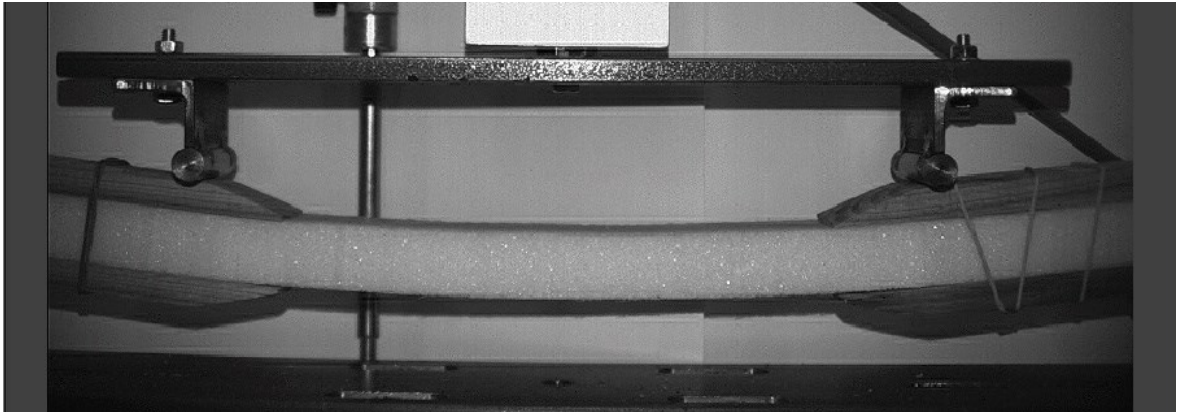
Obr. 55: Priebeh merania vzorky s označením S1-2



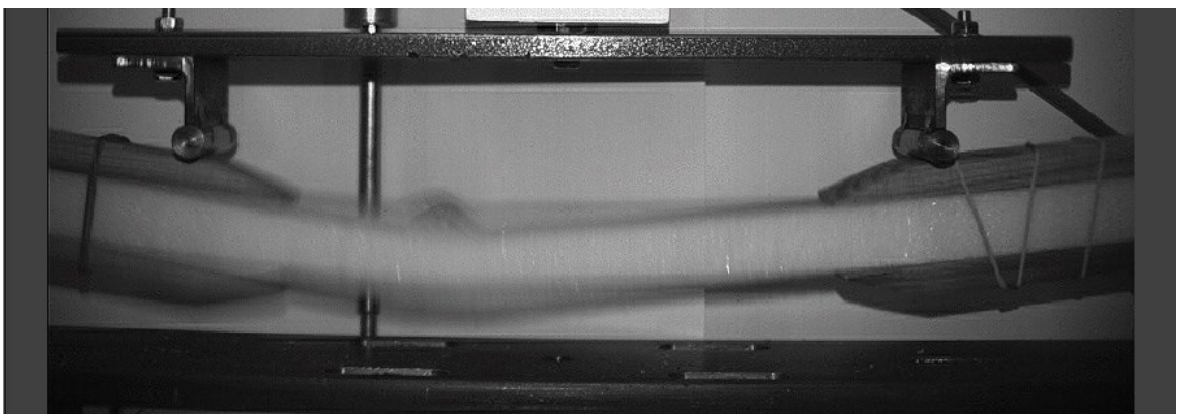
Ďalej bol vypočítaný medzný ohybový moment meranej vzorky:

$$M_{S1-2} = \frac{F_{S1-2}}{2} \cdot c = 26\,421,2 \text{ Nmm} \quad (17)$$

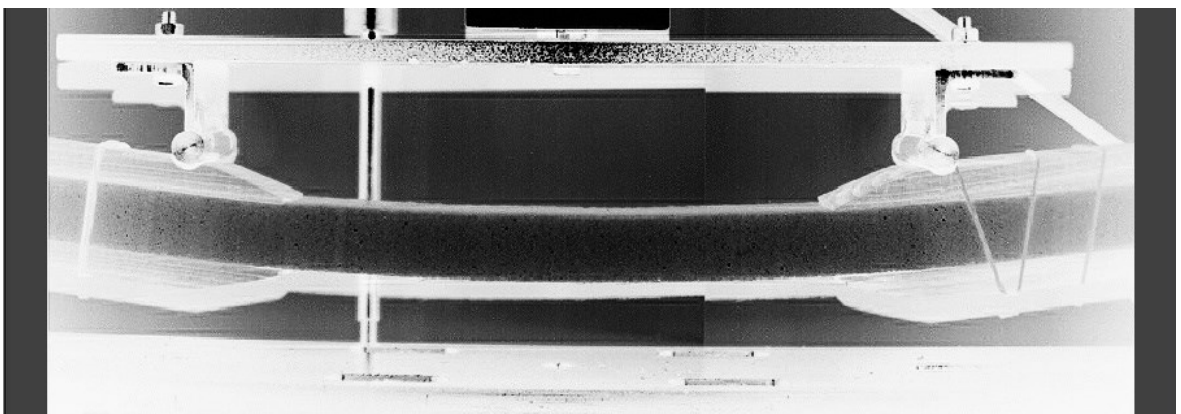
kde  $c$  je vzdialenosť ramena pôsobiacej sily.



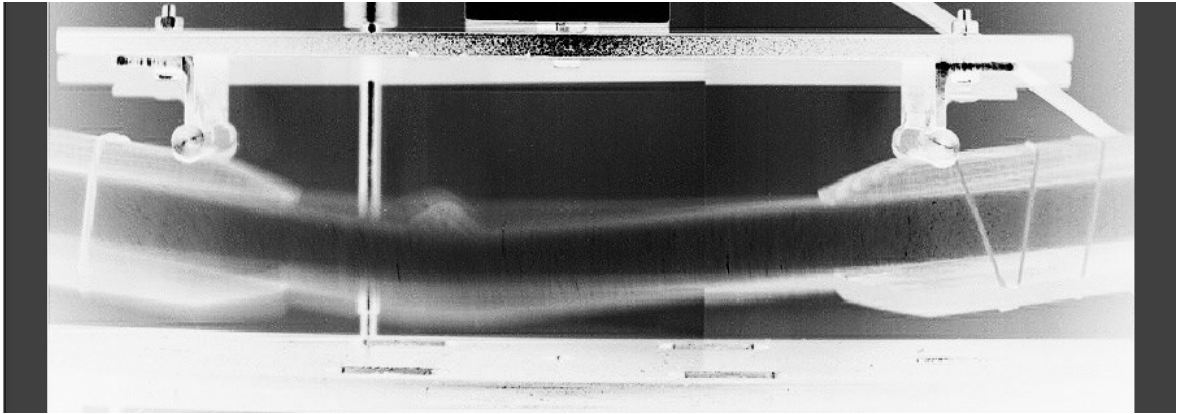
*Obr. 56: Mechanické chovanie vzorky S1-2 0,05 sekundy pred porušením*



*Obr. 57: Mechanické chovanie vzorky S1-2 v začiatku porušenia*



*Obr. 58: Upravená snímka vzorky S1-2 0,05 sekundy pred porušením*

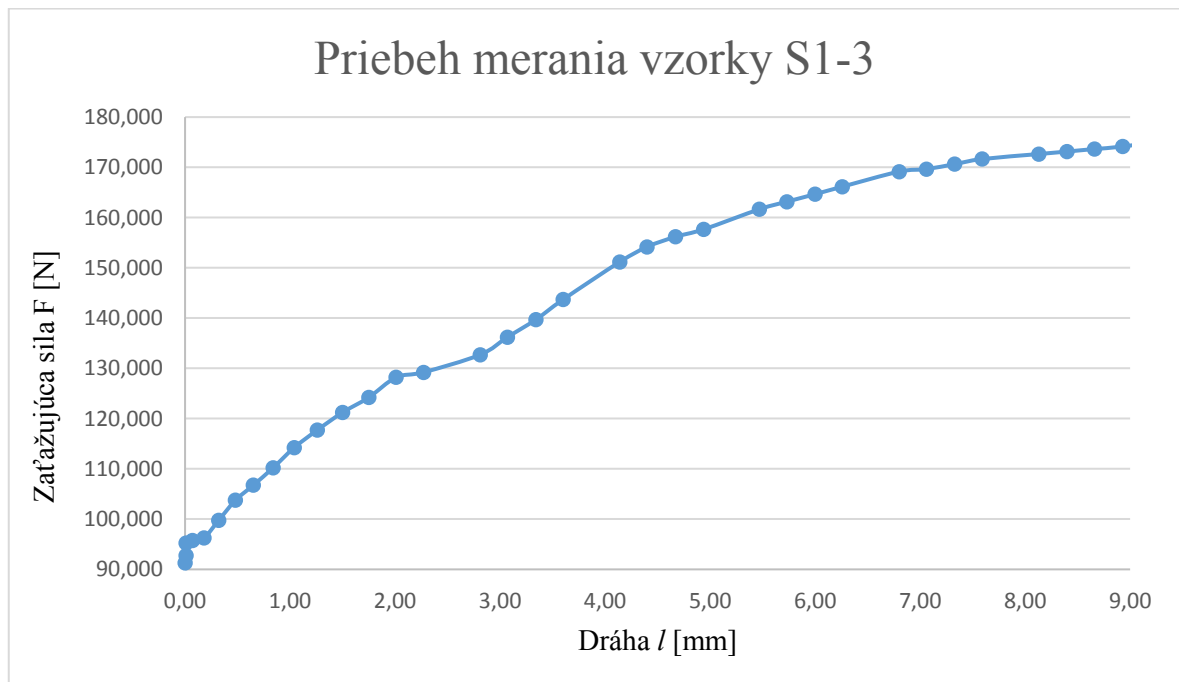


Obr. 59: Upravená snímka porušenia vzorky S1-2

V tomto prípade už bola súdržnosť lepšia, čo sa odrazilo aj na vysokom medznom momente a teda aj vyššej únosnosti v porovnaní so vzorkou S1-1. Na upravenom obrázku (Obr. 59) v čase porušenia je však vidieť, že súdržnosť nebola dokonalá. V určitom slabom mieste spojenia sa vonkajšie vrstvy odlepili od jadra. To znamená, že strata stability sa neobjavila vďaka nedostatočnej súdržnosti.

- **Namerané hodnoty a vyhodnotenie merania pre S1-3**

V meraní vzorky S1-3 bola nameraná maximálna zaťažujúca sila  $F_{S1-3}$ , ktorej hodnota je 187,63 N. Priebeh merania je zobrazený v nasledujúcom obrázku (Obr. 60).

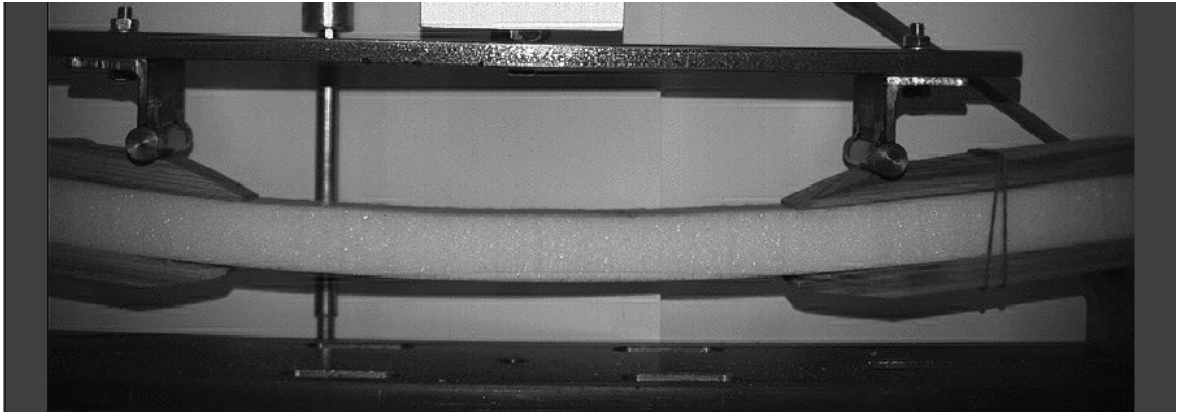


Obr. 60: Priebeh merania vzorky s označením S1-3

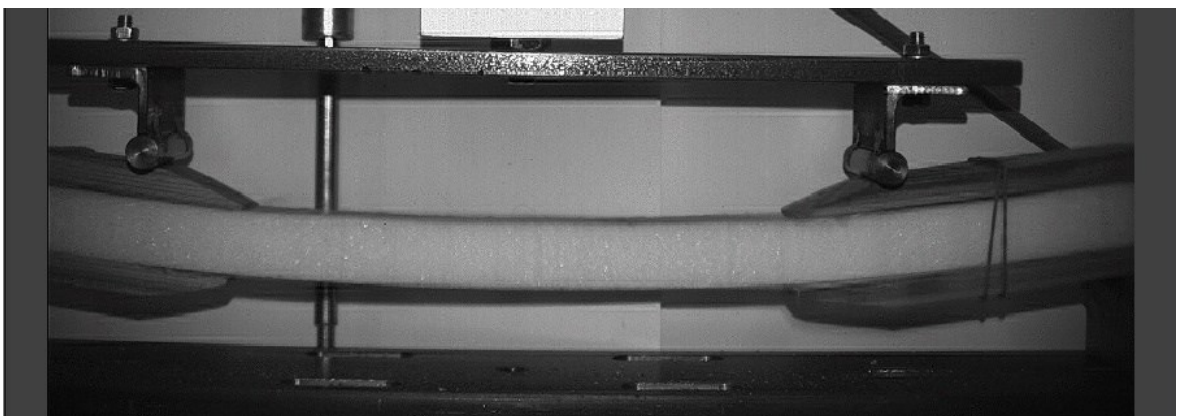
Výpočet medzného ohybového momentu meranej vzorky:

$$M_{S1-3} = \frac{F_{S1-3}}{2} \cdot c = 7505,2 \text{ Nmm} \quad (18)$$

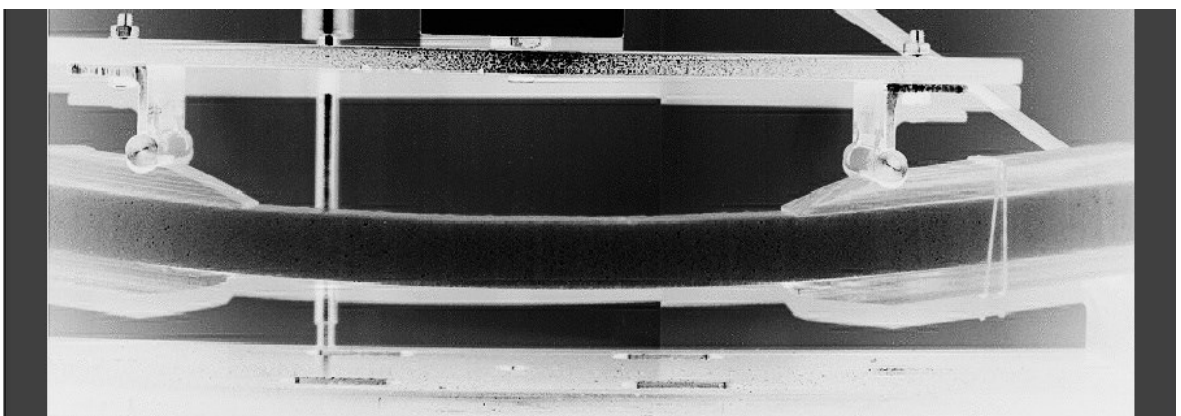
kde  $c$  je vzdialenosť ramena pôsobiacej sily.



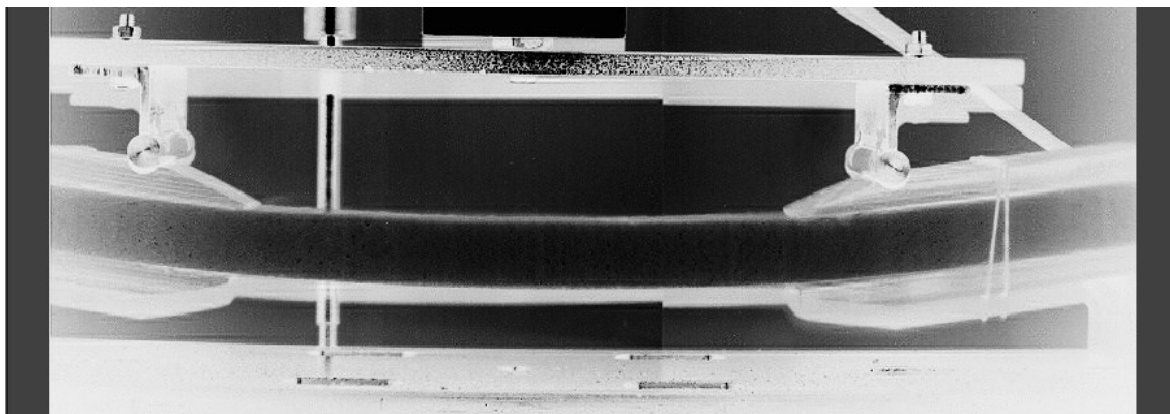
*Obr. 61: Mechanické chovanie vzorky S1-3 0,05 sekundy pred porušením*



*Obr. 62: Mechanické chovanie vzorky S1-3 v začiatku porušenia*



*Obr. 63: Upravená snímka vzorky S1-3 0,05 sekundy pred porušením*

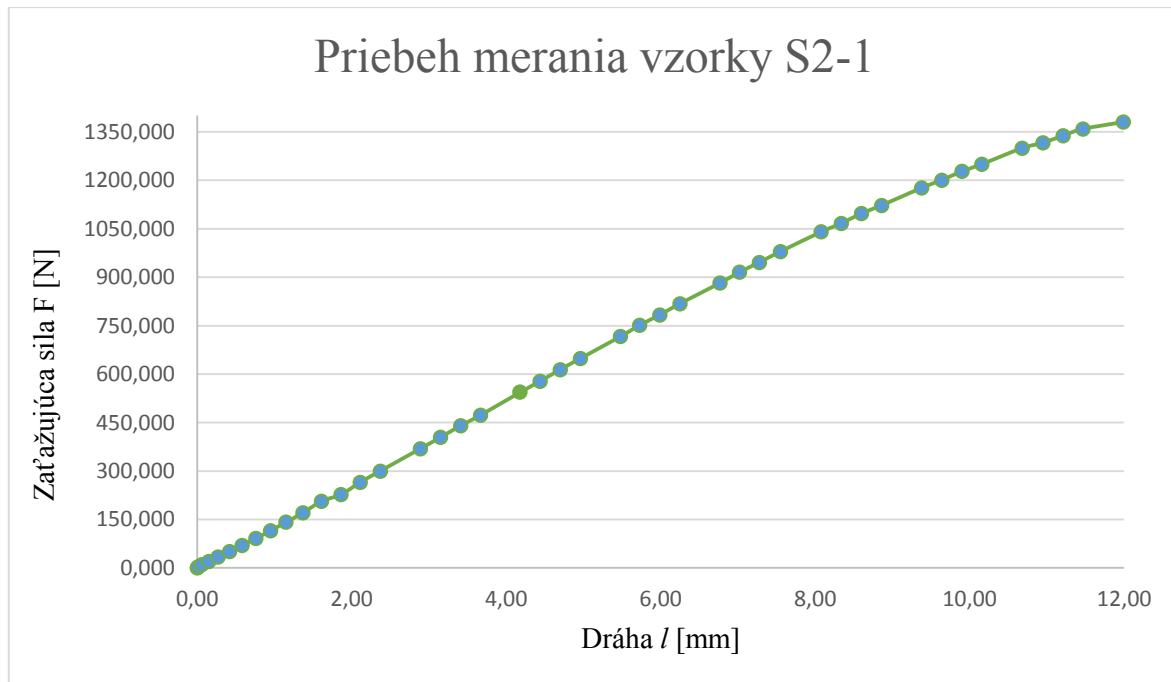


Obr. 64: Upravená snímka porušenia vzorky S1-3

Na upravenej snímke je vidieť opäť slabé miesto pro konci ľavej ochrannej doštičky, kde sa vonkajšia vrstva odlepila od jadra pri relatívne nízkej záťaži. Podobne ako v predošlých dvoch prípadoch sa strata stability pri tejto vzorke neobjavila.

- **Namerané hodnoty a vyhodnotenie merania pre S2-1**

V meraní vzorky S2-1 bola nameraná maximálna zaťažujúca sila  $F_{S2-1}$ , ktorej hodnota je 1380,47 N. Priebeh merania je zobrazený v nasledujúcom obrázku (Obr. 65).

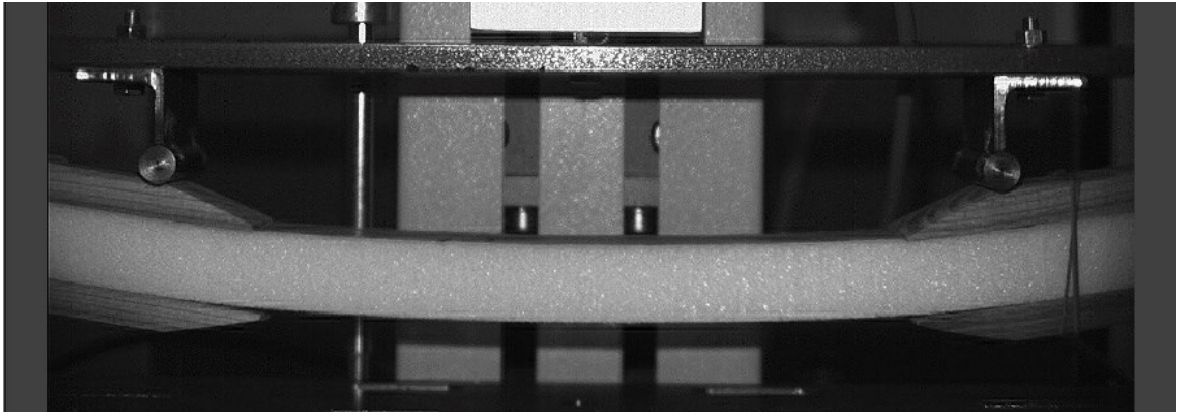


Obr. 65: Priebeh merania vzorky s označením S2-1

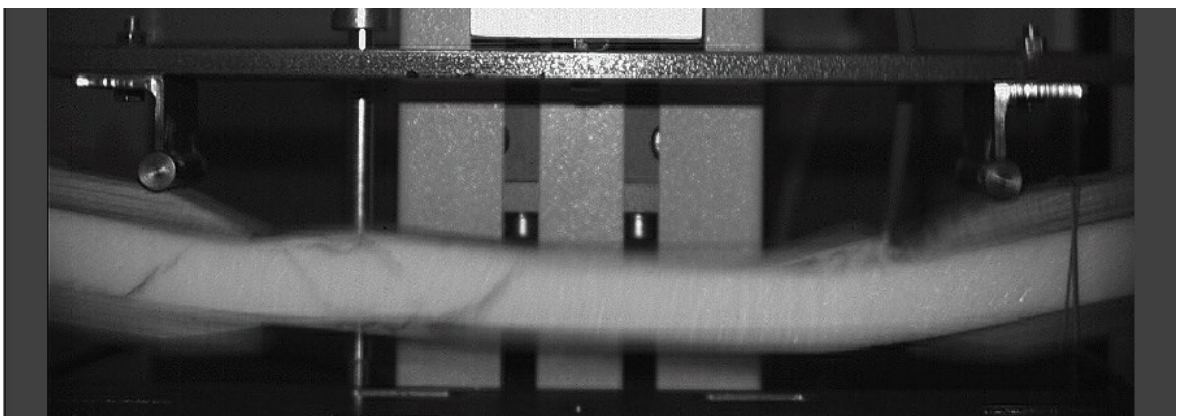
Výpočet medzného ohybového momentu meranej vzorky:

$$M_{S2-1} = \frac{F_{S2-1}}{2} \cdot c = 55\,218,8 \text{ Nmm} \quad (19)$$

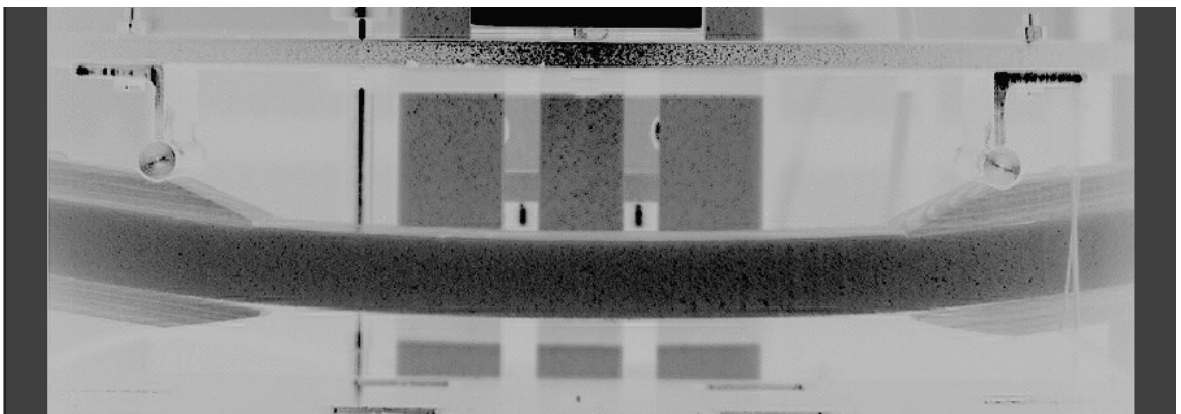
kde  $c$  je vzdialenosť ramena pôsobiacej sily.



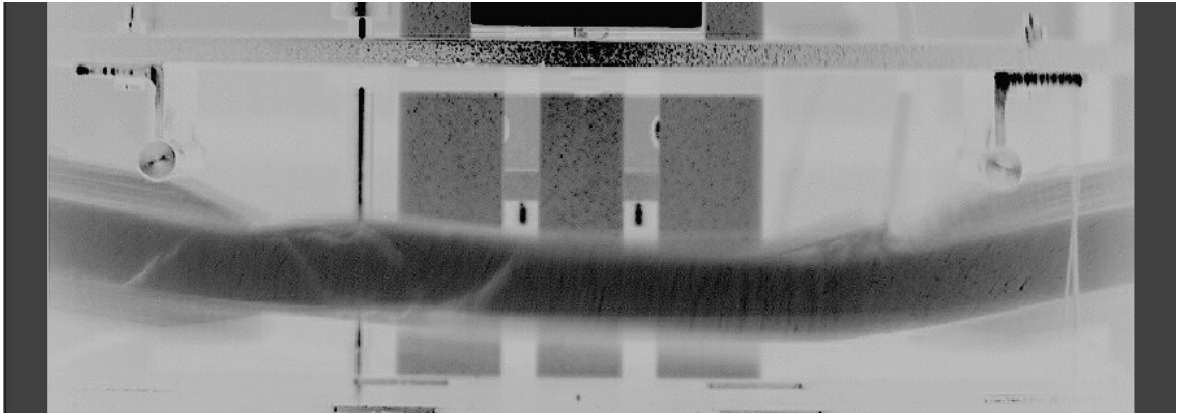
*Obr. 66: Mechanické chovanie vzorky S2-1 0,05 sekundy pred porušením*



*Obr. 67: Mechanické chovanie vzorky S2-1 v začiatku porušenia*



*Obr. 68: Upravená snímka vzorky S2-1 0,05 sekundy pred porušením*

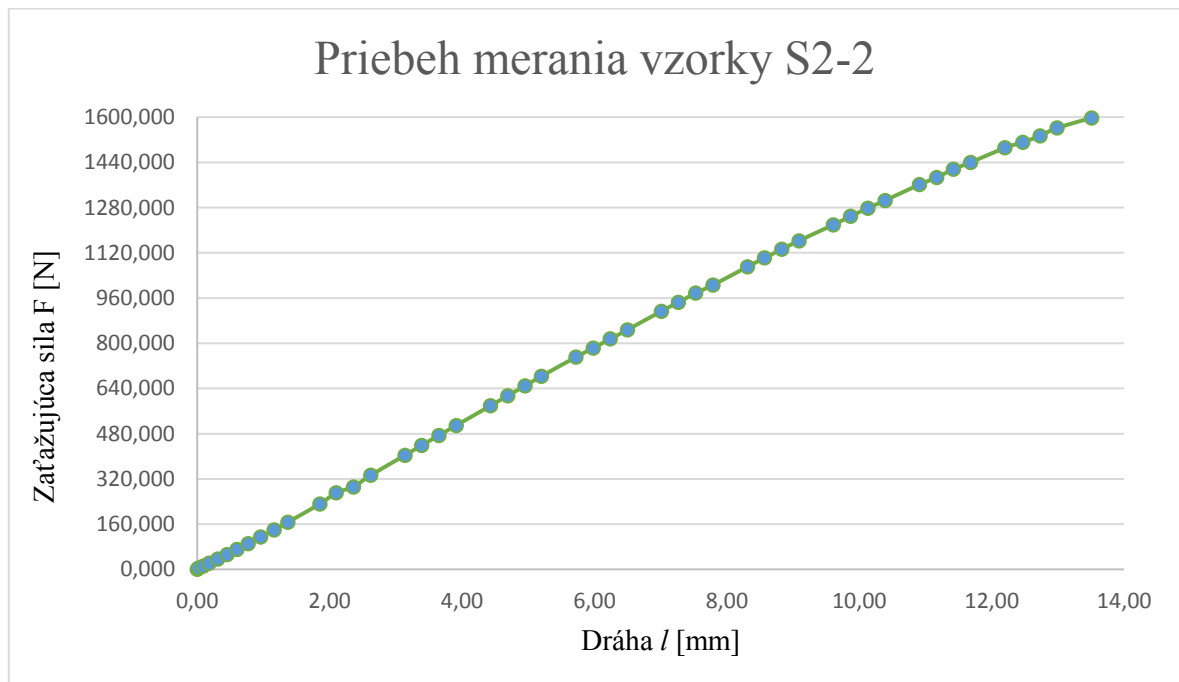


Obr. 69: Upravená snímka porušenia vzorky S2-1

Pri vzorke z označením S2-1 je vidieť veľký nárast medzného ohybového momentu v porovnaní s predošlými vzorkami. Na upravenom obrázku v čase porušenia (Obr. 69) je vidieť, že v momente, keď sa sendvič snažil strácať stabilitu, tak jadro nevydržalo ten nápor a prasklo skoro v celej vzorke súčasne. Z toho vyplýva, že adhézne spojenie vonkajších vrstiev a jadra je v tomto prípade veľmi dobré.

- **Namerané hodnoty a vyhodnotenie merania pre S2-2**

V meraní vzorky S2-2 bola nameraná maximálna zaťažujúca sila  $F_{S2-2}$ , ktorej hodnota je 1597,15 N. Priebeh merania je zobrazený v nasledujúcom obrázku (Obr. 70).

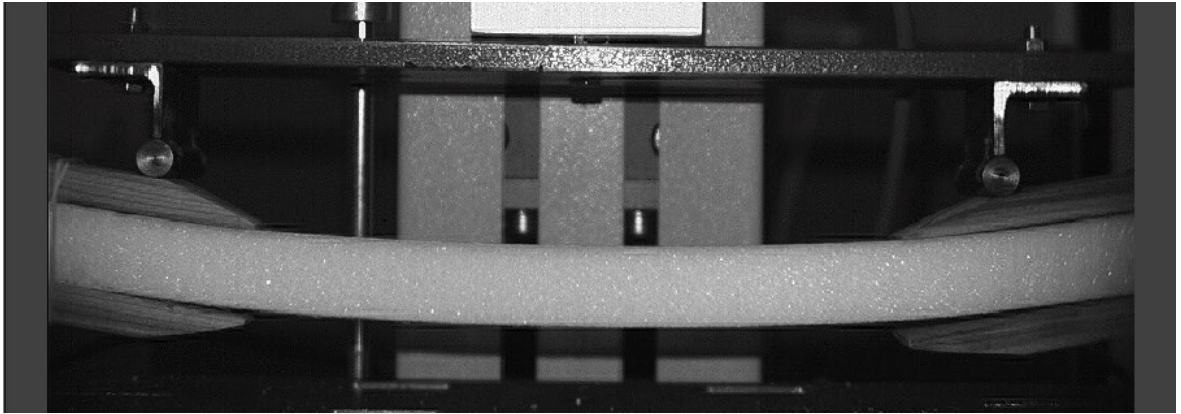


Obr. 70: Priebeh merania vzorky s označením S2-2

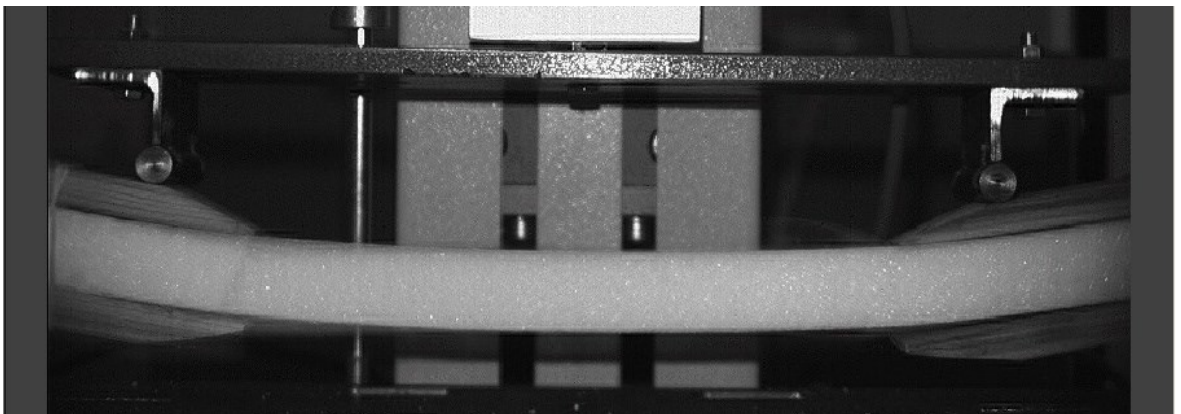
Výpočet medzného ohybového momentu meranej vzorky:

$$M_{S2-2} = \frac{F_{S2-2}}{2} \cdot c = 63\,886 \text{ Nmm} \quad (20)$$

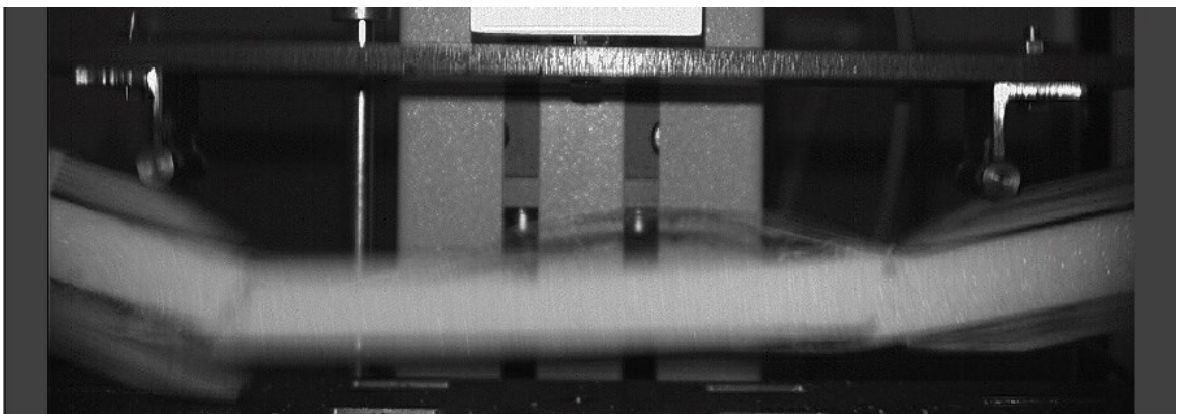
kde  $c$  je vzdialenosť ramena pôsobiacej sily.



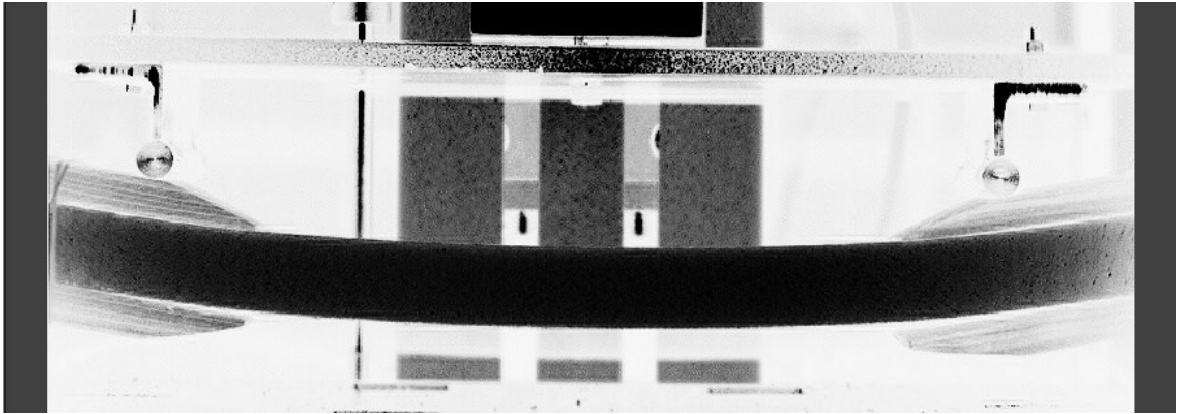
*Obr. 71: Mechanické chovanie vzorky S2-2 0,05 sekundy pred porušením*



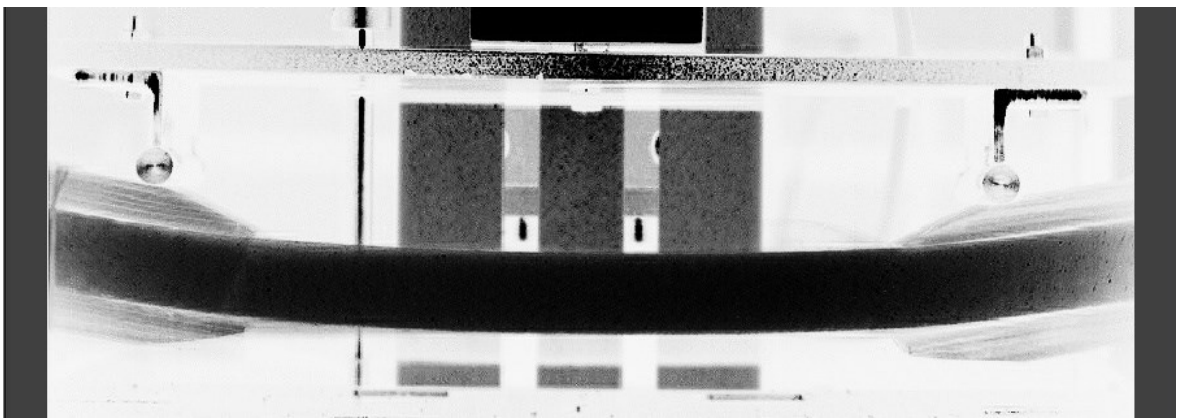
*Obr. 72: Mechanické chovanie vzorky S2-2 v začiatku porušenia*



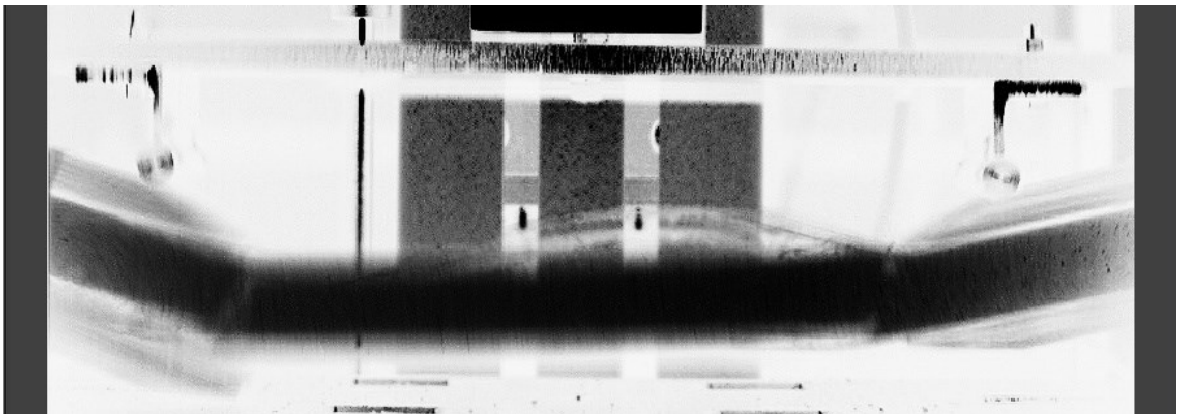
*Obr. 73: Mechanické chovanie vzorky S2-2 0,05 sekundy po porušení*



*Obr. 74: Upravená snímka vzorky S2-2 0,05 sekundy pred porušením*



*Obr. 75: Upravená snímka porušenia vzorky S2-2*



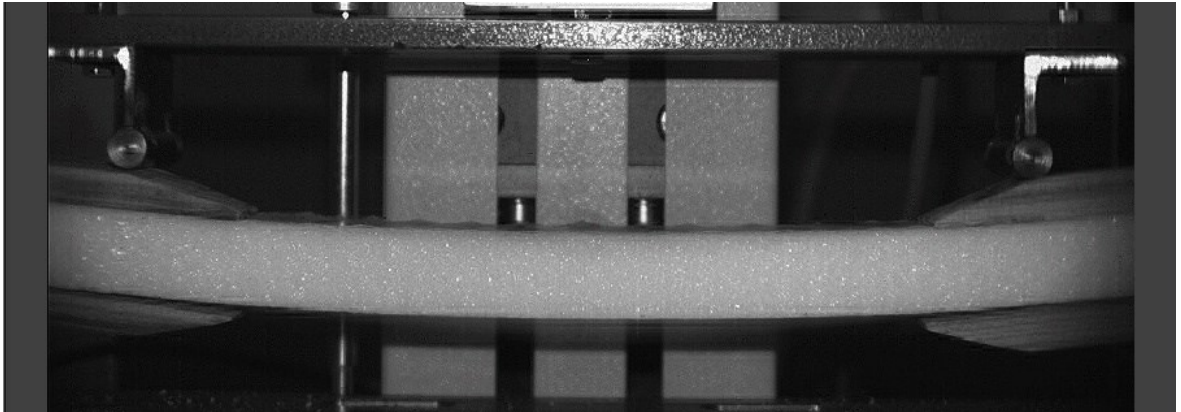
*Obr. 76: Upravená snímka vzorky S2-2 0,05 sekundy po porušení*

Na obrázku v čase porušenia (Obr. 75) je v porovnaní s obrázkom pred porušením (Obr. 74) vidieť, že tesne pred prasknutím sa vonkajšia vrstva namáhaná tlakom jemne zvlnila. V mieste začiatku ľavej doštičky však je vidieť náznak prasknutia jadra, ktoré sa v ďalšej 0,05 sekundy porušilo. V tomto prípade bola teda súdržnosť veľmi dobrá, ale objavilo sa slabšie miesto v jadre sendvičovej vzorky.

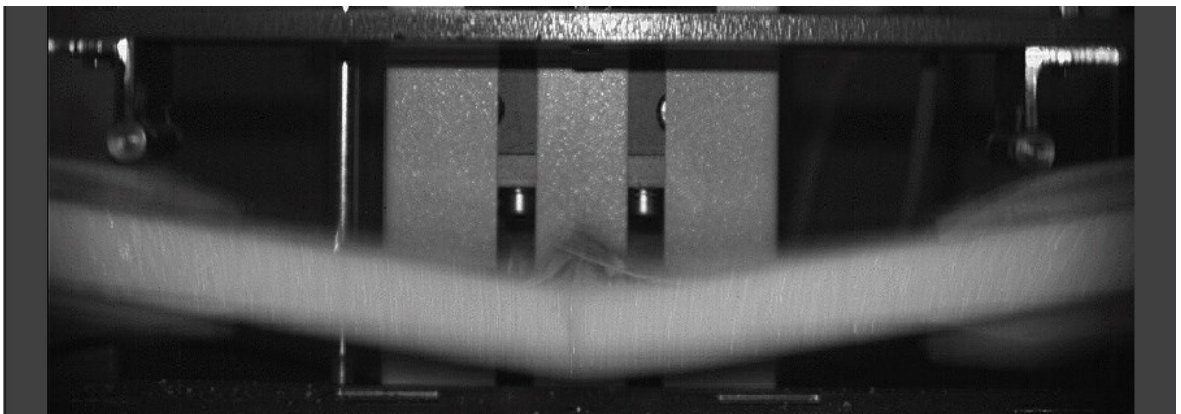


- **Namerané hodnoty a vyhodnotenie merania pre S2-3**

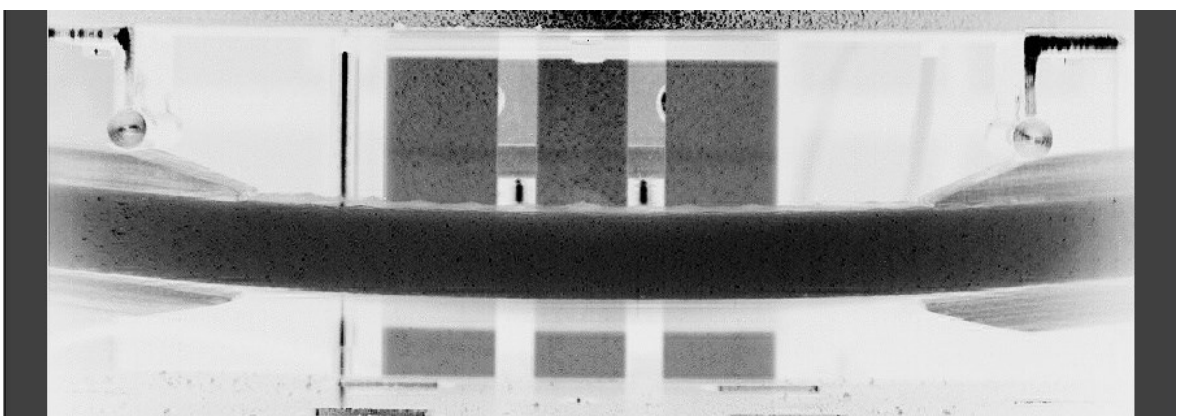
Pri meraní vzorky S2-3 sa podarilo úspešne zachytiť jej mechanické chovanie vysokorýchlostnou kamerou tak, ako v predošlých prípadoch.



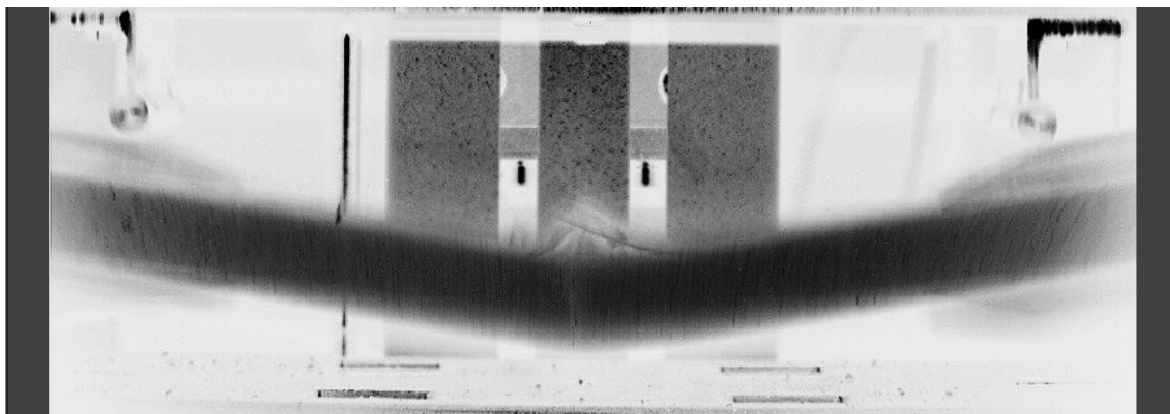
*Obr. 77: Mechanické chovanie vzorky S2-3 0,05 sekundy pred porušením*



*Obr. 78: Mechanické chovanie vzorky S2-3 v začiatku porušenia*



*Obr. 79: Upravená snímka vzorky S2-3 0,05 sekundy pred porušením*

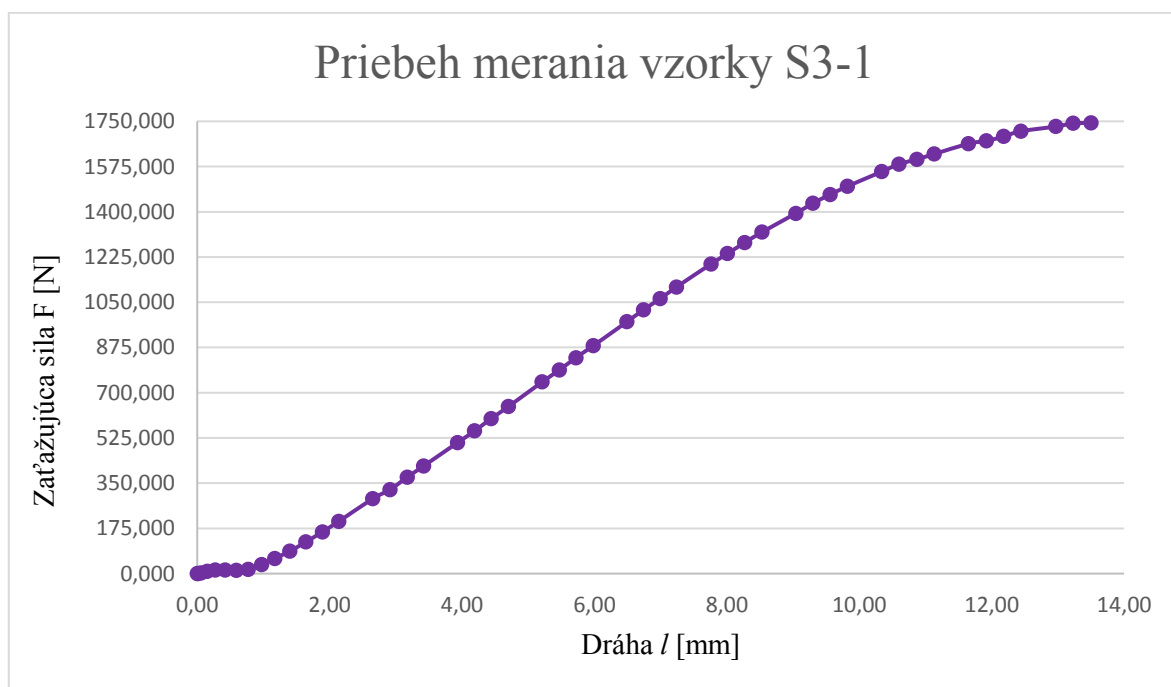


Obr. 80: Upravená snímka porušenia vzorky S2-3

Na obrázku tesne pred porušením (Obr. 79) je pri tejto vzorke nádherne vidieť stratu stability tlačenej laminátovej vrstvy na pružnom podklade jadra pred jej porušením v podobe malých vlniek. Táto vzorka bola z hľadiska kvality najlepšia v porovnaní s S2-1 a S2-2. Neobjavili sa na nej žiadne slabé miesta a práve vďaka tomu bolo možné sledovať stratu stability. Adhézia bola výborná a z toho dôvodu vzorka praskla vo všetkých miestach zároveň.

- **Namerané hodnoty a vyhodnotenie merania pre S3-1**

V meraní vzorky S3-1 bola nameraná maximálna zaťažujúca sila  $F_{S3-1}$ , ktorej hodnota je 1743,43 N. Priebeh merania je zobrazený v nasledujúcom obrázku (Obr. 81).

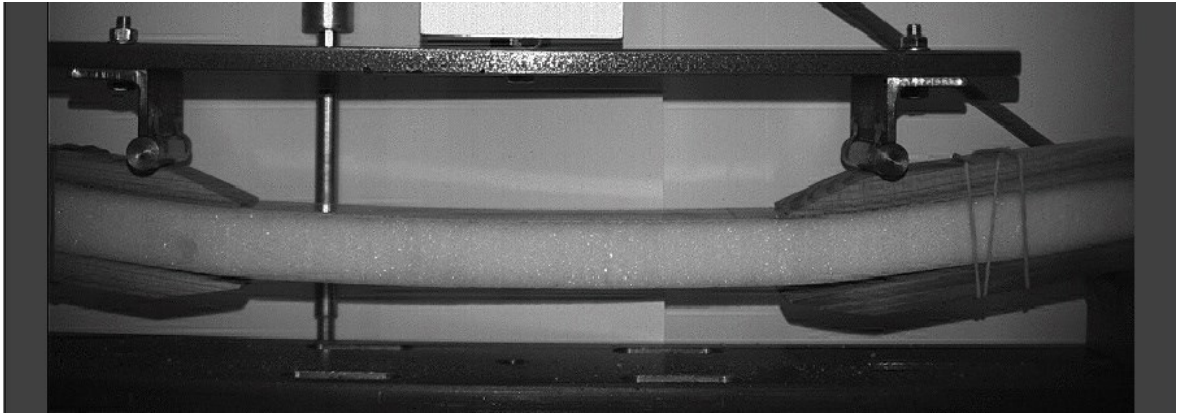


Obr. 81: Priebeh merania vzorky s označením S3-1

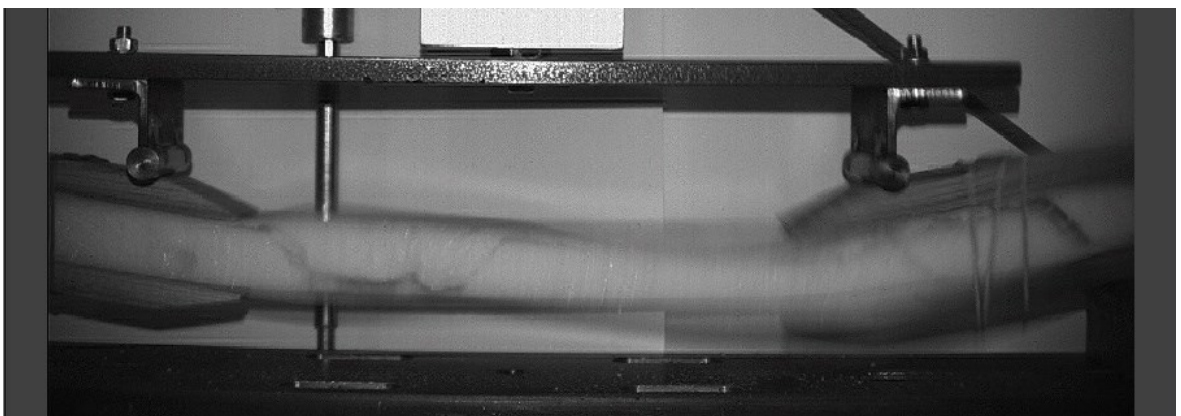
Výpočet medzného ohybového momentu meranej vzorky:

$$M_{S3-1} = \frac{F_{S3-1}}{2} \cdot c = 69\,737,2 \text{ Nmm} \quad (21)$$

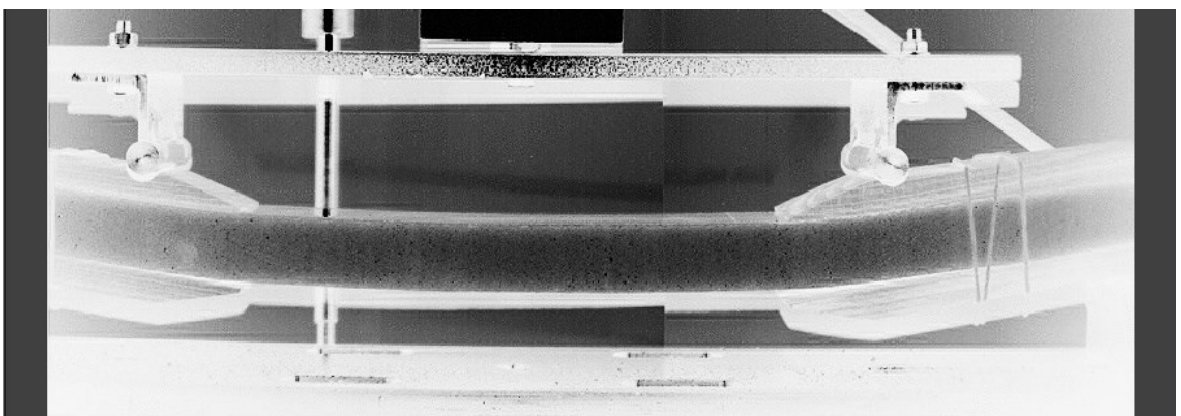
kde  $c$  je vzdialenosť ramena pôsobiacej sily.



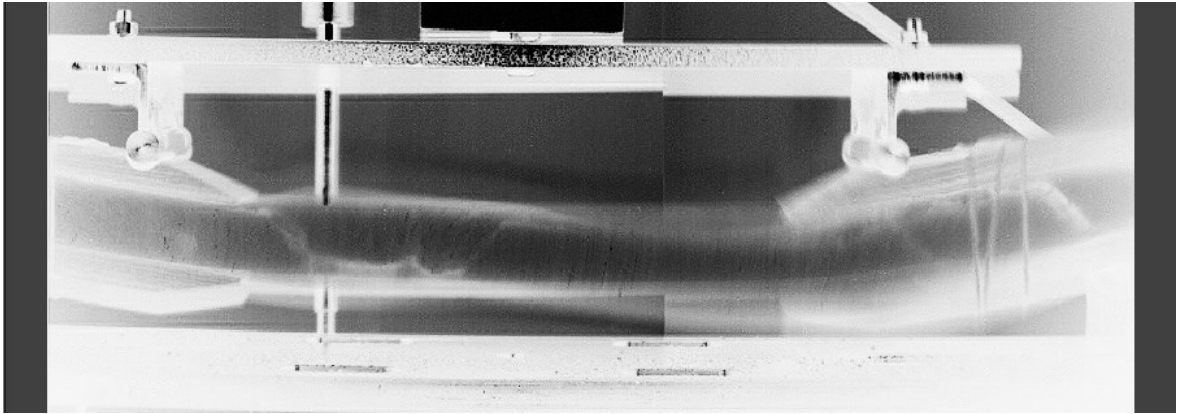
*Obr. 82: Mechanické chovanie vzorky S3-1 0,05 sekundy pred porušením*



*Obr. 83: Mechanické chovanie vzorky S3-1 v začiatku porušenia*



*Obr. 84: Upravená snímka vzorky S3-1 0,05 sekundy pred porušením*

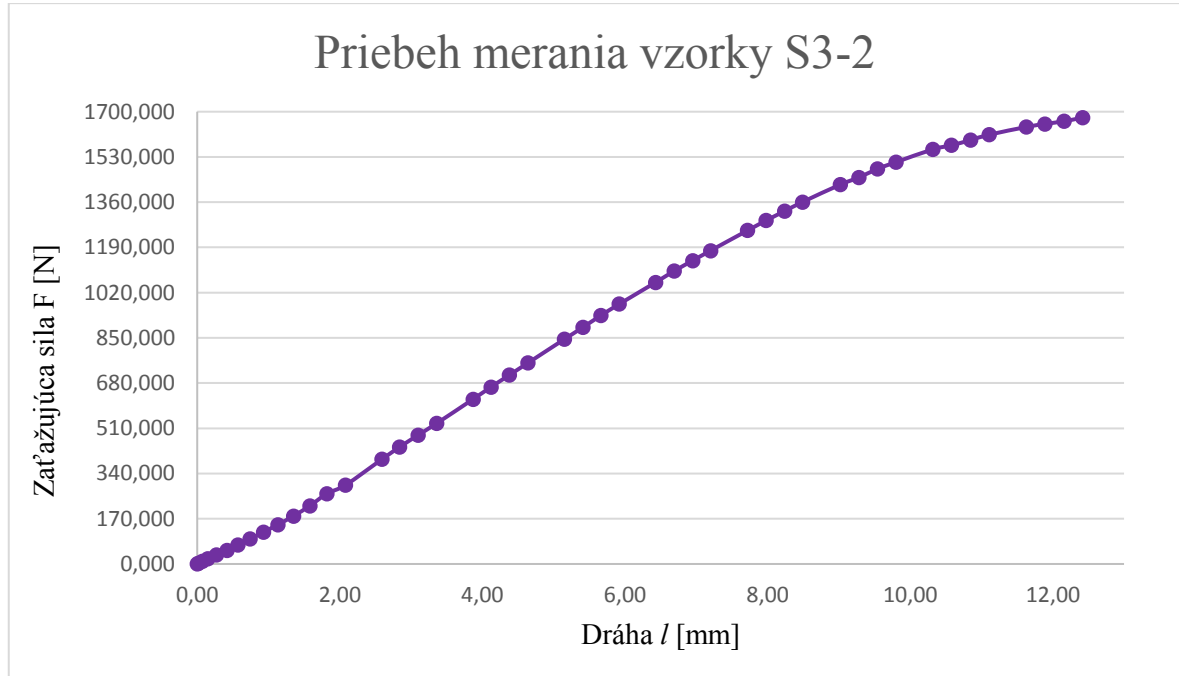


Obr. 85: Upravená snímka porušenia vzorky S3-1

Pri ohybe vzorky S3-1 je z obrázku v čase deformácie (Obr. 85) zrejmé, že pri tvorení stability sa vďaka dobrému adhéznemu spojeniu začala vonkajšia vrstva zdvíhať, čím sa roztrhlo penové jadro. Znovu teda môžeme sledovať stratu stability sendvičovej vzorky.

- **Namerané hodnoty a vyhodnotenie merania pre S3-2**

V meraní vzorky S3-2 bola nameraná maximálna zaťažujúca sila  $F_{S3-2}$ , ktorej hodnota je 1678 N. Priebeh merania je zobrazený v nasledujúcom obrázku (Obr. 86).

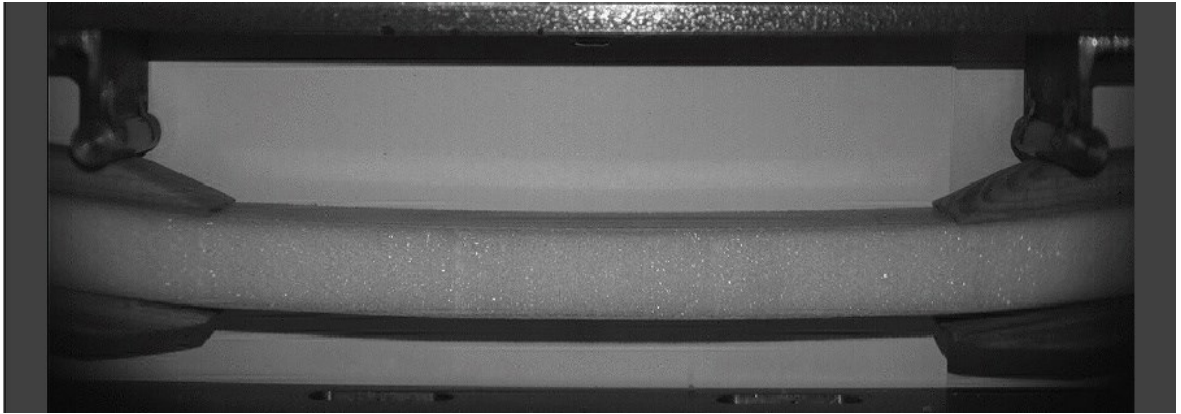


Obr. 86: Priebeh merania vzorky s označením S3-2

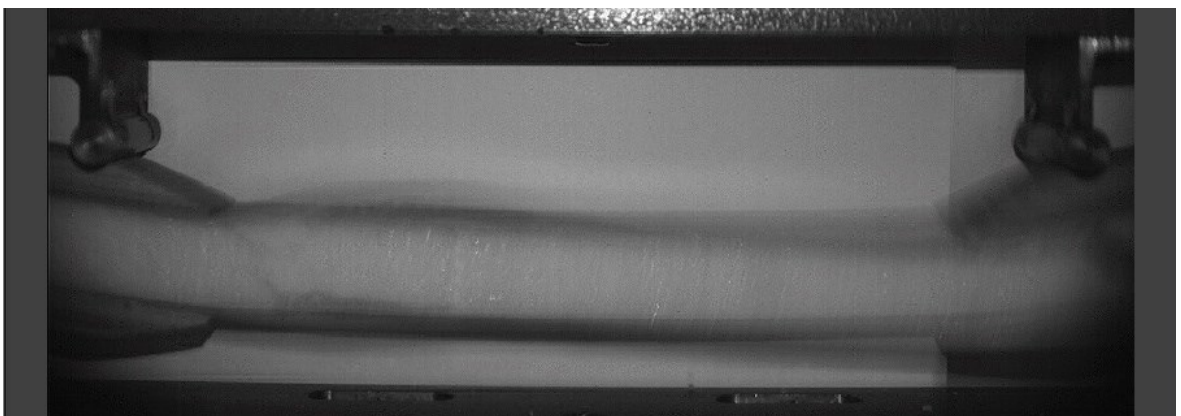
Výpočet medzného ohybového momentu meranej vzorky:

$$M_{S3-2} = \frac{F_{S3-2}}{2} \cdot c = 67\,120 \text{ Nmm} \quad (22)$$

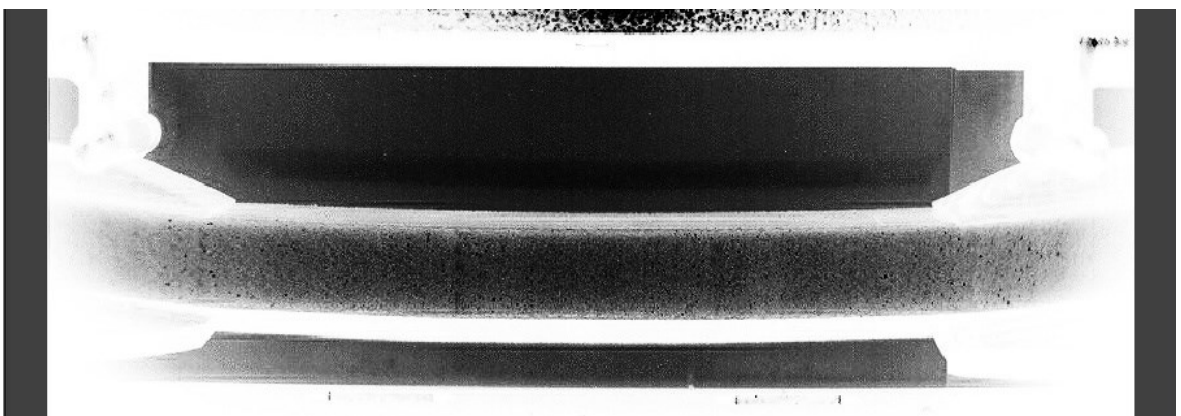
kde  $c$  je vzdialenosť ramena pôsobiacej sily.



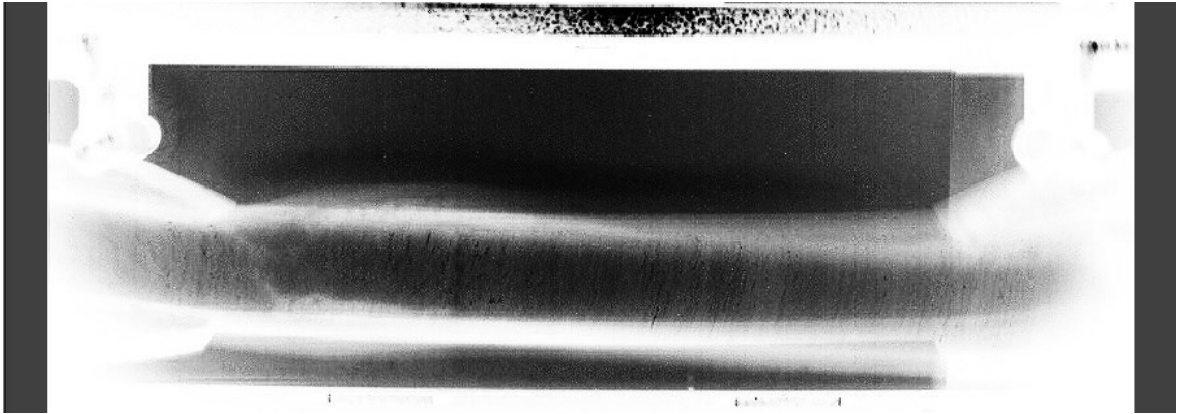
*Obr. 87: Mechanické chovanie vzorky S3-2 0,05 sekundy pred porušením*



*Obr. 88: Mechanické chovanie vzorky S3-2 v začiatku porušenia*



*Obr. 89: Upravená snímka vzorky S3-2 0,05 sekundy pred porušením*

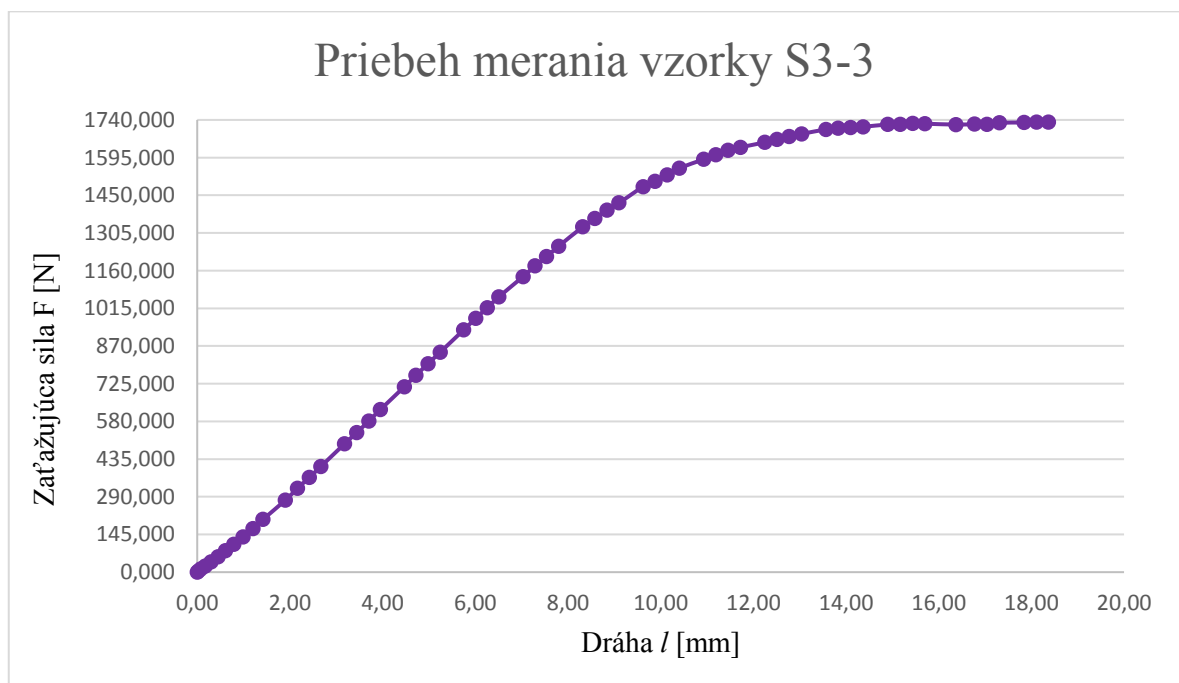


Obr. 90: Upravená snímka porušenia vzorky S3-2

Aj v tomto prípade bola zaznamenaná strata stability vzorky a opäť je zrejmé, že vďaka dobrému spojeniu jadra s vonkajšími vrstvami sa pri zvlnení vrstvy namáhanej tlakom roztrhlo penové jadro. Tento dej je zobrazený na upravenej snímke v čase porušenia vzorky (Obr. 90) bielou trhlínkou v ľavej časti obrázku.

- **Namerané hodnoty a vyhodnotenie merania pre S3-3**

V meraní vzorky S3-3 bola nameraná maximálna zaťažujúca sila  $F_{S3-3}$ , ktorej hodnota je 1731,45 N. Priebeh merania je zobrazený v nasledujúcom obrázku (Obr. 91).

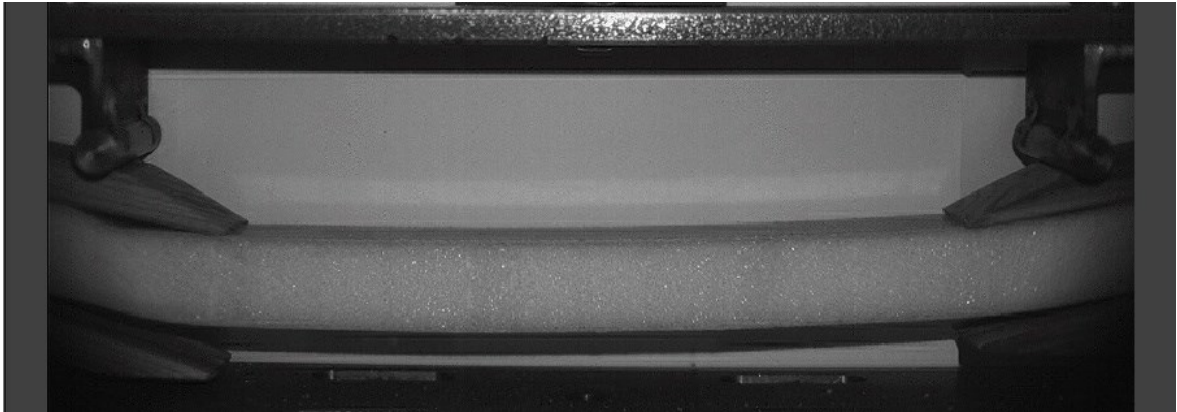


Obr. 91: Priebeh merania vzorky s označením S3-3

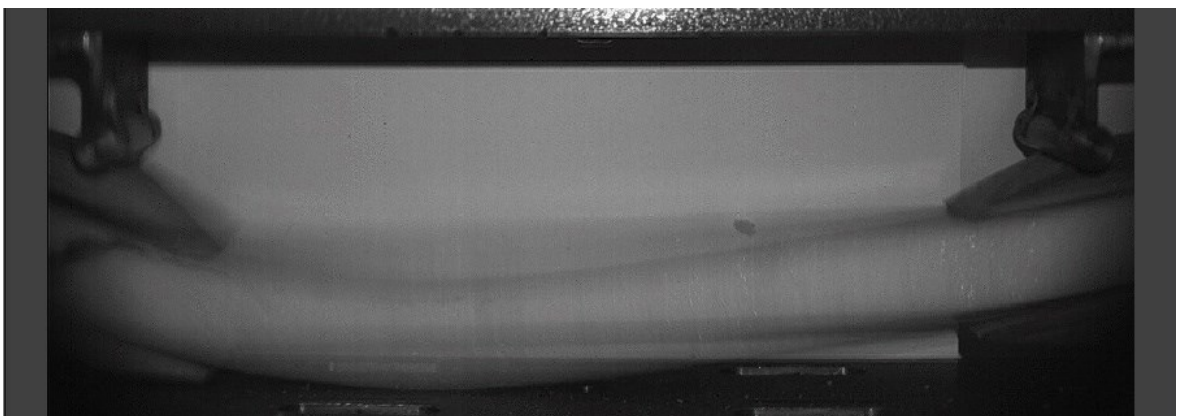
Výpočet medzného ohybového momentu meranej vzorky:

$$M_{S3-3} = \frac{F_{S3-3}}{2} \cdot c = 69\,258 \text{ Nmm} \quad (23)$$

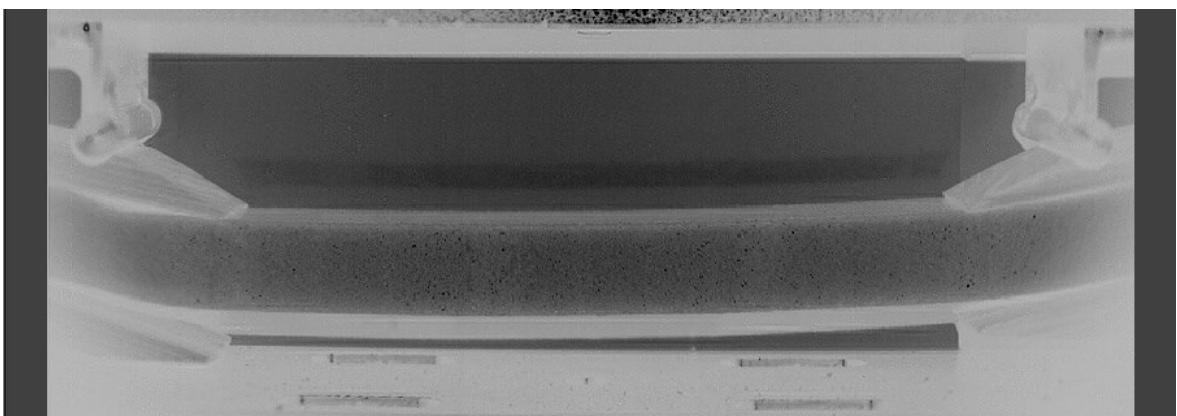
kde  $c$  je vzdialenosť ramena pôsobiacej sily.



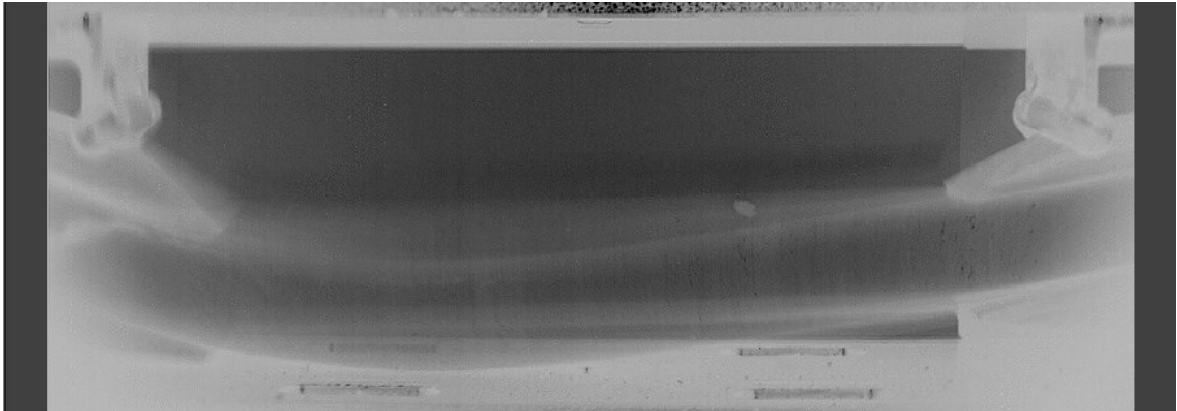
*Obr. 92: Mechanické chovanie vzorky S3-3 0,05 sekundy pred porušením*



*Obr. 93: Mechanické chovanie vzorky S3-3 v začiatku porušenia*



*Obr. 94: Upravená snímka vzorky S3-3 0,05 sekundy pred porušením*



Obr. 95: Upravená snímka porušení vzorky S3-3

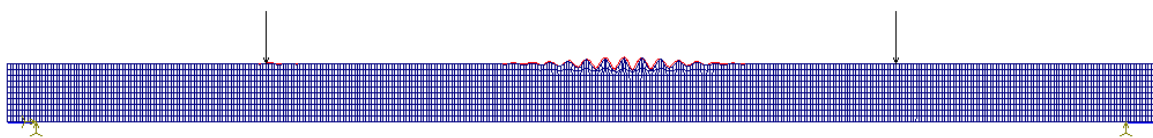
Pri meraní vzorky S3-3 nebola zaznamenaná strata stability, pretože sa objavilo slabé miesto v penovom jadre a už 0,05 sekundy pred porušením (Obr. 94) je zrejmé, že pod ľavým pôsobiskom sily nastal nežiadúci ohyb vzorky. V momente porušení jadro v mieste nežiadúceho ohybu prasklo, čo sa opäť zobrazilo ako biela trhlina na obrázku (Obr. 95).

### 6.3 Teoretický výpočet

Pre teoretický výpočet medzného stavu z hľadiska pevnosti sendvičovej štruktúry bol v softvéri SolidWorks/CosmosTools/Geostar vyrobený FEM model daného vzorku. Celkovo boli vyrobené tri modeli, v ktorých sa líšil počet laminátov tvoriacich vonkajšie vrstvy a tým sa teda menila aj ich hrúbka. Model bol zaťažovaný teoretickou silou 2000 N a zobrazuje teoretickú maximálnu silu, ktorú sendvič môže uniesť.

#### 6.3.1 Vzorka č. 1

E\_Mode=2 0.473446



Obr. 96: FEM model vzorky s vonkajšími vrstvami tvorenými 1 vrstvou prepregu

Obrázok (Obr. 96) zobrazuje FEM model vzorky, ktorej vonkajšie vrstvy sú tvorené jedným prepregom. Z obrázku je zrejmé, že sendvič v ideálnom stave pri pôsobení dostatočnej sily stráca stabilitu, čo zobrazujú vlnky na vonkajšej vrstve, ktorá je namáhaná tlakom. Tieto vlnky sa zobrazujú vďaka tomu, že v softvéri sa sendvič nemôže porušiť, tzn. má



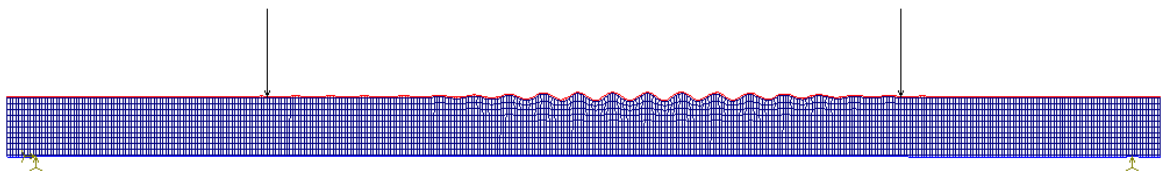
dokonalé spojenie jadra s vonkajšími vrstvami. Teoretická maximálna zaťažujúca sila bola v tomto prípade  $F_{t1max} = 946,9$  N. Pre výpočet teoretického medzného momentu  $M_{t1m}$ , ktorý unesie sendvičová štruktúra bol použitý nasledovný vzťah:

$$M_{t1m} = \frac{F_{t1max}}{2} \cdot c = 37\,876 \text{ Nmm} \quad (24)$$

kde rameno sily  $F_{t1max}$  (vzdialenosť od podpory k miestu pôsobenia sily)  $c = 80$  mm.

### 6.3.2 Vzorka č. 2

E\_Mode=1 0.893694



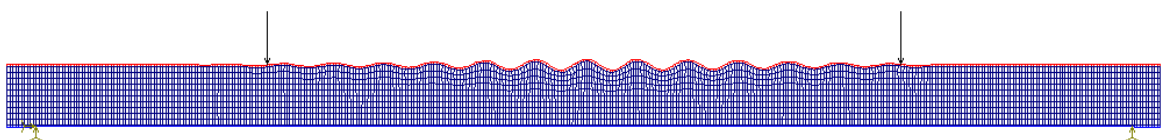
Obr. 97: FEM model vzorky s vonkajšími vrstvami tvorenými 2 vrstvami prepregu

Tak isto ako v predošlom prípade aj na vzorke č. 2, v ktorej sú použité vonkajšie vrstvy s dvomi vrstvami prepregov, sa zobrazili vlnky na strane, ktorá je namáhaná na tlak. V tejto vzorke sú však vlnky viditeľne väčšie čo značí použitie väčšej teoretickej zaťažujúcej sily ako tomu bolo pri vzorke č. 1. Samotná hodnota teoretickej maximálnej zaťažujúcej sily  $F_{t2max}$  je 1787,4 N. Môžeme si všimnúť, že pri zvýšení hrúbky vonkajšej vrstvy o 1 vrstvu prepregu, teda na hodnotu 0,46 mm, sa maximálna zaťažujúca sila zvýši takmer dvojnásobne. Pre výpočet teoretického medzného momentu  $M_{t2m}$ , ktorý unesie sendvičová štruktúra s dvoma vrstvami prepregu na vonkajšiu vrstvu bol použitý vzťah:

$$M_{t2m} = \frac{F_{t2max}}{2} \cdot c = 71\,496 \text{ Nmm} \quad (25)$$

### 6.3.3 Vzorka č. 3

E\_Mode=1 1.33071



Obr. 98: FEM model vzorky s vonkajšími vrstvami tvorenými 3 vrstvami prepregu

Vzorka č. 3 má vonkajšie vrstvy tvorené tromi vrstvami prepregov. Maximálna teoretická zaťažujúca sila  $F_{t3max}$  je v tomto prípade 2 661,4 N. V porovnaní so vzorkou č. 1 táto sila

vzrástla trojnásobne, z čoho môžeme predpokladať, že zaťažujúca sila ideálneho sendviču namáhaného štvorbodovým ohybom rastie priamoúmerne so zvyšovaním hrúbky vonkajšej vrstvy namáhanej tlakom. Taktiež aj pri tejto vzorke sa objavili vlnky značiace stratu stability, ktoré sú rozťahnuté po celej vzdialenosti medzi pôsobiacimi silami. Pre výpočet teoretického maximálneho medzného momentu  $M_{t2m}$  bol opäť použitý vzťah:

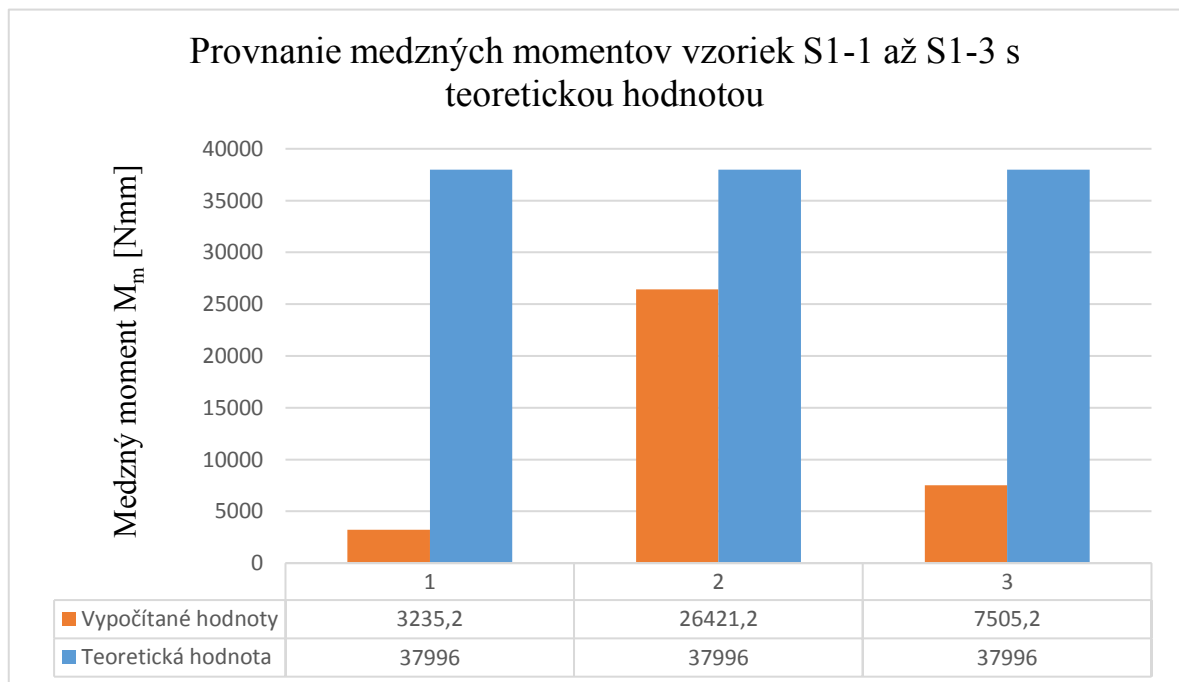
$$M_{t3m} = \frac{F_{t3max}}{2} \cdot c = 106\,456 \text{ Nmm} \quad (26)$$

## 6.4 Vyhodnotenie výsledkov

Vyhodnotenie prebehlo porovnávaním jednotlivých vypočítaných medzných ohybových momentov. Porovnávané sú analytické výsledky, ktoré boli získané pri skúške štvorbodovým ohybom s výsledkami teoretickými, ktoré boli vypočítané z maximálneho teoretického zaťaženia vo FEM modeli.

Tab. 5: Medzné momenty vzoriek S1-1 až S1-3 s teoretickou hodnotou

	$M_{S1-1}$ [Nmm]	$M_{S1-2}$ [Nmm]	$M_{S1-3}$ [Nmm]	$M_{t1m}$ [Nmm]
Vypočítané hodnoty	3 235,2	26 421,2	7 505,2	37 996

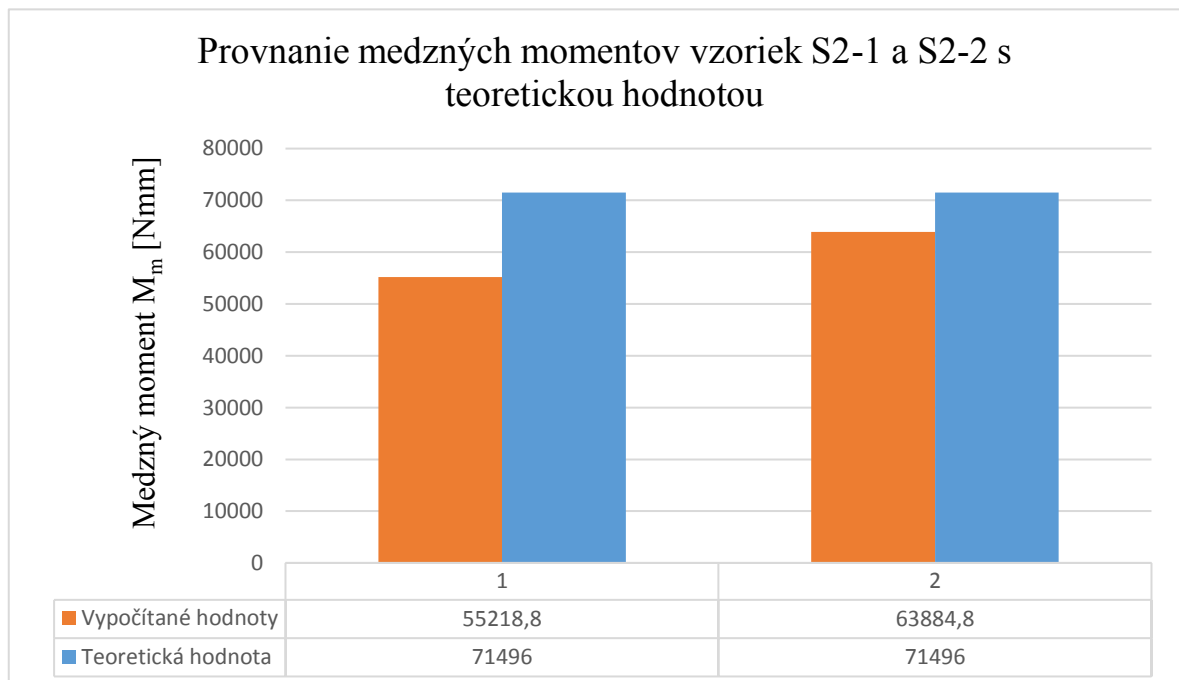


Obr. 99: Provnanie medzných momentov vzoriek S1-1 až S1-3 s teoretickou hodnotou

Z grafu (Obr. 99) je zřejmé, že pri vzorkách S1-1 a S1-3 sa jednalo o nezhodné výrobky. Ich súdržnosť jadra s vonkajšími vrstvami bola veľmi slabá, čo malo za následok prasknutie pri relatívne nízkej zaťažujúcej sile. Vzorka S1-2 mala v porovnaní s ostatnými vzorkami spojenie veľmi dobré, avšak ako už bolo spomenuté, aj na tejto vzorke sa objavilo slabé miesto, ktoré viedlo k prasknutiu skôr ako sa zobrazila strata stability.

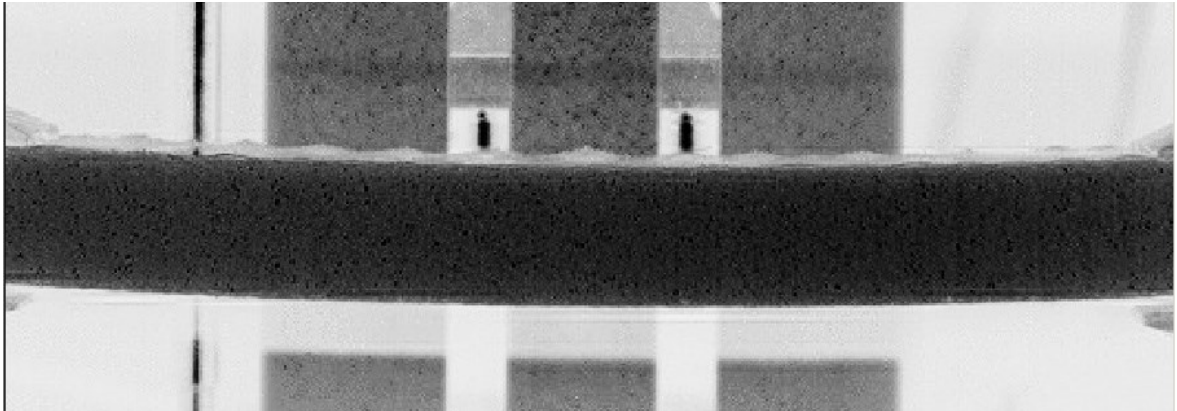
Tab. 6: Medzné momenty vzoriek S2-1 a S2-2 s teoretickou hodnotou

	$M_{S2-1}$ [Nmm]	$M_{S2-2}$ [Nmm]	$M_{t2m}$ [Nmm]
Vypočítané hodnoty	55 218,8	63 884,8	71 493



Obr. 100: Provnanie medzných momentov vzoriek S2-1 a S2-1 s teoretickou hodnotou

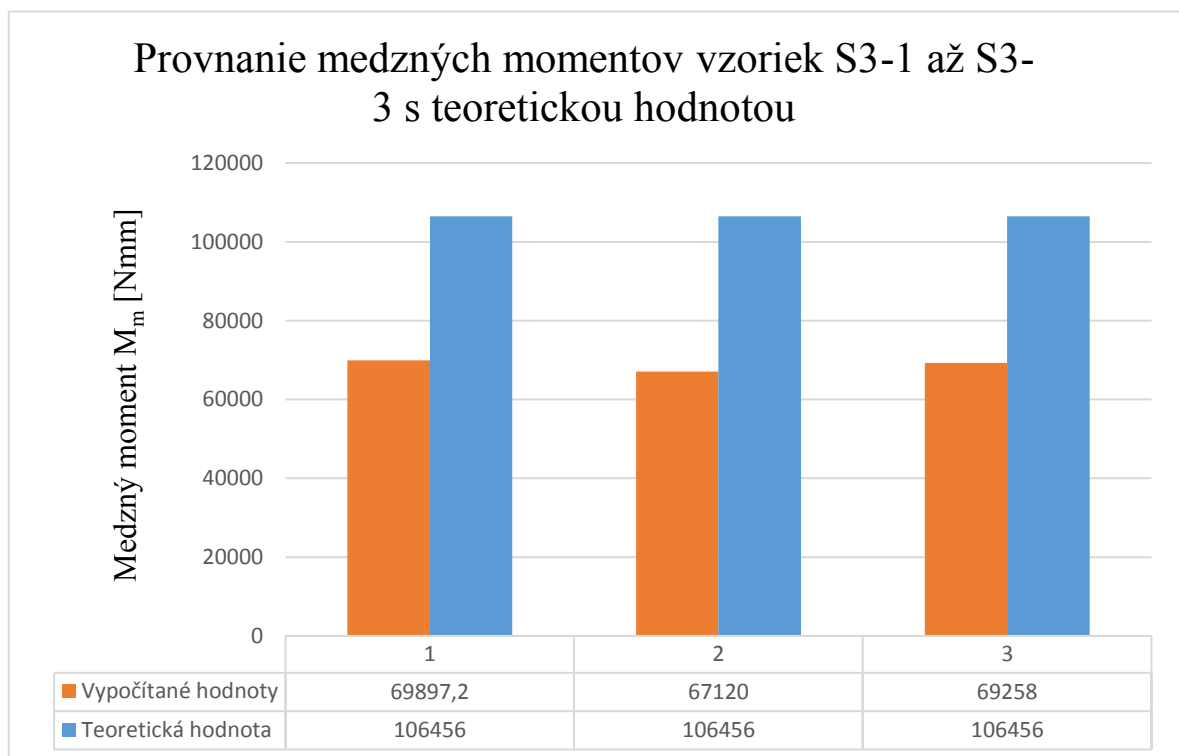
Pri vzorkách s vonkajšími vrstvami vyrobených z dvoch prepregov sa namerané hodnoty (Tab. 6) priblížili veľmi blízko hodnotám teoretickým (Obr. 100). Vo výsledku to znamená, že adhézne spojenie bolo veľmi dobré a bez slabých miest v súdržnosti. Z tohto dôvodu bola vďaka vysokorýchlostnej kamere zachytená strata stability na jednej z meraných vzoriek (Obr. 101). Táto strata stability sa veľmi podobá tej, ktorá je zobrazená vo FEM modeli, v ktorom je väzba medzi jadrom a vonkajšími vrstvami dokonalá. Bolo teda dokázané, že pri ohýbaní sendvič najskôr stratí stabilitu a až potom sa odtrhne vonkajšia vrstva od jadra.



Obr. 101: Strata stability pri štvrbodovom ohybe vzorky S2-3

Tab. 7: Medzné momenty vzoriek S3-1 až S3-3 s teoretickou hodnotou

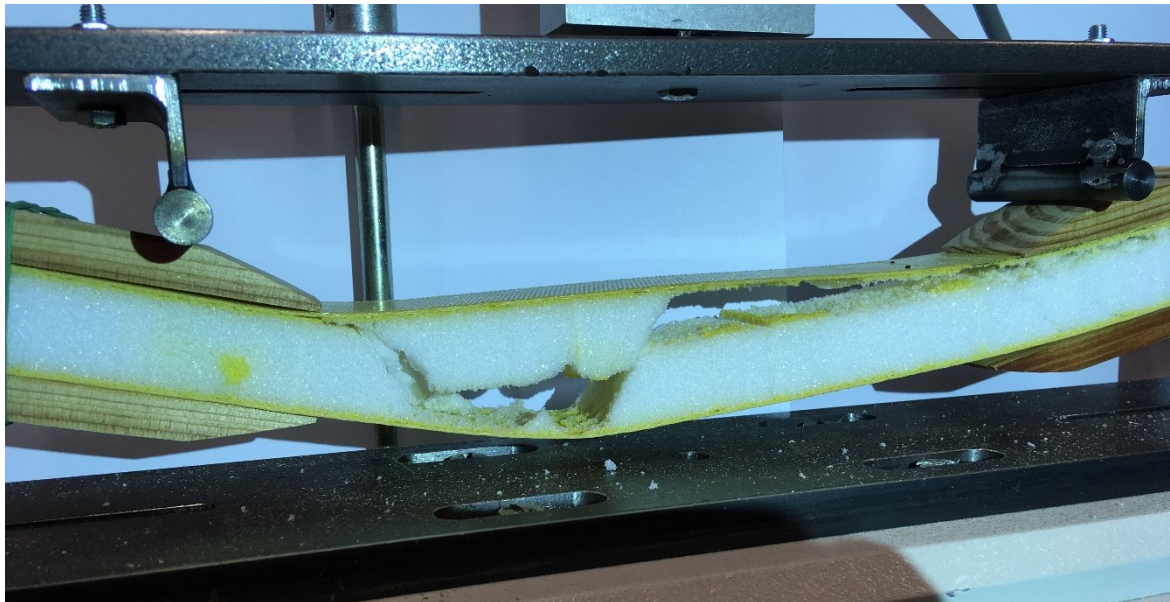
	$M_{S3-1}$ [Nmm]	$M_{S3-2}$ [Nmm]	$M_{S3-3}$ [Nmm]	$M_{t3m}$ [Nmm]
Vypočítané hodnoty	69 897,2	67 120	69 258	106 456



Obr. 102: Provnanie medzných momentov vzoriek S3-1 a S3-3 s teoretickou hodnotou

Z porovnaných hodnôt v grafe (Obr. 102) je zrejmé, že pre všetky tri merané vzorky vyšla únosnosť približne rovnaká. Tieto hodnoty sa od tých teoretických líšili v porovnaní s výsledkami S2-1 a S2-2 viac, avšak strata stability sa dala sledovať veľmi podobne. U tohto typu sa však v momente začiatku tvorenia stability začala vonkajšia vrstva namá-

haná tlakom zdvíhať, čo spôsobilo roztrhnutie penového jadra. Zase bolo však potvrdené, že strata stability nastáva skôr ako sa sendvičová štruktúra poruší. Na obrázku (Obr. 103) je zobrazená vzorka s vonkajšími vrstvami zloženými z 3 prepregov po skončení merania.



*Obr. 103: Vzorka S3-1 po skončení merania*

## 6.5 Diskusia výsledkov

Z výsledkov sme sa dozvedeli viacero dôležitých vecí. Doštičky, ktoré boli vyrobené aby zabraňovali vplyvu deformácie v mieste indentácie fungovali správne. Ďalej sme sa dozvedeli, že pre testovanie únosnosti pomocou štvorbodového ohybu je najlepšie používať vzorky, ktoré majú vonkajšie vrstvy zložené z 2 prepregov. Je to z toho dôvodu, že pri týchto vzorkách bola dostatočná súdržnosť, blízke hodnoty nameraných a teoretických medzných ohybových momentov a najlepšie zobrazenie straty stability na vonkajšej vrstve namáhanej tlakom. V poslednom rade sme zistili, že dej straty stability, ktorý vytvoril vlnky na skúšobnej vzorke nie sme schopný sledovať voľným okom. Preto pre sledovanie tohto deja musí byť použitá vysokorýchlostná kamera, ktorá ho dokáže zachytiť.

## ZÁVER

Mechanické skúšky na zistenie medzných ohybových momentov či napätí v ohybe sendvičových štruktúr sa často stretávajú v praxi s problémom lomu v mieste pôsobiska zaťažujúcej sily. Výsledkom takýchto meraní sú nie vždy presné výsledky a teda aj nepresné určenie potrebných mechanických vlastností. V prípade bimodulárneho materiálu, ako tomu bolo v našom prípade je určenie ohybového napätia ešte zložitejšie, keďže takéto materiály nemajú rovnaké vlastnosti v ťahu a v tlaku.

Vo vykonanej skúške sa predišlo týmto nežiadúcim porušeniam. Z tohoto dôvodu bola skúška nazvaná ako špeciálna skúška štvorbodovým ohybom. Doposiaľ sa však nepodarilo zistiť, aké je mechanické chovanie sendvičovej štruktúry pri ohýbaní. Jednalo sa o dej, ktorý je voľným okom nepozorovateľný. Z tohoto dôvodu bola použitá vysokorýchlostná kamera, ktorá nasnímala dej deformácie vzoriek rýchlosťou 500 snímok za sekundu. Bolo zistené, že niektoré vzorky vykazovali stratu stability predtým ako nastalo porušenie a niektoré sa zase skôr porušili skôr, než začali strácať stabilitu.

Týmto meraním bola teda kontrolovaná aj kvalita adhézneho spojenia vonkajších vrstiev s jadrom, na ktorej veľmi záleží. V prípade, že je súdržnosť veľmi malá, sendvič neplní svoju funkciu a tým pádom je v praxi nepoužiteľný. Najhoršie výsledky boli vyhodnotené pre sendvičové vzorky s veľmi tenkými vonkajšími vrstvami z fenolického prepregu, kde mali vzorky veľmi veľký rozptyl hodnôt medzných ohybových momentov, ktoré sa vo väčšine prípadov ani nepribližovali teoretickým hodnotám z FEM modelu daného sendviču. Taktiež nie je vhodné použiť vzorku s tromi vrstvami prepregu, pretože zaťažujúca sila je príliš veľká a skôr ako k strate stability dôjde k roztrhnutiu penového jadra.

**ZOZNAM POUŽITEJ LITERATURY**

- [1] BITZER, Tom. *Honeycomb Technology Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1997. ISBN 9789401064743.
- [2] RUSNÁKOVÁ, Soňa. *Zpracovatelské inženýrství kompozitů*. Přednášky 2015
- [3] *Multi-functionality of Polymer Composites Challenges and New Solutions*. Elsevier Science, 2015. ISBN 9780323264341.
- [4] THOMSEN, O.T., E. BOZHEVOLNAYA a A. LYCKEGAARD (EDS.). *Sandwich structures 7 advancing with sandwich structures and materials: proceedings of the 7th International Conference on Sandwich Structures, Aalborg University, Aalborg, Denmark, 29-31 August 2005*. Dordrecht: Springer, 2005. ISBN 9781402038488.
- [5] MM Průmyslové spektrum. *Sendvičové konstrukce* [online]. 2007 [cit. 2018-02-24]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/sendvicove-konstrukce.html>
- [6] BUCŇÁK, Ondřej. *Analýza sendvičových struktur metodou konečných prvků* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014 [cit. 2018-02-24]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/33511>. Bakalářská práce.
- [7] ŠUBA, Oldřich. *Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů*. Vyd. 3. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010. ISBN 978-80-7318-948-8.
- [8] DAVIES, J. M. *Lightweight sandwich construction*. Malden, MA: Blackwell Science, 2001. ISBN 06-320-4027-0.
- [9] Glasscon.com [online]. [cit. 2018-02-26]. *Stainless steel honeycomb*. Dostupné z: [https://static1.glasscon.com/sites/default/files/products/images/stainless\\_steel\\_honeycomb\\_panels\\_glasscon\\_01.jpg](https://static1.glasscon.com/sites/default/files/products/images/stainless_steel_honeycomb_panels_glasscon_01.jpg)
- [10] Nauticexpo.com [online]. [cit. 2018-02-26]. *Aluminium honeycomb panel*. Dostupné z: [http://img.nauticexpo.com/images\\_ne/photo-g/34324-11635134.jpg](http://img.nauticexpo.com/images_ne/photo-g/34324-11635134.jpg)
- [11] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5..

- [12] KORŽÍNEK Zdeněk. Vlákna pro kompozity. Typy produktů z vláken [online]. 2013 [cit. 2018-02-28]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/vlakna.pdf>
- [13] Okorder.com [online]. [cit. 2018-03-02]. *Fiberglass fiber woven roving*. Dostupné z: [https://www.okorder.com/p/fiberglass-glass-fiber-woven-roving\\_230080.html](https://www.okorder.com/p/fiberglass-glass-fiber-woven-roving_230080.html)
- [14] Johnandtable.com [online]. [cit. 2018-03-02]. *Carbon fiber*. Dostupné z: <http://www.johnandtable.com/carbon-fiber/processing.html>
- [15] BAMBUCH, Martin. *Výzkum chování sendvičových panelů při působení bočního tlaku*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2015, 62 s. (54 661 znaků). Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/34272>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství.
- [16] Fibreglast.com [online]. [cit. 2018-03-04]. *Prepreg*. Dostupné z: [https://www.fibreglast.com/images/LC\\_Pregreg.jpg](https://www.fibreglast.com/images/LC_Pregreg.jpg)
- [17] Corecomposites.com [online]. [cit. 2018-03-05]. *Balsa core*. Dostupné z: <http://www.corecomposites.com/products/core-materials/balsa.html>
- [18] Netcomposites.com [online]. [cit. 2018-03-05]. *Wood core materials*. Dostupné z: <https://netcomposites.com/guide-tools/guide/core-materials/wood-cores/>
- [19] Airexbaltekbanova.com [online]. [cit. 2018-03-05]. *Baltek® SB - Balsa*. Dostupné z: <http://www.airexbaltekbanova.com/baltek-sb-balsa.html>
- [20] Researchgate.net [online]. [cit. 2018-03-05]. *Balsa core sandwich*. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/profile/Alexander\\_Morgan5/publication/277522452/figure/fig1/AS:294268515176458@1447170489519/Balsa-wood-core-sandwich-panel.png](https://www.researchgate.net/profile/Alexander_Morgan5/publication/277522452/figure/fig1/AS:294268515176458@1447170489519/Balsa-wood-core-sandwich-panel.png)
- [21] Corecomposites.com [online]. [cit. 2018-03-08]. *Honeycomb sandwich*. Dostupné z: <http://www.corecomposites.com/products/honeycomb>
- [22] ŠATKA, Pavol. *3D voštinové štruktúry v dopravném priemysle*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2016, 63 s. (59 250 znaků). Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/38126>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství.
- [23] Plascore.com [online]. [cit. 2018-03-08]. *Kevlar honeycomb core*. Dostupné z: <https://www.plascore.com/wp-content/uploads/2013/07/cores-kevlar.jpg>



- [24] Plascore.com [online]. [cit. 2018-03-08]. *Thermoplastic honeycomb core*. Dostupné z: <https://www.plascore.com/honeycomb/honeycomb-cores/thermoplastic/>
- [25] Posterus.sk [online]. [cit. 2018-03-09]. *Bunkové telesá – penové materiály III. Vlastnosti bunkových telies*. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=8404>
- [26] Netcomposites.com [online]. [cit. 2018-03-09]. *Core materials*. Dostupné z: <https://netcomposites.com/guide-tools/guide/core-materials>
- [27] Polystyrene.com.uk [online]. [cit. 2018-03-09]. *Polystyrene sheet close up*. Dostupné z: <http://www.polystyrene.co.uk/wp-content/uploads/2016/01/POLY-SHEET-CLOSE-UP.jpg>
- [28] Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. *Manufacturing and applications of structural sandwich components*. 1997, **28**(2), 97-111. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(96\)00098-X..](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(96)00098-X..)
- [29] FABRIGER, Daniel. *Technologie výroby sendvičových kompozitních struktur pomocí vákuové infuze pod pružnou folií*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011, 124 s. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/15882>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství..
- [30] KŘEČEK, Vojtěch. *Výzkum crush-core technologie*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2013, 86 s (11 844 znaků). Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/24220>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství..
- [31] ManufacturingScience.asmedigitalcollection.asme.org [online]. [cit. 2018-03-14]. *In Situ Observations and Pressure Measurements for Autoclave Co-Cure of Honeycomb Core Sandwich Structures*. Dostupné z: <http://manufacturingScience.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=2647206>.
- [32] Hexcel.com [online]. [cit. 2018-03-14]. *Mechanical Testing of Sandwich Panels*. Dostupné z: [http://www.hexcel.com/user\\_area/content\\_media/raw/SandwichPanels\\_global.pdf](http://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/SandwichPanels_global.pdf)
- [33] SHAHDIN, Amir, Joseph MORLIER, Yves GOURINAT, Laurent MEZEIX a Christophe BOUVET. Fabrication and Mechanical Testing of a New Sandwich Structure with Carbon Fiber Network Core. *Journal of Sandwich Structures &*

- Materials* [online]. 2009, **12**(5), 569-589 [cit. 2018-04-23]. DOI: 10.1177/1099636209106070. ISSN 1099-6362. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1099636209106070>.
- [34] Unitedtest.com [online]. [cit. 2018-04-23]. *4 Point bend fixtures*. Dostupné z: <http://www.unitedtest.com/products/cp01/cp017/cp103/123.html#a1>.
- [35] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [36] PAVELKA, Lukáš. *Vliv materiálového složení a tvaru na mechanické chování sendvičové konstrukce*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2015, 110 s; Přílohy: 7 s. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/33633>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství.

**ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK**

$K_O$	Ohybová tuhosť sendviču
$E_1$	Modul pružnosti vonkajších vrstiev
$b$	Šírka sendviču
$h$	Hrúbka sendviču
$t_1$	Hrúbka vonkajšej vrstvy sendvič
$M_{O \max.}$	Maximálny ohybový moment
$W_O$	Modul prierezu v ohybe
$\sigma_{O \max.}$	Maximálne napätie
$E_+$	Modul pružnosti v tlakovej strane
$E_2$	Modul pružnosti jadra
$E_-$	Modul pružnosti v ťahovej strane
$E_{ef}$	Efektívny modul pružnosti v tlaku
$c$	Dĺžka ramena pôsobiacej sily
$S_0$	Prierez telesa kolmý na pôsobiacu silu
$M_{Sx-x}$	Medzný ohybový moment meranej vzorky
$F_{Sx-x}$	Maximálna zaťažujúca sila meranej vzorky
$M_{txm}$	Teoretický medzný ohybový moment modelovanej vzorky
$F_{txmax}$	Teoretická maximálna zaťažujúca sila modelovanej vzorky

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Sendvičová konštrukcia [3]</i> .....	12
<i>Obr. 2: Rozloženie napätia po priereze (za predpokladu <math>E_c \ll E_f</math> a <math>t_f \ll t_c</math>) [6]</i> .....	13
<i>Obr. 3: Druhy porušení sendvičových štruktúr [7]</i> .....	13
<i>Obr. 4: Sendvičový panel s poťahom z nerezovej oceli (vľavo) a s poťahom zo zliatiny hliníku (vpravo) [9, 10]</i> .....	15
<i>Obr. 5: Sklenené vlákna [13]</i> .....	17
<i>Obr. 6: Uhlíkové vlákna [14]</i> .....	17
<i>Obr. 7: Prepreg chránený separačnou a nosnou fóliou [16]</i> .....	18
<i>Obr. 8: Sendvičový panel s jadrom z balzového dreva [20]</i> .....	20
<i>Obr. 9: Hliníková voština [21]</i> .....	21
<i>Obr. 10: Nomexová (aramidová) voština [21]</i> .....	21
<i>Obr. 11: Kevlarová voština [23]</i> .....	22
<i>Obr. 12: Polykarbonátová a polypropylénová voština [24]</i> .....	22
<i>Obr. 13: Expanzná metóda výroby voštinových jadier [1]</i> .....	23
<i>Obr. 14 voštinového jadra metódou vrapovania [2]</i> .....	23
<i>Obr. 15: Štruktúry polymérnych pien: a) voština, b) pena s otvorenými bunkami, c) pena s uzatvorenými bunkami [2]</i> .....	24
<i>Obr. 16: Ťahový a tlakový diagram zaťaženia polymérnych pien [25]</i> .....	25
<i>Obr. 17: PVC pena [26]</i> .....	26
<i>Obr. 18: Polystyrénová pena [27]</i> .....	26
<i>Obr. 19: PUR pena [22]</i> .....	27
<i>Obr. 20: Výroba laminátu rozstrekovaním [30]</i> .....	28
<i>Obr. 21: Princíp ručného laminovania [2]</i> .....	29
<i>Obr. 22: Pripravený vákuový vak na výrobu sendvičovej konštrukcie [29]</i> .....	30
<i>Obr. 23: Prierez autoklávom pri výrobe sendvičovej konštrukcie [32]</i> .....	31
<i>Obr. 24: Výroba sendvičového panelu vyhrievaným lisovaním [22]</i> .....	31
<i>Obr. 25: Výroba sendvičových konštrukcii pomocou dvojitého pásového lisu [29]</i> .....	32
<i>Obr. 26: Princíp výroby sendvičovej konštrukcie pultrúziou [2]</i> .....	33
<i>Obr. 27: Zaťaženie sendvičovej konštrukcie na ohyb [2]</i> .....	34
<i>Obr. 28: Priebeh a schéma ohybového momentu v trojbodovej ohybovej skúške [34, 35]</i> .....	35

<i>Obr. 29: Priebeh a schéma ohybového momentu v štvorbodovej ohybovej skúške [34, 36].....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 30: Climbing drum test [32] .....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 31: Single Cantilever Beam - SCE testovanie .....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 32: Testovanie odlupovania pomocou tlaku vzduchu.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 33: Zataženie skúšobnej vzorky pri skúške tlakom [32].....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 34: Možné poruchy pri skúške tlakom [32] .....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 35: Schéma padostroja .....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 36: Výpočtový program vytvorený v softvéri Microsoft Excel .....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 37: Skúšobný stroj ZWICK 1456 .....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 38: Skúšobná vzorka s vonkajšími vrstvami zloženými z 1 prepregu .....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 39: Príklady porušenia sendvičového panelu pri skúške tlakom .....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 40: Vzďialenosť pôdobiacich síl a podpier pri štvorbodovom ohybe.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 41: Skúšobný prístroj PROMI PC 3000 .....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 42: Vysokorýchlostná kamera Olympus i-Speed 2 .....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 43: Nežiadúce praskanie sendvičového vzorku v mieste pôsobenia sily .....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 44: Doštičky slúžiace na ochranu pred prasknutím pod pôsobiskami síl .....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 45: Meracie prístroje a technika použitá pri skúške štvorbodovým ohybom .....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 46: Sendvičová testovacia vzorka s tromi prepregmi .....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 47: Schéma štvorbodového ohybu .....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 48: Vzorka pripravená na testovanie .....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 49: Vzorka po ukončení merania.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 50: Ukážka výsledkov z prostredia programu PROMI PC .....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 51: Priebeh merania vzorky s označením SI-1 .....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 52: Mechanické chovanie vzorky SI-1 0,05 sekundy pred porušením .....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 53: Mechanické chovanie vzorky SI-1 v začiatku porušenia .....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 54: Upravená snímka porušenia vzorky SI-1 .....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 55: Priebeh merania vzorky s označením SI-2 .....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 56: Mechanické chovanie vzorky SI-2 0,05 sekundy pred porušením .....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 57: Mechanické chovanie vzorky SI-2 v začiatku porušenia .....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 58: Upravená snímka vzorky SI-2 0,05 sekundy pred porušením .....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 59: Upravená snímka porušenia vzorky SI-2.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 60: Priebeh merania vzorky s označením SI-3 .....</i>	<i>58</i>

<i>Obr. 61: Mechanické chovanie vzorky S1-3 0,05 sekundy pred porušením</i> .....	59
<i>Obr. 62: Mechanické chovanie vzorky S1-3 v začiatku porušenia</i> .....	59
<i>Obr. 63: Upravená snímka vzorky S1-3 0,05 sekundy pred porušením</i> .....	59
<i>Obr. 64: Upravená snímka porušenia vzorky S1-3</i> .....	60
<i>Obr. 65: Priebeh merania vzorky s označením S2-1</i> .....	60
<i>Obr. 66: Mechanické chovanie vzorky S2-1 0,05 sekundy pred porušením</i> .....	61
<i>Obr. 67: Mechanické chovanie vzorky S2-1 v začiatku porušenia</i> .....	61
<i>Obr. 68: Upravená snímka vzorky S2-1 0,05 sekundy pred porušením</i> .....	61
<i>Obr. 69: Upravená snímka porušenia vzorky S2-1</i> .....	62
<i>Obr. 70: Priebeh merania vzorky s označením S2-2</i> .....	62
<i>Obr. 71: Mechanické chovanie vzorky S2-2 0,05 sekundy pred porušením</i> .....	63
<i>Obr. 72: Mechanické chovanie vzorky S2-2 v začiatku porušenia</i> .....	63
<i>Obr. 73: Mechanické chovanie vzorky S2-2 0,05 sekundy po porušení</i> .....	63
<i>Obr. 74: Upravená snímka vzorky S2-2 0,05 sekundy pred porušením</i> .....	64
<i>Obr. 75: Upravená snímka porušenia vzorky S2-2</i> .....	64
<i>Obr. 76: Upravená snímka vzorky S2-2 0,05 sekundy po porušení</i> .....	64
<i>Obr. 77: Mechanické chovanie vzorky S2-3 0,05 sekundy pred porušením</i> .....	65
<i>Obr. 78: Mechanické chovanie vzorky S2-3 v začiatku porušenia</i> .....	65
<i>Obr. 79: Upravená snímka vzorky S2-3 0,05 sekundy pred porušením</i> .....	65
<i>Obr. 80: Upravená snímka porušenia vzorky S2-3</i> .....	66
<i>Obr. 81: Priebeh merania vzorky s označením S3-1</i> .....	66
<i>Obr. 82: Mechanické chovanie vzorky S3-1 0,05 sekundy pred porušením</i> .....	67
<i>Obr. 83: Mechanické chovanie vzorky S3-1 v začiatku porušenia</i> .....	67
<i>Obr. 84: Upravená snímka vzorky S3-1 0,05 sekundy pred porušením</i> .....	67
<i>Obr. 85: Upravená snímka porušenia vzorky S3-1</i> .....	68
<i>Obr. 86: Priebeh merania vzorky s označením S3-2</i> .....	68
<i>Obr. 87: Mechanické chovanie vzorky S3-2 0,05 sekundy pred porušením</i> .....	69
<i>Obr. 88: Mechanické chovanie vzorky S3-2 v začiatku porušenia</i> .....	69
<i>Obr. 89: Upravená snímka vzorky S3-2 0,05 sekundy pred porušením</i> .....	69
<i>Obr. 90: Upravená snímka porušenia vzorky S3-2</i> .....	70
<i>Obr. 91: Priebeh merania vzorky s označením S3-3</i> .....	70
<i>Obr. 92: Mechanické chovanie vzorky S3-3 0,05 sekundy pred porušením</i> .....	71
<i>Obr. 93: Mechanické chovanie vzorky S3-3 v začiatku porušenia</i> .....	71

<i>Obr. 94: Upravená snímka vzorky S3-3 0,05 sekundy pred porušením .....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 95: Upravená snímka porušenia vzorky S3-3.....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 96: FEM model vzorky s vonkajšími vrstvami tvorenými 1 vrstvou prepregu .....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 97: FEM model vzorky s vonkajšími vrstvami tvorenými 2 vrstvami prepregu .....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 98: FEM model vzorky s vonkajšími vrstvami tvorenými 3 vrstvami prepregu .....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 99: Provanie medzných momentov vzoriek S1-1 až S1-3 s teoretickou hodnotou.....</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 100: Provanie medzných momentov vzoriek S2-1 a S2-1 s teoretickou hodnotou.....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 101: Strata stability pri štvrbodovom ohybe vzorky S2-3 .....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 102: Provanie medzných momentov vzoriek S3-1 a S3-3 s teoretickou hodnotou.....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 103: Vzorka S3-1 po skončení merania.....</i>	<i>77</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1: Vlastnosti balzových jadier so štandardnou a vysokou hustotou [17] .....</i>	<i>19</i>
<i>Tab. 2: Namerané a vypočítané hodnoty vzoriek s vonkajšou vrstvou z 1 prepregu .....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 3: Namerané a vypočítané hodnoty vzoriek s vonkajšou vrstvou z 2 prepregov .....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 4: Namerané a vypočítané hodnoty vzoriek s vonkajšou vrstvou z 3 prepregov .....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 5: Medzné momenty vzoriek S1-1 až S1-3 s teoretickou hodnotou .....</i>	<i>74</i>
<i>Tab. 6: Medzné momenty vzoriek S2-1 a S2-2 s teoretickou hodnotou .....</i>	<i>75</i>
<i>Tab. 7: Medzné momenty vzoriek S3-1 až S3-3 s teoretickou hodnotou .....</i>	<i>76</i>