

Únavové chování vrstvených sendvičových konstrukcí

Bc. Tomáš Mudrák

Diplomová práce
2015

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš Mudrák**
Osobní číslo: **T13690**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Únavové chování vrstvených sendvičových konstrukcí**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši o problematice kompozitních sendvičových struktur:
2. - Základní definice, způsoby zatěžování, použití
3. - Používané materiály, způsoby výroby
4. - Únava kompozitních materiálů
5. - Způsoby testování únavy kompozitních sendvičových struktur
6. Experimentální část:
7. - Popis použitých materiálů
8. - Příprava zkušebních vzorků
9. - Mechanické testování vzorků
10. Diskuze výsledků a závěry

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. **Vassilopoulos A. P.: Fatigue Life Prediction of Composites and Composite Structures, Cambridge; Woodhead Publishing, 2010.**
2. **Zenkert, D., Nordic Industrial Fund: The Handbook of Sandwich Construction. Worcestershire; EMAS Publishing, 1997.**
3. **Davies, J.M.: Lightweight Sandwich Construction. London; Blackwell Science Publishing, 2001.**
4. **Vinson, J. R., The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials, CRC Press, 1999**
5. **Ehrenstein, G. W.: Polymerní kompozitní materiály. Scientia Praha, 2009.**
6. **Elektronické zdroje dle doporučení vedoucího diplomové práce**

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Ladislav Fojtl

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

30. ledna 2015

Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2015

Ve Zlíně dne 30. ledna 2015


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

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 ¹⁾;
- 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 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ 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 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit 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 7.5.2015


.....

¹⁾ 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 nevdělečně 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.

²⁾ 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 vzdělávacího zařízení (školní dílo).

³⁾ 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

Cílem diplomové práce je studium únavového chování vrstvených sendvičových konstrukcí složených z různých typů jádra.

Teoretická část slouží jako úvod do problematiky sendvičových konstrukcí, používaných materiálů a výrobních technologií. Další část pak definuje únavu kompozitních materiálů, charakterizuje významné parametry a formuluje únavové závislosti. Praktická část je zaměřena na popis použitých materiálů, výrobu zkušebních těles a v neposlední řadě obsahuje diskuzi výsledků získaných měření mechanických a únavových vlastností sendvičových konstrukcí pomocí statické a cyklické zkoušky třibodovým ohybem.

Klíčová slova: sendvičová konstrukce, únavu kompozitních materiálů, třibodový ohyb, cyklické zatížení

ABSTRACT

The objective of this thesis is a study of the fatigue behavior of layered sandwich structures composed of different types of cores.

The theoretical part serves as an introduction into the topic of sandwich structures, used materials and manufacturing technologies. Following part defines fatigue of composite materials, characterizes important parameters and formulates fatigue dependencies. The practical part is focused on the description of used materials, production of test specimens and, last but not least, contains a discussion of the results obtained from the measurements of mechanical and fatigue properties of sandwich constructions by static and cyclic three-point bending tests.

Keywords: sandwich structure, fatigue of composite materials, three-point bending, cyclic loading

Touto cestou bych velmi rád poděkoval vedoucímu mé práce Ing. Ladislavovi Fojtlovi za odborné vedení, cenné rady, ochotu a vynaložený čas, který mi věnoval po celou dobu tvorby této diplomové práce. Velký dík patří také mé rodině za jejich podporu a pomoc v průběhu celého studia. Dále mé poděkování patří společnosti Form s.r.o. za poskytnutí materiálu a výrobních prostor pro přípravu zkušebních vzorků. V neposlední řadě děkuji Centru polymerních systémů za možnost využít pro řešení mé diplomové práce jejich zařízení.

Tato diplomová práce byla podpořena z financí interního grantu Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně s číslem IGA/FT/2015/001.

„Úspěch je cesta, ne cíl.“

Ben Sweetland

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 SENDVIČOVÉ STRUKTURY	12
1.1 MATERIÁLY SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ.....	13
1.1.1 Krycí vnější vrstva	13
1.1.2 Jádra sendvičových konstrukcí	18
1.2 VÝROBA SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ.....	21
1.2.1 Ruční kladení a stříkání.....	21
1.2.2 Lisování za tepla	22
1.2.3 Lisování pomocí vakua	23
1.2.4 Vysokotlaké vstřikování RTM.....	24
2 CHARAKTER ZATĚŽOVÁNÍ	25
2.1 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	26
2.1.1 Zkouška ohybem	26
2.2 PORUCHY SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ	28
3 ÚNAVA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	29
3.1 DYNAMICKÉ ZATÍŽENÍ.....	31
3.2 ANALÝZA ÚNAVOVÉHO PROCESU	32
3.2.1 Parametry únavové zkoušky	33
3.3 S-N DIAGRAM.....	36
3.4 TESTOVÁNÍ ÚNAVY KOMPOZITNÍCH SENDVIČOVÝCH STRUKTUR	38
II PRAKTICKÁ ČÁST	39
4 POPIS POUŽITÝCH MATERIÁLŮ	40
4.1 VNĚJŠÍ KRYCÍ VRSTVA SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE.....	40
4.2 JÁDRO SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE	41
4.2.1 Hliníkové voštinové jádro	41
4.2.2 Papírové voštinové jádro	42
4.2.3 Polymerní PET pěna	43
5 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	45
5.1 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ S PAPIROVÝM A PĚNOVÝM PET JÁDREM	45
5.2 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ S HLINÍKOVÝM JÁDREM	48
6 MECHANICKÉ TESTOVÁNÍ TĚLES	52
6.1 STATICKÁ ZKOUŠKA OHYBEM	52
6.2 ÚNAVOVÁ CYKlická ZKOUŠKA	53
6.2.1 Parametry cyklické zkoušky	54
7 DISKUZE VÝSLEDKŮ	56
7.1 SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE S HLINÍKOVÝM VOŠTINOVÝM JÁDREM	56
7.1.1 Výsledky statické zkoušky cyklicky nezatížených zkušebních těles	57
7.1.2 Výsledky statické zkoušky cyklicky zatížených zkušebních těles.....	65
7.2 SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE S PAPIROVÝM VOŠTINOVÝM JÁDREM	75
7.2.1 Výsledky statické zkoušky cyklicky nezatížených zkušebních těles	75

7.2.2	Výsledky cyklické zkoušky.....	78
7.3	SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE S PĚNOVÝM PET JÁDREM.....	78
7.3.1	Výsledky statické zkoušky cyklicky nezatížených zkušebních těles.....	79
7.3.2	Výsledky statické zkoušky cyklicky zatížených zkušebních těles.....	79
ZÁVĚR		85
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		88
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....		91
SEZNAM OBRÁZKŮ		93
SEZNAM TABULEK.....		96
SEZNAM PŘÍLOH.....		97

ÚVOD

Sendvičové konstrukce se řadí mezi kompozitní materiály, jejichž základní skladbu tvoří jádro o malé hmotnosti spojené s dvěma vnějšími vrstvami. Porušení kterékoliv části může vést k selhání celé sendvičové konstrukce. S výhodou se používají pro pokročile aplikace především v leteckém a dopravním průmyslu, kde se využívá jejich nízké hmotnosti při zachování vysoké ohybové tuhosti a pevnosti. Trendem dnešní doby je minimalizování vzniku zplodin vzniklých během provozu dopravních prostředků, což úzce souvisí se spotřebou pohonných hmot a tudíž s hmotností použitých komponentů dopravního prostředku. Během posledního desetiletí bylo v oblasti výroby sendvičových konstrukcí zavedeno mnoho inovací a tím došlo k obrovskému pokroku.

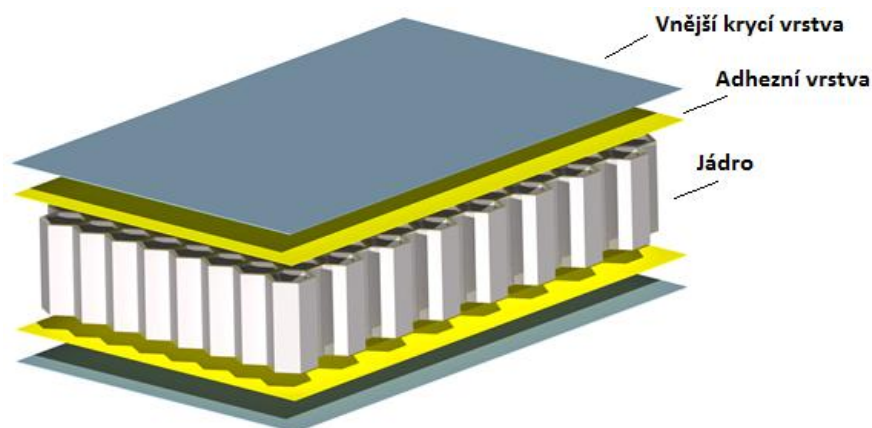
Po celou dobu životnosti jsou kompozitní materiály vystaveny mnoha druhům namáhání, které mohou vést k mechanickému porušení. Mechanické chování sendvičových konstrukcí bylo analyzováno v mnoha výzkumech, nicméně únavové chování a z něho vyplívající porušení nejsou stále úplně probádány, což vede k častému předimenzování sendvičové konstrukce během jejího návrhu.

Představená diplomová práce je zaměřena na únavové chování vrstvených sendvičových konstrukcí s vnější krycí vrstvou z prepreg materiálu vhodně zkombinovanou s třemi typy jádrových materiálů, kdy dva z nich spadají oblastí svého využití do dopravního průmyslu. Hlavním cílem je určit statické ohybové pevnosti a tuhosti, na základě kterých jsou pak získány parametry pro zkoušky cyklické. Únavové zkoušky jsou provedeny při předem definovaném počtu cyklů a po jeho dosažení jsou tělesa opět otestována statickou zkouškou, z níž je určena zbytková pevnost a tuhost těchto konstrukcí.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 SENDVIČOVÉ STRUKTURY

Sendvičové konstrukce patří mezi vrstvené kompozitní materiály s vysokou ohybovou pevností a tuhostí, při zachování nízké hmotnosti. Skládají se ze tří hlavních částí. Ze dvou tenkých vnějších vrstev, které jsou tuhé a pevné, z jádra, které je charakteristické větší tloušťkou, nižší hmotností a pevností. Poslední částí je adhezní vrstva, která zajišťuje přenos zatížení mezi jednotlivými složkami. Adhezní vrstva nemusí být ovšem vždy součástí sendvičové konstrukce, například při použití prepreg materiálů, u kterých adhezi zajišťuje pryskyřice uvnitř prepregu. Výhodou sendvičových struktur je, že při zvětšování tloušťky konstrukce stoupá ohybová tuhost a pevnost při velmi malém nárůstu hmotnosti, protože se zvětšuje pouze tloušťka lehkého jádra (Tab. 1). Uplatnění nacházejí v mnoha průmyslových odvětvích, ale především v automobilovém průmyslu a dopravní technice pro exteriérové i interiérové díly, jejíž hmotnost má výrazný vliv na spotřebu pohonných hmot, v námořní technice pro trupy lodí, dále pro pokročilé aplikace v leteckém průmyslu a kosmonautice, a také ve stavebnictví, kde se využívá jejich izolačních vlastností. [1, 2]



Obr. 1. Složení sendvičové konstrukce.

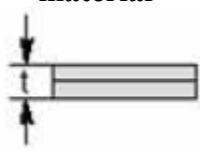
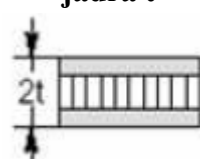

Výhody sendvičových konstrukcí: [3]

- Vysoká ohybová pevnost a tuhost
- Vysoká nosnost při zachování nízké hmotnosti
- Vzduchotěsnost a nepropustnost pro vodu a páru
- Tepelná a akustická izolace
- Dlouhá životnost a nízké náklady na údržbu
- Vnější vrstva poskytuje odolnost vůči povětrnostním vlivům a agresivnímu prostředí
- Snadná oprava nebo výměna v případě poškození

Nevýhody sendvičových konstrukcí: [3]

- Vysoká hořlavost při použití pevného pěnového jádra
- Vznik deformací, pokud je sendvič z jedné strany vystaven působení tepla
- Creep při trvalém zatížení, u prvků s pevným pěnovým jádrem
- Nízká tepelná kapacita

Tab. 1. Porovnání homogenního materiálu a sendvičové konstrukce s různou tloušťkou. [4]

	Homogenní materiál	Sendvič s tloušťkou jádra t	Sendvič s tloušťkou jádra $3t$
			
Ohybová tuhost	1	7	37
Pevnost v ohybu	1	3,5	9,2
Hmotnost	1	1,03	1,06

1.1 Materiály sendvičových konstrukcí

Materiálů pro sendvičové konstrukce je obrovské množství a od zavedení vláknových kompozitů, se tento počet ještě mnohokrát zvýšil. Rovněž množství materiálů pro jádra se v posledních letech výrazně zvýšil, díky stále pokračujícímu výzkumu a výrobě nových polymerů, které je možné připravit ve formě pěny či voštinového materiálu. [1]

1.1.1 Krycí vnější vrstva

Téměř každý konstrukční materiál, který může být v podobě tenké desky či plechu, lze použít pro vytvoření krycí vnější vrstvy sendvičového panelu. Běžně používané materiály lze rozdělit do dvou hlavních skupin, na kovové a nekovové materiály. Do první skupiny patří například ocel a slitiny hliníku. Nekovové materiály tvoří početnější skupinu a patří do ní materiály jako dřevěná překližka, dýha, vyztužené plasty a vláknové kompozity. [2]

O použití materiálu pro krycí vnější vrstvu jsou rozhodující následující vlastnosti: [3]

- ohybová tuhost,
- pevnost v tahu a tlaku,
- odolnost proti rázům opotřebení,
- odolnost vůči vnějším vlivům.

➤ **Kovové materiály**

Nejpoužívanějším kovovým materiálem pro krycí vnější vrstvu je ocel, dále slitiny titanu a slitiny hliníku. Hliníkové plechy se používají pro sendvičové panely, u kterých jsou kladeny speciální požadavky na hygienu nebo odolnost proti korozi, například v potravinářském průmyslu. Výhodou kovových materiálů je vysoká tuhost a pevnost, nízké náklady a vysoká odolnost proti rázům. Naopak nevýhodou je vysoká hustota oproti nekovovým materiálům. [4, 3]

➤ **Dřevěná překližka**

Dřevo je přírodní anizotropní materiál, který má v podélném směru dobré mechanické vlastnosti, ale v kolmém směru jsou tyto vlastnosti značně nižší. Tento problém částečně eliminuje použití dřevěné překližky, která je složena z několika vrstev dřeva orientovaného v různých směrech. Výhodou použití překližky je nízká pořizovací cena a hmotnost, má však nízkou pevnost a tuhost, vysokou hořlavost a navlhavost. [5]



Obr. 2. Dřevěná překližka. [5]

➤ **Vláknové kompozity**

Materiály ve formě vláken se jako konstrukční prvek používají jen zřídka. Zajímavou skupinou se stávají teprve v kompaktní formě, jako je tomu u vláknových kompozitních materiálů. Ty se skládají z vláken, které jsou uloženy v polymerním či jiném materiálu, který se nazývá matrice. Plošné výrobky z vláken anebo pramenců (pramenec – sdružená rovnoběžně uložená nestočená vlákna nebo vlákna tažená přímo z taveniny) se nazývají tkaniny. Vlákna nebo prameny působí výztužně ve dvou směrech a jsou uloženy pravoúhle v útku a osnově. Zvýšením počtu vláken v osnově vznikají rozdílné typy křížení nazývané se vazby. [6]

Pro vyztužující tkaniny se používají následující druhy vazeb: [6]

- plátňová vazba – jednoduchá základní vazba, vyznačující se jednoduchým zpracováním tkaniny, dobrou rozměrovou stálostí a malým počtem ořepů při řezání;
- keprová vazba – tkaniny s keprovou vazbou jsou ohebnější a proto vhodnější pro tvarově složitější výrobky;
- atlasová (saténová) vazba – v porovnání s keprovou vazbou má menší vychýlení vláken a umožňuje dosáhnout velmi hladký povrch.



Obr. 3. Druhy vazeb vyztužujících vláken. [4]

Pro sendvičové konstrukce se používají vláknové kompozity ve formě laminátů, což je plošný výrobek, který je složen z jednotlivých rozlišitelných vrstev. Nejčastěji se používají tkaniny se skelnými, uhlíkovými a nebo aramidovými vlákny. Nejčastěji používaná skleněná vlákna se vyrábí z E-skloviny. Tyto vlákna mají dobré mechanické vlastnosti a dobrou odolnost vůči vnějším vlivům, při zachování relativně nízké ceny. Sklovina, která má o 40 až 70 % vyšší pevnost, se označuje písmenem R. Uhlíková vlákna, vyrobená z polyakrylonitrylu (PAN) se středním modulem pružnosti a dobrou pevností v tahu se značí písmeny HS (HighStrength). Zkratkou HM (HighModulus), se značí vysoko modulová grafitizovaná vlákna z PAN. Velmi pevná vlákna z PAN se středním modulem pružnosti se označují písmena IM (IntermediateModulus) a vlákna s pevností větší než 6500 MPa mají zkratku SHT (Super High-tensile). Aramidová vlákna se vyrábějí v různých druzích, které se liší hodnotami modulu pružnosti. Typy s nízkým E-modulem a vyšším protažením se označují zkratkou LM (LowModulus). Tyto vlákna dokážou pojmout podstatně vyšší deformační práci než vlákna s vyšším E-modulem a nižší tažností, které se označují zkratkou HM (HighModulus). Následující tabulka (Tab. 2) zobrazuje přehled vlastností (hustotu – ρ ; pevnost v tahu - σ_{Pt} ; modul pružnosti v tahu ve směru vláken a kolmo na vlákna - E_{\parallel}, E_{\perp} ; tažnost - δ) výše popsaných vláken. [6, 7]

Tab. 2. Přehled vlastností vláken. [6]

Vlákno	ρ [g.cm ⁻³]	σ_{Pt} [MPa]	$E_{ }$ [GPa]	E_{\perp} [GPa]	δ [%]
Skleněná vlákna					
E-sklo	2,60	2400	73	73	3,0
R-sklo	2,53	3500	86	86	4,1
Uhlíková vlákna					
HS	1,78	3600	240	15	1,5
HM	1,9	1750	500	5,7	0,35
SHT	1,75	5000	240	15	2,1
IM	1,77	4700	295	15	1,6
Aramidová vlákna					
HM	1,45	3000	130	5,4	2,1
LM	1,44	2800	65	5,4	4,3

Matrice je materiál, kterým je prosycen systém vláken tak, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek - kompozit. Jejím úkolem je zajištění geometrické polohy vláken a tvarové stálosti výrobku, ochrana vlákna před vlivy okolí, přenos namáhání na vlákna a převedení namáhání z vlákna na vlákno. Pro získání kvalitního kompozitního výrobku je důležité zajistit adhezi na fázovém rozhraní matrice-vlákno. Matrice musí mít vhodnou viskozitu a povrchové napětí, aby došlo k úplnému smáčení vláken bez vzniku bublin. Pro polymerní kompozitní materiály se používá matrice reaktoplastická a termoplastická. Nejčastěji používané jsou reaktivní pryskyřice ze skupiny reaktoplastů. Jsou to kapalné nebo tavitelné pryskyřice, které se samostatně, nebo za pomoci tvrdidel vytvrzují polyadici nebo polymeraci bez odštěpení těkavých složek. Mezi nejdůležitější tvrdidla patří iniciátory, urychlovače urychlující síťovací reakce a taky aldehydy (fenoly). Nejpoužívanějšími reaktivními pryskyřicemi jsou nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R), epoxidové pryskyřice (EP-R), vinylesterové (VE-R) nebo fenakrylátové (PFA-R) pryskyřice, fenolické a metakrylátové pryskyřice (MA-R). Základními parametry pro vytvrzování pryskyřic jsou čas a teplota. Termoplasty se od reaktoplastů liší jak zpracovatelskými, tak i uživatelskými vlastnostmi. Za normální teploty jsou v pevném skupenství a teprve po zahřátí na teplotu většinou kolem 200 °C se dostávají do tekutého stavu. [6]

- *Prepreg materiály*

Prepreg je označení pro vláknové výztužné materiály, které jsou před-impregnovány částečně vytvrzenou reaktivní pryskyřicí, která je ve fázi, kdy již vzniklo zesítnění molekul, ale vytvořená síť má velmi malou hustotu. Nejčastěji používanou pryskyřicí pro prepreg materiály je epoxidová a fenolická pryskyřice, ale mohou být použity i jiné typy reaktivních pryskyřic. Prepregy před-impregnovány reaktoplastickou matricí se musí skladovat při teplotách kolem $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, při delším ponechání prepregu s běžným vytvrzovacím systémem při teplotě $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ se pryskyřice pozvolna vytvrzuje a prepreg stárne. Během stárnutí se snižuje jeho lepivost. Po vyjmutí z mrazicího boxu se role nechá v ochranném obalu vytemperovat na teplotu místnosti, aby po rozbalení nedošlo k orosení povrchu prepregu a tím i k navlhnutí matrice a povrchů vláken. Ze zmrazené role prepregu by také nešlo odvinout potřebnou délku. [7, 8]

Výhody prepregů: [9]

- Optimální množství pryskyřice bez vzniku přesycených anebo suchých míst. Při přebytečném množství pryskyřice se zvyšuje křehkost výsledného výrobku.
- Jednoduchost použití a opakovatelnost výroby.
- Lepší vzhled oproti ručnímu laminování, protože nevznikají vzduchové bubliny a hladký, lesklý povrch je snadno dosažitelný.

Nevýhody prepregů: [9]

- Obtížné skladování a omezená doba zpracovatelnosti.
- Vysoká pořizovací cena.
- Potřebná vytvrzovací teplota $100\text{ až }150\text{ }^{\circ}\text{C}$ a výdrž na této teplotě po dobu dvou a více hodin.



Obr. 4. Prepreg s uhlíkovou tkaninou. [10]

1.1.2 Jádra sendvičových konstrukcí

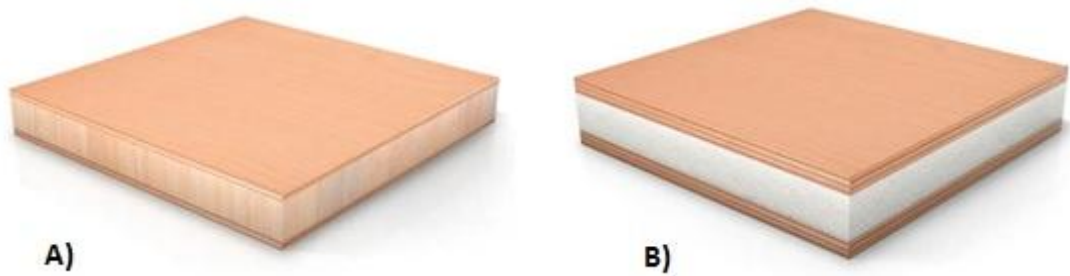
Pro jádra sendvičových konstrukcí, která jsou schopna přenášet zatížení, se nejčastěji používá balsa, polymerní pěny a voštinové materiály. Výběr vhodného materiálu pro jádro sendvičové konstrukce závisí především na hustotě použitého materiálu, tuhosti, modulu pružnosti ve smyku, mezi pevnosti ve smyku a v neposlední řadě na tepelných a akustických vlastnostech. [1]

➤ Balsa

Balsa je dřevo, které bylo jako první použito pro přenos zatížení v sendvičových konstrukcích. Největší množství pochází z Ekvádoru, ale dováží se taky z Indie a Indonésie, kde byl tento strom uměle vysazen. Mechanické vlastnosti tohoto materiálu jsou v podélném směru (směr růstu) velmi vysoké v porovnání s ostatními směry. Hustota balsy se pohybuje v rozmezí od 100 do 300 kg/m³, v závislosti na množství vody, v suchém stavu je hustota přibližně 160 kg/m³. Suší se velice obtížně a ihned po pokácení se musí zpracovat. Mnohem lepší než sušení na vzduchu je sušení v sušárnách, kde je možné minimalizovat vznik trhlin a deformací dřeva. Balsa je velmi navlhavá a její vlastnosti se rychle mění s rostoucím obsahem vody. [11]

➤ Polymerní pěny

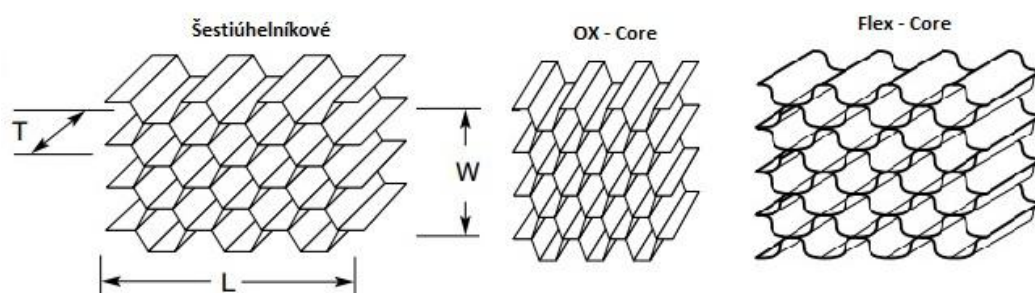
Mezi nejpoužívanější polymerní pěny patří pěny polyuretanové (PUR), polystyrenové (EPS a XPS), polypropylenové (EPP) a polyethylenové (PE). Výhodou polymerních pěn je dobrá tvarovatelnost, v porovnání s voštinovými materiály jsou levnější a povrch pěny se pojí s ostatními vrstvami pomocí lepidla. Ke zpěňování polymerů dochází přidáním plynných bublin do tekutého monomeru anebo do horkého polymeru. Následně se tyto bubliny nechají expandovat a po stabilizaci se vzniklá pěna ochladí, aby ztuhla. Bubliny se do polymeru přidávají dvěma způsoby a to mechanickým mícháním, či přimícháním zpěňovacího materiálu (zpěňovadla), který může být na fyzikální anebo chemické bázi. Mezi fyzikální zpěňovadla patří inertní plyny, dále uhlík, vodík a dusík. Tyto plyny se pod vysokým tlakem vhání do horkého polymeru a jejich růst je řízen redukcí tlaku. Chemická zpěňovadla jsou přísady, které se rozkládají teplem, anebo které uvolňují plyny vzájemnou chemickou reakcí. [6, 12]



Obr. 5. A) sendvičový panel s jádrem z balsy; B) s jádrem z PE pěny. [13]

➤ Voštinové materiály

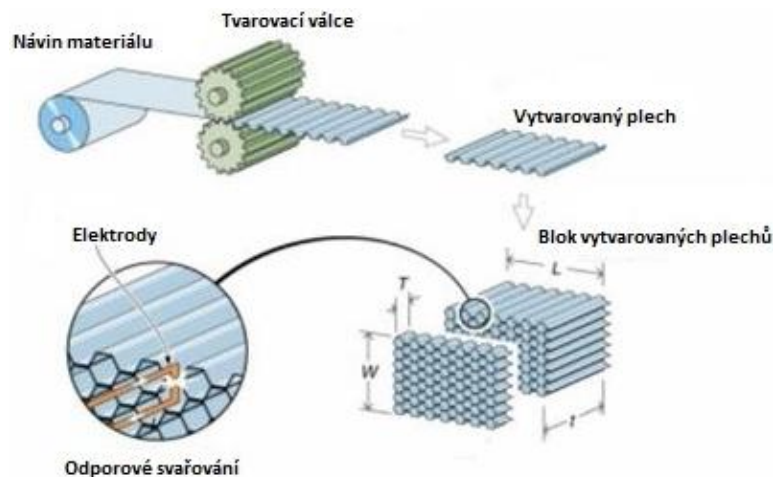
Voštinové materiály se skládají z řady otevřených, vzájemně spojených buněk, které jsou vytvořeny z velmi tenkých vrstev materiálu. Jejich název je odvozen z přírody, kde připomínají šestihrannou strukturu plástů včelího medu. Byly vyvinuty pro aplikace zejména v letectví a kosmonautice, kde se využívá jejich nízké hmotnosti. Při porovnání pevnosti pěnových a voštinových jader vyplývá, že voštinová jádra mají lepší mechanické vlastnosti než pěnová jádra při stejné hustotě. Jako výchozí materiál pro voštinová jádra se používají kovové materiály (hliník, nerezová ocel, titan) anebo nekovové materiály jako skleněná vlákna, aramidová vlákna, kraftový papír. Vyrábějí se v mnoha variantách tvaru buněk, nejčastěji však jako šestiúhelníkové, které mohou být v kovovém, i nekovovém provedení. Dalším typem jsou takzvané Flex-Core buňky a OX-Core. Flex-Core buňky poskytují mimořádnou tvárnost a v porovnání s šestiúhelníkovými buňkami vyšší pevnost ve smyku při zachování stejné hustoty jádra. Ox-Core buňky vycházejí z šestiúhelníkových buněk, ale jsou navíc prodlouženy ve směru W. V tomto provedení mají vyšší smykové vlastnosti ve směru W a nižší ve směru L. [1, 14, 15]



Obr. 6. Nejpoužívanější tvary buněk voštinových jader. [15]

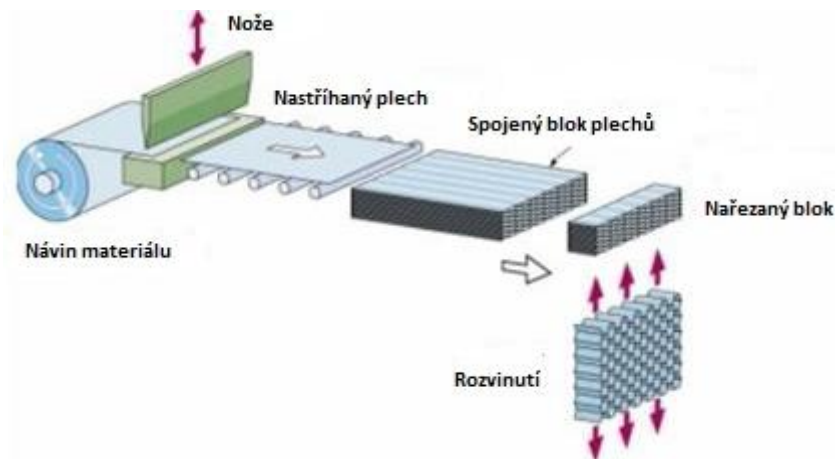
Pro výrobu voštinových jader se používají dvě základní technologie. První metodou výroby je tvarování, které se používá pro kovové materiály s vysokou hustotou a rovněž pro některé nekovové materiály. Principem této technologie je vytvarování výchozího materiálu mezi tvarovacími válci. Po zkrácení na požadovanou délku se jednotlivé vrstvy

skládají do bloku a spojují se nejčastěji lepením, bodovým svařováním anebo pájením. Poslední dvě technologie spojení se používají pro jádra, která jsou vystavena teplotám až 700 °C. V poslední fázi výroby se ze vzniklého bloku nařežou jednotlivá jádra na požadovanou tloušťku. [14, 1]



Obr. 7. Technologie tvarování kovových voštinových jader. [12]

Druhou používanou technologií je metoda zvaná HOBE, z anglického Honeycomb Before Expansion. Při výrobě z kovových materiálů se tenké plechy nejprve nastříhají a poskládají na sebe. Po spojení jednotlivých vrstev lepením, pájením anebo svařováním se vzniklý blok krátí na požadovaný rozměr. Poslední fází této technologie je rozvinutí bloku ve směru kolmém na rovinu, ve které leží spoje, čímž vznikne šestihorná struktura buněk. Při použití nekovových materiálů se výrobní proces mírně liší. Po rozvinutí buňky nedrží svůj požadovaný tvar a musí být zařazeny v přípravku. Materiál je nasycen malým množstvím pryskyřice, která se vytvrdí v peci a tím si voštinové jádro zachová svůj tvar. [14, 1]



Obr. 8. Technologie HOBE pro kovové materiály. [12]

1.2 Výroba sendvičových konstrukcí

Použitá technologie při výrobě sendvičových konstrukcí výrazně ovlivňuje konečné vlastnosti výrobku i ekonomiku celé výroby, proto je třeba jí věnovat značnou pozornost. Výrobní technologie je dána především charakterem výrobku a její volba se řídí několika zásadními parametry: [16]

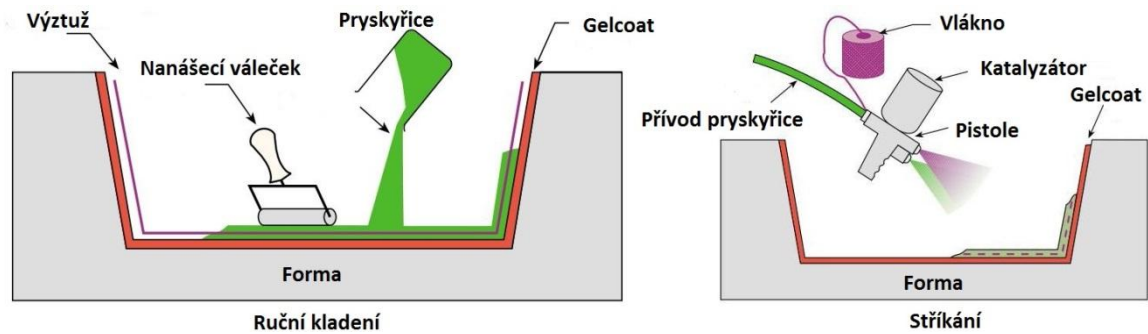
- Sériovost dílce
 - Dílce v malých sériích nelze vyrábět strojními technologiemi a naopak velké série není z ekonomického hlediska výhodné vyrábět ručními metodami.
- Velikost a členitost výrobku
 - Některé technologie lze aplikovat pouze na určité tvary.
- Kvalita povrchu
 - Některými výrobními postupy lze získat pouze jednostranně kvalitní povrch a to od povrchu formy.
- Požadované vlastnosti, zejména pevnost a hmotnost
 - Při použití kompozitních vláknových výztuží závisí většina mechanických vlastností na obsahu a orientaci výztuže a taky na typu použité matrice, což jsou faktory, které značně závisí na použité technologii.

Při použití vláknem vyztužených polymerů je výhodou, že za určitých podmínek mohou být laminovány přímo na jádro sendvičové konstrukce, ale taky může být vnější vrstva vyrobena v jednom kroku a následně spojena s jádrem v další fázi výroby. Ostatní materiály používané pro vnější vrstvu, jako jsou kovové plechy a dřevěné překližky, jsou vždy vyrobeny v jednom kroku a následně jsou přilepeny k jádru. [1]

1.2.1 Ruční kladení a stříkání

Ruční kladení a stříkání patří mezi takzvané metody mokrého kladení a jsou jedny z nejstarších a nejsnadnějších technologií pro výrobu sendvičových konstrukcí, které mají vnější vrstvu z vláken vyztuženého kompozitu. Tato metoda je velmi flexibilní, ale fyzicky náročná a závislá na zkušenostech pracovníka. Je vhodná pro malosériovou výrobu, pro výrobu forem a velkoplošných dílů. Při použití technologie ručního kladení se na povrch jednostranné formy nanese vrstva separačního činidla, které usnadňuje vyjmutí výrobku z formy. Na povrch formy může být taky nanesena vrstva gel-coatu, která vytvoří na

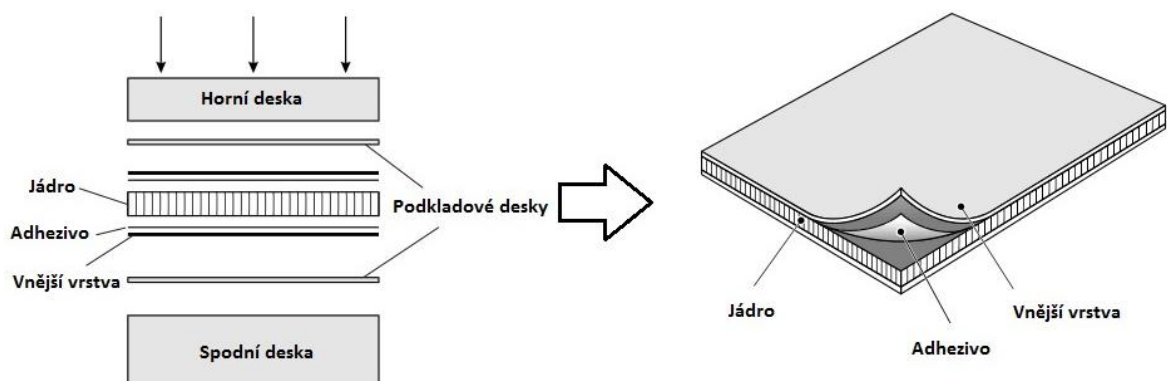
pohledové straně hladký povrch, který skryje strukturu výztuže a slouží taky jako ochrana proti vnějším vlivům. Dále se na formu kladou jednotlivé vrstvy výztuže, které se prosycují pryskyřicí pomocí válečku. Alternativou k ručnímu kladení je stříkání, při kterém se speciální pistolí nanáší směs pryskyřice a výztuže na povrch formy. Tento proces lze zčásti automatizovat použitím robotem řízenou pistolí. [1]



Obr. 9. Schéma technologií ručního kladení a stříkání. [17]

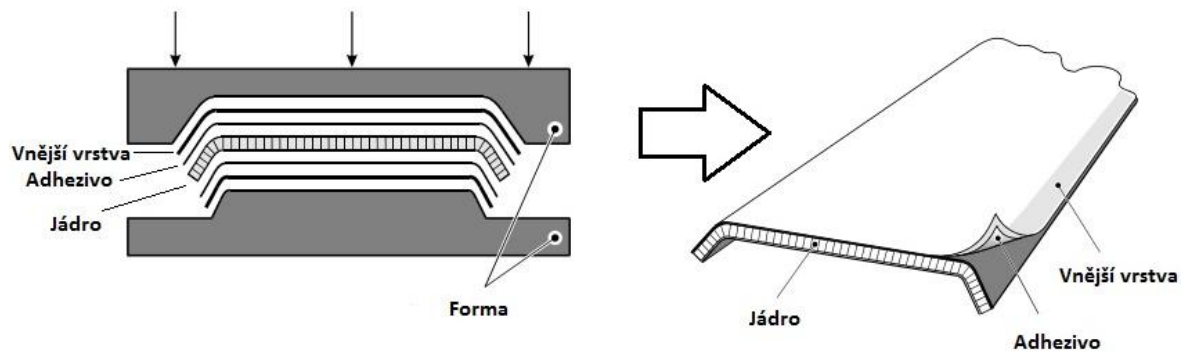
1.2.2 Lisování za tepla

Technologií lisování za tepla a tlaku lze v jednom kroku vyrobit rovinné sendvičové panely mezi vyhřívanými deskami nebo tvarové sendvičové konstrukce ve vyhřívaných formách. Výroba mezi vyhřívanými deskami spočívá ve vložení jednotlivých materiálových složek mezi podkladové desky a následným zalisováním. Po vytvrzení vznikne rovinný sendvičový panel. Tato metoda je vhodná pro sendvičové materiály, které mají vnější vrstvu z prepreg materiálu nebo kovu. [18]



Obr. 10. Lisování mezi vyhřívanými deskami. [18]

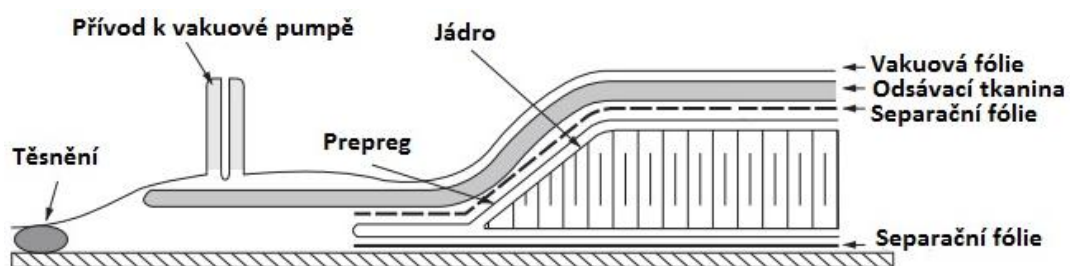
Technologie lisování v uzavřené formě se používá pro výrobky, kde jsou kladeny vyšší požadavky na rozměrovou přesnost a výslednou jakost povrchu sendvičové konstrukce. Požadovaného tlaku a teploty k vytvrzení se dosahuje buďto vyhříváním nástrojem a vnějším působením tlaku anebo nevyhříváním nástrojem umístěným v lisu nebo peci. [18]



Obr. 11. Lisování v uzavřené formě. [18]

1.2.3 Lisování pomocí vakua

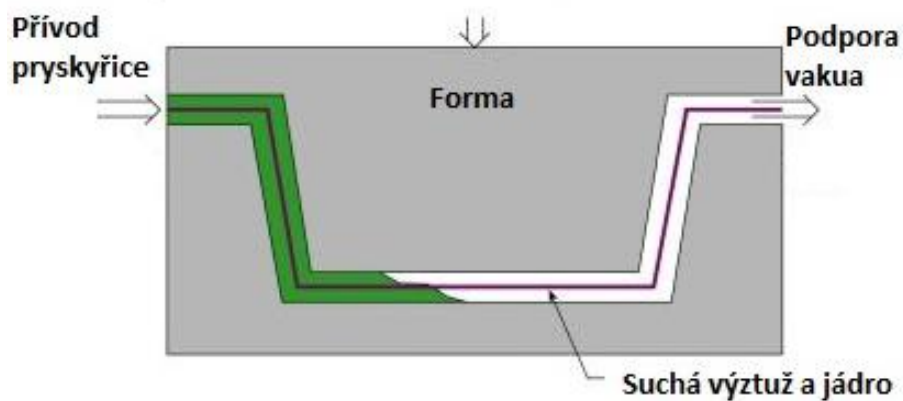
Pro technologii lisování pomocí vakua, anglicky Vacuum Bagging, se používá podobně jako při ručním kladení nebo stříkání jednodílná forma, popřípadě pro získání oboustranně hladkého povrchu dvoudílná forma. Aplikací vakua se sendvičová konstrukce zbaví nežádoucích vzduchových bublin. K vytvoření vakua je potřeba mimo čerpadla a vakuové fólie, která vytváří tlak na vrchní ploše a slouží k uzavření celého systému, taky dalších pomocných materiálů, jako separační fólie, odsávací tkanina a těsnění. Separací fólie slouží k vyjmutí výrobku a odděluje pomocné materiály od vyráběného výrobku, odsávací tkanina zabezpečuje odsávání vzduchu z uzavřeného systému a absorbuje přes separační fólii přebytečnou pryskyřici. Utěsnění celého systému je zajištěno těsnicí páskou, která vytvoří vzduchotěsný spoj mezi formou a vakuovou fólií. Celý systém je následně uložen ve vytvrzovací peci či autoklávu, což je vyhřívaná tlaková komora, u které přesné a reprodukovatelné řízení teplotních, tlakových a vakuovacích cyklů umožňuje stabilizaci a vytvrzení kompozitních materiálů. [6, 7]



Obr. 12. Výrobá sendvičové konstrukce lisováním pomocí vakua. [4]

1.2.4 Vysokotlaké vstřikování RTM

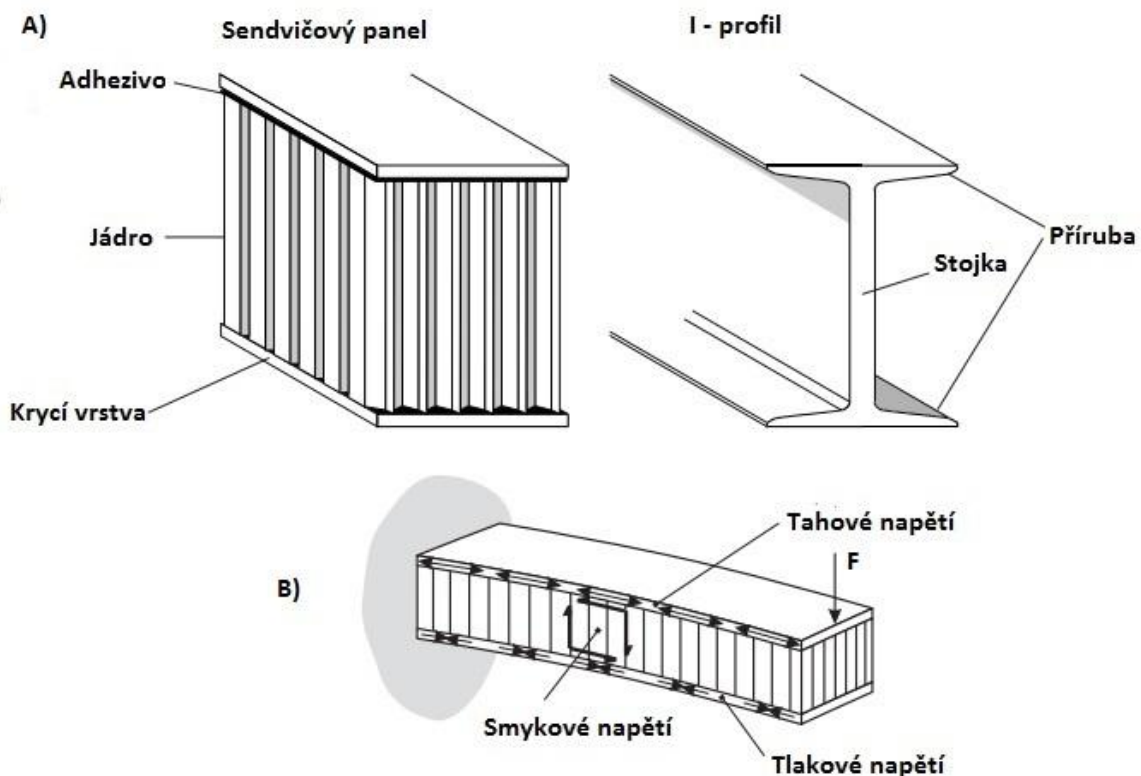
Při technologii RTM, z anglického slova Resin Transfer Moulding, se výztuž ve formě tkaniny nebo rohože uloží do formy společně s jádrem z polymerní pěny (nejčastěji PVC a PUR). Po uzavření formy se do pracovního prostoru vstříkne pod tlakem pryskyřice, která je pro snížení viskozity zahřívána a přiváděna do chvíle, dokud nezaplní kontrolní otvory pro odvod pryskyřice a nezačne z těchto otvorů vytékat. Vytvrzování může probíhat při pokojové teplotě anebo za zvýšené teploty formy, ale nemělo by začít dřív než je forma zcela zaplněna pryskyřicí, protože by hrozil vznik suchých míst a vzduchových bublin. Pro urychlení samotného procesu a odstranění vzduchu z prostoru formy se s výhodou využívá vakuum (VA-RTM). [8]



Obr. 13 Technologie vysokotlakého vstřikování RTM. [17]

2 CHARAKTER ZATĚŽOVÁNÍ

Sendvičové konstrukce lze přirovnat k nosníkovým profilům tvaru I, které mají efektivní konstrukční tvar, protože co nejvíce materiálu je soustředěno do okrajových přírub vzdálených od neutrální osy anebo centra ohybu. Stojka mezi přírubami slouží ke spojení obou přírub a odolává smykovému napětí a vzpěru. U sendvičových struktur vnější krycí vrstvy nahrazují příruby a stojku nahrazuje jádro, s tím rozdílem, že jádro je z odlišného materiálu a je rozloženo po celé ploše sendviče. Při namáhání ohybem přenáší horní vnější vrstva tahové napětí a dolní vrstva přenáší tlakové napětí. Jádro sendviče odolává smykovému napětí, které vzniká mezi krycími vrstvami a zvyšuje tuhost sendvičové konstrukce. Vrstva adheziva mezi jednotlivými vrstvami musí být schopná přenášet smykové napětí mezi jádrem a krycími vrstvami. Obecně platí, že by měla přenést smykové napětí stejně velké jako jádro sendviče. [9]



Obr. 14. A) Podobnost sendvičové konstrukce s I-profilem. B) Vzniklá napětí při zatížení ohybem. [18]

2.1 Zkoušky mechanických vlastností

Zkoušení vzorků materiálu konstantním zatížením anebo velmi pomalu měnícím se zatížením, se nazývá statické zkoušení, mezi které patří například zkoušky pevnosti v tahu, tlaku, ohybu, stříhu a také zkoušky tvrdosti. Pokud zkoušení probíhá rázovým, rychle vznikajícím nebo střídavým zatížením, mluvíme o dynamickém zkoušení, do kterého se řadí rázové zkoušky a cyklické zkoušky k určování meze únavy. V porovnání s nevyztuženými plasty nejsou vlastnosti kompozitních materiálů tak závislé na teplotě, době zatížení a podmínkách prostředí (vlhkost okolního vzduchu, agresivní prostředí, UV záření). Při mechanickém namáhání má vliv na jejich chování především vytvrzení matrice, rozložení plniva nebo vláken, orientace vláken a především obsah plniva. [19, 6]

Při statických zkouškách sendvičových konstrukcí v tahu, se stanovuje pevnost v tahu vztažená na plochu jádra anebo pevnost spojení mezi jádrem a krycími vrstvami. Testování probíhá na trhacím stroji a spočívá ve vystavení sendvičové struktury tahovému zatížení v kolmém směru k rovině sendviče. Statické zkoušky v tlaku slouží k posouzení únosnosti sestavené konstrukce, anebo při testování rovnoměrným tlakem kolmo na plochu sendviče ke stanovení pevnosti nebo tuhosti celé konstrukce vystavené rovnoměrnému, příčnému, statickému zatížení. Zkouška stříhem probíhá rovnoběžně s rovinou sendviče a poskytuje informace o chování konstrukce, která je vystavena smykovému namáhání. Při rázových zkouškách působí na malou plochu zkušebního tělesa relativně vysoké síly po krátkou dobu, tato zkouška slouží ke stanovení odolnosti sendvičové konstrukce proti rázům. [10]

2.1.1 Zkouška ohybem

Zkouška ohybem sendvičových konstrukcí se provádí na rovinných sendvičových panelech. Výsledky zkoušky slouží k určení ohybové a smykové tuhosti konstrukce, smykovému modulu a smykové pevnosti jádra anebo pevnosti v tahu nebo tlaku vnějších krycích vrstev. Při zkoušení pevnosti jádra ve smyku je možné vyhodnotit pevnost spojení mezi jednotlivými vrstvami, jelikož naměřené hodnoty smykových napětí mohou být nižší než skutečná pevnost jádra ve smyku, což znamená, že k selhání došlo ve vrstvě adheziva. Stanovené veličiny mají především srovnávací význam a při vyhodnocení je nutné sledovat druh porušení. Přípustný druh porušení ohýbaného nosníku je porucha zkušebního tělesa lomem, který byl vyvolán tlakovým nebo tahovým napětím. Zkouška ohybem může probíhat při tříbodovém nebo čtyřbodovém uložení a oboje mohou být použity pro

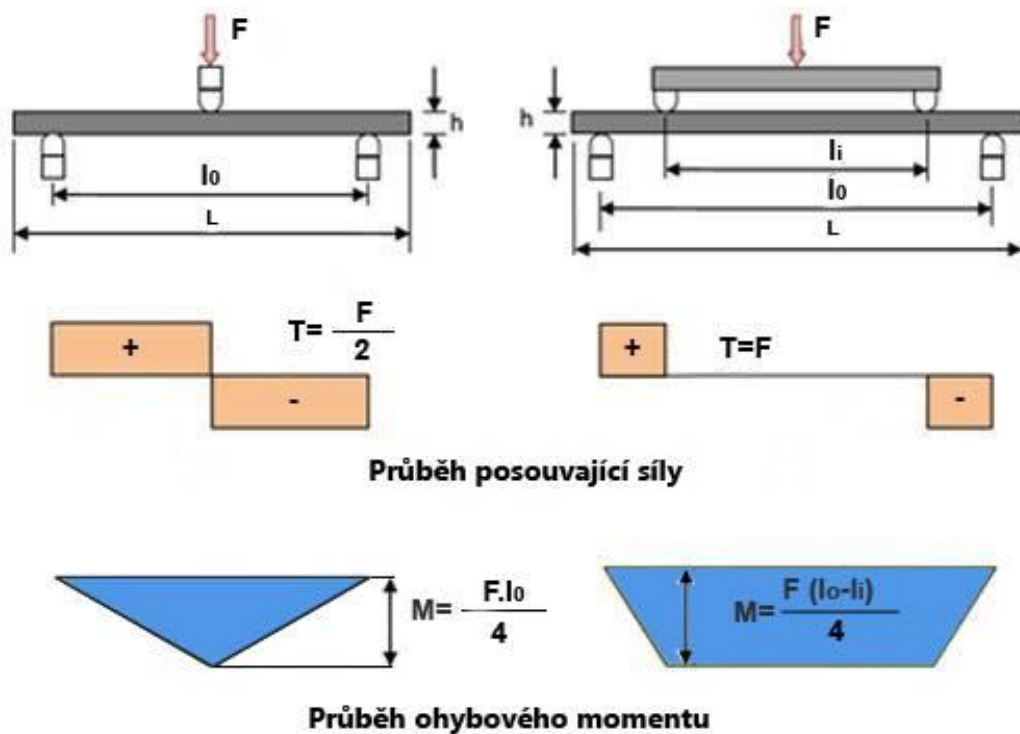
testování sendvičových konstrukcí jak při statickém zatížení, tak i testování únavového chování cyklickým zatěžováním. [11, 6]

➤ **Zkouška tříbodovým ohybem**

Při zkoušení tříbodovým ohybem je zkušební těleso podepřeno jako nosník mezi dvěma podpěrami a je prohýbáno konstantní rychlostí trnem, čímž nastává ve zkušebním tělese napjatost s maximálním zatížením a definovaným místem lomu v bodě zatížení, což je ve středu délky zkušebního tělesa. Z tohoto důvodu by mělo zatížení působit na větší plochu, aby nedošlo k lokálnímu promáčknutí vnější vrstvy. [12, 6]

➤ **Zkouška čtyřbodovým ohybem**

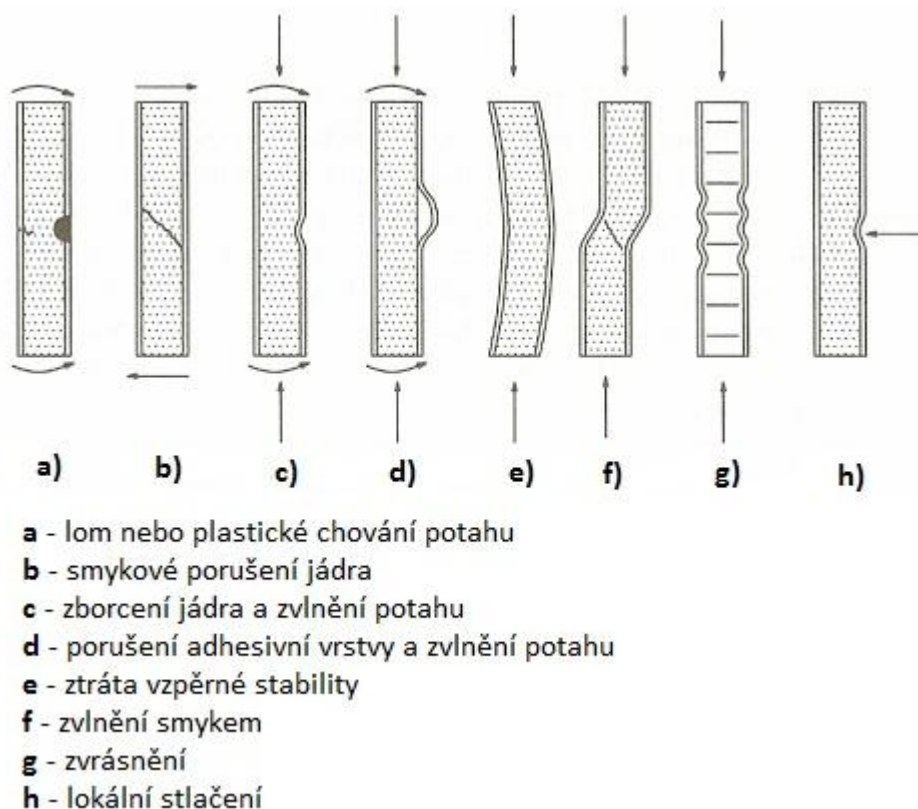
Rozdílem čtyřbodového provedení zkoušky je, že zkušební těleso je prohýbáno dvěma symetricky umístěnými trny, což způsobí, že ohybový moment M_0 je konstantní po celé délce zatížení tělesa a tím se sníží lokální zatížení, které by mohlo způsobit místní promáčknutí. [13, 6]



Obr. 15. Průběh posouvající síly Q a ohybového momentu M při zkoušce tří- a čtyřbodovým ohybem. [20]

2.2 Poruchy sendvičových konstrukcí

Výsledná únosnost sendviče v ohybu není dána pouze materiálovou charakteristikou, jako je tomu u homogenních výrobků, ale je výslednicí složitého mechanického chování sendvičové struktury. Únosnost sendvičové konstrukce je omezena různými poruchami a závisí jak na geometrických, tak i na materiálových a technologických parametrech. Vnější krycí vrstvy sendvičové struktury jsou náchylné k určitým formám ztráty stability, protože je lze přirovnat k tenkostěnným prvkům uloženým na pružném podkladě jádra. Porušení mohou být doprovázena odtržením – separací nosných vrstev od jádra a jejich následným porušením. Osamělá příčná zatížení mohou způsobit lokální poškození v důsledku stlačení, případně porušení jádra a tím dochází v těchto místech ke snížení únosnosti sendvičové konstrukce. [21]



Obr. 16. Příklady poruch sendvičových konstrukcí. [22]

3 ÚNAVA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

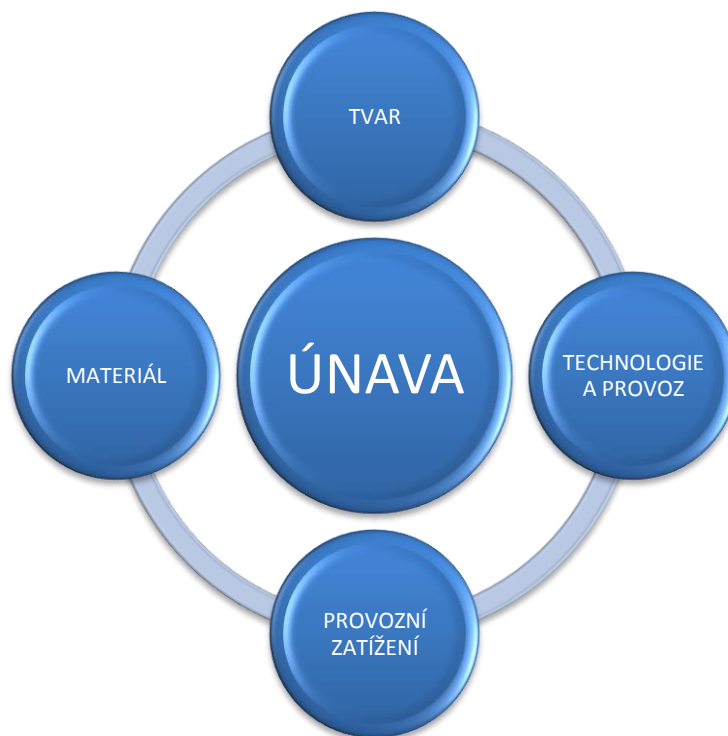
Únava materiálu je proces, při kterém dochází k degradaci vlastností materiálu vlivem kolísavého zatížení, které je proměnlivé v čase. Během tohoto procesu probíhají v materiálu postupné změny jeho vlastností, které mohou vést k únavovému lomu. K únavovému lomu může dojít po určité době, i když velikost zatěžovacího napětí je nižší, než je mez kluzu a mez pevnosti. Pojem únava materiálu byl lidstvu znám již v první polovině 19. století, ale systematicky zkoumán byl až na jeho konci. Známé jsou především experimenty a poznatky německého inženýra Augusta Wöhlera, jehož závěry z prací jsou platné dodnes: [23, 24]

- Za únavový lom se považuje lom součásti, který nastane v důsledku cyklického zatížení. Pro vznik lomu je rozhodující počet kmitů zatížení, nikoli absolutní doba provozu součásti.
- Stupeň poškození materiálu vlivem únavového procesu je závislý na rozdílu maximálního a minimálního napětí v kritickém místě součásti (na rozkmitu napětí). Absolutní velikost napětí, to znamená i střední hodnota napětíového cyklu, má až druhořadý vliv.
- Výsledky zkoušek lze znázornit únavovými křivkami v souřadnicích: počet kmitů a amplituda napětí, které jsou většinou v logaritmickém měřítku. Tyto křivky se označují jako Wöhlerovy křivky, popřípadě podle anglosaské literatury jako S-N křivky (Stress-Number of cycles).
- Při zkoušení únavového chování hladkých těles nebo vzorků s geometrickými vruby lze pro některé materiály, především pro konstrukční uhlíkovou ocel, stanovit mezní amplitudu napětí, pod kterou již nedochází k únavovým lomům. Tato hodnota bývá označována jako mez únavy materiálu.
- Geometrické vruby, ale taky ostatní konstrukční a technologické koncentrátoři napětí, snižují mez únavy a životnost vzorku. Míra poklesu je závislá nejen na geometrických rozměrech, ale taky na vrubové citlivosti daného materiálu.

Podle typu namáhání materiálu rozlišujeme únavu statickou a dynamickou. Statická únava vzniká dlouhodobým konstantním zatížením materiálu a projevuje se postupným poklesem pevnosti. Příčinou tohoto procesu je pomalý růst mikrotrhlin, přičemž čím vyšší je zatěžovací napětí, tím rychlejší je růst trhlin a tím rychleji klesá pevnost materiálu. Statická únava je významná zejména pro křehké materiály, jako je sklo a keramika. Dynamická

únavu nastává při proměnlivém zatížení a probíhá u všech materiálů. Proměnlivé namáhání rozlišujeme náhodné nebo cyklické, které je pro studium únavového chování výhodnější, protože ho lze popsat jednoduchými parametry. Cyklická plastická deformace neustále pohlcuje energii a způsobuje nevratné změny. I když je materiál zatěžován proměnlivým namáháním, které stále leží v elastické oblasti, koncentruje se v okolí defektů napětí a dochází k plastické deformaci. Při dimenzování konstrukcí musí konstruktér respektovat faktory ovlivňující únavovou pevnost. Čtyři základní faktory jsou následující: [23, 24, 25]

- provozní zatížení, většinou definované spektrem zatížení;
- materiál a jeho pevnostní, cyklické a lomové vlastnosti;
- tvar součásti a s tím související koncentrace napětí;
- technologie výroby konstrukce a provozní podmínky působící především na její povrch.



Obr. 17. Schéma čtyř základních faktorů ovlivňujících únavovou pevnost. [23]

Pro předpověď únavového chování byly vyvinuty teoretické matematické modely, které analyticky popisují proces únavového poškození a předpovídají únavovou životnost kompozitních materiálů. Teoretické modely lze rozdělit do dvou hlavních kategorií. První kategorie obsahuje teorie, které jsou založeny na poruchách v makroskopickém měřítku a

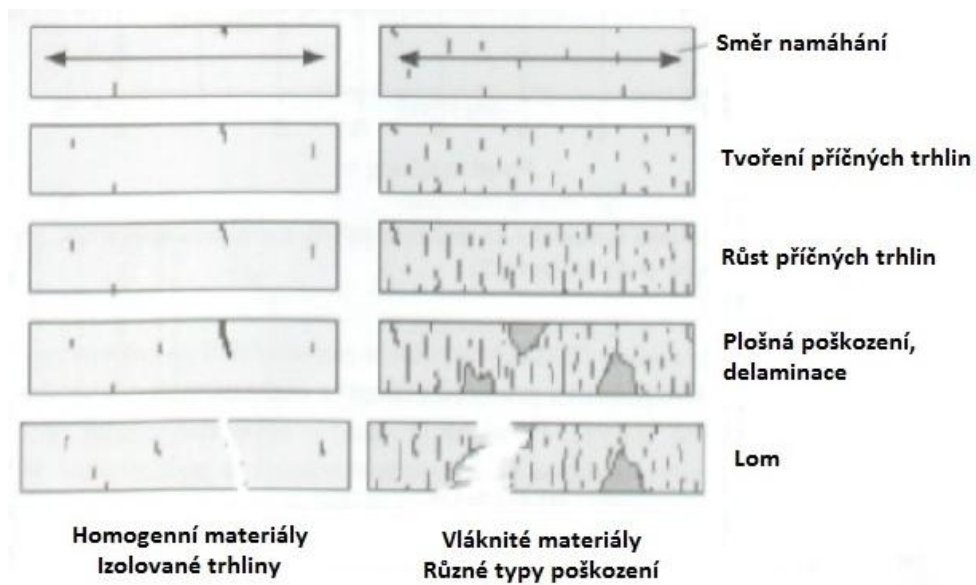
teoretických formulacích, které předpovídají životnost pod konstantní nebo proměnou amplitudou zatížení. Teorie v této kategorii neberou v úvahu experimentální pozorování mechanismů poškození a jejich rozvoj během zatížení. Teorie obsažené v druhé kategorii jsou založeny na skutečných výsledcích poškození během únavové životnosti. Tudíž existuje Damage Metric, která se používá jako indikátor nárůstu poškození. V závislosti na tomto indikátoru mohou být tyto teorie dále rozděleny do následujících kategorií: únavová teorie degradace pevnosti, kde Damage Metric je zbytková pevnost po cyklickém programu; únavová teorie degradace tuhosti, u které je tuhost pojatá jako tzv. Fatigue Damage Metric; a nakonec teorie skutečných mechanismů poškození, založených na modelování vnitřních vad v matici kompozitního materiálu, které lze považovat za trhliny v matici. [25]

3.1 Dynamické zatížení

U kovových materiálů se při cyklickém namáhání vytvoří lokálně působící trhlina, jejíž růst a kritickou velikost lze popsat pomocí lomové mechaniky. Pro kompozitní materiály vyztužené vlákny je poškození při dynamickém namáhání provázeno vznikem a rozvojem různých poruch ve velkém objemu materiálu (obr. 16), které nemají jednotlivě takový význam jako trhlina v kovovém materiálu. Růst trhliny může být zastaven sousedící pevnější složkou kompozitního materiálu. Rozsah jednotlivých typů poškození a jejich časové pořadí závisí nejen na směru a typu působícího napětí (tah, tlak, ohyb), ale taky na vlastnostech jednotlivých složek kompozitu (tažnost matrice, druh a obsah vláken, orientace a pořadí vrstev). [6]

Poškození, které se vyskytují u kompozitů vyztužených vlákny, se dají rozdělit do následujících skupin: [6]

- porušení soudružnosti vlákna s maticí,
- trhlina v matici,
- lom vlákna,
- porušení soudružnosti mezi jednotlivými vrstvami (hlavně u vrstvených materiálů při postupujícím procesu únavy).



Obr. 18. Průběh poškození u homogenních a vláknitých materiálu. [6]

Vznik a rozvoj jednotlivých poruch probíhá za spolupůsobení ostatních typů porušení a proto je velmi obtížné vyhodnotit kvalitativně vliv jednotlivých poruch a následně definovat obecné zákonitosti procesu porušování. Metody vyšetřování dynamických vlastností se dělí na: [6]

- kontinuální – proces poškození je průběžně sledován a zaznamenáván,
- diskontinuální – zkušební těleso je zatěžováno do lomu nebo do dosažení určitého počtu cyklů a následně je zkoumáno mikroskopickou nebo jinou nedestruktivní metodou.

3.2 Analýza únavového procesu

Pro zkoušky při statickém zatížení jsou rozměry zkušebních těles, zkušební podmínky a použitá zařízení podrobně popsána v řadě směrnic a norem vydaných většinou organizacemi ISO, ASTM a dalšími národními instituty. V případě testování únavového chování kompozitních materiálů je standardizace mnohem omezenější. Určité směrnice existují pro měření únavového chování v tahové oblasti a v kombinované oblasti tahu a tlaku, kde se vychází ze zkušebních vzorků a metod použitých při statických zkouškách. Poruchy se při analýze procesu únavového poškození dělí na mikroskopické a makroskopické. O mikroskopické porušení se jedná v případě, že vzniklé poruchy jsou o velikosti jednoho nebo několika průměrů vláken a porušení o velikosti nejméně tloušťky jedné vrstvy patří k poruchám makroskopickým. Proces porušování začíná na mikroúrovni a s rostoucím počtem zatěžovacích cyklů vznikají stále rostoucí třídímní oblasti

poškození, což se projevuje snížením tuhosti materiálu. V momentě, kdy rozsah poškození v určitém místě dosáhne kritické hodnoty, tak zbytková pevnost nebo tuhost klesne pod úroveň působícího namáhání a dojde k lomu, případně ke ztrátě stability. [6]

K popisu únavového chování slouží následující kritéria: [6]

- lom nebo úplná porucha (S-N diagram),
- pokles tuhosti a zbytková pevnost,
- způsob poškození a jeho průběh.

Uvedená kritéria umožňují rozvíjet poznatky o příčinách procesu únavového poškození, avšak vyžadují větší rozsah zkoušek při kontinuálním záznamu průběhu závislosti napětí na deformaci, dále doplňující ultrazvukové zkoušky a mikroskopickou analýzu stavu poškození. [6]

3.2.1 Parametry únavové zkoušky

Na únavové vlastnosti kompozitních materiálů má vliv mnoho parametrů a pro měření co možná nej přesnějšího únavového chování je nezbytná důkladná příprava zkoušky. Při dynamickém zatížení se pro zjištění mezí namáhání používají dvě metody, vícestupňová a jednostupňová zkouška. Při vícestupňové zkoušce se zkušební těleso nejprve po určitou dobu zatíží na jistou hladinu deformace nebo napětí, při které v materiálu nedochází k tvorbě trhlin ani jiným změnám. Stanovené hodnoty značí stav bez poškození. Následně je hladina zatížení stupňovitě zvyšována až do doby, kdy je úroveň poškození zjistitelná. Opakem je jednostupňová zkouška nebo taky zkouška zvyšováním zatížení (po určitém, předem stanoveném počtu cyklů), kde se vyšetřuje hladina zatížení, při které se projeví změny v materiálu vyvolané únavovým procesem. [6]

Pro parametry únavové zkoušky se nejčastěji používají následující zkratky: [25]

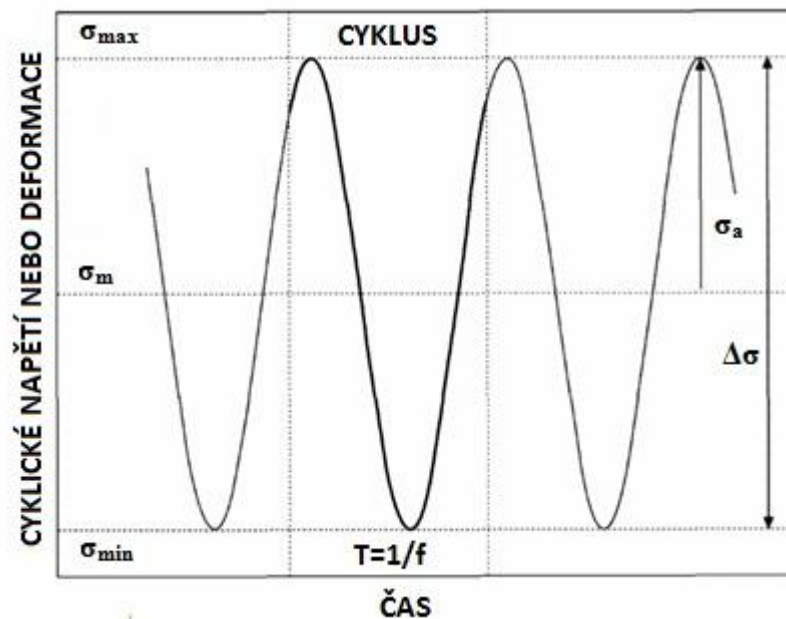
CA: konstantní amplituda zatížení;

$\sigma_{\max/\min}$ = maximální, nebo minimální napětí;

σ_m = střední hodnota napětí;

σ_a = amplituda napětí;

$\Delta\sigma$ = rozsah napětí.



Obr. 19. Základní terminologie sinusového průběhu. [25]

➤ Regulační režim

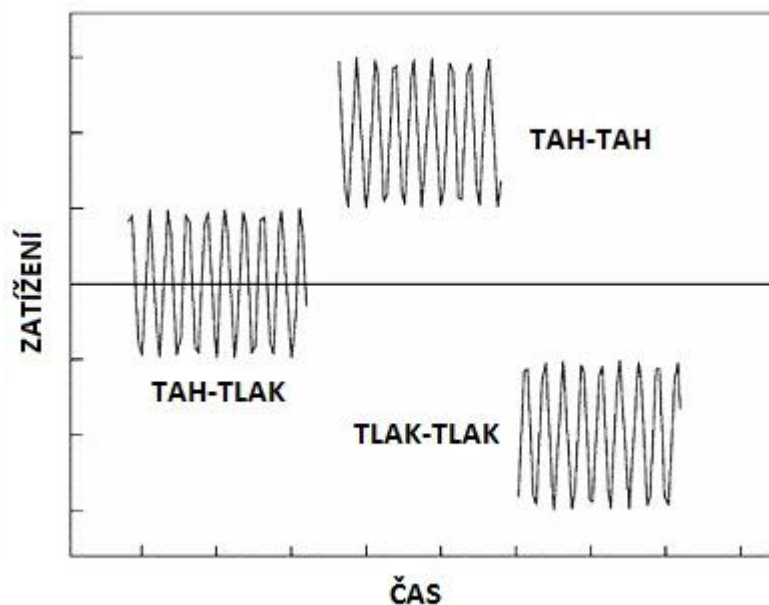
Únavová zkouška může být provedena při konstantním zatížení nebo při konstantním průhybu, v některých případech při konstantní deformaci. V prvním případě dojde k porušení materiálu po několika zatěžovacích cyklech. I když zkouška probíhá při konstantním zatížení, tak s rostoucím počtem cyklů se zvětšuje deformace v důsledku nahromaděných poruch v materiálu. Tento typ regulačního řízení je vhodný pro sestavení S-N diagramu a je nejpoužívanější pro testování únavy, zvláště nosných laminátů. Použitím režimu při konstantním průhybu nebo konstantní deformaci dochází k plynulejšímu růstu poruch, protože zatížení pozvolna klesá a tak nedochází k náhlému poškození. Je možné, že během zkoušky nedojde k destruktivnímu porušení vzorku, protože snížení tuhosti vede k poklesu zatížení. Z tohoto důvodu musí být stanoveny i ostatní kritéria selhání, která budou sloužit jako kritéria pro ukončení zkoušky, například pokles tuhosti nebo délka trhlin. Použití tohoto regulačního režimu je výhodné pro monitorování stabilního růstu trhlin nebo poklesu tuhosti během únavového procesu. [25]

➤ Poměr napětí

Typ působícího zatížení, ať už tahového, tlakového nebo dokonce kombinace obou, může být snadno stanoven pomocí poměru napětí R , což je poměr minimálního a maximálního cyklického zatížení působícího na materiál ($R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$). Reálně se tento poměr pro měření únavového chování volí v rozmezí od 0.1 do 0.8. Kompozitní materiály se chovají

odlišně pod tahovým a tlakovým namáháním, jelikož v každé z těchto oblastí zatížení vznikají odlišné mechanismy porušení. Zatímco při tahovém zatížení mají na únavové chování vliv především vyztužující vlákna, tak při tlakovém zatížení je významnější role matrice a vady v materiálu. Definuje tedy, v jaké oblasti zatížení se bude průběh zatěžovací křivky pohybovat: [25]

- T-T: tah-tah, platí když $0 \leq R < 1$;
- C-C: tlak-tlak, v případě kdy $1 < R < +\infty$;
- T-C nebo C-T: kombinace tahového a tlakového zatížení, platí když $-\infty < R < 0$;
- Zvláštní případ: $R = -1$, když amplituda tlakového zatížení je shodná s tahovou amplitudou zatížení a střední hodnota napětí se rovná nule.



Obr. 20. Oblasti zatížení během únavové zkoušky. [25]

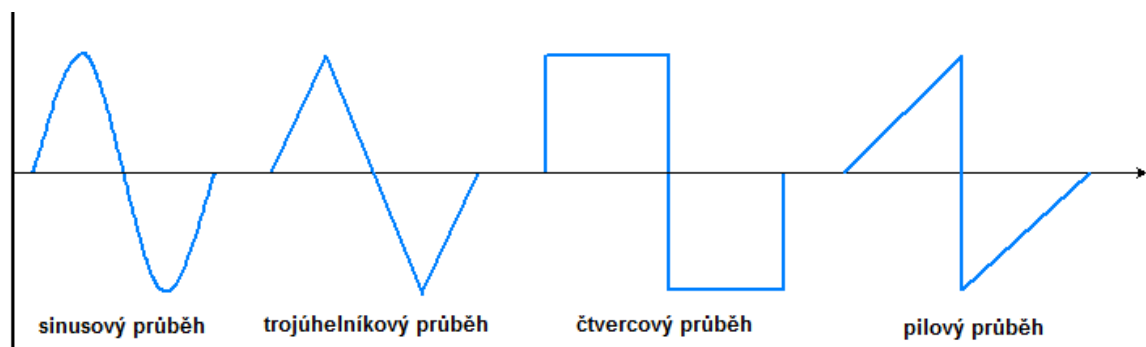
➤ Zkušební frekvence/deformační rychlost

Frekvence zkušebního zatížení je při testování únavy kompozitních materiálů omezujícím faktorem, jelikož v porovnání s kovovými materiály má značný vliv na únavovou životnost těchto materiálů. Označuje se písmenem f a uvádí se v Hertzech (Hz) nebo v počtu cyklů za sekundu. Při vyšší frekvenci dochází k ohřevu materiálu a při nižší k únavovému tečení, neboli creepu, popřípadě může dojít i k vzájemnému působení obou. Aby byl ohřev vzorku vyloučen, volí se frekvence zatížení v rozsahu 1 až 5 Hz u vyztužených termoplastů a 5 až 10 Hz u vyztužených reaktoplastů. Zkoušky únavového chování pro různé poměry

napětí, při různých deformačních rychlostech probíhají při konstantní frekvenci. Na druhé straně pro dosažení konstantní deformační rychlosti pro všechny hladiny cyklického namáhání se musí zvolit více zkušebních frekvencí. To znamená nižší frekvence pro nízké hladiny zatěžování a vyšší frekvence pro vysoké hladiny zatěžování. [25, 6]

➤ Průběh zatěžovací křivky

Tvar průběhu zatěžovací křivky může mít taky vliv na únavovou životnost materiálu. Při únavových zkouškách se používají sinusové, trojúhelníkové, krokové (čtvercové) a pilové průběhy zatěžování. Nejvíce používaný je sinusový průběh, neboť je snadno na stroji definovatelný a lze ho považovat za reálnější v porovnání s ostatními průběhy, u kterých probíhají náhlé změny. [25]



Obr. 21. Nejčastěji používané průběhy zatěžovací křivky.

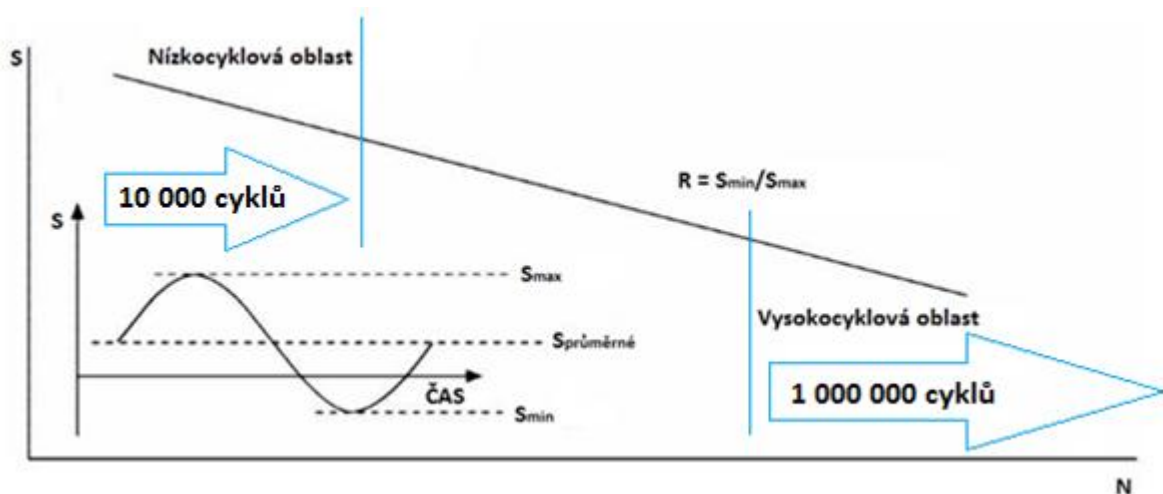
➤ Zkušební teplota

Během reálného zatížení je materiál vystaven kombinovanému termomechanickému zatížení, a proto znalosti o chování materiálu v těchto podmínkách jsou velmi důležité pro věrohodný průběh zkoušky. Obecně platí, že při vyšších zkušebních teplotách, zejména v oblasti teplot skelného přechodu matric kompozitních materiálů, dochází ke snížení únavové a statické pevnosti. Toto je velmi častý jev, i když obvykle odlišný pro různé typy kompozitů a závisí na druhu použité matrice, na orientaci vláken v laminátové struktuře a na geometrii zkušebního vzorku. [25]

3.3 S-N diagram

S-N diagram, označovaný taky jako Wöhlerova křivka, je i pro kompozity vyztužené vlákny nejčastěji používaný k popisu únavového chování. Parametr S může označovat cyklické zatížení, napětí a deformace (z každé z těchto skupin můžeme volit mezi amplitudou, střední hodnotou, maximální a minimální hodnotou zatížení nebo absolutní

hodnotou maximální a minimální). Obecný termín N obvykle vyjadřuje počet cyklů (v logaritmických souřadnicích) do selhání materiálu, ale může být taky použit pro indikaci počtu cyklů, při kterých dojde k předem definované změně tuhosti. Křivky $S-N$ jsou obvykle vyneseny pro konstantní hodnotu R , což je poměr mezi minimální a maximální hodnotou S a platí, že tlakové zatížení má zápornou hodnotu. Pro dynamicky zatížené části je lom, jakožto jediné kritérium únavy nedostatečný, jelikož většina vláknových kompozitů s rostoucí dobou zatížení a postupující únavou vykazuje pokles tuhosti. Tento pokles může být přípustný pro konstrukční prvky, u kterých se mohou měnit vlastnosti s počtem cyklů v daných mezích. Budeme-li považovat za kritérium únavy určitý pokles tuhosti (zpravidla o 10 nebo 20 %) a vyneseme-li tyto body do $S-N$ diagramu, získáme tak další informace o časovém průběhu únavy. Ke stanovení zbytkové pevnosti je zkušební těleso po určitém počtu cyklů zatížení podrobena statické zkoušce. [25, 6]



Obr. 22. $S-N$ diagram. [25]

V $S-N$ diagramu je možné osu životnosti rozdělit do tří oblastí: nízkocyklová (vysoké napětí a deformace), vysokocyklová (nízké napětí a deformace) a oblast mezi nimi. Odpovídající počet cyklů závisí na aplikaci materiálu, ale pro struktury, u kterých lze předpovídat vysoký počet cyklů během provozu, lze za nízkocyklovou únavu považovat oblast do 10000 cyklů a vysokocyklovou únavu za oblast začínající přibližně na 1 milionu cyklů. [25]

3.4 Testování únavy kompozitních sendvičových struktur

Během běžného provozu jsou sendvičové kompozitní struktury vystaveny dynamickému zatížení, které může způsobit vnitřní pnutí. Z tohoto důvodu je únavové chování sendvičových struktur důležité pro určení spolehlivosti a pro zajištění bezpečnosti během provozu. Únavová pevnost sendvičů při ohybovém zatížení závisí na pevnosti vnější krycí vrstvy, na typu jádra (na jeho smykové pevnosti a hustotě) a na pevnosti spojení mezi jednotlivými vrstvami. Selhání kterékoliv z těchto složek může vést k delaminaci a nebo jiné poruše, která vede k selhání celé sendvičové konstrukce. Únavové vlastnosti sendvičových konstrukcí dále ovlivňuje kvalita výrobního procesu, prostředí, ve kterém se sendvičová konstrukce vyskytuje (vlhkost, teplota) a v neposlední řadě uspořádání vláken ve vnějších krycích vrstvách sendvičové konstrukce. [26]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

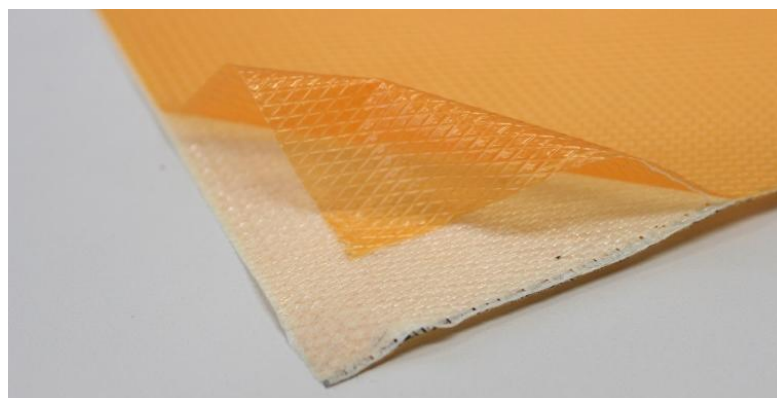
4 POPIS POUŽITÝCH MATERIÁLŮ

4.1 Vnější krycí vrstva sendvičové konstrukce

Vnější krycí vrstva sendvičové konstrukce určené pro testování únavového chování byla vyrobena z prepreg materiálu, který dodává švýcarská společnost Gurit pod obchodním označením PHG840-300-42. Vytuzující složkou tohoto prepregu je skelná tkanina, prosycená fenolickou pryskyřicí, u které probíhá vytvrzení při teplotě 120 – 160 °C. Fenolické pryskyřice patří mezi reaktivní pryskyřice, které se vyrábějí kondenzací fenolů a 30 až 50% vodných roztoků aldehydů (především formaldehydu). Fenolické pryskyřice jsou tvarově stálé a vysoce odolné vůči teplu a chemikáliím. Další jejich výhodou je příznivé chování při požáru, což je předurčuje pro použití v dopravních prostředcích. Vytvrzování může být prováděno například technologií lisování za tepla a lisování pomocí vakua v peci nebo v autoklávu při tlaku nejméně 0.07 MPa. Podrobněji jsou podmínky vytvrzování popsány v níže uvedené tabulce (Tab. 3). Uplatnění nachází jak v námořním a automobilovém průmyslu, tak především v železničních dopravních prostředcích pro aerodynamické kryty karoserie, rámy oken a pro stropní nebo podlahové panely, kde se využívá jejich následujících vlastností: [6, 27]

- výborné mechanické vlastnosti,
- dobrá kvalita výsledného povrchu,
- dlouhá skladovatelnost,
- odolnost proti ohni a proti šíření toxických zplodin během požáru.

Bližší specifikace vlastností je znázorněna v tabulce (Tab. 4) a v materiálovém listě, který je součástí přílohy [PŘÍLOHA PI].



Obr. 23. Prepreg materiál PHG840-300-42.

Tab. 3. Vytvrzovací podmínky prepregu PHG840-300-42. [27]

Parametr	Hodnota
Teplota [°C]	120/130/140/160
Doba vytvrzování [min]	90/60/30/10
Tlak [MPa]	0.07 – 0.4
Vyjmutí materiálu při teplotě [°C]	< 80 °C

Tab. 4. Vlastnosti prepregu PHG840-300-42. [27]

Parametr	Hodnota
Hmotnost prepregu [g/m ²]	525 ± 30
Pryskyřice	fenolická
Obsah pryskyřice [%]	42 ± 3 %
Výztuž	E-sklo
Hmotnost tkaniny [g/m ²]	296 ± 5 %
Druh vazby	atlasová
Provozní teplota (ve vytvrzeném stavu) [°C]	-55 až +80

4.2 Jádru sendvičové konstrukce

Pro jádra sendvičových konstrukcí byly vybrány tři různé materiály a to šestiúhelníková hliníková voština, již používaná pro aplikace v dopravním průmyslu, šestiúhelníková prototypová papírová voština a polymerní pěna z polyethylentereftalátu (PET).

4.2.1 Hliníkové voštinové jádro

Většina zkušebních těles byla vyrobena s voštinovým hliníkovým jádrem, legovaným mědí a manganem. Tato slitina je dodávána pod obchodním označením ECM 6.4 – 82 lucemburskou společností EURO-COMPOSITES. Ochranu proti korozi této voštiny zajišťuje vrstva oxidu zirkoničitého ZrO₂. Bližší specifikace a vlastnosti jsou uvedeny v materiálovém listu přiloženém v příloze [PŘÍLOHA PII] a tabulkách (Tab. 5, Tab. 6).

Tab. 5. Rozměry hliníkové voštiny ECM 6.4 – 82.

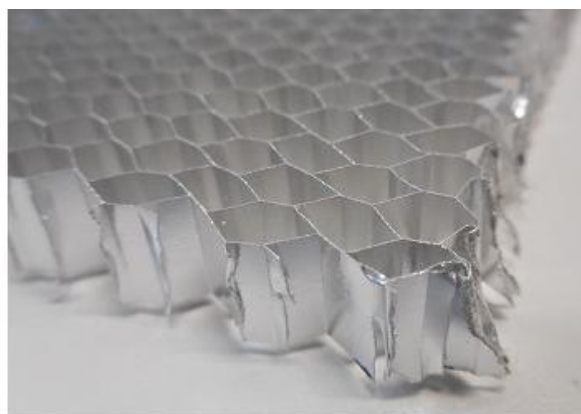
Parametr	Hodnota
Tloušťka hliníkové fólie [mm]	0.08
Velikost buňky [mm]	6.4
Výška voštiny [mm]	3, 7, 9, 16, 20

Tab. 6. Vlastnosti hliníkové voštiny ECM 6.4 – 82. [28]

Parametr	Hodnota
Hustota [kg/m^3]	82
Pevnost ve smyku (ve směru L) [MPa]	2.4
Smykový modul (ve směru L) [MPa]	430
Pevnost ve smyku (ve směru W) [MPa]	1.4
Smykový modul (ve směru W) [MPa]	220
Provozní teplota [$^{\circ}\text{C}$]	-55 až 177



A)



B)

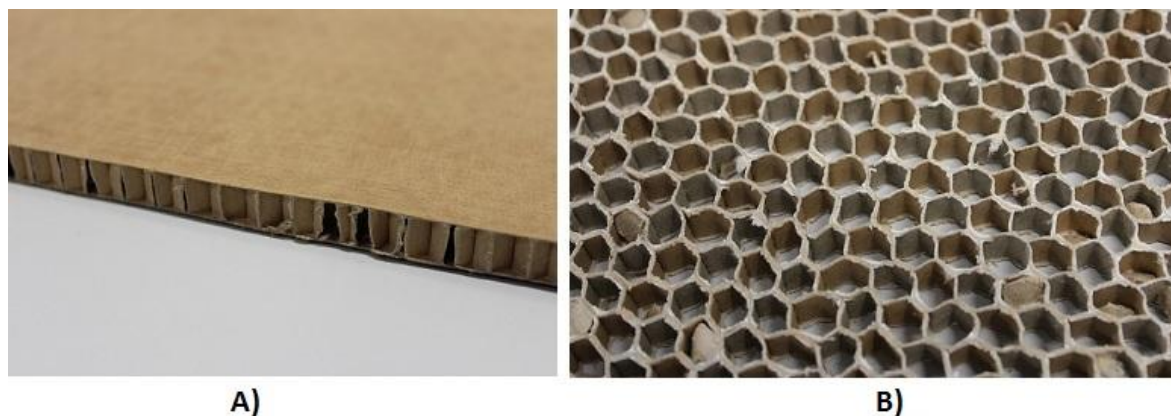
Obr. 24. Hliníková voština ECM 6.4 – 82 s tloušťkou jádra 3 mm (Obr. A) a s tloušťkou jádra 9 mm (Obr. B).

4.2.2 Papírové voštinové jádro

Druhý typ jádra sendvičové konstrukce byl vyroben z papírové šestiúhelníkové voštiny. Jednalo se o prototypovou voštinu vyrobenou společností Forlit, která sídlí v České republice a zabývá se výrobou papírových voštin pro různé aplikace. Na horní a spodní straně je voština opatřena papírovou krycí vrstvou, která brání mechanickému porušení voštiny. Rozměry buněk papírové voštiny jsou specifikovány v tabulce (Tab. 7).

Tab. 7. Rozměry buněk papírové voštiny.

Parametr	Hodnota
Tloušťka stěny buňky [mm]	0.1
Velikost buňky [mm]	8
Výška voštiny s krycí vrstvou [mm]	10
Výška voštiny bez krycí vrstvy [mm]	10.35



Obr. 25. Papírová voština s krycí vrstvou (obr. A); papírová voština se sejmutou krycí vrstvou (obr. B).

4.2.3 Polymerní PET pěna

Pro výrobu sendvičové konstrukce s polymerním pěnovým jádrem byla použita termoplastická konstrukční PET pěna s uzavřenými buňkami, kterou pod označením AIREX[®] T90 100 dodává švýcarská společnost Airex AG. Mezi její vlastnosti patří vynikající únavová pevnost a odolnost proti ohni, dlouhodobá tepelná stabilita až do teploty 100 °C, dobré termoizolační vlastnosti, dobrá přilnavost k vnější krycí vrstvě, odolnost proti nasákavosti vody a v neposlední řadě snadné použití se všemi typy pryskyřic a s výrobními laminovacími procesy jako je ruční laminování, lisování, vakuová infuze, lisování pomocí vakua a vysokotlaké vstřikování pryskyřice RTM. Pro svou vysokou odolnost proti ohni se s výhodou používá pro výrobu sendvičových struktur pro dopravní průmysl. Bližší specifikace materiálových vlastností je uvedena v tabulce (Tab. 8) a v materiálovém listě, který je součástí přílohy [PŘÍLOHA PIII]. [29]

Tab. 8. Vlastnosti polymerní PET pěny AIREX[®] T90 100. [29]

Parametr	Hodnota
Hustota [kg/m ³]	110
Pevnost v tlaku kolmo na rovinu [MPa]	1.4
Modul pružnosti v tlaku kolmo na rovinu [MPa]	85
Pevnost v tahu kolmo na rovinu [MPa]	2.2
Modul pružnosti v tahu kolmo na rovinu [MPa]	120
Pevnost ve smyku [MPa]	0.8
Modul pružnosti ve smyku [MPa]	20
Smykové prodloužení při přetržení [%]	10

Polymerní pěna AIREX[®] T90 100 nachází uplatnění v silničních a kolejových dopravních prostředcích, kde se používá pro podlahy, střechy, kryty motorů a interiérové díly, dále pak pro paluby a interiéry lodí, pro výrobu kontejnerů, střech, krytů a obkladů určených pro stavebnictví a průmysl. Tloušťka použité polymerní PET pěny byla 10 mm. [29]



Obr. 26. Polymerní PET pěna AIREX[®] T90 100.

5 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

5.1 Výroba zkušebních vzorků s papírovým a pěnovým PET jádrem

Zkušební tělesa pro testování únavového chování s papírovým voštinovým jádrem a polymerním pěnovým jádrem z PET byly vyrobeny technologií lisování za tepla v prostorách Laboratorního centra Fakulty technologické. Lisování probíhalo na vulkanizačním laboratorním lisu (Obr. 29), jehož technické údaje jsou blíže uvedeny v tabulce (Tab. 9).

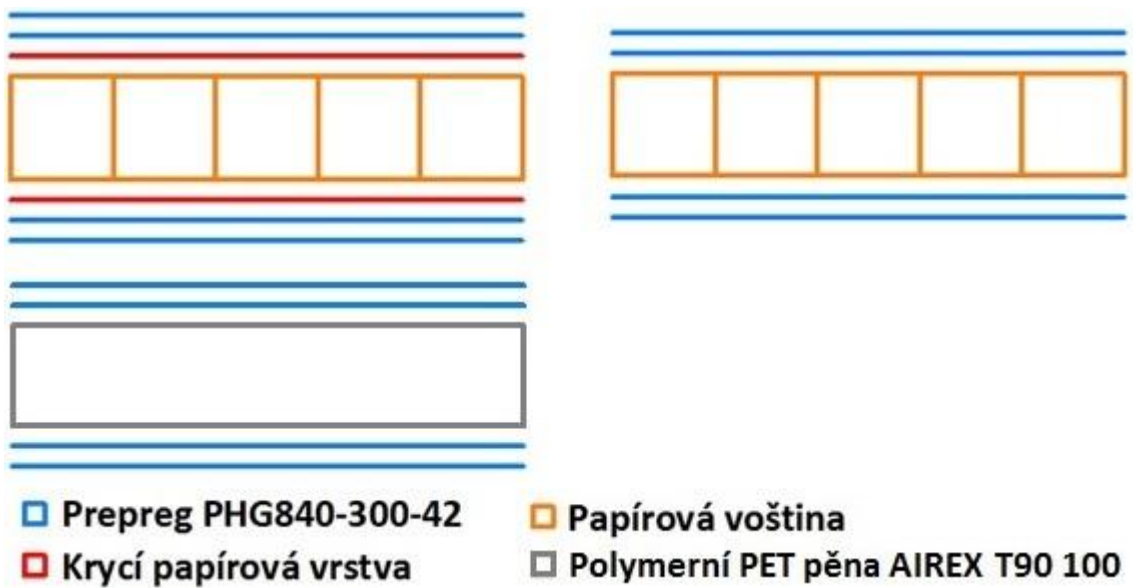
Tab. 9. Technické údaje laboratorního lisu.

Parametr	Hodnota
Rozměry desek [mm]	250 x 250
Příkon [W]	2400
Maximální teplota [°C]	200
Svírací síla [t]	5

Použité pomůcky a zařízení:

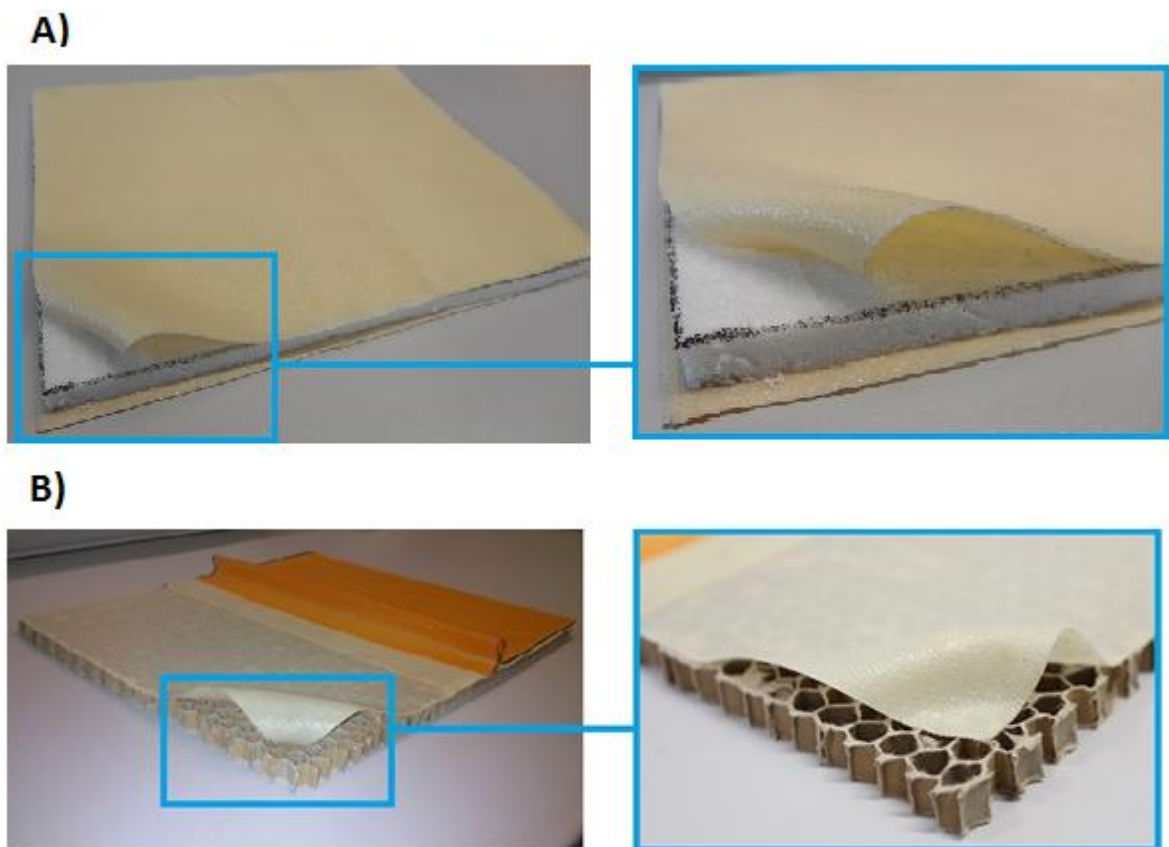
- laboratorní vulkanizační lis,
- ocelové lisovací desky,
- separační vosk,
- kotoučová pila,
- pilový kotouč pro sendvičové materiály,
- pomůcky pro přípravu polotovarů (žiletkový nůž, nůžky),
- ochranné pomůcky (rukavice, ochranný štít hlavy).

Papírová voština a polymerní PET pěna dodaná ve formě desky byla nejprve nařezána žiletkovým nožem na rozměry ocelových desek určených pro lisování. Pro jednu sérii zkušebních těles byla z papírových voštin sejmuta krycí papírová vrstva. Na části těles byla tato krycí vrstva ponechána a došlo pouze k zdrsnění této vrstvy smirkovým papírem pro lepší adhezi s prepreg materiálem. Vnější krycí vrstvu sendvičové konstrukce tvořily dvě vrstvy fenolického prepreg materiálu se skelnou tkaninou PHG840-300-42. Prepreg materiál bylo nutné před zpracováním vyjmout z mrazicího boxu a ponechat samovolně vytemperovat na pokojovou teplotu. Skladba sendvičových konstrukcí je znázorněna na obrázku (Obr. 27).



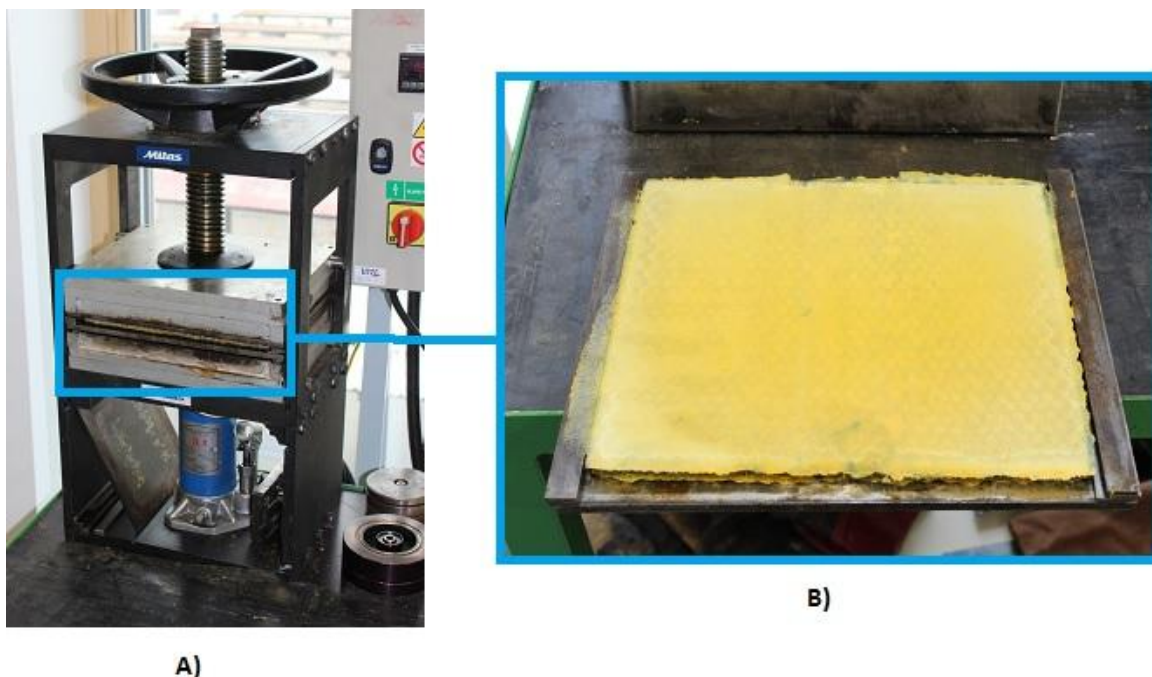
Obr. 27. Materiálová skladba sendvičové konstrukce s papírovým jádrem.

Po důkladném očištění papírové voštiny od zbytků krycí papírové vrstvy, popřípadě po zdrsnění této vrstvy, byl nastříhán prepreg materiál na požadovaný rozměr nůžkami. Z takto připraveného prepregu byl sejmut ochranný obal a následovalo kladení jednotlivých vrstev na papírovou voštinu a polymerní PET pěnu (Obr. 28).



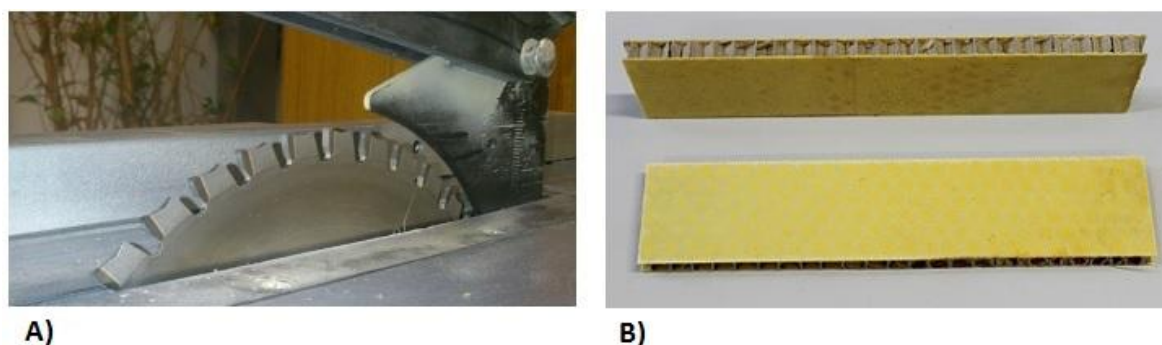
Obr. 28. Kladení prepregu na PET pěnu (Obr. A) a papírovou voštinu (Obr. B).

Před samotným lisováním bylo nutné na povrch ocelových desek nanést vrstvu separačního vosku, která usnadňuje oddělení vytvrzené sendvičové desky od povrchu ocelových desek. Voskem naseparované desky se nechaly vytemperovat v laboratorním lisu na vytvrzovací teplotu 160 °C. Po vytemperování se mezi desky vložila připravená sendvičová konstrukce a následně došlo k zalisování. Doba vytvrzování v lisu byla podle materiálového listu prepregu PHG840-300-42 stanovena na 10 minut.



Obr. 29. Laboratorní lis (Obr. A); vytvrzená sendvičová konstrukce s papírovým voštinovým jádrem (Obr. B).

Z takto připravených sendvičových desek byly v prostorách dílen Ústavu výrobního inženýrství nařezány zkušební tělesa na požadovaný rozměr pro statickou zkoušku tříbodovým ohybem a pro cyklickou únavovou zkoušku. Pro řezání byla použita kotoučová pila s kotoučem určeným pro řezání sendvičových konstrukcí.

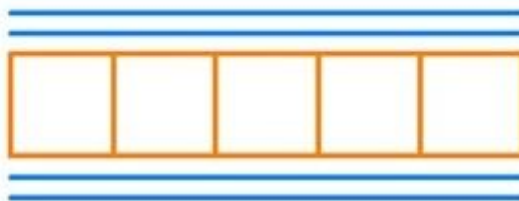


Obr. 30. Pilový kotouč (Obr. A); zkušební těleso s papírovým jádrem (Obr. B).

5.2 Výroba zkušebních vzorků s hliníkovým jádrem

Výroba vzorků probíhala ve společnosti FORM s.r.o. sídlící v obci Horní Lideč. Společnost FORM se zabývá výrobou nejen z kompozitních materiálů, ale taky z termoplastů. Jejich výrobky nacházejí uplatnění především v automobilovém a dopravním průmyslu, dále pak ve stavebnictví, v lékařství a zemědělské technice.

Zkušební tělesa s vnější krycí vrstvou z prepreg materiálu se skelnou tkaninou a hliníkovým voštinovým jádrem o tloušťce 3, 7, 9, 16 a 20 mm byly vyrobeny technologií lisování pomocí vakua, která je podrobněji popsána v kapitole 1.2 Výroba sendvičových konstrukcí. Materiálová skladba sendvičové konstrukce s hliníkovým voštinovým jádrem je znázorněna na následujícím obrázku (Obr. 31).



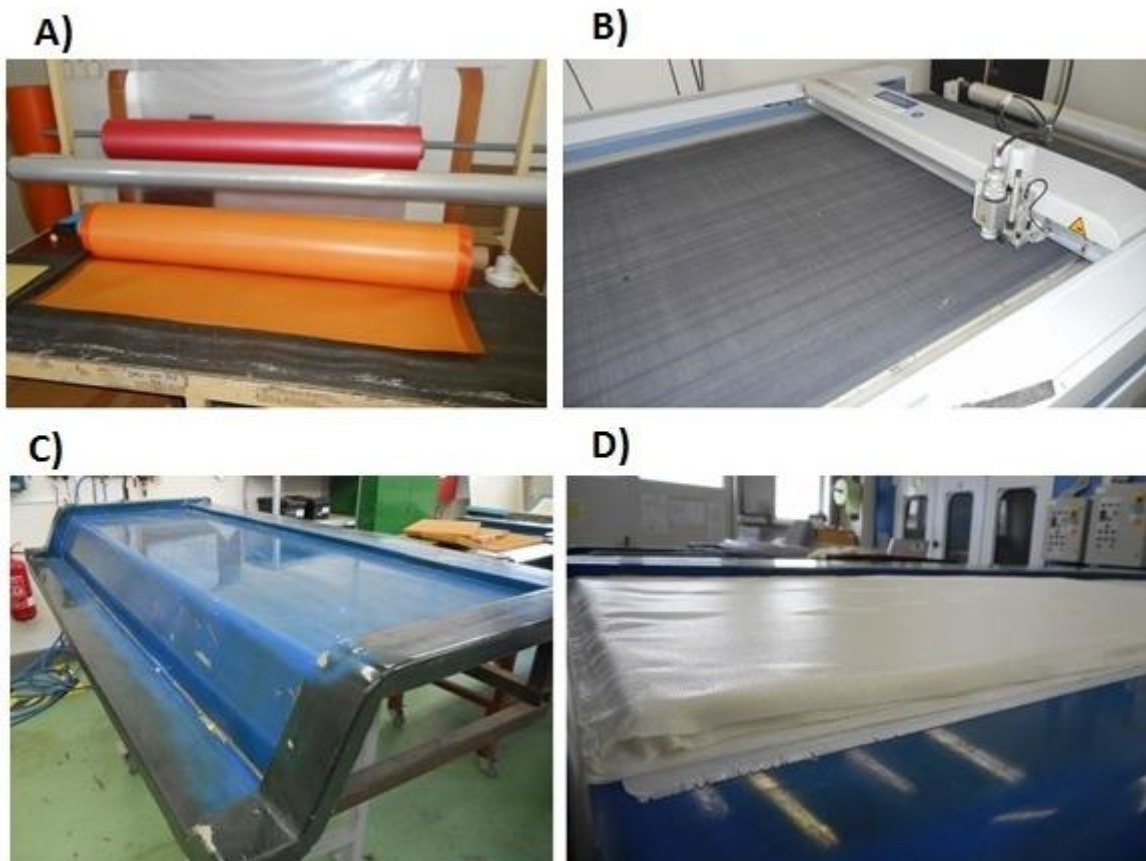
- **Prepreg PHG840-300-42**
- **Hliníkové voštinové jádro ECM 6,4 – 82**

Obr. 31. Materiálová skladba sendvičové konstrukce s hliníkovým jádrem.

Použité pomůcky a zařízení:

- řezací plotr Zünd M1600,
- forma pro rovinné desky,
- separační vosk,
- separační tkanina,
- odsávací tkanina,
- oboustranná těsnicí páska,
- vakuovací folie,
- zařízení pro vyvození podtlaku,
- pomůcky pro vytvoření a kontrolu vakua (spojky, budík pro kontrolu podtlaku),
- vytvrzovací pec,
- ochranné pomůcky (rukavice).

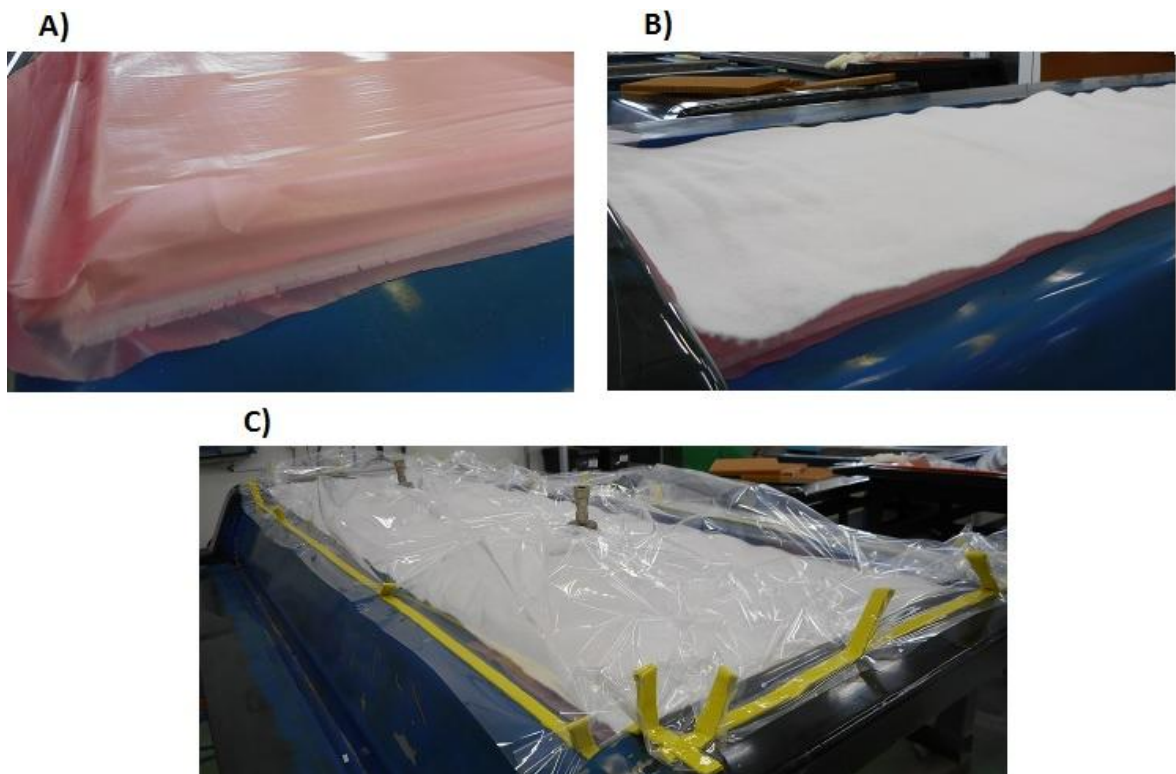
V prvním kroku výroby byl prepreg materiál vytemperovaný na pokojovou teplotu a nařezán na požadované rozměry pomocí řezacího plotru Zünd M1600 o rozměrech pracovní plochy 1300 x 1600 mm. Před kladením jednotlivých vrstev na formu bylo nutné povrch formy opatřit vrstvou separačního vosku, zajišťující snadné odformování výrobku. Na takto upravenou formu byly následně kladeny jednotlivé vrstvy sendvičové konstrukce podle materiálové skladby uvedené na obrázku (Obr. 31).



Obr. 32. Návin prepregu v ochranném obalu (Obr. A); řezací plotr (Obr. B); forma opatřená vrstvou separačního vosku (Obr. C); kladení jednotlivých vrstev sendvičové konstrukce (Obr. D).

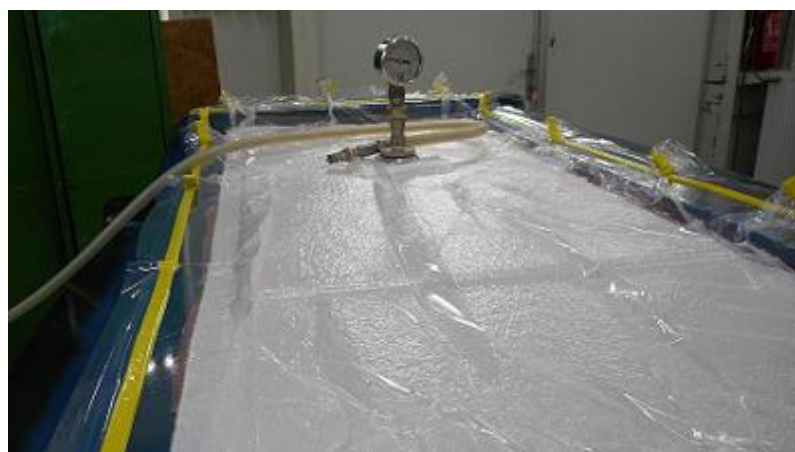
Po položení poslední vrstvy prepreg materiálu byly přichystány pomocné technologické materiály. První položenou tkaninou byla separační tkanina, která zajišťuje vyjmutí výrobku a odděluje pomocné technologické tkaniny od výrobku. Na separační tkaninu byla položena odsávací tkanina, přes kterou se odsává vzduch z uzavřeného systému a také slouží k absorpci přebytečné pryskyřice. Posledním pomocným materiálem byla fólie pro vytvoření vakuu, která nahrazuje horní díl formy. Po obvodu vakuovací fólie byla nalepena oboustranná páska, která vytvořila vzduchotěsný spoj mezi formou a vakuovací fólií. Po

připojení hadic, určených pro evakuaci vzduchu z uzavřeného systému, byly na vakuovací fólii umístěny rychlospojky pro vzduchové hadice (Obr. 33).



Obr. 33. Separáčnı́ tkanina (Obr. A); odsávacı́ tkanina (Obr. B); vakuovacı́ fólie, utěsněná oboustrannou páskou a spojky pro připojení hadic (Obr. C).

V posledním kroku výroby byl připravený vakuovací systém připojen prostřednictvím spojek k zařízení pro vyvození podtlaku. Po odsátı́ vzduchu a přetěsnění míst, z kterých vzduch unikal, byla provedena kontrola pomocí připojeného budı́ku určeného pro kontrolu podtlaku. Hodnota podtlaku byla 0.78 bar, což je pro technologickou operaci lisování pomocí vakua dostačující.



Obr. 34. Zavakuovaná forma a budı́k pro kontrolu podtlaku.

Takto zavakuovaná forma se sendvičovou konstrukcí byla umístěna do vytvrzovací pece vytemperované na teplotu 130 °C, kdy hodinu dochází k temperaci formy spolu s materiálem na vytvrzovací teplotu, na které pak následně dochází po dobu 2 hodin k vytvrzování. Na rozměr zkušebních těles pro testování byly vyrobené sendvičové desky nařezány pomocí technologie řezání vodním paprskem.

Řezání vodním paprskem, někdy označované jako hydrodynamické obrábění, se řadí mezi nekonvenční technologie a je vhodné pro řezání různých materiálů. Řezným nástrojem je paprsek vody o vysokém tlaku a rychlosti. Pro řezání se v praxi nejčastěji používá čistý vodní paprsek, určený pro řezání nekovových materiálů, jako jsou třeba lamináty anebo vodní paprsek s abrazivní příměsí, který se používá pro řezání velmi tvrdých materiálů jako titan, kobalt nebo slinuté karbidy. [30]

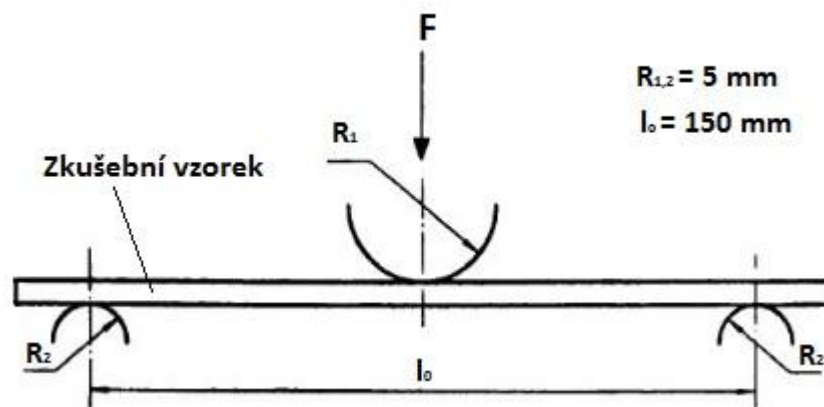
6 MECHANICKÉ TESTOVÁNÍ TĚLES

6.1 Statická zkouška ohybem

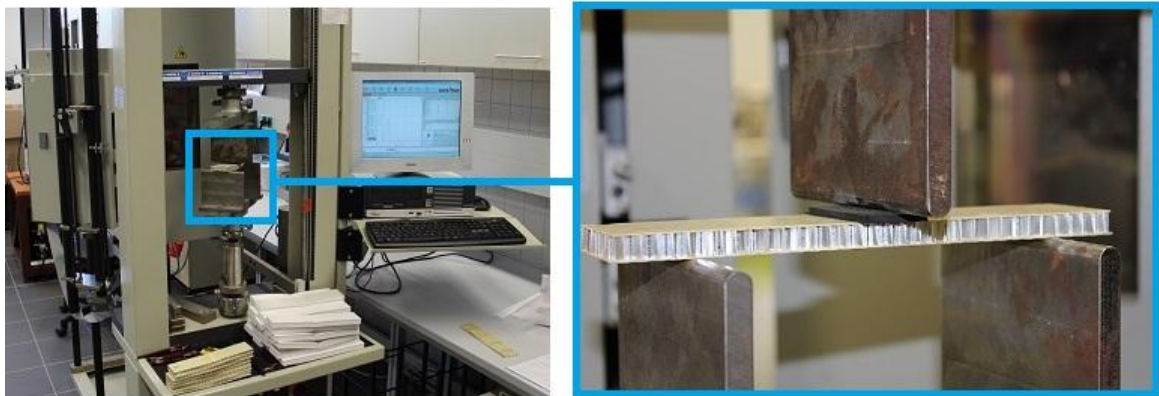
Zkušební tělesa byla nejprve testována statickým tříbodovým ohybem, z kterého byly získány potřebné materiálové charakteristiky, především efektivní modul pružnosti a maximální ohybová síla jednotlivých sendvičových struktur. Měření probíhalo v Laboratorním centru Fakulty technologické na zkušebním stroji ZWICK 1456, určeném pro statické a dynamické (nízkocyklové) zkoušky v tahu, tlaku, ohybu, smyku a pro creepové zkoušky. Součástí přístroje ZWICK 1456 je taky teplotní komora, umožňující testování při snížených nebo zvýšených teplotách. Zkušební stroj je propojen s počítačem, který zaznamenává měřená data a vyhodnocuje je pomocí programu Test Expert Standart. Statická zkouška probíhala podle americké technické normy ASTM C393, která popisuje zkušební metody pro testování smykových vlastností jádra sendvičových konstrukcí při ohybovém zatížení. Podle této normy byla pro optimální rozložení působícího napětí použita pryžová podložka obdélníkového průřezu s předepsanou tvrdostí, která byla vložena mezi zatěžovací trn a zkušební těleso. Rozteč mezi podpěrami byla nastavena na 150 mm a zaoblení podpěr bylo 5 mm (Obr. 35). [31]

Tab. 10. Parametry zkušebního stroje ZWICK 1456.

Parametr	Hodnota
Maximální posuv příčnicku [mm/min]	800
Snímače síly [kN]	2.5 a 20
Teplotní komora [°C]	-80 až +250



Obr. 35. Schéma zkoušky tříbodovým ohybem.[32]



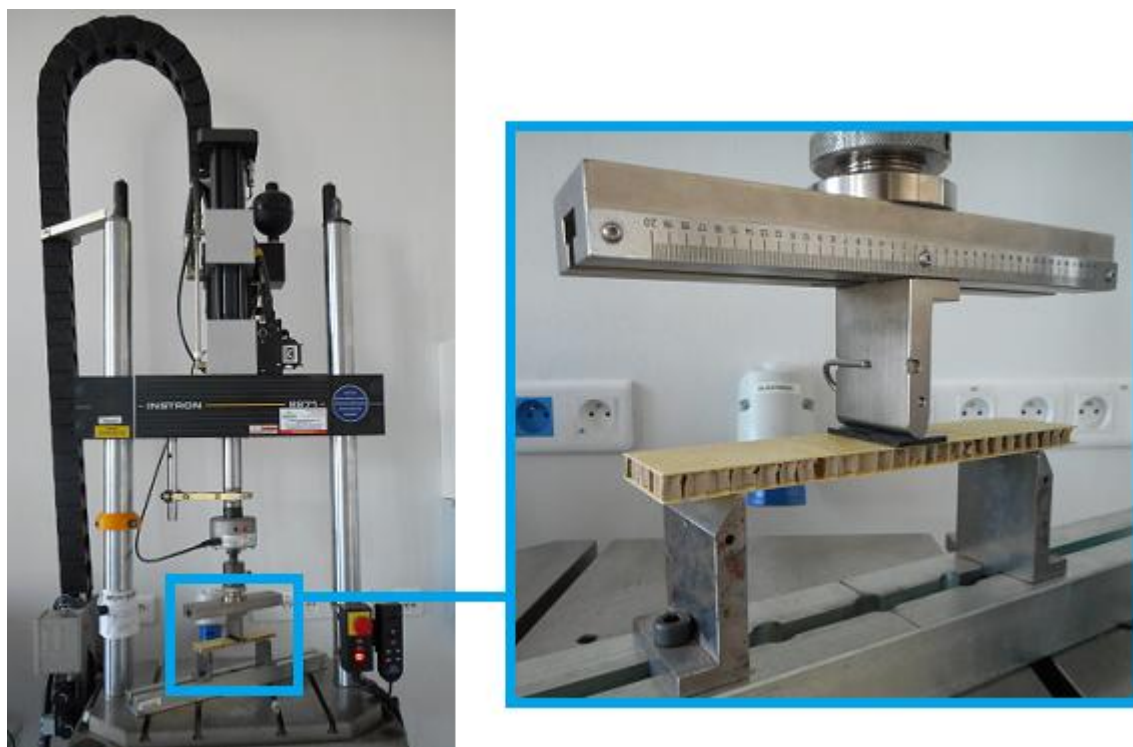
Obr. 36. Zkušební stroj ZWICK 1456 a uspořádání zkoušky tříbodovým ohybem.

6.2 Únavová cyklická zkouška

Únavové chování vrstvených sendvičových konstrukcí bylo testováno při dynamickém cyklickém zatížení v laboratoři Centra polymerních systémů Univerzity Tomáše Bati. Zkoušení probíhalo na servohydraulickém univerzálním zkušebním stroji INSTRON 8871. Tento zkušební přístroj je určený pro cyklické testování únavového chování, dále pro creepové zkoušky a statické zkoušky. Základna stroje je opatřena T drážkou, která umožňuje upnutí již vyrobených komponentů, určených pro testování. Únavové chování testovaných sendvičových konstrukcí bylo prováděno cyklickým ohybovým zatížením při tříbodovém uspořádání. Rozteč mezi podpěrami byla shodná s uspořádáním při statické zkoušce tříbodovým ohybem (Obr. 35). Pro optimální rozložení napětí byla opět použita pryžová podložka obdélníkového průřezu.

Před zkouškou bylo nutné stanovit velikost maximálního zkušebního zatížení, to bylo zvoleno na základě výsledku statické zkoušky ohybem a určilo se jako 60 a 80 % maximální ohybové síly $F_{o_{max}}$. Následně byla stanovena amplituda zatěžování F_a , a tudíž velikost střední hodnoty zatížení F_{mean} . Po nastavení dalších parametrů únavové zkoušky byla tělesa testována předem definovaným počtem cyklů. Dosažením počtu těchto cyklů byla zkouška ukončena. U zkušebních sendvičových konstrukcí s hliníkovým jádrem byl tento počet cyklů 2500, 5000 a 10000. V případě těles s pěnovým PET jádrem byl počet cyklů ukončující zkoušku rovněž 2500, 5000, 10000 a navíc 15000 cyklů. U sendvičových konstrukcí s hliníkovým a pěnovým jádrem nedošlo k viditelnému porušení a tak byly tyto zkušební tělesa opět otestována statickou zkouškou tříbodovým ohybem a výsledky zkoušky byly porovnány s výsledky zjištěnými ze statické zkoušky, provedené před

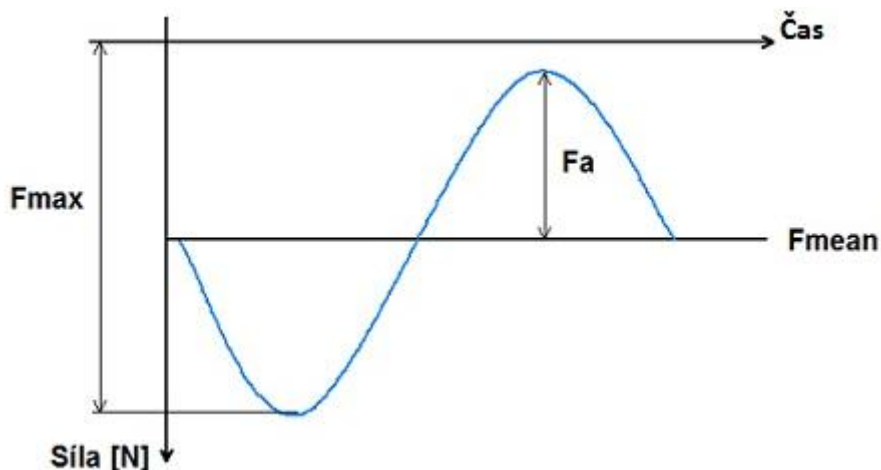
únavovou cyklickou zkouškou. U sendvičových konstrukcí s papírovým voštinovým jádrem byl sledován počet cyklů, při kterém došlo k porušení zkušebního tělesa.



Obr. 37. Zkušební stroj INSTRON 8871 a detail uspořádání zkoušky.

6.2.1 Parametry cyklické zkoušky

- *Oblast zatížení:* tlak
- *Zkušební frekvence:* f [Hz]
- *Průběh zatěžovací křivky:* sinusový
- *Maximální velikost ohybové síly při statické zkoušce:* $F_{0\max}$ [N]
- *80 % maximální ohybové síly = 80 % $F_{0\max}$ [N]*
- *60 % maximální ohybové síly = 60 % $F_{0\max}$ [N]*
- *Maximální velikost zkušebního zatížení:* F_{\max} [N]
- *Amplituda zatížení:* F_a [N]
- *Střední hodnota zatížení při 80 % maximální ohybové síly:* $F_{\text{mean}80\%}$ [N]
- *Střední hodnota zatížení při 60 % maximální ohybové síly:* $F_{\text{mean}60\%}$ [N]
- *Počet zatěžovacích cyklů:* 2500, 5000, 10 000, 15 000



Obr. 38. Parametry cyklické zkoušky.

➤ Parametry zkoušky pro zkušební vzorky s hliníkovým voštinovým jádrem

Tab. 11. Parametry zkoušky pro hliníkové voštinové jádro.

	Tloušťka hliníkového voštinového jádra				
	3 mm	7 mm	9 mm	16 mm	20 mm
Frekvence f [Hz]	3	3	3	3	3
F_{0max} [N]	470.9	796	1045.4	1616	1342
80 % F_{0max} [N]	376.8	636.8	836.3	1292	1074
60 % F_{0max} [N]	282.6	477.6	627.2	969.6	805
F_a [N]	100	200	200	300	300
F_{mean80%} [N]	276.8	436.8	636.3	992	774
F_{mean60%} [N]	182.6	277.6	427.2	669.6	505

➤ Parametry zkoušky pro zkušební vzorky s papírovým jádrem a pěnovým jádrem

Tab. 12. Parametry zkoušky pro papírové jádro a polymerní PET jádro.

	Papírové jádro	Pěnové PET jádro
	Tloušťka jádra 10 mm	
Frekvence f [Hz]	3	3
F_{0max} [N]	339.4	513
80 % F_{0max} [N]	271	410
F_a [N]	50	100
F_{mean80%} [N]	221	310

7 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Pro studium únavového chování vrstvených sendvičových konstrukcí byly porovnány výsledky statické zkoušky třibodovým ohybem provedené před a po cyklické únavové zkoušce, popřípadě byl stanoven počet cyklů, při kterém došlo k porušení zkušební tělesa v průběhu cyklické zkoušky. Během statické zkoušky ohybem se také zaznamenávaly vzniklé poruchy sendvičové konstrukce. Pro porovnání změn mechanických vlastností byly zjištěny následující materiálové charakteristiky:

- Efektivní modul pružnosti $E_{ef}[MPa]$
 - Statickou zkouškou stanovený modul pružnosti. Čím vyšší je tento modul, tím méně a neochotněji se materiál deformuje.
- Maximální ohybová síla $F_{Omax}[N]$
 - Maximální síla, které během ohybové zkoušky odolává zkušební těleso a kdy po jejím překročení dojde k některému typu poškození.
- Průhyb $y[mm]$
 - Vzdálenost, o kterou byla během zkoušky prohnuta vrchní nebo spodní plocha zkušební tělesa uprostřed mezi podpěrami vzhledem ke své původní pozici.

Z výše uvedených hodnot byl vypočítán aritmetický průměr označovaný jako \bar{x} a pro vyjádření odchylek naměřených hodnot od aritmetického průměru byl použit odhad směrodatné odchylky, který se značí písmenem s .

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

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

7.1 Sendvičové konstrukce s hliníkovým voštinovým jádrem

Zkušební vzorky sendvičové konstrukce s hliníkovým voštinovým jádrem byly po cyklické zkoušce opět testovány statickým třibodovým ohybem, protože u většiny vzorků ani po 10 000 cyklech nedošlo k selhání. Po provedení statické ohybové zkoušky byly výsledky zpracovány pomocí tabulkového procesoru Microsoft Excel 2013, vyneseny do grafů a porovnány s hodnotami získanými ohybovou zkouškou provedenou před cyklováním.

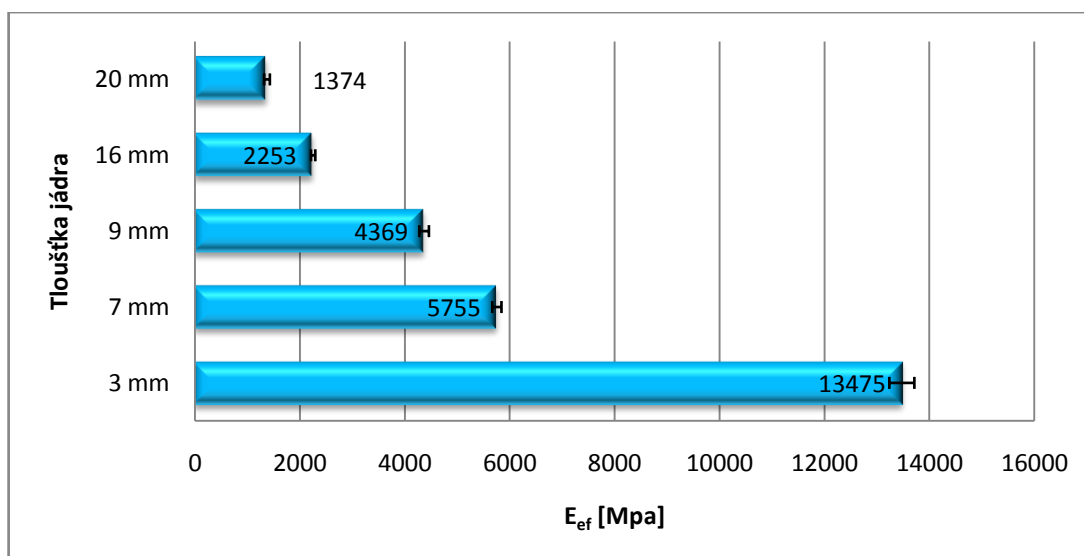
7.1.1 Výsledky statické zkoušky cyklicky nezatížených zkušebních těles

➤ Efektivní modul pružnosti E_{ef} [MPa] hliníkového jádra

Tab. 13. Efektivní modul pružnosti cyklicky nezatíženého hliníkového jádra.

Efektivní modul pružnosti E_{ef} pro tloušťku jádra					
Měření	3 mm	7 mm	9 mm	16 mm	20 mm
1.	13900	5790	4480	2240	1340
2.	13700	5700	4490	2300	1380
3.	13600	5630	4260	2270	1360
4.	13300	5740	4390	2310	1380
5.	13100	5950	4440	2230	1450
6.	13400	5740	4350	2260	1300
7.	13500	5710	4300	2170	1460
8.	13300	5780	4240	2240	1320
\bar{x}	13475	5755	4369	2253	1374
s	238	87	91	41	54

Z naměřených dat vyplývá, že nejvyšší hodnoty efektivního modulu pružnosti dosahují hliníková voštinová jádra s tloušťkou 3 mm. Jak jde vidět na obrázku (Obr. 39), efektivní modul pružnosti s rostoucí tloušťkou jádra klesá. Zvýšení tloušťky jádra o 4 mm na hodnotu 7 mm způsobilo snížení efektivního modulu pružnosti o 57 %. Nejnižší hodnoty efektivního modulu pružnosti dosáhla jádra s tloušťkou 20 mm, u kterých došlo v porovnání s jádrem o tloušťce 3 mm k poklesu efektivního modulu pružnosti o 90 %.



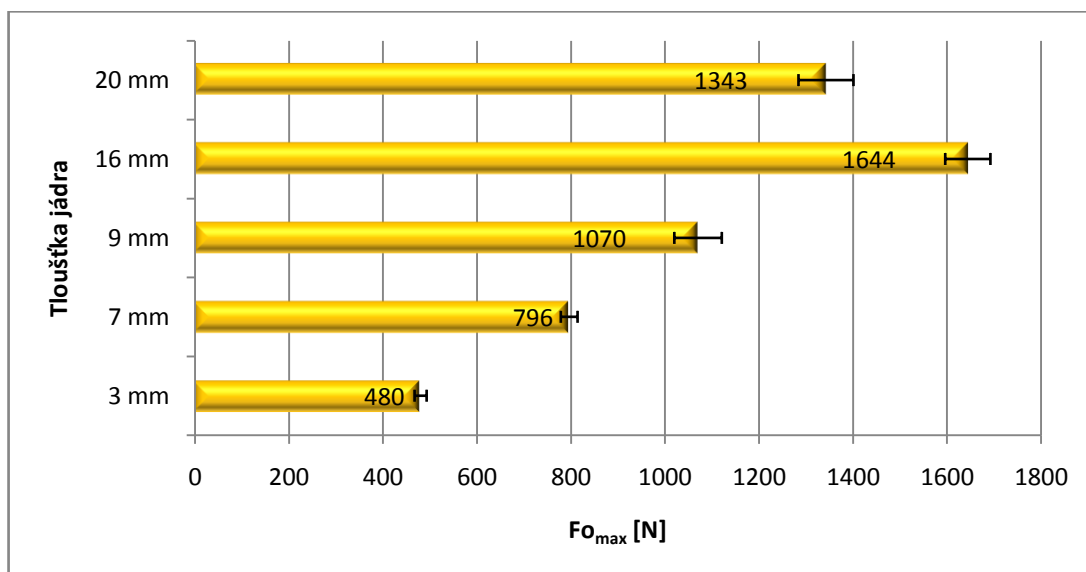
Obr. 39. Efektivní modul pružnosti cyklicky nezatíženého hliníkového voštinového jádra.

➤ Maximální ohybová síla $F_{o_{max}}$ [N]

Tab. 14. Maximální ohybová síla před cyklickou zkouškou.

Maximální ohybová síla $F_{o_{max}}$ pro tloušťku jádra					
Měření	3 mm	7 mm	9 mm	16 mm	20 mm
1.	474	787	1020	1700	1370
2.	-	788	1090	1660	1380
3.	459	803	1060	1580	1250
4.	489	785	1070	1710	1390
5.	474	764	1010	1660	1440
6.	500	804	1110	1610	1310
7.	474	823	1030	-	1290
8.	491	816	1173	1590	1310
\bar{x}	480	796	1070	1644	1343
s	13	18	51	48	58

Pro porušení zkušební tělesa během statické zkoušky tříbodovým ohybem bylo potřeba nejvyšší ohybové síly u zkušební tělesa s hliníkovým jádrem o tloušťce 16 mm. Pevnost klesala se snižující se tloušťkou jádra, ale taky došlo k mírnému poklesu u zkušební tělesa o tloušťce jádra 20 mm. V případě zkušební tělesa s tloušťkou jádra 3 mm, došlo k poklesu maximální ohybové síly o 71 % v porovnání s jádrem o tloušťce 16 mm, u kterého byla zaznamenána nejvyšší hodnota ohybové síly. U jádra s tloušťkou 7 mm došlo ve srovnání s jádrem o tloušťce 3 mm k navýšení maximální ohybové síly o 66 %. Další hodnoty jsou porovnány na následujícím obrázku (Obr. 40).



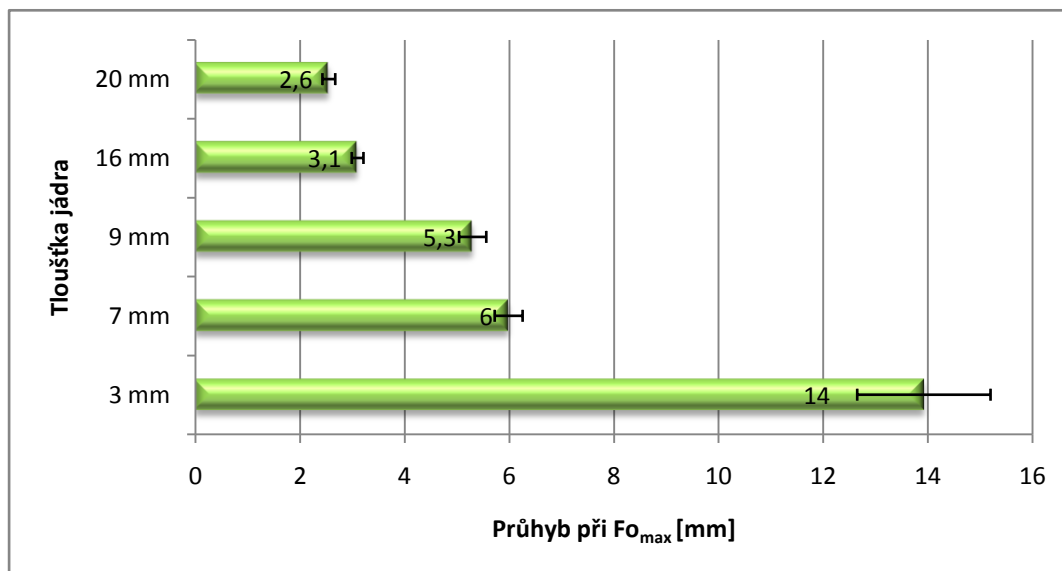
Obr. 40. Maximální ohybová síla cyklicky nezatížených těles.

➤ Průhyb y [mm]

Tab. 15. Maximální průhyb cyklicky nezatížených zkušebních těles.

Maximální průhyb při $F_{o_{max}}$ pro tloušťku jádra					
Měření	3 mm	7 mm	9 mm	16 mm	20 mm
1.	13.4	5.8	5	3.3	2.6
2.	11.1	6.1	5.4	3.1	2.5
3.	13.2	6.3	5.4	3.1	2.3
4.	15.3	5.9	5.5	3.2	2.7
5.	14.7	5.4	5	3.1	2.7
6.	14.9	6.1	5.8	3.1	2.5
7.	14	6.2	5.2	2.9	2.6
8.	14.8	6.1	5.1	3	2.5
\bar{x}	14	6	5.3	3.1	2.6
s	1	0.3	0.3	0.1	0.1

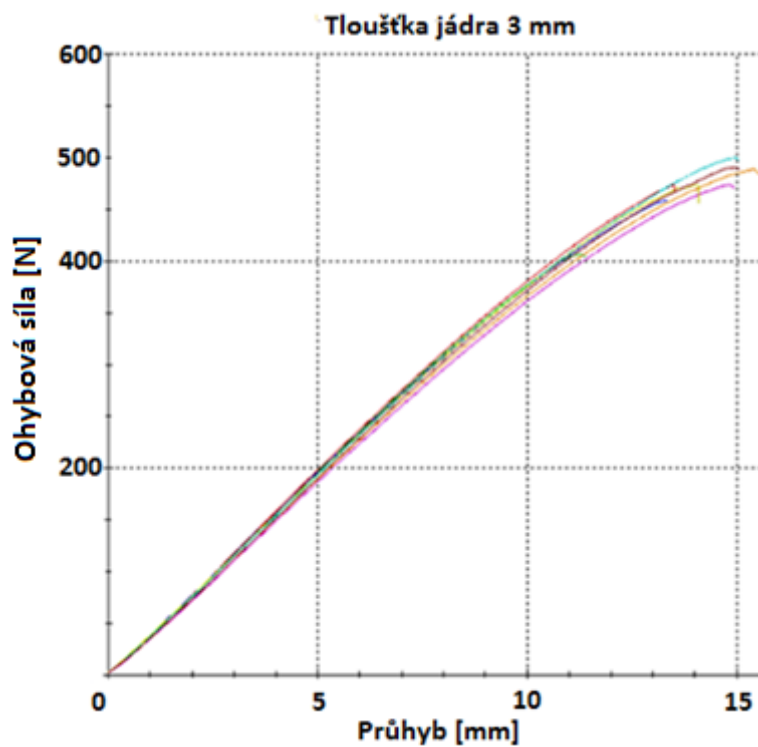
K největší deformaci během zkoušky třibodovým ohybem došlo u zkušebních těles s hliníkovým jádrem o tloušťce 3 mm. Při zvětšení tloušťky jádra o 17 mm se průhyb snížil o 11.4 mm, což odpovídá poklesu hodnoty průhybu o 81 %. Jádro tloušťky 7 mm vykazovalo pokles maximálního průhybu o 57 % (Obr. 41).



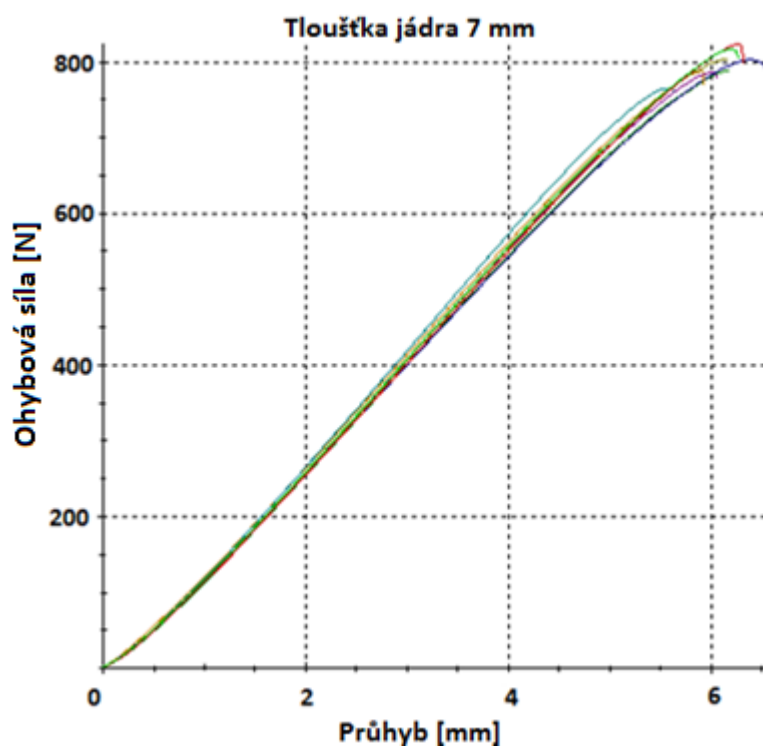
Obr. 41. Maximální průhyb při maximální ohybové síle.

Následující série obrázků (Obr. 42 – 46) znázorňuje jednotlivé průběhy závislosti ohybové síly na deformaci neboli průhybu. Jak je z obrázků patrné, mění se strmost průběhu, což je spojené s poklesem efektivního modulu pružnosti. U Obr. 46 je znatelný odlišný průběh

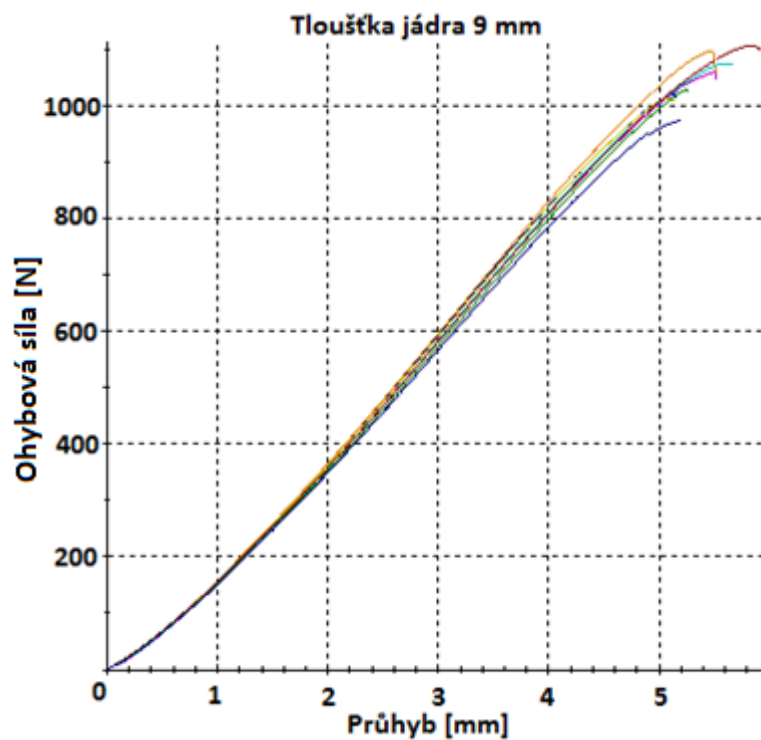
závislosti, jelikož nedochází ke křehkému lomu, ale k lokální poruše s postupnou, dále probíhající deformací jádra.



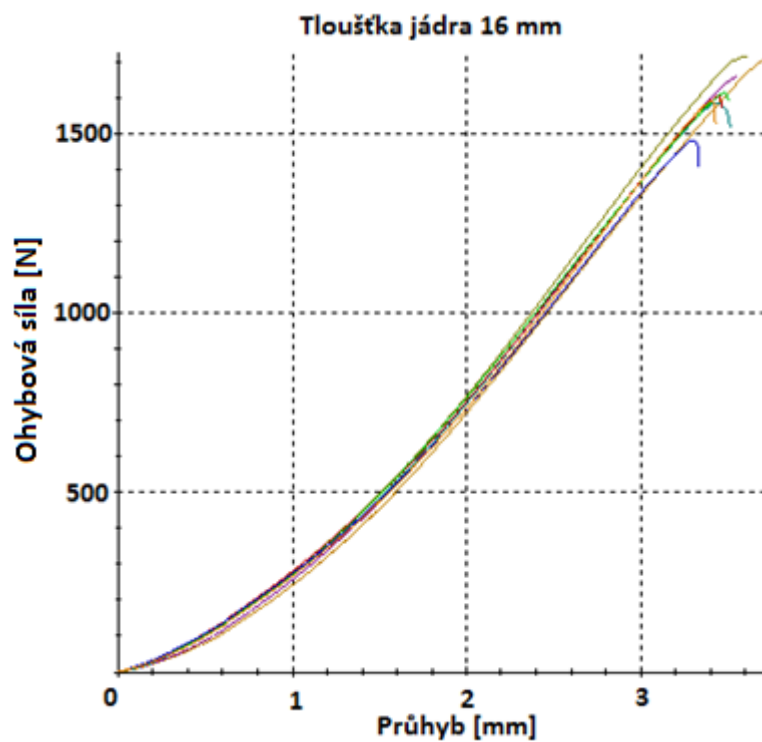
Obr. 42. Závislost $F_{o_{max}}$ na průhybu pro tloušťku jádra 3 mm.



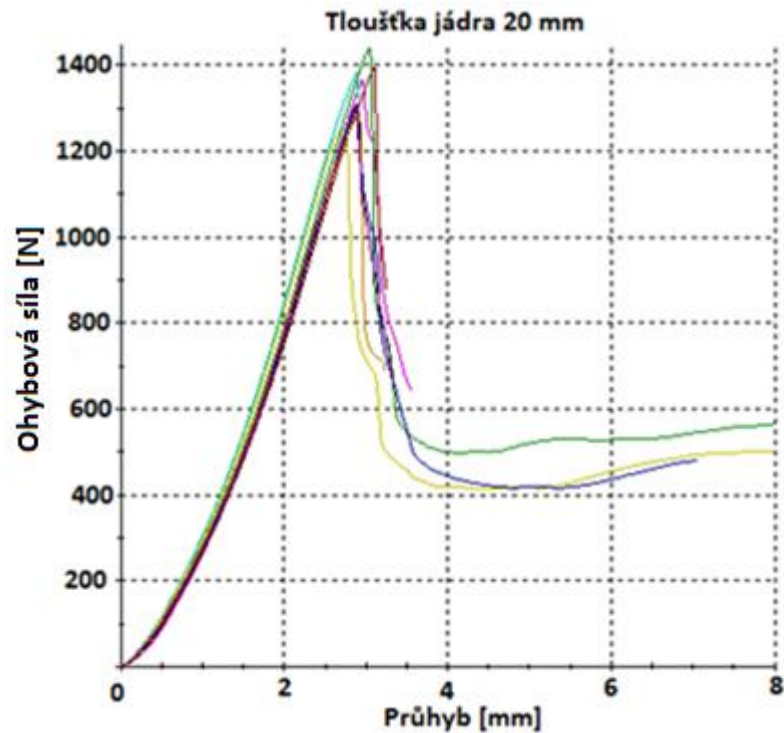
Obr. 43. Závislost $F_{o_{max}}$ na průhybu pro tloušťku jádra 7 mm.



Obr. 44. Závislost $F_{o_{max}}$ na průhybu pro tloušťku jádra 9 mm.



Obr. 45. Závislost $F_{o_{max}}$ na průhybu pro tloušťku jádra 16 mm.



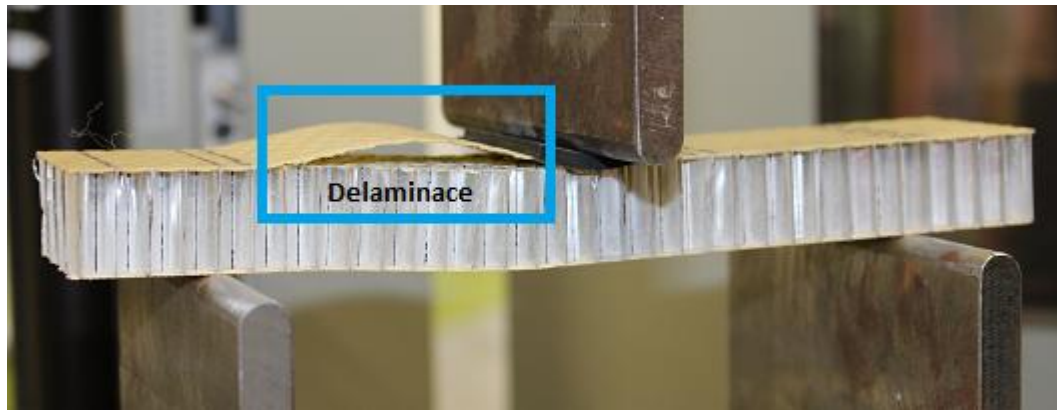
Obr. 46. Závislost $F_{o_{max}}$ na průhybu pro tloušťku jádra 20 mm.

➤ **Poruchy vzniklé během statické zkoušky**

Nejčastěji zaznamenanou poruchou v průběhu statické zkoušky cyklicky nezatížených sendvičových konstrukcí byla plošná delaminace neboli porušení soudružnosti mezi vnější krycí vrstvou a jádrem sendvičové konstrukce (Obr. 48). Společně s touto poruchou ojediněle docházelo i k lokální trhlině hliníkového voštinového jádra a to především u zkušebních těles s nižší tloušťkou jádra (Obr. 47).

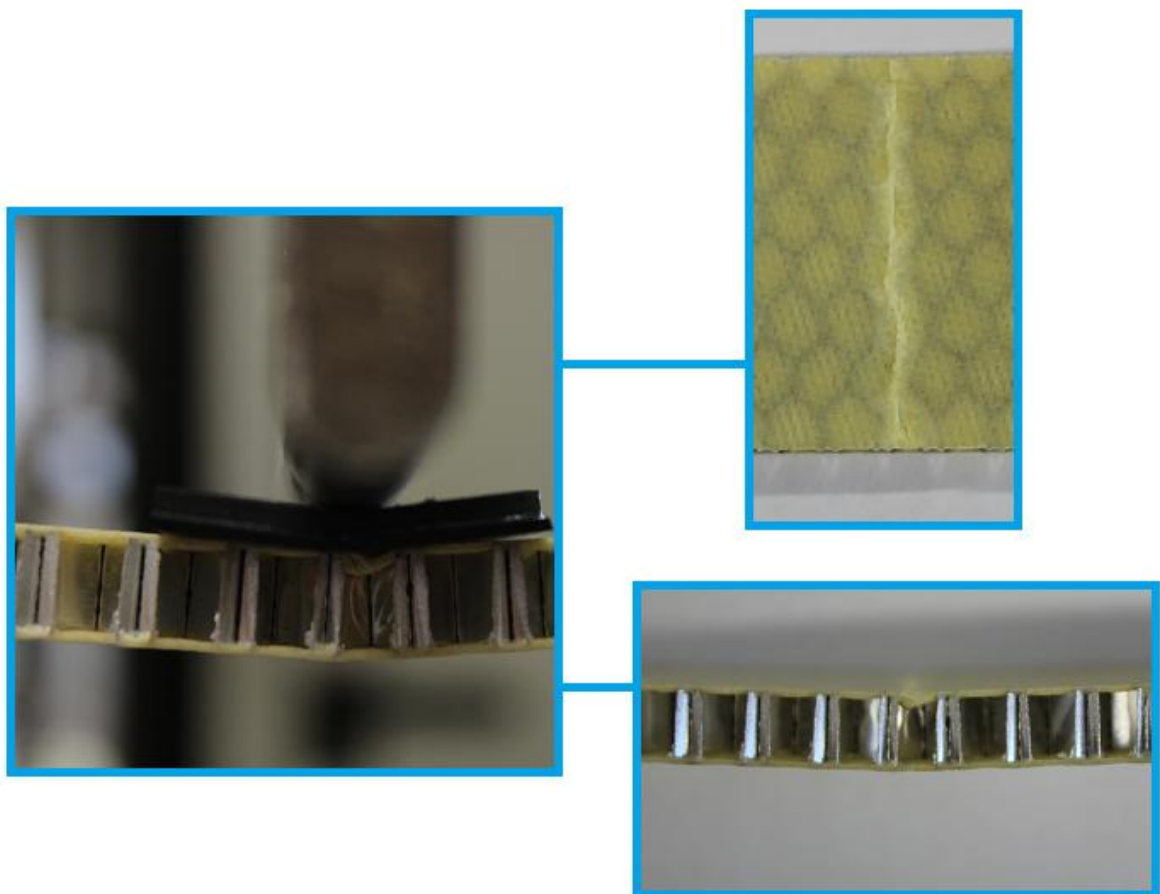


Obr. 47. Delaminace a trhlina hliníkového voštinového jádra o tloušťce 3 mm.



Obr. 48. Plošná delaminace hliníkového voštinového jádra o tloušťce 20 mm.

Další vzniklá poškození měla spíše lokální charakter a vznikala v místě působení zatěžovacího trnu. Docházelo k tlakové poruše voštinového jádra, ale taky k trhlině ve vnější krycí vrstvě z prepreg materiálu (Obr. 49).



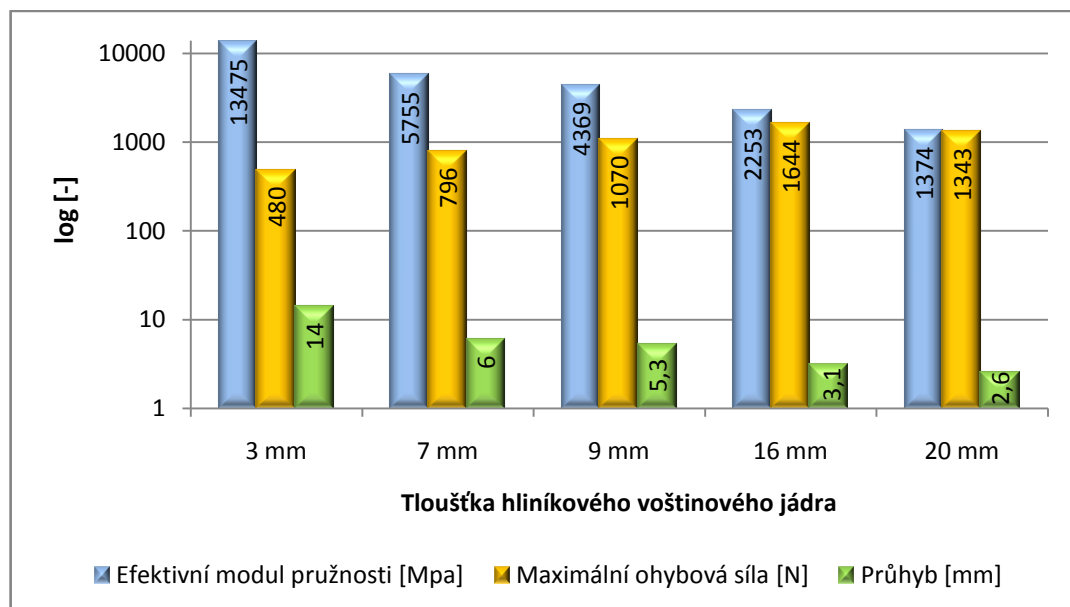
Obr. 49. Lokální poškození hliníkového voštinového jádra.

➤ Shrnutí výsledku statické zkoušky cyklicky nezatížených zkušebních těles

Tab. 16. Shrnutí průměrných hodnot statické zkoušky cyklicky nezatížených zkušebních těles.

Průměrné výsledky \bar{x} hliníkového voštinového jádra pro tloušťku					
Parametr	3 mm	7 mm	9 mm	16 mm	20 mm
E_{ef} [MPa]	13475	5755	4369	2253	1374
$F_{o_{max}}$ [N]	480	796	1070	1644	1343
y [mm]	14	6	5.3	3.1	2.6

Z výsledků statické zkoušky tříbodovým ohybem cyklicky nezatížených těles vyplývá, že nejvyšší hodnoty efektivního modulu pružnosti dosahují hliníková voštinová jádra o tloušťce 3 mm a tento modul dále klesá se zvyšující se tloušťkou jádra. Nejnížší naměřený efektivní modul pružnosti měly tedy zkušební tělesa s tloušťkou jádra 20 mm, u kterých došlo k poklesu tohoto modulu o téměř 90 %.



Obr. 50. Shrnutí průměrných hodnot výsledků statické zkoušky cyklicky nezatížených zkušebních těles.

S rostoucí tloušťkou jádra stoupala ohybová pevnost těles a tudíž maximální ohybová síla potřebná pro dosažení meze pevnosti. K vychýlení došlo pouze u sendvičové konstrukce s tloušťkou jádra 20 mm, u které byla naměřena nižší maximální ohybová síla v porovnání se zkušebním tělesem s tloušťkou jádra 16 mm. K nejvyšším hodnotám průhybu docházelo u sendvičových konstrukcí s malou tloušťkou jádra a se zvyšující tloušťkou jádra

docházelo k rovnoměrnému poklesu průhybu neboli vzniklé deformaci. Během průběhu statické zkoušky byly rovněž zaznamenávány vzniklé poruchy, které měli ve většině případů plošný charakter a docházelo nejčastěji k porušení soudružnosti mezi jádrem a vnější krycí vrstvou sendvičové konstrukce.

7.1.2 Výsledky statické zkoušky cyklicky zatížených zkušebních těles

Zkušební tělesa s hliníkovým jádrem zatížena předem definovaným počtem cyklů (2500, 5000, 10 000) na dvou hladinách, 80 a 60 % maximální ohybové síly, byly po cyklování opět testovány statickou zkouškou třibodového ohybu a získané hodnoty byly porovnány s výsledky statické zkoušky cyklicky nezatížených zkušebních těles. Zpracované výsledky byly rozděleny do kategorií podle amplitudy zatížení nastavené při cyklické zkoušce. Při amplitudě zatížení 100 N byla testována zkušební tělesa sendvičové konstrukce o tloušťce jádra 3 mm. Do další kategorie patřila zkušební tělesa s tloušťkou jádra 7 a 9 mm, která byla testována při $F_a = 200$ N. Poslední skupinu tvořily sendvičové konstrukce s tloušťkou jádra 16 a 20 mm zkoušené při amplitudě 300 N.

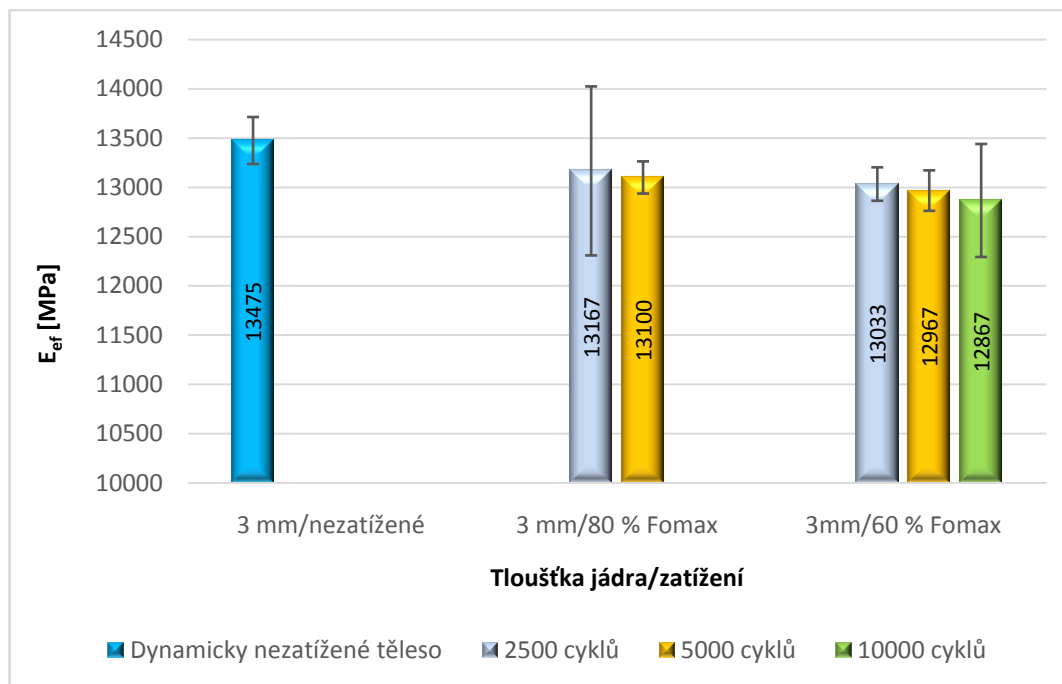
➤ Zkušební tělesa testované při amplitudě zatížení 100 N

V následující tabulce (Tab. 17) jsou shrnuta data získaná statickou zkouškou zkušebních těles s tloušťkou jádra 3 mm, která byla cyklicky zatížena při amplitudě $F_a = 100$ N.

Tab. 17. Výsledky statické zkoušky cyklicky zatížených těles s tloušťkou 3 mm.

3 mm		E_{ef} [MPa]		$F_{o_{max}}$ [N]		Průhyb [mm]	
Měření		80 % $F_{o_{max}}$	60 % $F_{o_{max}}$	80 % $F_{o_{max}}$	60 % $F_{o_{max}}$	80 % $F_{o_{max}}$	60 % $F_{o_{max}}$
2500 cyklů	1.	13200	13200	488	449	13.9	12.1
	2.	12100	13100	432	520	13	15
	3.	14200	12800	484	486	14.1	13.8
	\bar{x}	13167	13033	468	485	13.7	13.6
	s	858	170	26	29	0.5	1
5000 cyklů	1.	12900	12700	430	503	11.9	14.8
	2.	13100	13000	460	422	13.3	13
	3.	13300	13200	425	516	12	14.7
	\bar{x}	13100	12967	438	480	12.4	14.2
	s	163	205	15	42	0.6	0.8
10000 cyklů	1.	-	12800	-	424	-	12
	2.	-	13600	-	486	-	13.7
	3.	-	12200	-	468	-	13.6
	\bar{x}	-	12867	-	459	-	13.1
	s	-	573	-	26	-	0.8

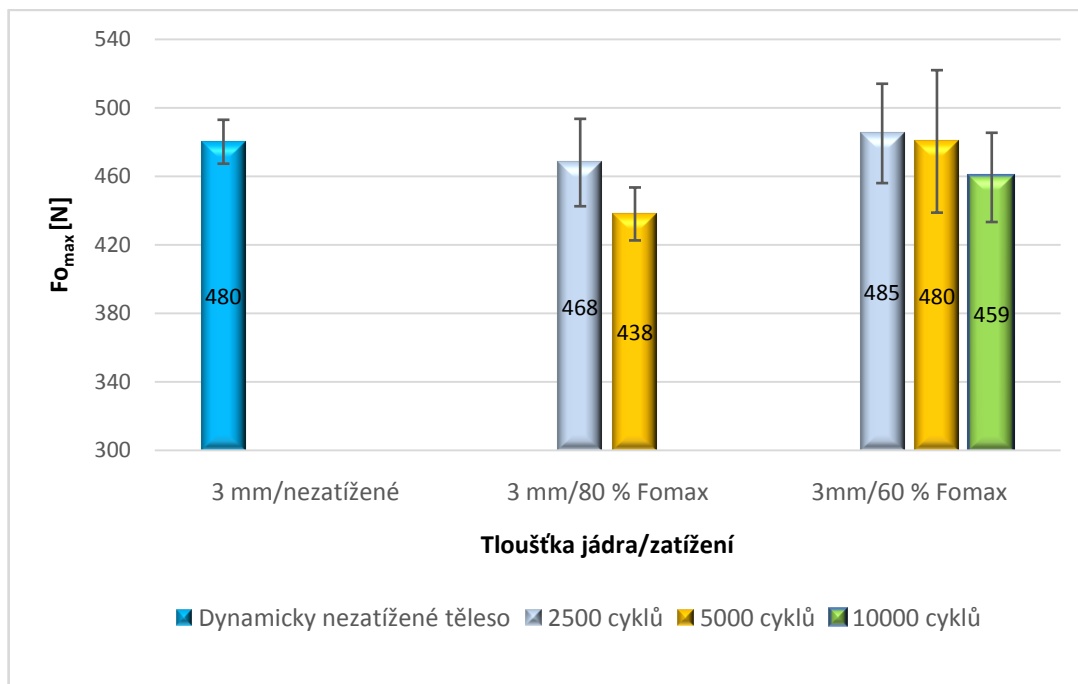
Sendvičové konstrukce s tloušťkou jádra 3 mm po únavové cyklické zkoušce vykazovaly téměř nezměněnou hodnotu efektivního modulu pružnosti v porovnání s výsledky získanými při statické zkoušce dynamicky nezatížených zkušebních těles. Ke změně docházelo pouze v rámci chyby měření, která byla vyjádřena pomocí odhadu směrodatné odchylky. Porovnání jednotlivých hodnot je znázorněno na obrázku (Obr. 51).



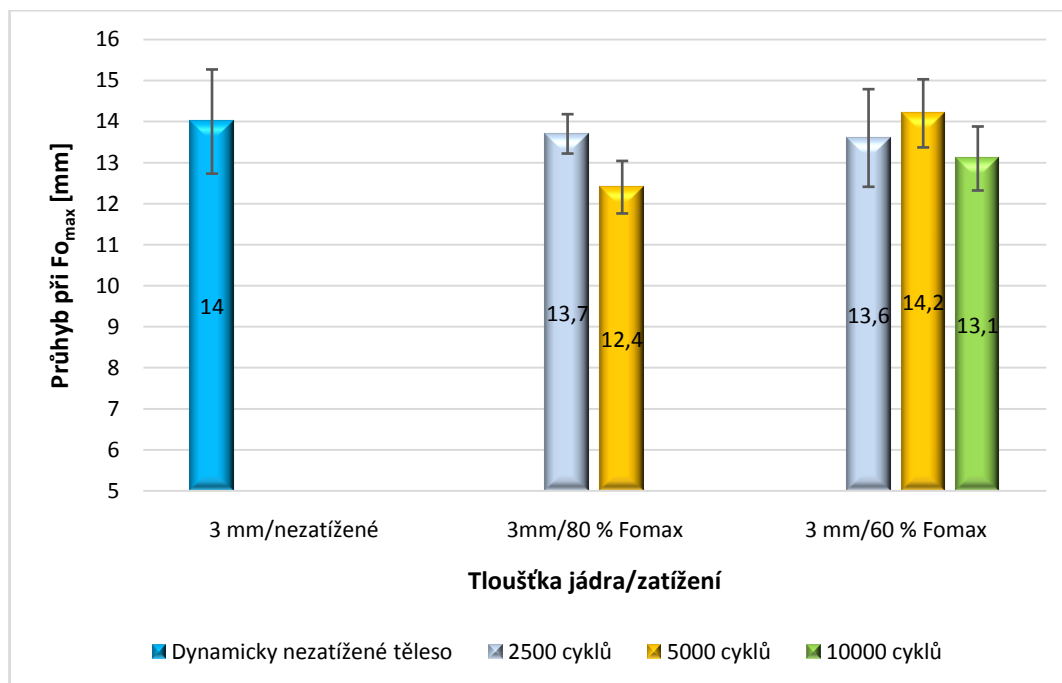
Obr. 51. Efektivní modul pružnosti cyklicky zatížených těles s tloušťkou 3 mm.

Obdobné výsledky byly taky zjištěny při porovnání maximální ohybové síly a průhybu, u kterého se výsledky rovněž pohybovaly v rámci chyby. V případě porovnání maximální ohybové síly došlo pouze k mírnému snížení pevnosti po 5000 cyklech u zkušebních těles testovaných 80 % maximální ohybové síly, která byla stanovena statickou zkouškou cyklicky nezatížených těles. U tohoto zkušebního tělesa došlo k poklesu maximální ohybové síly o 9 % ve srovnání s dynamicky nezatíženým zkušebním tělesem (Obr. 52).

Provedení únavové zkoušky 10 000 zatěžovacími cykly při 80 % $F_{o_{max}}$ nebylo provedeno, neboť u zkušebních těles s tloušťkou jádra 3 mm již docházelo k porušení soudružnosti před dosažením tohoto počtu cyklů.



Obr. 52. Maximální ohybová síla cyklicky zatížených těles s tloušťkou 3 mm.



Obr. 53. Průhyb při $F_{o_{max}}$ cyklicky zatížených těles s tloušťkou 3 mm.

➤ **Zkušební tělesa testované při amplitudě zatížení 200 N**

Při amplitudě zatížení $F_a = 200$ N byly testovány sendvičové konstrukce s tloušťkou hliníkového jádra 7 a 9 mm. Výsledky získané statickou zkouškou tříbodovým ohybem těchto těles jsou znázorněny v tabulkách (Tab. 18, Tab. 19).

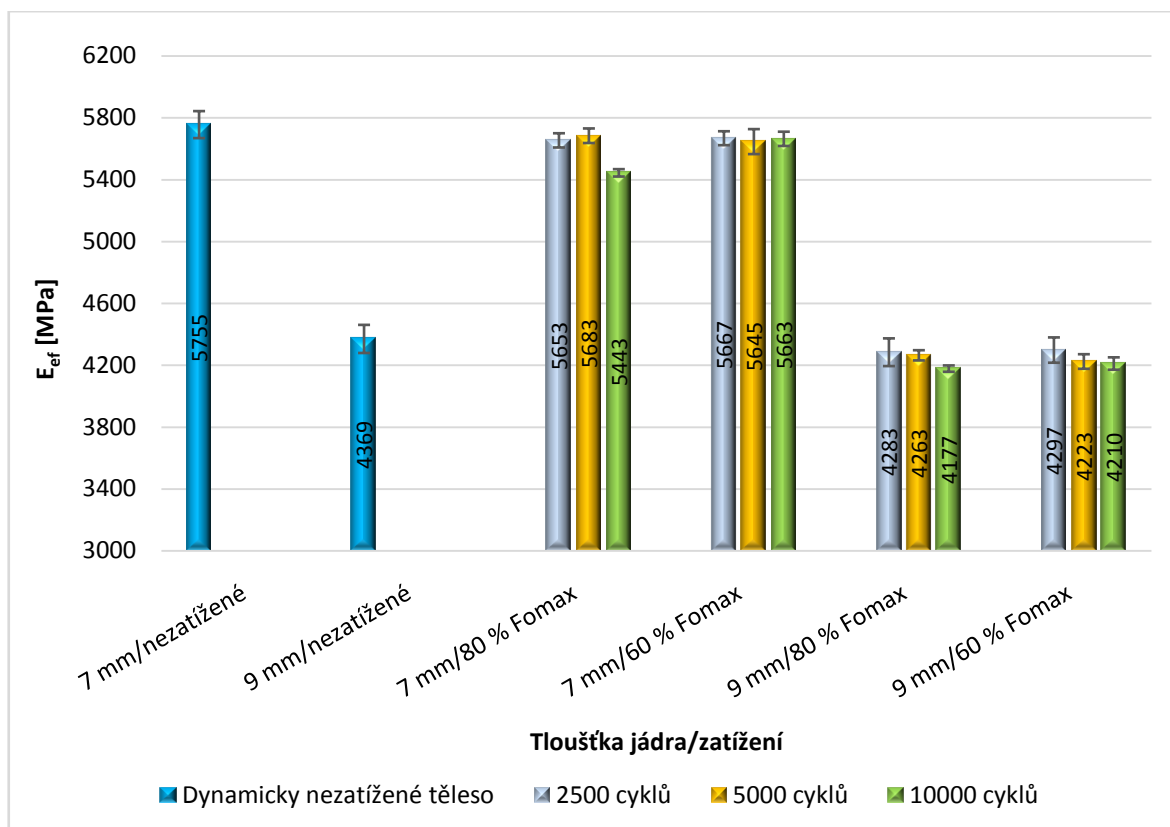
Tab. 18. Výsledky statické zkoušky cyklicky zatížených těles s tloušťkou 7 mm.

7 mm		E_{ef} [MPa]		Fo_{max} [N]		Průhyb [mm]	
Měření		80 % Fo_{max}	60 % Fo_{max}	80 % Fo_{max}	60 % Fo_{max}	80 % Fo_{max}	60 % Fo_{max}
2500 cyklů	1.	5730	5610	878	870	6.4	6.3
	2.	5630	5720	823	844	6	6.2
	3.	5640	5670	830	835	5.9	6.1
	4.	5610	-	844	-	6.2	-
	\bar{x}	5653	5667	844	850	6.1	6.2
	s	46	45	21	15	0.19	0.08
5000 cyklů	1.	5650	5560	853	867	6.2	6.3
	2.	5680	5770	871	836	6.3	6
	3.	5640	5660	853	812	6.1	5.9
	4.	5760	5590	827	854	5.9	6.1
	\bar{x}	5683	5645	851	842	6.1	6.1
	s	47	81	16	21	0.15	0.15
10000 cyklů	1.	5410	5680	868	834	6.4	6.1
	2.	5460	5620	860	872	6.4	6.5
	3.	5470	5730	861	766	6.3	5.4
	4.	5430	5620	846	811	6.3	5.9
	\bar{x}	5443	5663	859	821	6.4	6.0
	s	24	46	8	38	0.05	0.40

Tab. 19. Výsledky statické zkoušky cyklicky zatížených těles s tloušťkou 9 mm.

9 mm		E_{ef} [MPa]		Fo_{max} [N]		Průhyb [mm]	
Měření		80 % Fo_{max}	60 % Fo_{max}	80 % Fo_{max}	60 % Fo_{max}	80 % Fo_{max}	60 % Fo_{max}
2500 cyklů	1.	4160	4410	1020	1050	5	5.1
	2.	4320	4220	1080	1120	5.2	5.6
	3.	4370	4260	1070	1100	5.1	5.5
	\bar{x}	4283	4297	1057	1090	5.1	5.4
	s	90	82	26	29	0.08	0.22
5000 cyklů	1.	4220	4190	1070	1100	5.2	5.3
	2.	4300	4190	1020	1070	5.2	5.4
	3.	4270	4290	1050	1100	5	5.4
	\bar{x}	4263	4223	1047	1090	5.1	5.4
	s	33	47	21	14	0.09	0.05
10000 cyklů	1.	4180	4170	999	1060	5	5.3
	2.	4200	4250	1070	1120	5.3	5.4
	3.	4150	-	1040	-	5.5	-
	\bar{x}	4177	4210	1036	1090	5.3	5.4
	s	21	40	29	30	0.21	0.05

Z výsledků statické zkoušky cyklicky zatížených těles s tloušťkou jádra 7 a 9 mm vyplývá, že k mírnému poklesu efektivního modulu pružnosti došlo po 10 000 cyklech u zkušebních těles testovaných 80 % F_{0max} (Obr. 54). U těles s tloušťkou jádra 7 mm došlo k poklesu o 5 % a u zkušebních těles s tloušťkou 9 mm tento modul klesl o 4 %. V ostatních případech docházelo ke změnám efektivního modulu pružnosti pouze v rámci chyby měření vyjádřené pomocí odhadu směrodatné odchylky.

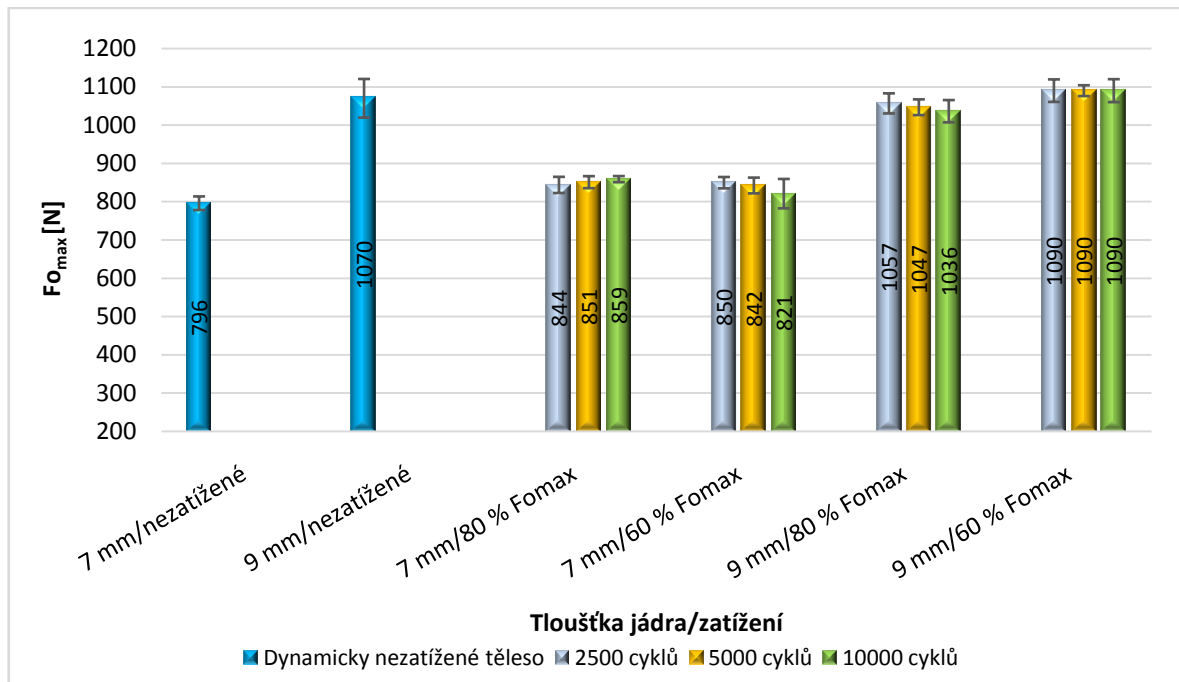


Obr. 54. Efektivní modul pružnosti cyklicky zatížených těles s tloušťkou 7 a 9 mm.

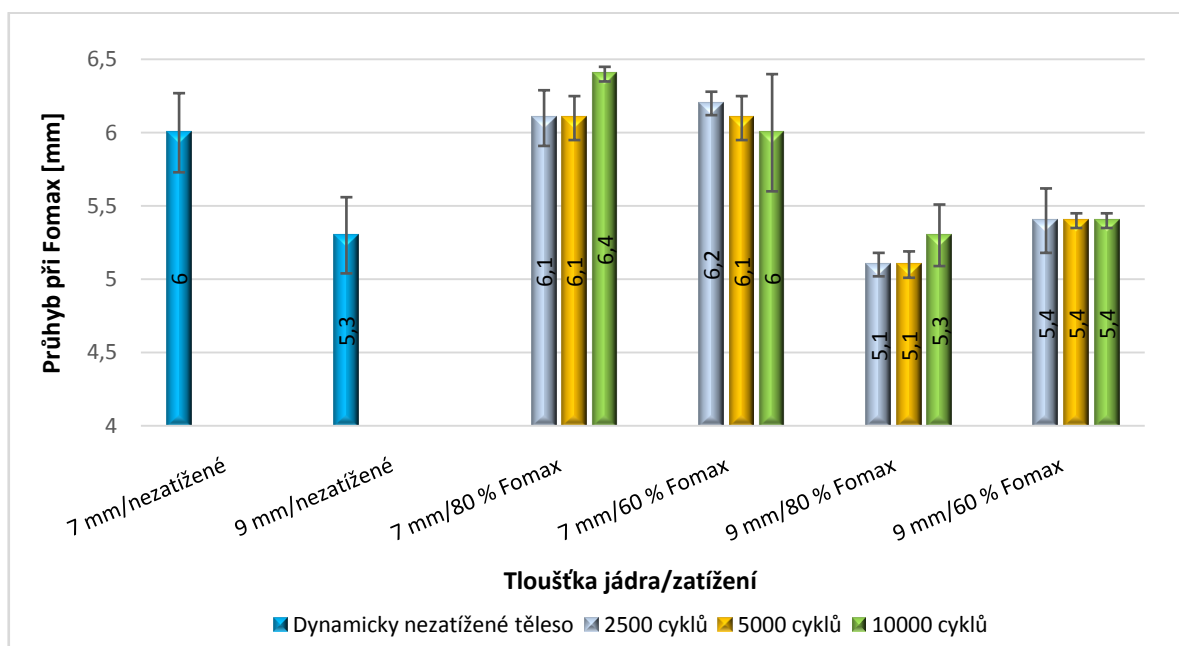
V případě maximální ohybové síly, která vyjadřuje ohybovou pevnost sendvičové konstrukce, docházelo k výchybkám rovněž v rámci chyby měření (Obr. 55).

Ke změně průhybu došlo mírně u těles s tloušťkou jádra 7 mm po 10 000 cyklech při zatížení, které odpovídalo 80 % maximální ohybové síly stanovené pomocí statické zkoušky ohybem cyklicky nezatížených zkušebních těles. Hodnota zaznamenaného průhybu byla o 0.4 mm vyšší v porovnání s hodnotou cyklicky nezatíženého zkušebního tělesa s tloušťkou jádra 7 mm (Obr. 56).

Výše uvedené výsledky potvrzují, že sendvičové konstrukce, složené z prepreg materiálu PHG840-300-42 a hliníkového voštinového jádra ECM 6.4 – 82, vykazují dobrou odolnost vůči únavě, tak jako to deklaruje výrobce v materiálovém listě.



Obr. 55. Maximální ohybová síla cyklicky zatížených těles s tloušťkou 7 a 9 mm.



Obr. 56. Průhyb při $F_{o_{max}}$ cyklicky zatížených těles s tloušťkou 7 a 9 mm.

➤ **Zkušební tělesa testovaná při amplitudě zatížení 300 N**

Poslední skupinu tvořila zkušební tělesa testovaná při nejvyšší nastavené amplitudě zatížení $F_a = 300$ N. Do této kategorie patřily sendvičové konstrukce s tloušťkou jádra 16 a 20 mm. Výsledky statické zkoušky tříbodovým ohybem, provedené po cyklické únavové zkoušce, jsou uvedeny v následujících tabulkách (Tab. 20, Tab. 21).

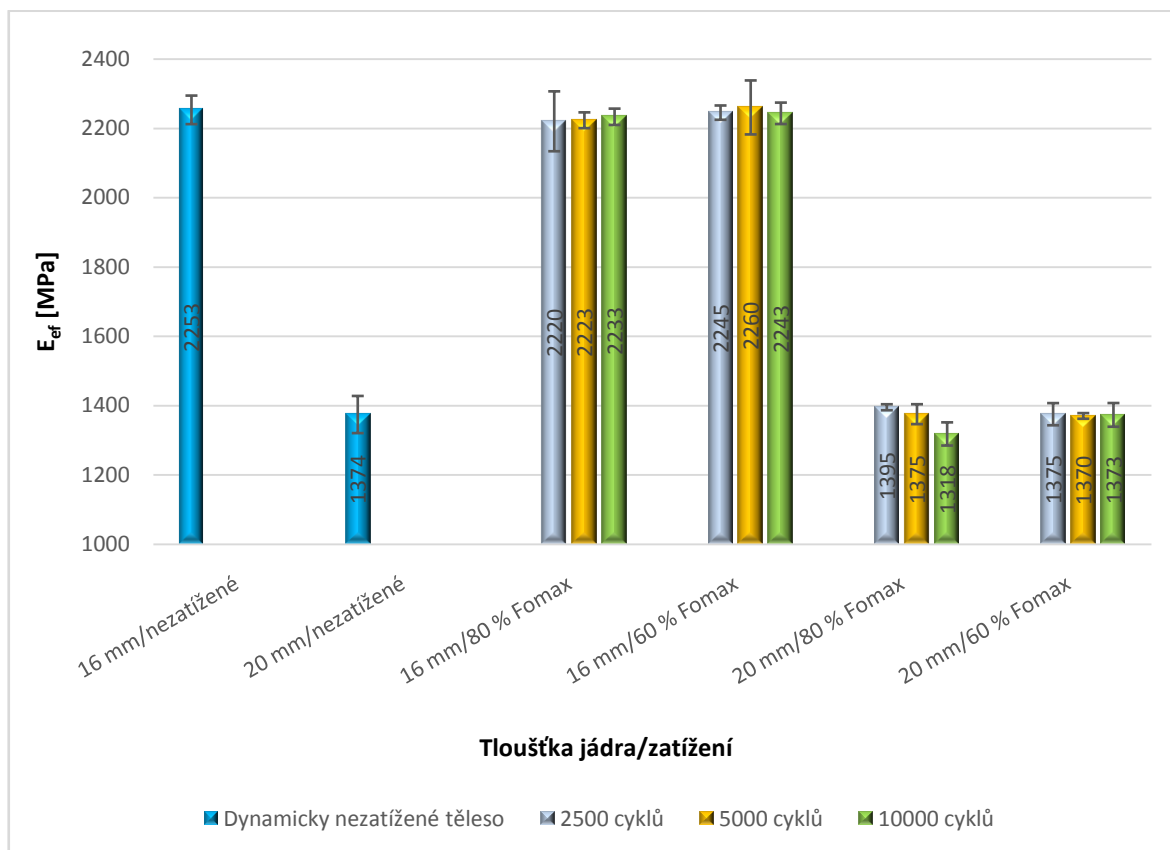
Tab. 20. Výsledky statické zkoušky cyklicky zatížených těles s tloušťkou 16 mm.

16 mm		Eef [MPa]		Fo _{max} [N]		Průhyb [mm]	
Měření		80 % Fo _{max}	60 % Fo _{max}	80 % Fo _{max}	60 % Fo _{max}	80 % Fo _{max}	60 % Fo _{max}
2500 cyklů	1.	2340	2220	1690	1620	3.6	3.4
	2.	2140	2270	1650	1720	3.4	3.5
	3.	2180	2260	1580	1520	3.6	3.2
	4.	-	2230	-	1660	-	3.7
	\bar{x}	2220	2245	1640	1630	3.5	3.5
	<i>s</i>	86	21	45	73	0.1	0.2
5000 cyklů	1.	2250	2270	1640	1670	3.4	3.5
	2.	2200	2160	1680	1630	3.5	3.4
	3.	2200	2350	1730	1580	3.6	3.3
	4.	2240	-	1500	-	3.2	-
	\bar{x}	2223	2260	1638	1627	3.4	3.4
	<i>s</i>	23	78	86	37	0.2	0.1
10000 cyklů	1.	2250	2270	1450	1560	3.1	3.3
	2.	2200	2200	1500	1650	3.3	3.4
	3.	2250	2260	1630	1660	3.3	3.5
	\bar{x}	2233	2243	1527	1623	3.2	3.4
	<i>s</i>	24	31	76	45	0.1	0.1

Tab. 21. Výsledky statické zkoušky cyklicky zatížených těles s tloušťkou 20 mm.

20 mm		Eef [MPa]		Fo _{max} [N]		Průhyb [mm]	
Měření		80 % Fo _{max}	60 % Fo _{max}	80 % Fo _{max}	60 % Fo _{max}	80 % Fo _{max}	60 % Fo _{max}
2500 cyklů	1.	1390	1410	1370	1340	2.8	2.8
	2.	1390	1400	1330	1340	2.9	2.9
	3.	1390	1330	1360	1250	2.8	2.8
	4.	1410	1360	1280	1430	2.8	3
	\bar{x}	1395	1375	1335	1340	2.8	2.9
	<i>s</i>	9	32	35	64	0.1	0.1
5000 cyklů	1.	1400	1380	1340	1220	2.8	3
	2.	1370	-	1370	-	3	2.9
	3.	1330	1360	1280	1380	3.1	2.9
	4.	1400	1370	1380	1440	2.8	2.9
	\bar{x}	1375	1370	1343	1347	2.9	2.9
	<i>s</i>	29	8	39	93	0.1	0.1
10000 cyklů	1.	1260	1430	1370	1320	2.8	3
	2.	1330	1360	1240	1360	2.9	2.8
	3.	1340	1340	1340	1350	2.8	3
	4.	1340	1360	1330	1310	3	3
	\bar{x}	1318	1373	1320	1335	2.9	3
	<i>s</i>	33	34	48	21	0.1	0.1

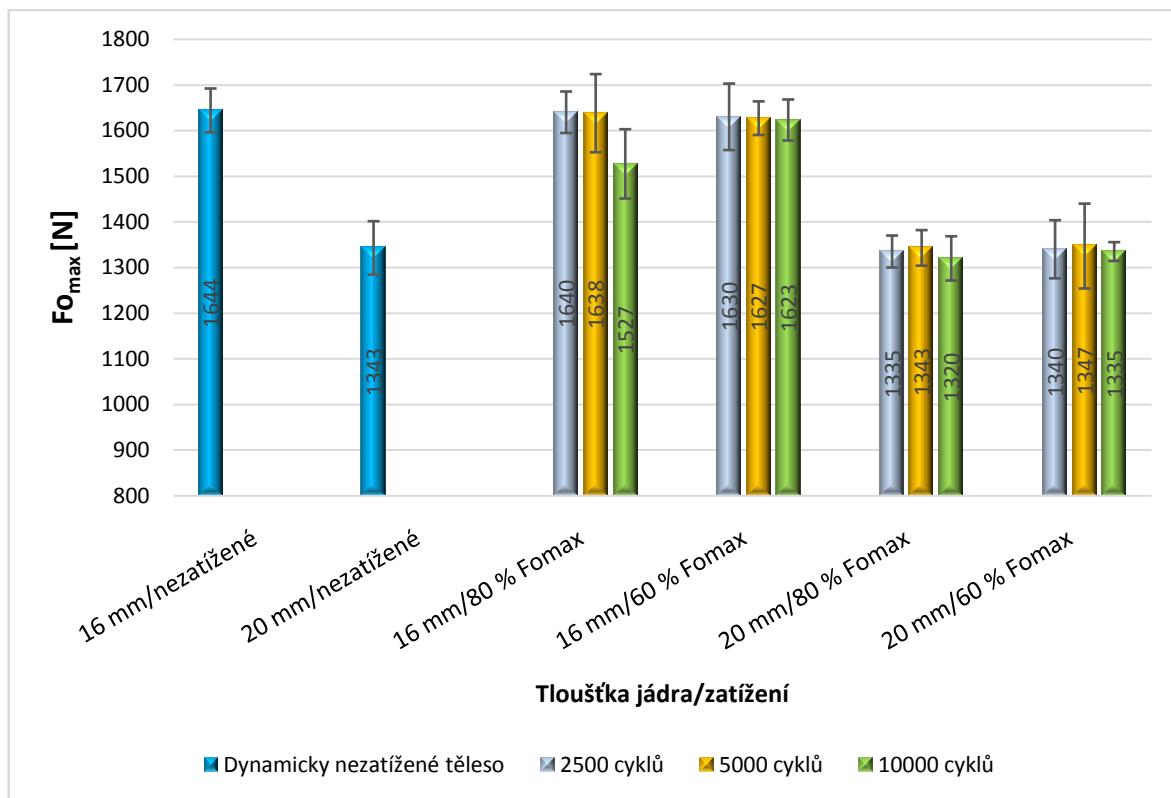
Hodnoty efektivního modulu pružnosti získané pomocí statické zkoušky cyklicky zatížených zkušebních těles s tloušťkou jádra 16 a 20 mm opět dokazují dobrou odolnost sendvičových konstrukcí vůči únavě. K odchýlkám efektivního modulu pružnosti dochází opět pouze v rozmezí odhadu směrodatné odchylky (Obr. 57).



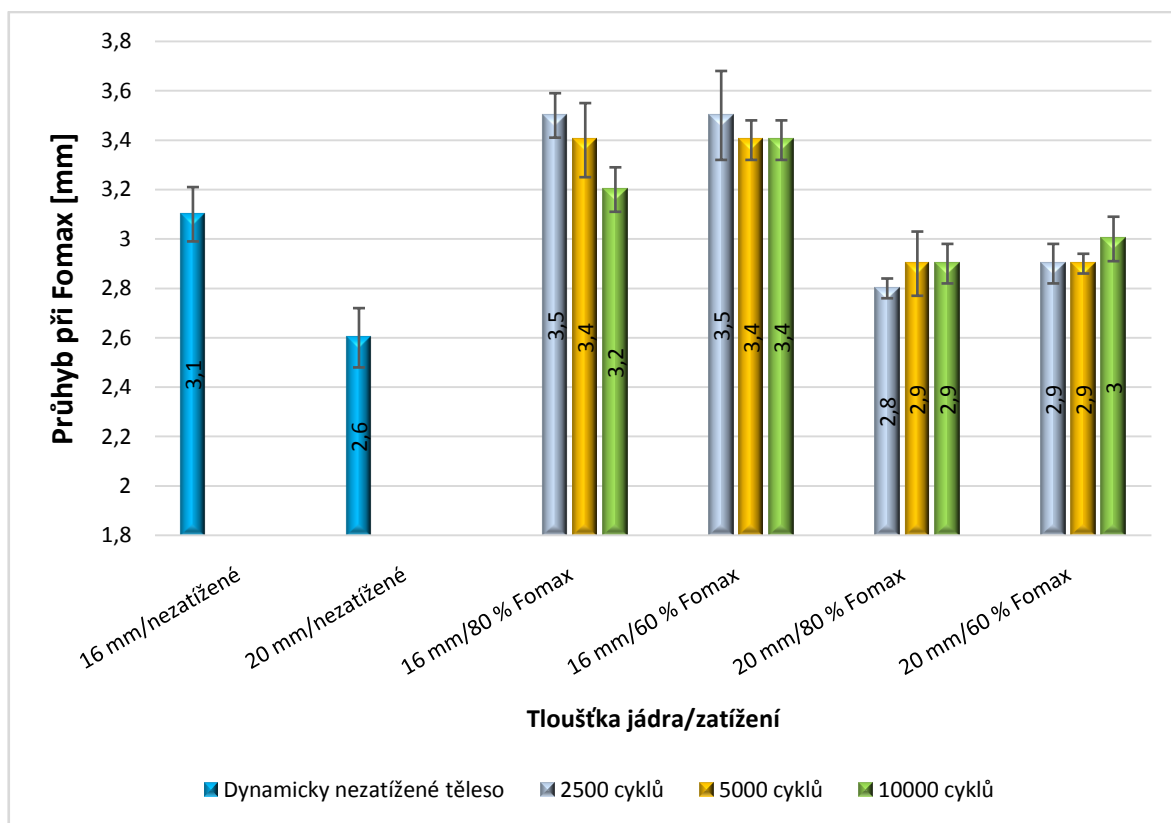
Obr. 57. Efektivní modul pružnosti cyklicky zatížených těles s tloušťkou 16 a 20 mm.

Při porovnání maximální ohybové síly došlo ke snížení ohybové pevnosti pouze u zkušebních těles s tloušťkou jádra 16 mm, které byly zatíženy 10000 cykly při 80 % maximální ohybové síly stanovené pomocí statické zkoušky nezatížených těles. U těchto sendvičových konstrukcí došlo k poklesu maximální ohybové síly o 7 % (Obr. 58).

Sendvičové konstrukce s tloušťkou hliníkového jádra 16 a 20 mm byly jedinou kategorií, u které došlo ke zvýšení deformace neboli průhybu při maximální hodnotě ohybové síly u většiny zkoušených těles. U sendvičových konstrukcí s tloušťkou jádra 16 mm došlo k nejvyššímu nárůstu deformace již po 2500 cyklech při 80 a taky 60 % maximální ohybové síly. Konkrétně došlo ke zvýšení průhybu o necelých 13 %. V případě sendvičové konstrukce s tloušťkou jádra 20 mm byla nejvyšší hodnota průhybu zaznamenána u těles zatížených 10000 cykly při 60 % $F_{o_{max}}$. U těchto cyklicky zatížených těles došlo k navýšení hodnoty průhybu o 15 % (Obr. 59).



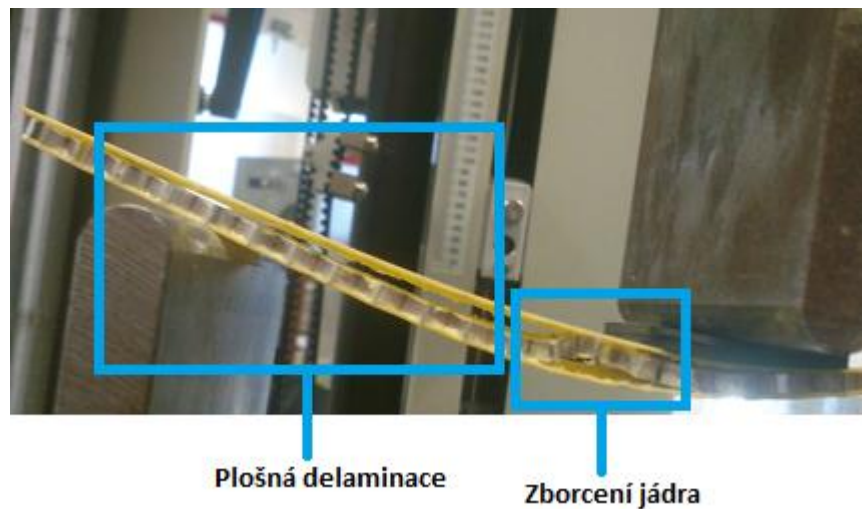
Obr. 58. Maximální ohybová síla cyklicky zatížených těles s tloušťkou 16 a 20 mm.



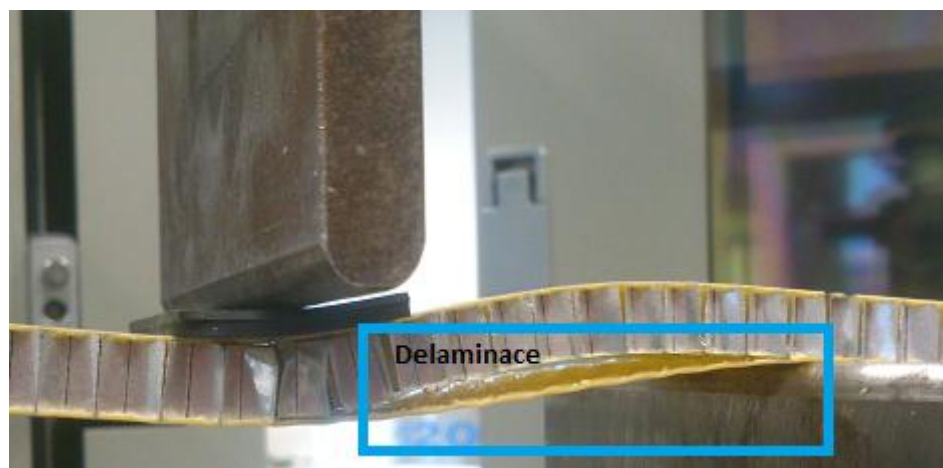
Obr. 59. Průhyb při F_{0max} cyklicky zatížených těles s tloušťkou 16 a 20 mm.

➤ **Poruchy vzniklé během statické zkoušky cyklicky zatížených těles**

Během statické zkoušky třibodovým ohybem cyklicky zatížených těles byly stejně jako u nezatížených těles sledovány vzniklé poruchy sendvičové konstrukce. Ve většině případů docházelo opět k plošnému porušení soudružnosti mezi jádrem a vnější krycí vrstvou (delaminaci), popřípadě k zborcení hliníkového voštinového jádra v blízkosti působení zatěžovacího trnu. Jednotlivé ukázky vzniklých poruch jsou znázorněny na níže uvedených obrázcích (Obr. 60, Obr. 61).



Obr. 60. Ukázka plošné delaminace a zborcení jádra.



Obr. 61. Ukázka další vzniklé delaminace.

7.2 Sendvičové konstrukce s papírovým voštinovým jádrem

Jak již bylo řečeno, pro testování mechanických vlastností sendvičových konstrukcí s papírovým voštinovým jádrem byly použity dva druhy zkušebních vzorků. V obou případech byla vnější krycí vrstva vyrobena z fenolického prepreg materiálu se skelnou tkaninou a rozdíl byl pouze ve složení jádra. Na části zkušebních těles byla ponechána papírová ochranná vrstva překrývající voštinové jádro a ze zbylé části zkušebních těles byla tato vrstva důkladně odstraněna. Zkušební tělesa s papírovou krycí vrstvou byla určena pouze pro statickou zkoušku třibodovým ohybem a zaznamenával se u nich efektivní modul pružnosti E_{ef} a maximální ohybová síla $F_{o_{max}}$. Sendvičové konstrukce bez papírové krycí vrstvy byly testovány jak statickou ohybovou zkouškou, zaznamenávající opět E_{ef} a $F_{o_{max}}$, tak i cyklickou únavovou zkouškou. Bližší popis a rozměry tohoto jádra jsou uvedeny v podkapitole 4.2.2 Papírové voštinové jádro.

7.2.1 Výsledky statické zkoušky cyklicky nezatížených zkušebních těles

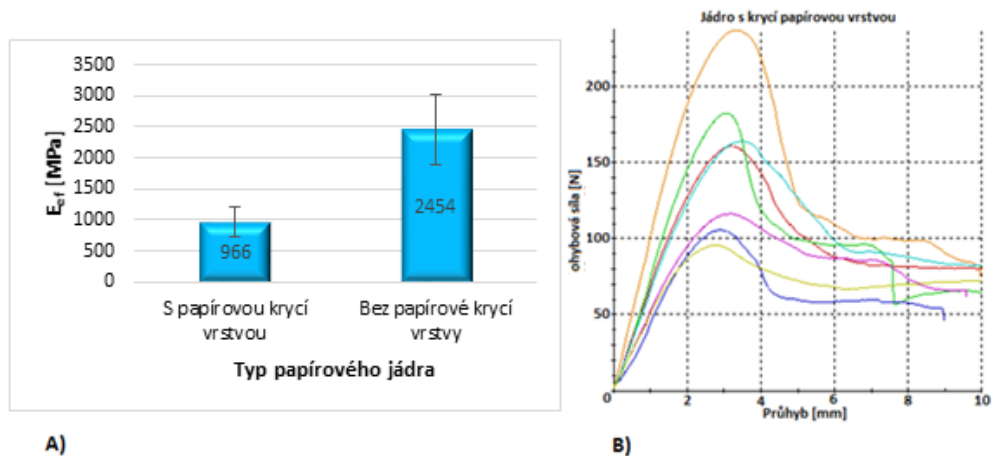
V následující tabulce (Tab. 22) jsou znázorněny hodnoty efektivního modulu pružnosti E_{ef} a maximální ohybové síly $F_{o_{max}}$ získané z výsledků statické zkoušky třibodovým ohybem zkušebních těles s papírovým voštinovým jádrem. Tyto hodnoty byly porovnány a výsledky jsou znázorněny na obrázcích (Obr. 62, Obr. 63). Na zmíněných obrázcích je rovněž znázorněna závislost ohybové síly na průhybu.

Tab. 22. Výsledky statické zkoušky zkušebních těles s papírovým jádrem.

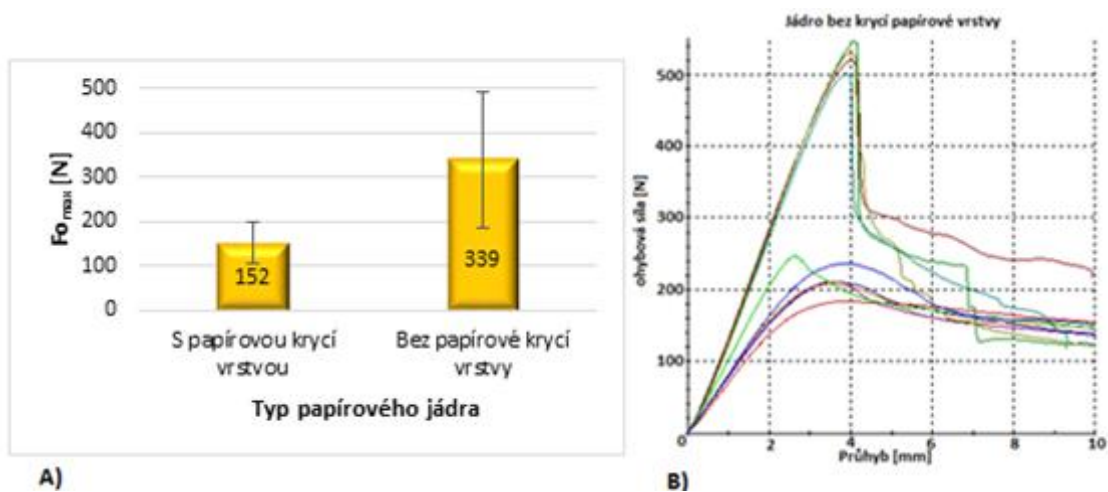
Měření	S papírovou krycí vrstvou		Bez papírové krycí vrstvy	
	E_{ef} [MPa]	$F_{o_{max}}$ [MPa]	E_{ef} [MPa]	$F_{o_{max}}$ [MPa]
1.	1040	161	3190	520
2.	1160	183	3020	547
3.	809	106	1960	211
4.	1400	237	2060	208
5.	701	117	1910	211
6.	982	164	2930	501
7.	669	96	3110	529
8.	-	-	1500	183
9.	-	-	2680	248
10.	-	-	2180	236
\bar{x}	966	152	2454	339
s	243	46	570	152

Z výsledku statické zkoušky ohybem sendvičových konstrukcí s papírovým jádrem je patrné, že při zachování papírové krycí vrstvy na povrchu voštinového jádra dochází k výraznému snížení efektivního modulu pružnosti a maximální ohybové síly, která definuje ohybovou pevnost materiálu. Po odstranění této krycí vrstvy došlo k nárůstu efektivního modulu pružnosti o 154 % a v případě maximální ohybové síly bylo zaznamenáno navýšení o 123 %.

Získaná data jsou zatížena velkou chybou měření a slouží pouze k určení vlivu papírové krycí vrstvy na mechanické vlastnosti papírového voštinového jádra. V důsledku nekvalitního spojení mezi papírovou krycí vrstvou a voštinovým jádrem dochází k značnému zhoršení mechanických vlastností.



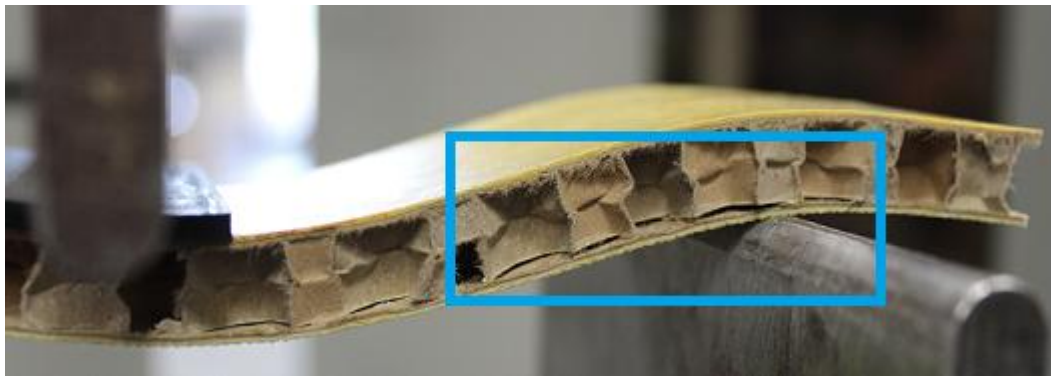
Obr. 62. Efektivní modul pružnosti papírového voštinového jádra (Obr. A),
závislost $F_{o_{max}}$ na průhybu pro jádro s papírovou krycí vrstvou (Obr. B).



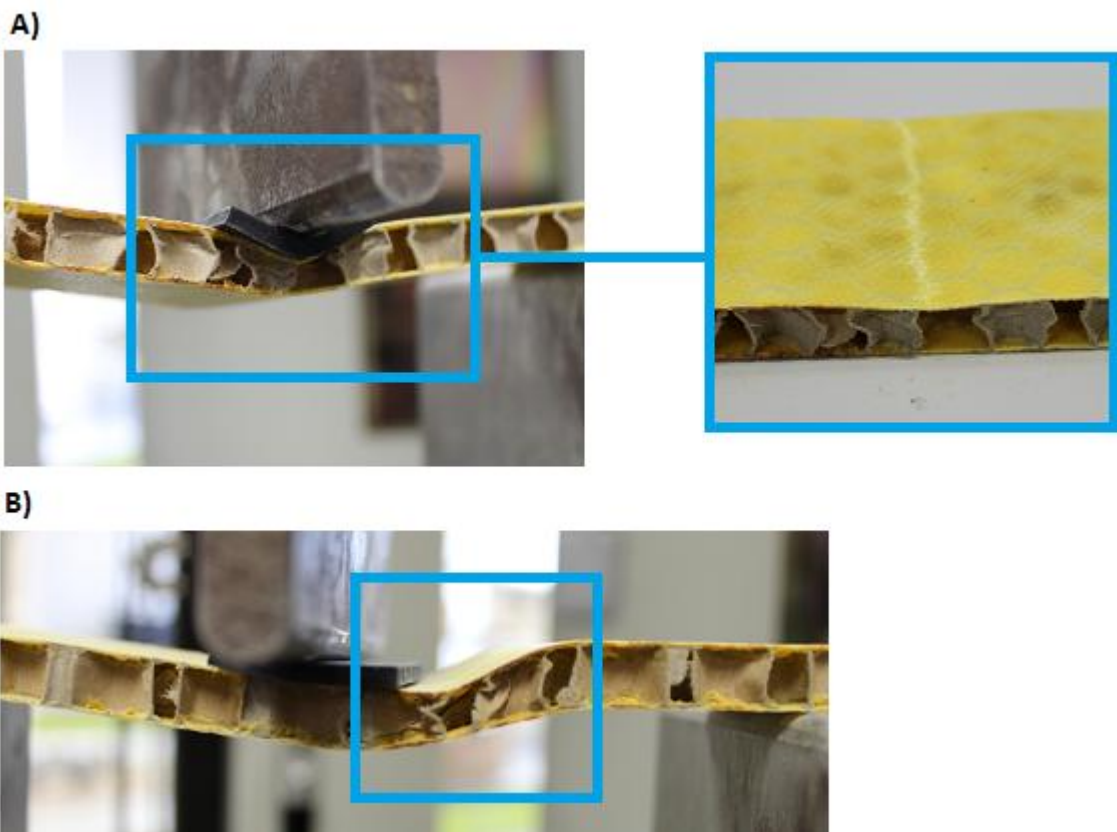
Obr. 63. Maximální ohybová síla pro papírové voštinové jádro (Obr. A),
závislost $F_{o_{max}}$ na průhybu pro jádro bez papírové krycí vrstvy (Obr. B).

➤ **Poruchy vzniklé během zkoušky**

U zkušebních těles s papírovým voštinovým jádrem, z kterého nebyla odstraněna krycí papírová vrstva, docházelo nejčastěji k porušení soudružnosti v adhezivní vrstvě mezi voštinovým jádrem a papírovou krycí vrstvou (Obr. 64). Tato porucha způsobila selhání celé sendvičové konstrukce. V případě zkušebních těles s odstraněnou krycí vrstvou docházelo spíše k lokálnímu poškození v místě působení zatěžovacího trnu anebo ke zborcení voštinového jádra (Obr. 65).



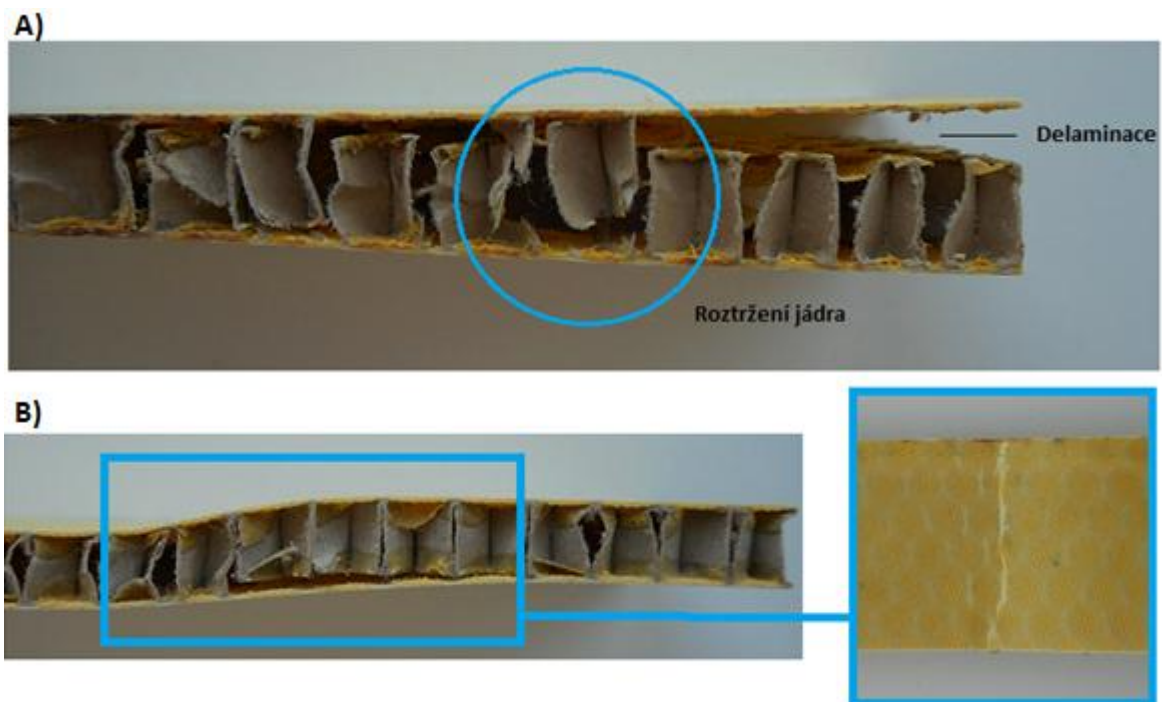
Obr. 64. Porušení soudružnosti mezi jádrem a krycí papírovou vrstvou.



Obr. 65. Lokální poškození v místě zatížení (Obr. A), zborcení jádra (Obr. B).

7.2.2 Výsledky cyklické zkoušky

Jak již bylo uvedeno výše, cyklicky zatěžována byla pouze sendvičová zkušební tělesa s papírovým jádrem bez krycí papírové vrstvy. Během únavové cyklické zkoušky došlo téměř u všech zkušebních těles k porušení soudružnosti dřive, než bylo dosaženo požadovaného počtu cyklů. Pouze jedno zkušební těleso ze šesti vydrželo bez porušení přednastavenou hodnotu 2500 cyklů při nízké amplitudě zatížení $F_a = 50$ N. V průběhu cyklické zkoušky docházelo nejčastěji k porušení soudružnosti mezi jádrem a vnější vrstvou sendvičové konstrukce, které bylo doprovázeno roztržením papírového jádra, popřípadě k lokálnímu poškození voštinového jádra a vnější krycí vrstvy. Vzniklé poruchy během zkoušky jsou znázorněny na následujícím obrázku (Obr. 66).



Obr. 66. Delaminace a roztržení papírového jádra (Obr. A), delaminace a lokální poškození jádra (Obr. B)

7.3 Sendvičové konstrukce s pěnovým PET jádrem

Zkušební vzorky sendvičové konstrukce s polymerním pěnovým jádrem z PET o tloušťce 10 mm byly po cyklické zkoušce opět testovány statickou zkouškou. Výsledné hodnoty efektivního modulu pružnosti a maximální ohybové síly byly porovnány s výsledky cyklicky nezatížených zkušebních těles.

7.3.1 Výsledky statické zkoušky cyklicky nezatížených zkušebních těles

Získané hodnoty efektivního modulu pružnosti E_{ef} a maximální ohybové síly $F_{o_{max}}$ jsou shrnuty v následující tabulce (Tab. 23). Grafické znázornění hodnot a porovnání s výsledky statické zkoušky cyklicky zatížených zkušebních těles je uvedeno v následující podkapitole s číslem 7.3.2. Rovněž závislost maximální ohybové síly na průhybu a vzniklé poruchy během statické zkoušky jsou definovány v této kapitole, neboť docházelo k výskytu totožných poruch.

Tab. 23. Hodnoty statické zkoušky cyklicky nezatížených těles s pěnovým jádrem.

Měření	E_{ef} [MPa]	$F_{o_{max}}$ [MPa]
1.	2740	469
2.	2320	523
3.	2510	488
4.	2780	544
5.	2430	562
6.	2840	519
7.	2850	504
8.	2620	540
9.	2820	468
10.	2180	514
\bar{x}	2609	513
s	226	30

7.3.2 Výsledky statické zkoušky cyklicky zatížených zkušebních těles

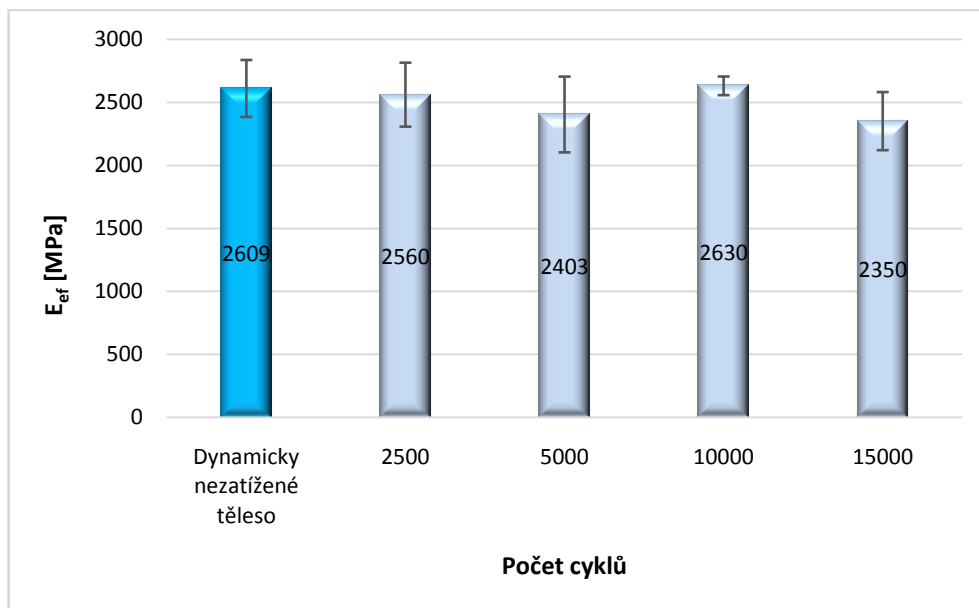
Sendvičové konstrukce s polymerní tuhou pěnou z PET byly cyklicky zatíženy 80 % maximální ohybové síly, získané z výsledků statické zkoušky cyklicky nezatížených zkušebních těles. Testování bylo ukončeno po předem definovaném počtu cyklů (2500, 5000, 10000, 15000). Dynamicky zatížená tělesa byla následně testována statickou zkouškou třibodovým ohybem, z které byly opět získány hodnoty efektivního modulu pružnosti a maximální ohybové síly. V průběhu zkoušky byly pozorovány a zaznamenány vzniklá porušení sendvičové konstrukce. Jednotlivé hodnoty sledovaných veličin jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 24).

Tab. 24. Hodnoty statické zkoušky cyklicky zatížených těles s pěnovým jádrem.

	Měření	Eef [MPa]	Fo _{max} [N]
2500 cyklů	1.	2870	502
	2.	2300	530
	3.	2320	498
	4.	2750	497
	\bar{x}	2560	507
	s	254	14
5000 cyklů	1.	2510	596
	2.	2060	467
	3.	2840	585
	4.	2200	529
	\bar{x}	2403	544
	s	301	51
10000 cyklů	1.	2510	482
	2.	2630	467
	3.	2700	574
	4.	2680	581
	\bar{x}	2630	526
	s	74	52
15000 cyklů	1.	2170	540
	2.	2740	487
	3.	2190	515
	4.	2300	563
	\bar{x}	2350	526
	s	231	28

Na obrázcích (Obr. 67 –71) je pomocí grafů znázorněno porovnání sledovaných parametrů sendvičové konstrukce s jádrem z PET pěny a závislost ohybové síly na průhybu zkušebního tělesa.

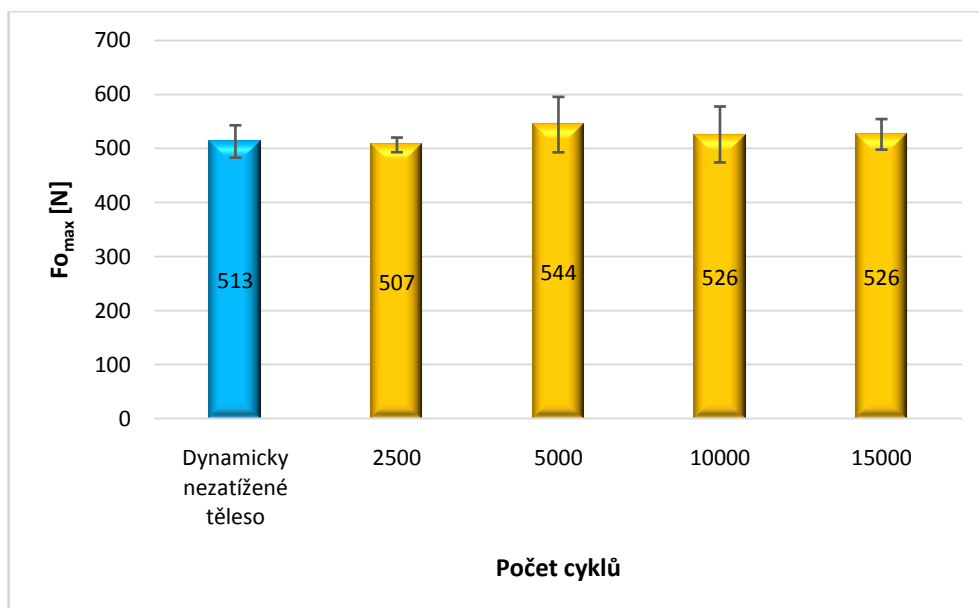
Při porovnání výsledků efektivního modulu pružnosti je patrné, že nedochází k výraznému poklesu tohoto modulu a odchylky hodnot se pohybují pouze v rozmezí chyby měření, která je vyjádřena odhadem směrodatné odchylky (Obr. 67).



Obr. 67. Efektivní modul pružnosti pěnového PET jádra.

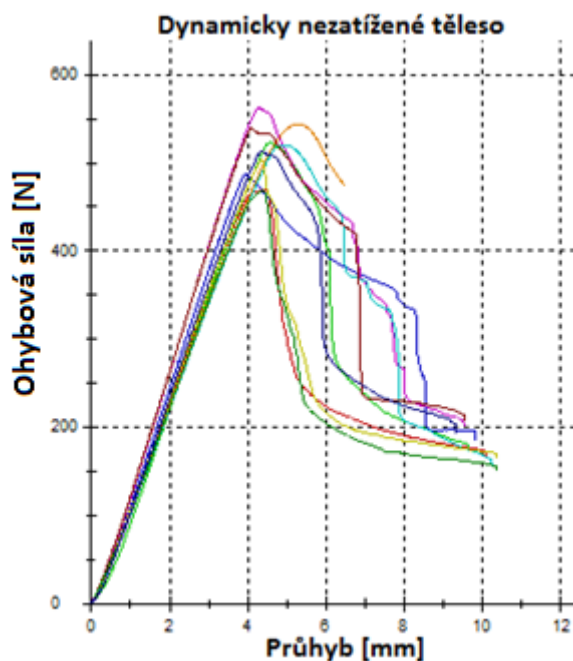
Hodnota maximální ohybové síly, při níž zkušební těleso dosáhlo meze pevnosti, se rovněž jako hodnota efektivního modulu pružnosti pohybovala pouze v rozmezí odhadu směrodatné odchylky a nedošlo tedy ke snížení ohybové pevnosti při dynamickém, cyklickém zatížení (Obr. 68).

Tyto výsledky ukazují dobrou odolnost vůči únavě sendvičových konstrukcí s vnější krycí vrstvou z fenolického prepreg materiálu se skelnou tkaninou a jádrem z polymerní PET pěny s označením AIREX[®] T90 100.

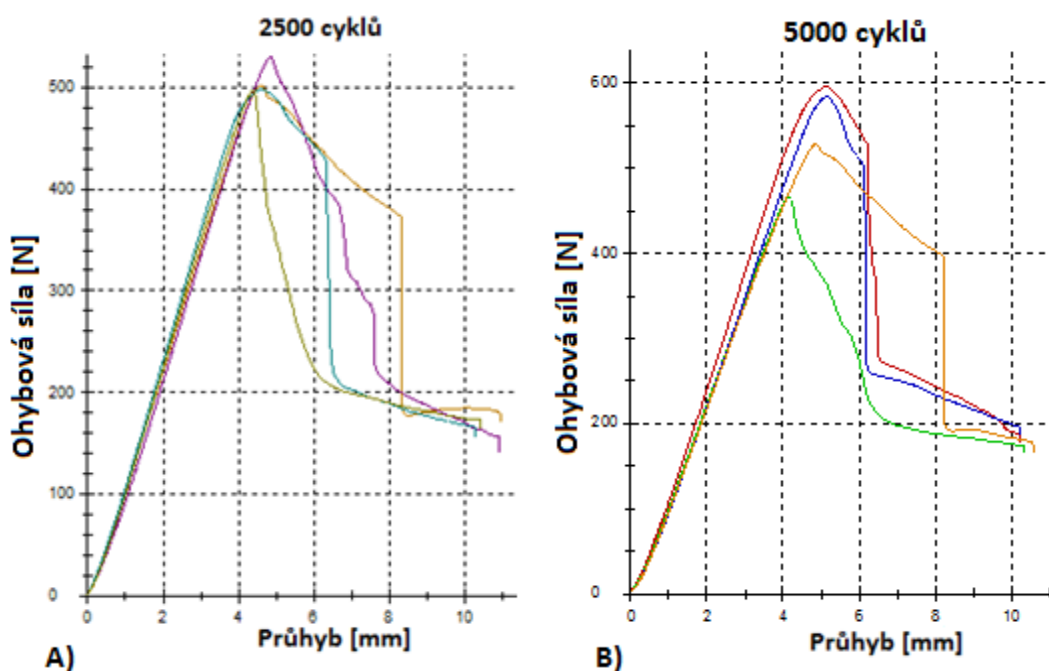


Obr. 68. Maximální ohybová síla pro pěnové PET jádro.

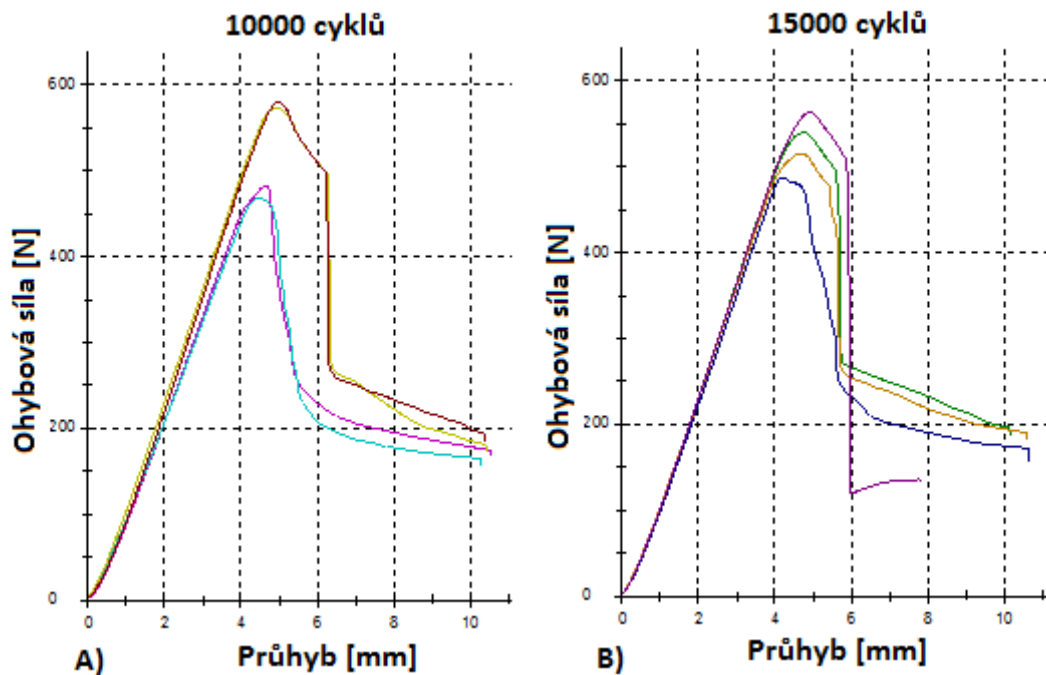
Na níže uvedených obrázcích (Obr. 69 –71) jsou znázorněny jednotlivé průběhy závislosti ohybové síly na průhybu zkušebního tělesa. Z obrázků je patrné že strmost křivky průběhu se s rostoucím počtem cyklů výrazně nemění. V místě náhlého strmého poklesu ohybové síly došlo k lokální poruše vnější krycí vrstvy a postupné deformaci jádra.



Obr. 69. Závislost $F_{o_{max}}$ na průhybu dynamicky nezatíženého tělesa.



Obr. 70. Závislost $F_{o_{max}}$ na průhybu zatíženého tělesa 2500 cykly (Obr. A) a 5000 cykly (Obr. B).



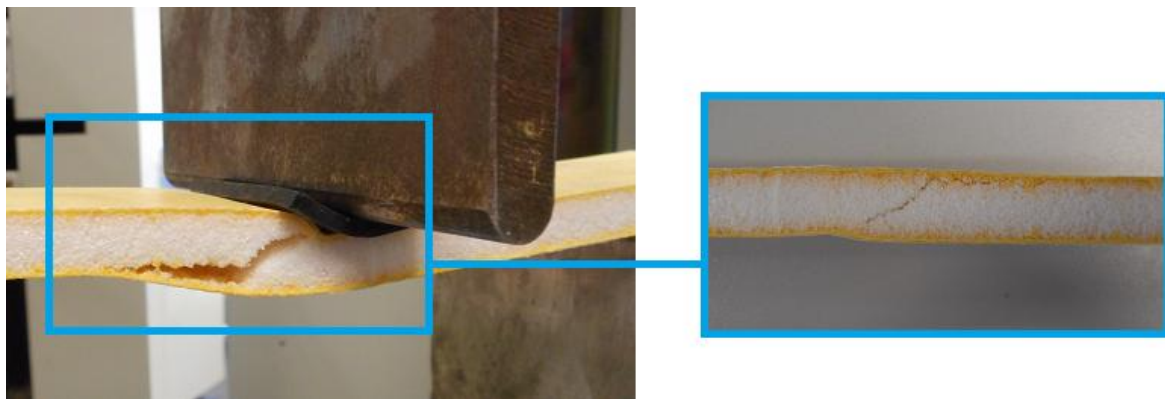
Obr. 71. Závislost $F_{o_{max}}$ na průhybu zatíženého tělesa 10000 cykly (Obr. A) a 15000 cykly (Obr. B).

➤ Poruchy vzniklé během zkoušky

V průběhu statické zkoušky sendvičových konstrukcí s pěnovým PET jádrem došlo u většiny cyklicky zatížených i nezatížených zkušebních těles ke stejnému typu porušení. V obou případech docházelo k lokálnímu porušení vnější krycí vrstvy sendvičové konstrukce a k postupnému, dále probíhajícímu deformování pěnového jádra. Pouze u dynamicky zatíženého zkušebního tělesa 15000 cykly se vyskytl jiný typ poruchy a to smykové porušení jádra, které bylo doprovázeno trhlinou pěnového jádra a lokální poruchou vnější krycí vrstvy sendvičové konstrukce.



Obr. 72. Lokální porušení vnější krycí vrstvy konstrukce s pěnovým jádrem.



Obr. 73. Smykové porušení pěnového PET jádra.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce byla studie únavového chování vrstvených sendvičových konstrukcí, které byly vyrobeny s vnější krycí vrstvou z fenolického prepreg materiálu se skelnou tkaninou a různým typem jádra. Pro jádro sendvičové konstrukce byly vybrány tři různé materiály a to hliníkové voštinové jádro, papírové voštinové jádro a nakonec pěnové polymerní PET jádro.

Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Část teoretická je dále rozdělena do tří kapitol, kde v první kapitole jsou obecně popsány sendvičové struktury, používané materiály a jejich výroba. Další kapitola je zaměřena na charakter zatěžování, zkoušky mechanických vlastností a poruchy sendvičových konstrukcí. Kapitola poslední uvede čtenáře do problematiky únavy kompozitních materiálů, charakterizuje významné parametry a v neposlední řadě formuluje únavové závislosti. Praktická část diplomové práce slouží k popisu použitých materiálů a výroby zkušebních těles, definuje mechanické testování těles a především obsahuje diskuzi výsledků, ve které jsou porovnány sledované materiálové charakteristiky a vzniklá porušení sendvičové konstrukce.

Testování bylo prováděno tak, že se nejdříve stanovily sledované materiálové charakteristiky, konkrétně efektivní modul pružnosti, maximální ohybová síla a případně průhyb dynamicky nezatížených zkušebních těles, pomocí statické zkoušky tříbodovým ohybem. Následovala cyklická zkouška, která byla ukončena po dosažení předem stanoveného počtu cyklů, případně ve chvíli vzniku poruchy vedoucí k selhání sendvičové konstrukce. Zkušební tělesa, u kterých nedošlo k porušení během cyklické zkoušky, byla opět podrobena statickému zatížení a získané hodnoty byly porovnány s výsledky statické zkoušky dynamicky nezatížených těles. Závěry studie únavového chování zkušebních vzorků sendvičové konstrukce jsou následující.

Z výsledků statické zkoušky dynamicky nezatížených těles s hliníkovým voštinovým jádrem o tloušťce 3, 7, 9, 16 a 20 mm vyplývá, že nejvyššího efektivního modulu pružnosti dosahují tělesa s tloušťkou jádra 3 mm a že tento modul klesá s rostoucí tloušťkou jádra. Při porovnání maximální ohybové síly, která definuje ohybovou pevnost, docházelo k růstu se zvyšující se tloušťkou jádra. Výjimku pouze tvořily zkušební tělesa s tloušťkou 20 mm, u kterých byla naměřena nižší hodnota maximální ohybové síly v porovnání s tělesy o tloušťce 16 mm. V případě zkušebních těles s hliníkovým jádrem byl rovněž sledován průhyb neboli vzniklá deformace v milimetrech ve chvíli dosažení maximální ohybové síly

a je z výsledků patrné, že se zvyšující se tloušťkou jádra průhyb klesá. Během zkoušky dynamicky nezatížených těles byla taky sledována vzniklá porušení a ve většině případů docházelo k porušení soudružnosti jádra s vnější krycí vrstvou neboli k delaminaci, popřípadě k lokálnímu poškození v místě zatěžovacího trnu. Při pozorování výsledků statické zkoušky cyklicky zatížených zkušebních těles bylo patrné, že ve většině případů dochází ke změnám pouze v rozmezí chyby měření, která je vyjádřena směrodatnou odchylkou, a tudíž nedochází k výrazným změnám mechanických vlastností. Poruchy vzniklé během statické zkoušky byly obdobné jako u dynamicky nezatížených zkušebních těles.

Výše uvedené výsledky potvrzují, že sendvičové konstrukce složené z prepreg materiálu PHG840-300-42 a hliníkového voštinového jádra ECM 6.4 – 82, vykazují dobrou odolnost vůči únavě a jsou vhodné pro aplikace, kde se předpokládá krátkodobé cyklické zatížení.

Zkušební tělesa s papírovým voštinovým jádrem byla vyrobena ve dvojím provedení. Z výsledků statické zkoušky je zřejmé, že po odstranění papírové vrstvy dojde k výraznému zlepšení mechanických vlastností. K rozdílu pravděpodobně došlo v důsledku nekvalitního spojení mezi papírovou krycí vrstvou a voštinovým jádrem. U zkušebních těles s papírovou krycí vrstvou docházelo nejčastěji k porušení soudružnosti v adhezni vrstvě mezi voštinovým jádrem a papírovou krycí vrstvou. V případě těles s odstraněnou krycí vrstvou docházelo spíše k lokálnímu poškození v místě působení zatěžovacího trnu anebo ke zborcení voštinového jádra. Cyklicky zatěžována byla pouze zkušební tělesa s odstraněnou papírovou vrstvou. V průběhu cyklické zkoušky došlo u většiny zkušebních těles k selhání dříve, než byl dosažen požadovaný počet cyklů. Nejčastěji docházelo k porušení soudružnosti mezi jádrem a vnější vrstvou sendvičové konstrukce, což bylo doprovázeno roztržením papírového jádra, popřípadě lokálním poškozením voštinového jádra a vnější krycí vrstvy.

Z cyklické zkoušky vyplývá, že papírové voštinové jádro použité pro výrobu zkušebních těles není vhodné pro dynamické cyklické zatížení.

Sendvičové konstrukce s pěnovým PET jádrem s označením AIREX[®] T90 nevykazovaly pokles efektivního modulu pružnosti ani maximální ohybové síly a odchylky hodnot se pohybovaly pouze v rozmezí chyby měření. Sledované poruchy měly shodný charakter, jak v případě cyklicky zatížených, tak cyklicky nezatížených těles. Docházelo k lokálnímu porušení vnější krycí vrstvy sendvičové konstrukce a k postupnému deformování pěnového

jádra. V jednom případě se vyskytlo smykové porušení jádra, které bylo doprovázeno trhlinou a lokální poruchou vnější krycí vrstvy sendvičové konstrukce.

Z tohoto zjištění je patrné, že sendvičové konstrukce s vnější vrstvou z prepreg materiálu PHG840-300-42 a jádra z polymerní PET pěny AIREX[®] T90, jsou odolné vůči únavě materiálu a dynamickému zatížení a jsou vhodné pro aplikace, kde se toto zatížení předpokládá.

Část cyklicky zatížených těles vykazovala při statické zkoušce vyšší průměrné hodnoty sledovaných veličin v porovnání s tělesy dynamicky nezatíženými. Toto vychýlení bylo pravděpodobně způsobeno statistickou chybou, neboť z důvodu časové náročnosti cyklické zkoušky bylo množství dynamicky zatížených těles nižší v porovnání s dynamicky nezatíženými.

Všechny uvedené výsledky poslouží k získání informací o statickém, ale hlavně únavovém chování připravených sendvičových konstrukcí, kdy zejména tyto výsledky jsou v praxi uplatnitelné.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ZENKERT, Nordic Industrial Fund. Ed.: *D.The handbook of sandwich construction*, CradleyHeath, WestMidlands: Engineering Materials Advisory Services Ltd. (EMAS), 1997, 370 p. ISBN 09-478-1796-4.
- [2] BOUKHAROUBA, Wahid, Abderrezak BEZAZI, Fabrizio SCARPA. 2014. Identification and prediction of cyclic fatigue behaviour in sandwich panels. *Elsevier*
- [3] DAVIES, J. *Lightweight sandwich construction*. Malden, MA: Blackwell Science, 2001, 370 p. ISBN 06-320-4027-0.
- [4] Prepreg Technology. In: *Hexcel.com - Technology Manuals* [online]. [cit. 2015-01-11]. Dostupné z: http://www.hexcel.com:82/pdf/Technology%20Manuals/Prepreg_Technology/index.html#?page=0
- [5] Překližka vodovzdorná OcoumeCombi B/BB JAF HOLZ spol. JAF HOLZ spol. s r. o. [online]. [cit. 2014-12-07]. Dostupné z: <http://www.jafholz.cz/shop/konstrukcni-desky/preklizky-a-latovky/truhlarske-preklizky/preklizka-vodovzdorna-ocoume-combi-bbb~p330064?category=829308>.
- [6] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [7] Vlákna. In: *KOMPOZITY - Ing. Zdenek Korinek, CSc.* [online]. [cit. 2014-11-01]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/vlakna.pdf>.
- [8] Understanding the Basics of Prepregs. *About Money* [online]. [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: <http://composite.about.com/od/eqptprepreggers/a/What-Are-Prepregs.htm>.
- [9] What Are Prepregs Fibre Glast. *Fibre Glast Developments Corp. Fiber glass & Composite Materials* [online]. [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: https://www.fibreglast.com/product/about-prepregs/Learning_Center.
- [10] Prepreg technologie. In: *FORM s.r.o.* [online]. 2014 [cit. 2014-12-02]. Dostupné z: <http://www.form-composite.com/prepreg>
- [11] Dřevo - BALSÁ. *Dřevo - DRUHÝ DŘEVA A JEJICH VLASTNOSTI* [online]. [cit. 2014-12-08]. Dostupné z: <http://prace-se-drevem.spibi.cz/Drevo-Druhy-Balsa.html>

- [12] Bunkovételesá – Penové materiály, II. Výroba bunkových te-
lies. *Posterus.sk, portál pre odborné publikovanie* [online]. [cit. 2014-12-
30]. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=7871>
- [13] Sandwich panels, Sandwich tiles - Allboating and marine industry manu-
facturers - Videos. *Nautic Expo – The Virtual Boat and Marine Show: mo-
torboat, sailboat, yacht, marine hardware, sailingdinghy, workboat* [online].
[cit. 2014-12-30]. Dostupné z: [http://www.nauticexpo.com/boat-
manufacturer/sandwich-panel-2324.html](http://www.nauticexpo.com/boat-
manufacturer/sandwich-panel-2324.html)
- [14] BITZER, By Tom. *Honeycomb Technology Materials, Design, Manufactu-
ring, Applications and Testing*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1997.
ISBN 978-940-1064-743.
- [15] Hex Web Honeycomb Attributes and Properties. In: *Hexcel.com -
Carbonfiber and composites for aerospace, windenergy and
industrial* [online]. [cit. 2015-01-03].
Dostupné z: [http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-
Sheets/Honeycomb_Attributes_and_Properties.pdf](http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-
Sheets/Honeycomb_Attributes_and_Properties.pdf)
- [16] Technologie jejich popis a schémata. *Havel Composites* [online]. [cit. 2015-
01-03].
Dostupné z: [http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-
Technologie-jejich-popis-a-schemata.html](http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-
Technologie-jejich-popis-a-schemata.html)
- [17] Manufacturing. *Welcome to NetComposites* [online]. [cit. 2015-01-03].
Dostupné z: <http://www.netcomposites.com/guide/manufacturing/50>
- [18] Honeycomb Sandwich Design Technology. In: *Hexcel.com – Carbon fiber
and composites for aerospace, wind energy and industrial* [online]. [cit.
2015-01-03]. Dostupné
z: [http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-
Sheets/Honeycomb_Sandwich_Design_Technology.pdf](http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-
Sheets/Honeycomb_Sandwich_Design_Technology.pdf)
- [19] DILLINGER, Josef. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Vyd. 1. Praha:
Europa-Sobotáles, 2007, 608 s. ISBN 978-80-86706-19-1.
- [20] Objectives template. *II Ts and II Scearning Courses in Engineering and
Science under NPTEL* [online]. [cit. 2015-01-14].
Dostupné z: http://nptel.ac.in/courses/101104010/lecture39/39_6.htm
- [21] ŠUBA, Oldřich. Vyd. 3. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010. ISBN
978-807-3189-488.

- [22] Best Practice Guide for Sandwich Structures in Marine Applications. In: *TRIP - Transport Research & Innovation Portal* [online]. [cit. 2015-01-21]. Dostupné z: http://www.transportresearch.info/Upload/Documents/201302/20130201_105501_16344_RevisedBPGv1-00---Report-Format.pdf
- [23] RŮŽIČKA, Milan a Jiří FIDRANSKÝ. Pevnost a životnost letadel. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000, 206 s. ISBN 80-01-02254-4.
- [24] VOJTĚCH, Dalibor. *Materiály a jejich mezní stavy*. Vyd. 1. V Praze: Vysoká škola chemicko-technologická, 2010, 204 s. ISBN 9788070807415.
- [25] VASSILOPOULOS, Anastasios P. *Fatigue life prediction of composites and composite structures: edited by Anastasios P. Vassilopoulos*. Oxford: Woodhead Publishing, 2010, 552 p. Woodhead Publishing in materials. ISBN 14-398-2789-3.
- [26] RAO, R Vijayalakshmi; MANUJESH, B J. Behavior of Sandwich Composites Under Flexural and Fatigue Loading: Effect of Variation of Core Density. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2011, vol. 3, no. 10 s. 7598-7607. ISSN:0975-5462.
- [27] GURIT. *Materiálový list prepregu PHG840-300-42*. 2008.
- [28] EURO-COMPOSITES. *Materiálový list hliníkové voštiny ECM 6,4-82*. 2013.
- [29] AIREX AG. *Materiálový list polymerní PET pěny AIREX® T90 100*. 2015.
- [30] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [31] C393/C393M. *Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Construction by Beam Flexure*. 2012. ASTM International.
- [32] ČSN EN ISO 14125. *Vlákny vyztužené plastové kompozity - Stanovení ohybových vlastností*. 1999.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PAN	Polyakrylonitril.
HS	Uhlíková vlákna HighStrength.
LM	Nízko modulová vlákna LowModulus.
HM	Vysoko modulová vlákna HighModulus .
IM	Uhlíková vlákna IntermediateModulus.
SHT	Uhlíková vlákna Super High-tensile.
ρ	Hustota materiálu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$].
σ_{Pt}	Pevnost v tahu [Pa].
E_{\parallel}	Modul pružnosti v tahu ve směru vláken[Pa].
E_{\perp}	Modul pružnosti v tahu kolmo na vlákna[Pa].
δ	Tažnost [%].
UP-R	Nenasycené polyesterové pryskyřice.
EP-R	Epoxidové pryskyřice.
VE-R	Vinylesterové pryskyřice.
PFA-R	Fenakrylátové pryskyřice.
MA-R	Metakrylátové pryskyřice.
$^{\circ}\text{C}$	Celsiův stupeň.
PUR	Polyuretan.
EPS	Expandovaný polystyren.
XPS	Extrudovaný polystyren.
EPP	Polypropylenová pěna.
PE	Polyethylen.
PVC	Polyvinylchlorid.
PET	Polyethylentereftalát.

RTM	Vysokotlaké vstřikování.
VA-RTM	Vysokotlaké vstřikování s podporou vakua.
F	Síla [N]
H	Tloušťka zkušebního tělesa [mm]
l_0	Vzdálenost podpěr [mm]
l_i	Vzdálenost zatěžovacích trnů [mm]
L	Délka zkušebního tělesa [mm]
T	Posouvající síla [N]
M_o	Ohybový moment [Nm]
c_A	Konstantní amplituda zatížení.
$\sigma_{\max/\min}$	Maximální, nebo minimální napětí [Pa].
σ_m	Střední hodnota napětí [Pa].
σ_a	Amplituda zatížení.
$\Delta\sigma$	Rozsah napětí.
f	Frekvence [Hz].
R	Poměr napětí.
E_{ef}	Efektivní modul pružnosti [Pa].
$F_{o_{\max}}$	Maximální ohybová síla [N].
y	Průhyb [mm]
\bar{x}	Aritmetický průměr.
s	Odhad směrodatné odchylky.

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Složení sendvičové konstrukce.</i>	12
<i>Obr. 2. Dřevěná překližka. [5]</i>	14
<i>Obr. 3. Druhy vazeb vyztužujících vláken. [4]</i>	15
<i>Obr. 4. Prepreg s uhlíkovou tkaninou. [10]</i>	17
<i>Obr. 5. A) sendvičový panel s jádrem z balsy; B) s jádrem z PE pěny. [13]</i>	19
<i>Obr. 6. Nejpoužívanější tvary buněk voštinových jader. [15]</i>	19
<i>Obr. 7. Technologie tvarování kovových voštinových jader. [12]</i>	20
<i>Obr. 8. Technologie HOBE pro kovové materiály. [12]</i>	20
<i>Obr. 9. Schéma technologií ručního kladení a stříkání. [17]</i>	22
<i>Obr. 10. Lisování mezi vyhřívanými deskami. [18]</i>	22
<i>Obr. 11. Lisování v uzavřené formě. [18]</i>	23
<i>Obr. 12. Výroba sendvičové konstrukce lisováním pomocí vakua. [4]</i>	23
<i>Obr. 13 Technologie vysokotlakého vstřikování RTM. [17]</i>	24
<i>Obr. 14. A) Podobnost sendvičové konstrukce s I-profilem. B) Vzniklá napětí při zatížení ohybem. [18]</i>	25
<i>Obr. 15. Průběh posouvající síly Q a ohybového momentu M při zkoušce tří- a čtyřbodovým ohybem. [20]</i>	27
<i>Obr. 16. Příklady poruch sendvičových konstrukcí. [22]</i>	28
<i>Obr. 17. Schéma čtyř základních faktorů ovlivňujících</i>	30
<i>Obr. 18. Průběh poškozování u homogenních a vláknitých materiálů. [6]</i>	32
<i>Obr. 19. Základní terminologie sinusového průběhu. [25]</i>	34
<i>Obr. 20. Oblasti zatížení během únavové zkoušky. [25]</i>	35
<i>Obr. 21. Nejčastěji používané průběhy zatěžovací křivky.</i>	36
<i>Obr. 22. S-N diagram. [25]</i>	37
<i>Obr. 23. Prepreg materiál PHG840-300-42.</i>	40
<i>Obr. 24. Hliníková voština ECM 6.4 – 82 s tloušťkou jádra 3 mm (Obr. A) a s tloušťkou jádra 9 mm (Obr. B).</i>	42
<i>Obr. 25. Papírová voština s krycí vrstvou (obr. A); papírová voština se sejmutou krycí vrstvou (obr. B).</i>	43
<i>Obr. 26. Polymerní PET pěna AIREX[®] T90 100.</i>	44
<i>Obr. 27. Materiálová skladba sendvičové konstrukce s papírovým jádrem.</i>	46
<i>Obr. 28. Kladení prepregu na PET pěnu (Obr. A) a papírovou voštinu (Obr. B).</i>	46

Obr. 29. Laboratorní lis (Obr. A); vytvrzená sendvičová konstrukce s papírovým voštinovým jádrem (Obr. B).	47
Obr. 30. Pilový kotouč (Obr. A); zkušební těleso s papírovým jádrem (Obr. B).	47
Obr. 31. Materiálová skladba sendvičové konstrukce	48
Obr. 32. Návin prepregu v ochranném obalu (Obr. A); řezací plotr (Obr. B); forma opatřená vrstvou separačního vosku (Obr. C); kladení jednotlivých vrstev sendvičové konstrukce (Obr. D).	49
Obr. 33. Separační tkanina (Obr. A); odsávací tkanina (Obr. B); vakuovací fólie, utěsněná oboustrannou páskou a spojky pro připojení hadic (Obr. C).	50
Obr. 34. Zavakuovaná forma a budík pro kontrolu podtlaku.	50
Obr. 35. Schéma zkoušky tříbodovým ohybem.[32].	52
Obr. 36. Zkušební stroj ZWICK 1456 a uspořádání zkoušky tříbodovým ohybem.	53
Obr. 37. Zkušební stroj INSTRON 8871 a detail uspořádání zkoušky.	54
Obr. 38. Parametry cyklické zkoušky.	55
Obr. 39. Efektivní modul pružnosti cyklicky nezatíženého hliníkového voštinového jádra.	57
Obr. 40. Maximální ohybová síla cyklicky nezatížených těles.	58
Obr. 41. Maximální průhyb při maximální ohybové síle.	59
Obr. 42. Závislost $F_{o_{max}}$ na průhybu pro tloušťku jádra 3 mm.	60
Obr. 43. Závislost $F_{o_{max}}$ na průhybu pro tloušťku jádra 7 mm.	60
Obr. 44. Závislost $F_{o_{max}}$ na průhybu pro tloušťku jádra 9 mm.	61
Obr. 45. Závislost $F_{o_{max}}$ na průhybu pro tloušťku jádra 16 mm.	61
Obr. 46. Závislost $F_{o_{max}}$ na průhybu pro tloušťku jádra 20 mm.	62
Obr. 47. Delaminace a trhlina hliníkového voštinového jádra o tloušťce 3 mm.	62
Obr. 48. Plošná delaminace hliníkového voštinového jádra o tloušťce 20 mm.	63
Obr. 49. Lokální poškození hliníkového voštinového jádra.	63
Obr. 50. Shrnutí průměrných hodnot výsledků statické zkoušky cyklicky nezatížených zkušebních těles.	64
Obr. 51. Efektivní modul pružnosti cyklicky zatížených těles s tloušťkou 3 mm.	66
Obr. 52. Maximální ohybová síla cyklicky zatížených těles s tloušťkou 3 mm.	67
Obr. 53. Průhyb při $F_{o_{max}}$ cyklicky zatížených těles s tloušťkou 3 mm.	67
Obr. 54. Efektivní modul pružnosti cyklicky zatížených těles s tloušťkou 7 a 9 mm.	69
Obr. 55. Maximální ohybová síla cyklicky zatížených těles s tloušťkou 7 a 9 mm.	70

<i>Obr. 56. Průhyb při $F_{o_{max}}$ cyklicky zatížených těles s tloušťkou 7 a 9 mm.</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 57. Efektivní modul pružnosti cyklicky zatížených těles s tloušťkou 16 a 20 mm.</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 58. Maximální ohybová síla cyklicky zatížených těles s tloušťkou 16 a 20 mm.</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 59. Průhyb při $F_{o_{max}}$ cyklicky zatížených těles s tloušťkou 16 a 20 mm.</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 60. Ukázka plošné delaminace a zborcení jádra.</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 61. Ukázka další vzniklé delaminace.</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 62. Efektivní modul pružnosti papírového voštinového jádra (Obr. A), Závislost $F_{o_{max}}$ na průhybu pro jádro s papírovou krycí vrstvou (Obr. B).</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 63. Maximální ohybová síla pro papírové voštinové jádro (Obr. A), závislost $F_{o_{max}}$ na průhybu pro jádro bez papírové krycí vrstvy (Obr. B).</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 64. Porušení soudružnosti mezi jádrem a krycí papírovou vrstvou.</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 65. Lokální poškození v místě zatížení (Obr. A), zborcení jádra (Obr. B).</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 66. Delaminace a roztržení papírového jádra (Obr. A), delaminace a lokální poškození jádra (Obr. B)</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 67. Efektivní modul pružnosti pěnového PET jádra.</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 68. Maximální ohybová síla pro pěnové PET jádro.</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 69. Závislost $F_{o_{max}}$ na průhybu dynamicky nezatíženého tělesa.</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 70. Závislost $F_{o_{max}}$ na průhybu zatíženého tělesa 2500 cykly (Obr. A) a 5000 cykly (Obr. B).</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 71. Závislost $F_{o_{max}}$ na průhybu zatíženého tělesa 10000 cykly (Obr. A) a 15000 cykly (Obr. B).</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 72. Lokální porušení vnější krycí vrstvy konstrukce s pěnovým jádrem.</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 73. Smykové porušení pěnového PET jádra.</i>	<i>84</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Porovnání homogenního materiálu a sendvičové konstrukce s různou tloušťkou.</i> [4]	13
<i>Tab. 2. Přehled vlastností vláken.</i> [6]	16
<i>Tab. 3. Vytvrzovací podmínky prepregu PHG840-300-42.</i> [27].....	41
<i>Tab. 4. Vlastnosti prepregu PHG840-300-42.</i> [27].....	41
<i>Tab. 5. Rozměry hliníkové voštiny ECM 6.4 – 82.</i>	41
<i>Tab. 6. Vlastnosti hliníkové voštiny ECM 6.4 – 82.</i> [28]	42
<i>Tab. 7. Rozměry buněk papírové voštiny.</i>	42
<i>Tab. 8. Vlastnosti polymerní PET pěny AIREX® T90 100.</i> [29]	43
<i>Tab. 9. Technické údaje laboratorního lisu.</i>	45
<i>Tab. 10. Parametry zkušebního stroje ZWICK 1456.</i>	52
<i>Tab. 11. Parametry zkoušky pro hliníkové voštinové jádro.</i>	55
<i>Tab. 12. Parametry zkoušky pro papírové jádro a polymerní PET jádro.</i>	55
<i>Tab. 13. Efektivní modul pružnosti cyklicky nezatíženého hliníkového jádra.</i>	57
<i>Tab. 14. Maximální ohybová síla před cyklickou zkouškou.</i>	58
<i>Tab. 15. Maximální průhyb cyklicky nezatížených zkušebních těles.</i>	59
<i>Tab. 16. Shrnutí průměrných hodnot statické zkoušky cyklicky nezatížených zkušebních těles.</i>	64
<i>Tab. 17. Výsledky statické zkoušky cyklicky zatížených těles s tloušťkou 3 mm.</i>	65
<i>Tab. 18. Výsledky statické zkoušky cyklicky zatížených těles s tloušťkou 7 mm.</i>	68
<i>Tab. 19. Výsledky statické zkoušky cyklicky zatížených těles s tloušťkou 9 mm.</i>	68
<i>Tab. 20. Výsledky statické zkoušky cyklicky zatížených těles s tloušťkou 16 mm.</i>	71
<i>Tab. 21. Výsledky statické zkoušky cyklicky zatížených těles s tloušťkou 20 mm.</i>	71
<i>Tab. 22. Výsledky statické zkoušky zkušebních těles s papírovým jádrem.</i>	75
<i>Tab. 23. Hodnoty statické zkoušky cyklicky nezatížených těles s pěnovým jádrem.</i>	79
<i>Tab. 24. Hodnoty statické zkoušky cyklicky zatížených těles s pěnovým jádrem.</i>	80

SEZNAM PŘÍLOH

- PŘÍLOHA PI Materiálový list prepregu PHG840-300-42.
- PŘÍLOHA PII Materiálový list hliníkového voštinového jádra ECM 6.4 – 82.
- PŘÍLOHA PIII Materiálový list pěnového PET jádra AIREX[®] T90 100.

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST PREPREGU PHG840-300-42



PH840-300-42

- Fiber reinforced thermosetting prepregated materials for railway parts (e.g. fairings, window, ceiling and floor panels).
- Woven fabric of E-glass filament yarn, 300 g/m², 8H satin, prepregated with 42% phenolic resin PH840.
- Long shelf and shop life
- Excellent FST behaviour
- Excellent mechanical behaviour
- Good surface finish
- Autoclave-free processes possible
- Short curing time 10 min at 160°C

Description

PH840-300-42 is a halogenfree modified phenolic system, designed for laminate with bright colour and good surface quality. This prepreg material has been developed for industrial and rail applications. with high specific mechanical properties and excellent FST (low heat-release and smoke-density) behaviour.

The resin matrix PH840 can be cured at a temperature range between 120 C and 160 C. Monolithic and sandwich structures can be easily manufactured with this prepreg. The curing can be performed by press, vacuum and autoclave moulding with a pressure of at least 0.07 N/mm².

Such composite structures can be exposed easily to temperatures in the range of -55°C up to +80°C.

Cured laminates fulfil the flame-retardant Rail specifications:

- BS 476-6 and 7 Class 1, BS 6853 R. 025, NF-F 16-101/102 (M1, F1)
- UNE 23-721 (M1), DIN 5510 S4, SR2, ST2, DIN EN 45545 under testing

The prepreg material is suitable for:

- Rail industries
- Machine industries
- Marine and automotive applications

Prepreg Properties

	Test method	Value
Resin		Phenolic
Prepreg Weight	EN 2329	525 ±30 g/m ²
Volatile	EN 2330 (160°C/10min)	< 6.0 %
Resin Flow	EN 2332 (3 plies, 135°C, 8min, 4 bar)	> 10 %
Tackiness		T0, T1, T2
Fibre Material		E-glass
Fabric Weight	EN 2331	296 g/m ² ±5 %
Weave Style		8H satin
Service Temperature (Cured State)		-55°C to +80°C
Resin Content	EN 2331	42.0 ±3%

Delivery Form and Storage

Prepreg sizes	Roll length / Roll width	50 / 1.0 m
Storage Life (from delivery date)	Days at RT / Month at -18°C	

Curing Conditions

		Cycle
Temperature		120/130/140/160°C
Cure Time		90/60/30/10 min
Spec. Pressure		0.07- 0.4 MPa
Heat-up		2 to 5 K/min
Cool-down		2 to 5 K/min
Remove material at		< 80°C
Recommended curing process		Vacuum bag / Oven, Press, Autoclave

Mechanical Properties (Typical Values)

	Temp. [°C]	Standard	Results	
Flexural Strength (warp)	RT 80	ISO 178	450 300	MPa
Flexural Modulus (warp)	RT 80	ISO 178	22 19	GPa
Tensile Strength (warp)	RT 80	ISO 527-4		MPa
Tensile Modulus (warp)	RT	ISO 527-4		GPa
Compressive Strength (warp)	RT 80	EN 2850	-- --	MPa
Compressive Modulus (warp)	RT	EN 2850	--	GPa
Interlaminar Tensile Shear Strength (warp)	RT 80	AITM 1.0019/1B	18 16	MPa
Climbing Drum Peel ¹	RT 80	EN 2243-3	110 --	N/75 mm
Bending Load (4-P.) ¹	RT 80	AITM 1.0018 Fig.2	850 --	N
Tg (TMA)		TMA	> 80	°C

¹Sandwichstructure

Burning Behavior

		Test method	Max. mean values	
Flammability vertical, 60s flaming	burn length after flame time after flame time of drips	AITM 2.0002A	60 5 --	mm s s
Max. specific optical smoke density within 4 min	flaming mode	AITM 2.0007A	5	Ds
Heat release		AITIM 2.0006	25	$\frac{kW}{m^2}$
Heat release rate		AITIM 2.0006	25	$\frac{kW \cdot min}{m^2}$



Notice

The data have been obtained from representative sample specimens. Because the properties depend strongly on the fabrication and testing conditions, Gurit cannot guarantee that the data listed above will be achieved with other processes and equipment.

Gurit (Zulwil) AG

Fabrikweg 54
CH-4234 Zulwil
Switzerland

T +41 (0) 61 795 06 01

F +41 (0) 61 795 06 04

Gurit (Kassel) GmbH

Otto-Hahn-Str. 5
D-34 123 Kassel
Germany

T +49 (0) 56 1 99 85 63 0

F +49 (0) 56 1 99 85 63 22

E info@gurit.com

W www.gurit.com

PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST HLINÍKOVÉHO VOŠTINOVÉHO JÁDRA ECM 6.4 – 82



EURO-COMPOSITES® Aluminum Honeycomb Core
Technical Data Sheet for all types

Material: Alu-Alloy 3003 (AlMnCu)
Corrosion protection: chromium oxide coated

Mechanical Properties	Unit	Test method	Typical values							
			ECM 3.2-130	ECM 4.8-77	ECM 6.4-60	ECM 6.4-82	ECM 9.6-41	ECM 9.6-55	ECM 12.7-42	ECM 19.2-29
Foil Thickness	µm	ECP 231-04	60	60	60	80	60	80	80	80
Cell Size, Nominal	mm	DIN 29970	3.2	4.8	6.4	6.4	9.6	9.6	12.7	19.2
Density, Nominal	kg/m ³	DIN 29970	130	77	60	82	41	55	42	29
Compression Strength Unstab.	N/mm ²	DIN 53291	7.00	3.94	2.96	4.25	1.73	2.24	1.00	0.69
Compression Strength Stab.	N/mm ²	DIN 53291	-	-	3.55	4.50	-	2.75	-	-
Crush strength	N/mm ²	NHTSATP-24-214D-02**	3.380	1.679	-	1.665	0.574	0.891	-	0.263
Plate Shear Strength/ L-Dir.	N/mm ²	DIN 53294	4.00	2.29	1.72	2.40	1.13	1.48	1.00	0.66
Plate Shear Modul/ L-Dir.	N/mm ²	DIN 53294	550	456	370	430	227	253	193	201
Plate Shear Strength/ W-Dir.	N/mm ²	DIN 53294	2.50	1.52	0.95	1.40	0.60	0.88	0.46	0.32
Plate Shear Modul/ W-Dir.	N/mm ²	DIN 53294	350	265	166	220	98	170	87	54
Service Temperature	°C	-	-55°C up to 177°C							

Micro-Perforated: All Honeycomb ECM core types can be delivered, if required, as micro-perforated

Honeycomb: Aluminum core types ECM-P

*- Thickness of test sheet: 15.87 mm

** - Thickness of test sheet: 25.40 mm

PŘÍLOHA P III: MATERIÁLOVÝ LIST PĚNOVÉHO PET JÁDRA AIREX[®] T90 100

AIREXBALTEK**BANOVA**

DATA SHEET

03.2015 (replaces 02.2012)

AIREX[®] T90

The Fire Resistant Structural Foam

CHARACTERISTIC

- Superior fire resistance (FAR 25.853; NF 16-101; DIN 5510)
- Outstanding fatigue strength
- Excellent long term thermal stability up to 100 °C (212 °F)
- Best thermal stability in process up to 150 °C (302 °F)
- Good thermal insulation
- Highly consistent material properties
- Easy to process with all types of resin and lamination processes
- Good adhesion (skin-to-core bond)
- Very high chemical stability
- No water absorption, no after-expansion, no outgassing

APPLICATIONS

- **Road and Rail**
Floors, sidewalls, front ends, interiors, roofs, engine covers
- **Marine**
Decks, interiors, superstructures
- **Industrial**
Covers, containers, x-ray tables, sporting goods
- **Architecture and Construction**
Roofs, claddings, domes, portable building

PROCESSING

- Contact molding (hand/spray)
- Vacuum infusion
- Resin infusion / injection (VARTM / RTM)
- Adhesive bonding
- Pre-preg processing
- Compression molding (GMT, SMC)
- Thermoforming



AIREX[®] T90 is a closed-cell, thermoplastic and recyclable polymer foam with excellent fire, smoke & toxicity (FST) properties.

It has very good mechanical properties and an extraordinary resistance to fatigue, is chemically stable, UV-resistant and has negligible water absorption.

It is thermally stable during high temperature processing and post curing. T90 is designed for easy use with all resin systems and processing technologies.

AIREX[®] T90 is the ideal core material for structural sandwich applications requiring high fire resistance.

www.3ACCorematerials.com



Europe | Middle East | India | Africa

Airex AG
5643 Sins, Switzerland
T +41 41 789 66 00 | F +41 41 789 66 60
corematerials@3ACComposites.com

North America | South America

Baltek Inc.
High Point, NC 27261, USA
T +1 336 398 1900 | F +1 336 398 1901
corematerials.americas@3ACComposites.com

Asia | Australia | New Zealand

3A Composites (China) Ltd.
201201 Shanghai, China
T +86 21 585 86 006 | F +86 21 338 27 298
corematerials.asia@3ACComposites.com

AIREX BALTEK BANOVA

Typical properties for AIREX® T90		Unit (metric)	Value ¹⁾	T90.60	T90.100	T90.150	T90.210
Density	ISO 845	kg/m³	Average <i>Typ. range</i>	65 60 - 70	110 105 - 115	145 140 - 150	210 200 - 220
Compressive strength perpendicular to the plane	ISO 844	N/mm²	Average <i>Minimum</i>	0.80 0.7	1.4 1.2	2.2 2.0	3.5 3.2
Compressive modulus perpendicular to the plane	DIN 53421	N/mm²	Average <i>Minimum</i>	50 35	85 75	115 100	170 145
Tensile strength perpendicular to the plane	ASTM C297	N/mm²	Average <i>Minimum</i>	1.5 1.2	2.2 1.6	2.7 2.2	3.0 2.4
Tensile modulus perpendicular to the plane	ASTM C297	N/mm²	Average <i>Minimum</i>	85 70	120 90	170 140	225 180
Shear strength	ISO 1922	N/mm²	Average <i>Minimum</i>	0.46 0.4	0.8 0.7	1.2 1.1	1.85 1.5
Shear modulus	ISO 1922	N/mm²	Average <i>Minimum</i>	12 10.5	20 18	30 26	50 44
Shear elongation at break	ISO 1922	%	Average <i>Minimum</i>	12 8	10 5	8 4	5 3
Thermal conductivity at room temperature	ISO 8301	W/m.K	Average	0.033	0.033	0.036	0.041
Standard sheet	Width ²⁾	mm ± 5		610	610	610	610
	Length ²⁾	mm ± 5		1220	1220	1220	1220
	Thickness	mm ± 0.5		5 to 100	5 to 100	5 to 100	5 to 100

Finishing Options, other dimensions and closer tolerances upon request

¹⁾ Minimum values acc. DNV definition; test sample thickness 20 mm except compressive modulus (40 mm)

²⁾ Alternative width 1220 mm, alternative length 2440 mm

Fire performance	Standard		T90.60	T90.100	T90.150	T90.210
Aircraft	FAR 25.853/ABD0031	Flammability	passed	passed	passed	passed
	FAR 25.853/ABD0031	Smoke density	passed	passed	passed	passed
	FAR 25.853/ABD0031	Toxicity	passed	passed	passed	passed
Rail	DIN 5510/2	Flammability	S4	S4	S4	S4
	DIN 5510/2	Smoke density	SR2	SR2	SR2	SR2
	DIN 5510/2	Dripping	ST2	ST2	ST2	ST2
	DIN 5510/2 / DIN 53438-2	Edge flaming	K1	K1	K1	K1
	DIN 5510/2	Toxicity (FED)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Rail	NF F16-101	Flammability	M2	M1	M1	M1
	NF F16-101	Smoke density	F1	F1	F1	F1
Rail	EN 45545-2		HL3 achievable; Certification depending on sandwich design			
Building & Construction	DIN 4102-1	Material Class	tbd	B1	tbd	B1
Building & Construction	EN 13501-1	Fire reaction behaviour	tbd	C	tbd	C
	EN 13501-1	Smoke production	tbd	s2	tbd	s2
	EN 13501-1	Flaming droplets	tbd	d0	tbd	d0

The data provided gives approximate values for the nominal density and DNV minimum values according to DNV type approval certificate. The information contained herein is believed to be correct and to correspond to the latest state of scientific and technical knowledge. However, no warranty is made, either expressed or implied, regarding its accuracy or the results to be obtained from the use of such information. No statement is intended or should be construed as a recommendation to infringe any existing patent.

AIREX BALTEK BANOVA

Typical properties for AIREX® T90		Unit (metric)	Value ¹⁾	T90.60	T90.100	T90.150	T90.210
Density	ISO 845	lb/ft ³	Average <i>Typ. range</i>	4.1 3.7 - 4.4	6.8 6.6 - 7.2	9.1 8.7 - 9.4	13 12.5 - 13.7
Compressive strength perpendicular to the plane	ISO 844	psi	Average <i>Minimum</i>	116 102	203 174	319 290	508 464
Compressive modulus perpendicular to the plane	DIN 53421	psi	Average <i>Minimum</i>	7'250 5'075	12'330 10'875	16'680 14'500	24'650 21'025
Tensile strength perpendicular to the plane	ASTM C297	psi	Average <i>Minimum</i>	218 174	319 232	392 319	435 350
Tensile modulus perpendicular to the plane	ASTM C297	psi	Average <i>Minimum</i>	12'325 10'150	17'400 13'050	24'650 20'300	32'630 26'100
Shear strength	ISO 1922	psi	Average <i>Minimum</i>	67 58	116 102	174 160	268 215
Shear modulus	ISO 1922	psi	Average <i>Minimum</i>	1'740 1'520	2'900 2'610	4'350 3'770	7'250 6'380
Shear elongation at break	ISO 1922	%	Average <i>Minimum</i>	12 8	10 5	8 4	5 3
Thermal conductivity at room temperature	ISO 8301	Btu.in/ hr.ft ² .F	Average	0.228	0.228	0.250	0.284
Standard sheet	Width ²⁾	in ± 0.2		48	48	48	48
	Length ²⁾	in ± 0.2		96	96	96	96
	Thickness	in ± 0.02		1/8 to 4	1/8 to 4	1/8 to 4	1/8 to 4

Finishing Options, other dimensions and closer tolerances upon request

¹⁾ Minimum values acc. DNV definition; test sample thickness 20 mm (3/4") except compressive modulus 40 mm (1 1/2")

²⁾ Alternative width 24", alternative length 48" (39 1/2" for T92.110)

Fire performance	Standard		T90.60	T90.100	T90.150	T90.210
Aircraft	FAR 25.853/ABD0031	Flammability	passed	passed	passed	passed
	FAR 25.853/ABD0031	Smoke density	passed	passed	passed	passed
	FAR 25.853/ABD0031	Toxicity	passed	passed	passed	passed
Rail	DIN 5510/2	Flammability	S4	S4	S4	S4
	DIN 5510/2	Smoke density	SR2	SR2	SR2	SR2
	DIN 5510/2	Dripping	ST2	ST2	ST2	ST2
	DIN 5510/2 / DIN 53438-2	Edge flaming	K1	K1	K1	K1
	DIN 5510/2	Toxicity (FED)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Rail	NF F16-101	Flammability	M2	M1	M1	M1
	NF F16-101	Smoke density	F1	F1	F1	F1
Rail	EN 45545-2		HL3 achievable; Certification depending on sandwich design			
Building & Construction	DIN 4102-1	Material Class	tbd	B1	B1	B1
Building & Construction	EN 13501-1	Fire reaction behaviour	tbd	C	tbd	C
	EN 13501-1	Smoke production	tbd	s2	tbd	s2
	EN 13501-1	Flaming droplets	tbd	d0	tbd	d0

The data provided gives approximate values for the nominal density and DNV minimum values according to DNV type approval certificate. The information contained herein is believed to be correct and to correspond to the latest state of scientific and technical knowledge. However, no warranty is made, either expressed or implied, regarding its accuracy or the results to be obtained from the use of such information. No statement is intended or should be construed as a recommendation to infringe any existing patent.