



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Ing. Ladislav Fojtl

**Vliv materiálového složení a tvaru na vybrané fyzikální
vlastnosti sendvičových konstrukcí**

**The influence of material composition and shape on
selected physical properties of sandwich constructions**

Disertační práce

Obor: 3909V013 Nástroje a procesy

Školitel: doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.

Zlín: 2016

Motto:

„Člověk zůstává mladým, pokud je ještě schopen učit se, získávat nové vlastnosti a snášet odlišné názory ostatních.“

Marie von Ebner-Eschenbachová (*1830 - †1916)

&

„Vědění je poklad, ale praxe je klíč k němu.“

Thomas Fuller (*1608 - †1661)

Poděkování:

V první řadě bych rád poděkoval své školitelce doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D. za velkou ochotu, otevřenost, vstřícnost, pozitivní přístup, odborné vedení a snahu mne zapojovat do různých setkání a projektů. Upřímná slova díky patří také panu Ing. Vladimíru Rusnákovi za cenné praktické rady a pomoc při výrobě vzorků, stejně tak jako pracovníkům ve výrobě firmy Form, s.r.o. Dále bych také rád poděkoval konzultantovi Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za usměvavý přístup a cenné rady ohledně mechanického testování. Velké poděkování také patří doc. Ing. Zdenku Dvořákovi, CSc., doc. Ing. Oldřichu Šubovi, CSc. a doc. Dr. Ing. Vladimíru Patovi za jejich cenné rady a odborné konzultace.

Poděkování patří taky všem zbylým doktorům, docentům a profesorům, které jsem během svého studia na Fakultě technologické potkal, za jejich veškeré vědomosti a moudra, která jsem od nich mohl získat.

Velké a s úsměvem podané díky patří také skvělé partě doktorandů, starších i mladších, neboť v kolektivu se spousta problémů snadněji překonává a víc hlav, víc ví, i když kolikrát víc vypije. Jmenovitě bych chtěl poděkovat jednomu kolegovi a kamarádovi, Ing. Jiřímu Čopovi, že to se mnou od prvních dnů studia až po celkových devět let vydržel a společně jsme to přes všechny nástrahy dotáhli až k napsání doktorských prací.

Největší poděkování však směřuji svým rodičům a mladší sestře, za veškerou podporu, ať už finanční, či psychickou a také celé úžasné rodině za to, že jsou a je možné se na ně ve všem obrátit a svěřit se.

Závěrečné slovo „děkuji“ pak patří všem těm, které jsem v řádcích výše nezmínil, ale během studia mě podporovali, v případě potřeby mě vyslechli, dokázali poradit a šířili pozitivní náladu v době, kdy byla opravdu potřeba.

Tato disertační práce byla spolufinancována z projektu Interní Grantové Agentury Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně číslo IGA/FT/2016/002.

ABSTRAKT

Sendvičové kompozity jsou známé již řadu let a své místo mezi konstrukčními materiály si zasloužily zejména díky velmi dobrým mechanickým vlastnostem vztaheným k jejich nízké hmotnosti. Tyto materiály již byly předmětem mnoha výzkumů, avšak jen velmi málo z nich se věnovalo popisu chování sendvičových konstrukcí v ohybu s ohledem na jejich specifický tvar (zakřivení). V technické praxi se dílce vytvořené z těchto kombinovaných materiálů nachází v řadě exteriérových a interiérových aplikacích, kde jsou zformovány do tvarů daných designem celé sestavy. S rostoucím množstvím stále nově vyvíjených materiálů a z nich vyplývajících, možných materiálových kombinací, je potřeba charakterizovat vlastnosti připravených struktur a také posoudit vliv tvaru na chování sendvičových konstrukcí s ohledem právě na jejich materiálové složení.

Tato disertační práce se věnuje výzkumu rovinných a zakřivených sendvičových konstrukcí, které svým materiálovým složením odpovídají těm, používaným v hromadné a kolejové dopravě.

Pro potřeby experimentu byla navržena a vyrobena laminátová forma umožňující výrobu dvou typů zakřivených sendvičových panelů. Z panelů připravené sendvičové nosníky byly testovány v trojbodovém a čtyřbodovém ohybu v různých variantách jejich uložení. Samotné měření bylo provedeno při třech různých provozních teplotách a to za záporné, pokojové a zvýšené teploty. Konkrétně byl ve všech experimentech posuzován vliv zakřivení a případných dalších vlivů na hodnoty efektivního modulu pružnosti a ohybovou únosnost.

V úvodu popisu hlavních výsledků jsou mezi sebou srovnány jednotlivé typy připravených rovinných struktur s ohledem na rozměry (tloušťku) jádra a také dle různých provozních teplot.

Vliv tvaru, konkrétně zakřivení, byl posuzován pro jednotlivá materiálová složení samostatně dle tloušťky jádra. Dle experimentálního testování bylo zjištěno, že zejména silné zakřivení u konkávně uložených nosníků snižuje hodnoty efektivního modulu pružnosti. Ohybová únosnost konstrukcí byla značně ovlivněna zakřivením, avšak míra ovlivnění u konkávně a konvexně uložených sendvičových nosníků se lišila dle materiálu jádra. Hodnoty obou testovaných parametrů, získaných při jednotlivých konfiguracích ohybového testu, se mezi sebou lišily, avšak trendy poklesů či růstů zůstávaly téměř neměnné. Rozdíly byly identifikovány pouze u konstrukcí s voštinovým jádrem. Výzkum vlivu teploty na chování zakřivených sendvičových struktur přinesl zajímavé výsledky zejména u silně zakřivených nosníků s jádrem tloušťky 10 mm při zvýšené teplotě, kdy se vliv tvaru pozitivně projevil zvýšením únosnosti v porovnání s rovinnými u všech testovaných sérií. U všech experimentálních měření byly také pozorovány jednotlivé ohybové poruchy.

V rámci mechanického testování byly pro charakterizaci soudržnosti jednotlivých částí sendvičové struktury provedeny taktéž zkoušky odlupu. Z dalších testů

byla provedena také DMA analýza za účelem charakterizace vlivu teploty na vlastnosti jednotlivých materiálů tvořících sendvičové konstrukce.

V závěru práce jsou dále uvedeny diagramy modelové závislosti efektivního ohybového modulu, ohybové tuhosti a únosnosti výsledné sendvičové struktury v závislosti na modulu pružnosti jádra. Diagramy jsou modelově vytvořeny pro různé počty vrstev prepregů v potahu a dále je také vytvořeno srovnání výsledků z FEM modelu, analytických výpočtů a experimentálně získaných dat.

Klíčová slova:

Sendvičová konstrukce, prepreg, polymerní pěna, voština, tvar, zakřivení, efektivní modul pružnosti, ohybová únosnost, soudržnost, tah naplocho, DMA analýza, FEM model

ABSTRACT

Sandwich composites are well known for many years and its place among the construction materials have they deserved mainly due to very good mechanical properties related to their weight. These materials have been a subject for many researches, but very few of them were focused on the behavior of curved constructions in bend with respect to their specific shape (curvature). In technical practice, parts created from these composite materials are applied in various exterior and interior applications, where they are formed into shapes given by design of whole assembly or construction. With increasing amount of newly developed materials and from them resulting possible material combinations, it is necessary to characterize the properties of prepared structures and also assess the effect of shape on sandwich constructions behavior with respect to their material composition.

This dissertation thesis is focused on the research of flat and curved sandwich constructions that by its material composition corresponds to those used in public and rail transport.

For the purpose of the experiment, laminate mold enabling the production of two types of curved sandwich panels was designed and manufactured. Sandwich beams, created from cured panels, were tested in three-point and four-point bending in different variants of sample clamping. Measurement itself was conducted at three different operational temperatures; negative, ambient and increased temperature. Specifically, the influence of curvature and other possible effects on values of the effective modulus and flexural load capacity was evaluated in all experiments.

At the beginning of the main results description, individual types of produced flat sandwich structures are compared with respect to the core dimensions (thickness) and also according to various operational temperatures.

The influence of shape, namely curvature, was assessed for individual material composition separately according to core thickness. Based on experimental testing, it was found that especially greater curvature ration of concavely clamped beams reduces the values of effective modulus of elasticity. Flexural load capacity was significantly affected by the curvature, but the extent of impact for concave and convex clamped sandwich beams varied according to the core material. The values of both tested parameters, obtained at various configurations of bending test varied between themselves, but trends of decrease or growth remained almost unchanged. Differences were identified only for sandwich structures with a honeycomb core. Research of the effect of temperature on the behavior of curved sandwich structures brought interesting results especially for more curved beams with 10 mm cores at an elevated temperature, where the shape positively influenced by increase of load capacity in comparison to the flat beams in all tested

series. Moreover, failure modes were also observed during all experimental measurements.

Furthermore, peel tests for cohesion characterization of the sandwich structure individual parts were also performed. DMA analysis was conducted as well to characterize the influence of temperature on the properties of individual materials constituting the sandwich constructions.

At the end of this thesis, diagrams of model dependences of effective flexural modulus, flexural stiffness and strength of resulting sandwich structure according to the elasticity modulus of the core are constructed and described. These diagrams are created for different number of prepreg layers in face sheets and the comparison of results from FEM model, analytic calculations and experimental values is also given in corresponding diagram.

Keywords:

Sandwich construction, prepreg, polymer foam, honeycomb, shape, curvature, effective modulus of elasticity, flexural load capacity, coherence, flatwise tensile, DMA analysis, FEM model

OBSAH PRÁCE

SEZNAM ILUSTRACÍ	10
SEZNAM TABULEK	14
SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK	16
ÚVOD DO SENDVIČOVÝCH MATERIÁLŮ	19
1 SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE	20
1.1 MATERIÁL KRYCÍCH POTAHŮ	20
1.1.1 Kovové krycí potahy.....	21
1.1.2 Nekovové krycí potahy	21
1.2 JÁDROVÉ MATERIÁLY	27
1.2.1 Polymerní pěnová jádra	28
1.2.2 Voštinové jádrové materiály.....	30
1.3 VÝROBNÍ TECHNOLOGIE	33
1.3.1 Ruční kladení	34
1.3.2 Prepreg technologie	34
1.3.3 RTM technologie	36
1.3.4 Vakuová infuze	37
1.3.5 Ostatní technologie	37
1.4 APLIKACE SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ	38
1.4.1 Dopravní průmysl:	38
1.4.2 Letecký a raketový průmysl:	39
1.4.3 Ostatní oblasti průmyslu:	40
2 OHYBOVÉ CHOVÁNÍ SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ	41
2.1 OHYB ROVINNÝCH, MATERIÁLOVĚ SYMETRICKÝCH KONSTRUKCÍ.....	41
2.2 TVAROVÝ FAKTOR – ZAKŘIVENÍ	45
2.3 OHYBOVÉ PORUCHY SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ.....	48
2.3.1 Poruchy vnějších krycích vrstev.....	48
2.3.2 Poruchy jádra	49
3 SHRUTÍ POZNATKŮ Z TEORETICKÉ ČÁSTI.....	50
4 CÍL PRÁCE.....	51
5 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ.....	52
5.1 ZVOLENÉ MATERIÁLY	52
5.1.1 Materiál potahu	52
5.1.2 Jádrové materiály.....	52
5.2 NÁVRH A VÝROBA LAMINÁTOVÉ FORMY.....	53
5.3 VÝROBA KONSTRUKCÍ A PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	54
5.4 TESTOVÁNÍ PŘIPRAVENÝCH TĚLES	55
5.4.1 Zkouška ohybem.....	56

5.4.2	Zkouška tahem naplocho	56
5.5	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT.....	57
5.6	DMA ANALÝZA	58
5.7	FEM MODELY	59
6	HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE	60
6.1	OHYBOVÉ CHOVÁNÍ ROVINNÝCH SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ.....	60
6.1.1	Rovinné konstrukce s jádrem o tloušťce 5 mm – pokojová teplota.....	60
6.1.2	Rovinné konstrukce s jádrem o tloušťce 5 mm - vliv okolní teploty prostředí	63
6.1.3	Rovinné konstrukce s jádrem o tloušťce 10 mm - pokojová teplota.....	65
6.1.4	Rovinné konstrukce s jádrem o tloušťce 10 mm - vliv okolní teploty prostředí	67
6.1.5	Rovinné konstrukce s jádrem o tloušťce 20 mm – pokojová teplota, vliv okolní teploty prostředí.....	69
6.2	OHYBOVÉ CHOVÁNÍ ZAKŘIVENÝCH SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ.....	71
6.2.1	Zakřivené konstrukce s jádrem o tloušťce 5 mm – vliv uložení zkušebního tělesa	71
6.2.2	Zakřivené konstrukce s jádrem o tloušťce 5 mm – vliv typu ohybové testu	76
6.2.3	Zakřivené konstrukce s jádrem o tloušťce 5 mm – vliv okolní teploty prostředí	80
6.2.4	Zakřivené konstrukce s jádrem o tloušťce 10 mm – vliv uložení zkušebního tělesa	85
6.2.5	Zakřivené konstrukce s jádrem o tloušťce 10 mm – vliv typu ohybové testu	90
6.2.6	Zakřivené konstrukce s jádrem o tloušťce 10 mm – vliv okolní teploty prostředí	94
6.2.7	Zakřivené konstrukce s jádrem o tloušťce 20 mm – vliv uložení zkušebního tělesa	99
6.2.8	Zakřivené konstrukce s jádrem o tloušťce 20 mm – vliv typu ohybové testu	101
6.2.9	Zakřivené konstrukce s jádrem o tloušťce 20 mm – vliv okolní teploty prostředí	103
6.2.10	Zakřivené konstrukce série A – srovnání ohybové únosnosti dle poměru R/t_c	105

6.3	DMA ANALÝZA VYBRANÝCH MATERIÁLŮ	107
6.4	SOUDRŽNOST JEDNOTLIVÝCH VRSTEV SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ	109
6.5	NUMERICKÉ (FEM) MODELOVÁNÍ CHOVÁNÍ SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ V OHYBU	112
7	PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI	119
8	ZÁVĚR.....	120
	LITERATURA	123
	SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA	131
	CV AUTORA.....	135
	PŘÍLOHA PI: OHYBOVÉ KŘIVKY.....	137

SEZNAM ILUSTRACÍ

<i>Obr. 1. 1: Schéma složení vybrané sendvičové konstrukce a přenos zatížení</i>	20
<i>Obr. 1. 2: Nejčastější typy vazeb výztužných tkanin; [6]</i>	21
<i>Obr. 1. 3: Výroba před-impregnovaných výztužných materiálů;</i>	26
<i>Obr. 1. 4: Hlavní typy buněčných struktur; [14]</i>	27
<i>Obr. 1. 5: Srovnání jádrových materiálů s ohledem na cenu a vlastnosti [8]</i>	28
<i>Obr. 1. 6: Schéma vytlačování pěnových struktur [14]</i>	29
<i>Obr. 1. 7: Vybrané tvary buněk voštinových materiálů [4]</i>	30
<i>Obr. 1. 8: Technologie výroby voštinových materiálů; [15]</i>	31
<i>Obr. 1. 9: Umístění rádiusu lepidla mezi stěnou voštiny a potahem [38].....</i>	32
<i>Obr. 1. 10: Technologie výroby pomocí ručního kladení;</i>	34
<i>Obr. 1. 11: Schéma skladby prepregů, jádra a pomocných materiálů.....</i>	35
<i>Obr. 1. 12: Schéma vytvrzování prepregů v autoklávu.....</i>	36
<i>Obr. 1. 13: Princip VARTM technologie</i>	36
<i>Obr. 1. 14: Výroba metodou vakuové infuze</i>	37
<i>Obr. 1. 15: Konkrétní příklady kolejových vozidel obsahující díly ze sendvičových konstrukcí; [9]</i>	38
<i>Obr. 1. 16: Konkrétní příklady aplikace sendvičových kompozitů na dílce v letectví; [2]</i>	39
<i>Obr. 2. 1: Schéma sendvičového nosníku namáhaného v trojbodovém ohybu;</i>	42
<i>Obr. 2. 2: Průběhy normálových a smykových napětí u sendvičového nosníku namáhaného ohybem [5]</i>	43
<i>Obr. 2. 3: Vliv smykové poddajnosti jádra na celkovou deformaci sendvičového nosníku – trojbodový ohyb [75]</i>	44
<i>Obr. 2. 4: Schéma silně zakřiveného sendvičového nosníku namáhaného ohybem [78].....</i>	45
<i>Obr. 2. 5: Rozdělení ohybových momentů dle jejich působení na zakřivený sendvičový nosník.....</i>	46
<i>Obr. 2. 6: Srovnání ohybové únosnosti rovinných a zakřivených sendvičových nosníků [81]</i>	47
<i>Obr. 2. 7: Ohybové poruchy krycích potahů; [46][77]</i>	48
<i>Obr. 2. 8: Ohybové poruchy jádra; [46][77]</i>	49
<i>Obr. 5. 1: Vybrané jádrové materiály;</i>	53
<i>Obr. 5. 2: Výrobní forma;</i>	54
<i>Obr. 5. 3: Deformace sendvičového panelu pod ventilem</i>	55
<i>Obr. 5. 4: Rozměry a materiálové složení připravených sendvičových konstrukcí</i>	55
<i>Obr. 5. 5: Uložení zkušebních těles pro zkoušky ohybem</i>	56
<i>Obr. 5. 6: Statistické veličiny obsažené v box-plotovém diagramu</i>	58

<i>Obr. 6. 1: Ohybová pevnost rovinných sendvičových konstrukcí - S5.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 6. 2: Ohybové poruchy rovinných sendvičových konstrukcí s jádrem o tloušťce 5 mm – trojbodové uložení těles.....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 6. 3: Ohybové poruchy rovinných sendvičových konstrukcí s jádrem o tloušťce 5 mm – čtyřbodové uložení těles</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 6. 4: Ohybová pevnost rovinných sendvičových konstrukcí S5 při odlišných provozních teplotách</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 6. 5: Ohybová pevnost rovinných sendvičových konstrukcí – S10.....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 6. 6: Ohybové poruchy rovinných sendvičových konstrukcí s jádrem o tloušťce 10 mm – trojbodové i čtyřbodové uložení těles.....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 6. 7: Ohybová pevnost rovinných sendvičových konstrukcí – S10 při odlišných provozních teplotách</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 6. 8: Ohybová pevnost rovinných sendvičových konstrukcí – S20_A</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 6. 9: Ohybové poruchy rovinných sendvičových konstrukcí s PET jádrem o tloušťce 20 mm.....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 6. 10: Shluková analýza dat z ohybové zkoušky různě uložených zakřivených sendvičových nosníků S5.....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 6. 11: Test rovnosti rozptylů dat pro ohybovou únosnost</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 6. 12: Ohybová únosnost konstrukcí S5 – série A</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 6. 13: Ohybová únosnost konstrukcí S5 – série B</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 6. 14: Ohybová únosnost konstrukcí S5 – série C</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 6. 15: Ohybové poruchy zakřivených sendvičových konstrukcí s jádrem o tloušťce 5 mm – trojbodové uložení těles (3PB)</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 6. 16: Box-plotový diagram závislosti ohybové únosnosti konstrukcí S5 na typu ohybové zkoušky – série A.....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 6. 17: Box-plotový diagram závislosti ohybové únosnosti konstrukcí S5 na typu ohybové zkoušky – série B.....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 6. 18: Box-plotový diagram závislosti ohybové únosnosti konstrukcí S5 na typu ohybové zkoušky – série C</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 6. 19: Ohybové poruchy zakřivených sendvičových konstrukcí s jádrem o tloušťce 5 mm – čtyřbodové uložení těles (4PB).....</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 6. 20: Shluková analýza dat z ohybové zkoušky zakřivených sendvičových nosníků S5 při různé teplotě okolí</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 6. 21: Box-plotový diagram závislosti ohybové únosnost zakřivených sendvičových konstrukcí S5 při odlišných provozních teplotách (série A).....</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 6. 22: Box-plotový diagram závislosti ohybové únosnost zakřivených sendvičových konstrukcí S5 při odlišných provozních teplotách (série B).....</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 6. 23: Box-plotový diagram závislosti ohybové únosnost zakřivených sendvičových konstrukcí S5 při odlišných provozních teplotách (série C).....</i>	<i>85</i>

<i>Obr. 6. 24: Shluková analýza dat z ohybové zkoušky různě uložených zakřivených sendvičových nosníků S10.....</i>	86
<i>Obr. 6. 25: Ohybová únosnost konstrukcí S10 – série A.....</i>	88
<i>Obr. 6. 26: Ohybová únosnost konstrukcí S10 – série B.....</i>	89
<i>Obr. 6. 27: Ohybová únosnost konstrukcí S10 – série C.....</i>	89
<i>Obr. 6. 28: Ohybové poruchy zakřivených sendvičových konstrukcí s jádrem o tloušťce 10 mm – trojbodové uložení těles (3PB).....</i>	90
<i>Obr. 6. 29: Box-plotový diagram závislosti ohybové únosnosti konstrukcí S10 na typu ohybové zkoušky – série A.....</i>	92
<i>Obr. 6. 30: Box-plotový diagram závislosti ohybové únosnosti konstrukcí S10 na typu ohybové zkoušky – série B.....</i>	92
<i>Obr. 6. 31: Box-plotový diagram závislosti ohybové únosnosti konstrukcí S10 na typu ohybové zkoušky – série C.....</i>	93
<i>Obr. 6. 32: Ohybové poruchy zakřivených sendvičových konstrukcí s jádrem o tloušťce 10 mm – čtyřbodové uložení těles (4PB).....</i>	94
<i>Obr. 6. 33: Box-plotový diagram závislosti ohybové únosnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S10 při odlišných provozních teplotách (série A).....</i>	97
<i>Obr. 6. 34: Box-plotový diagram závislosti ohybové únosnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S10 při odlišných provozních teplotách (série B).....</i>	97
<i>Obr. 6. 35: Box-plotový diagram závislosti ohybové únosnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S10 při odlišných provozních teplotách (série C).....</i>	98
<i>Obr. 6. 36: Ohybová únosnost konstrukcí S20 – série A.....</i>	100
<i>Obr. 6. 37: Ohybové poruchy zakřivených sendvičových konstrukcí s jádrem o tloušťce 20 mm – trojbodová zkouška (3PB).....</i>	101
<i>Obr. 6. 38: Box-plotový diagram závislosti ohybové únosnosti konstrukcí S20 na typu ohybové zkoušky – série A.....</i>	102
<i>Obr. 6. 39: Ohybové poruchy zakřivených sendvičových konstrukcí s jádrem o tloušťce 20 mm – čtyřbodová zkouška (4PB).....</i>	103
<i>Obr. 6. 40: Box-plotový diagram závislosti ohybové únosnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S20 při odlišných provozních teplotách (série A).....</i>	105
<i>Obr. 6. 41: Ohybová únosnost konstrukcí série A – konkávně uložené nosníky.....</i>	106
<i>Obr. 6. 42: Ohybová únosnost konstrukcí série A – konvexně uložené nosníky.....</i>	106
<i>Obr. 6. 43: Průběh elastické složky modulu polymerních jader.....</i>	107
<i>Obr. 6. 44: Průběh viskózní složky modulu polymerních jader.....</i>	108
<i>Obr. 6. 45: Průběh parametru $\tan \delta$ polymerních jader.....</i>	108
<i>Obr. 6. 46: Průběh elastické složky modulu prepreg kompozitů.....</i>	109
<i>Obr. 6. 47: Maximální tahová síla při zkoušce tahem naplocho.....</i>	110

<i>Obr. 6. 48: Vzhled zkušebních těles po zkoušce tahem naplocho.....</i>	<i>111</i>
<i>Obr. 6. 49: Modelová závislost efektivního modulu pružnosti na modulu pružnosti polymerního jádra.....</i>	<i>113</i>
<i>Obr. 6. 50: Modelová závislost ohybové tuhosti na modulu pružnosti polymerního jádra.....</i>	<i>114</i>
<i>Obr. 6. 51: Typy podložek použitých při 3PB testu</i>	<i>115</i>
<i>Obr. 6. 52: Srovnání modelové a analytické závislosti efektivního modulu pružnosti sendvičové struktury na modulu pružnosti polymerního jádra spolu s experimentálními hodnotami</i>	<i>116</i>
<i>Obr. 6. 53: Průběh deformace sendvičové struktury v závislosti na modulu pružnosti jádra zjištěný při FEM modelování</i>	<i>117</i>
<i>Obr. 6. 54: Srovnání modelové závislosti jednotkového ohybového momentu jakožto únosnosti sendvičové struktury na modulu pružnosti polymerního jádra spolu s experimentálními hodnotami</i>	<i>118</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. 1: Porovnání vlastností výztužných vláken [16]</i>	23
<i>Tab. 5. 1: Vybrané vlastnosti prepregu PH840-300-42. [90].....</i>	52
<i>Tab. 5. 2: Vybrané vlastnosti jádrových materiálů. [25][30][45]</i>	53
<i>Tab. 6. 1: Ohybové vlastnosti rovinných sendvičových konstrukcí s jádrem o tloušťce 5 mm – trojbodový ohyb (3PB)</i>	60
<i>Tab. 6. 2: Ohybové vlastnosti rovinných sendvičových konstrukcí s jádrem o tloušťce 5 mm – čtyřbodový ohyb (4PB).....</i>	61
<i>Tab. 6. 3: Ohybové vlastnosti rovinných sendvičových konstrukcí S5 při zvýšené teplotě prostředí.....</i>	63
<i>Tab. 6. 4: Ohybové vlastnosti rovinných sendvičových konstrukcí S5 při záporné teplotě prostředí</i>	63
<i>Tab. 6. 5: Ohybové vlastnosti rovinných sendvičových konstrukcí s jádrem o tloušťce 10 mm – trojbodový ohyb (3PB)</i>	65
<i>Tab. 6. 6: Ohybové vlastnosti rovinných sendvičových konstrukcí s jádrem o tloušťce 10 mm – čtyřbodový ohyb (4PB).....</i>	65
<i>Tab. 6. 7: Ohybové vlastnosti rovinných sendvičových konstrukcí S10 při zvýšené teplotě prostředí.....</i>	67
<i>Tab. 6. 8: Ohybové vlastnosti rovinných sendvičových konstrukcí S10 při záporné teplotě prostředí</i>	68
<i>Tab. 6. 9: Ohybové vlastnosti rovinných sendvičových konstrukcí S20_A.....</i>	69
<i>Tab. 6. 10: Ohybové vlastnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S5 s ohledem na uložení zkušebního nosníku – série A</i>	73
<i>Tab. 6. 11: Ohybové vlastnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S5 s ohledem na uložení zkušebního tělesa – série B</i>	73
<i>Tab. 6. 12: Ohybové vlastnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S5 s ohledem na uložení zkušebního tělesa – série C</i>	74
<i>Tab. 6. 13: Ohybové vlastnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S5 s ohledem na typ ohybové zkoušky – 4PB test</i>	77
<i>Tab. 6. 14: Ohybové vlastnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S5 při zvýšené teplotě prostředí.....</i>	82
<i>Tab. 6. 15: Ohybové vlastnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S5 při záporné teplotě prostředí</i>	82
<i>Tab. 6. 16: Ohybové vlastnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S10 s ohledem na uložení zkušebního tělesa – série A</i>	87
<i>Tab. 6. 17: Ohybové vlastnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S10 s ohledem na uložení zkušebního tělesa – série B</i>	87
<i>Tab. 6. 18: Ohybové vlastnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S10 s ohledem na uložení zkušebního tělesa – série C</i>	88
<i>Tab. 6. 19: Ohybové vlastnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S10 s ohledem na typ ohybové zkoušky – 4PB test</i>	91

<i>Tab. 6. 20: Ohybové vlastnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S10 při zvýšené teplotě prostředí.....</i>	<i>95</i>
<i>Tab. 6. 21: Ohybové vlastnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S10 při záporné teplotě prostředí</i>	<i>96</i>
<i>Tab. 6. 22: Ohybové vlastnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S20 s ohledem na uložení zkušebního tělesa – série A</i>	<i>100</i>
<i>Tab. 6. 23: Ohybové vlastnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S20 s ohledem na typ ohybové zkoušky – 4PB.....</i>	<i>102</i>
<i>Tab. 6. 24: Ohybové vlastnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S20 při odlišných provozních teplotách</i>	<i>104</i>
<i>Tab. 6. 25: Tah naplocho připravených konstrukcí.....</i>	<i>110</i>

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

m	Metr
mm	Milimetr
N	Newton
MPa	Megapascal
°C	Stupeň Celsius
kg	Kilogram
g	Gram
PVC	Polyvinylchlorid
PET	Polyetylentereftalát
PUR	Polyuretan
PAN	Polyakrylonitril
PA	Polyamid
PC	Polykarbonát
PEI	Polyéterimid
PS	Polystyrén
PMI	Polymetakrylimid
PE	Polyetylen
PEEK	Polyéteréterketon
PEKK	Polyéterketonketon
PPS	Polyfenylensulfid
PEI	Polyéterimid
Al	Hliník
Cu	Měď
Ni	Nikl
Mg	Hořčík
Mn	Mangan
RTM	z angl. Resin Transfer Molding
VARTM	z angl. Vacuum Assisted Resin Transfer Molding
SRIM	z angl. Structural Reaction Injection Molding
BMC	z angl. Bulk Molding Compound

SMC	z angl. Sheet Molding Compound
ε	Deformace myšleného vlákna [1]
y	Vzdálenost od neutrální osy [m]
r	Poloměr zakřivení neutrální plochy [m]
M	Ohybový moment [N·m]
K_0	Ohybová tuhost složeného prutu [N·m ²]
J_i	Kvadratický moment i-té materiálové části průřezu [m ⁴]
E_i	Modul pružnosti i-té materiálové části průřezu [MPa]
b_i	Redukovaná šířka i-té materiálové části průřezu [m]
S_i	Plocha i-té materiálové části průřezu [m ²]
J_R	Redukovaný kvadratický moment [m ⁴]
σ_i	Ohybové napětí v i-té materiálové části průřezu [MPa]
t_f	Tloušťka krycích potahů [m]
t_c	Tloušťka jádra [m]
h	Tloušťka sendviče [m]
E_f	Modul pružnosti krycích potahů [MPa]
E_c	Modul pružnosti jádra [MPa]
E_{ef}	Efektivní modul pružnosti vrstevnaté struktury [MPa]
T_x	Posouvající příčná síla [N]
$\tau_{c,max}$	Maximální smykové napětí [MPa]
y_T	Průhyb sendvičového nosníku od smykových deformací [m]
y_M	Průhyb sendvičového nosníku od ohybových momentů [m]
G_c	Modul jádra ve smyku [MPa]
F	Ohybová síla [N]
L	Vzdálenost podpěr při ohybu [m]
d	Vzdálenost mezi osami potahů [m]
R	Maximální poloměr zakřiveného nosníku [m]
σ_r	Radiální normálové napětí v jádru [MPa]
σ_f	Normálové napětí v krycích potazích [MPa]
R_x	Radius zakřivení neutrální plochy [m]
z	Vzdálenost od neutrální osy v radiálním směru [m]

M_k	Mezní ohybový moment zakřiveného panelu [N·m]
M_r	Mezní ohybový moment rovinného panelu [N·m]
FEM	z angl. Finite Element Method
R/t_c	poměr zakřivení sendvičové konstrukce [1]
FST	z angl. Fire-Smoke-Toxicity
σ_{fM}	Experimentálně určená mezní ohybová pevnost [MPa]
F_{fmax}	Experimentálně určená maximální ohybová únosnost [N]
\bar{x}	Výběrový aritmetický průměr
s	Výběrová směrodatná odchylka
V_x	Variační koeficient [%]
\tilde{x}	Median
Q1	První kvartil
Q3	Třetí kvartil
MIN	Minimální naměřená hodnota výběrového souboru
MAX	Maximální naměřená hodnota výběrového souboru
IQR	Interkvartilové rozpětí
H_0	Nulová hypotéza
H_A	Alternativní hypotéza
σ^2	Rozptyl základního souboru
μ	Aritmetický průměr základního souboru
P	Pravděpodobnost
α	Hladina významnosti

ÚVOD DO SENDVIČOVÝCH MATERIÁLŮ

Kompozitní materiály jsou známé již po řadu desetiletí, kdy úplné počátky jejich využití člověkem spadají ho dávné historie. Příkladem může být použití nasekané slámy jako výztuže do stavebních cihel ve starověkém Egyptě. Dalším již moderním příkladem aplikace je po patentování výroby fenolické pryskyřice L. H. Baekelandem (1907) chemicky odolná nádrž z fenolické pryskyřice vyztužená azbestovými vlákny. Zlomový okamžik nastal se zahájením průmyslové výroby skleněných vláken (1935) a následně s patentováním výroby epoxidové pryskyřice doktorem P. Castanem v roce 1938. O nástupu moderních kompozitních materiálů mluvíme až v souvislosti s druhou světovou válkou. [1][2][3]

První zmínky o úspěšné aplikaci sendvičových konstrukcí jsou v oblasti letectví již z roku 1919, kdy došlo k výrobě sendvičového panelu složeného z tenkých mahagonových potahů, mezi kterými bylo umístěno jádro ve formě balzy. Tyto panely byly použity na plováky námořních letadel. Následně byly v meziválečném období připraveny sendvičové panely z překližky lepené na balzové jádro jako části hlavní konstrukce letadel. [4]

I přes to, že první voštinové jádro připravené z kartonového papíru bylo patentováno v roce 1905 v Německu, k prvnímu většímu použití došlo v období druhé světové války u americké společnosti Glen L. Martin u krytů radarových antén. Velkým problémem však byla nasákavost papíru. Do konce války tato společnost vyrobila voštinová jádra z bavlněné tkaniny, skleněné tkaniny a hliníkové fólie. Ve stejném období došlo k úspěšné aplikaci sendvičových panelů jako prvků trupu a křídel u anglické firmy de Havilland Airplane, konkrétně u bombardérů Mosquito, kde byly použity opět překližka a balzové jádro. O kvalitě konstrukce a použitých materiálech svědčí i fakt, že tyto letadla létala až do druhé poloviny 50. let. [4][5]

První sendvičový panel, tvořený hliníkovými potahy a hliníkovou voštinou, byl vyroben v roce 1945. Hlavním problémem při výrobě těchto panelů byl nekvalitní spoj mezi potahem a buňkami voštiny a také skutečnost, že při vytvrzování lepidla docházelo ke vzniku těkavých plynů. Tento problém byl odstraněn až s příchodem moderních lepidel, které vytvrzují bez vzniku vedlejších produktů. Obecně lze konstatovat, že ve 40. letech došlo k velkému nárůstu aplikací voštinových sendvičových konstrukcí a to právě v letectví a raketové technice. [4]

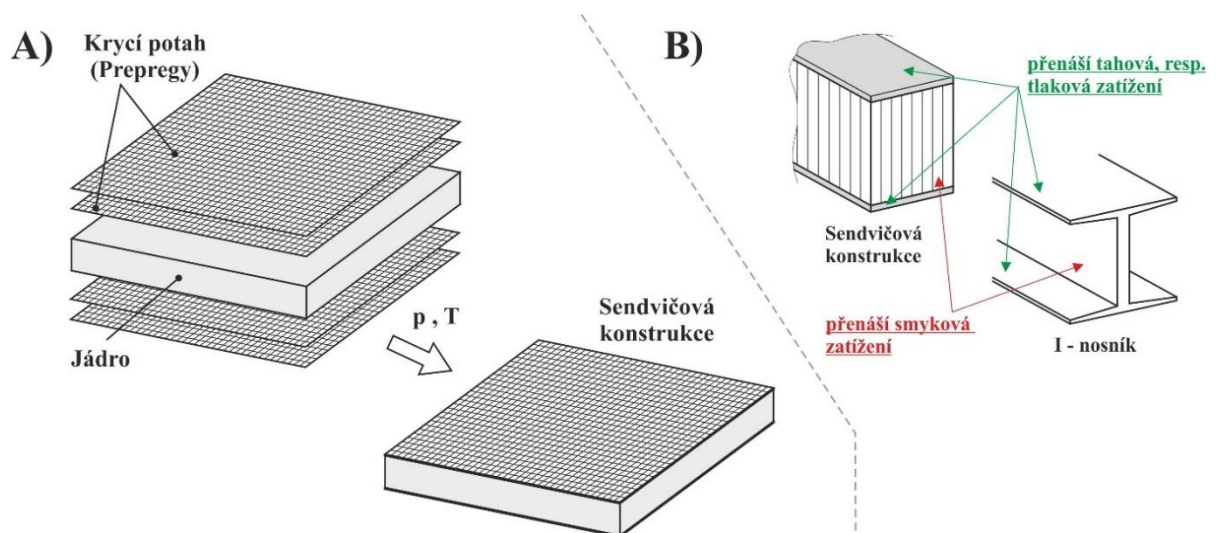
K vývoji a následně aplikaci nových jádrových materiálů, konkrétně polyvinylchloridových (PVC) a polyuretanových (PUR) pěn, došlo na přelomu 50. a 60. let 19. století. Od té doby došlo díky rozvoji v oblasti polymerních materiálů k přípravě dalších typů lehčených materiálů, které lze s výhodou použít jako jádra sendvičových konstrukcí. [5]

Obecně lze konstatovat, že sendvičové materiály a konstrukce se stále vyvíjí, respektive zdokonalují se jejich vlastnosti a to díky přípravě nových a modifikací stávajících materiálů a samotných výrobních technologií.

1 SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE

Strukturální sendvičové konstrukce (Obr. 1. 1 A) jsou dle příslušné ASTM normy i v řadě další literatury definovány jako speciální typ vrstvených kompozitů skládajících se ze dvou tenkých, tuhých a pevných potahů, mezi kterými je umístěno lehké, ale dle mechanických vlastností slabší jádro o definované tloušťce. Potahy neboli vnější krycí vrstvy jsou k jádru buďto přilepeny, anebo spoj vzniká vytvrzením pryskyřice při výrobě panelů (např. u prepreg materiálů). [4][5][6]

Každá z těchto komponent je samostatně relativně nevyužitelná (je pevnostně slabá a poddajná), avšak jejich kombinací a hlavně kvalitním spojením vzniká sendvičová struktura, která je tuhá, pevná a lehká. Základní koncept sendvičové konstrukce předpokládá, že krycí potahy přenášejí normálová napětí od ohybových momentů, zatímco jádro přenášejí smyková napětí od příčných sil, často je v literatuře použito přirovnání sendvičové struktury k I-nosníku (Obr. 1. 1 B). [7][8]



Obr. 1. 1: Schéma složení vybrané sendvičové konstrukce a přenos zatížení

1.1 Materiál krycích potahů

V technické praxi existuje široká paleta materiálů, které lze použít jako vnější krycí vrstvy (potahy) sendvičových konstrukcí. Jejich volba záleží zejména na konkrétní aplikaci a požadovaných vlastnostech. Hlavními požadovanými vlastnostmi jsou vysoká ohybová tuhost, velká tahová a tlaková pevnost, odolnost proti průrazu, vzhled, respektive kvalita povrchu a zejména odolnost proti vlivům prostředí (např. korozi či ohni). Poslední dvě zmíněné vlastnosti lze ovlivnit použitím vhodné krycí vrstvy, zvané gelcoat – pouze případně laminátů (aplikuje se na formu během výroby dílců) či nástřikem ochranných tmelů a laků (aplikuje se na hotové výrobky). [5][7][9][10]

Materiál a tloušťka potahů mohou být shodné (symetrická konstrukce), nebo odlišné (nesymetrická konstrukce). Nesymetrické konstrukce pak vykazují mírně odlišné chování v ohybu – mají odlišnou ohybovou tuhost. [3][5][11]

Obecně se materiály potahů rozdělují na kovové, do kterých spadají tenké plechy zejména z hliníku, oceli a slitin kovů, a nekovové, do kterých patří vláknové kompozity (skelné, uhlíkové, apod.) s různou matricí (polyester, fenol, apod.), HPL desky, dřevěné desky a v současné době značně používané před-impregnované materiály (prepregy). [6][12][13]

1.1.1 Kovové krycí potahy

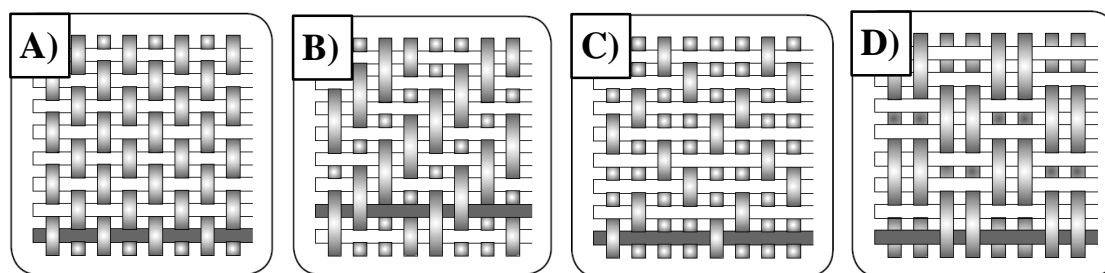
Tato skupina materiálů vyniká díky vysoké tuhosti a pevnosti, nízké ceně, kvalitě povrchu (např. vysokému lesku) a značné odolnosti proti průrazu. Nevýhody jsou pak zejména vyšší hmotnost, nutnost použít vybraných lepidel při výrobě sendvičových struktur a obtížnější výroba složitých tvarů (nutné před tvarování plechů). Jednotlivé materiálové typy se liší v hustotě, z ní vyplývající tuhosti a hlavně v pevnosti. Dodavatelů těchto tenkých kovových plechů (potahů) je velké množství, jejich výběr záleží tedy pouze na požadovaných vlastnostech. [5][14]

1.1.2 Nekovové krycí potahy

Jak již bylo zmíněno, do nekovových potahů patří široké množství materiálů. Následující text zmiňuje vybrané typy s ohledem na materiál výztuže a matrici.

❖ *Kompozitní krycí potahy – výztuž:*

Kompozitní potahy mohou obsahovat výztužná vlákna v různém stavu. Pro strukturální aplikace se nejčastěji používá tkaninová výztuž, případně její kombinace ve vrstvách s netkanou rohoží či jednosměrnou výztuží. Jednotlivé typy tkanin zobrazuje Obr. 1. 2. Plátňová vazba patří mezi základní typ, který se dobře zpracovává – netřepí se a poskytuje rozměrovou stálost (díky symetrii pramenců). Mezi nevýhody této vazby patří náchylnost ke zvlnění pramenců a problematické umístění do složitých ohybů. Naopak keprová vazba je vhodnější pro tvarově náročné dílce, vazba samotná se nezvlňuje, z čehož vyplývají i lepší mechanické vlastnosti kompozitu. Atlasová vazba umožňuje bezproblémové kopírování složitých tvaru bez zvlnění, je vhodná pro prostorově složitě dílce. Nevýhodou je však značná asymetrie vlastností s ohledem na uspořádání pramenců v osnově a útku. Košíková vazba je u kompozitů méně používaná, je podobná plátňové vazbě, méně se však zvlňuje, má vyšší pevnost, ale je méně stabilní (snáze se třepí). [1][6]



Obr. 1. 2: Nejčastější typy vazeb výztužných tkanin; [6]

(A) Plátňová v., B) Keprová v., C) Atlasová v., D) Košíková v.)

Nejčastějším materiálovým typem výztuže jsou pak skleněná vlákna a to díky nízké ceně, nízké hmotnosti, transparentnosti, odolnosti proti chemikáliím, dobré ohebnosti a pevnosti. Tyto vlákna se vyrábí dloužením roztaveného skla vycházejícího z trysek ze slitin platiny a to do finálního průměru vlákna od 3 do 20 μm . V průběhu dloužení se na vlákna nanáší lubrikace, která vlákna chrání a upravuje pro další zpracování. [1][8][15]

Mezi základní typy skleněných vláken patří:

- **A – sklo:** zvýšená odolnosti proti kyselinám
- **C – sklo:** obecně vysoká chemická odolnost
- **E – sklo:** nízká elektrická vodivost (nejčastější aplikace)
- **S – sklo:** vysoká pevnost
- **M – sklo:** vysoký modul pružnosti
- **D – sklo:** nízká dielektrická konstanta [8][16]

Nejvýznamnějšími typy skleněných vláken jsou typ E a S. E-sklo obsahuje od 52 do 56 % SiO_2 , S-sklo pak 60 až 65 %. Dále vlákna těchto typů obsahují různá množství oxidů například vápníku (CaO), hliníku (Al_2O_3), boru (B_2O_3), magnezia (MgO), sodíku (Na_2O) a dalších prvků. Skleněná vlákna jsou nehořlavá, čehož se využívá právě při aplikacích v letectví a dopravním průmyslu. Teplota měknutí pro E-sklo je okolo 846 $^\circ\text{C}$, respektive 970 $^\circ\text{C}$ pro S-sklo. Poissonovo číslo je pro většinu skleněných vláken mezi 0,15 až 0,26, konkrétně pro E-sklo je 0,22. Konečné vlastnosti kompozitů (s jakoukoli výztuží) jsou tedy závislé na druhu, množství a samotné orientaci vláken ve finálním kompozitním výrobku. [1][15]

Dalším používaným typem jsou uhlíková vlákna. Tyto vlákna se vyrábí karbonizací organického viskózného hedvábí, polyakrylonitrilu (PAN) či smoly. Typický průměr těchto vláken je mezi 5 a 10 μm . Uhlíková vlákna mají vysokou pevnost a tuhost až do teploty 500 $^\circ\text{C}$, avšak při nízké tažnosti. Dále mají velmi dobrou elektrickou vodivost. Stejně jako v případě skleněných vláken existuje více typů, lišících se vlastnostmi, zejména mechanickými. [8][14]

Aramidová vlákna používaná v kompozitech vynikají vysokou tuhostí a schopností absorbovat energii, dále mají také dobrou pevnost a to vše při nejnižší hustotě ze všech typů používaných vláken. Nevýhodou je však nízká tlaková pevnost, silná anizotropie vláken a jejich hydrofilie. Aramidové kompozity jsou vhodné pro lehké konstrukce namáhané na tah, nikoli však pro dílce namáhané na tlak či ohyb. [1][8]

Poslední skupinou materiálů, které se používají jako výztuže kompozitních krycích potahů, jsou přírodní materiály. V různých aplikacích se používají sisal, bavlna, konopí, juta, len, ale i mnoho dalších. Sisalová vlákna jsou poměrně hrubá a neohebná, avšak mají dobrou pevnost a jsou odolné proti působení slané vody. Lněná vlákna jsou naopak tuhá a pevná, lesklá a odolná. Juta patří mezi nejlev-

nější vláknovou výztuž, avšak je silně náchylná na příjem vlhkosti a křehne účinkem UV. Vlákna bavlny jsou dostupná v malé délce (8 – 50 mm), při přetržení mají prodloužení až 8 % a značně absorbují vlhkost. Poslední konopná vlákna jsou pevná, lehká a mají velmi malé prodloužení. Tyto vlákna vykazují nejlepší vlastnosti z uvedených přírodních vláken. [16][17]

Následující tabulka (Tab. 1. 1) porovnává vlastnosti vybraných výztužných materiálů.

Tab. 1. 1: Porovnání vlastností výztužných vláken [16]

Materiál vláken	Hustota ρ [g/cm ³]	Tahový modul E_t [GPa]	Tahová pevnost σ_t [GPa]	Specifická pevnost σ_t/ρ [-]	Specifický modul E_t/ρ [-]	Max. teplota použití T [°C]
S - sklo	2,48	85	4,8	1,94	34,3	300
E - sklo	2,6	72	3,5	1,18	27,6	350
Uhlík (HM)*	1,96	517	1,86	0,95	264	600
Uhlík (HS)*	1,8	295	5,6	3,11	164	500
Kevlar 29	1,44	60	2,7	1,87	41,6	-
Kevlar 49	1,45	130	2,7	1,86	89,6	160
Sisal	1,45	9,4 - 22	0,47 – 0,70	0,32 – 0,48	6,5 – 15,2	-
Len	1,5	27,6	0,35 – 1,50	0,21 – 1	18,4	-
Juta	1,3 – 1,49	13 – 26,5	0,39 – 0,80	0,28 – 0,57	9,3 – 18,9	-
Konopí	1,47	70	0,69	0,47	47,6	-
Bavlna	1,5 – 1,6	5,5 – 12,6	0,29 – 0,80	0,19 – 0,52	3,6 – 8,1	-
Ocel	8,0	210	0,35 – 2,1	0,25	26	900
Hliník	2,7	70	0,14 – 0,62	0,23	25,5	250

* HM – vysokomodulový typ, HS – vysokopevnostní typ

❖ *Kompozitní krycí potahy – matrice:*

Pro vytvoření kompozitního potahu je třeba kromě výztuže ještě jedna složka – matrice (pojivo). Matrice plní řadu úkolů, mezi které patří vytvoření a udržení tvaru kompozitu, ochrana výztužných vláken proti účinku prostředí a přenos namáhání na vlákna. K dokonalému smáčení vláken je třeba, aby matrice měla vhodné povrchové napětí a viskozitu, pokud nejsou tyto vlastnosti zaručeny, nanáší se apretace pro úpravu kompatibility. [1]

Množství pryskyřice v laminátu taktéž ovlivňuje pevnost a právě obsažené množství je ovlivněno mnoha faktory, od zkušenosti obsluhy, až po samotný typ výrobní technologie či typ výztužné tkaniny. [18]

Matrice používané u vláknových kompozitů dělíme na reaktoplastické (termosetické) a termoplastické. V průběhu vytvrzování termosetických pryskyřic dochází vlivem exotermické reakce ke vzniku tepla. Základními procesními parametry při zpracování termosetů jsou teplota a čas. Mezi typické termosetické pryskyřice patří:

- Fenolická pryskyřice
- Epoxidová pryskyřice
- Bismaleimidové pryskyřice
- Polyesterová pryskyřice
- Vinylesterové pryskyřice

Fenolické pryskyřice vznikají reakcí fenolu s formaldehydem. Rozlišují se dva základní typy a to rezoly (jednostupňová pryskyřice) a novolaky (dvoustupňová pryskyřice). Rezoly jsou označovány jako jednostupňové pryskyřice, protože mají molární poměr formaldehyd/fenol < 1 , naopak novolaky se označují jako dvoustupňové, neboť mají tento poměr > 1 . Fenolické pryskyřice mají výbornou odolnost proti vysokým teplotám a ohni, dobré elektrické vlastnosti, rozměrovou stabilitu a odolnost proti různým rozpouštědlům, kyselinám a vodě. Tyto pryskyřice, například u prepregů, je možné vytvrzovat při teplotách od 120 do 175 °C. [14][19]

Epoxidové pryskyřice patří k nejpoužívanějšímu typu matrice v kompozitech pro strukturální aplikace. Mají nízké smrštění (cca 2 %), dobrou adhezi k vlákny, jsou univerzální (vhodné pro většinu typů vláken) a poskytují výborné mechanické vlastnosti. Dále mají velmi dobré elektrické vlastnosti a mají značnou odolnost proti vodě, roztokům alkálií i některým kyselinám a rozpouštědlům. Nevýhodou je jejich vyšší cena v porovnání s polyesterovými pryskyřicemi. Komerční typy pryskyřic se obvykle skládají ze směsi dvou a více epoxidů v kombinaci s jedním nebo dvěma vytvrzovacími činidly. Teplotní odolnost těchto pryskyřic je dána druhem použitých vytvrzovacích činidel a stupněm zesíťení. [1][7][19]

Bismaleimidové pryskyřice jsou speciálním typem pro vysokoteplotní aplikace kompozitů. Mají teplotu použití od 150 do 230 °C, při které si udržují konstantní mechanické vlastnosti a jsou nehořlavé. [7][8]

Nenasycené polyesterové pryskyřice jsou značně rozšířené pro méně namáhané kompozity, vyznačují se nižší cenou, odolností proti účinku prostředí a horšími mechanickými vlastnostmi než epoxidové pryskyřice. Tyto pryskyřice mají díky nízké viskozitě dobré smáčení vláken a rychle vytvrzují, nevýhodou je však značné smrštění (o 5 až 9 %). Tyto pryskyřice se vyrábí reakcí dikarbonových kyselin s glykoly. Právě výběrem kyseliny se dají upravovat vlastnosti jako houževnatost, chemická či tepelná odolnost. V závislosti na iniciátoru mohou být tyto pryskyřice vytvrzovány při teplotách od 25 do 175 °C. [1][15][19]

Vinylesterové pryskyřice jsou velmi podobné polyesterovým, avšak mají reaktivní skupiny na koncích molekulových řetězců. Jsou houževnatější, chemicky odolnější, ale i dražší v porovnání s polyesterovou pryskyřicí. [1][7]

Typickými zástupci ze skupiny termoplastů jsou:

- Polypropylen (PP) a Polyetylen (PE)
- Polyetylen Polyéteréterketon (PEEK) a Polyéterketonketon (PEKK)
- Polyfenylen sulfid (PPS)
- Polyéterimid (PEI)

Hlavním důvodem použití termoplastů vychází z problémů, spojených se zpracováním reaktoplastů. Odpadají například problémy se skladovatelností. Tyto matrice bývají spíše houževnaté, mají však sklon k tečení pod napětím (krípu). Další nevýhodou jsou vyšší zpracovatelské teploty, problematické lepení, nízká tvrdost a také špatná přilnavost nátěru. Termoplasty v kombinaci s dlouhovláknovou a tkaninovou výztuží se zpracovávají lisováním, tvarováním, případně vytvrzováním v peci či autoklávu, kdy termoplast je ve formě tenké fólie. [1][7]

❖ *Kompozitní krycí potahy – prepregy:*

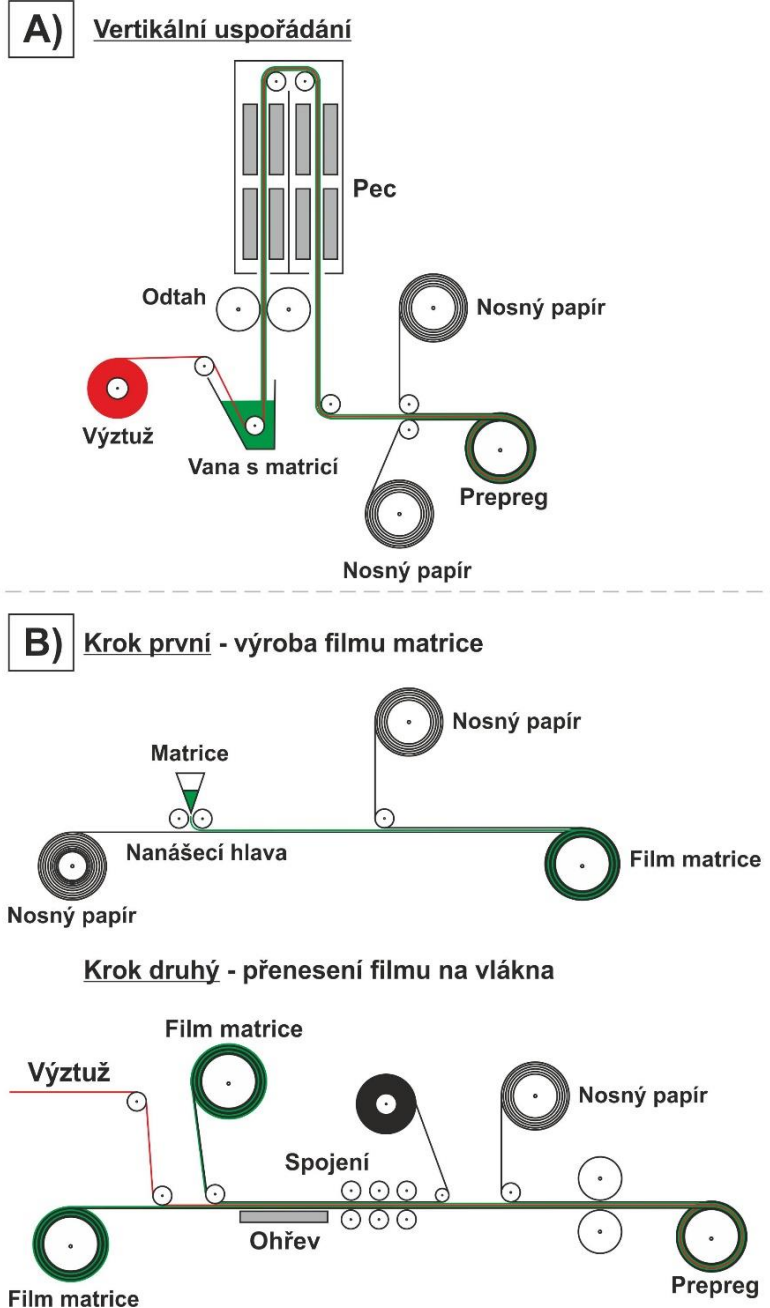
Speciálním druhem materiálů, který se používá na krycí potahy sendvičových konstrukcí, jsou prepregy. Tyto prepregy jsou před-impregnované vláknové materiály patřící do skupiny polotovarů, které po vytvrzení pryskyřice dostávají konečný tvar a stávají se vláknovým kompozitem. Výztuž u těchto materiálů může být jednosměrná, multiaxiální nebo ve formě tkaniny s různou vazbou. Materiál výztuže se liší dle aplikace, používají se skelná, uhlíková, aramidová a v poslední době jsou i pokusy připravit přírodní materiály ve formě prepregu. V dopravě kolejových vozidel se používá téměř výhradně výztuž skelná. [1]

Dále se jednotlivé prepregy liší typem použité pryskyřice, kdy mezi nejvíce používané patří fenolické a epoxidové pryskyřice, v poslední době i pryskyřice polyimidové. Na základě použité pryskyřice se liší procesní parametry, zejména čas a teploty vytvrzování. Mezi tradiční výrobce těchto materiálů patří firmy Hexcel, Gurit, Pro-systems, Huntsman a mnoho dalších. [13][15]

Mezi výhodné zpracovatelské vlastnosti těchto materiálů patří přesný poměr vláken a pryskyřice, definovatelná lepivost a tedy přilnavost k formě, kontrolovaný tok pryskyřice při procesu vytvrzování, dobrá manipulovatelnost a tvarovatelnost (snadno kopírují složité tvary a přechody forem bez vzniku přehybů a porušení vazeb tkaniny). Nevýhodou pak zůstává nutnost skladování při záporných teplotách (-20 °C) a stále ještě poměrně vysoká cena. [8][15]

Tyto materiály se připravují dvěma technologickými postupy (Obr. 1. 3). Při první jednokrokové výrobě, kdy linka může mít vertikální či horizontální uspořádání, dochází na jedné straně linky k odvíjení výztuže (tkaniny) ze zásobníku, která prochází přes lázeň obsahující pryskyřici, následně prosycená tkanina postupuje přes chlazené válce, dále mezi válce definující tloušťku. Poté dochází

k oboustrannému nanesení ochranné PE fólie/nosného papíru a návinnu prepregu do role. Při dvou krokové výrobě dochází nejdříve k nanesení pryskyřice na ochranné fólie na jedné lince a následně na druhé je pak pryskyřice prohřáta, mezi válce je současně navedena tkanina a ze dvou stran tyto fólie s pryskyřicí, kde dochází k samotné impregnaci. Následuje chlazení a návinn do role. [1][13]



Obr. 1. 3: Výroba před-impregnovaných výztužných materiálů;
(A) Jednokroková výroba, B) Dvou kroková výroba)

Prepregy bývají zpracovávány ručně, poloautomaticky či dokonce plně automaticky (technologie navíjení, robotické kladení na formu apod.). Výroba finálních výrobků pak probíhá pod pružnou fólií vytvrzováním v peci či autoklávu, nebo kontaktním lisováním v kovových formách. [8][15]

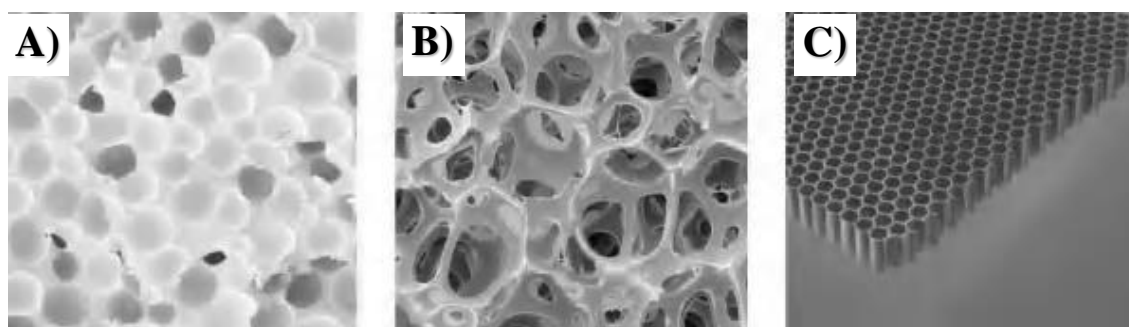
❖ *Ostatní typy nekovových potahů:*

Dřevo je přírodním materiálem, který je anizotropní a to díky vláknům celulózy v jeho struktuře. Orientace těchto vláken odpovídá směru růstu stromu, tudíž vlastnosti v jednom směru jsou jiné, než ve směru kolmém. Vlastnosti jsou silně závislé na typu použitého dřeva. Naopak překližka je již historicky značně používaný kompozit (laminát), skládající se z více tenkých vrstev dřeva. Výhody dřeva jsou nízká cena a váha, avšak v mechanických vlastnostech nedosahují na ostatní typy krycích potahů. Hustota překližek se pohybuje mezi 550 až 700 kg/m³ [5][12]

1.2 Jádrové materiály

Jádrové materiály používané u sendvičových konstrukcí lze rozdělit do čtyř hlavních skupin. Jde o kovové či polymerní pěny, kovové či nekovové voštinové materiály, tvarová jádra a materiály na přírodní bázi (korek, balza). Řada výzkumných prací se pak věnuje přípravě a charakterizaci vlastností sendvičových konstrukcí s tzv. tvarovými jádry (například [20][21][22][23]). Hlavními parametry, na základě kterých jsou jádrové materiály posuzovány, jsou hustota, smykové vlastnosti, zvukově a tepelně izolační vlastnosti, chování v ohni a odolnost proti příjmu vlhkosti. Na hustotě závisí samotná váha výsledného sendvičového panelu a jeho izolační vlastnosti závisí na typu materiálu a tloušťce jádra. Ve většině aplikací jsou sendvičové panely a konstrukce namáhány zejména ohybem, kdy jádro přenáší značné posuvné (příčné) síly a je tedy nutné, aby jádro mělo dostatečnou smykovou tuhost a pevnost. [5][12]

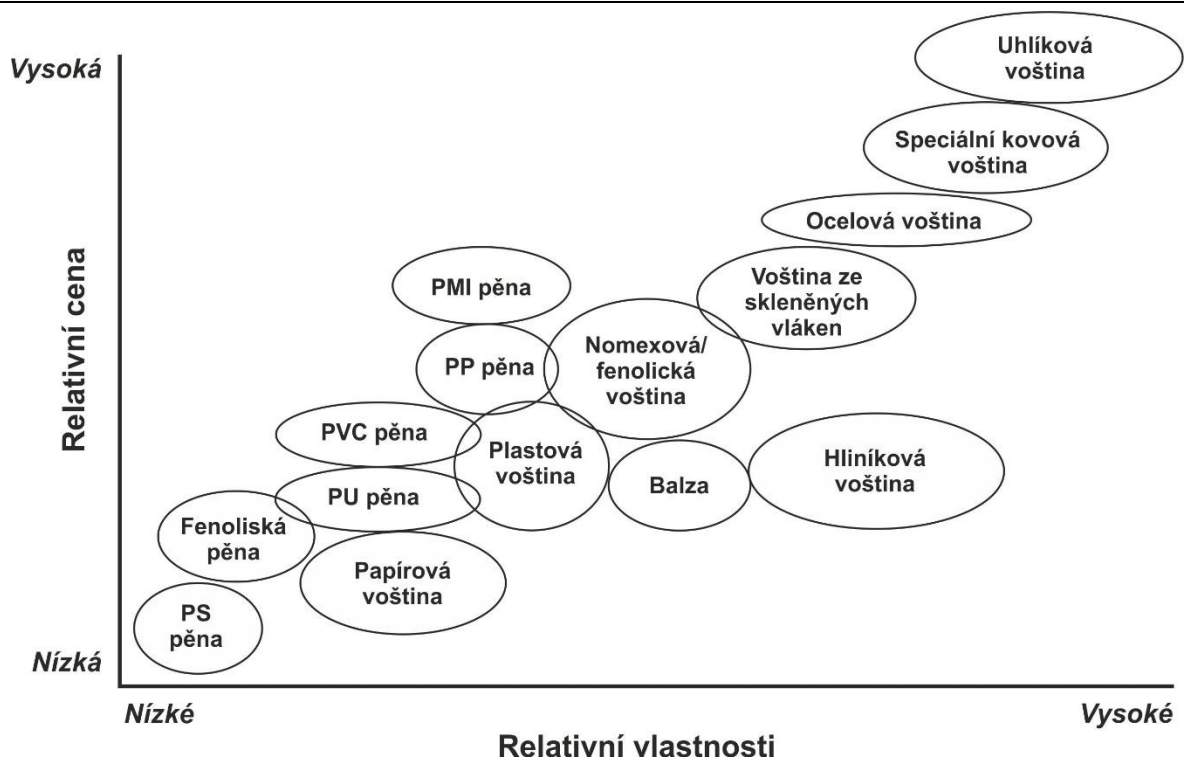
Jak bylo zmíněno, existuje velké množství jádrových materiálů, avšak následující text je zaměřen pouze na polymerní pěny (Obr. 1. 4 A a B) a voštinová jádra (Obr. 1. 4 C), jejichž aplikace u moderních sendvičových konstrukcí převládá.



Obr. 1. 4: Hlavní typy buněčných struktur; [14]

(A) 3D uzavřená buněčná struktura – pěna, B) 3D otevřená buněčná struktura – pěna, C) 2D buněčná struktura – voština)

Následující schéma (Obr. 1. 5) ukazuje relativní srovnání jednotlivých jádrových materiálů s ohledem na jejich cenu a vlastnosti. Jak je z obrázku patrné, voštinové jádrové materiály svými, zejména mechanickými vlastnostmi značně převyšují pěnová i přírodní jádra, avšak úměrná je tomu i jejich cena. [8]

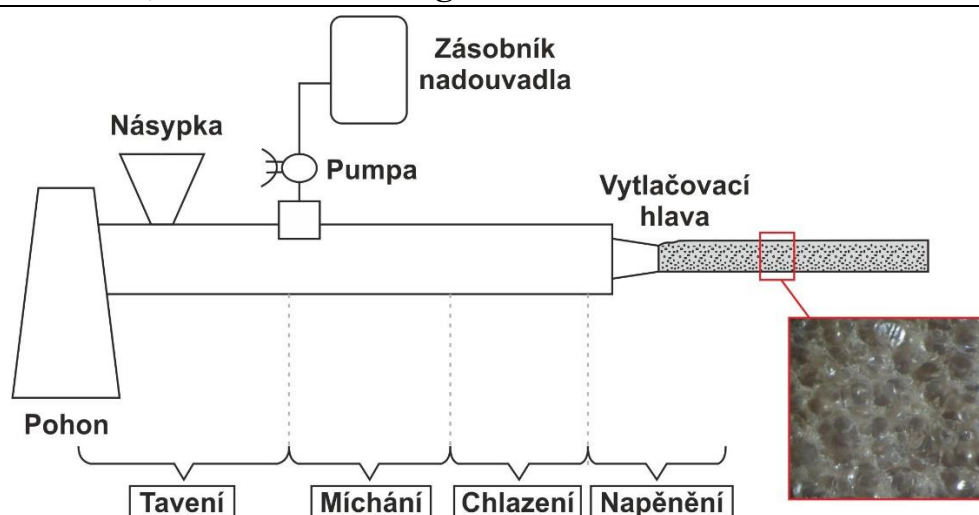


Obr. 1. 5: Srovnání jádrových materiálů s ohledem na cenu a vlastnosti [8]

1.2.1 Polymerní pěnová jádra

Polymerní pěnová jádra se připravují řadou různých technologií. Obecným principem je vmíchání molekul plynu do tekutého monomeru či taveniny polymeru, následně dochází k expanzi bublin, jejich stabilizaci a poté k zafixování tvaru polymerní pěny chemickou reakcí (zesíťováním) nebo ochlazením na pokojovou teplotu. Samotný plyn se do polymeru vnáší buď mechanickým mícháním, nebo smícháním nadouvadla a polymeru. Pro přípravu polymerních pěn se používají buď fyzikální (inertní plyny) nebo chemická nadouvadla (např. uhličitán sodný). Polymerní pěny vynikají zejména díky nízké váze, nižší ceně v porovnání s voštinovými jádry, velmi dobrým tepelně a zvukově izolačním vlastnostem a schopností absorbovat energii při rázu. [5][14][24]

Mezi konkrétní výrobní technologie, pomocí kterých se pěnová jádra vyrábí, patří vstřikování pěn do kovových forem (využívané zejména v automobilovém průmyslu), vytlačování pěnových desek, lisování a rozpouštění plynu v polymerní matici za podpory teploty a tlaku (nejčastěji v autoklávu). Pro výrobu pěnových desek, používaných pro výrobu sendvičových panelů v dopravním průmyslu, se používají zejména pěny vytvořené vytlačováním (Obr. 1. 6). Při vytlačování pěn dochází k přidávku nadouvadla do polymerního materiálu ve válci vytlačovacího stroje, kdy díky přesně definovanému teplotnímu profilu a tlaku dochází k dekompozici těchto nadouvadla a po průchodu materiálu vytlačovací hlavou dochází k růstu a stabilizaci buněk, následované chlazením a tuhnutím výsledné pěnové desky. [14]



Obr. 1. 6: Schéma vytlačování pěnových struktur [14]

❖ Polyetylentereftalátová pěnová jádra

Polyetylentereftalátové (PET) pěny patří do skupiny termoplastů, což umožňuje jejich bezproblémovou recyklaci. U sendvičových konstrukcí nachází uplatnění zejména z důvodu vynikajících FST (Fire-Smoke-Toxicity) vlastností, vysoké chemické stability, nízkému příjmu vlhkosti (z důvodu uzavřených buněk ve struktuře) a také rozměrové stálosti za vyšších teplot. Na trhu jsou tyto pěny dostupné v hustotě od cca 60 až do 200 kg/m³. PET pěny je možné zpracovávat pomocí všech technologií pro výrobu sendvičových konstrukcí a je možné je obrábět do potřebných tvarů. Sendvičové panely, obsahující PET jádro, můžeme nalézt například jako podlahy, boční panely a prvky kabiny v dopravním průmyslu, trupy a interiérové panely u lodí, nebo jako kryty a obložení ve stavebnictví. Mezi hlavní výrobce PET pěn patří společnost 3A Composites pod označením AIREX T, respektive DIAB a jejich Divynicell P. [25][26][27][28][29]

❖ Polyvinylchloridová pěnová jádra

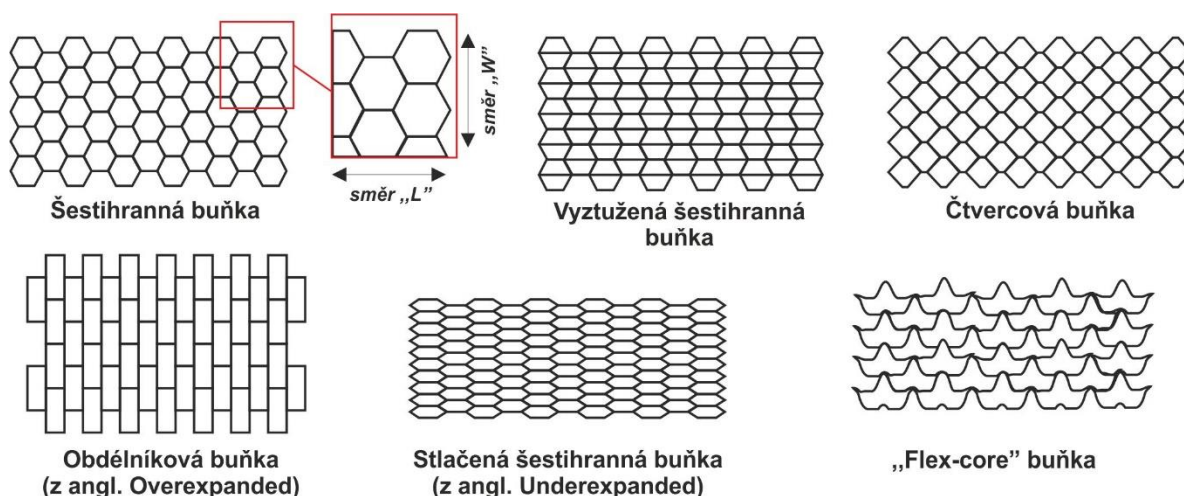
U sendvičových konstrukcí jsou používány dva typy polyvinylchloridových (PVC) pěn a to čistě termoplastická, tzv. lineární PVC pěna, nebo zesíťovaná PVC pěna. U obou typů obsahuje struktura uzavřené buňky. Lineární pěny jsou houževnaté, avšak značně měknou při zvýšené teplotě. Pěny ze zesíťovaného PVC vynikají díky excelentním mechanickým vlastnostem vztaženým k velmi nízké hmotnosti, velmi dobrou chemickou odolností, dobrou tepelnou a akustickou izolací a samozhášivostí. PVC pěny se vyrábí v hustotách od cca 40 do 250 kg/m³. Tyto pěny nejsou vhodné pro výrobu sendvičových konstrukcí lisováním, zbylé technologie se s výhodou používají. PVC jádra uvnitř sendvičových konstrukcí nalezneme v dopravě jako boční panely a kryty, u větrných elektráren jako části vrtulových listů, dále jako výplně u snowboardů a surfů nebo uvnitř stěn nádrží a kontejnerů. Na trhu jádrových materiálů jsou PVC pěny dostupné od výrobců Gurit (Gurit® PVC), 3A composites (AIREX C) a DIAB (Divynicell H). [1][27][30][31][32][33][34]

❖ Další typy pěnových jádrových materiálů

Mezi další pěnové materiály, které se používají u sendvičových konstrukcí, patří polystyrén (PS), který se vyrábí v hustotách od 15 do 300 kg/m³ a je používán zejména díky dobré tepelné izolaci a nízké ceně. Nemůže však být použit v kombinaci s polyesterovou pryskyřicí, neboť ho rozpouští styren v ní obsažený. Dále se používají polyuretanové (PUR) pěny s otevřenými i uzavřenými buňkami v hustotách od 30 do 500 kg/m³. Mají velmi dobré izolační vlastnosti, avšak mechanické vlastnosti jsou v porovnání s ostatními typy plastových pěn nejnižší. Styren-akrylonitrilové (SAN) pěny mají obdobné mechanické vlastnosti jako PVC pěny, avšak mají vyšší houževnatost a díky tomu lépe pohlcují rázy. Nahrazují zejména lineární typy PVC pěn. Vyrábí se o hustotě cca 60 až 160 kg/m³. Poslední zástupcem jsou polymetakrylimidové (PMI) pěny, které mají nejlepší mechanické vlastnosti z dostupných pěn, avšak také nejvyšší cenu. Jejich další velkou výhodou je teplotní odolnost (do 180 °C), díky které jsou vhodné zejména pro vytvrzování v autoklávu. PMI pěny jsou dostupné o hustotě v rozmezí od 30 do 300 kg/m³ se strukturou tvořenou uzavřenými buňkami. [5][18][35][36][37]

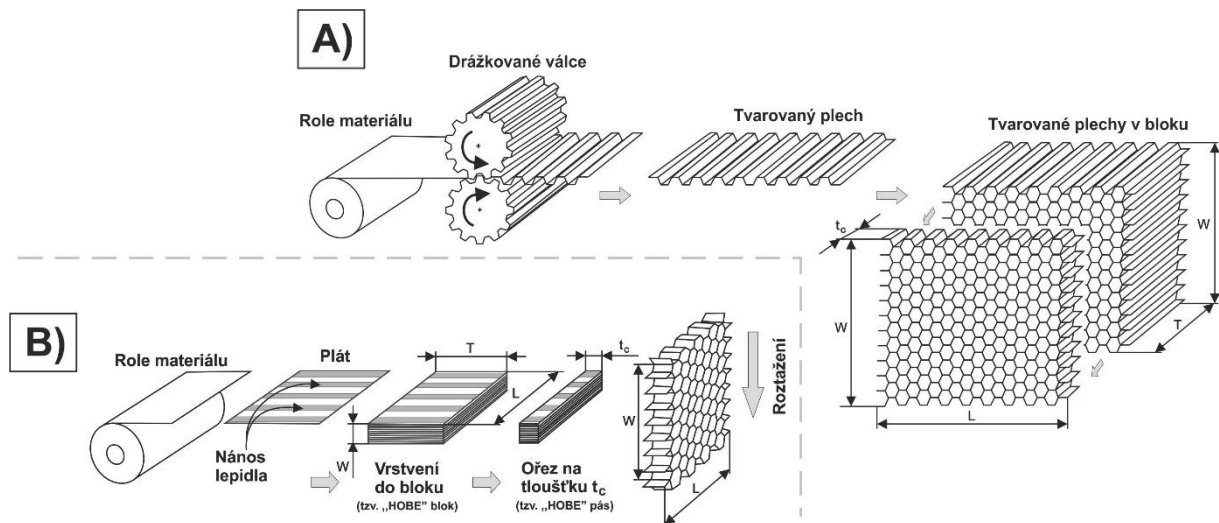
1.2.2 Voštinové jádrové materiály

Voštiny (z angl. Honeycombs) byly původně vyvinuty pouze pro aplikace v letectví, avšak s postupem času a vývojem výrobních technologií došlo k jejich průniku do dalších odvětví průmyslu. Voštiny mohou být vyrobeny s různým tvarem buněk, avšak mezi nejpoužívanější patří šestihránné buňky. Dále jsou vyráběny buňky čtyřhranné, vyztužené a speciálních tvarů (např. „flex-core“ či „tube-core“). Schéma jednotlivých typů buněk zobrazuje následující obrázek (Obr. 1. 7). Voštiny se vyrábějí jak z kovových, tak nekovových materiálů. Mezi kovové patří hliník, korozi odolná ocel, titan a slitiny niklu. Do skupiny nekovových náleží nomexový papír, skelná vlákna, lepenka a tyto materiály bývají impregnovány pomocí fenolických, polyesterových nebo polyimidových pryskyřic. Ideální obsah pryskyřice je přibližně 50 %. [2][15]



Obr. 1. 7: Vybrané tvary buněk voštinových materiálů [4]

Pro výrobu voštinových jader se používají zejména dvě výrobní technologie (Obr. 1. 8), jedná se o výrobu tvarováním a o technologii využívající expanze (roztáhnutí). První zmíněná technologie se používá pro výrobu kovových voštin o vyšší hustotě. Podstatou je průchod plátu materiálu mezi tvarovanými válci, skládání do bloků a lepení či svařování v místě styku. Druhá technologie využívá vrstvení tenkých plátů materiálu na sebe, na kterých jsou v jistých místech naneseny vrstvy lepidla. Po vytvrzení lepidla (například v lisu) dochází k nařezání na požadované tloušťky a roztáhnutí do příslušného tvaru buněk. Po roztážení a naimpregnování požadovanou pryskyřicí dochází k zafixování stavu (tvaru) účinkem tepla (vytvrzením) v peci. [4][15]

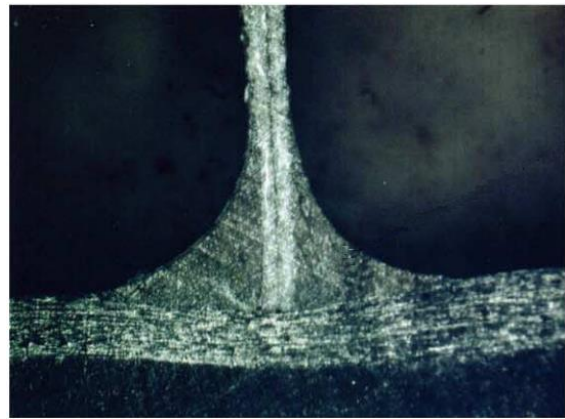
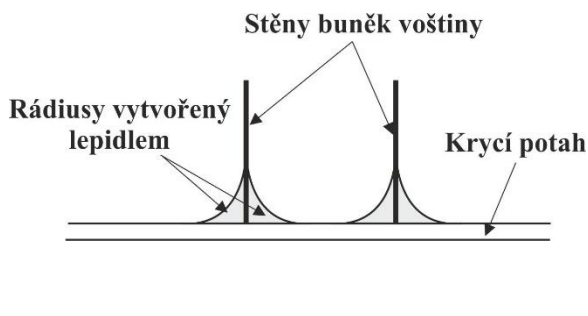


Obr. 1. 8: Technologie výroby voštinových materiálů; [15]

(A) Technologie využívající tvarování, B) Technologie využívající expanze)

Voštinové materiály jsou definovány velikostí a tvarem buňky, hustotou (materiálem) a tloušťkou jádra. Tyto jádrové materiály vynikají díky vysoké tuhosti ve směru kolmém na buňky, vysokou smykovou tuhostí a pevností s ohledem na váhu a také velkou odolností proti únavě. Největší nevýhodou je stále jejich vysoká cena. [4][5][15]

Hlavním problémem sendvičových panelů s voštinovým jádrem je soudržnost všech vrstev, neboť styčná plocha mezi potahem a stěnami voštiny je velmi malá. Vrstva lepidla musí být dostatečně tenká, aby zbytečně nezvyšovala váhu panelu, ale na druhé straně musí zaručit přenos napětí z jednoho potahu přes jádro na druhý. Strukturální pevnost spoje mezi potahem a voštinou záleží na velikosti rádiu lepidla nebo matrice (Obr. 1. 9), který se vytvoří právě mezi potahem a stěnou voštiny [38]. Pro posouzení soudržnosti jednotlivých vrstev sendvičových konstrukcí slouží řada testů, viz [39][40].



Obr. 1. 9: Umístění rádiusu lepidla mezi stěnou voštiny a potahem [38]

Okada a Kortschot [41] experimentálně určili, že s rostoucím množstvím energie, kterou je potřeba vynaložit k porušení rádiusu tvořeného lepidlem, roste odolnost proti delaminaci celého panelu. Odolnost lepidla a tedy i rádiusu je možné řídit tuhostí použitého lepidla a také kontrolou množství objemu pryskyřice a vytvrzovacích parametrů. Problematice adheze mezi voštinami a krycími potahy se věnuje řada výzkumů a to z pohledu materiálů, procesu výroby nebo simulací. [42][43][44]

Mimo aplikace u sendvičových panelů se voštinové materiály používají jako prvky pohlcující rázovou energii (např. „tube-core“), pro stínění rádiových frekvencí a jako usměrňovače proudu vzduchu. [4][15]

❖ Nomexové voštiny

Nomex® je obchodní název pro aramidový papír prosycený fenolickou pryskyřicí. Voštiny vyrobené z tohoto materiálu jsou používány díky vysokým hodnotám pevnosti a tuhosti při nízké hmotnosti blízké se vlastnostem hliníkových voštin. Mezi další výhodné vlastnosti patří tepelná stabilita až do 180 °C a vysoká požární odolnost. Nomexové voštiny jsou k dostání na trhu v rozmezí hustot od 32 do 123 kg/m³ při standardní velikosti buněk od 3,2 do 9,5 mm. Jejich hustota je upravována počtem namáčení (cyklů) do fenolické pryskyřice. Tyto voštiny jsou nejčastěji dostupné s šestihranným či obdélníkovým (OX) tvarem buněk. Mezi významné výrobce patří firma Schultz (Coremaster) a Hexcel (HexWeb HRH). Tyto voštiny nachází uplatnění jako jádrový materiál u vrtulových listů helikoptér, u panelů tvořící křídla letadel, dále u interiérových panelů ve vlacích i tramvajích a u sportovního náčiní. [4][5][15][45][46][47][48][49][50]

❖ Další materiálové typy voštin

Z historického hlediska je jedním z nejstarších typů voštinových materiálů lepenkový papír impregnovaný vybraným typem pryskyřice. Voštiny z toho materiálu jsou levné, ale používají se pouze v nábytkářství a jako ochranný výplňový materiál. Vyskytují se v hustotách od 23 do 56 kg/m³. [5][51]

V některých aplikacích se i buňky vyplňují polymerní pěnou a to pro zvýšení tepelné izolace. Asi nejdůležitějším zástupcem jsou hliníkové voštiny. Vyrábí se z tenkých hliníkových plechů třídy 3003 (AlMnCu), 5052 (AlMg), 5056 (AlCuNi) a 2024 (AlCuMg), kdy nejčastější je třída 5052. Veškeré hliníkové voštiny jsou během jejich výroby opatřeny ochrannými, antikorozními povlaky (např. oxid zirkoničitý). Hliníková fólie (o tloušťce 60 – 80 μm), ze které je voština vyrobena, může obsahovat mikro otvory sloužící k odvodu vedlejších produktů (sloučenin) vznikajících při vytvrzování lepidel či pryskyřic v průběhu výroby sendvičových panelů. Mezi výrobce patří např. firmy Hexcel (HexWeb CR), Euro-Composites a Corex-Honeycomb. Tyto voštiny se vyskytují v hustotách od 26 do 128 kg/m^3 , při velikosti buněk od 3,2 mm a o minimální tloušťce 3 mm. Hliníkové voštiny vynikají zejména díky vysokým mechanickým vlastnostem vztaženým na jejich hmotnost a také provozní teplotou do 180 °C. [4][5][46]

Poslední velkou skupinou jsou termoplastické voštiny. Voštiny z těchto materiálů jsou poměrně moderní, jejich výroba docela ekonomická, avšak co do vlastností nedosahují takových parametrů jako hliníkové či nomexové voštiny. Buňky tvoří šestihrany nebo trubičky. Vyrábí se zejména z polypropylenu (PP), polyéteryimidu (PEI) a polykarbonátu (PC), avšak v současné době se řada firem věnuje jejich výrobě i z dalších typů termoplastů. Někteří výrobci nabízí také voštiny opatřené po obou stranách netkanou textilií pro lepší adhezi mezi potahy a voštinou. Výroba těchto typů voštin probíhá oběma výše uvedenými metodami, ale objevují se i nové přístupy, například vytlačování polovičního šestihranného profilu s následným nařezáváním a natavením do typických buněk. Termoplastické voštiny jsou dostupné v různých hustotách, lišících se podle typu plastu, typicky mezi cca 40 až 300 kg/m^3 . Velikost buněk je opět různorodá, typicky používaná je 8 mm a vyšší. Mezi tradiční dodavatele patří například firma Nidaplast. [4][52][53]

1.3 Výrobní technologie

Sendvičové konstrukce mohou být připraveny velkou řadou výrobních technologií a jejich volba záleží na řadě skutečností. Mezi fakta, které určují volbu konkrétní technologie patří počet vyráběných kusů, složitost dílce, zvolené materiály, kvalita povrchu, rozměrové tolerance a řada dalších. Dalším důležitým faktem je co nejvíce omezit dodatečné práce na vyrobeném dílci (začišťování, lakování, obrábění, apod.). [8]

Technologie je možné dělit z mnoha hledisek, například z pohledu automatizace je dělíme na:

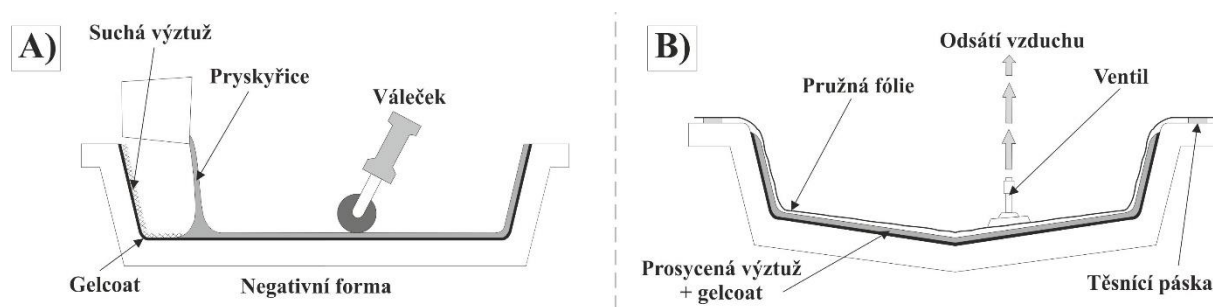
- Manuální
- Částečně automatizované
- Zcela automatizované
- Kontinuální [1]

Formy jako nástroje pro výrobu sendvičů mohou být vyrobeny z různých materiálů. Volba materiálu formy souvisí zejména s počtem vyráběných kusů. Mezi tradiční patří laminátové formy (nejčastěji sklo+polyester), obráběné hliníkové a ocelové formy, případně prototypové formy z betonu či dřeva. Dále formy rozdělujeme na jednodílné (pozitivního x negativního tvaru) a dvoudílné. Na formu musí být vždy před výrobou nanesen vhodný separátor (dle použité pryskyřice) a případně i ochranný gelcoat (tloušťka gelcoatu je v rozmezí od 0,5 do 1 mm). [2][7][10][54]

I když existuje velké množství výrobních technologií a jejich různých modifikací, následující kapitoly budou zaměřeny pouze na technologie, kterými se vyrábí běžné sendvičové konstrukce a dílce.

1.3.1 Ruční kladení

Metoda ručního kladení (Obr. 1. 10) je jedna z nejstarších technologií. Principem je kladení výztužných materiálů či jádra a jejich postupné impregnování pryskyřicí. Pryskyřice je nanášena ručně pomocí válečku, stěrky či štětce. Tato technologie je vhodná pro všechny typy jádrových a výztužných materiálů. Její hlavní výhodou je jednoduchost, nízké náklady a možnost vytvrzování za pokojové teploty. Pro zvýšení kvality a odstranění vzduchových bublin, i nadměrného množství pryskyřice je možné všechny vrstvy stlačit účinkem podtlaku pod pružnou fólií. Mezi nevýhody patří nutnost použití pryskyřic o nižší viskozitě (pro snadné nanášení), malá produktivita a problém s odpařováním styrenu (při zpracování polyesteru a vinylesteru). Tato metoda umožňuje vytvoření pouze jedné pohledové strany, dále je vhodná jak pro rozměrné kompozitní výrobky, tak pro menší dílce. [1][6][19]



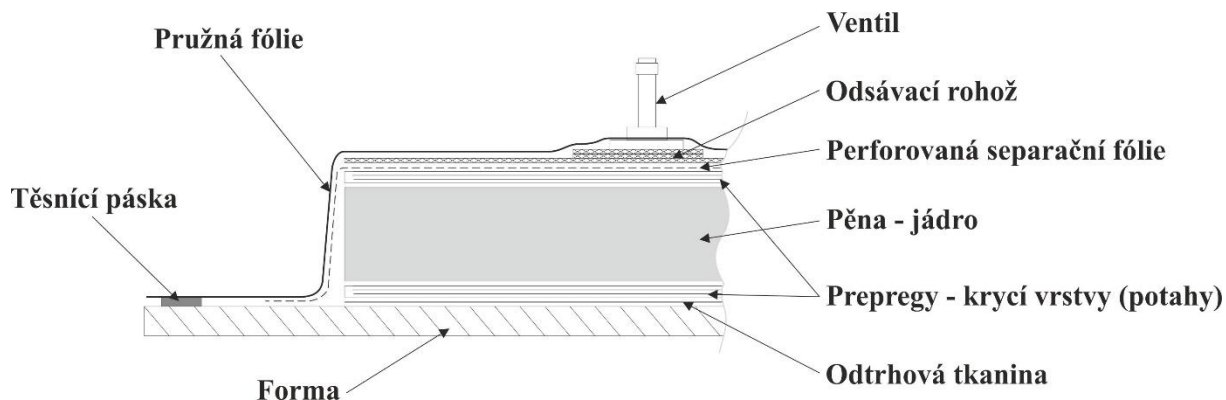
Obr. 1. 10: Technologie výroby pomocí ručního kladení;
(A) tradiční ruční kladení, B) ruční kladení + použití pružné fólie)

1.3.2 Prepreg technologie

Technologie kladení prepreg materiálů patří do tzv. suchých technologií, neboť obsluha nepracuje s kapalnou pryskyřicí. Prepregy byly představeny v kapitole 1.1.2 a při výrobě dílců z nich se využívá všech jejich předností. Při kladení na formu, která může být jak laminátová, tak kovová se využívá lepivosti pryskyřice v prepregu, která se dá zvýšit mírným ohřevem. Jednotlivé vrstvy z prepreg materiálu, které tvoří kompozitní díl, mohou být předem nařezány na

řezacím plotteru. Po umístění příslušných vrstev, které tvoří jeden potah na formu, dochází k umístění jádra. Při této technologii je možné použít jakéhokoli jádra bez nutnosti speciálních úprav. Po umístění následuje další kladení prepregů tvořících druhý krycí potah. Umísťování prepregů na formu může probíhat manuálně, poloautomaticky či zcela automaticky. Při manuálním způsobu se může využít například laserového značení polohy jednotlivých vrstev. [5][7][8]

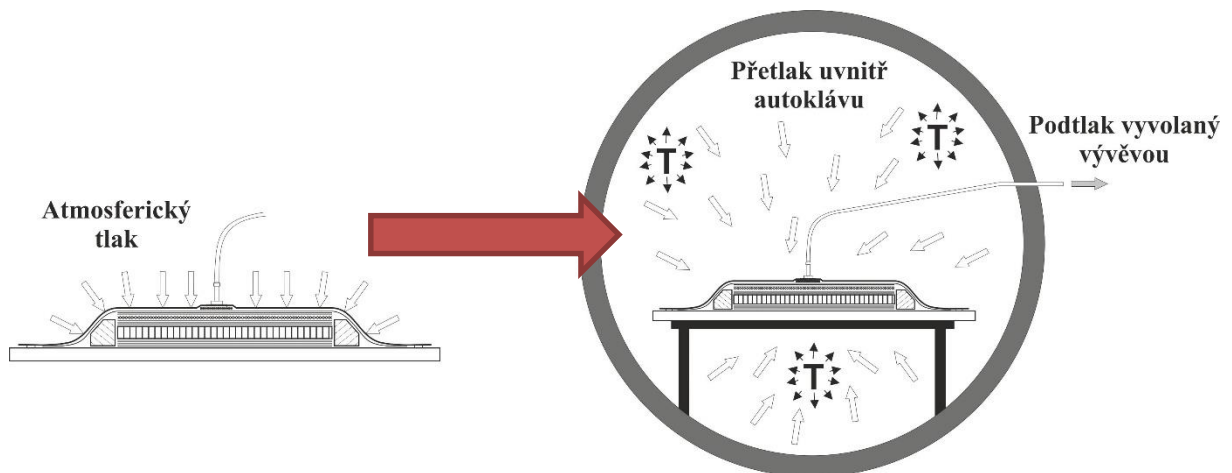
Po umístění všech materiálů, tvořících následnou sendvičovou konstrukci, dochází ke kladení tzv. pomocných materiálů (Obr. 1. 11). Ihned na poslední vrstvu prepregu se umísťuje separační fólie. Tato fólie je po celém povrchu perforovaná a umožňuje tak odvedení těkavých látek a přebytečné pryskyřice mimo výrobek. Přebytečné množství absorbuje tzv. odsávací, nejčastěji skelná rohož. Z obou stran kompozitu ještě před separační fólií může být umístěna odtrhová tkanina. Jedná se o tkaninu z polyamidu či polyesteru, která je opatřena separátorem. Tato tkanina umožňuje jednak snadné odformování, ale také po její odstranění vzniká povrch, který je připraven pro lepení či barvení bez nutnosti dalších úprav. Poslední vrstvou, zakrývající všechny předchozí materiály je vakuovací (někdy nazývaná jako pružná) fólie opatřená těsnicí páskou. Vakuovací fólie je nejčastěji vyrobena z materiálů polyamid 6 (PA6) – použitelný do 160 °C, případně PA 66 – použitelný do cca 210 °C. Pro velmi tvarově složité, případně pro velké série výroby se používají pružné membrány z pryže s předlisovaným tvarem. Všechny tyto materiály musí vydržet vytvrzovací teploty a musí být netečné vůči pryskyřici uvnitř prepregu. [13][15]



Obr. 1. 11: Schéma skladby prepregů, jádra a pomocných materiálů

Jakmile jsou všechny materiály uloženy na formu, dochází k odsátí vzduchu z prostoru mezi formou a pružnou fólií. Kontrola podtlaku se provádí pomocí manometru. Ideální hodnota absolutního tlaku je 0,08 MPa. Po kontrole dokonalé těsnosti je forma přesunuta na vytvrzení. K vytvrzování dochází uvnitř vytvrzovací pece nebo v autoklávu (Obr. 1. 12). Vytvrzování v autoklávu vyžadují zejména letecké společnosti od svých dodavatelů. Uvnitř autoklávu na materiály působí mimo určité hodnoty podtlaku také přetlak uvnitř nádoby. Čas a teplota vytvrzování jsou závislé na typu pryskyřice uvnitř prepregu. K chladnutí sendvičového dílce dochází nejčastěji pozvolna až na pokojovou teplotu. Následně jsou

všechny pomocné materiály z formy sejmuty a putují do odpadu, z formy se dále odstraní dílec a forma se připravuje pro další výrobní cyklus. [7][8]

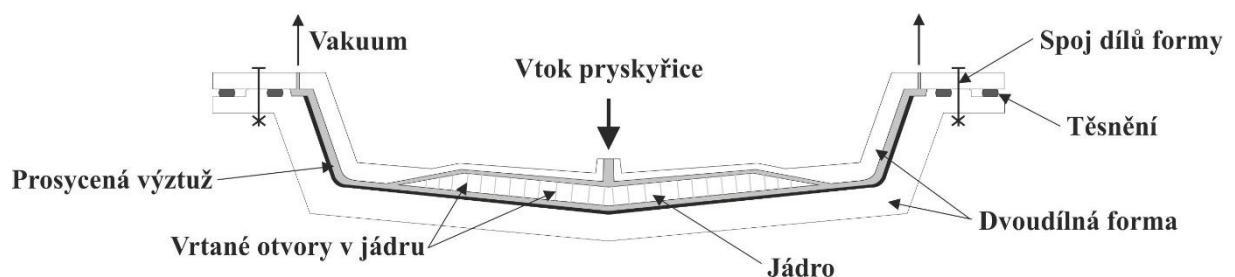


Obr. 1. 12: Schéma vytvrzování prepregů v autoklávu

1.3.3 RTM technologie

Technologie RTM (z angl. Resin Transfer Molding) slouží k výrobě oboustranně pohledových kompozitních panelů. K výrobě slouží dvoudílná forma, která může být laminátová (vyztužená ocelovým rámem, případně ještě vyplněná kamenivem), nebo tradiční hliníková či ocelová forma. RTM je vhodná pro středně až velkosériovou výrobu dílců s ohledem na zvýšené náklady na formu. Principem této technologie je vložení výztuže (preformu) včetně jádra do formy, její uzavření a vstříknutí pryskyřice podtlakem cca 0,2 – 0,35 MPa. K plnění dutiny dochází do té doby, než dojde k zaplnění odtokových otvorů. Prosycování výztuže může být podpořeno asistencí podtlaku (Obr. 1. 13), což pomáhá i k lepšímu odvzdušnění (tzv. technologie VARTM). RTM technologie patří do stejné skupiny jako technologie SRIM (z angl. Structural Reaction Injection Molding), kdy hlavní rozdíl mezi těmito technologiemi je v použitém typu pryskyřice (v její reaktivitě), konstrukci forem, procesu impregnace a délce výrobního cyklu. [8][55]

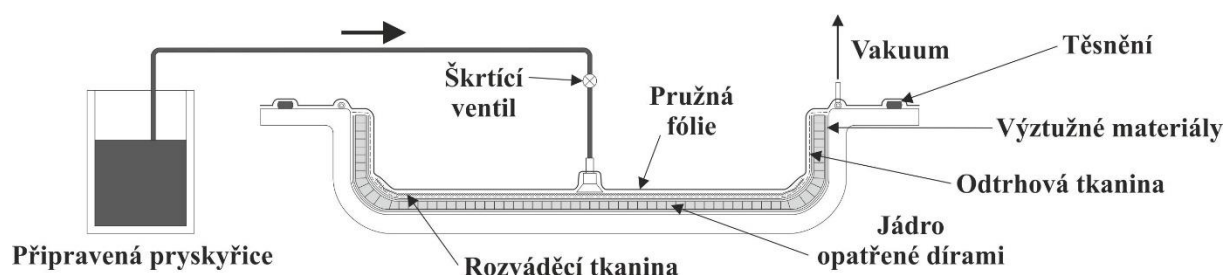
V případě výroby sendvičových konstrukcí není RTM vhodné pro voštinová jádra, ostatní typy jádra musí být opatřeny otvory (vrtanými kanálky), které slouží k distribuci pryskyřice z jedné strany sendviče na druhou. [6]



Obr. 1. 13: Princip VARTM technologie

1.3.4 Vakuová infuze

Podstatou technologie vakuové infuze je nasávání pryskyřice vakuem a současně prosycování výztuže a jádra touto pryskyřicí. K této technologii se používá jednoduchá forma, na kterou jsou umístěny materiály tvořící sendvičovou konstrukci a dále pomocné materiály, jako odtrhová tkanina, rozváděcí tkanina a vakuovací fólie utěsněná po obvodu těsnicí páskou (Obr. 1. 14). Tato technologie není opět vhodná pro sendvičové dílce s voštinovým jádrem, pro ostatní typy jader platí stejná úprava, jako u technologie RTM. Vakuová infuze překonává ruční technologii díky lepšímu poměru výztuže a pryskyřice, a z toho vyplývajícím lepším mechanickým vlastnostem při nižší hmotnosti dílce. Dále je zamezeno při prosycování výztuže kontaktu obsluhy se škodlivými produkty (např. styrenem), prosycování probíhá v uzavřeném systému (pod fólií). Nevýhodou je zvýšená možnost výskytu neprosycených míst na výrobku, což vede ke značné zmetkovitosti, a je tedy nutná vyšší kvalifikovanost obsluhy. Technologie vakuové infuze je vhodná zejména pro rozměrné dílce vyráběné v menších sériích. [1][6][56]



Obr. 1. 14: Výroba metodou vakuové infuze

1.3.5 Ostatní technologie

Další technologie, kterou je možné připravit sendvičové panely, je lepení. Tato technologie se používá pro výroby rovinných panelů s potahy z HPL desek, či kovových plechů. Principem je aplikace lepidla buď v tekuté formě, nebo ve formě fólie mezi potahy a jádro, následně dochází k vytvrzení účinkem teploty nebo samotné chemické reakce. K vytvrzení dochází v lisu nebo pod pružnou fólií či membránou. [55]

Metoda pultruze se používá zejména pro výrobu kompozitních profilů různých tvarů, avšak úpravou linky je možné vyrábět sendvičové panely. Jde o technologii poměrně složitou a v případě sendvičů spíše prototypovou. Hlavní předností této metody je kontinuální výroba. [5][7]

Poslední metodou je již od počátků zpracování polymerů známá technologie lisování. Tato technologie se používá pro výrobu sendvičových konstrukcí s potahy jak z reaktoplastů, tak termoplastů. Ve zpracování kompozitů je pak nejpoužívanější pro BMC (z angl. Bulk Molding Compound) a SMC (z angl. Sheet Molding Compound) materiály. Výhodou této technologie je krátký výrobní cyklus a oboustranně pohledový výrobek. Mezi nevýhody patří velké náklady na kovovou formu a samotný lis, z čehož plynou i značné provozní náklady. Technologie je

tedy vhodná pro velké série výrobků. V případě sendvičových materiálů je třeba volit jádra, která vydrží lisovací tlak od 0,2 do 4 MPa. [1][5]

1.4 Aplikace sendvičových konstrukcí

Sendvičové materiály nachází uplatnění v mnoha oblastech a záleží zejména na požadavcích konkrétní aplikace, která pak určí její samotné materiálové složení.

1.4.1 Dopravní průmysl:

Mezi hlavní požadavky na sendvičové konstrukce použité v dopravě kolejových vozidel jsou stálost mechanických vlastností, odolnost proti únavě, dobrá požární odolnost a jednoduchá údržba a opravitelnost. [57][58]

Konkrétními aplikacemi sendvičových konstrukcí (Obr. 1. 15) s jádrem AIREX T90 jsou například střešní panely u tramvaje Solaris Tramino, vnější krycí panely u vysokorychlostního vlaku Frecciarossa 1000, interiérové panely u tramvají Siemens Combino a kabiny u vlaků X60 Coradia Lirex a CFL-Dosto. Příkladem nahrazení ocelových dílců sendvičovým kompozitem jsou čelní dveře u holandské vlakové soupravy „Koploper“. [9]



Obr. 1. 15: Konkrétní příklady kolejových vozidel obsahující díly ze sendvičových konstrukcí; [9]

(A) Rychlostní vlak Frecciarossa 1000, B) Dvoupatrový vlak CFL-Dosto, C) Vozy metra Bombardier C20, D) Vlak Koploper NS Class 4000/4200, E) Vlak X60 Coradia Nordic, F) Tramvaj Palermo)

Zinno a kol. [50] navrhli více parametrickou proceduru pro návrh sendvičových konstrukcí pro aplikace v dopravě. Zkoumali a porovnávali mechanické vlastnosti sendvičů s pěnovým a voštinovým jádrem, a dále se věnovali i spojům sendvič-

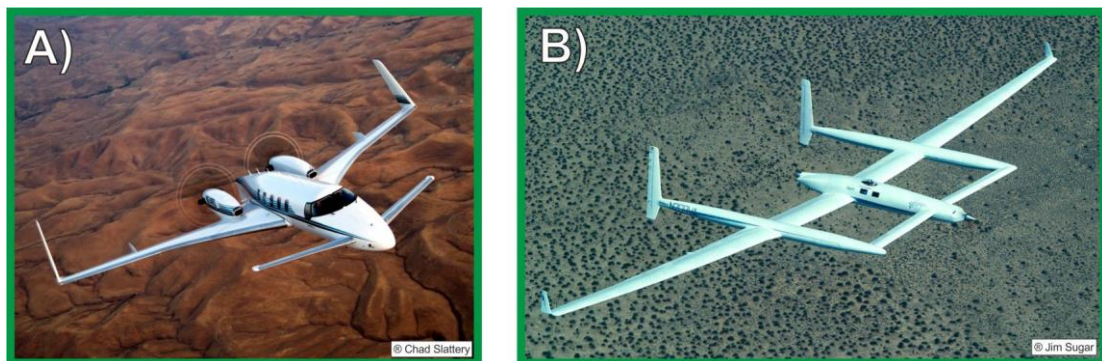
vých panelů. Naopak Belingardi a kol. [59] se věnovali návrhu čela vlaku ze skelných kompozitů v kombinaci s pěnovým jádrem a to jak z pohledu statických ohybových testů, tak i s ohledem na dynamické – rázové vlastnosti. Právě hodnocení odolnosti sendvičových struktur proti průrazu je předmětem velké řady výzkumů. [60][61][62][63][64][65][66]

Aplikaci polymerních kompozitů a konkrétně sendvičových dílců s termoplastickou voštinou se věnovali Ning, Vaidya a kol. [67][68][69]. Uvedli, že dosáhli úspory 55 % váhy dveřního panelu při aplikaci těchto materiálů ve srovnání s panely z hliníkových potahů s ocelovou výztuží.

Porovnání vlastností různých jádrových materiálů a dvou typů potahů pro aplikaci u nízkopodlažního autobusu (boční panely a střecha) se věnoval Shin s kol. [70]. Z jejich experimentů vychází jako nejvhodnější kandidát dle váhy a vlastností sendvičový panel s potahy z kompozitů (skelná tkanina/epoxid) spolu s hliníkovou voštinou.

1.4.2 Letecký a raketový průmysl:

Jak již bylo zmíněno dříve, počátky použití sendvičových konstrukcí v letectví se datují do počátků dvacátého století. Mezi hlavní posuzovaná kritéria patří co nejnižší váha, maximální životnost a bezporuchovost. Typickým příkladem využití těchto materiálů u moderních letadel je využití sendvičů téměř pro celou konstrukci u letadla Beechcraft Starship (Obr. 1. 16). Konkrétně bylo využito uhlíkových či Kevlarových potahů spolu s nomexovou voštinou. Velké množství sendvičových konstrukcí s voštinovým jádrem se nachází také u letadel Boeing 747 v podobě krycích panelů na křídlech, klapek na hlavních křídlech či výškových kormidlech a krytech motorů. Dalším příkladem je letadlo Rutan Voyager tvořené výhradně konstrukcemi s nomexovou voštinou o hustotě $28,8 \text{ kg/m}^3$, tloušťky 6,35 mm a velikostí buňky 3,2 mm s potahy z dvou vrstev uhlíkových prepregů. Mimo civilní sektor můžeme sendvičové konstrukce nalézt také u vojenských letadel, například u McDonnell Douglas F-15, Lockheed F-117, nebo Saab JAS 39. [2][3][4][5]



Obr. 1. 16: Konkrétní příklady aplikace sendvičových kompozitů na dílce v letectví; [2]

(A) Beechcraft Starship, B) Rutan Voyager)

Raketová technika byla jedna z prvních oblastí, kde se ve velkém množství kompozity a sendviče používaly. Velké množství kompozitních dílců, zejména uhlíkových, tvoří jak vnější, tak vnitřní části raketoplánu, prvky teleskopů a solárních panelů. Mimo letadel a raketoplánů se sendvičové materiály používají také u vrtulníků a to na různé panely, kryty dveří, vrtulové listy – voštiny, nebo na kryty kolem motorů – pěny. [2][4][15]

1.4.3 Ostatní oblasti průmyslu:

V lodním průmyslu můžeme sendviče najít v podobě samonosných trupů u závodních člunů, v podobě panelů a přepážek, tvořící interiér i paluby, kde tyto materiály nahradily tradiční dřevo z důvodu jejich nižší váhy a vyšší odolnosti. [4][5]

Di Bella a kol. [71] navrhli a úspěšně otestovali sendvičové kompozity tvořené potahy ze skla a polyesteru s PVC jádrem pro kryt výfuku u jachty. V materiálové skladbě sendvičové konstrukce přidali do rozhraní mezi jádrem a potahem spojovací vrstvu, která zvýšila mechanické vlastnosti a zpomalila vznik mikrotrhlin při zatěžování.

Ve stavebnictví slouží sendvičové konstrukce zejména jako tepelně a zvukově izolační stěny u budov. Například Garrido a kol. [72][73] experimentálně a numericky zkoumali spoje vybraných sendvičových panelů pro podlahy v budovách. Dále Awad [74] zkoumal vlastnosti sendvičových panelů s fenolickým pěnovým jádrem se zaměřením na poruchy celého panelu při působení lokálního zatížení. Můžeme je nalézt u nábytku (papírové voštiny + potahy z překližky), dále u různých mobilních kontejnerů a ochranných stěn. Sendvičové konstrukce jsou vhodné i pro různé sportovní aplikace, například pro sjezdové lyže, pingpongové pátky a kajaky či kánoe. [4][12]

2 OHYBOVÉ CHOVÁNÍ SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ

2.1 Ohyb rovinných, materiálově symetrických konstrukcí

Sendvičové konstrukce, jako vrstevnaté materiály, vykazují v ohybu odlišné chování než materiály homogenní. Navrhovat konstrukce z homogenního materiálu je z hlediska jeho efektivního využití nevhodné, jelikož oblast v blízkosti neutrální plochy je namáhána normálovými silami pouze nepatrně ve srovnání s napětím v krajních vrstvách. [4][75][76]

Jednotlivé vrstvy sendvičové konstrukce přenáší odlišné typy namáhání. Dle orientace ohybového momentu přenáší vždy jeden potah tahové, respektive tlakové napětí, zatímco jádro je namáháno na smyk. [4][75]

Z technické teorie ohybu složených prvků plyne pro poměrnou deformaci myšleného vlákna $\varepsilon_{(y,z)}$ [-], ve vzdálenosti y [m] od neutrální plochy vztah:

$$\varepsilon_{(y,z)} = \frac{1}{r} \cdot y \quad (1)$$

, kde r [m] je poloměr zakřivení neutrální plochy v daném místě. Vzhledem k rovinnosti problému bude deformace a tedy i napětí pouze funkcí pořadnice y . Dosazením Hookeova zákona a rovnice (1) do známé rovnice pro ohybový moment M [N·m] průřezu je získán vztah pro obecný případ ohybu nehomogenního průřezu:

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{\int_{(s)} E(y) \cdot y^2 dS} = \frac{M}{K_0} \quad (2)$$

, kde K_0 [N·m²] odpovídá tuhosti složeného prutu v ohybu. Pro jeho vyčíslení tedy platí následující vztah:

$$K_0 = \sum_{i=1}^n E_i \cdot \int_{(s)} y^2 dS_i = \sum_{i=1}^n E_i \cdot J_i \quad (3)$$

, kde J_i [m⁴] je kvadratický moment i -té materiálové části průřezu vzhledem k neutrální ose, které odpovídá modul pružnosti E_i [N·m⁻²]. Poloha neutrální osy složeného (vrstevnatého) průřezu vyplývá z podmínky rovnováhy sil v ose x nosníku. Na základě této rovnováhy a příslušného odvození pak platí, že neutrální osa leží v těžišti plošného útvaru, který vznikne z původního průřezu myšlenou redukcí šířek b_i [m] jednotlivých ploch S_i [m²] v poměru E_i/E_1 . Modul pružnosti E_1 obvykle odpovídá materiálu s nejvyšší hodnotou tohoto parametru. Výpočtový průřez, který vznikne, je dále nazýván jako redukovaný průřez složeného prutu J_R [m⁴]. [75]

Rovnice pro výpočet tuhosti v ohybu je definována:

$$K_0 = E_1 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_1} \cdot J_i = E_1 \cdot J_R \quad (4)$$

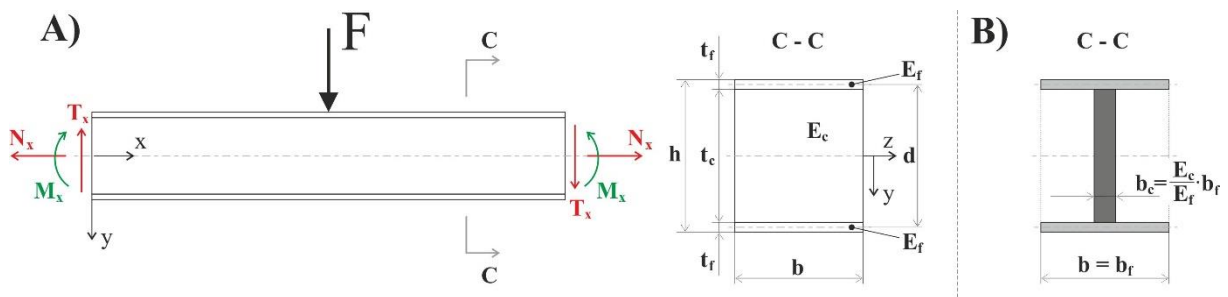
Následně je pak možno rovnici (2) přeformulovat:

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{E_1 \cdot J_R} \quad (5)$$

Dosazením rovnic (1) a (5) do Hookeova zákona získáme vztah pro výpočet ohybového napětí v i -té části průřezu:

$$\sigma_{i(y)} = E_1 \cdot \frac{1}{r} \cdot y = \frac{E_i}{E_1} \cdot \frac{M}{J_R} \cdot y \quad (6)$$

Ve schématu na Obr. 2. 1 je zobrazen sendvičový nosník namáhaný v trojbodovém ohybu, kdy část A) vyobrazuje označení a symboly, použité v následujících rovnicích, část B) pak přibližuje provedenou redukci šířek.



Obr. 2. 1: Schéma sendvičového nosníku namáhaného v trojbodovém ohybu; (A) Použitá označení a symboly, B) Redukce šířky jádra) [5][75]

Pro výpočet ohybové tuhosti K_0 v případě třívrstvého - sendvičového průřezu, tvořeného dvěma tuhými a pevnými potahy (dolní index f) a jádrem (dolní index c) lze podle (3) odvodit následující vztah:

$$K_0 = E_f \cdot \frac{b \cdot h^3}{12} \cdot \left[1 - \frac{E_f - E_c}{E_f} \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{t_f}{h} \right)^3 \right] \quad (7)$$

Tento vztah je možné zjednodušit na základě předpokladů, že modul pružnosti potahů je mnohem větší než modul jádra ($E_f \gg E_c$) a tloušťka jádra je mnohem větší v porovnání s tloušťkou potahů ($t_f \ll t_c$). Poté je ohybová tuhost dána jednoduchým výrazem:

$$K_0 \cong E_f \cdot \frac{b \cdot h^2 \cdot t_f}{2} \quad (8)$$

Pro případy vyhodnocování experimentálních výsledků je možné zavést pojem efektivního modulu pružnosti sendvičové struktury $E_{ef} [N \cdot m^{-2}]$. Je definován jako modul pružnosti myšleně homogenního (jednovrstvého) nosníku tloušťky shodné

s tloušťkou sendvičového nosníku, mající shodnou hodnotu ohybové tuhosti jako daná sendvičová struktura. Je tedy možné formulovat následující vztah:

$$E_{ef} = E_f \cdot \frac{12 \cdot J_R}{b \cdot h^3} \quad (9)$$

Hodnota modulu pružnosti v ohybu naměřeného pomocí standardního ohybového testu je tak zřejmě experimentálně určenou hodnotou efektivního modulu pružnosti sendvičové stěny. [75]

Dosazením do rovnice (6) je možné dostat vztahy pro výpočet průběhu a velikosti ohybových napětí v jednotlivých částech (myšlených vláknech) sendvičového nosníku. Pro napětí v potahu platí:

$$\sigma_f = \pm \frac{M}{J_R} \cdot y \quad (10)$$

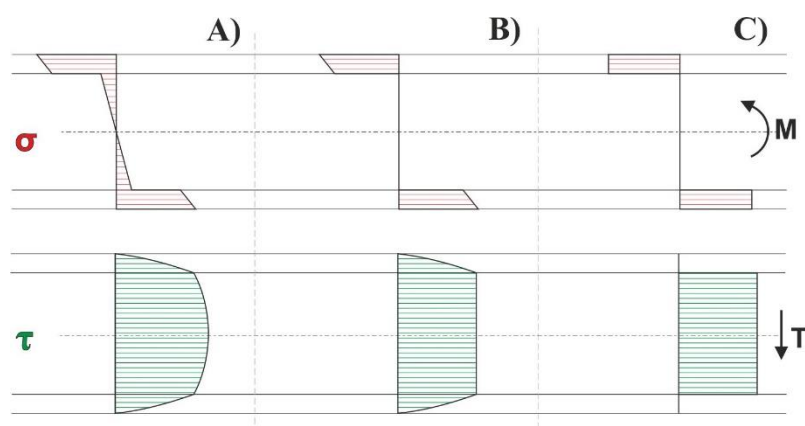
A následně pro ohybové napětí v jádru:

$$\sigma_c = \pm \frac{E_c}{E_f} \cdot \frac{M}{J_R} \cdot y \quad (11)$$

Smyková napětí v potazích, respektive v jádru symetrické sendvičové konstrukce jsou definována pomocí následujících vztahů, kdy platí, že maximální smyková napětí se nachází v oblasti kolem neutrální osy ($y = 0$), zatímco nejmenší na rozhraní jádra a potahu:

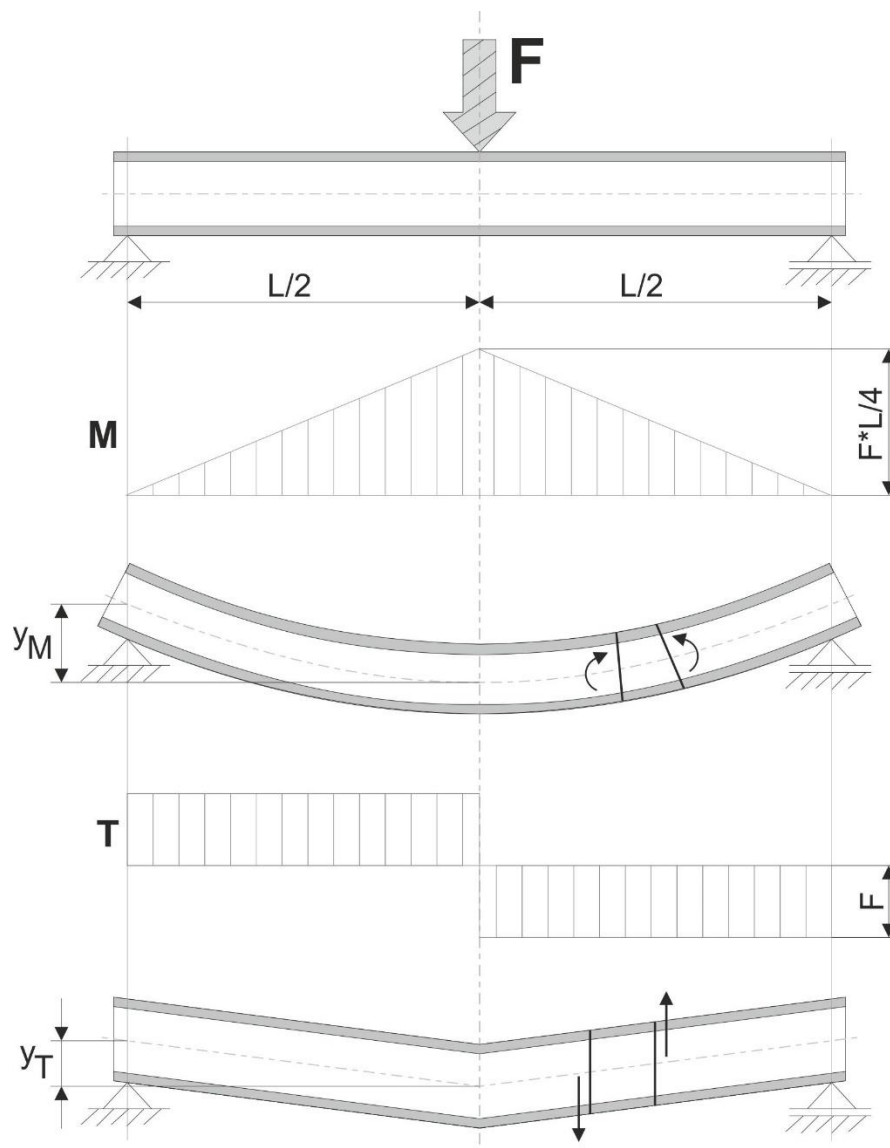
$$\tau_{c,max} = \frac{T_x}{K_0} \cdot \left(\frac{E_f \cdot t_f \cdot d}{2} + \frac{E_c \cdot t_c^2}{8} \right), \tau_{c,min} = \tau_{f,max} = \frac{T_x}{K_0} \cdot \left(\frac{E_f \cdot t_f \cdot d}{2} \right) \quad (12)$$

Grafické znázornění průběhů normálových a smykových napětí při ohybu popsaného pomocí předchozích rovnic a odvození vyobrazuje níže uvedený obrázek (Obr. 2. 2). Distribuce napjatosti ve vzorku bez žádného zjednodušení odpovídá schématu A), po přijetí předpokladu tenkých potahů (B) a následně po přijetí obou dříve uvedených předpokladů odpovídá schématu C). [5][34][77]



Obr. 2. 2: Průběhy normálových a smykových napětí u sendvičového nosníku namáhaného ohybem [5]

Jedním z aspektů mechanického chování sendvičové struktury je vliv obecně značné smykové poddajnosti, tj. nízkých hodnot smykového modulu pružnosti lehčeného jádra na výsledné - efektivní mechanické chování sendvičového prvku. Jak je schematicky znázorněno na Obr. 2. 3, na celkové deformaci vzorku při tříbodovém ohybovém testu se kromě deformace vlivem ohybových (normálových) napětí podílí relativně značnou měrou smykové deformace, neboť smyková napětí daná příčnými silami T [N] v průřezích sendvičového prvku jsou jak známo přenášena prakticky pouze vrstvou lehčeného jádra. [75]



Obr. 2. 3: Vliv smykové poddajnosti jádra na celkovou deformaci sendvičového nosníku – trojbodový ohyb [75]

Jak je patrné z výše uvedeného schématu, lze zvýšení průhybu sendvičového nosníku vlivem smykových deformací y_T [m] položit rovno:

$$y_T = \frac{1}{G_c \cdot b \cdot t_c} \cdot \int_{(L)} T_{(x)} dx \quad (13)$$

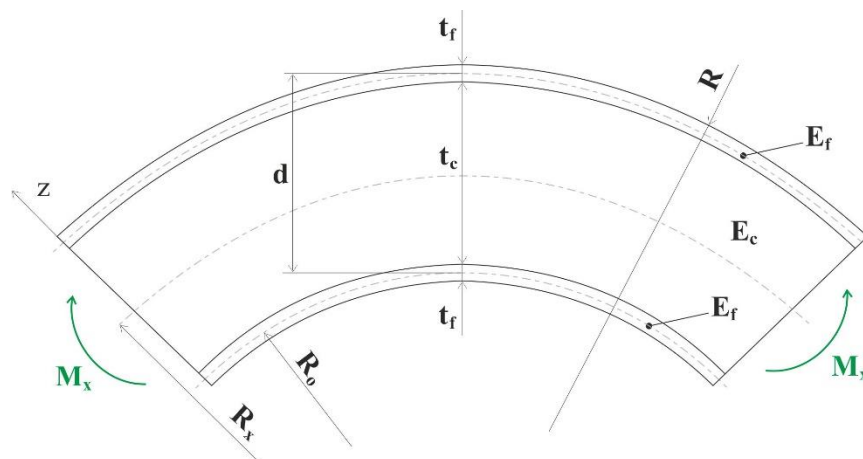
Celkový průhyb nosníku $y [m]$ je pak při zahrnutí tohoto vlivu roven:

$$y = y_M + y_T = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot K_0} + \frac{F \cdot L}{4 \cdot G_c \cdot b \cdot t_c} \quad (14)$$

, kde $y_M [m]$ je průhyb sendvičového nosníku vlivem ohybových momentů, $F [N]$ je zatěžující ohybová síla, $L [m]$ je vzdálenost podpěr a $G_c [N \cdot m^{-2}]$ je modul jádra ve smyku. [75]

2.2 Tvarový faktor – zakřivení

Při zatížení v ohybu vykazují zakřivené sendvičové nosníky (Obr. 2. 4) obecně odlišné chování ve srovnání s rovinnými (přímými) sendvičovými konstrukcemi. Zakřivené panely mohou dosahovat v jistých aplikacích vyšších hodnot pevnosti než rovinné, avšak častější je případ, kdy dochází spíše k poklesu vlastností vlivem tvarového faktoru (zakřivení). Hlavní příčinou je fakt, že jádro zakřivené sendvičové konstrukce přenáší kromě příčných sil i značná normálová napětí. Právě tato normálová napětí mohou být limitním faktorem při návrhu sendvičových konstrukcí. K jejich predikci se používají buďto nákladné experimentální testy či výpočtové FEM softwary, využít se dají i analytické vztahy, ty však mohou poskytnout značně nepřesné výsledky. [5][7][76][78][79][80][81]



Obr. 2. 4: Schéma silně zakřiveného sendvičového nosníku namáhaného ohybem [78]

Následující výpočtové rovnice je možné použít pro analytický výpočet napětí u zakřivených sendvičových nosníků a to za přijmutí předpokladu tenkých potahů a malých deformací. Shodně jako u rovinných, tak i pro i zakřivené nosníky platí následující rovnice pro normálové napětí v krycích potazích:

$$\sigma_f = \pm \frac{M}{t_f \cdot d} \quad (15)$$

, kde $M [N \cdot m]$ je ohybový moment, $t_f [m]$ je tloušťka potahu a $d [m]$ je vzdálenost mezi osami potahů. [5][78]

Radiální normálové napětí v jádru (kolmo k potahům) je poté definováno:

$$\sigma_r = \frac{M}{(R_x + z) \cdot d} \quad (16)$$

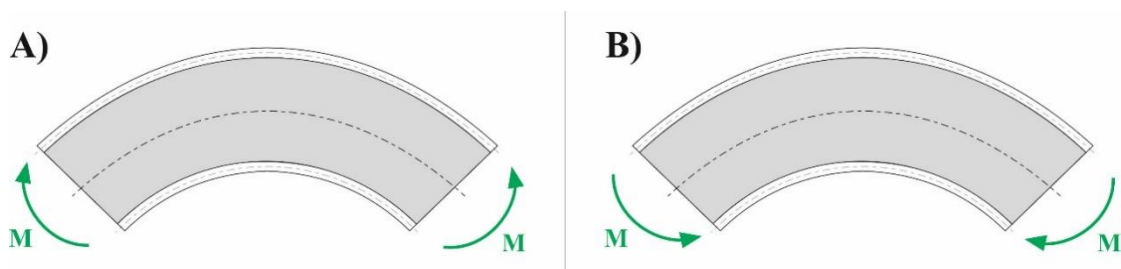
, kde $R_x [m]$ je rádius zakřivení neutrální osy jádra nosníku, $z [m]$ je vzdálenost od neutrální osy v radiálním směru v intervalu $(-t_c/2 < z \leq t_c/2)$ [5][78].

Pro porovnání ohybové pevnosti mezi zakřivenými a rovinnými nosníky slouží tzv. efektivní ohybový faktor $\eta_b [-]$ vyjádřený:

$$\eta_b = \frac{\overline{M}_k}{\overline{M}_r} = \frac{\overline{\sigma}_r \cdot b \cdot d \cdot R}{\overline{\sigma}_f \cdot t_f \cdot b \cdot d} = \frac{\overline{\sigma}_r \cdot R}{\overline{\sigma}_f \cdot t_f} \quad (17)$$

, kde $M_k [N \cdot m]$ je mezní ohybový moment zakřiveného panelu a $M_r [N \cdot m]$ je mezní ohybový moment rovinného panelu. Je-li tento faktor roven 1, dochází prvně k poškození potahů, naopak je-li menší než 1, je jako první poškozeno jádro. [5][80]

U zakřivených sendvičových konstrukcí zatížených ohybem jsou logicky krycí potahy taktéž zakřivené, tudíž příčná síla musí působit i na jádro, aby bylo dosaženo rovnováhy v radiálním směru. Tradiční kompozitní materiály používané jako potahy poskytují pouze malou pevnost v příčném směru v porovnání se směrem v rovině zatěžování. Jádrové materiály jako pěny či voštiny mají malou pevnost v porovnání s pevností v rovině u krycích potahů. Na základě těchto informací vyplývá, že na rozdíl od rovinných panelů a nosníků, příčná tahová či tlaková pevnost jádra a potahů jsou dvěma kritickými faktory určující celkovou ohybovou pevnost u zakřivených sendvičových nosníků a panelů. Ohybový moment, který působí tak, že zvětšuje poloměr zakřivení (zvaný jako otevírací moment), způsobí, že tahové síly působí na jádro a na rozhraní mezi potahem a jádrem (Obr. 2. 5 A). Naopak, pokud tento moment působí proti zakřivení, nazývá se jako uzavírací a způsobuje, že je jádro zatíženo tlakovými silami (Obr. 2. 5 B). [78]



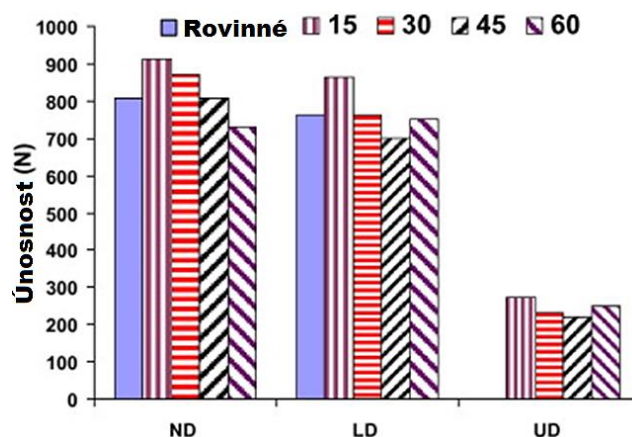
Obr. 2. 5: Rozdělení ohybových momentů dle jejich působení na zakřivený sendvičový nosník

Smith [78], [79] na základě Airyho napěťové funkce implementované do analytických výpočtů a následném srovnání s FEM modelem popisuje, že obvodová napětí v krycích potazích u zakřivených sendvičových nosníků jsou závislá na

geometrii a materiálových parametrech stejně jako u rovinných nosníků a to v případě, že rádius zakřivení je značně vyšší než tloušťka celého sendviče. Dále zjistil, že radiální napětí v jádru zakřivených sendvičových nosníků jsou ovlivněna hlavně poloměrem R zakřivení a pouze minimálně materiálovými vlastnostmi a tloušťkou krycích potahů.

Na základě výsledků FEM modelování a následného srovnání autoři konstatují, že pro modelování zakřivených sendvičových konstrukcí v ohybu jsou elementy typu 3D vrstvených skořepin a 3D prvků (solidů) nepřiliš vhodné a nejlepší shody s elastickým řešením vykazují modely tvořené 2D elementy s lineárně elastickými parametry. [79]

Baba a Thoppul [81] experimentálně potvrdili, že menší zakřivení panelu zvyšuje ohybovou pevnost (při čtyřbodovém ohybu) v porovnání s panelem rovinným a dále popsali, že zakřivení ovlivňuje i vibrační chování sendvičových struktur. Danou problematiku zkoumali na konstrukcích tvořených PU jádrem vysoké hustoty a potahy z laminátů tvořených ze skleněné výztuže a epoxidové pryskyřice. Konkrétní výsledky zobrazuje Obr. 2. 6, kde je také posuzována změna ohybové únosnosti v závislosti nejen na úhlu zakřivení ($\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ a 60°), ale i na umístění úmyslné separace pod horním potahem (UD), respektive nad dolním potahem (LD).



Obr. 2. 6: Srovnání ohybové únosnosti rovinných a zakřivených sendvičových nosníků [81]

Nejčastěji bývají zakřivené panely zkoumány z hlediska jejich chování při vzpěru a pouze okrajově při ohybu. Dále jsou pak dostupné výzkumy, kdy je posuzována vyrobiteľnosť a deformace po odformování sendvičových tvarových výrobků. [5][7][82][83]

Zakřivené sendvičové konstrukce můžeme najít v řadě aplikací, kdy se značně liší míra tohoto faktoru. Mezi hlavní oblasti, kde můžeme tyto konstrukce najít, patří doprava kolejových vozidel – vnější i vnitřní obkladové panely, masky kabin, nárazníky, lodní průmysl – trupy lodí, letecký průmysl – prvky trupu a křídla, atd. [5][9]

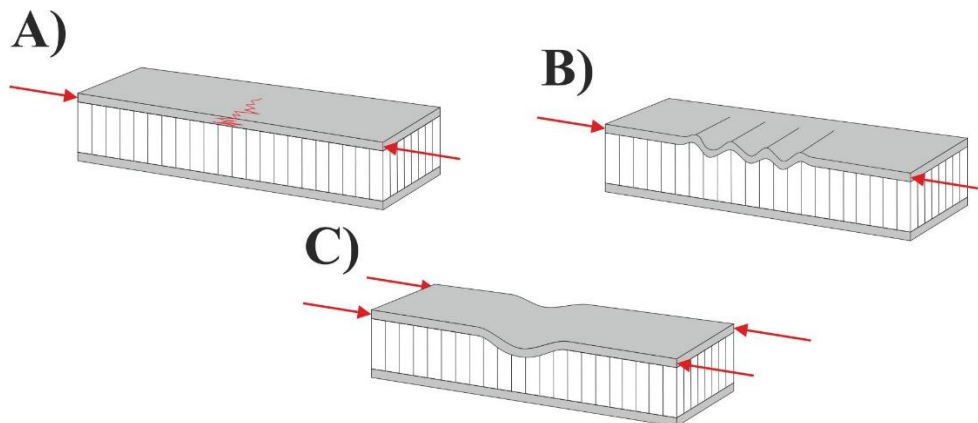
2.3 Ohybové poruchy sendvičových konstrukcí

Výsledná únosnost sendvičové konstrukce, na rozdíl od homogenních dílců, není dána pouze materiálovou charakteristikou (pevností), ale je závislá zejména na geometrických, materiálových a v neposlední řadě i technologických parametrech. Únosnost sendvičových nosníků je omezena různými poruchami. Obecně se jednotlivé typy poruch rozdělují na poruchy vnějších krycích potahů a poruchy samotného jádra. [5][15][75]

Na základě specifických výpočtů je pak možné připravit speciální grafy, tzv. mapy poruch, které slouží při návrhu sendvičových konstrukcí k vytvoření materiálově vyvážené struktury právě s ohledem na typy kritických poruch. Například Steeves a Fleck [84][85] ve svém výzkumu připravili grafy zahrnující mapy poruch pro vybraná PVC a kovová jádra mezi dvojicí laminátových potahů. Tyto mapy poruch pak potvrdili pomocí série experimentálních měření a také FEM modelu. Dále také potvrdili, že ohybové poruchy jsou závislé na geometrii sendvičového nosníku a hustotě PVC jádra.

2.3.1 Poruchy vnějších krycích vrstev

Mezi hlavní poruchy, které se vyskytují u krycích potahů, patří lokální popraskání vláken v potahu, zvlnění potahu a lokální ztráta stability (Obr. 2. 7). Tyto poruchy mohou být následovány dalšími poruchami, např. separací od jádra. [77]



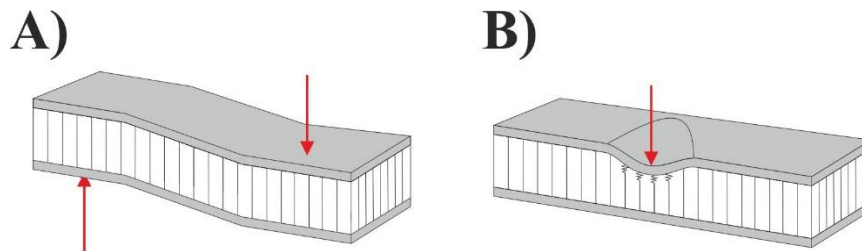
Obr. 2. 7: Ohybové poruchy krycích potahů; [46][77]
(A) lokální popraskání vláken v potahu, B) zvlnění potahu,
C) lokální ztráta stability)

K lokálnímu popraskání vláken v laminátovém krycím potahu dochází v důsledku překročení jejich meze pevnosti v kluzu. U symetrických sendvičových struktur dochází k této poruše zejména u potahu namáhaného na tlak. Dále ke zvlnění potahu dochází zejména u sendvičových nosníků s voštinovým jádrem v místech, která nejsou podepřena stěnou buňky voštiny. Výskyt této poruchy je možné ovlivnit použitím voštiny s dostatečně malou velikostí buňky. Poslední zmíněná porucha, lokální ztráta stability, úzce souvisí se samotnou únosností jádra, neboť k této poruše dochází vlivem stlačení potahu od ohybu, mimo ohyb se

tato porucha vyskytuje u vzpěru. Aby došlo k zamezení této poruchy, potah musí mít dostatečně vysoký tlakový modul a dále jádro dostatečně velkou tlakovou pevnost. [5][46][77]

2.3.2 Poruchy jádra

K výrazným poruchám jádra, při ohybu sendvičových struktur patří jeho smyková porucha a lokální porucha – indentace (Obr. 2. 8). Jak bylo zmíněno dříve, jádro přenáší téměř výhradně smyková napětí vyvozená od příčných sil. Při překročení smykové pevnosti jádra nastává jeho porucha, typické prasknutí jádra od horní po dolní krycí potah pod úhlem cca 45 °. Dále se této poruše dá zamezit zvýšením tloušťky jádra. Naopak k lokální indentaci dochází působením osamělých příčných sil (např. od příčnicku při trojbodovém ohybu), které způsobí překročení tlakové pevnosti jádra a dojde k poruše – stlačení v daném místě. [46][75][77]



Obr. 2. 8: Ohybové poruchy jádra; [46][77]

(A) smyková porucha, B) lokální stlačení)

Crupi a kol. [86] popsali ohybové poruchy hliníkových voštin uvnitř sendvičových panelů za použití 3D počítačové tomografie. Zenkert a Burman [87] zkoumali poruchy sendvičových konstrukcí při únavových testech. Z jejich výsledků vyplývá, že při vysokých amplitudách dochází ke smykové poruše jádra již při malém počtu cyklů. Naopak při nízkých zatěžujících amplitudách dochází k tahové poruše laminátového potahu. Dále Banghai a kol. [88] vytvořili 2D a 3D mapy poruch pro sendvičové konstrukce s pěnovým hliníkovým jádrem. Určili, že s rostoucím poměrem modulů jádra a hliníkových potahů (E_c/E_f) dochází k posunu oblastí poruch – roste oblast smykových poruch jádra na úkor indentace a poruch potahů. Jak je z těchto a mnoha dalších výzkumů zřejmé, poruchy jsou závislé na mnoha parametrech, od materiálu, až po průběh zatěžování a typ zkoušky. Je tedy nutné teoretické mapy poruch vždy experimentálně verifikovat.

3 SHRNUÍ POZNATKŮ Z TEORETICKÉ ČÁSTI

Sendvičové konstrukce jsou z historického hlediska známé řadu desetiletí a postupně se vyvíjí jak materiály jednotlivých částí, tak výrobní technologie i metody k určování jejich chování. Díky tomuto vývoji dochází k jejich čím dál častějšímu průniku do konkrétních oblastí průmyslu se specifickými požadavky. Mezi tyto požadavky patří co nejpřesnější dodržení tvaru, který je definován designérem a musí být také co nejefektivněji vyroben zvolenou technologií. Volba technologie je tedy ovlivněna řadou skutečností, ve velkém množství případů je třeba použít kompromisů mezi cenou a požadovanou kvalitou, respektive vlastnostmi.

Ohybové chování vrstevnatých prvků je velmi složité a při dimenzování je třeba znát veškeré materiálové konstanty a chování za různých provozních teplot. Toto chování ovlivňují oba typy namáhání, jak normálová – tahová/tlaková, tak tečná – smyková. Oba typy je možné bezpečně přenášet při použití vhodných typů materiálů potahů a jádra. Pokud je výsledný výrobek charakteristický jistým tvarem, je třeba definovat, jak tento tvar dané chování ovlivňuje, jak bylo potvrzeno v řadě výzkumných studií. Konkrétní příklady výzkumů ohybového chování zakřivených sendvičových konstrukcí a získané poznatky, respektive závěry jsou uvedeny v kapitole 2.2.

V dostupné literatuře však chybí zmínky o studiu ohybového chování zakřivených sendvičových konstrukcí, tvořených potahy z před-impregnovaných tkanin a s jádrem z různých typů materiálů s ohledem na jejich aplikaci v dopravním průmyslu a požadavky s tím spojenými. Právě tato skutečnost definuje oblasti výzkumu představené disertační práce.

4 CÍL PRÁCE

Hlavním cílem této disertační práce je experimentálně charakterizovat vliv tvaru - zakřivení (vyjádřeného pomocí poměru R/t_c) na mechanické chování sendvičových konstrukcí s různým typem a vlastnostmi jádra. Tyto testy budou probíhat jak za pokojové, tak i snížené, respektive zvýšené teploty a to z důvodu vystavení sendvičových panelů a konstrukcí účinku teploty okolního prostředí v řadě jejich aplikací. Závěrečným úkolem je srovnat naměřená data s vlastnostmi konstrukcí rovinných, neboť právě na základě jejich vlastností jsou sendvičové dílce dimenzovány, bez ohledu na jejich tvar.

Postup při řešení disertační práce:

- Návrh materiálového složení sendvičových konstrukcí a volba poměrů R/t_c (různé typy jádrových materiálů, odlišná tloušťka jádra - t_c)
- Návrh konstrukce a výroba laminátové formy pro výrobu sendvičových konstrukcí s definovaným tvarem - křivostí (dána poloměrem R)
- Výroba sendvičových panelů pomocí technologie využívající fóliového vaku a příprava zkušebních těles v požadovaných rozměrech
- Provedení statických mechanických testů (trojbodový, respektive čtyřbodový ohyb) za pokojové (+25 °C), snížené (-20 °C) a zvýšené teploty (+60 °C)
- Statistické vyhodnocení výsledků experimentů
- Zhodnocení vlivu tvaru a srovnání naměřených dat pro rovinné a zakřivené nosníky
- Určení soudržnosti jednotlivých vrstev připravených konstrukcí
- Určení vlivu teploty na vlastnosti jednotlivých materiálů (DMA analýza)
- Vytvoření FEM modelu (korelace dat z FEM výpočtů s výsledky ze statických testů a analytickými výpočty)

5 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

Problematika sendvičových konstrukcí je oblastí velmi širokou a jejich chování je možné sledovat na základě mnoha parametrů. Změnou materiálového složení, výrobních procesních parametrů či podmínek zatěžování dochází k významné změně jejich chování. Disertační práce zkoumá mechanické chování sendvičových struktur na základě jejich materiálového složení a tvaru (křivosti), tzn. dle poloměru a tloušťky jádra dané konstrukce. Tato oblast je značně neprobádaná a umožňuje získat řadu v průmyslu aplikovatelných poznatků a to zejména při dimenzování sendvičových konstrukcí pro konkrétní aplikace.

5.1 Zvolené materiály

Všechny níže uvedené materiály, použité pro výrobu sendvičových konstrukcí, byly voleny s ohledem na specifickou oblast použití, kterou je hromadná silniční a kolejová doprava. Na materiály (konstrukce), použité v tomto odvětví průmyslu, jsou kladeny zvýšené požadavky na bezpečnost, odolnost proti únavě a FST (Fire-Smoke-Toxicity) vlastnosti. Obecně jsou tyto a mnohé další požadavky uvedeny v příslušných mezinárodních či firemních technických normách. [57][89]

5.1.1 Materiál potahu

Jako materiál potahu byla zvolena před-impregnovaná tkanina (prepreg) od firmy Gurit s názvem PH840-300-42. Jedná se o prepreg tvořený skelnou tkaninou typu E, impregnovaný fenolickou pryskyřicí neobsahující halogeny. Tloušťka jedné vrstvy tohoto prepregu odpovídá hodnotě 0,23 mm. Tento materiál má vynikající mechanické a FST (Fire-Smoke-Toxicity) vlastnosti, díky kterým nachází uplatnění v dopravě kolejových vozidel, lodním a automobilovém průmyslu. Vybrané vlastnosti zobrazuje následující tabulka (Tab. 5. 1). [90][91]

Tab. 5. 1: Vybrané vlastnosti prepregu PH840-300-42. [90]

PH840-300-42	
<i>Plošná hmotnost prepregu [g/m²]</i>	525
<i>Plošná hmotnost tkaniny [g/m²]</i>	296
<i>Typ textilní vazby</i>	8H saténová
<i>Množství pryskyřice [%]</i>	42
<i>Vytvrzovací teplota [°C]</i>	120 - 160

5.1.2 Jádrové materiály

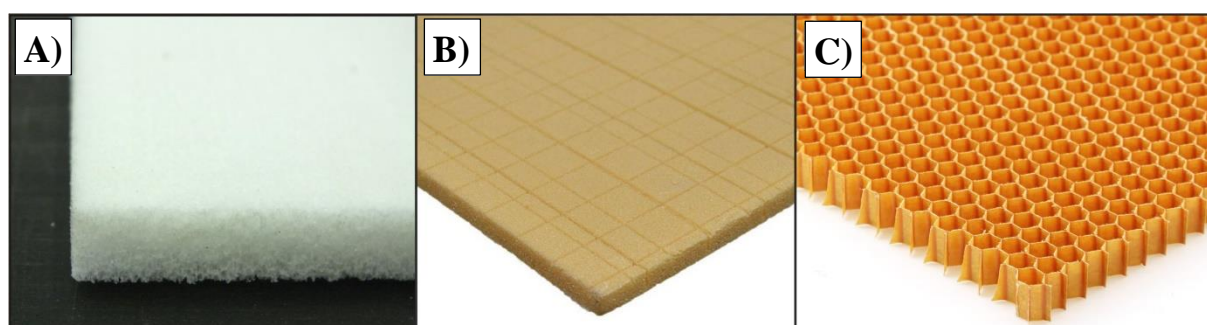
Z širokého spektra dostupných jádrových materiálů byli vybráni celkově tři zástupci (Obr. 5. 1). Prvním je polymerní pěna AIREX T90.100. Jedná se o pěnu z materiálu PET (polyethylentereftalát) s uzavřenými buňkami, vyznačující se vý-

bornými FST vlastnostmi a únavovou životností, velkou teplotní stabilitou a chemickou odolností. Dalším použitým materiálem je pěna AIREX C70.55 ze zesíťovaného materiálu PVC (Polyvinylchlorid) s uzavřenými buňkami. Hlavními přednostmi této pěny jsou výborná odolnost vůči chemikáliím, samozhášivost, dobrá rázová odolnost a vysoká odolnost proti únavě. Posledním materiálem je voština CORMASTER C2-4,8-48 z aramidového kompozitního papíru (velikost buňky 4,8 mm) impregnovaná fenolickou pryskyřicí, která vyniká velkou tepelnou stabilitou a vysokou rozměrovou stabilitou jak za tepla, tak i za působení vlhkosti. Tab. 5. 2 obsahuje specifické vlastnosti jednotlivých jádrových materiálů. [25][30][45]

Tab. 5. 2: Vybrané vlastnosti jádrových materiálů. [25][30][45]

	AIREX T90.100	CORMASTER C2	AIREX C70.55
<i>Hustota [kg/m³]</i>	110	48	60
<i>Pevnost v tlaku [MPa]</i>	1,4	2,0	0,6
<i>Modul v tlaku [MPa]</i>	85	-	69
<i>Pevnost ve smyku [MPa]</i>	0,8	*0,54 – 1,12	0,85
<i>Modul ve smyku [MPa]</i>	20	*23,0 – 37,0	22

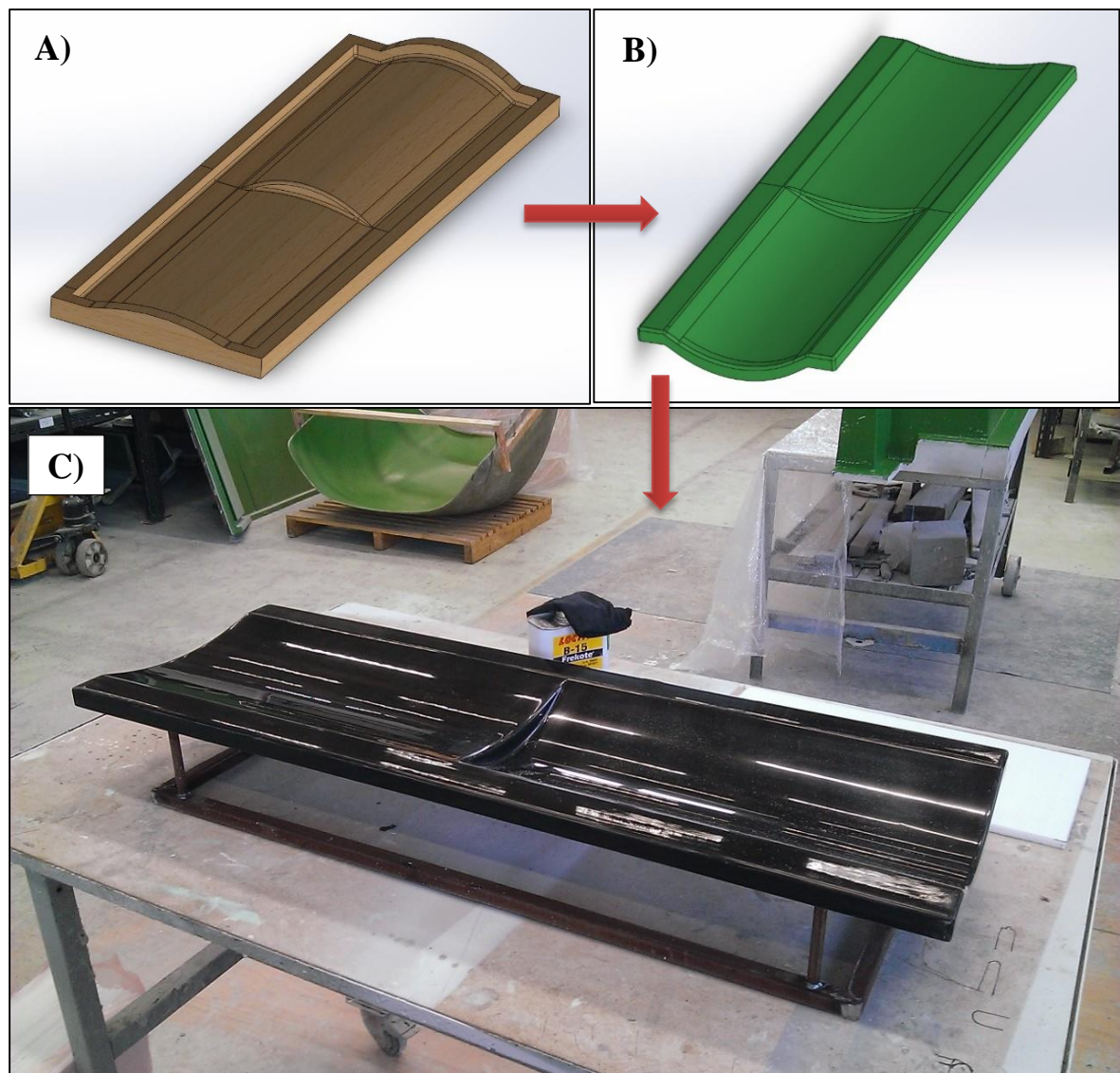
* hodnoty se liší dle směru orientace buňky voštiny (směr L a W, viz [45])



Obr. 5. 1: Vybrané jádrové materiály;
(A) PET pěna, B) PVC pěna, C) Nomexová voština)

5.2 Návrh a výroba laminátové formy

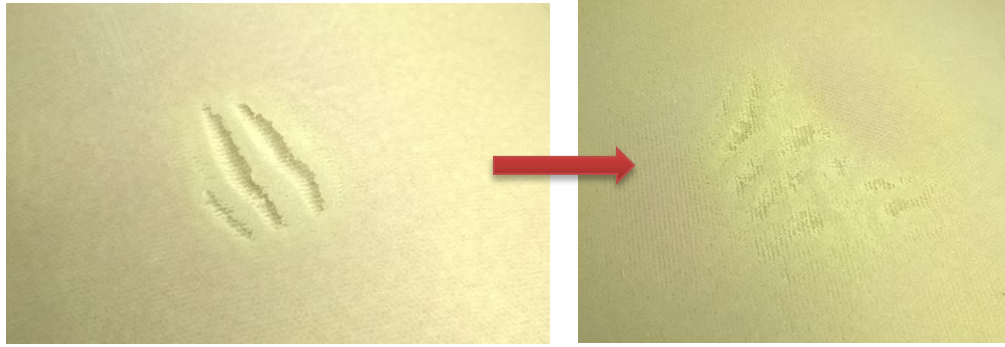
Pro naplnění cílů disertační práce bylo třeba navrhnout, zkonstruovat a vyrobit laminátovou formu pro výrobu vzorků s definovanou křivostí (Obr. 5. 2). Křivost vzorku je vyjádřena pomocí poměru poloměru R a tloušťky jádra t_c , tudíž R/t_c . Pro potřeby výzkumu byly na formě vytvořeny dva poloměry R , konkrétně $R=200$ mm a $R=400$ mm. Konstrukcí forma dodržuje veškeré zásady platné pro tento typ forem. Pro výrobu byl použit dřevěný model pozitivního tvaru. Výsledná laminátová forma, vytvořená ze skelných tkanin a rohoží impregnovaných polyesterovou pryskyřicí, byla při výrobě opatřena vrstvou ochranného gelcoatu a pro zvýšení tuhosti byla celá forma opatřena kovovým výztužným rámem.



*Obr. 5. 2: Výrobní forma;
 (A) dřevěný 3D model, B) 3D model laminátové formy,
 C) vyrobená laminátová forma)*

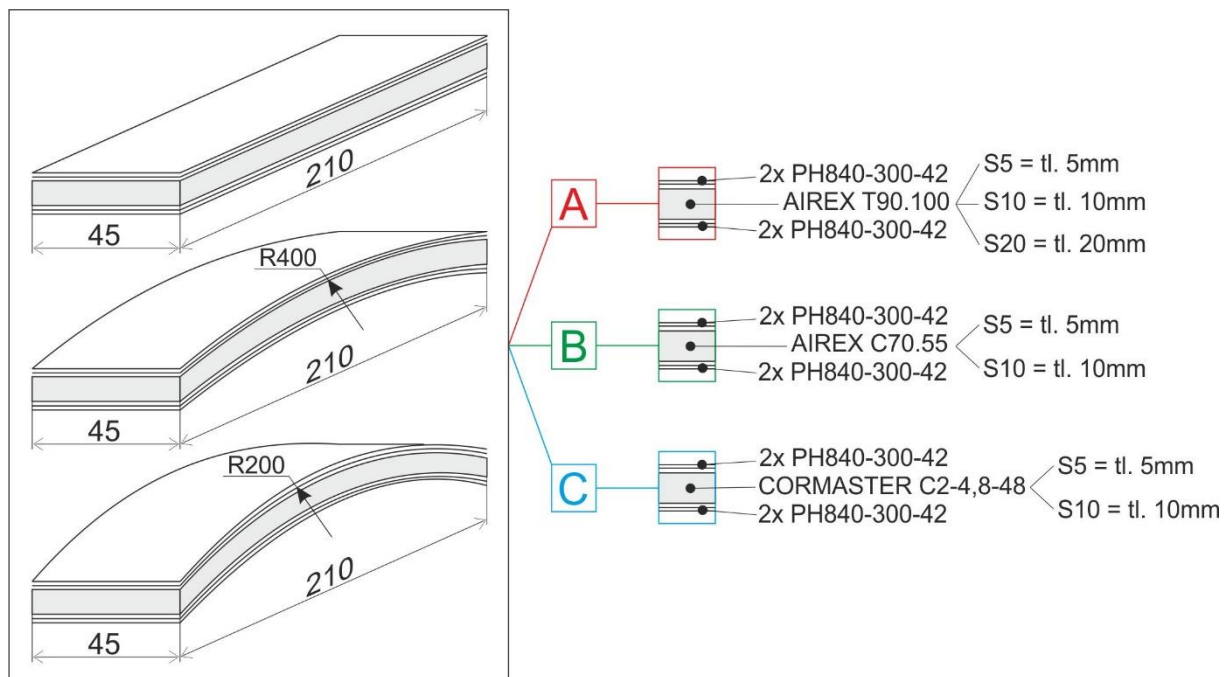
5.3 Výroba konstrukcí a příprava zkušebních těles

Jednotlivé sendvičové panely byly vyrobeny pomocí prepreg technologie využívající fóliového vaku na formě (z angl. vacuum bagging) popsané v kapitole 1.3.2 a samotné vytvrzování bylo uskutečněno ve vytvrzovací peci. Vytvrzovací cyklus začínal náběhem po dobu 30 min. na vytvrzovací teplotu 130 °C a následným vytvrzováním na této teplotě po dobu 2 hod. V průběhu výroby docházelo u jádra AIREX C70.55 tloušťky 5 mm k deformaci panelu v místě umístění ventilu, kdy díky teplotě a značnému podtlaku docházelo ke vtahování tohoto nízko-husotního jádra spolu se spodním potahem do ventilu. Vzniklá deformace je vyobrazena na Obr. 5. 3. Tento problém se nepodařilo zcela odstranit, pouze značně zmírnit použitím více vrstev odsávací rohože pod ventilem.



Obr. 5. 3: Deformace sendvičového panelu pod ventilem

Z vyrobeného panelu byly následně pomocí kotoučové pily nařezány potřebná zkušební tělesa. Materiálové složení a rozměry zkušebních těles zobrazuje následující schéma na Obr. 5. 4.



Obr. 5. 4: Rozměry a materiálové složení připravených sendvičových konstrukcí

Na výše uvedených vzorcích je možné definovat následující poměry R/t_c :

- pro tloušťku $t_c = 5 \text{ mm}$ (S5) $\rightarrow R/t_c = 80, R/t_c = 40$
- pro tloušťku $t_c = 10 \text{ mm}$ (S10) $\rightarrow R/t_c = 40, R/t_c = 20$
- pro tloušťku $t_c = 20 \text{ mm}$ (S20) $\rightarrow R/t_c = 20, R/t_c = 10$

5.4 Testování připravených těles

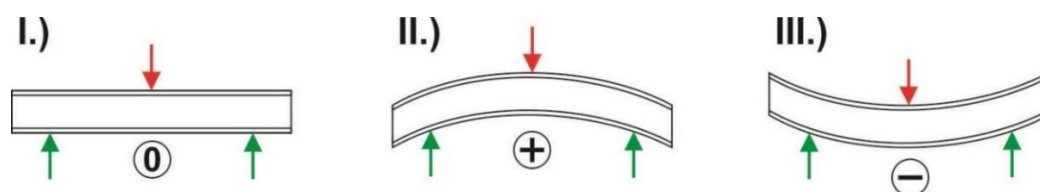
Připravené nosníky sendvičových konstrukcí byly testovány v trojbodovém, respektive čtyřbodovém ohybu a to jak v případě rovinných, tak i zakřivených nosníků. Pro ověření soudržnosti jednotlivých vrstev sendvičové konstrukce byly dále provedeny zkoušky soudržnosti.

5.4.1 Zkouška ohybem

Veškeré zkoušky ohybem probíhaly na zkušebním stroji ZWICK 1456 dle americké normy ASTM C393 [92] zabývající se přímo ohybem sendvičových konstrukcí. Testování bylo provedeno v obou konfiguracích, jak v trojbodovém uložení – 3PB (s výrazným vlivem smyku), tak ve čtyřbodovém uložení – 4PB (oblast působení konstantního ohybového momentu). V obou případech byla nastavena vzdálenost podpěr 150 mm. Při čtyřbodové zkoušce byla vzdálenost mezi působícími trny nastavena na 50 mm. Pro oba způsoby uložení byla použita rychlost posuvu příčnicku 5 mm/min. Ve všech případech byly pro omezení vlivu lokálního stlačení nosníku v místě působení příčnicku použity pryžové podložky o rozměrech a tvrdosti dle výše uvedené normy.

Samotný záznam dat prováděl software TestExpert II, kdy vyhodnocovány byly hodnoty efektivního modulu pružnosti - E_{ef} [MPa], ohybová pevnost - σ_{fM} [MPa], případně ohybová únosnost - F_{fmax} [N]. Statické testy byly prováděny za pokojové teploty (+25 °C), vliv změny teploty na ohybové vlastnosti byl měřen v teplotní komoře ZWICK W91255 a to při zvýšené teplotě (+60 °C) a při záporné teplotě (-20 °C).

Zkušební tělesa byla testována ve třech konfiguracích uložení nosníků, které zobrazuje níže uvedený obrázek (Obr. 5. 5). Jednotlivé symboly zobrazené v obrázku (0,+,-) odpovídají popisu výsledků v grafech v kapitole 6.



Obr. 5. 5: Uložení zkušebních těles pro zkoušky ohybem

5.4.2 Zkouška tahem naplocho

Soudržnost jednotlivých vrstev připravených sendvičových konstrukcí byla zkoumána dle americké normy ASTM C297 [39]. Testování probíhalo na vzorcích o rozměrech 50 x 50 mm, respektive 75 x 75 mm za pokojové teploty (25 °C). Rychlost posuvu příčnicku při testu byla nastavena na 5 mm/min. Data zaznamenával shodný software jako v případě ohybu, kdy zaznamenávanou veličinou byla maximální tahová síla - F_{tmax} [N], při které došlo k delaminaci vrstev, případně k ukončení testu softwarem. Na základě plochy měřené sendvičové konstrukce bylo definováno maximální tahové napětí - σ_t [MPa], potřebné k odlupu vrstev.

5.5 Statistické vyhodnocení naměřených dat

Naměřená data byla vyhodnocena pomocí vybraných statistických veličin s využitím programů Microsoft Excel 2013 a Minitab 14. Při každém měření bylo otestováno celkem 10 zkušebních těles ($n=10$), kdy získaná data odpovídají tzv. statistickému výběrovému souboru. Jednotlivé hodnoty statistických veličin jsou pouze odhady, neboť neznáme skutečnou hodnotu daného parametru základního statistického souboru. Jednotlivé měřené veličiny jsou porovnávány na základě aritmetických průměr. Konkrétně byly pro vyhodnocení dat použity tyto statistické veličiny:

- Aritmetický průměr – \bar{x} :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (13)$$

- Směrodatná odchylka – s :

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (14)$$

- Variační koeficient – V_x :

$$V_x = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \% \quad (15)$$

- První kvartil – $Q1$:

Tento parametr vyjadřuje hodnotu, pod kterou leží 25 % naměřených hodnot a zbývajících 75 % pak nad tímto kvantilem. [93][94]

- Medián – \tilde{x} :

Medián neboli 50 % kvantil ($Q2$) rozděluje statistický soubor na dvě shodné poloviny. [93][94]

- Třetí kvartil – $Q3$:

Třetí kvartil reprezentuje hodnotu, kde 75 % všech naměřených hodnot leží pod danou hodnotou a zbývajících 25 % nad tímto kvantilem. [93][94]

- Minimum a Maximum – MIN , MAX :

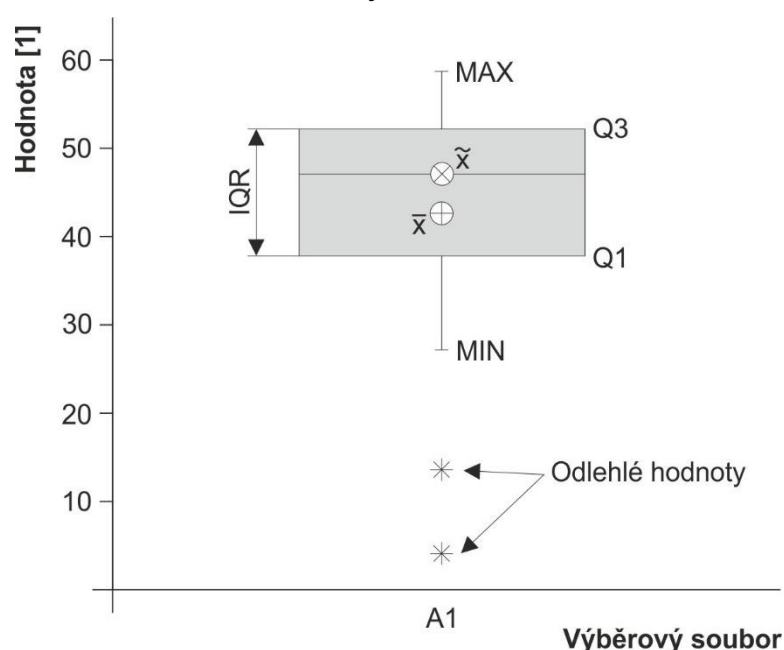
Tyto statistické parametry odpovídají minimální, respektive maximální hodnotě naměřené v daném výběrovém souboru. [93][94]

- Interkvartilové rozpětí – IQR :

Interkvartilové rozpětí odpovídá hodnotě vzdálenosti mezi prvním a třetím kvantilem. [93][94]

Ve vybraných případech výběrových souborů byla uskutečněna shluková analýza pomocí tzv. dendrogramů, která slouží k určení vzájemné podobnosti výběrových souborů. Následně byly provedeny testy normality a u vybraných souborů dat byla aplikována teorie hypotéz pro určení statistické významnosti vlivu zakřivení na ohybovou únosnost a pomocí metodiky ANOVA, či neparametrického Kruskal – Wallisova testu.

Z důvodu kontroly a pro grafickou interpretaci naměřených dat byly použity box-plotové diagramy (Obr. 5. 6), ve kterých jsou zaznačeny hodnoty aritmetického průměru, mediánu, prvního a třetího kvartilu, MIN i MAX a dále pomocí šedého obdélníku zaznačené interkvartilové rozpětí. V diagramu označené, pravděpodobně odlehlé hodnoty, jsou ta data, jejichž hodnota je větší, než $\frac{1}{2}$ interkvartilového rozpětí. Ve vhodných případech bylo také pro grafickou interpretaci využito grafů s konfidenčními intervaly.



Obr. 5. 6: Statistické veličiny obsažené v box-plotovém diagramu

5.6 DMA analýza

Na jednotlivých materiálech, které tvořily připravené sendvičové konstrukce, byla provedena DMA analýza z důvodu určení vlivu teploty na jejich chování. Měření bylo uskutečněno na přístroji METTLER-TOLEDO DMA 1 při měřicí frekvenci 10 Hz. Konkrétně byly testovány pěnové jádrové materiály (PVC i PET), kdy rozměry zkušebního tělíska byly rovny 10x4x3 mm. Testování proběhlo také na prepreg materiálech tvořených dvěma vrstvami (10x4x0,5 mm), respektive čtyřmi vrstvami (10x4x1 mm). Samotné měření probíhalo při teplotách od -40 °C do +80 °C při deformaci vzorku 20 μm . Vyhodnocovány byly tři parametry a to elastická složka modulu - E' [MPa], viskózní složka modulu - E'' [MPa] a parametr - $\tan \delta$ [-].

5.7 FEM modely

Z důvodu značné finanční náročnosti experimentálního měření byly vytvořeny konečně prvkové – FEM modely za účelem možné predikce vlastností sendvičových konstrukcí. K vytvoření byl použit výpočtový modul v softwaru SolidWork a to Cosmos tools. Pro tvorbu samotných modelů byly použity elementy typu Plane2D, tedy čtyř-uzlové 2D elementy. Počet elementů byl volen s ohledem na značný gradient tuhosti na rozhraní potah-jádro a pro jednotlivé typy konstrukcí se lišil dle jejich složení. Vrstva odpovídající rozhraní mezi potahem a jádrem byla nadefinována jako absolutně tuhá vazba.

Pro studium závislosti ohybové tuhosti sendvičové konstrukce na tuhosti pěnového jádra byl použit lineárně elastický FEM model třibodové ohybové zkoušky. Naopak pro určení pevnosti těchto konstrukcí byla použita modální analýza mezního stavu ztráty stability tlačené laminy uložené na pružném podkladě. Výsledkem modální analýzy jsou vlastní hodnoty vyjadřující poměr mezního zatížení (toho, při kterém dojde k poruše sendvičového nosníku) a daného zatížení (nominálního, např. 10 N).

6 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

Hlavním cílem disertační práce bylo porovnat chování připravených zakřivených sendvičových konstrukcí a to z pohledu ohybových vlastností při různých variantách uložení, respektive odlišných pracovních teplotách a také určit vliv tvaru, tedy zakřivení, na únosnost a tuhost těchto konstrukcí při různých zkušebních podmínkách.

6.1 Ohybové chování rovinných sendvičových konstrukcí

Úvodní měření ohybových vlastností bylo provedeno na rovinných sendvičových konstrukcích z důvodu vzájemného porovnání jednotlivých jádrových materiálů a určení jejich vlivu na vlastnosti celé konstrukce.

6.1.1 Rovinné konstrukce s jádrem o tloušťce 5 mm – pokojová teplota

Statistické vyhodnocení obou měřených parametrů (efektivního modulu pružnosti a ohybové pevnosti) pro sendvičové konstrukce nejnižší připravené tloušťky (S5) měřené při pokojové teplotě (+25 °C) je uvedeno v Tab. 6. 1, Tab. 6. 2 a zobrazeno v grafu na Obr. 6. 1. Nejvyšších hodnot pro efektivní ohybový modul bylo naměřeno pro konstrukce C. Tento parametr byl u těchto konstrukcí vyšší o 6,7 % v porovnání s konstrukcemi série A (PET pěna), respektive o 17,1 % s konstrukcemi série B (PVC pěna).

Tab. 6. 1: Ohybové vlastnosti rovinných sendvičových konstrukcí s jádrem o tloušťce 5 mm – trojbodový ohyb (3PB)

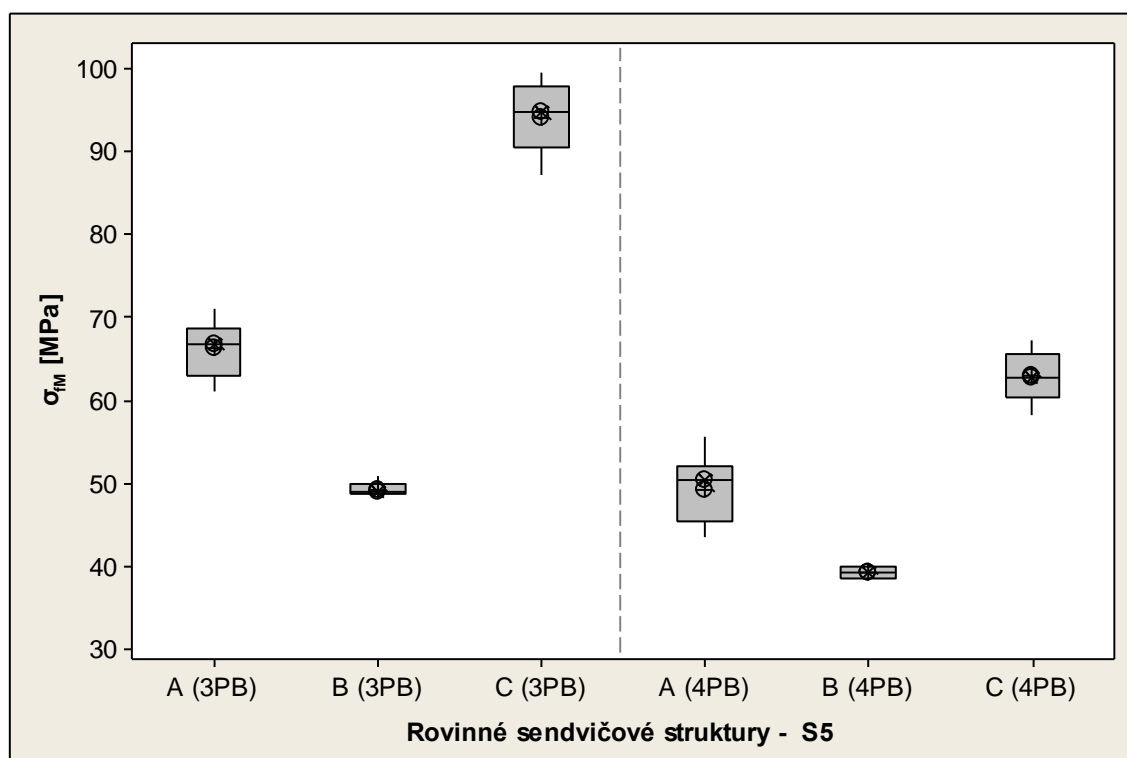
S5	A		B		C	
	E_{ef} [MPa]	σ_{fM} [MPa]	E_{ef} [MPa]	σ_{fM} [MPa]	E_{ef} [MPa]	σ_{fM} [MPa]
\bar{x}	6535	66,2	5952	49,3	6970	94,1
s	261	3,2	140	0,7	135	4,0
<i>Max</i>	7000	71,1	6170	50,9	7100	99,5
<i>Min</i>	6120	61,0	5620	48,5	6680	87,2
\tilde{x}	6525	66,9	5965	49,0	7020	94,8
V_x [%]	3,99	4,79	2,35	1,44	1,94	4,23

Jak je z grafu (Obr. 6. 1) patrné, nejvyšších hodnot pevnosti dosahují konstrukce série C, obsahující jádro z Nomexové voštiny. Konstrukce s jádrem typu A (PET pěna) dosahují pouze 70 % pevnosti konstrukcí C. Nejnižších hodnot měřeného parametru (pouze 52,4 % pevnosti S5_C) bylo získáno pro konstrukce série B, jejichž jádro z PVC pěny má sice shodné smykové vlastnosti jako PET pěna, avšak o téměř polovinu menší hustotu, což se projevuje právě nižší ohybovou pevností celé konstrukce. Při čtyřbodové zkoušce ohybem (4PB) jsou hodnoty pevností ve všech případech nižší než při třibodové zkoušce (3PB). Na druhou

stranu, rozdíl mezi pevnostmi konstrukcí série B v 3PB a 4PB je pouze 20,3 %. V případě sendvičových nosníků série C je tento rozdíl 33,2 %, pro nosníky S5_ A pak 25,5 %.

Tab. 6. 2: Ohybové vlastnosti rovinných sendvičových konstrukcí s jádrem o tloušťce 5 mm – čtyřbodový ohyb (4PB)

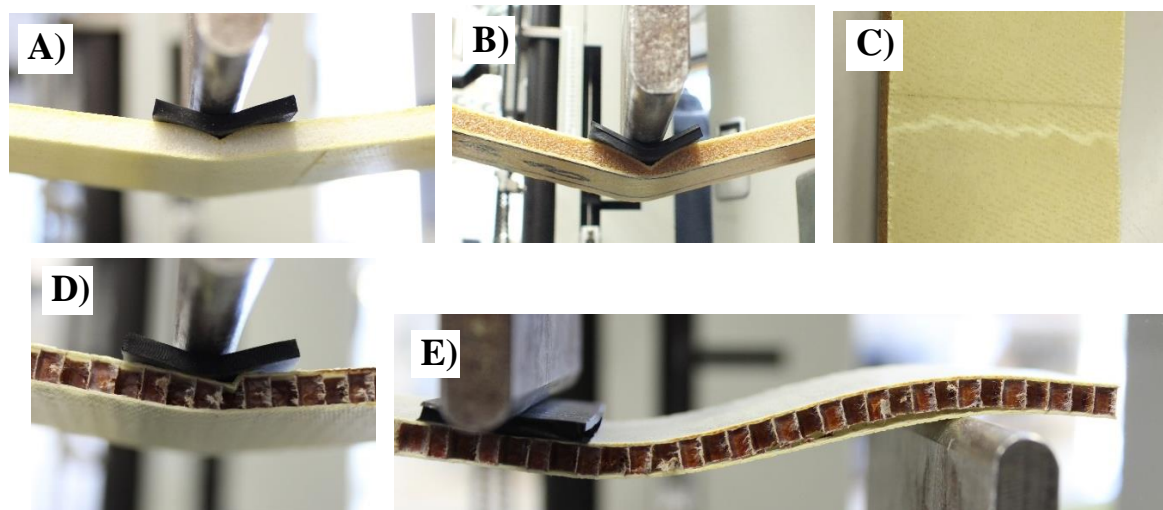
S5	A		B		C	
	E_{ef} [MPa]	σ_{fM} [MPa]	E_{ef} [MPa]	σ_{fM} [MPa]	E_{ef} [MPa]	σ_{fM} [MPa]
\bar{x}	6681	49,3	6008	39,3	7278	62,9
s	231	3,9	106	0,8	151	2,9
<i>Max</i>	7120	55,7	6210	40,5	7480	67,2
<i>Min</i>	6430	43,4	5890	38,3	7100	58,2
\tilde{x}	6600	50,4	5990	39,4	7200	62,8
V_x [%]	3,46	7,80	1,76	1,90	2,08	4,60



Obr. 6. 1: Ohybová pevnost rovinných sendvičových konstrukcí - S5

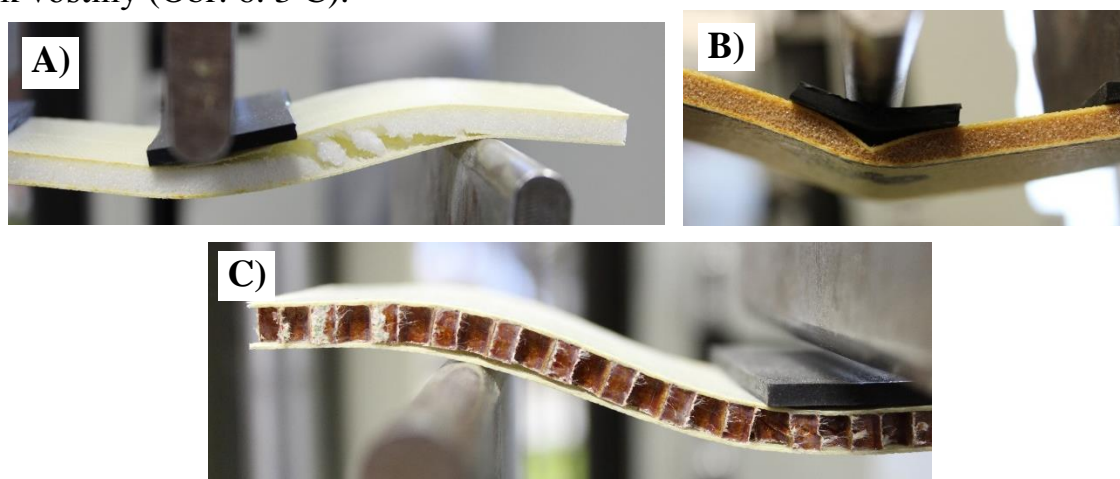
V průběhu měření ohybových vlastností byly také zaznamenávány specifické poruchy rovinných nosníků. Při třibodovém ohybu u nosníků série A a B zatěžující síla, působící na vzorek, rostla do okamžiku, kdy došlo k lokálnímu stlačení jádra (Obr. 6. 2 A, B). Od tohoto okamžiku jsou vyztužující vlákna v krycím potahu mnohem intenzivněji zatěžována normálovými silami, kdy jejich následkem dochází k přetrhnutí vláken pod působícím příčником (Obr. 6. 2 C), což způsobí

kritický pokles pevnosti. Tato porucha se vyskytovala také u přibližně 20 % testovaných nosníků v případě konstrukcí série C (Obr. 6. 2 D), kdy nejdříve došlo k lomu horního potahu a následně ke stlačení buněk voštiny. Zbylým typem poruchy u těchto nosníků (S5_ C) byla separace voštinového jádra od spodního potahu. Při této poruše nedochází k popraskání vláken pod příčnickem (Obr. 6. 2 E).



Obr. 6. 2: Ohybové poruchy rovinných sendvičových konstrukcí s jádrem o tloušťce 5 mm – trojbodové uložení těles

V případě 4PB docházelo u konstrukcí série A téměř ve většině případů k delaminaci na rozhraní potahu a PET pěny, které způsobilo smykové porušení jádra (Obr. 6. 3 A). Sendvičové konstrukce S5_B vykazovaly shodnou poruchu jako v případě trojbodového uložení (Obr. 6. 3 B). U konstrukcí S5_C docházelo výhradně k separaci, které předcházela ztráta stability jádra, respektive zborcení buněk voštiny (Obr. 6. 3 C).



Obr. 6. 3: Ohybové poruchy rovinných sendvičových konstrukcí s jádrem o tloušťce 5 mm – čtyřbodové uložení těles

Veškeré tyto charakteristické znaky postupných poruch jsou velmi dobře pozorovatelné z průběhu ohybové křivky závislosti ohybové síly na deformaci, které zobrazuje použitý software (viz. PŘÍLOHA PI).

6.1.2 Rovinné konstrukce s jádrem o tloušťce 5 mm - vliv okolní teploty prostředí

Vyhodnocené výsledky dat pro efektivní modul (Tab. 6. 3 a Tab. 6. 4) ukazují na jeho značnou závislost na provozní teplotě. Následující text pak srovnává jeho změnu vůči hodnotě naměřené při pokojové teplotě (uvedené v Tab. 6. 1) a to při trojbodovém ohybu. Tento modul poklesl při zvýšené teplotě u sendvičových nosníků série A o 21,5 %, v případě konstrukcí S5_B o 13,6 %. U konstrukcí S5_C s nomexovou voštinou byl taktéž zaznamenán pokles a to o 18,1 % v porovnání s hodnotami z měření za pokojové teploty.

Snížená okolní teplota prostředí nepřináší tak výrazné změny v tuhosti (efektivním modulu pružnosti) jako v případě teploty zvýšené. V případě konstrukcí S5_A došlo pouze k nepatrnému snížení efektivního modulu pružnosti o 1,5 %. Naopak v případě konstrukce série B došlo ke zvýšení tuhosti vlivem snížené teploty o 3,7 % a následně v případě konstrukce C k navýšení o 3,9 %.

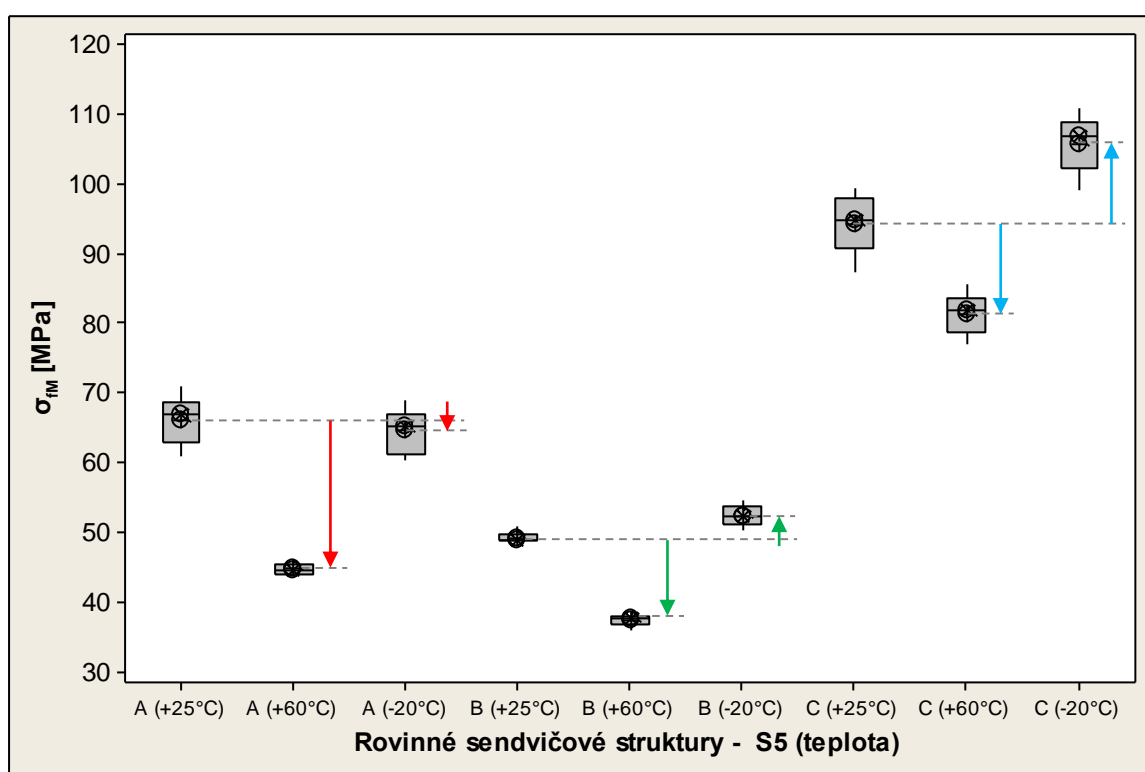
Tab. 6. 3: Ohybové vlastnosti rovinných sendvičových konstrukcí S5 při zvýšené teplotě prostředí

S5	T = +60 °C					
	A		B		C	
	E _{ef} [MPa]	σ _{fM} [MPa]	E _{ef} [MPa]	σ _{fM} [MPa]	E _{ef} [MPa]	σ _{fM} [MPa]
\bar{x}	5129	44,2	5140	37,4	5708	81,4
s	228	1,8	73	0,7	175	2,6
Max	5380	45,8	5270	38,4	5970	85,5
Min	4570	39,2	4980	36,1	5420	77,1
\tilde{x}	5180	44,7	5155	37,6	5680	81,8
V _x [%]	4,44	4,07	1,43	1,84	3,06	3,24

Tab. 6. 4: Ohybové vlastnosti rovinných sendvičových konstrukcí S5 při záporné teplotě prostředí

S5	T = -20 °C					
	A		B		C	
	E _{ef} [MPa]	σ _{fM} [MPa]	E _{ef} [MPa]	σ _{fM} [MPa]	E _{ef} [MPa]	σ _{fM} [MPa]
\bar{x}	6429	64,6	6357	52,4	7243	105,8
s	328	3,0	180	1,4	132	3,7
Max	6960	69,1	6610	54,7	7420	111,0
Min	5960	60,3	6080	50,4	7020	99,2
\tilde{x}	6350	65,3	6410	52,3	7225	107,0
V _x [%]	5,11	4,66	2,83	2,59	1,82	3,52

Vliv teploty na ohybovou pevnost je vyobrazen v grafu na Obr. 6. 4. Zvýšená teplota (+60 °C) má silný vliv na měřený parametr, kdy v případě konstrukcí série A byl zjištěn pokles v porovnání s pokojovou teplotou o 33,2 %. Tento pokles byl největší ze všech měřených konstrukcí s jádrem o tloušťce 5 mm. U sendvičových struktur série B a C byl naměřen taktéž pokles pevnosti a to o 24,1 %, respektive o 13,5 %. Ukázalo se, že zvýšená provozní teplota ovlivňuje i konstrukce, kde není termoplastické jádro (S5_C). Záporná okolní teplota u konstrukcí s pěnovým jádrem ovlivňuje ohybovou pevnost pouze minimálně, konkrétně v případě konstrukcí s PET jádrem (S5_A) došlo k poklesu o 2,4 % a v případě PVC jádra byl zaznamenán menší nárůst o 6,3 %. Nejvyšší ovlivnění zápornou teplotou (zvýšení) bylo naměřeno u konstrukcí S5_C a to o 15,8 %.



Obr. 6. 4: Ohybová pevnost rovinných sendvičových konstrukcí S5 při odlišných provozních teplotách

Ohybové poruchy, stejně jako výše uvedené měřené parametry doznaly jistých změn. Při zvýšené zkušební teplotě bylo u konstrukcí S5_A pozorována pouze lokální ztráta stability jádra bez typického popraskání vláken v horním potahu. Zcela shodná porucha byla zaznamenána i u konstrukcí série B. Konstrukce obsahující voštinové jádro (série C) vykazovaly taktéž lokální poruchu (zbrocení buněk voštiny), avšak té předcházelo prasknutí vláken v horním potahu. Při záporné zkušební teplotě docházelo naopak ve všech případech sendvičových konstrukcí série A ke smykové poruše jádra. Na rozdíl od této skutečnosti, konstrukce S5_B vykazovaly shodnou poruchu jako při teplotě zvýšené, avšak docházelo i k porušení vláken v horním krycím potahu. V případě konstrukcí C byla situace

složitější, neboť byly zaznamenány dva typy poruch a to první typ shodný s poruchou při +60 °C a dále smyková porucha buněk voštiny s následnou separací spodního potahu. Poměr těchto poruch byl přibližně 50:50.

6.1.3 Rovinné konstrukce s jádrem o tloušťce 10 mm - pokojová teplota

Ohybové vlastnosti sendvičových konstrukcí s jádrem tloušťky 10 mm naměřené v trojbodovém (3PB), respektive čtyřbodovém ohybu (4PB) jsou uvedeny v následujících tabulkách (Tab. 6. 5 a Tab. 6. 6). Při 3PB i 4PB lze pozorovat pouze minimální vliv typu zkoušky na efektivní ohybový modul. Ze statistického vyhodnocení je patrné, že hodnoty aritmetických průměrů a mediánů jsou si velmi podobné a také, že variační koeficient je nízký, což ukazuje na dobrou kvalitu naměřených dat. Konstrukce sérií A i B mají téměř shodnou hodnotu efektivního modulu i přes téměř dvojnásobnou hustotu PET jádra v konstrukcích S10_A. Sendvičové nosníky série C pak vykazují hodnoty modulu o 10 – 17 % vyšší než nosníky s polymerními jádry.

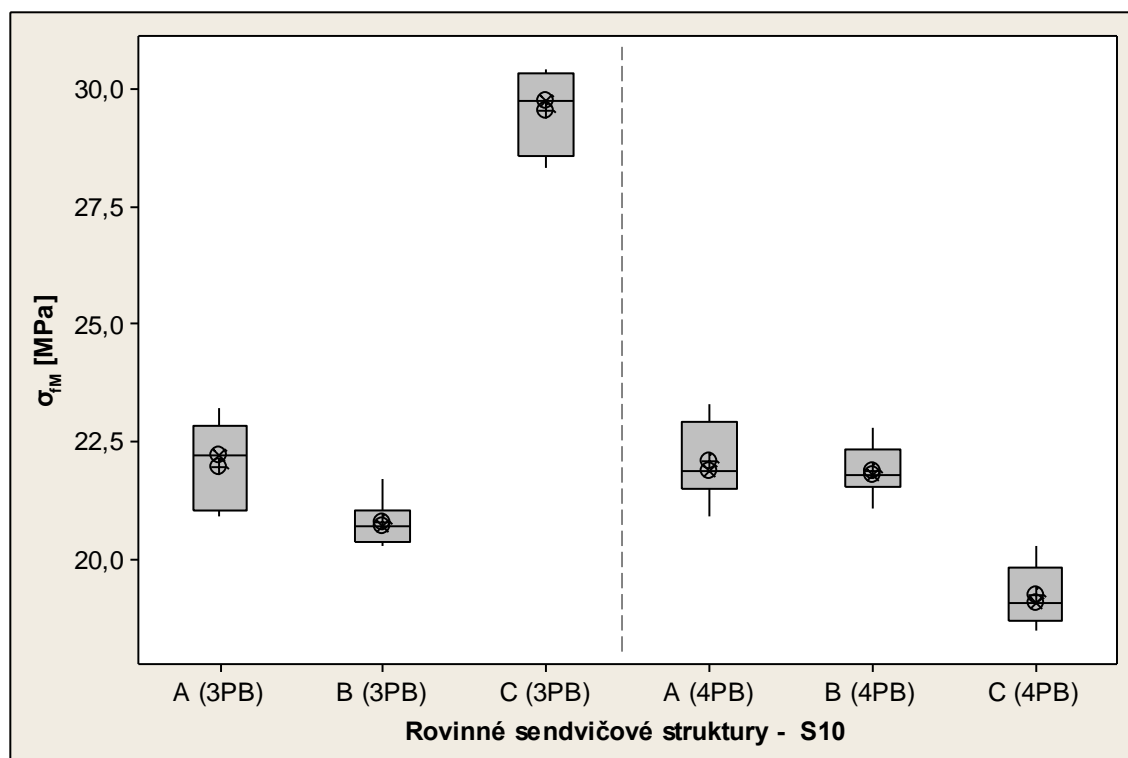
Tab. 6. 5: Ohybové vlastnosti rovinných sendvičových konstrukcí s jádrem o tloušťce 10 mm – trojbodový ohyb (3PB)

S10	A		B		C	
	E_{ef} [MPa]	σ_{fM} [MPa]	E_{ef} [MPa]	σ_{fM} [MPa]	E_{ef} [MPa]	σ_{fM} [MPa]
\bar{x}	2133	22,0	2110	20,8	2495	29,5
s	79	0,9	32	0,4	27	0,8
<i>Max</i>	2260	23,0	2170	21,7	2540	30,4
<i>Min</i>	2000	20,9	2040	20,3	2460	28,3
\tilde{x}	2150	22,2	2115	20,7	2500	29,8
V_x [%]	3,69	4,00	1,53	2,00	1,08	2,60

Tab. 6. 6: Ohybové vlastnosti rovinných sendvičových konstrukcí s jádrem o tloušťce 10 mm – čtyřbodový ohyb (4PB)

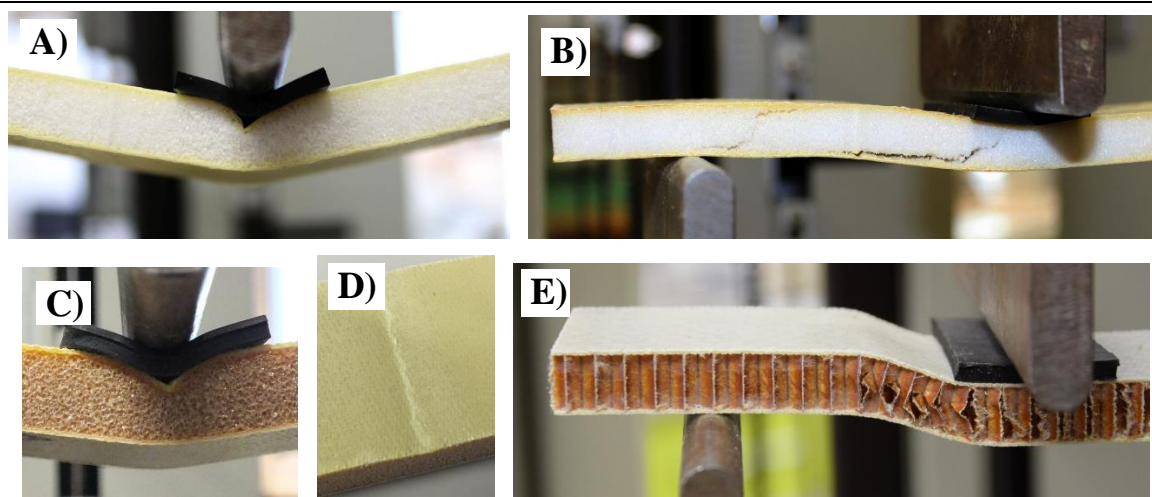
S10	A		B		C	
	E_{ef} [MPa]	σ_{fM} [MPa]	E_{ef} [MPa]	σ_{fM} [MPa]	E_{ef} [MPa]	σ_{fM} [MPa]
\bar{x}	2246	22,4	2331	21,9	2504	19,3
s	62	1,3	63	0,5	57	0,6
<i>Max</i>	2350	25,3	2450	22,8	2610	20,3
<i>Min</i>	2160	20,9	2210	21,1	2420	18,5
\tilde{x}	2250	21,9	2335	21,8	2490	19,1
V_x [%]	2,78	5,70	2,72	2,20	2,29	3,10

Z box-plotového diagramu pro mezní ohybovou pevnost na Obr. 6. 5 je zřejmé, že nosníky série B mají nejužší interkvartilové rozpětí z posuzovaných výběrových souborů. Při 3PB dosahují konstrukce série C nejvyšších hodnot ohybové pevnosti a to o 34 % než konstrukce A, respektive o téměř 42 % než B. Naopak při 4PB vykazují nosníky série C nejnižší pevnost, kdy pokles mezi pevností z 3PB a 4PB testu je 45 %. V případě konstrukcí série A a B je rozdíl mezi hodnotami z obou typů ohybových testů minimální.



Obr. 6. 5: Ohybová pevnost rovinných sendvičových konstrukcí – S10

Při ohybu sendvičových konstrukcí s jádrem o tloušťce 10 mm byly pozorovány následující poruchy. U nosníků ze série A docházelo při 3PB k lokálnímu stlačení jádra pod příčnickem včetně popraskání vláken v horním potahu (Obr. 6. 6 A). Další pozorovanou poruchou byla smyková porucha jádra následovaná separací spodního potahu, která nastala dříve, než došlo k popraskání vláken v horním krycím potahu (Obr. 6. 6 B). Tato druhá porucha byla pozorována ve všech případech nosníků série A při 4PB. Naopak konstrukce s PVC jádrem (série B) byly v případě obou typů ohybu poškozeny lokální poruchou pod působícím příčnickem s popraskáním výztužných vláken v krycím potahu (Obr. 6. 6 C, D). Sendvičové konstrukce s voštinovým jádrem byly charakteristické smykovou poruchou jádra mezi opěrným a působícím příčnickem v obou případech ohybu (3PB i 4PB), kdy docházelo k odtrhávání jednotlivých šestihránných buněk voštiny (Obr. 6. 6 E).



Obr. 6. 6: Ohybové poruchy rovinných sendvičových konstrukcí s jádrem o tloušťce 10 mm – trojbodové i čtyřbodové uložení těles

6.1.4 Rovinné konstrukce s jádrem o tloušťce 10 mm - vliv okolní teploty prostředí

Zvýšení provozní teploty opět ovlivnilo efektivní ohybový modul u všech konstrukcí (Tab. 6. 7). U nosníků série A došlo k poklesu o 16 % v porovnání s hodnotou naměřenou při +25 °C. U sendvičových nosníků ze série B byl pokles ještě vyšší a to o 20 %. Nejnižší pokles modulu byl zjištěn u konstrukcí S10_C, kdy oproti hodnotě naměřené při +25 °C modul poklesl o 10 %.

Naopak snížení teploty prostředí (Tab. 6. 8) výrazně ovlivnilo efektivní modul pouze u konstrukcí série C s voštinovým jádrem, kdy došlo k jeho mírnému navýšení o téměř 7 %. Stejně jako v případě konstrukcí s jádrem tloušťky 5 mm, ohybový modul nosníků série A a B je zápornou teplotou ovlivněn pouze minimálně.

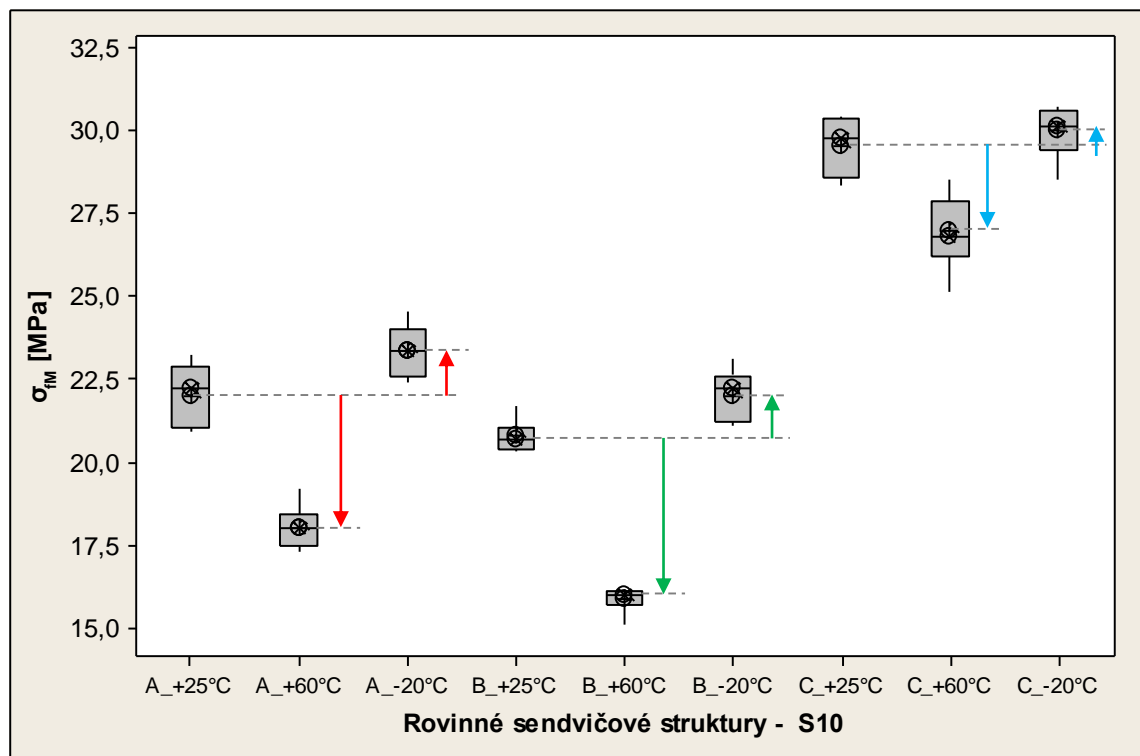
Tab. 6. 7: Ohybové vlastnosti rovinných sendvičových konstrukcí S10 při zvýšené teplotě prostředí

S10	T = +60 °C					
	A		B		C	
	E_{ef} [MPa]	σ_{fM} [MPa]	E_{ef} [MPa]	σ_{fM} [MPa]	E_{ef} [MPa]	σ_{fM} [MPa]
\bar{x}	1792	18,0	1687	15,9	2243	27,0
s	15	0,6	51	0,4	39	1,0
Max	1820	19,2	1750	16,2	2310	28,5
Min	1770	17,3	1560	15,1	2190	25,1
\tilde{x}	1790	18,0	1700	16,0	2240	26,8
V_x [%]	0,82	3,53	3,02	2,49	1,75	3,77

Tab. 6. 8: Ohybové vlastnosti rovinných sendvičových konstrukcí S10 při záporné teplotě prostředí

S10	T = -20 °C					
	A		B		C	
	E_{ef} [MPa]	σ_{fM} [MPa]	E_{ef} [MPa]	σ_{fM} [MPa]	E_{ef} [MPa]	σ_{fM} [MPa]
\bar{x}	2170	23,3	2194	22,0	2666	30,0
s	39	0,8	97	0,7	89	0,7
<i>Max</i>	2220	24,5	2330	23,1	2750	30,7
<i>Min</i>	2110	22,4	1990	21,1	2510	28,5
\tilde{x}	2175	23,4	2200	22,2	2700	30,1
V_x [%]	1,80	3,45	4,43	3,38	3,32	2,46

Na Obr. 6. 7 je zobrazen vliv provozní teploty na mezní ohybovou pevnost sendvičových konstrukcí. Jak je patrné, zvýšená teplota způsobila snížení tohoto parametru v případě nosníků série A o 18 %, u série B až o téměř 23 %. Tento pokles je však méně kritický, než v případě konstrukcí S5. Konstrukce s voštinovým jádrem (série C) byly zvýšenou teplotou ovlivněny nejméně a pokles pevnosti je roven pouze 8,5 %. Záporná hodnota teploty prostředí způsobila nepatrné zvýšení pevnosti u všech měřených konstrukcí, kdy u nosníků s polymerním jádrem je toto zvýšení rovno téměř shodně 6 %.



Obr. 6. 7: Ohybová pevnost rovinných sendvičových konstrukcí – S10 při odlišných provozních teplotách

Zvýšená provozní teplota způsobí relativní měknutí polymerních jader, což se u poruch sendvičových konstrukcí S10 projevilo tak, že u obou sérií (A i B) byla pozorována pouze lokální porucha jádra pod působícím příčným, následovaná popraskáním vláken v horním krycím potahu. V případě konstrukcí C docházelo opět pouze ke smykové poruše buněk voštinového jádra spolu s jejich roztržením v daném místě. Snížená provozní teplota (-20 °C) výrazněji ovlivnila poruchy pouze u konstrukcí série C, kdy po smykové poruše docházelo při pokračování testu k následné delaminaci spodního potahu – poruše na rozhraní jádro - potah. V případě konstrukcí ze série A i B docházelo opět pouze k lokální poruše popsané při teplotě +60°C.

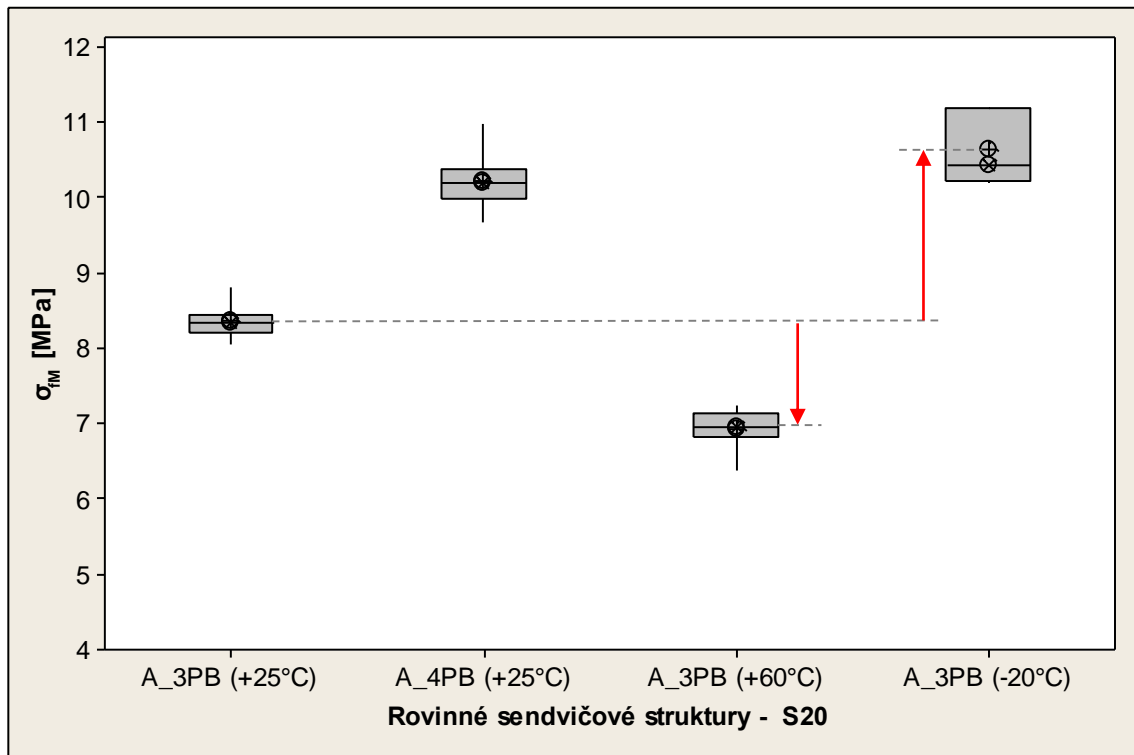
6.1.5 Rovinné konstrukce s jádrem o tloušťce 20 mm – pokojová teplota, vliv okolní teploty prostředí

U sendvičových konstrukcí série A jsou oba vyhodnocované parametry ovlivněny značným zastoupením jádra v průřezu a oproti oběma předchozím sériím (S5 a S10) jsou oba parametry značně nízké. Naměřená a vyhodnocená data jsou uvedena v Tab. 6. 9 a hodnoty pevnosti graficky interpretovány na Obr. 6. 8. Hodnoty efektivní ohybového modulu jsou při 3PB a 4PB téměř shodné, více se však liší v hodnotách mediánů. Značná tloušťka polymerního jádra již ve velké míře ovlivňuje parametry při různých provozních teplotách. Zvýšená teplota způsobila pokles ohybového modulu o 12 %, naopak její snížení do záporných hodnot zvýšilo tento parametr o téměř 22 %.

Tab. 6. 9: Ohybové vlastnosti rovinných sendvičových konstrukcí S20_A

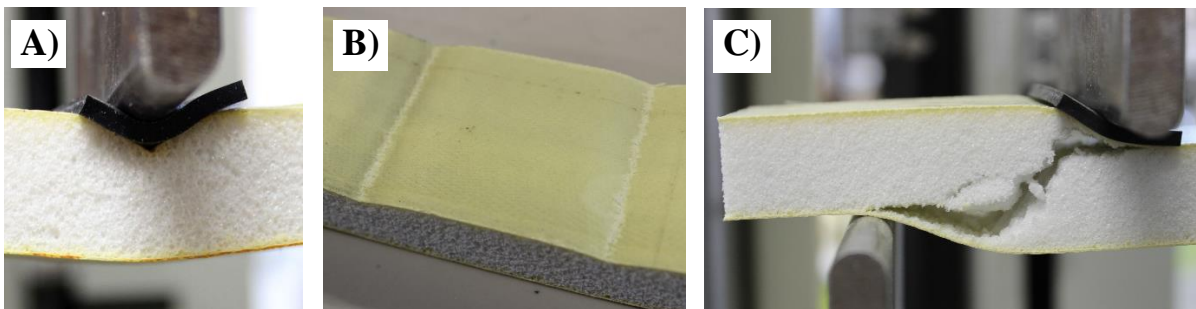
S20	3PB		4PB		3PB		3PB	
	T = +25 °C		T = +25 °C		T = +60 °C		T = -20 °C	
	E _{ef} [MPa]	σ _{fM} [MPa]	E _{ef} [MPa]	σ _{fM} [MPa]	E _{ef} [MPa]	σ _{fM} [MPa]	E _{ef} [MPa]	σ _{fM} [MPa]
\bar{x}	602	8,36	613	10,23	531	7,02	732	10,65
<i>s</i>	17	0,21	28	0,38	29	0,41	28	0,44
<i>Max</i>	643	8,82	648	11,00	585	7,94	765	11,20
<i>Min</i>	581	8,07	568	9,68	496	6,38	675	10,20
\tilde{x}	598	8,34	627	10,20	523	6,97	740	10,45
<i>V_x</i> [%]	2,75	2,52	4,60	3,69	5,41	5,87	3,84	4,15

Hodnoty mezní ohybové pevnosti jsou uvedeny pro všechny případy měření v následujícím diagramu (Obr. 6. 8). Ohybová pevnost při 4PB je o 22 % vyšší než v případě 3PB, což je zřejmě způsobeno malou odolností jádra odolávat lokální poruše při 3PB. Zvýšení teploty okolí způsobilo pokles pevnosti o 16 %, naopak snížená teplota pozitivně ovlivnila pevnost a došlo k jejímu nárůstu na 127 % hodnoty naměřené při +25 °C.



Obr. 6. 8: Ohybová pevnost rovinných sendvičových konstrukcí – S20_A

U sendvičových nosníků série A s jádrem tloušťky 20 mm se začíná značně projevovat poměr jeho tloušťky k tloušťce potahů. Při 3PB i 4PB docházelo téměř výhradně k lokální poruše v místě zatěžujícího příčniku (Obr. 6. 9 A, B), popsané u předchozích sérií, pouze ojediněle byla pozorována smyková porucha při 4PB (Obr. 6. 9 C). Změna provozní teploty neovlivnila typ ohybových poruch a byla pozorována shodná lokální porucha.

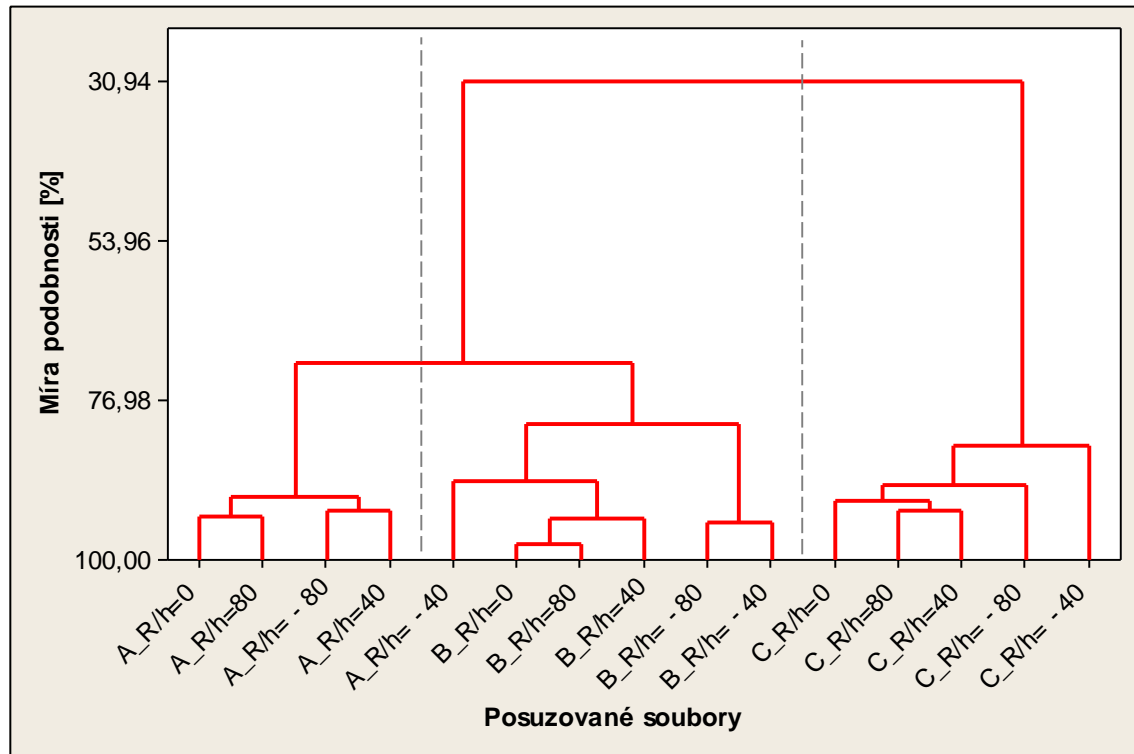


Obr. 6. 9: Ohybové poruchy rovinných sendvičových konstrukcí s PET jádrem o tloušťce 20 mm

6.2 Ohybové chování zakřivených sendvičových konstrukcí

6.2.1 Zakřivené konstrukce s jádrem o tloušťce 5 mm – vliv uložení zkušebního tělesa

Vliv uložení zakřiveného sendvičového nosníku na ohybovou únosnost byl pozorován při jeho trojbodovém uložení při pokojové teplotě (+25 °C). Na naměřených datech byla v úvodu provedena shluková analýza, uvedená v dendrogramu na Obr. 6. 10, který byl vytvořen metodou výpočtu průměrných vzdáleností (Average) a pomocí metriky Euclidian.

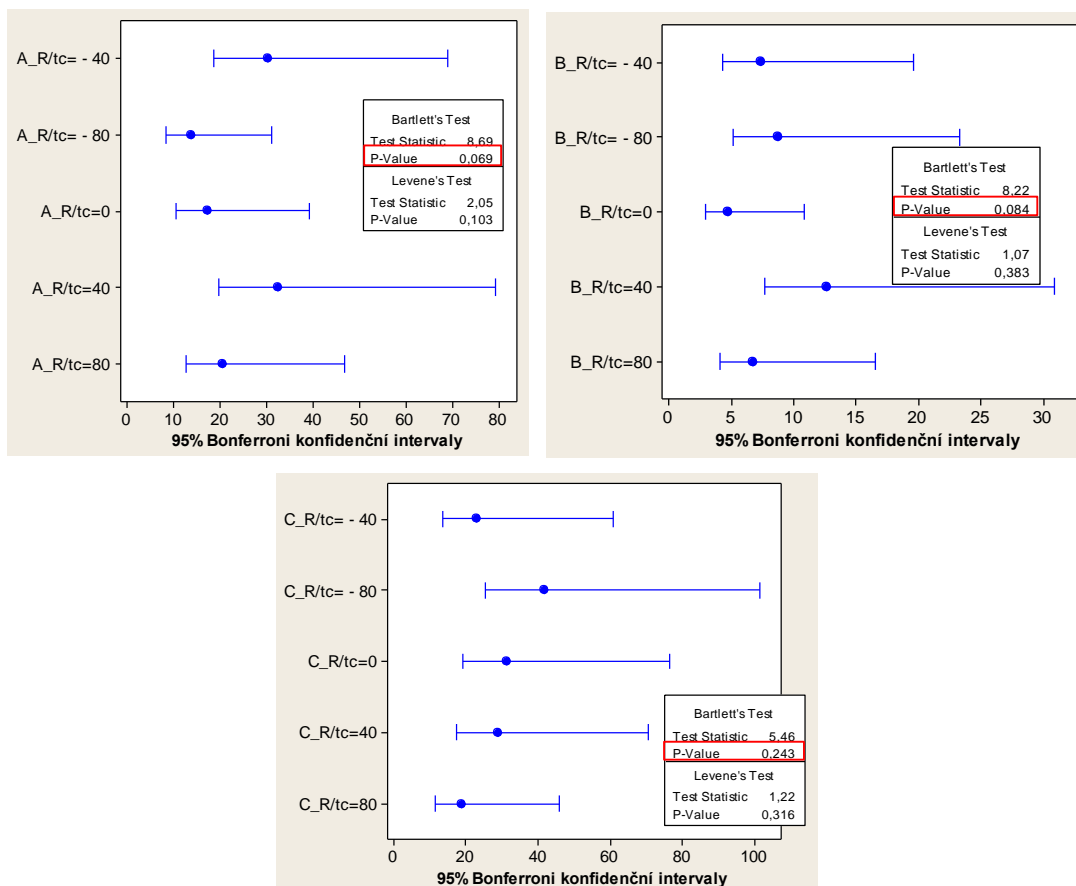


Obr. 6. 10: Shluková analýza dat z ohybové zkoušky různě uložených zakřivených sendvičových nosníků S5

Na základě získaného dendrogramu lze konstatovat, že z hlediska únosnosti se sendvičové nosníky typ C liší od nosníků sérií A a B nejvíce, kdy míra podobnosti je rovna pouze 31 %. Naopak podobnost výsledků pro konstrukce A a B je vyšší a to rovna přibližně 72 %. Silně zakřivené nosníky S5_A, uložené konvexně, se svou únosností dle míry podobnosti cca 89 % blíží vlastnostem nosníkům série B. Na základě těchto skutečností je třeba věnovat se posuzování výběrových souborů separátně dle série sendvičové konstrukce.

V prvním kroku byly všechny výběrové soubory podrobeny testu normality, konkrétně testu Anderson-Darling. Na základě testování lze konstatovat, že s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$ mají všechna naměřená data normální rozdělení.

Z důvodu zjištění statistické významnosti vlivu zakřivení nosníků a jejich uložení na hodnoty jejich ohybové únosnosti byl proveden test hypotéz o rovnosti rozptylů, kdy nulová hypotéza (H_0) je formulována jako $H_0: \sigma^2_{R/tc=0} = \sigma^2_{R/tc=80} = \sigma^2_{R/tc=-80} = \sigma^2_{R/tc=40} = \sigma^2_{R/tc=-40}$ a následně alternativní hypotéza (H_A) ji popírá $H_A: \text{NON}$ s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$ (na konfidenční úrovni). Následující série grafů (Obr. 6. 11) zobrazuje rozptyly jednotlivých výběrových souborů dat pro ohybovou únosnost jednotlivých typů zakřivených sendvičových konstrukcí. Jelikož je P – hodnota (Obr. 6. 11) větší než 0,05 \rightarrow nezamítám hypotézu H_0 o rovnosti rozptylů ve prospěch hypotézy H_A s možností omylu $\alpha = 5\%$. Dále na základě provedené jednocestné metodiky ANOVA s výsledkem P – hodnoty rovné 0,000 s $1 - \alpha = 0,95$ a možností chyby $\alpha = 5\%$ zamítám hypotézu $H_0: \mu_{R/tc=0} = \mu_{R/tc=80} = \mu_{R/tc=-80} = \mu_{R/tc=40} = \mu_{R/tc=-40}$ ve prospěch hypotézy $H_A: \text{NON}$, z čehož plyne, že na základě této hypotézy lze konstatovat, že zakřivení sendvičové konstrukce spolu s jejím uložením při testu mají statisticky významný vliv na její ohybovou únosnost.



Obr. 6. 11: Test rovnosti rozptylů dat pro ohybovou únosnost

Statistické vyhodnocení naměřených souborů dat je uvedeno v následujících tabulkách (Tab. 6. 10, Tab. 6. 11 a Tab. 6. 12). Jak je z těchto tabulek patrné, variační koeficient je ve všech případech nižší jak 10 % a také je patrná značná shoda aritmetických průměrů s mediány. Efektivní modul pružnosti v případě slabě zakřivených nosníků ($R/t_c = \pm 80$) v sérii A vykazuje pouze nízký pokles o

cca 7 % v případě konkávně uloženého vzorku. U silně zakřivených nosníků ($R/t_c = 40$) uložených taktéž konkávně je tento pokles již značný a to o 16 %. U konkávně uložených zakřivených nosníků nebyl zaznamenán výraznější pokles modulu pružnosti v porovnání s nosníky rovinnými. V případě ohybové únosnosti byl naměřen s rostoucím zakřivením mírný pokles. Nejnižší únosnost vykazují konvexně uložené sendvičové nosníky a to téměř 20 % v porovnání s konstrukcemi rovinnými.

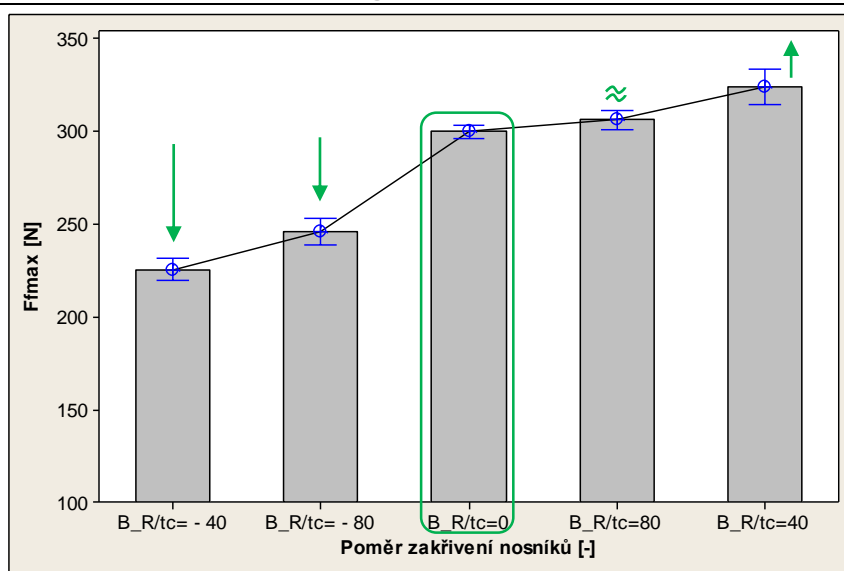
Tab. 6. 10: Ohybové vlastnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S5 s ohledem na uložení zkušební nosníku – série A

A	$R/t_c = 0$		$R/t_c = 80$		$R/t_c = - 80$		$R/t_c = 40$		$R/t_c = - 40$	
	E_{ef} [MPa]	F_{fmax} [N]	E_{ef} [MPa]	F_{fmax} [N]	E_{ef} [MPa]	F_{fmax} [N]	E_{ef} [MPa]	F_{fmax} [N]	E_{ef} [MPa]	F_{fmax} [N]
\bar{x}	6535	430	6132	428	6442	404	5482	392	6234	348
s	261	16	176	19	244	13	364	31	235	29
Max	7000	450	6320	448	6720	424	6000	430	6620	395
Min	6120	401	5820	388	5940	384	4960	348	5740	286
\tilde{x}	6525	435	6205	438	6490	403	5355	392	6290	348
V_x [%]	3,99	3,80	2,88	4,55	3,79	3,21	6,64	7,84	3,78	8,28

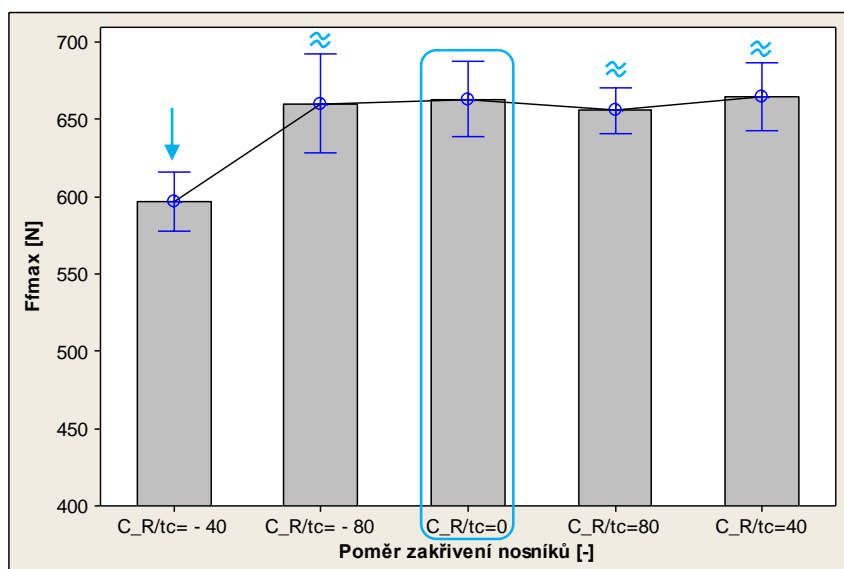
Sendvičové struktury obsahující PVC jádro nízké hustoty (série B) vykazují opět mírný pokles efektivního modul pružnosti u silně zakřivených nosníků ($R/t_c = \pm 40$), naopak v případě slabě zakřivených nosníků, uložených konvexně, bylo zjištěno dokonce zvýšení tohoto parametru o 8 %. Dále byl zjištěn výraznější vliv zakřivení na ohybovou únosnost u těchto konstrukcí než u série A. Konvexně uložené nosníky mírného i silného zakřivení vykazují pokles únosnosti o 18 %, respektive o téměř 25%.

Tab. 6. 11: Ohybové vlastnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S5 s ohledem na uložení zkušební tělesa – série B

B	$R/t_c = 0$		$R/t_c = 80$		$R/t_c = - 80$		$R/t_c = 40$		$R/t_c = - 40$	
	E_{ef} [MPa]	F_{fmax} [N]	E_{ef} [MPa]	F_{fmax} [N]	E_{ef} [MPa]	F_{fmax} [N]	E_{ef} [MPa]	F_{fmax} [N]	E_{ef} [MPa]	F_{fmax} [N]
\bar{x}	5952	300	5734	307	6447	246	5427	325	5566	226
s	140	5	493	6	309	8	98	12	300	7
Max	6170	310	6110	312	7210	260	5640	337	5970	238
Min	5620	295	4430	294	5990	233	5290	302	5250	212
\tilde{x}	5965	298	5850	310	6370	244	5400	328	5405	227
V_x [%]	2,35	1,51	8,59	2,09	4,80	3,33	1,81	3,69	5,39	3,06

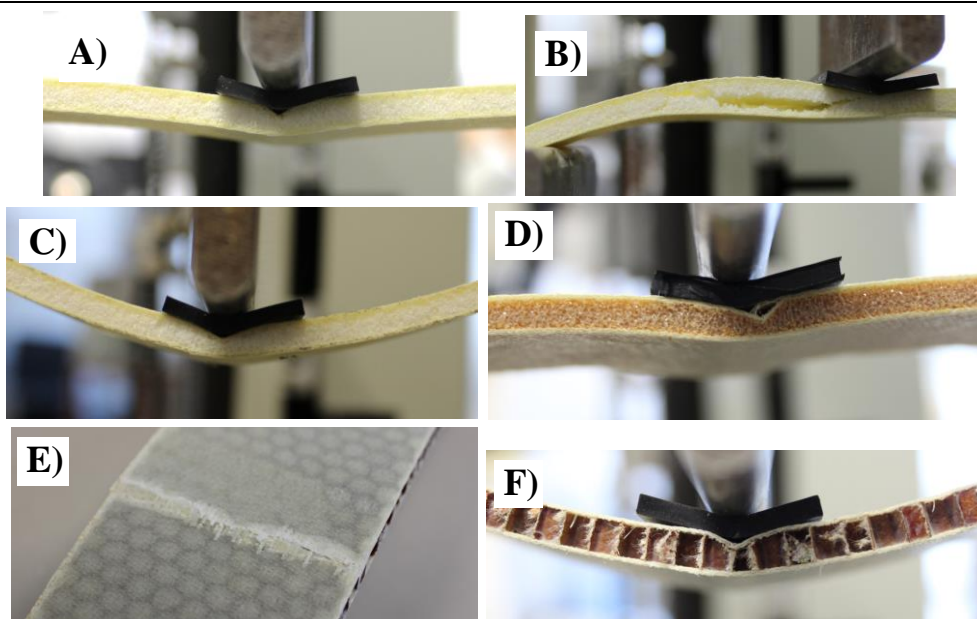


Obr. 6. 13: Ohybová únosnost konstrukcí S5 – série B



Obr. 6. 14: Ohybová únosnost konstrukcí S5 – série C

Ohybové poruchy sledované u jednotlivých sérií zakřivených nosníků se od sebe značně odlišovaly. U slabě zakřivených nosníků série A uložených konkávně byly pozorovány dva typy poškození a to lokální poruchy jádra spolu s poškozením horního potahu (Obr. 6. 15 A) a smykové poruchy jádra bez poškození potahu. U silně zakřivených se pak vyskytovaly pouze poruchy smykové (Obr. 6. 15 B). Naopak u konvexně uložených nosníků této série byly v průběhu trojbodového ohybu zaznamenány pouze lokální poruchy jádra (Obr. 6. 15 C). U nosníků série B byla pozorována pouze lokální ztráta stability jádra s následným poškozením vláken v krycím potahu a to jak u konkávně, tak i konvexně uložených sendvičových nosníků (Obr. 6. 15 D). Obdobná porucha byla pozorována i u nosníků série C (Obr. 6. 15 E, F) s tím rozdílem, že po popraskání vláken v potahu docházelo k částečné delaminaci v místě pod příčnicí u horního i dolního potahu (zejména u konkávně uložených).



Obr. 6. 15: Ohybové poruchy zakřivených sendvičových konstrukcí s jádrem o tloušťce 5 mm – trojbodové uložení těles (3PB)

6.2.2 Zakřivené konstrukce s jádrem o tloušťce 5 mm – vliv typu ohybového testu

Změna ohybového chování zakřivených sendvičových konstrukcí byla pozorována také s ohledem na typ ohybové zkoušky a to při trojbodové (3PB) a čtyřbodové konfiguraci (4PB). Měření bylo provedeno pouze v případě konkávně uložených sendvičových nosníků.

Na základě výsledků z testování normality pomocí testu Anderson-Darling lze konstatovat, že s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$ mají všechna naměřená data normální rozdělení. Test hypotéz o rovnosti rozptylů byl formulován následovně:

$$H_0: \sigma^2_{R/tc(3PB)=0} = \sigma^2_{R/tc(3PB)=80} = \sigma^2_{R/tc(3PB)=40} = \sigma^2_{R/tc(4PB)=0} = \sigma^2_{R/tc(4PB)=80} = \sigma^2_{R/tc(4PB)=40}$$

$$H_A: \text{NON}$$

Jelikož je P-hodnota ($P_{(A)} = 0,211$; $P_{(B)} = 0,042$; $P_{(C)} = 0,557$) u jednoho z vyhodnocovaných souborů nižší než 0,05 \rightarrow zamítám nulovou hypotézu H_0 ve prospěch hypotézy H_A o rovnost rozptylů s možností omylu $\alpha = 5\%$. Je tedy nutné pro určení statistické významnosti vlivu typu ohybového testu na únosnost postupovat metodami neparametrickými, konkrétně metodou Kruskal-Wallis. Test hypotéz o rovnosti mediánů byl formulován následovně:

$$H_0: \tilde{\mu}_{R/tc(3PB)=0} = \tilde{\mu}_{R/tc(3PB)=80} = \tilde{\mu}_{R/tc(3PB)=40} = \tilde{\mu}_{R/tc(4PB)=0} = \tilde{\mu}_{R/tc(4PB)=80} = \tilde{\mu}_{R/tc(4PB)=40}$$

$$H_A: \text{NON}$$

Vyhodnocením byla zjištěna P-hodnota = 0,000 a je tedy možné s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$ tvrdit, že typ ohybové zkoušky spolu se zakřivením mají statisticky významný vliv na ohybovou únosnost sendvičových konstrukcí.

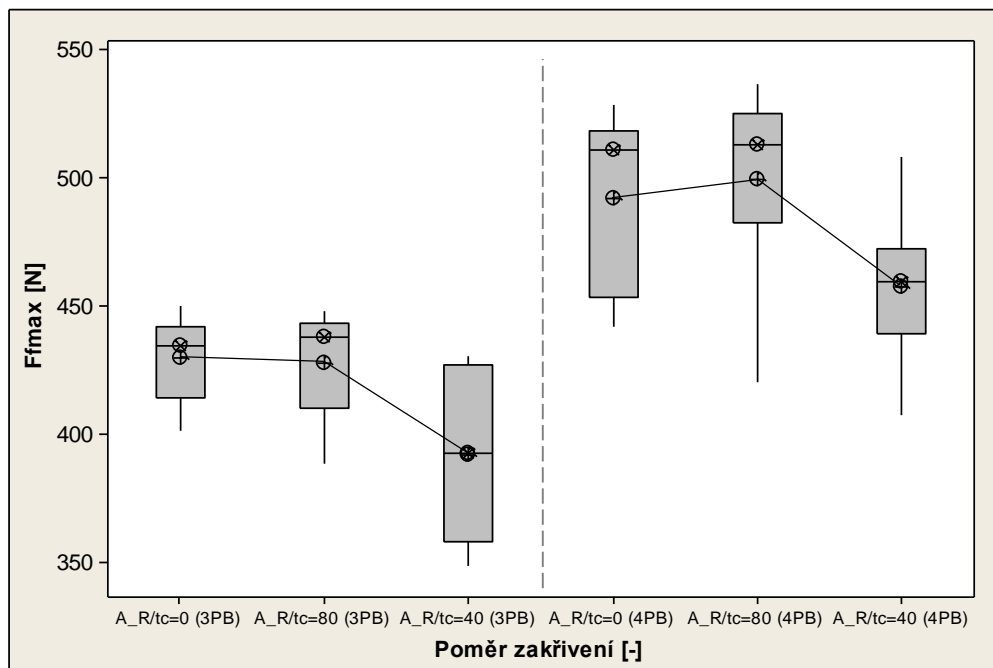
Níže uvedená tabulka (Tab. 6. 13) ukazuje vyhodnocená data získaná při čtyřbodovém ohybu pro všechny série sendvičových konstrukcí S5. Z výsledků měření efektivního modulu v případě série A je patrné, že s rostoucím zakřivením dochází k jeho značnému poklesu. Tento pokles činí pro silně zakřivené nosníky v porovnání s rovinnými nosníky téměř 25 %, pro slabě zakřivené pak 9 %. Stejně značný pokles byl zaznamenán i v případě nosníků ze zbylých sérií. V případě silného zakřivení ($R/t_c = 40$) u nosníků ze série B je tento pokles roven 11 %, u nosníků ze série C pak cca 15 %. U slabě zakřivených nosníků těchto sérií nebyla naměřena významná změna efektivního modulu.

Tab. 6. 13: Ohybové vlastnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S5 s ohledem na typ ohybové zkoušky – 4PB test

			\bar{x}	s	<i>Max</i>	<i>Min</i>	\tilde{x}	V_x [%]
A	R/t_c = 0	E_{ef} [MPa]	6681	231	7120	6430	6600	3,46
		F_{fmax} [N]	492	33	529	442	511	6,69
	R/t_c = 80	E_{ef} [MPa]	6134	198	6550	5770	6120	3,23
		F_{fmax} [N]	500	35	537	420	513	7,07
	R/t_c = 40	E_{ef} [MPa]	5030	316	5630	4360	5030	6,28
		F_{fmax} [N]	458	27	508	407	460	5,83
B	R/t_c = 0	E_{ef} [MPa]	6008	106	6210	5890	5990	1,76
		F_{fmax} [N]	358	6	369	349	358	1,64
	R/t_c = 80	E_{ef} [MPa]	6193	89	6380	6080	6210	1,43
		F_{fmax} [N]	370	11	394	355	370	3,06
	R/t_c = 40	E_{ef} [MPa]	5350	384	5810	4830	5500	7,17
		F_{fmax} [N]	364	7	374	344	366	1,82
C	R/t_c = 0	E_{ef} [MPa]	7278	151	7480	7100	7200	2,08
		F_{fmax} [N]	648	31	705	593	655	4,82
	R/t_c = 80	E_{ef} [MPa]	7231	142	7400	6970	7300	1,96
		F_{fmax} [N]	744	33	798	672	751	4,47
	R/t_c = 40	E_{ef} [MPa]	6194	142	6450	5980	6180	2,29
		F_{fmax} [N]	743	22	765	710	755	2,94

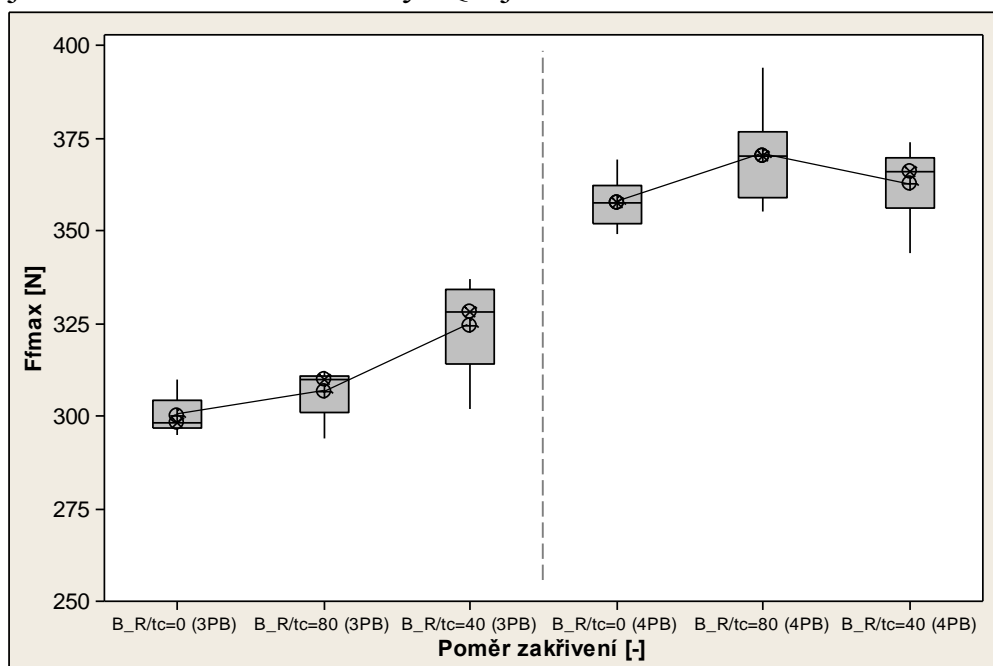
Naměřená data ohybové únosnosti jsou vyhodnocena jednak v předchozí tabulce a dále také srovnána v následujících box-plotových grafech (Obr. 6. 16, Obr. 6. 17 a Obr. 6. 18) s hodnotami z trojbodového ohybu. Spojnice hodnot aritmetických průměrů zobrazuje trend změny.

V případě konstrukcí ze série A (Obr. 6. 16) je zřejmé, že výsledky z 3PB a 4PB ohybu mají podobný trend, silně zakřivené nosníky mají nižší ohybovou únosnost, zatímco mírné zakřivení únosnost téměř nezmění. Konkrétně došlo u čtyřbodového ohybu těchto nosníků k poklesu parametru o 7 %. Dále lze konstatovat, že únosnost ve čtyřbodovém ohybu je o přibližně 15 % vyšší než v ohybu trojbodovém.



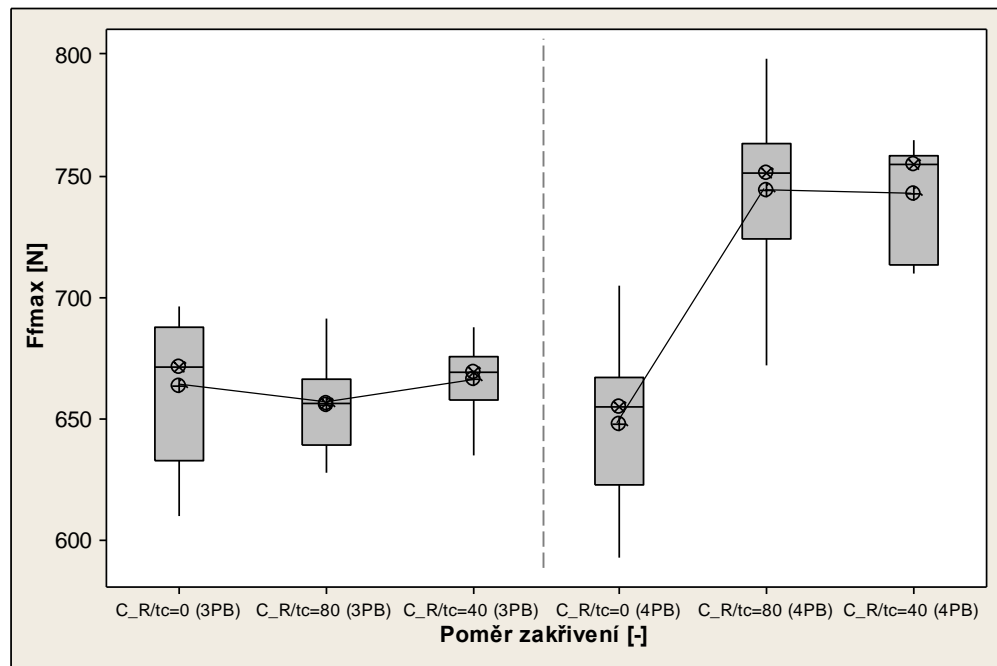
Obr. 6. 16: Box-plotový diagram závislosti ohybové únosnosti konstrukcí S5 na typu ohybové zkoušky – série A

V případě sendvičových nosníků ze série B mají výsledky rozdílný trend. Při trojbodového ohybu je pozorovatelný pomalý nárůst únosnosti vlivem zakřivení, avšak v případě čtyřbodového ohybu již tento trend není výrazný a po slabém nárůstu při mírném zakřivení naopak silné zakřivení únosnost posouvání blíže k únosnosti konstrukcí rovinných. Hodnoty únosnosti v případě dat z 4PB leží opět výše než hodnoty z 3PB, tento rozdíl se pohybuje okolo 20 %. Dále je možné dle grafu (Obr. 6. 17) poznamenat, že hodnoty aritmetických průměrů a mediánů vykazují značnou shodu a hodnoty IQR jsou nízké.



Obr. 6. 17: Box-plotový diagram závislosti ohybové únosnosti konstrukcí S5 na typu ohybové zkoušky – série B

Z naměřených dat u konstrukcí ze série C (Obr. 6. 18) je patrné, že zakřivení značně zvyšuje únosnost těchto konstrukcí ve čtyřbodovém ohybu. Zatímco při 3PB je únosnost téměř neměnná, při 4PB testu zakřivení zvyšuje únosnost o téměř 15 % v obou případech.



Obr. 6. 18: Box-plotový diagram závislosti ohybové únosnosti konstrukcí S5 na typu ohybové zkoušky – série C

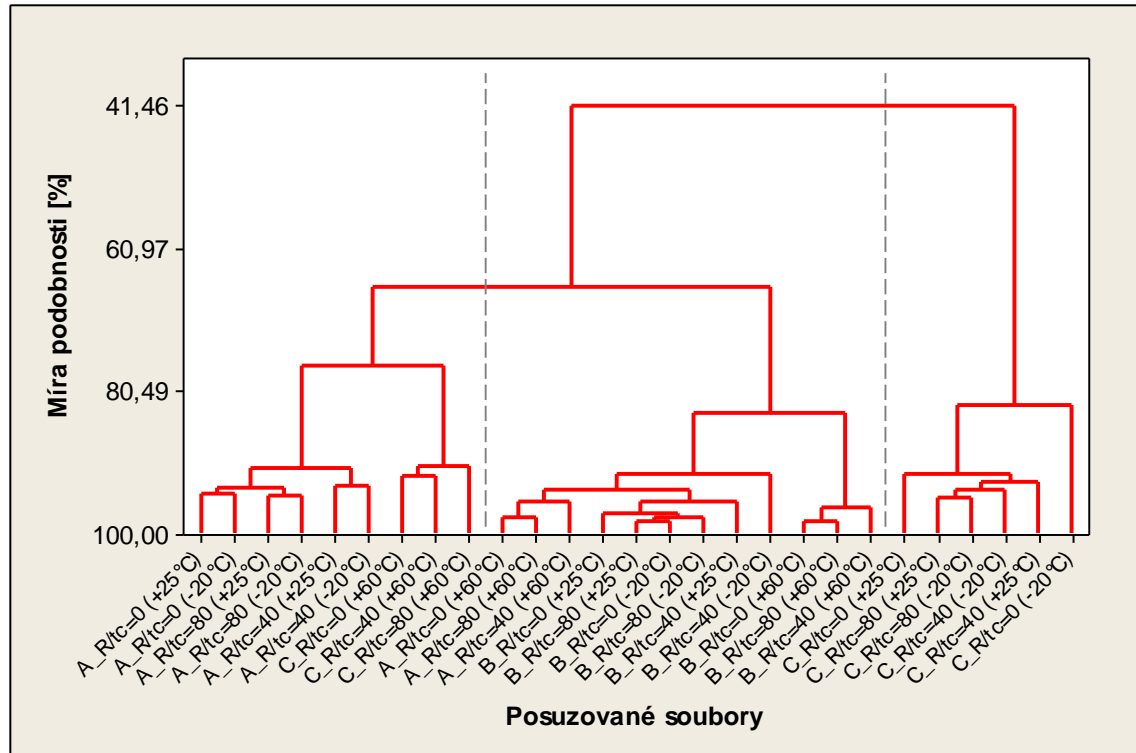
Nosníky série A obsahující PET jádro vykazovaly při 4PB testu pouze charakteristickou smykovou poruchu (Obr. 6. 19 A) jak v případě slabě, tak i silně zakřivených nosníků. Nosníky série B byly deformovány opět shodnou poruchou jako v případě 3PB testu a to lokální ztrátou stability jádra pod působícími podpěrami (Obr. 6. 19 B). U nosníků s voštinou (série C) byly pozorovány pouze smykové poruchy voštiny s následnou delaminací od spodního potahu, případně pouze delaminace spodního potahu bez viditelného porušení voštiny (Obr. 6. 19 C).



Obr. 6. 19: Ohybové poruchy zakřivených sendvičových konstrukcí s jádrem o tloušťce 5 mm – čtyřbodové uložení těles (4PB)

6.2.3 Zakřivené konstrukce s jádrem o tloušťce 5 mm – vliv okolní teploty prostředí

Vliv teploty okolního prostředí byl posuzován pouze u nosníků uložených konkávně a to v trojbodovém ohybu (3PB). Získaná data byla podrobena shlukové analýze, která je vyobrazena pomocí dendrogramu na Obr. 6. 20. Tento graf byl vytvořen metodou výpočtu průměrných vzdáleností (Average) a pomocí metriky Euclidian.



Obr. 6. 20: Shluková analýza dat z ohybové zkoušky zakřivených sendvičových nosníků S5 při různé teplotě okolí

Dle výše uvedeného dendrogramu je zřejmé, že nosníky série A měřené při pokojové a záporné teplotě jsou únosností podobné na 77 % nosníkům série C, měřených při +60 °C. Dále pak je vysoká míra podobnosti (přibližně 94 %) mezi konstrukcemi série A, měřených při zvýšené teplotě a téměř všech konstrukcí série B. Z toho vyplývá, že konstrukce A při +60 °C mají velmi podobnou únosnost jako konstrukce B jak při pokojové, tak i záporné teplotě. Naopak míra podobnosti únosnosti pro konstrukce série C měřené při pokojové a záporné teplotě s konstrukcemi A i B při všech případech teplot je velmi nízká, rovna 41,5 %. Dendrogram opět potvrdil nutnost vyhodnocovat jednotlivé výběrové soubory dle sérií a teplot.

Následně byly výběrové soubory otestovány Anderson-Darling testem normality. Toto statistické testování s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$ potvrdilo, že naměřená data mají normální rozdělení.

Pro ověření statistické významnosti vlivu teploty spolu se zakřivením na parametr ohybové únosnosti, byla data podrobena testu hypotéz o rovnosti rozptylů s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$ (na konfidenční úrovni). Formulace hypotéz byla následující:

$$H_0: \sigma^2_{R/t_c = 0_{-}+25^{\circ}\text{C}(+60^{\circ}\text{C},-20^{\circ}\text{C})} = \sigma^2_{R/t_c = 80_{-}+25^{\circ}\text{C}(+60^{\circ}\text{C},-20^{\circ}\text{C})} = \sigma^2_{R/t_c = 40_{-}+25^{\circ}\text{C}(+60^{\circ}\text{C},-20^{\circ}\text{C})}$$

$$H_A: \text{NON}$$

Na základě testování hypotéz v rámci jednotlivých sérií byla zjištěna P-hodnota ($P_{(A)} = 0,053$; $P_{(B)} = 0,001$; $P_{(C)} = 0,180$) u jedné z vyhodnocovaných sérií nižší než $0,05 \rightarrow$ zamítám nulovou hypotézu H_0 ve prospěch hypotézy H_A o rovnost rozptylů s možností omylu $\alpha = 5 \%$. Na základě tohoto výsledku je nutné použít metodu neparametrickou – Kruskal-Wallis. Test hypotéz o rovnosti mediánů byl formulován následně:

$$H_0: \tilde{\mu}_{R/t_c=0_{-}+25^{\circ}\text{C}(+60^{\circ}\text{C},-20^{\circ}\text{C})} = \tilde{\mu}_{R/t_c=80_{-}+25^{\circ}\text{C}(+60^{\circ}\text{C},-20^{\circ}\text{C})} = \tilde{\mu}_{R/t_c=40_{-}+25^{\circ}\text{C}(+60^{\circ}\text{C},-20^{\circ}\text{C})}$$

$$H_A: \text{NON}$$

Vyhodnocením byla zjištěna P-hodnota = $0,000$ a je tedy možné s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$ tvrdit, že teplota spolu se zakřivením mají statisticky významný vliv na ohybovou únosnost sendvičových konstrukcí.

Ze statisticky vyhodnocených dat z tabulky uvádějící hodnoty získané při zvýšené teplotě okolí (Tab. 6. 14) je patrné, že pro efektivní modul byla zjištěna silná závislost na teplotě, respektive na zakřivení. U konstrukcí série A došlo k mírnému poklesu modulu při jejich mírném zakřivení (o cca $5,5 \%$), avšak pro silně zakřivené nosníky ($R/t_c=40$) byl tento pokles již výrazný, roven $16,4 \%$. Zcela obdobné chování bylo identifikováno v případě sendvičových konstrukcí série B. Pokles efektivního modulu pružnosti byl 3% , respektive 15% a to pro slabě, respektive silně zakřivené nosníky pod vlivem teploty $+60 \text{ }^{\circ}\text{C}$. U konstrukcí s voštinovým jádrem (série C) byl tento pokles nejnižší. Konkrétně došlo k poklesu efektivního modulu o $5,1 \%$ pro nosníky s poměrem zakřivení $R/t_c=80$ a o $12,5 \%$ pro silně zakřivené ($R/t_c=40$).

V případě záporné teploty okolí (Tab. 6. 15) bylo zjištěno odlišné chování. U sendvičových konstrukcí série A a B došlo u mírně zakřivených nosníků k zanedbatelnému nárůstu efektivního modulu, u silně zakřivených byl však opět pozorován mírný pokles tohoto parametru o 11% pro A, respektive o $6,2 \%$ u nosníků série B. U konstrukcí C byl opět naměřen pokles o $12,5 \%$ u silně zakřivených nosníků v porovnání s rovinnými. Dále lze konstatovat, že nosníky série C vykazují nejnižší hodnoty variačních koeficientů v porovnání s dalšími sériemi.

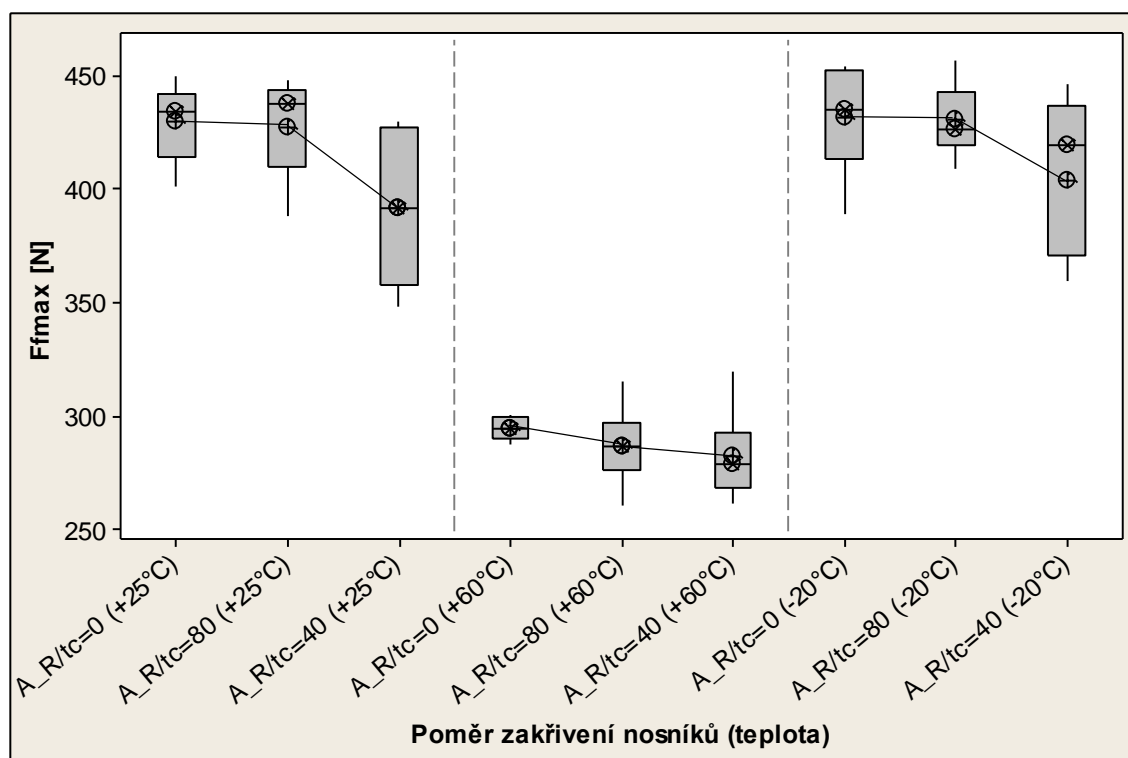
Tab. 6. 14: Ohybové vlastnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S5 při zvýšené teplotě prostředí

			\bar{x}	s	<i>Max</i>	<i>Min</i>	\tilde{x}	V_x [%]	
+60 °C	A	R/t _c = 0	E _{ef} [MPa]	5129	228	5380	4570	5180	4,44
			F _{fmax} [N]	291	12	301	288	295	4,07
		R/t _c = 80	E _{ef} [MPa]	4851	163	5160	4630	4910	3,37
			F _{fmax} [N]	287	15	315	261	287	5,18
		R/t _c = 40	E _{ef} [MPa]	4291	115	4510	4140	4280	2,67
			F _{fmax} [N]	282	17	320	262	279	5,95
	B	R/t _c = 0	E _{ef} [MPa]	5140	73	5270	4980	5155	1,43
			F _{fmax} [N]	228	4	234	220	229	1,83
		R/t _c = 80	E _{ef} [MPa]	4992	247	5340	4600	4970	4,96
			F _{fmax} [N]	222	4	228	215	223	1,84
		R/t _c = 40	E _{ef} [MPa]	4374	300	4690	3740	4475	6,86
			F _{fmax} [N]	212	10	227	195	215	4,77
C	R/t _c = 0	E _{ef} [MPa]	5708	175	5970	5420	5680	3,06	
		F _{fmax} [N]	559	19	591	536	552	3,44	
	R/t _c = 80	E _{ef} [MPa]	5412	188	5690	5150	5420	3,47	
		F _{fmax} [N]	512	20	535	480	521	3,86	
	R/t _c = 40	E _{ef} [MPa]	4991	292	5380	4520	5050	5,85	
		F _{fmax} [N]	545	47	603	463	567	8,68	

Tab. 6. 15: Ohybové vlastnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S5 při záporné teplotě prostředí

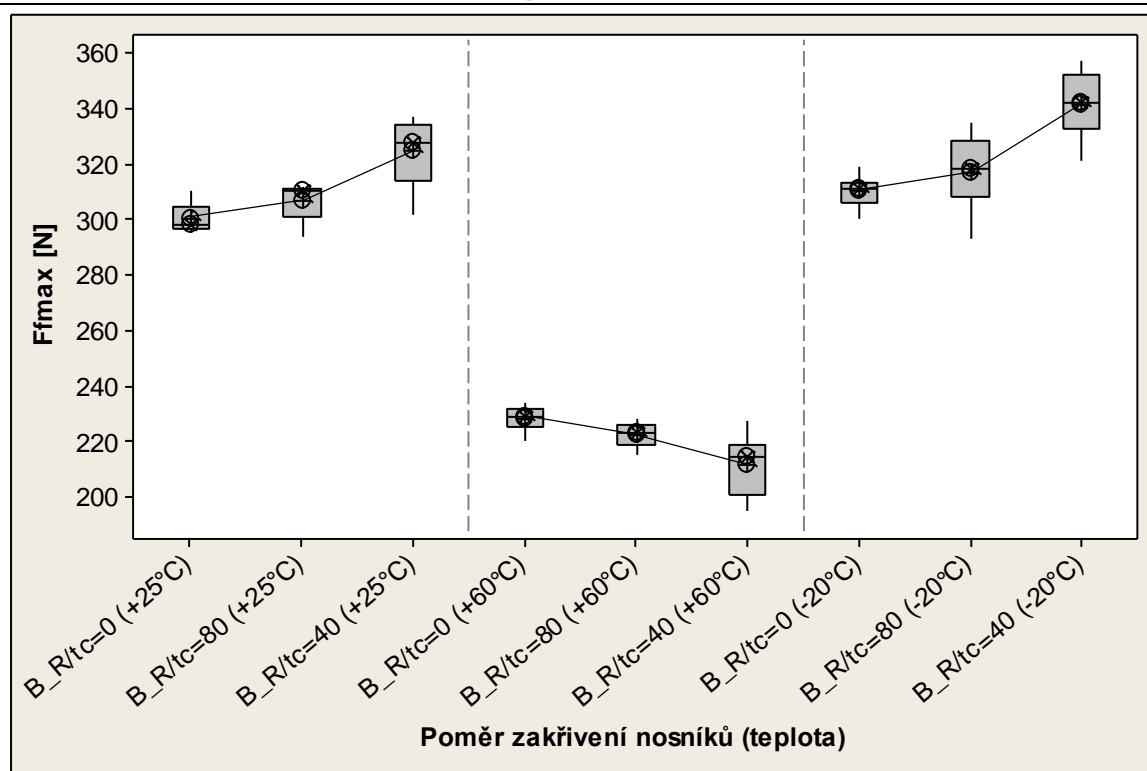
			\bar{x}	s	<i>Max</i>	<i>Min</i>	\tilde{x}	V_x [%]	
-20 °C	A	R/t _c = 0	E _{ef} [MPa]	6429	328	6960	5960	6350	5,11
			F _{fmax} [N]	432	22	454	389	435	5,01
		R/t _c = 80	E _{ef} [MPa]	6517	396	7370	5980	6515	6,08
			F _{fmax} [N]	439	28	457	409	432	6,40
		R/t _c = 40	E _{ef} [MPa]	5661	330	6300	5220	5540	5,83
			F _{fmax} [N]	404	32	446	360	419	8,03
	B	R/t _c = 0	E _{ef} [MPa]	6357	180	6610	6080	6410	2,83
			F _{fmax} [N]	310	5	319	300	311	1,69
		R/t _c = 80	E _{ef} [MPa]	6513	191	6740	6070	6560	2,94
			F _{fmax} [N]	317	12	335	293	318	3,87
		R/t _c = 40	E _{ef} [MPa]	5959	314	6380	5400	6100	5,27
			F _{fmax} [N]	341	11	357	321	342	3,27
C	R/t _c = 0	E _{ef} [MPa]	7243	132	7420	7020	7225	1,82	
		F _{fmax} [N]	741	24	775	697	751	3,28	
	R/t _c = 80	E _{ef} [MPa]	7178	176	7410	6890	7210	2,45	
		F _{fmax} [N]	641	23	674	591	647	3,64	
	R/t _c = 40	E _{ef} [MPa]	6341	213	6690	5980	6260	3,36	
		F _{fmax} [N]	640	23	686	610	639	3,59	

Grafická interpretace naměřených dat ohybové únosnosti pro jednotlivé série sendvičových konstrukcí je uvedena v následujících box-plotových diagramech (Obr. 6. 21, Obr. 6. 22 a Obr. 6. 23), kdy spojnice aritmetických průměrů opět vyjadřuje trend změny únosnosti. První z uvedených diagramů srovnává únosnost konstrukcí série A. Jak je zřejmé, vyhodnocená data mají nejvyšší hodnoty interkvartilového rozpětí ze všech sérií, což poukazuje na velký rozptyl hodnot zejména u silně zakřivených nosníků. Ohybová únosnost značně poklesla při zvýšené teplotě a to o 34 % (pro nosníky s poměrem $R/t_c=80$) a o 28 % u silně zakřivených ($R/t_c=40$). Naopak při záporných teplotách jsou hodnoty únosnosti téměř shodné s jejich hodnotami při pokojové teplotě.



Obr. 6. 21: Box-plotový diagram závislosti ohybové únosnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S5 při odlišných provozních teplotách (série A)

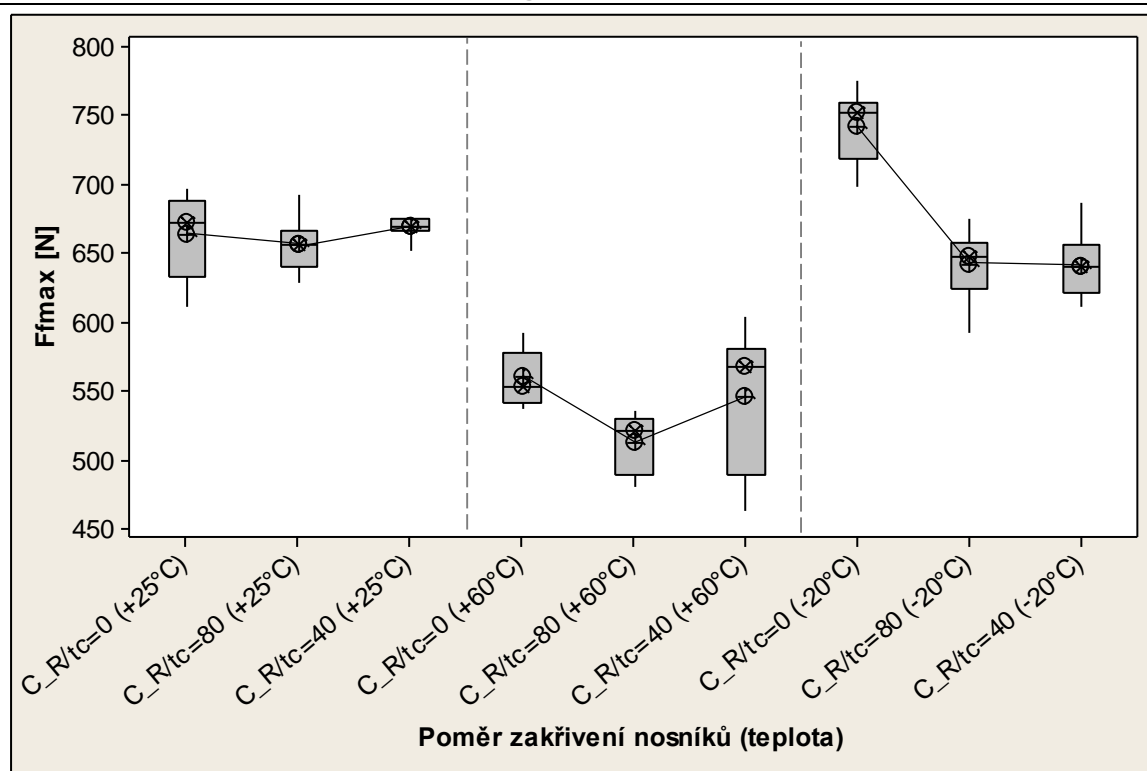
Sendvičové nosníky série B (Obr. 6. 22) vykazují odlišné chování než nosníky předchozí série. Z grafu je patrné, že zvýšená teplota prostředí opět způsobila pokles ohybové únosnosti o 27,5 % v porovnání se slabě zakřiveným nosníkem a jeho chováním při pokojové teplotě. Ještě větší pokles (o téměř 35 %) byl naměřen u silně zakřiveného nosníku. Záporná teplota okolí způsobila mírné zvýšení únosnosti s rostoucím zakřivením nosníků, kdy se toto zvýšení pohybuje v řádech od 3 do 6%. Z diagramu je také patrné, že data naměřená pro tuto sérii mají nejmenší rozptyl hodnot (malé IQR) a velmi dobrou shodu mezi hodnotami aritmetického průměru a mediánu.



Obr. 6. 22: Box-plotový diagram závislosti ohybové únosnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S5 při odlišných provozních teplotách (série B)

Nosníky poslední série (Obr. 6. 23), obsahující odlišný materiálový typ jádra (voštinu), vykazovaly pod vlivem teplot značně rozdílné chování. Při teplotě +60 °C došlo u slabě zakřivených nosníků ke značnému poklesu únosnosti a to o 22 %. U silně zakřivených nosníků byl naměřen také pokles (o 18 %) v porovnání se stejnými nosníky při pokojové teplotě, avšak při srovnání s rovinnými za této zvýšené teploty jsou hodnoty únosnosti téměř shodné. Hodnoty naměřené u nosníků s poměrem $R/t_c=40$ mají také nejvyšší hodnotu IQR z celého diagramu. Záporná teplota okolí způsobila snížení únosnosti obou typů zakřivených nosníků. Toto snížení je v porovnání s únosností měřenou při pokojové teplotě minimální. Na druhou stranu, při srovnání s únosností nosníků rovinných měřenou při záporné teplotě je tento pokles značný, roven téměř 14 %.

Při zvýšené zkušební teplotě byla u všech zakřivených nosníků všech sérií pozorována pouze lokální porucha jádra s následným popraskáním vláken v horním potahu. V případě nosníků série C pak došlo také k mírné delaminaci v místě lomu tohoto horního potahu. U obou typů zakřivených sendvičových konstrukcí série A byly při záporné zkušební teplotě zaznamenány pouze smykové poruchy PET pěny bez viditelné poruchy potahů. Zakřivené konstrukce ze série B vykazovaly opět shodnou lokální poruchu jako v případě teplot +25 °C a +60 °C. Nosníky poslední testované série byly při záporné teplotě okolí nejčastěji poškozeny lokální ztrátou stability voštiny v místě příčnicku, následovanou prasknutím horního potahu nebo smykovou poruchou jádra a mírnou delaminací spodního potahu.



Obr. 6. 23: Box-plotový diagram závislosti ohybové únosnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S5 při odlišných provozních teplotách (série C)

6.2.4 Zakřivené konstrukce s jádrem o tloušťce 10 mm – vliv uložení zkušebního tělesa

Na úvod vyhodnocení vlivu uložení sendvičových nosníků byla uskutečněna shluková analýza a její výsledek je zobrazen v následujícím dendrogramu na Obr. 6. 24. Tento dendrogram byl vytvořen metodou počítání Average a pomocí metriky Euclidian. Na základě vyobrazení daného dendrogramu lze konstatovat, že podobnost výběrových souborů již tak přesně neodpovídá jednotlivým sériím, jak tomu bylo v případě zakřivených nosníků S5 (Obr. 6. 10). Je patrné, že je identifikována značná míra podobnosti mezi rovinnými nosníky série A, slabě zakřivenými nosníky série B a silně zakřivenými konvexně uloženými nosníky série A (míra podobnosti 92,5 %). Na druhou stranu míra podobnosti mezi zakřivenými nosníky série A a nosníky série B je nízká, rovna 65,6 %. Dále byla zjištěna velmi nízká míra podobnosti (pouze 43,4 %) mezi výsledky konvexně uložených zakřivených nosníků série C a zbylých typů. Dané podobnosti byly také kontrolovány pomocí box-plotových diagramů v jednotlivých sériích.

Na základě výsledků z testování normality pomocí testu Anderson-Darling lze konstatovat, že s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$ mají všechny výběrové soubory normální rozdělení. Test hypotéz o rovnosti rozptylů byl formulován následovně:

$$H_0: \sigma^2_{R/tc=0} = \sigma^2_{R/tc=40} = \sigma^2_{R/tc=-40} = \sigma^2_{R/tc=20} = \sigma^2_{R/tc=-20}$$

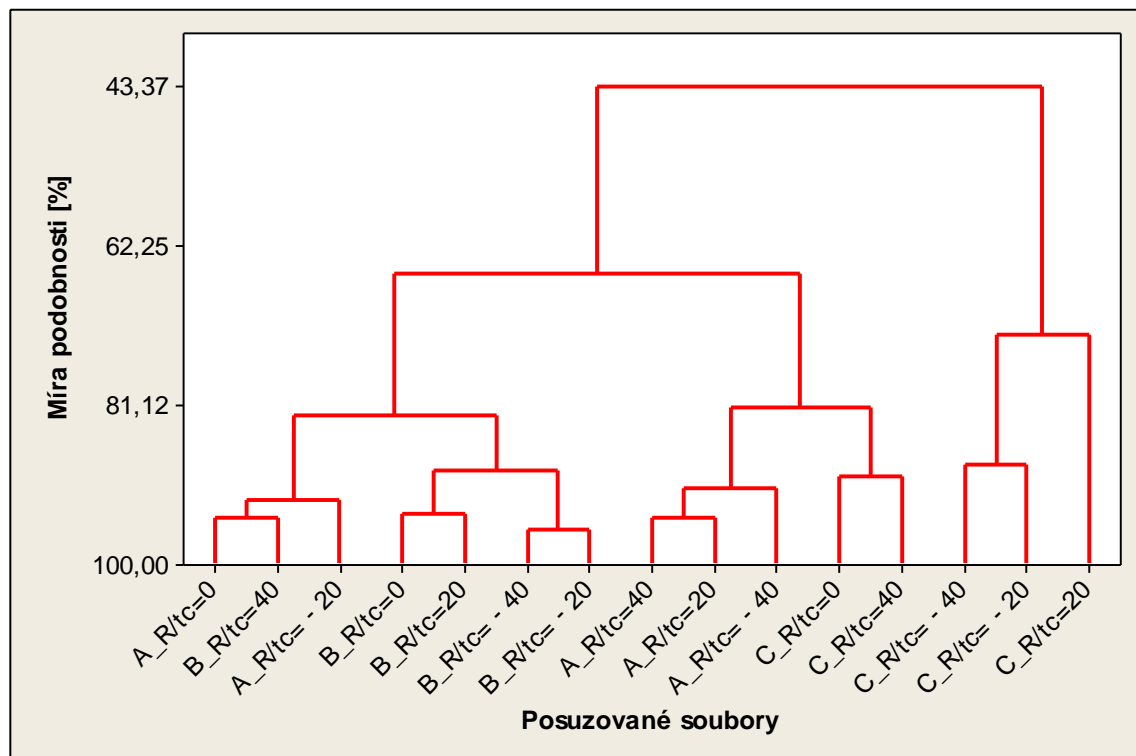
$$H_A: \text{NON}$$

Zjištěné P – hodnoty ($P_{(A)} = 0,084$; $P_{(B)} = 0,227$; $P_{(C)} = 0,034$) jsou v jednom případě nižší než 0,05 \rightarrow zamítám nulovou hypotézu H_0 ve prospěch hypotézy H_A o rovnost rozptylů s možností omylu $\alpha=5$ %. Je tedy nutné postupovat pomocí neparametrické metody Kruskal-Wallis. Test hypotéz o rovnosti mediánů byl formulován následovně:

$$H_0 : \tilde{\mu}_{R/t_c=0} = \tilde{\mu}_{R/t_c=40} = \tilde{\mu}_{R/t_c=-40} = \tilde{\mu}_{R/t_c=20} = \tilde{\mu}_{R/t_c=-20}$$

$$H_A : \text{NON}$$

Vyhodnocením byla ve všech případech zjištěna P-hodnota = 0,000 a je tedy možné s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$ tvrdit, že zakřivení sendvičové konstrukce S10 spolu s jejím uložením při testu mají statisticky významný vliv na její ohybovou únosnost.



Obr. 6. 24: Shluková analýza dat z ohybové zkoušky různě uložených zakřivených sendvičových nosníků S10

Statisticky vyhodnocená data z 3PB testu jsou pro jednotlivé série uvedena v následujících tabulkách (Tab. 6. 16, Tab. 6. 17 a Tab. 6. 18). V řadě případů výběrových souborů je velmi dobrá shoda mezi aritmetickým průměrem a hodnotou mediánu, kvalitu dat také podporuje fakt, že hodnota variačního koeficientu je ve všech případech velmi nízká. Hodnoty efektivního modulu u nosníků s PET jádrem jsou si velmi blízké, nejnižší hodnota, naměřená pro konkávně uložené nosníky s poměrem zakřivení $R/t_c=20$, je nižší o 6,5 % v porovnání s rovinnými, u slabě zakřivených nosníků v případě obou typů uložení bylo pozorováno zvýšení modulu pružnosti a to o cca 7 %. V případě ohybové únosnosti mělo zakřivení pozitivní vliv na tento parametr. Konkávně uložené, slabě zakřivené nosníky,

měly únosnost vyšší o 20,7 %, silně zakřivené pak o 18,6 %. U konvexně uložených nosníků došlo také k nárůstu ohybové únosnosti, konkrétně o 14,4 % a 5,9 %, v případě slabě, respektive silně zakřivených nosníků.

Tab. 6. 16: Ohybové vlastnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S10 s ohledem na uložení zkušební tělesa – série A

A	R/t _c = 0		R/t _c = 40		R/t _c = - 40		R/t _c = 20		R/t _c = - 20	
	E _{ef} [MPa]	F _{fmax} [N]	E _{ef} [MPa]	F _{fmax} [N]	E _{ef} [MPa]	F _{fmax} [N]	E _{ef} [MPa]	F _{fmax} [N]	E _{ef} [MPa]	F _{fmax} [N]
\bar{x}	2133	506	2245	611	2289	579	1994	600	2119	536
s	79	20	128	29	58	30	166	22	100	47
Max	2260	534	2470	658	2400	634	2160	635	2260	643
Min	2000	482	1960	564	2210	531	1540	566	1960	439
\tilde{x}	2150	508	2260	610	2280	577	2035	602	2100	534
V _x [%]	3,69	3,96	5,71	4,83	2,51	5,19	8,33	3,65	4,73	8,76

U sendvičových nosníků ze série B byl zjištěn pokles efektivního modulu pružnosti s rostoucím zakřivením. Tento pokles byl výraznější u konkávně uložených nosníků. Konkrétně byl pokles modulu u konkávně uložených nosníků roven 4,7 % pro slabě zakřivené a 16,3 % pro silně zakřivené sendvičové nosníky. U konvexně uložených byl největší pokles modulu o cca 6 % naměřen u silně zakřivených nosníků. Ohybová únosnost u sendvičových struktur série B se zakřivením nosníků spíše klesala. Značný pokles byl zaznamenán u konvexně uložených nosníků a to o 8,8 a 9,7 %. Naopak u slabě zakřivených konkávně uložených nosníků byl zjištěn cca 11 % nárůst únosnosti.

Tab. 6. 17: Ohybové vlastnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S10 s ohledem na uložení zkušební tělesa – série B

B	R/t _c = 0		R/t _c = 40		R/t _c = - 40		R/t _c = 20		R/t _c = - 20	
	E _{ef} [MPa]	F _{fmax} [N]	E _{ef} [MPa]	F _{fmax} [N]	E _{ef} [MPa]	F _{fmax} [N]	E _{ef} [MPa]	F _{fmax} [N]	E _{ef} [MPa]	F _{fmax} [N]
\bar{x}	2110	452	2010	500	2074	412	1766	453	1983	408
s	32	10	46	15	35	22	57	21	63	17
Max	2170	473	2110	530	2120	447	1830	493	2050	425
Min	2040	438	1930	479	2020	363	1650	437	1850	378
\tilde{x}	2115	450	2010	500	2070	415	1780	443	2010	416
V _x [%]	1,53	2,17	2,31	3,07	1,69	5,34	3,25	4,54	3,17	4,19

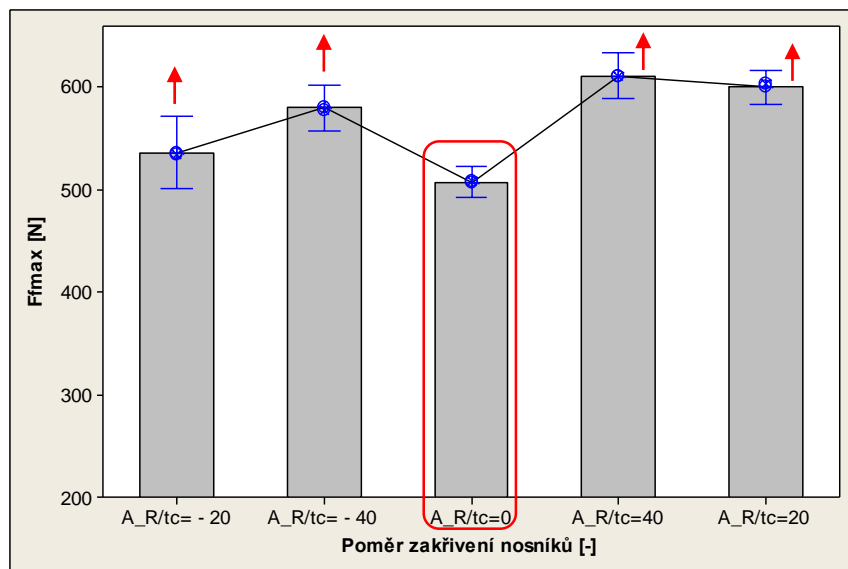
Obdobný pokles efektivního modulu pružnosti jako v případě série B byl zaznamenán také v případě nosníků série C. U slabě zakřivených nosníků obou typů uložení je změna modulu do 5 %, zatím co u silně zakřivených konkávně uložených nosníků byl zjištěn pokles o 7,2 %, u konvexně uložených až o 9,8 %. Únosnost zakřivených sendvičových konstrukcí s voštinovým jádrem byla v porovnání

s rovinnými ve všech uloženích vyšší. Nejvyšší hodnota únosnosti 892 N, tedy nárůst o 33,3 %, byla naměřena pro silně zakřivené, konkávně uložené nosníky. V případě konvexně uložených nosníků došlo k nárůstu ohybové únosnosti o 18,2 % u poměru zakřivení $R/t_c = -40$, respektive o 9,9 % u nosníků s poměrem zakřivení $R/t_c = -20$.

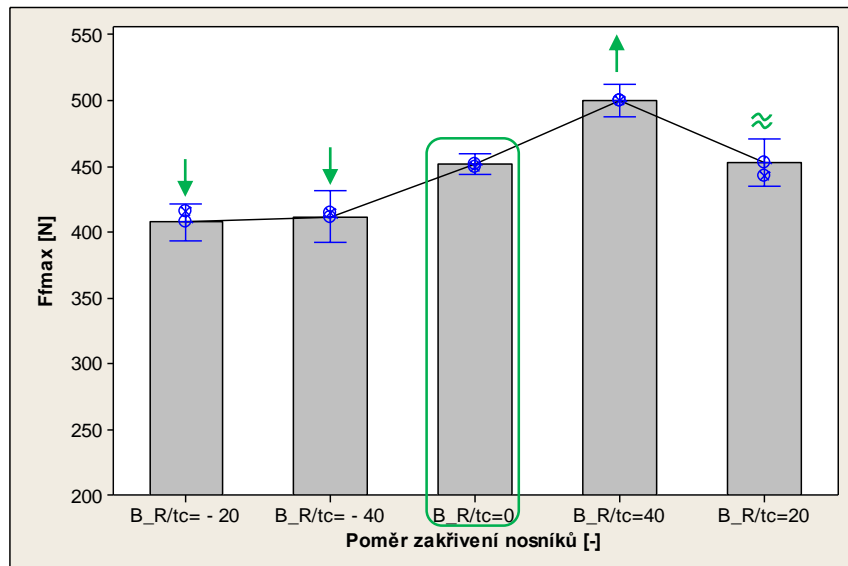
Tab. 6. 18: Ohybové vlastnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S10 s ohledem na uložení zkušební tělesa – série C

C	R/t _c = 0		R/t _c = 40		R/t _c = - 40		R/t _c = 20		R/t _c = - 20	
	E _{ef} [MPa]	F _{fmax} [N]	E _{ef} [MPa]	F _{fmax} [N]	E _{ef} [MPa]	F _{fmax} [N]	E _{ef} [MPa]	F _{fmax} [N]	E _{ef} [MPa]	F _{fmax} [N]
\bar{x}	2495	669	2503	679	2420	791	2316	892	2250	735
s	27	18	34	43	58	26	55	19	35	17
Max	2540	689	2560	755	2530	835	2390	916	2320	763
Min	2460	640	2440	638	2310	751	2210	861	2200	712
\tilde{x}	2500	673	2500	660	2420	788	2330	898	2250	730
V _x [%]	1,08	2,65	1,35	6,31	2,39	3,32	2,37	2,08	1,54	2,35

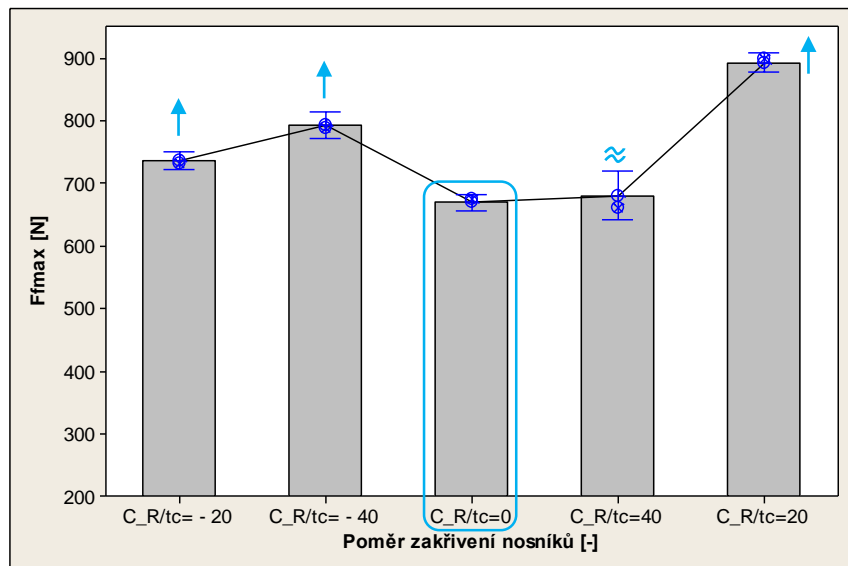
V následujících grafech (Obr. 6. 25, Obr. 6. 26 a Obr. 6. 27) jsou zobrazeny průměrné hodnoty ohybové únosnosti měřených výběrů. Zobrazené intervaly odpovídají konfidenčním intervalům pro aritmetický průměr základního souboru - μ na konfidenční úrovni $1 - \alpha = 0,95$.



Obr. 6. 25: Ohybová únosnost konstrukcí S10 – série A



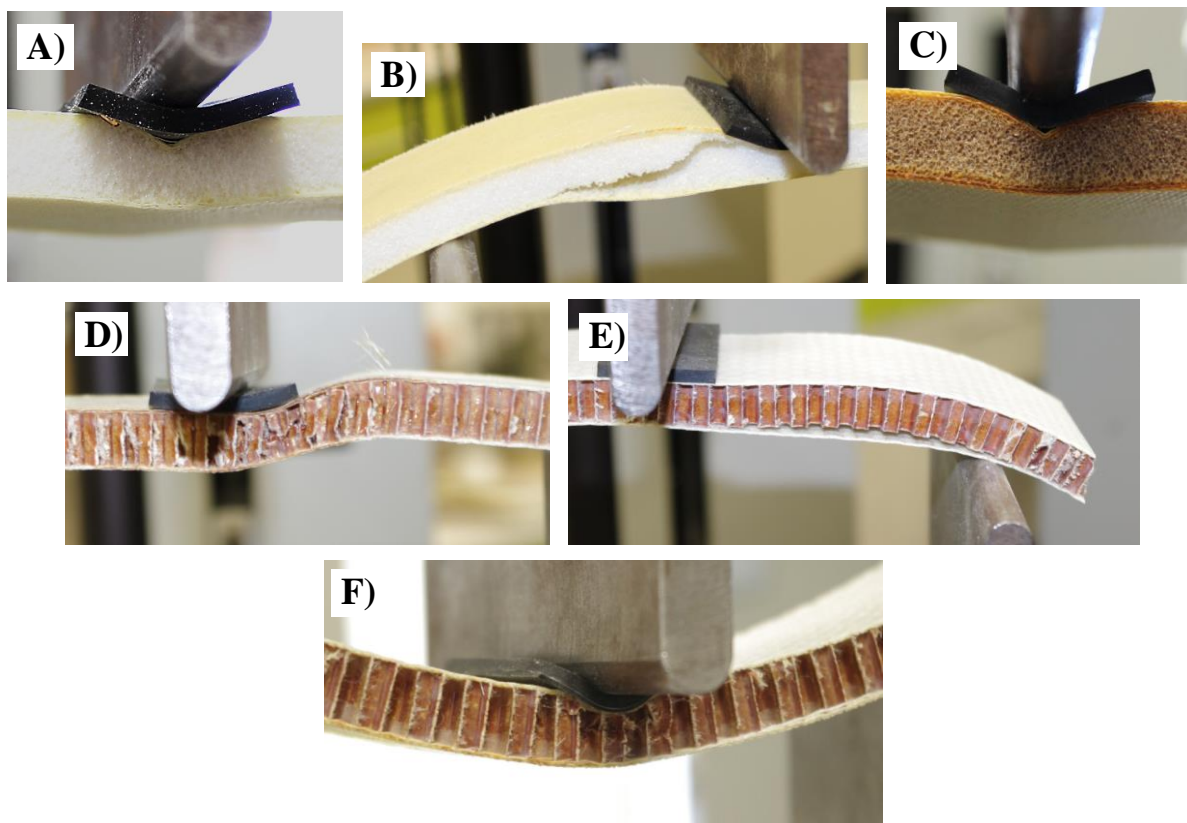
Obr. 6. 26: Ohybová únosnost konstrukcí S10 – série B



Obr. 6. 27: Ohybová únosnost konstrukcí S10 – série C

Při trojbodovém ohybu sendvičových nosníků série A docházelo k dvěma typům poruch. U slabě zakřivených nosníků, uložených konkávně, byla pozorována hlavně lokální porucha v místě příčnicku s následným popraskáním vláken v horním potahu (Obr. 6. 28 A). Naopak u silně zakřivených, stejně uložených nosníků docházelo zejména ke smykové poruše PET jádra (Obr. 6. 28 B), kdy lom se šířil od horního potahu směrem ke spodnímu, se značnou delaminací spodního potahu. U konvexně uložených nosníků této série docházelo pouze k lokální poruše. Sendvičové nosníky s PVC jádrem (S10_B) vykazovaly stále shodnou poruchu při obou typech uložení a zakřivení a to lokální ztrátu stability buněk v jádru doprovázenou popraskáním vláken v horním potahu (Obr. 6. 28 C). U nosníků poslední série C byly pozorovány rozdílné poruchy dle jejich uložení. Konkávně uložené, slabě zakřivené nosníky vykazovaly smykovou poruchu buněk voštiny (Obr. 6. 28 D). Naopak u silně zakřivených nosníků takto uložených docházelo k delaminaci

spodního potahu bez viditelné poruchy jádra (Obr. 6. 28 E). U konvexně uložených nosníků docházelo u obou typů pouze k lokální ztrátě stability buněk voštiny pod působícím příčnickem (Obr. 6. 28 F).



Obr. 6. 28: Ohybové poruchy zakřivených sendvičových konstrukcí s jádrem o tloušťce 10 mm – trojbodové uložení těles (3PB)

6.2.5 Zakřivené konstrukce s jádrem o tloušťce 10 mm – vliv typu ohybového testu

Stejně jako v případě sendvičových konstrukcí S5, testování probíhalo pouze u nosníků S10 uložených konkávně a to při 3PB a 4PB konfiguraci ohybové zkoušky.

Úvodní test normality Anderson-Darling potvrdil s $P = 1 - \alpha = 95 \%$, že všechny měřené výběrové soubory mají normální rozdělení. Následná formulace hypotéz o rovnosti rozptylů je zapsána:

$$H_0: \sigma^2_{R/tc(3PB)=0} = \sigma^2_{R/tc(3PB)=40} = \sigma^2_{R/tc(3PB)=20} = \sigma^2_{R/tc(4PB)=0} = \sigma^2_{R/tc(4PB)=40} = \sigma^2_{R/tc(4PB)=20}$$

$$H_A: \text{NON}$$

Dle zjištěných pravděpodobností ($P_{(A)} = 0,005$; $P_{(B)} = 0,003$; $P_{(C)} = 0,000$), jenž jsou ve všech případech nižší než 0,05, je zamítnuta nulová hypotéza H_0 ve prospěch hypotézy H_A o rovnosti rozptylů s možností omylu $\alpha = 5 \%$. Pro určení statistické významnosti vlivu typu ohybového testu na únosnost je třeba použít

neparametrickou metodu Kruskal-Wallis. Následně byl formulován test hypotéz o rovnosti mediánů:

$$H_0 : \tilde{\mu}_{R/tc(3PB)=0} = \tilde{\mu}_{R/tc(3PB)=40} = \tilde{\mu}_{R/tc(3PB)=20} = \tilde{\mu}_{R/tc(4PB)=0} = \tilde{\mu}_{R/tc(4PB)=40} = \tilde{\mu}_{R/tc(4PB)=20}$$

$$H_A : \text{NON}$$

Vyhodnocením pomocí dané metody byla zjištěna P-hodnota = 0,000 a je tedy možné s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$ konstatovat, že typ ohybové zkoušky spolu se zakřivením mají statisticky významný vliv na ohybovou únosnost sendvičových konstrukcí.

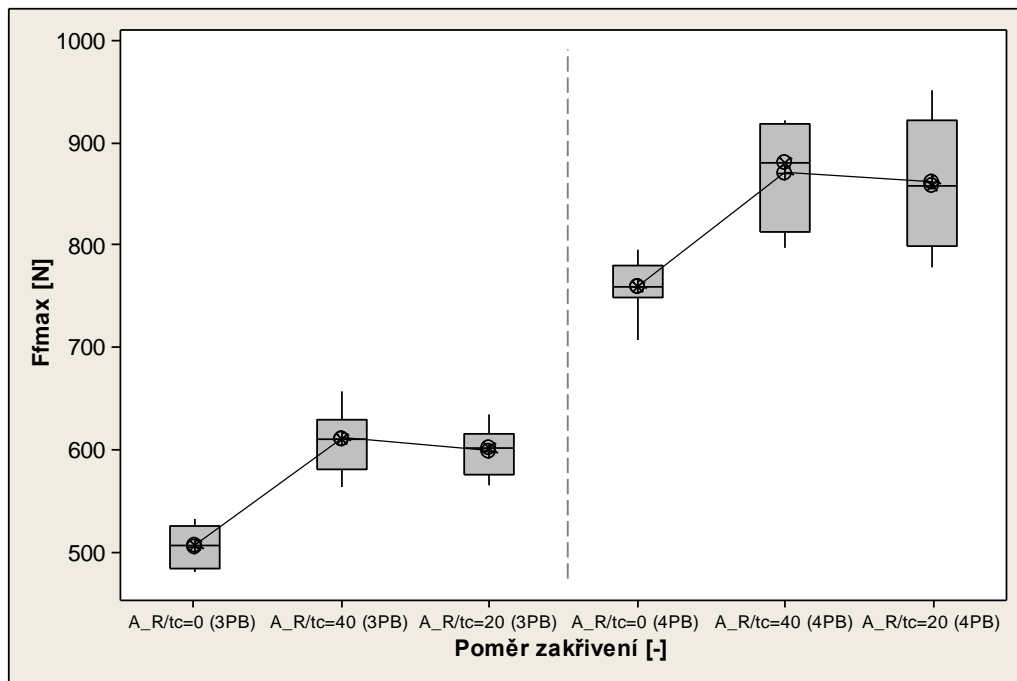
Ohybové parametry získané při čtyřbodovém testu (4PB) jsou uvedeny v Tab. 6. 19. Při porovnání efektivního modulu pružnosti z tohoto testu a při 3PB testu je zřejmé, že silně zakřivené nosníky série A vykazují nižší hodnotu modulu v porovnání s rovinnými nosníky. Konkrétně jde o 11,5 % pokles. Sendvičové nosníky série B naopak vykazují plynulý pokles modulu s rostoucím zakřivením, který je roven 4,8 % u slabě a 20,8 % u silně zakřivených nosníků. U konstrukcí série C byl naměřen největší pokles modulu o 26,7 % u silně zakřivených nosníků.

Tab. 6. 19: Ohybové vlastnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S10 s ohledem na typ ohybové zkoušky – 4PB test

			\bar{x}	s	<i>Max</i>	<i>Min</i>	\tilde{x}	V_x [%]
A	R/tc = 0	E_{ef} [MPa]	2246	62	2350	2160	2250	2,78
		F_{fmax} [N]	772	46	796	707	759	6,01
	R/tc = 40	E_{ef} [MPa]	2321	117	2530	2150	2300	5,04
		F_{fmax} [N]	869	48	921	797	880	5,56
	R/tc = 20	E_{ef} [MPa]	1986	108	2170	1770	2020	5,41
		F_{fmax} [N]	860	60	951	779	858	6,94
B	R/tc = 0	E_{ef} [MPa]	2331	64	2450	2210	2335	2,72
		F_{fmax} [N]	704	10	718	687	705	1,41
	R/tc = 40	E_{ef} [MPa]	2218	55	2330	2160	2200	2,48
		F_{fmax} [N]	762	21	789	714	769	2,73
	R/tc = 20	E_{ef} [MPa]	1845	124	2020	1570	1860	6,72
		F_{fmax} [N]	764	34	802	702	780	4,41
C	R/tc = 0	E_{ef} [MPa]	2504	57	2610	2420	2490	2,29
		F_{fmax} [N]	662	15	689	644	657	2,25
	R/tc = 40	E_{ef} [MPa]	2329	39	2410	2280	2330	1,69
		F_{fmax} [N]	853	55	901	753	879	6,49
	R/tc = 20	E_{ef} [MPa]	1786	39	1870	1740	1780	2,21
		F_{fmax} [N]	645	18	670	612	648	2,77

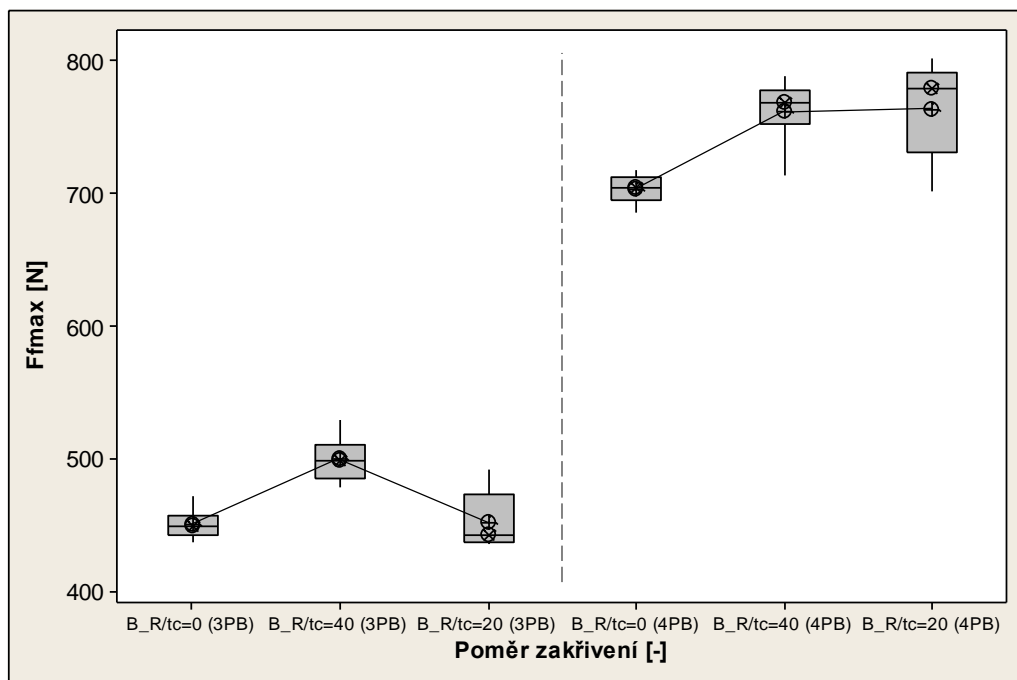
Dále uvedené box-plotové diagramy (Obr. 6. 29, Obr. 6. 30 a Obr. 6. 31) uvádí změnu ohybové únosnosti s ohledem na typ ohybové zkoušky. Z diagramů je patrné, že v případě konstrukcí s pěnovým jádrem (série A a B) byla naměřena u zakřivených nosníků vyšší únosnost. Zakřivené nosníky série A vykazují při 4PB testu vyšší únosnost než nosníky rovinné, avšak jak je z diagramu patrné, data

mají velký rozptyl hodnot (velké IQR). Konkrétně došlo vlivem zakřivení k nárůstu únosnosti o cca 12 % u obou hodnot zakřivení.



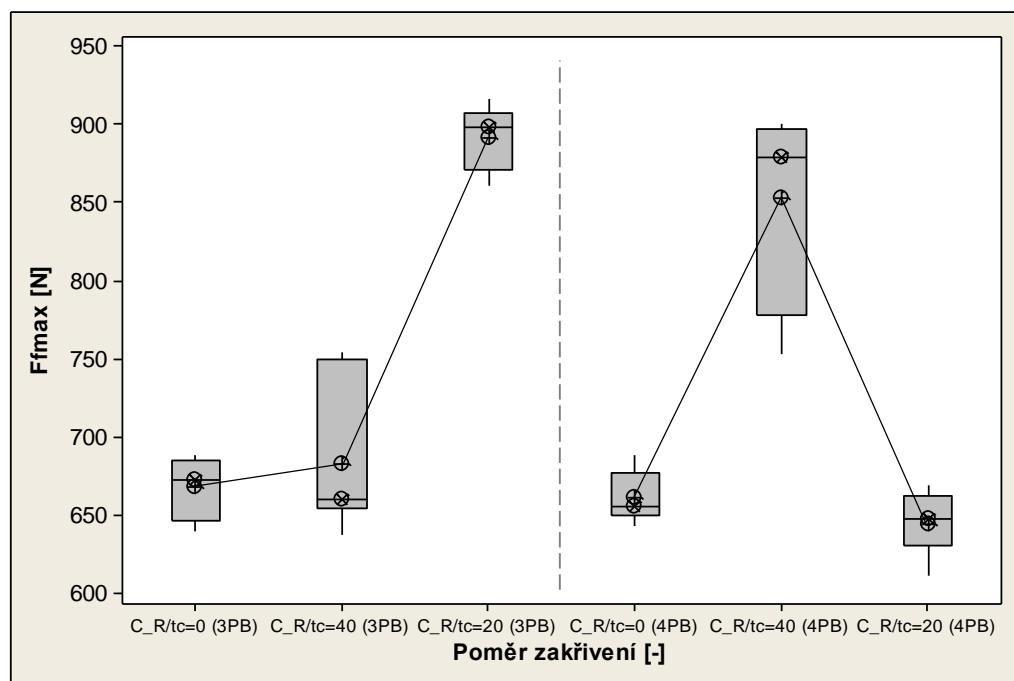
Obr. 6. 29: Box-plotový diagram závislosti ohybové únosnosti konstrukcí S10 na typu ohybové zkoušky – série A

Ohybová únosnost nosníků série B ve čtyřbodovém ohybu vlivem zakřivení mírně vzrostla (Obr. 6. 30). Tento nárůst byl roven více jak 8 % pro slabě i silně zakřivené nosníky. U silně zakřivených nosníků je z diagramu zřejmá vysoká hodnota IQR.



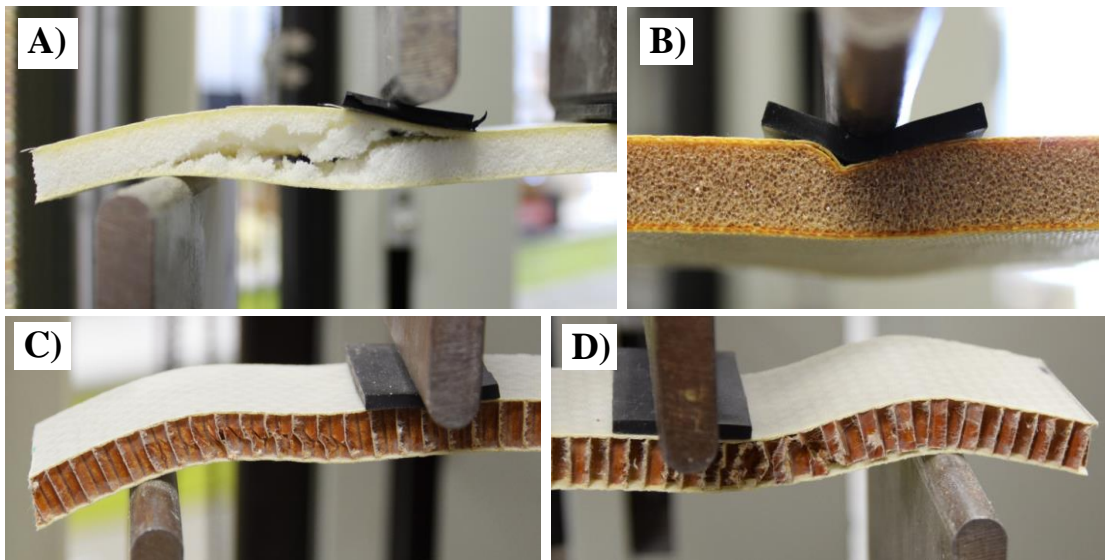
Obr. 6. 30: Box-plotový diagram závislosti ohybové únosnosti konstrukcí S10 na typu ohybové zkoušky – série B

Popis ohybové únosnosti v případě sendvičových konstrukcí ze série C je komplikovanější, než v předchozích případech (Obr. 6. 31). U nosníků s poměrem zakřivení $R/t_c = 40$ jsou v diagramu viditelné velká interkvartilová rozpětí, kdy i hodnoty aritmetických průměrů a mediánů jsou od sebe značně vzdáleny. I přes tento fakt je možné odečíst nárůst únosnosti těchto nosníků při 4PB o 28,8 %. V případě silně zakřivených nosníků došlo naopak k nepatrnému poklesu únosnosti v porovnání s rovinnými. Pokud je však daný pokles srovnán s mírně zakřivenými nosníky, jde o velmi zásadní snížení únosnosti.



Obr. 6. 31: Box-plotový diagram závislosti ohybové únosnosti konstrukcí S10 na typu ohybové zkoušky – série C

Ohybovou poruchou, která byla pozorována v případě obou typů zakřivených nosníků série A ve čtyřbodovém ohybu byla smyková porucha jádra vedoucí ke značné delaminaci spodního potahu (Obr. 6. 32 A). V případě nosníků série B nedošlo k žádné změně a opět hlavním a jediným typem poškození pozorovaného u těchto nosníků byla lokální ztráta stability v místech pod příčnickými s částečnou delaminací horního potahu v daném místě (Obr. 6. 32 B). U zakřivených nosníků s voštinovým jádrem (série C) byla u obou typů pozorována pouze smyková porucha buněk jádra (Obr. 6. 32 C), někdy také s částečnou delaminací v tomto místě, které se nacházelo mezi působícím příčnickem a podpěrou (Obr. 6. 32 D).



Obr. 6. 32: Ohybové poruchy zakřivených sendvičových konstrukcí s jádrem o tloušťce 10 mm – čtyřbodové uložení těles (4PB)

6.2.6 Zakřivené konstrukce s jádrem o tloušťce 10 mm – vliv okolní teploty prostředí

Naměřená data byla podrobena shlukové analýze, avšak získaný dendrogram nerozeznal díky značné podobnosti některých vzájemně neporovnatelných dat jednotlivé série sendvičových konstrukcí. Z tohoto důvodu není v práci daný dendrogram uveden.

Výběrové soubory, získané z měření, byly podrobeny testu normality Anderson-Darling, kdy na základě výsledku se s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$ potvrdilo, že naměřená data mají normální rozdělení.

Statistická významnost vlivu teploty současně s vlivem zakřivení sendvičových struktur na jejich ohybovou únosnost byla ověřena pomocí testů hypotéz. V prvním kroku byla data podrobena testu hypotéz o rovnosti rozptylů s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$ s následující formulací:

$$H_0: \sigma^2_{R/tc=0_{+25^{\circ}C(+60^{\circ}C,-20^{\circ}C)}} = \sigma^2_{R/tc=40_{+25^{\circ}C(+60^{\circ}C,-20^{\circ}C)}} = \sigma^2_{R/tc=20_{+25^{\circ}C(+60^{\circ}C,-20^{\circ}C)}}$$

$$H_A: NON$$

Dle výsledků z testování hypotéz, jelikož byla v jednom případě zjištěna P-hodnota ($P_{(A)} = 0,571$; $P_{(B)} = 0,086$; $P_{(C)} = 0,020$) nižší než 0,05 \rightarrow zamítám nulovou hypotézu H_0 ve prospěch hypotézy H_A o rovnost rozptylů s možností omylu $\alpha = 5\%$. Následně byla použita neparametrická metoda Kruskal-Wallis a formulován test hypotéz o rovnosti mediánů:

$$H_0: \tilde{\mu}_{R/tc=0_{+25^{\circ}C(+60^{\circ}C,-20^{\circ}C)}} = \tilde{\mu}_{R/tc=40_{+25^{\circ}C(+60^{\circ}C,-20^{\circ}C)}} = \tilde{\mu}_{R/tc=20_{+25^{\circ}C(+60^{\circ}C,-20^{\circ}C)}}$$

$$H_A: NON$$

Vyhodnocením byla zjištěna P-hodnota = 0,000 a je tedy možné s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$ tvrdit, že teplota spolu se zakřivením mají statisticky významný vliv na ohybovou únosnost testovaných sendvičových konstrukcí S10.

Statistické vyhodnocení naměřených dat získaných při měření za teploty +60 °C je uvedeno v Tab. 6. 20. Hodnoty efektivního modulu pružnosti (E_{ef}), uvedené v dané tabulce, jsou ve všech případech nižší, než hodnoty získané za pokojové teploty. V případě struktur série A (jádro PET pěna) došlo vlivem zakřivení k poklesu modulu o 14,5 % u slabě, respektive o téměř 17,5 % u silně zakřivených sendvičových nosníků. Stejný trend poklesu byl zjištěn také u struktur s PVC jádrem (série B). Konkrétně pokles o 7,6 % a 18,6 % pro slabě a silně zakřivené sendvičové konstrukce. I přesto, že konstrukce série C obsahují nomenoxovou voštinu, i u nich došlo pod vlivem zvýšené teploty k poklesu parametru E_{ef} , avšak tento pokles byl nejnižší z testovaných struktur. U slabě zakřivených nosníků došlo k poklesu modulu o pouhé 2 %, u silně zakřiveného pak o 11,4 %.

Tab. 6. 20: Ohybové vlastnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S10 při zvýšené teplotě prostředí

			\bar{x}	s	<i>Max</i>	<i>Min</i>	\bar{x}	V_x [%]	
+60 °C	A	R/t _c = 0	E_{ef} [MPa]	1792	15	1820	1770	1790	0,82
			F_{fmax} [N]	394	14	420	378	393	3,55
		R/t _c = 40	E_{ef} [MPa]	1531	113	1700	1350	1520	7,35
			F_{fmax} [N]	403	28	428	341	415	7,02
		R/t _c = 20	E_{ef} [MPa]	1481	106	1650	1330	1495	7,17
			F_{fmax} [N]	446	25	496	406	443	5,59
	B	R/t _c = 0	E_{ef} [MPa]	1687	51	1750	1560	1700	3,02
			F_{fmax} [N]	346	9	353	329	349	2,49
		R/t _c = 40	E_{ef} [MPa]	1558	53	1670	1500	1550	3,39
			F_{fmax} [N]	352	12	372	327	351	3,49
		R/t _c = 20	E_{ef} [MPa]	1372	38	1430	1310	1370	2,79
			F_{fmax} [N]	367	16	388	339	373	4,46
C	R/t _c = 0	E_{ef} [MPa]	2243	39	2310	2190	2240	1,75	
		F_{fmax} [N]	612	23	648	571	609	3,72	
	R/t _c = 40	E_{ef} [MPa]	2178	43	2250	2110	2190	1,96	
		F_{fmax} [N]	625	25	686	600	617	4,05	
	R/t _c = 20	E_{ef} [MPa]	1762	63	1860	1680	1760	3,59	
		F_{fmax} [N]	763	43	822	687	768	5,63	

Ohybové chování připravených sendvičových konstrukcí S10 za záporné teploty okolí je uvedeno v Tab. 6. 21. Jak je z této tabulky zřejmé, čím více je sendvičový nosník zakřiven, tím nižší modul byl u něj naměřen. Hodnoty modulů však mají vyšší hodnoty než ty, získané při měření za pokojové teploty. Nejnižší pokles efektivního modulu pružnosti při záporné teplotě byl naměřen pro struktury ze série A (jádro PET pěna). Modul poklesl u silně zakřivených nosníků pouze o 3,4 % v porovnání s rovinnými. Pokles modulu pružnosti u sendvičových struktur

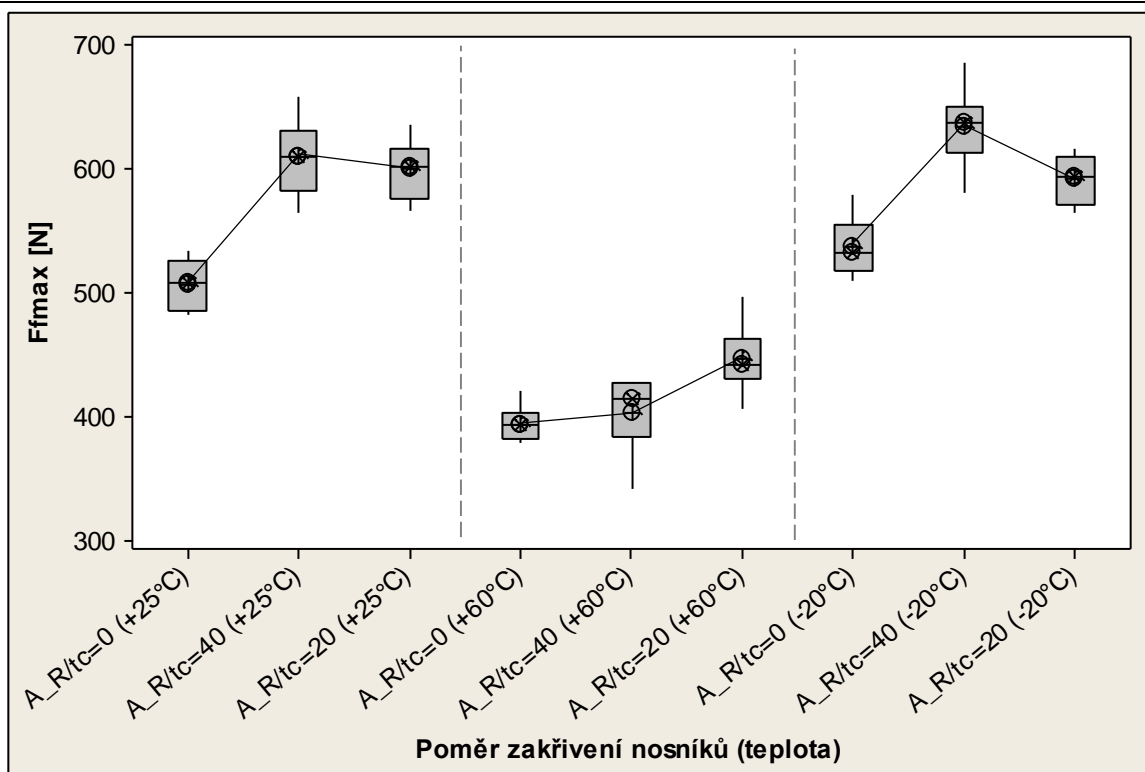
ze sérií B a C (PVC jádro a voština) byl u silně zakřivených nosníků přibližně shodný a činil cca 18 %.

Tab. 6. 21: Ohybové vlastnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S10 při záporné teplotě prostředí

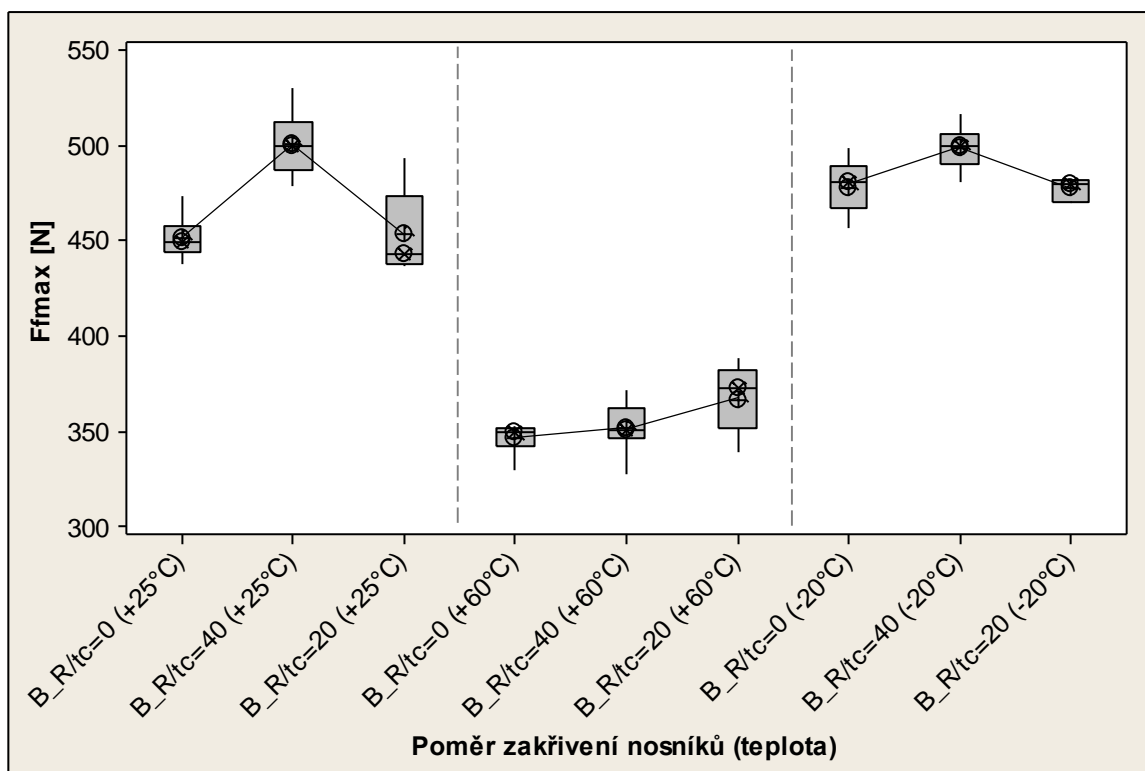
			\bar{x}	s	<i>Max</i>	<i>Min</i>	\tilde{x}	V_x [%]	
-20 °C	A	R/t _c = 0	E _{ef} [MPa]	2170	39	2220	2110	2175	1,80
			F _{fmax} [N]	537	22	579	510	533	4,15
		R/t _c = 40	E _{ef} [MPa]	2337	79	2470	2180	2340	3,39
			F _{fmax} [N]	635	28	686	581	637	4,44
		R/t _c = 20	E _{ef} [MPa]	2097	112	2270	1900	2140	5,33
			F _{fmax} [N]	592	19	617	564	595	3,18
	B	R/t _c = 0	E _{ef} [MPa]	2194	97	2330	1990	2200	4,43
			F _{fmax} [N]	478	13	498	456	481	2,74
		R/t _c = 40	E _{ef} [MPa]	2147	127	2310	1840	2150	5,90
			F _{fmax} [N]	488	22	506	481	495	4,47
		R/t _c = 20	E _{ef} [MPa]	1816	50	1910	1760	1820	2,74
			F _{fmax} [N]	473	13	482	470	478	2,68
C	R/t _c = 0	E _{ef} [MPa]	2666	89	2750	2510	2700	3,32	
		F _{fmax} [N]	691	16	709	657	693	2,36	
	R/t _c = 40	E _{ef} [MPa]	2655	36	2700	2610	2655	1,37	
		F _{fmax} [N]	976	10	993	965	973	1,06	
	R/t _c = 20	E _{ef} [MPa]	2183	40	2250	2150	2165	1,81	
		F _{fmax} [N]	880	20	914	865	870	2,27	

Naměřené hodnoty pro ohybovou únosnost jsou prezentovány pomocí následujících box-plotových diagramů (Obr. 6. 33, Obr. 6. 34 a Obr. 6. 35). Hodnoty únosnosti sendvičových konstrukcí s PET jádrem (série A) vlivem zvýšené teploty poklesly, avšak jak je patrné, že zakřivení mělo pozitivní vliv na únosnost a zakřivené nosníky vykazovaly její zvýšení (Obr. 6. 33). Konkrétně došlo ke zvýšení únosnosti o 14 % v porovnání s únosností rovinných nosníků. Za snížené teploty je v diagramu zřejmý shodný trend v únosnosti jako za teploty pokojové. Hodnoty tohoto parametru jsou však vyšší než za teploty +25 °C. Slabě zakřivené nosníky měly únosnost o 18,3 % vyšší, silně zakřivené pak vlivem poklesu pouze o 10,2 %.

U sendvičových konstrukcí série B (PVC jádro) bylo za zvýšené teploty pozorováno obdobné chování jako u struktur s PET jádrem. U silně zakřivených nosníků došlo vlivem tvaru k mírnému zvýšení únosnosti o 6 % v porovnání s rovinnými nosníky. Při teplotě -20 °C byl naměřen pouze minimální vliv zakřivení na ohybovou únosnost.

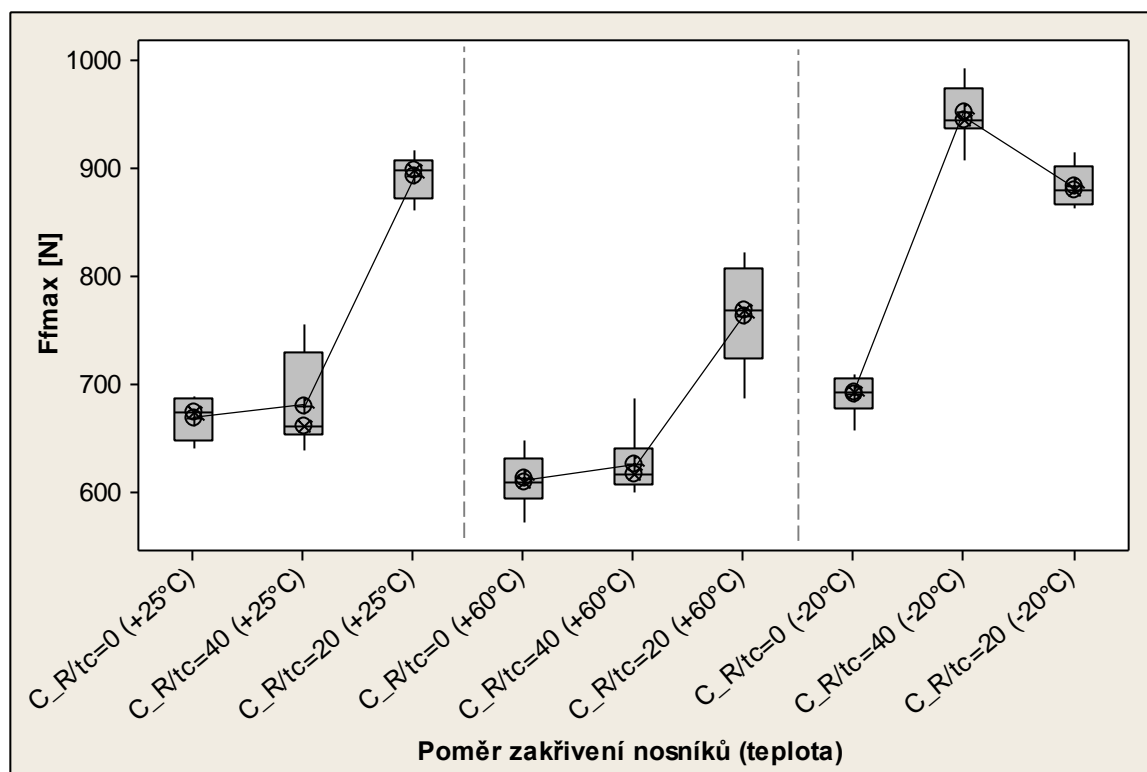


Obr. 6. 33: Box-plotový diagram závislosti ohybové únosnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S10 při odlišných provozních teplotách (série A)



Obr. 6. 34: Box-plotový diagram závislosti ohybové únosnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S10 při odlišných provozních teplotách (série B)

U sendvičových nosníků s voštinovým jádrem (Obr. 6. 35) bylo zjištěno nejvýraznější zvýšení únosnosti u silně zakřivených nosníků ze všech sérií při $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ a to konkrétně o 24,7 %. Slabě zakřivené struktury nevykazovaly výrazné zvýšení únosnosti v porovnání s rovinnými. Stejně pak za snížené teploty ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) bylo naměřeno značné zvýšení únosnosti u slabě zakřivených nosníků (o více než 40 %), mírnější zvýšení shodného parametru o 27,4 % byl zjištěno také u nosníků s poměrem zakřivení $R/t_c=20$.



Obr. 6. 35: Box-plotový diagram závislosti ohybové únosnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S10 při odlišných provozních teplotách (série C)

Hlavní ohybová porucha, která byla pozorována během měření sendvičových konstrukcí S10 série A u slabě i silně zakřivených nosníků při $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$, byla lokální porucha PET pěnového jádra v místě příčnicku. Zcela shodná porucha byla charakteristická i pro struktury s PVC jádrem (série B). Naopak u nosníků série C (voštinové jádro) byly za zvýšené teploty pozorovány smykové poruchy, ale také poruchy lokální v poměru cca 50:50. Při záporné teplotě okolí vykazovaly slabě zakřivené nosníky s PET jádrem ve všech případech smykovou poruchu pěny vedoucí k následné delaminaci spodního potahu. U silně zakřivených nosníků shodné série pak byla zaznamenána pouze lokální porucha v místě příčnicku. Tuto poruchu pak opět vykazovaly oba typy zakřivených nosníků série B (s PVC pěnou). U konstrukcí s voštinovým jádrem byly za teploty $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ pozorovány zcela shodné poruchy jako při teplotě zvýšené.

6.2.7 Zakřivené konstrukce s jádrem o tloušťce 20 mm – vliv uložení zkušebního tělesa

Jak bylo uvedeno dříve, jádro této tloušťky bylo použito pouze v případě konstrukcí série A. Jednotlivé výběrové soubory byly otestovány testem Anderson-Darling a s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$ lze konstatovat, že naměřená data mají normální rozdělení. Statistická významnost vlivu zakřivení a uložení nosníků na jejich ohybovou únosnost byla otestována pomocí testu hypotéz s následující formulací:

$$H_0: \sigma^2_{R/t_c = 0} = \sigma^2_{R/t_c = 20} = \sigma^2_{R/t_c = -20} = \sigma^2_{R/t_c = 10} = \sigma^2_{R/t_c = -10}$$

$$H_A: \text{NON}$$

Určená P-hodnota je rovna 0,000 (tedy nižší než 0,05) \rightarrow zamítám nulovou hypotézu H_0 ve prospěch hypotézy H_A o rovnost rozptylů s možností omylu $\alpha = 5 \%$. Na základě tohoto výsledku je třeba pro určení statistické významnosti vlivu zakřivení a uložení nosníků na jejich únosnost využít neparametrické metody Kruskal-Wallis.

Test hypotéz o rovnosti mediánů byl formulován následovně:

$$H_0: \tilde{\mu}_{R/t_c=0} = \tilde{\mu}_{R/t_c=20} = \tilde{\mu}_{R/t_c=-20} = \tilde{\mu}_{R/t_c=10} = \tilde{\mu}_{R/t_c=-10}$$

$$H_A: \text{NON}$$

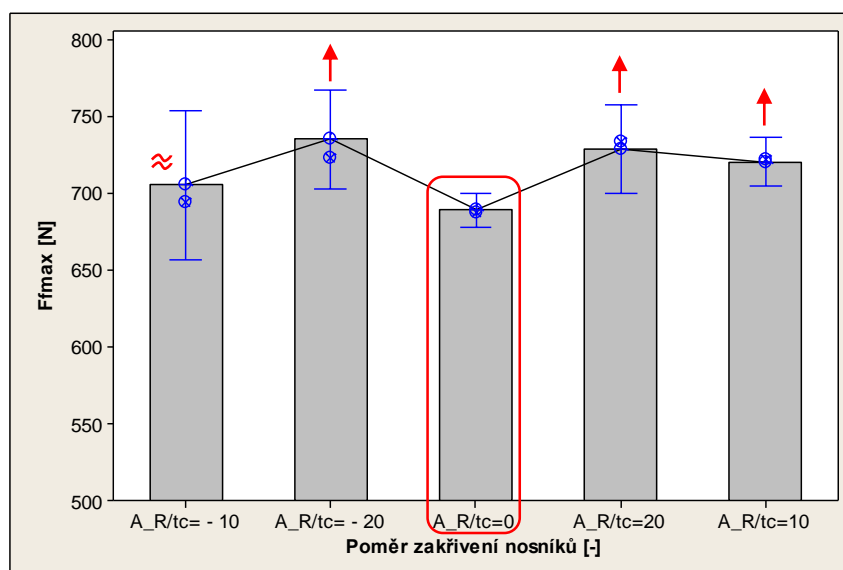
Vyhodnocením byla zjištěna P-hodnota = 0,039 a je tedy možné s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$ tvrdit, že zakřivení nosníků spolu s jejich uložení mají statisticky významný vliv na jejich ohybovou únosnost.

Statistické vyhodnocení naměřených dat je uvedeno v tabulce níže (Tab. 6. 22). U konstrukcí uložených konkávně (kladné poměry R/t_c) dochází s rostoucím poměrem k poklesu efektivního modulu v porovnání s konstrukcí rovinnou ($R/t_c = 0$). Vlivem zakřivení došlo k výraznějším poklesu tohoto parametru o cca 5 % u slabě zakřivených, respektive o 22 % v případě silně zakřivených konkávně uložených nosníků. U konvexně uložených nosníků byl naměřen výraznější pokles efektivního modulu pouze u silně zakřivených nosníků. Tento pokles byl však roven pouze cca 6 %. Z této tabulky je také patrné, že u všech naměřených hodnot je vysoká shoda mezi hodnotami aritmetických průměrů a mediánů.

Tab. 6. 22: Ohybové vlastnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S20 s ohledem na uložení zkušební tělesa – série A

A	R/t _c = 0		R/t _c = 20		R/t _c = - 20		R/t _c = 10		R/t _c = - 10	
	E _{ef} [MPa]	F _{fmax} [N]	E _{ef} [MPa]	F _{fmax} [N]	E _{ef} [MPa]	F _{fmax} [N]	E _{ef} [MPa]	F _{fmax} [N]	E _{ef} [MPa]	F _{fmax} [N]
\bar{x}	602	689	573	729	610	735	469	720	565	705
s	17	15	23	38	21	43	23	21	24	64
Max	643	716	604	800	654	824	497	759	594	793
Min	581	661	539	660	579	678	422	689	517	580
\tilde{x}	598	687	572	733	608	723	478	722	572	694
V _x [%]	2,75	2,15	3,97	5,26	3,50	5,88	4,81	2,94	4,32	9,14

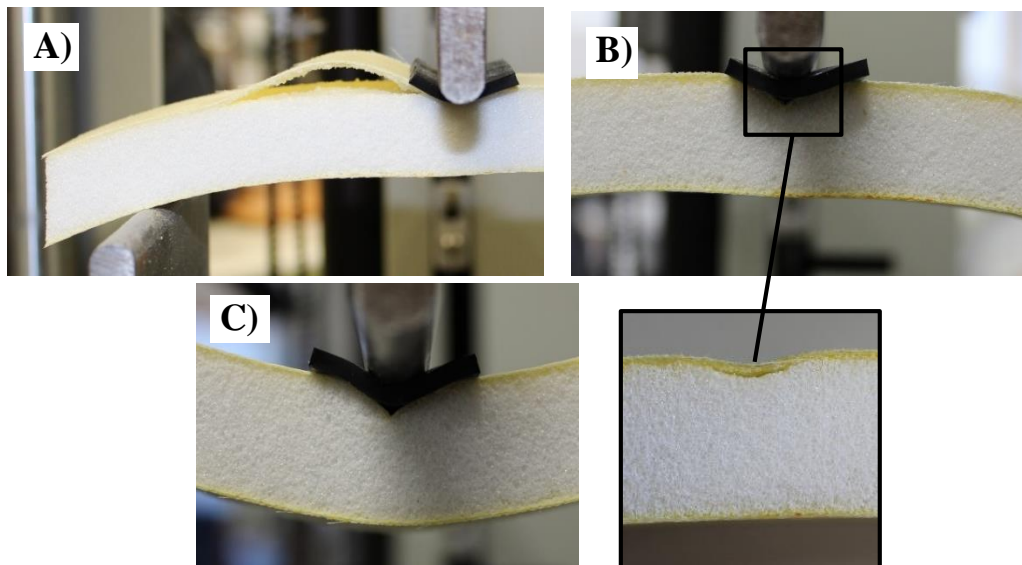
V následujícím grafu (Obr. 6. 36) jsou vyobrazeny průměrné hodnoty ohybové únosnosti měřených výběrů. Zobrazené intervaly odpovídají konfidenčním intervalům pro μ na konfidenční úrovni $1 - \alpha = 0,95$. Ohybová únosnost těchto konstrukcí ze série A v případě slabě zakřivených konvexně i konkávně uložených nosníků nepatrně vzrostla (o cca 6 %) v porovnání s rovinnými, u silně zakřivených nosníků byl zjištěn opět pouze mírný nárůst o 5 % v případě konkávně uložených nosníků. Konkávně uložené nosníky vykazovaly téměř shodnou únosnost jako nosníky rovinné, avšak jak je patrné z grafu, mají široký konfidenční interval, nelze tedy učinit jednoznačné stanovisko ohledně únosnosti.



Obr. 6. 36: Ohybová únosnost konstrukcí S20 – série A

Mezi specifické poruchy, které byly zaznamenány v průběhu měření nosníků série A při trojbodovém ohybu, patřily u konkávně uložených těles smyková porucha jádra vyvolaná delaminací na rozhraní potah - jádro, částečná či úplná separace potahu od jádra (Obr. 6. 37 A) a nejčastěji pak lokální porucha potahu pod příčnickem s následnou deformací jádra a to při obou poměrech zakřivení. Po odlehčení tělesa je pak pozorovatelná separace v místě, kde působil příčnick

(Obr. 6. 37 B). V případě konvexního uložení byla ve všech případech pozorována pouze lokální porucha potahu pod příčnickem (Obr. 6. 37 C).



Obr. 6. 37: Ohybové poruchy zakřivených sendvičových konstrukcí s jádrem o tloušťce 20 mm – trojbodová zkouška (3PB)

6.2.8 Zakřivené konstrukce s jádrem o tloušťce 20 mm – vliv typu ohybového testu

V prvním kroku byly výběrové soubory opět otestovány testem normality Anderson-Darling. Na základě výsledků lze s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$ konstatovat, že naměřená data mají normální rozdělení. Test hypotéz o rovnosti rozptylů byl formulován následně:

$$H_0: \sigma^2_{R/tc(3PB)=0} = \sigma^2_{R/tc(3PB)=20} = \sigma^2_{R/tc(3PB)=10} = \sigma^2_{R/tc(4PB)=0} = \sigma^2_{R/tc(4PB)=20} = \sigma^2_{R/tc(4PB)=10}$$

$$H_A: \text{NON}$$

Identifikovaná P-hodnota byla rovna 0,000 (nižší tedy než 0,05) → zamítám nulovou hypotézu H_0 ve prospěch hypotézy H_A o rovnost rozptylů s možností omylu $\alpha=5\%$. Pro určení statistické významnosti vlivu typu ohybového testu na únosnost byla použita neparametrická metoda Kruskal-Wallis. Test hypotéz o rovnosti mediánů byl formulován následovně:

$$H_0: \tilde{\mu}_{R/tc(3PB)=0} = \tilde{\mu}_{R/tc(3PB)=20} = \tilde{\mu}_{R/tc(3PB)=10} = \tilde{\mu}_{R/tc(4PB)=0} = \tilde{\mu}_{R/tc(4PB)=20} = \tilde{\mu}_{R/tc(4PB)=10}$$

$$H_A: \text{NON}$$

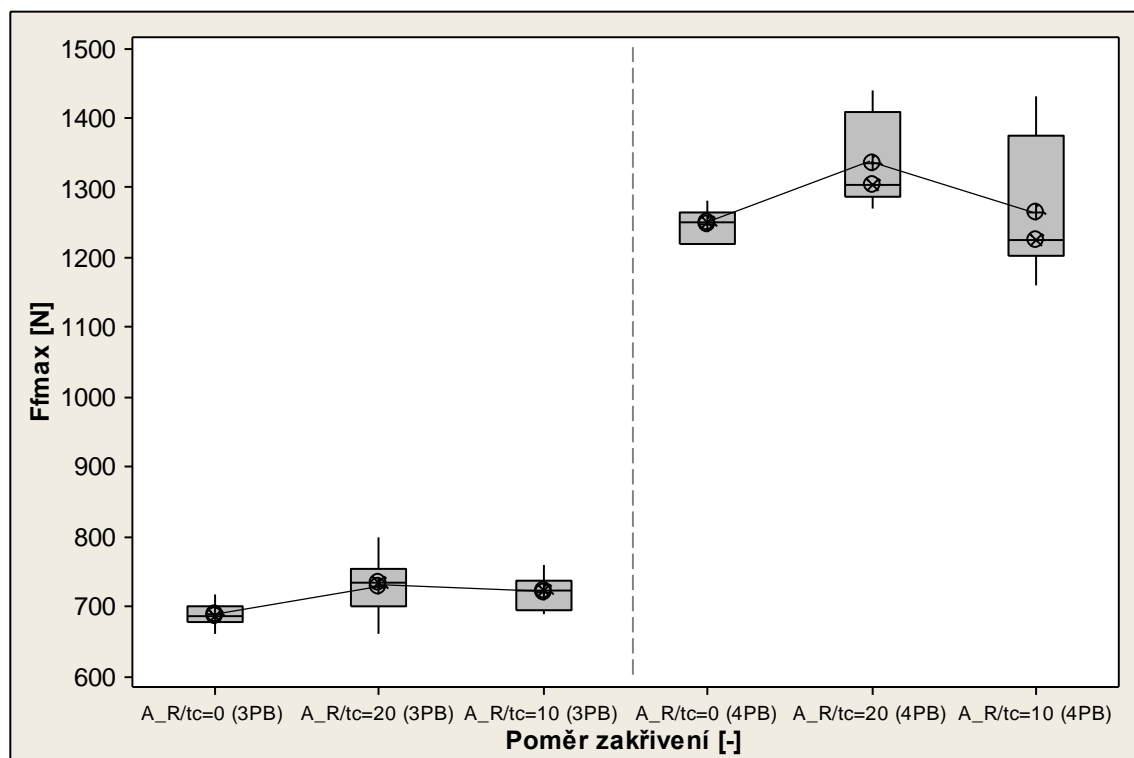
Testováním byla zjištěna P-hodnota = 0,000 a je tedy možné s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$ konstatovat, že typ ohybového testu má statisticky významný vliv na ohybovou únosnost zakřivených sendvičových konstrukcí.

Následně Tab. 6. 23 uvádí vyhodnocená data měřených parametrů. Efektivní modul pružnosti u zakřivených nosníků při 4PB klesá s rostoucím zakřivením obdobně jako při ohybu trojbodovém. Výrazný pokles modulu pružnosti o 21 % byl naměřen u silně zakřivených nosníků ($R/t_c = 10$).

Tab. 6. 23: Ohybové vlastnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S20 s ohledem na typ ohybové zkoušky – 4PB

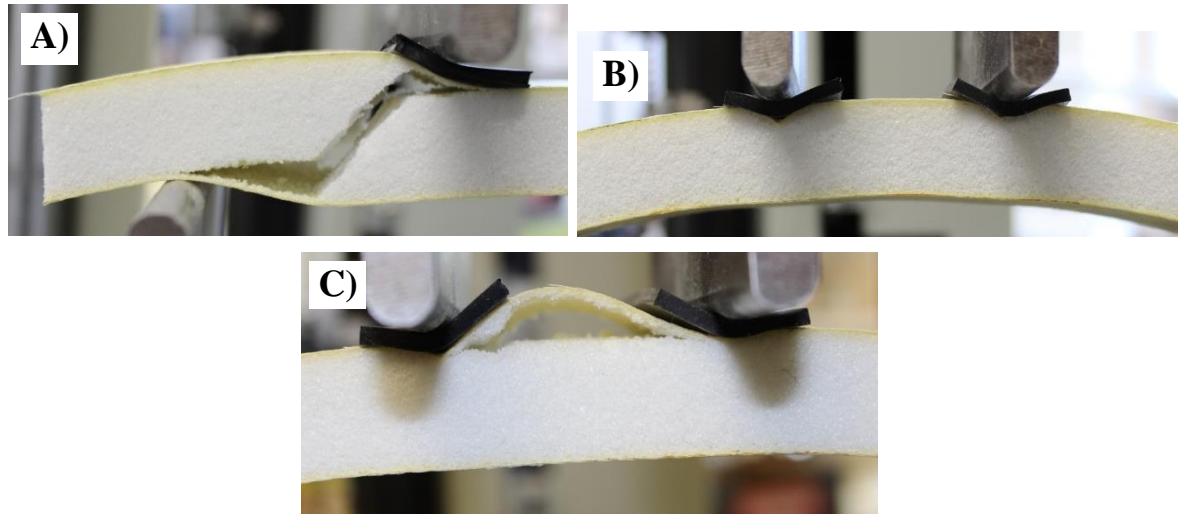
		\bar{x}	s	Max	Min	\tilde{x}	V_x [%]	
A	R/t_c = 0	E_{ef} [MPa]	613	28	648	568	627	4,60
		F_{fmax} [N]	1269	57	1280	1220	1250	4,51
	R/t_c = 20	E_{ef} [MPa]	599	17	634	579	597	2,79
		F_{fmax} [N]	1335	61	1440	1270	1305	4,53
	R/t_c = 10	E_{ef} [MPa]	478	13	496	448	480	2,73
		F_{fmax} [N]	1264	91	1430	1160	1225	7,18

Diagram na Obr. 6. 38 zobrazuje ohybovou únosnost zakřivených sendvičových konstrukcí S20 s ohledem na typ ohybového testu. Jak je patrné, únosnost nosníků při 4PB je téměř dvojnásobná v porovnání s hodnotami získanými při trojbodové zkoušce. Zakřivené konstrukce vykazovaly ve všech případech nárůst parametru, kdy vyšších hodnot bylo dosaženo u slabě zakřivených nosníků. Zakřivené nosníky měřené při 4PB mají více než dvojnásobný rozptyl hodnot v porovnání s ostatními výběry. Mírný nárůst ohybové únosnosti o 5,2 % při 4PB byl naměřen u slabě zakřivených nosníků ($R/t_c = 10$).



Obr. 6. 38: Box-plotový diagram závislosti ohybové únosnosti konstrukcí S20 na typu ohybové zkoušky – série A

V případě čtyřbodového uložení docházelo k obdobným poruchám jako při 3PB (Obr. 6. 39 A, B), pouze k separaci docházelo mezi působícími příčníky (Obr. 6. 39 C). Při smykové poruše byl dobře patrný lom pod úhlem téměř 45°.



Obr. 6. 39: Ohybové poruchy zakřivených sendvičových konstrukcí s jádrem o tloušťce 20 mm – čtyřbodová zkouška (4PB)

6.2.9 Zakřivené konstrukce s jádrem o tloušťce 20 mm – vliv okolní teploty prostředí

Naměřené hodnoty byly podrobeny testu normality Anderson-Darling a na základě výsledků lze konstatovat, že s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$ mají naměřená data normální rozdělení.

Statistická významnost vlivu teploty spolu se zakřivením na ohybovou únosnost nosníků byla testována pomocí hypotéz. V první fázi byla položena hypotéza o rovnosti rozptylů (s $P = 1 - \alpha = 0,95$) s následující formulací:

$$H_0: \sigma_{R/TC=0_{+25^{\circ}C(+60^{\circ}C,-20^{\circ}C)}^2 = \sigma_{R/TC=20_{+25^{\circ}C(+60^{\circ}C,-20^{\circ}C)}^2 = \sigma_{R/TC=10_{+25^{\circ}C(+60^{\circ}C,-20^{\circ}C)}^2$$

$$H_A: \text{NON}$$

Hodnota pravděpodobnosti zjištěná testováním hypotéz o rovnosti rozptylů byla rovna 0,109, což je vyšší než 0,05 \rightarrow nezamítám nulovou hypotézu H_0 ve prospěch hypotézy H_A o rovnost rozptylů s možností omylu $\alpha = 5\%$. Na základě tohoto výsledku byla pro další testování hypotéze použita jednocestná metodika ANOVA. Test hypotéz o rovnosti aritmetických průměrů byl formulován:

$$H_0: \mu_{R/TC=0_{+25^{\circ}C(+60^{\circ}C,-20^{\circ}C)} = \mu_{R/TC=20_{+25^{\circ}C(+60^{\circ}C,-20^{\circ}C)} = \mu_{R/TC=10_{+25^{\circ}C(+60^{\circ}C,-20^{\circ}C)}$$

$$H_A: \text{NON}$$

Tímto testováním byla zjištěna P-hodnota = 0,000 a je tedy možné s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$ konstatovat, že teplota spolu se zakřivením mají statisticky významný vliv na ohybovou únosnost sendvičových konstrukcí S20.

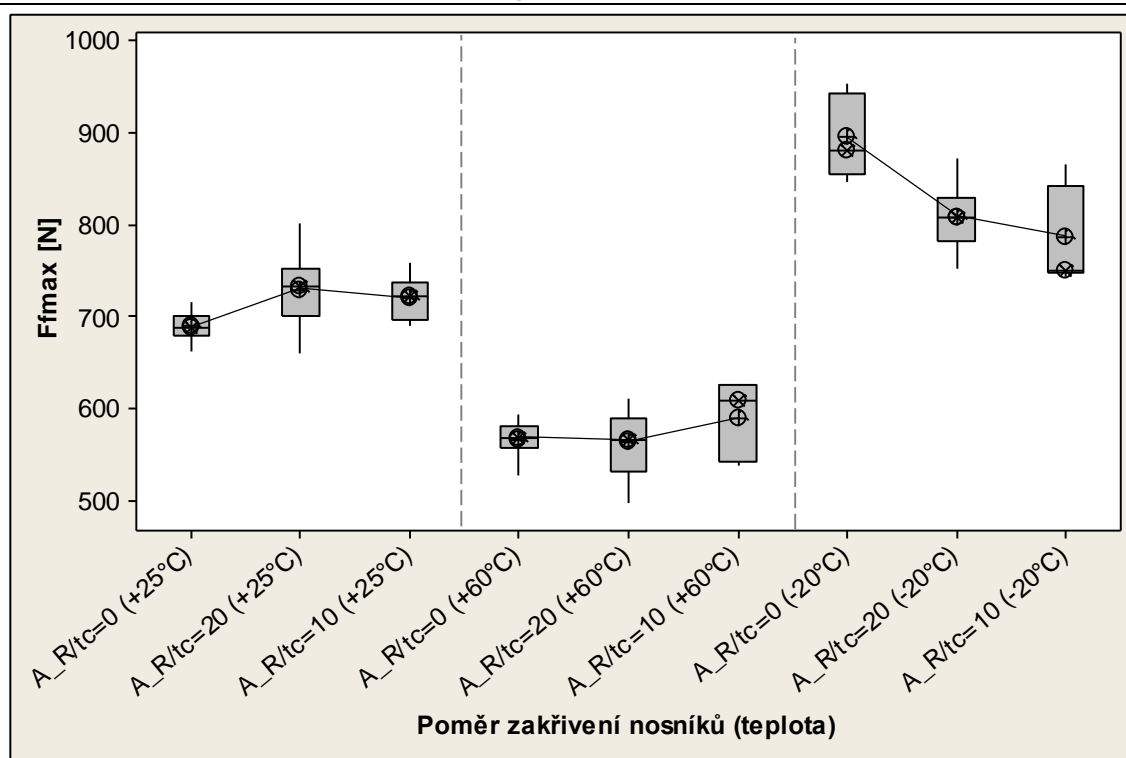
Z naměřených hodnot pro efektivní modul pružnosti uvedených v následující tabulce (Tab. 6. 24) je patrné, že teplota tento parametr v případě konstrukcí série A značně ovlivňuje. Při zvýšené teplotě došlo u slabě zakřivených nosníků k poklesu modulu pružnosti o 18 %, u silně zakřivených dokonce o téměř 27 % v porovnání s hodnotou efektivního modulu u rovinných nosníků. V porovnání s nosníky, jejichž efektivní modul byl měřen při pokojové teplotě, došlo vlivem zvýšené teploty k poklesu modulu u zakřivených nosníků o 23,9 % (pro $R/t_c = 20$), respektive o 17 % v případě nosníků s poměrem zakřivení $R/t_c = 10$.

Z hodnot efektivního modulu pružnosti naměřeného při záporné teplotě lze pozorovat, že opět s rostoucím zakřivením tento parametr klesá. Oproti rovinným byl naměřen pokles o 16 %, respektive až o 34 % v případě silně zakřivených nosníků. Na druhou stranu při srovnání s hodnotami naměřenými při pokojové teplotě lze konstatovat, že záporná teplota způsobila zvýšení modulu pružnosti, avšak méně, než v případě rovinných sendvičových nosníků této série. U zakřivených nosníků byl tento nárůst modulu nižší a to o 7 % u slabě zakřivených a o 4,7 % u silně zakřivených konkávně uložených nosníků.

Tab. 6. 24: Ohybové vlastnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S20 při odlišných provozních teplotách

			\bar{x}	s	Max	Min	\tilde{x}	V_x [%]	
+60 °C	A	R/t _c = 0	E _{ef} [MPa]	531	29	585	496	523	5,41
			F _{fmax} [N]	579	34	592	526	575	5,85
		R/t _c = 20	E _{ef} [MPa]	436	17	469	409	430	3,88
			F _{fmax} [N]	562	35	610	496	564	6,15
		R/t _c = 10	E _{ef} [MPa]	389	13	408	371	394	3,45
			F _{fmax} [N]	588	39	625	538	607	6,65
-20 °C	A	R/t _c = 0	E _{ef} [MPa]	732	28	765	675	740	3,84
			F _{fmax} [N]	895	40	954	847	882	4,52
		R/t _c = 20	E _{ef} [MPa]	614	21	640	563	620	3,50
			F _{fmax} [N]	808	32	872	751	809	3,93
		R/t _c = 10	E _{ef} [MPa]	491	13	507	468	494	2,62
			F _{fmax} [N]	785	48	865	744	750	6,17

Následující box-plotový diagram (Obr. 6. 40) vyobrazuje vliv provozní teploty na ohybovou únosnost zakřivených sendvičových nosníků série A. Lze pozorovat, že v porovnání s hodnotami naměřenými za pokojové teploty mají data měřená při odlišných teplotách větší interkvartilové rozpětí. Únosnost vlivem zvýšené teploty poklesla o 23 % u nosníků s poměrem zakřivení $R/t_c = 20$ a o 19,3 % u nosníků s poměrem $R/t_c = 10$. Naopak teplota -20 °C způsobila zvýšení ohybové únosnosti zakřivených nosníků ve srovnání s únosností nosníků, měřenou za teploty pokojové (zvýšení o 10,8 %, resp. o 9 %). Při porovnání hodnot únosnosti měřené při této záporné teplotě je však zřejmé, že zakřivení způsobilo pokles tohoto parametru o 9,7 % u slabě zakřivených nosníků a o 12,3 % u silně zakřivených nosníků.

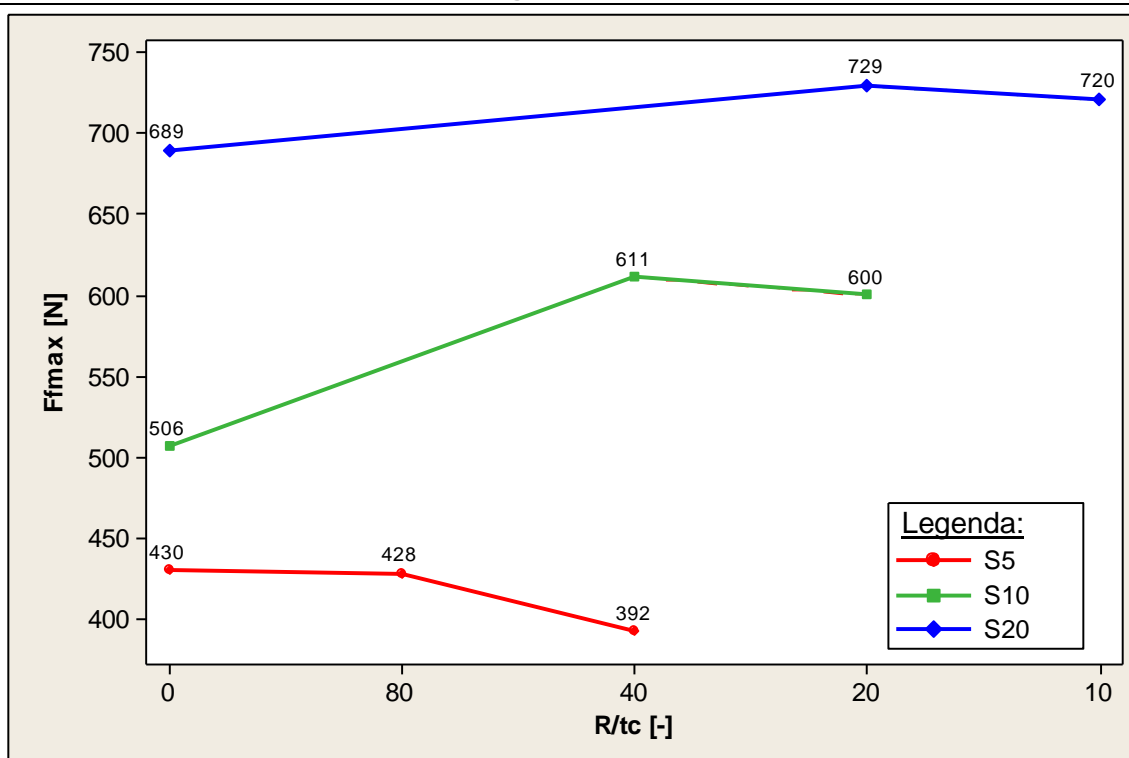


Obr. 6. 40: Box-plotový diagram závislosti ohybové únosnosti zakřivených sendvičových konstrukcí S20 při odlišných provozních teplotách (série A)

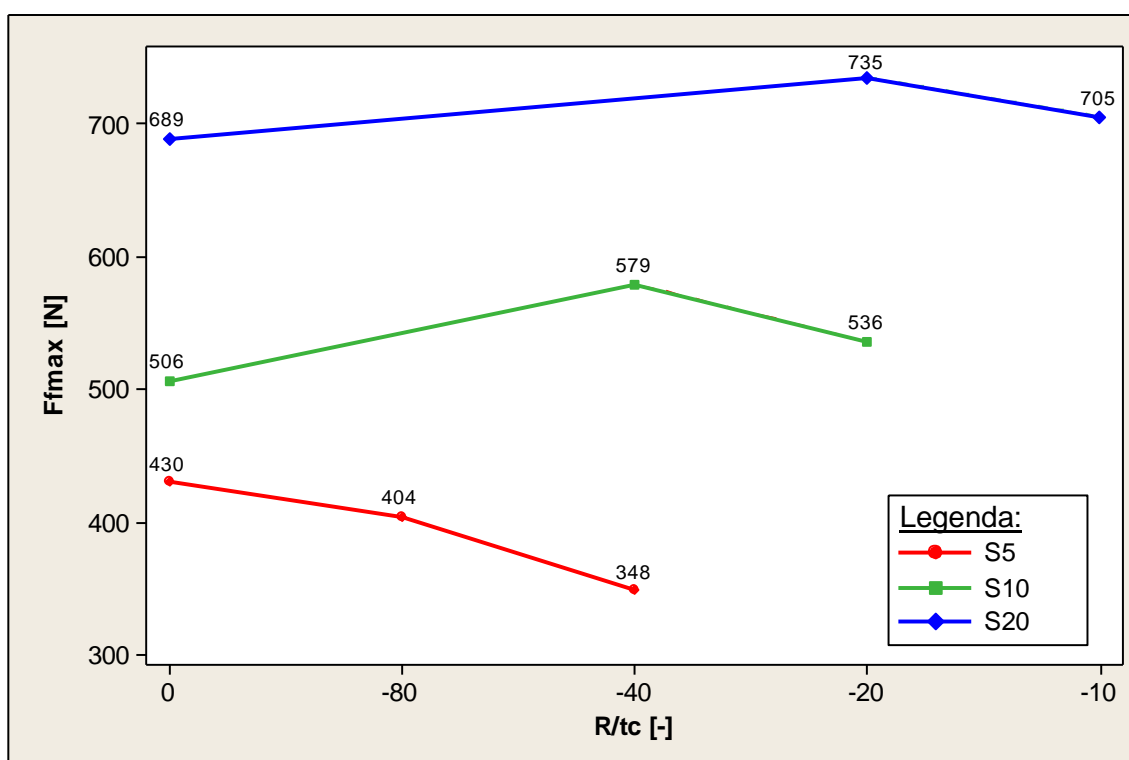
Ohybové poruchy, které nastaly během testování při zvýšené, respektive snížené teplotě okolí byly shodné s těmi typy, pozorovanými při teplotě $+25^{\circ}\text{C}$. Při teplotě $+60^{\circ}\text{C}$ docházelo výhradně ke ztrátě stability pěnového jádra a popraskání potahu s mírnou delaminací v místě pod příčnicí a to pro oba typy zakřivení. Při záporné teplotě -20°C docházelo k dvěma typům poruch a to k separaci horního potahu od jádra (částečné i úplné k okraji nosníku) a ke smykové poruše jádra. Obě poruchy byly pozorovány u obou poměrů zakřivení nosníků.

6.2.10 Zakřivené konstrukce série A – srovnání ohybové únosnosti dle poměru R/t_c

Následující grafy poskytují názorné srovnání vlivu zakřivení na ohybovou únosnost sendvičových konstrukcí série A pro nosníky S5, S10 a S20, tedy pro tři různé tloušťky jádra PET. Ohybová únosnost konkávně uložených nosníků (Obr. 6. 41) je téměř ve všech případech sendvičových konstrukcí vyšší, než u konvexně uložených nosníků (Obr. 6. 42). Avšak trendy, vzniklé spojením jednotlivých naměřených hodnot jsou obdobné. Lze tedy konstatovat, že u sendvičových konstrukcí s jádrem tloušťky 5 mm zakřivení způsobuje pokles únosnosti rostoucí se zvyšujícím se zakřivením. Naopak u konstrukcí s jádrem tloušťky 10 a 20 mm dochází s mírným zakřivením k vyššímu nárůstu únosnosti, avšak zvyšování zakřivení tuto únosnost již snižuje.



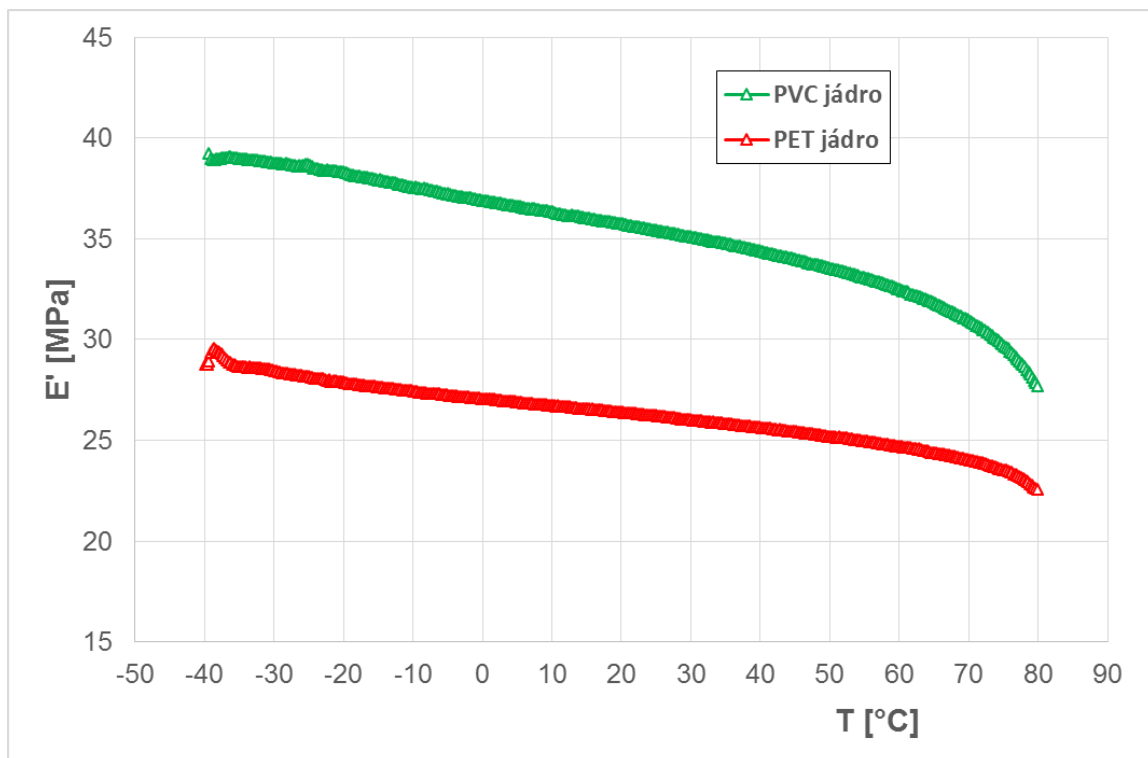
Obr. 6. 41: Ohybová únosnost konstrukcí série A – konkávně uložené nosníky



Obr. 6. 42: Ohybová únosnost konstrukcí série A – konvexně uložené nosníky

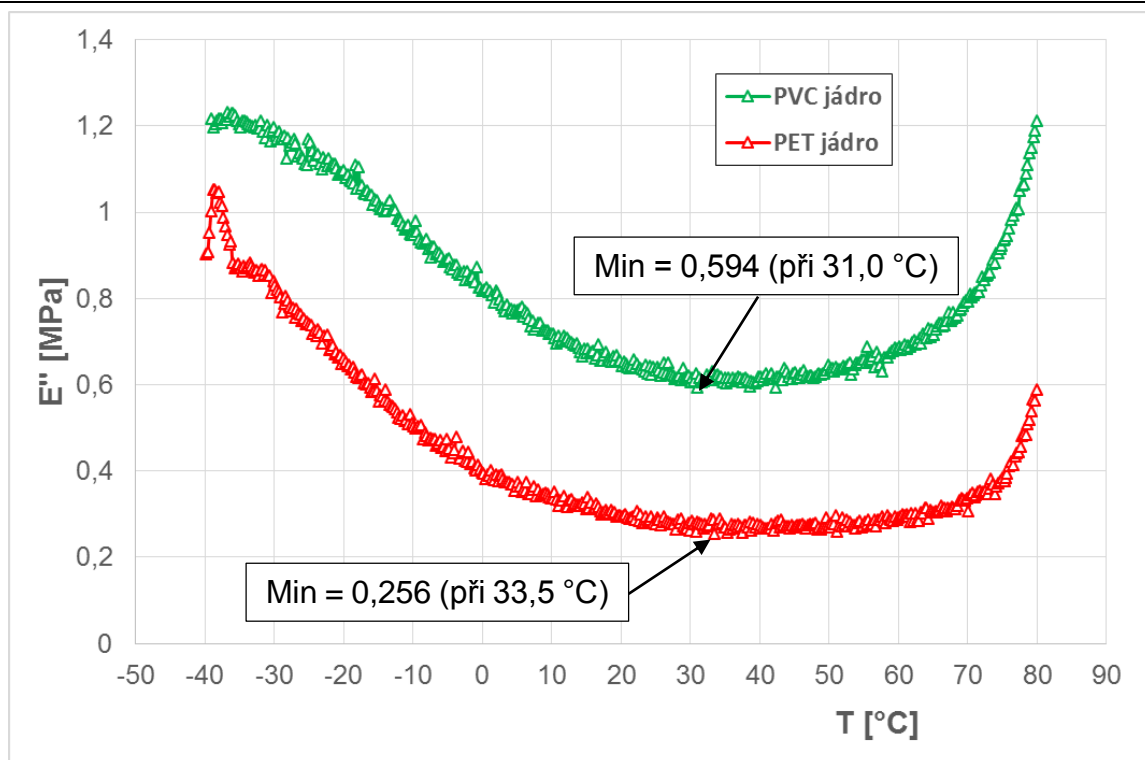
6.3 DMA analýza vybraných materiálů

Vliv teploty na chování polymerních jádrových materiálů je zobrazen v následující sérii grafů (Obr. 6. 43, Obr. 6. 44 a Obr. 6. 45). U jádra z materiálu PVC je patrný silnější pokles elastické složky modulu vlivem teploty v porovnání s jádrem z PET. Obecně lze konstatovat, že celá křivka pro materiál PET vykazuje méně strmý pokles s rostoucí teplotou než pění PVC. Dále je z grafu patrné, že od teploty +60 °C dochází k silnějšímu poklesu modulu a to u obou zkoumaných pěnových materiálů.



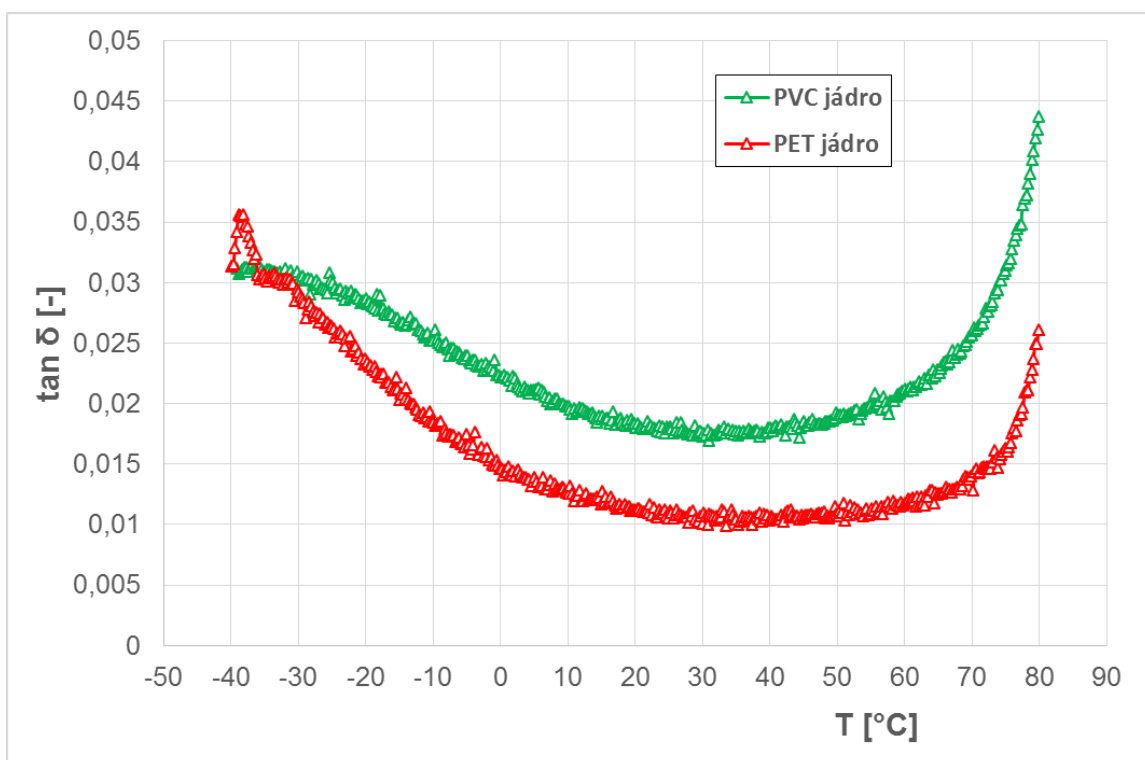
Obr. 6. 43: Průběh elastické složky modulu polymerních jader

Při porovnání viskózního modulu (Obr. 6. 44) je patrné, že pro PVC pěnu má tento parametr vyšší hodnoty a je i více teplotně závislý. U PET pěny můžeme sledovat téměř lineární oblast cca od +30 °C do +50 °C. V případě obou materiálů po překročení +50 °C došlo opět k růstu viskózní složky modulu, který by teoreticky pokračoval až do teploty T_g , kdy by došlo k překmitu a opětovnému snižování parametru. PET pěna dosáhla minima viskózní složky modulu při +33,5 °C, kdežto PVC pěna už při +31 °C.



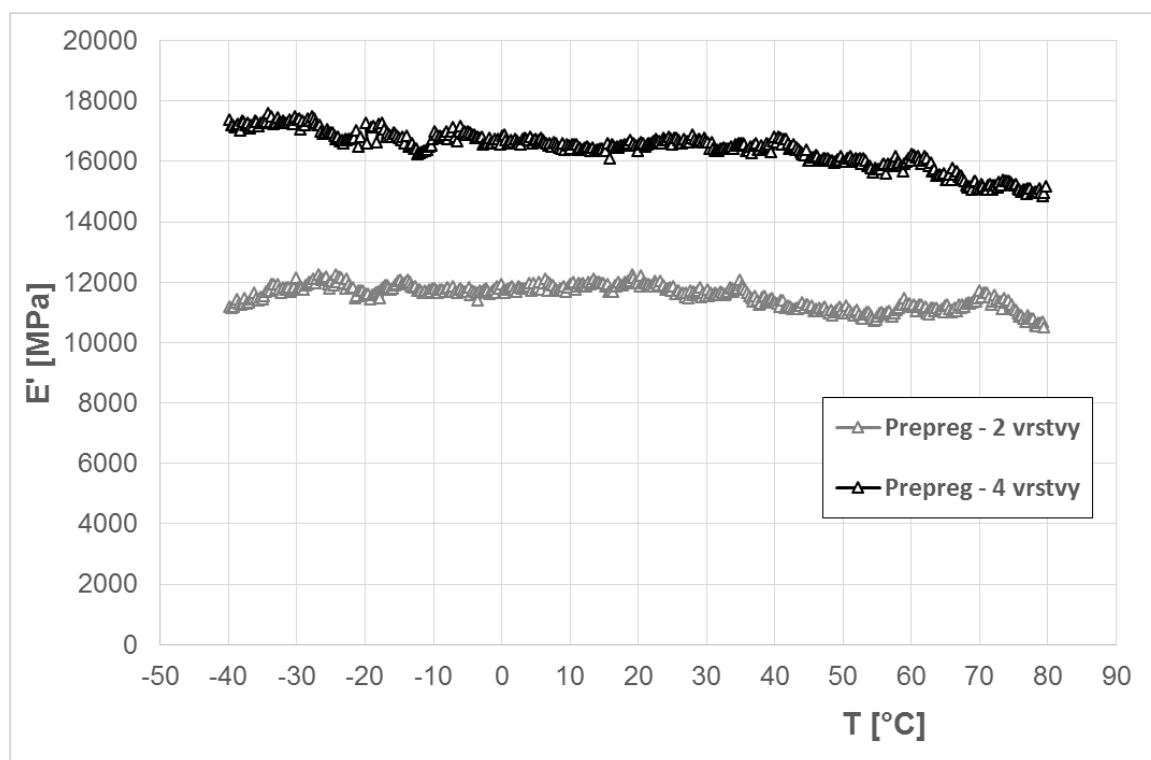
Obr. 6. 44: Průběh viskózní složky modulu polymerních jader

Parametr $\tan \delta$ (Obr. 6. 45), který vzniká složením elastické a viskózní složky modulu svým průběhem v grafu kopíruje průběh E'' .



Obr. 6. 45: Průběh parametru $\tan \delta$ polymerních jader

Při testování kompozitů tvořených vrstvami prepregů byly využitelná pouze data pro elastickou složku modulu, neboť hodnoty viskózní složky modulu byly menší než 1 % hodnoty elastické složky. V rámci chyby měření nejsou tak nízké hodnoty průkazné, hodnoty jsou také ovlivněny upnutím vzorku. Tento vliv je více patrný pro materiály s vysokou pevností. Hodnoty $\tan \delta$ byly naměřeny v rozmezí setin až tisícín, z čehož plyne závěr, že testovaný kompozit vykazuje prakticky 100 % elastické chování. V grafu níže (Obr. 6. 46) jsou zobrazeny hodnoty elastické složky modulu při různých teplotách měření, které vykazují pouze mírný pokles vlivem rostoucí teploty, dále je zřejmé, že počet vrstev zvyšuje elastickou složku modulu kompozitu.



Obr. 6. 46: Průběh elastické složky modulu prepreg kompozitů

6.4 Soudržnost jednotlivých vrstev sendvičových konstrukcí

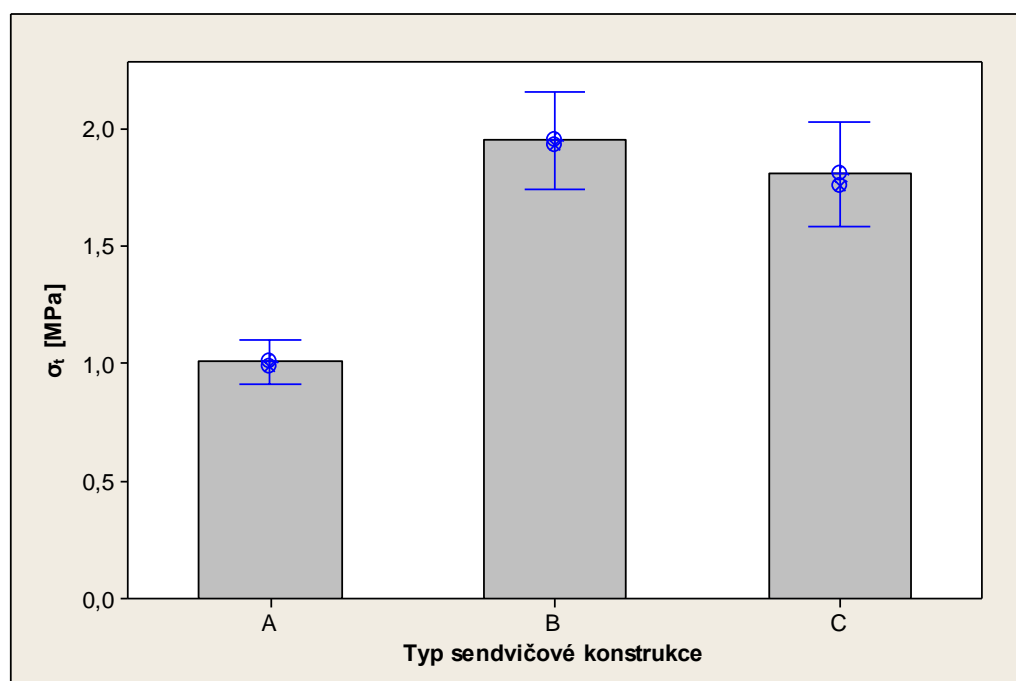
Pro testování soudržnosti jednotlivých částí sendvičové konstrukce byly provedeny testy tahem naplocho dle již zmíněné normy ASTM C297. Testování konstrukcí s pěnovým jádrem (série A a B) probíhalo na zkušebních kostkách o rozměrech 50 x 50 mm, pro konstrukce ze série C s voštinovým jádrem byly dle informací z normy použity zkušební kostky o rozměrech 75 x 75 mm. Tato zkouška byla provedena pouze na sendvičových konstrukcích s jádry tloušťky 10 mm. Maximální tahové napětí (σ_t) vzniklo jednoduchým přepočtem přes naměřenou sílu (F_{tmax}) a plochu zkušebního tělesa o shodných rozměrech jako zkušební kostky.

Naměřená data jsou uvedena v následující tabulce (Tab. 6. 25). Jak je z výsledků patrné, nejlepší soudržnost na základě potřebného tahového napětí k odtrhnutí vrstev byla určena pro sendvičové konstrukce B s PVC pěnovým jádrem. Soudržnost těchto konstrukcí byla o 93,6 % vyšší v porovnání s konstrukcemi série A (PET pěna). Naopak u konstrukcí s voštinovým jádrem (série C) bylo určeno napětí pouze o 6,5 % nižší, než u sérií B.

Tab. 6. 25: Tah naplocho připravených konstrukcí

	A		B		C	
	F_{tmax} [N]	σ_t [MPa]	F_{tmax} [N]	σ_t [MPa]	F_{tmax} [N]	σ_t [MPa]
\bar{x}	2518	1,007	4874	1,950	10156	1,824
s	207	0,083	370	0,148	914	0,162
v_x [%]	8,2	8,2	7,6	7,6	8,9	8,9

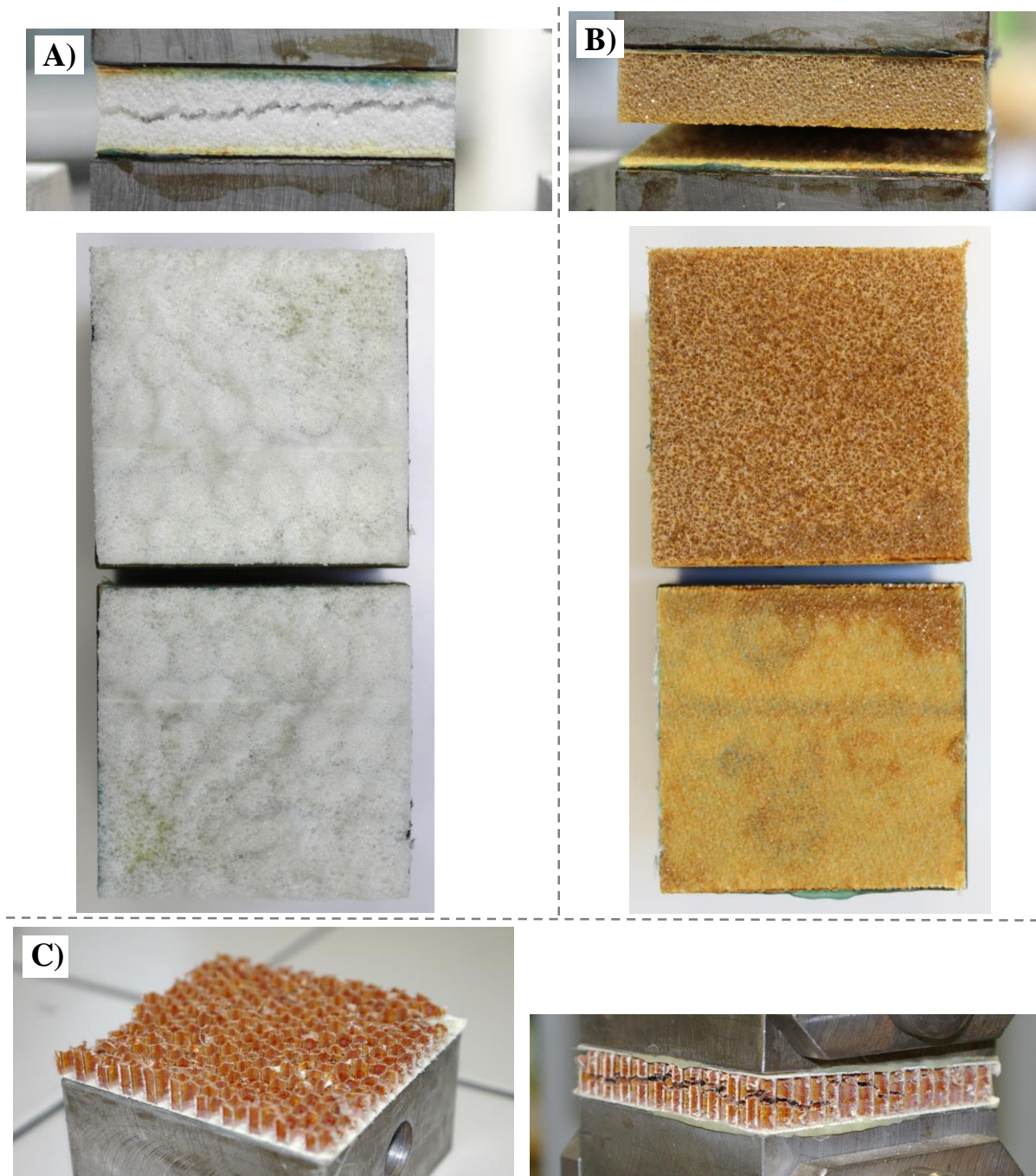
V následujícím grafu (Obr. 6. 47) jsou vyobrazeny průměrné hodnoty určeného tahového napětí potřebného k odlupu vrstev. Zobrazené intervaly odpovídají konfidenčním intervalům pro μ na konfidenční úrovni $1 - \alpha = 0,95$.



Obr. 6. 47: Maximální tahová síla při zkoušce tahem naplocho

Ze snímků pořízených po ukončení testu a následně po sejmutí ze zkušebního stroje je zřejmé, že v případě sendvičových konstrukcí s PET jádrem (série A) došlo ve všech případech k porušení soudržnosti jádra, nedošlo k delaminaci na rozhraní potah - jádro (Obr. 6. 48 A). Dá se tedy předpokládat, že reálná soudržnost mezi potahy ze skelného prepregu s fenolickou pryskyřicí a PET jádrem je vyšší, než tahová soudržnost tohoto jádra. Jak bylo již zmíněno, nejvyšších hodnot

maximální tahové síly bylo naměřeno pro konstrukce s jádrem z PVC (série B). Tyto hodnoty by měly odpovídat reálné soudržnosti, neboť ze snímků je patrná delaminace potahu od jádra (Obr. 6. 48 B). V případě sendvičových konstrukcí ze série C docházelo k obdobné poruše, jako v případě konstrukcí série A. Při tahu došlo k poruše jádra a roztržení jednotlivých voštinových buněk v různých místech jejich výšky, ale vždy nad rádiusy od zatečené pryskyřice z prepregu (Obr. 6. 48 C). Reálná soudržnost potahů s voštinou je tedy vyšší než tahová pevnost voštinového jádra.



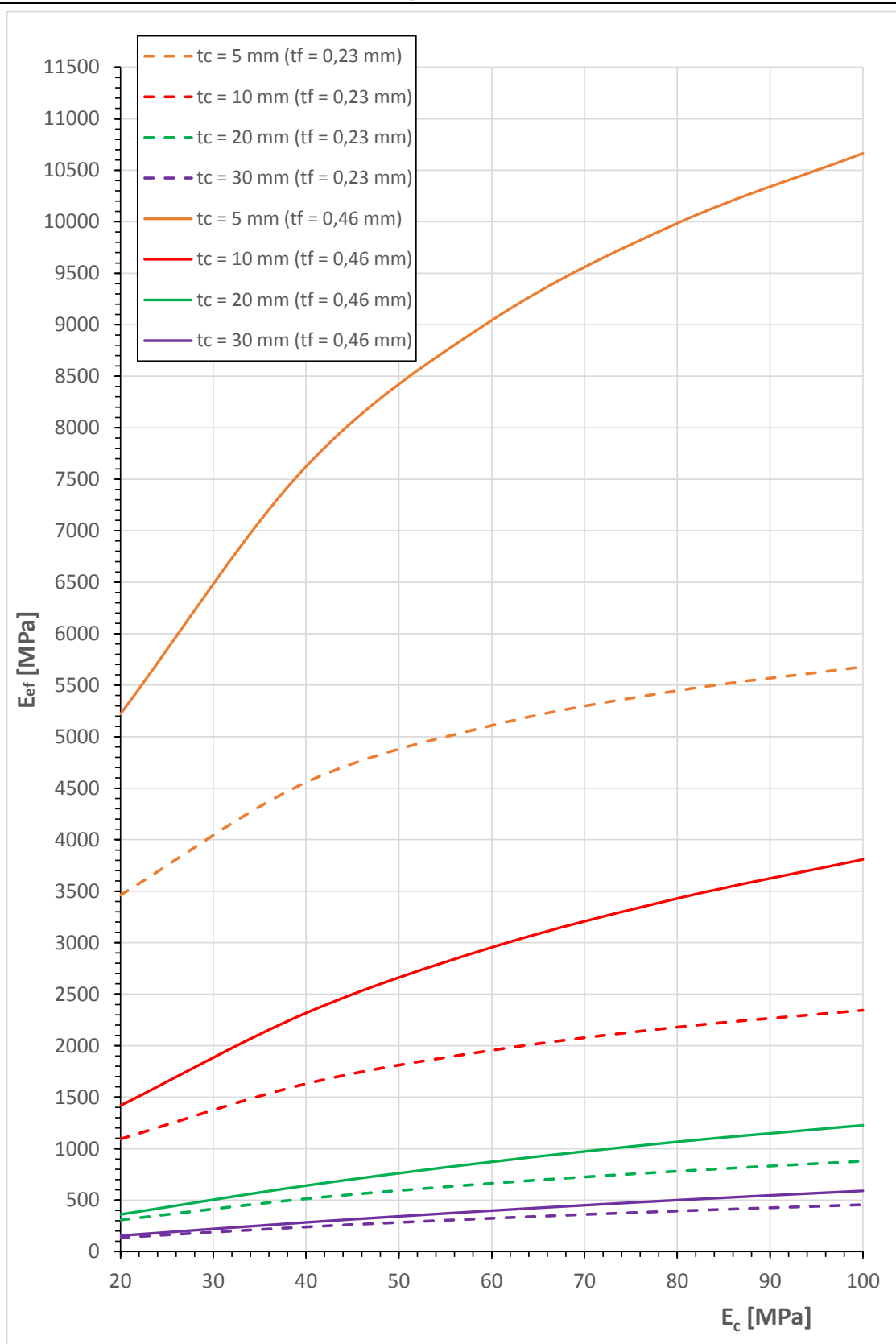
Obr. 6. 48: Vzhled zkušebních těles po zkoušce tahem naplocho

6.5 Numerické (FEM) modelování chování sendvičových konstrukcí v ohybu

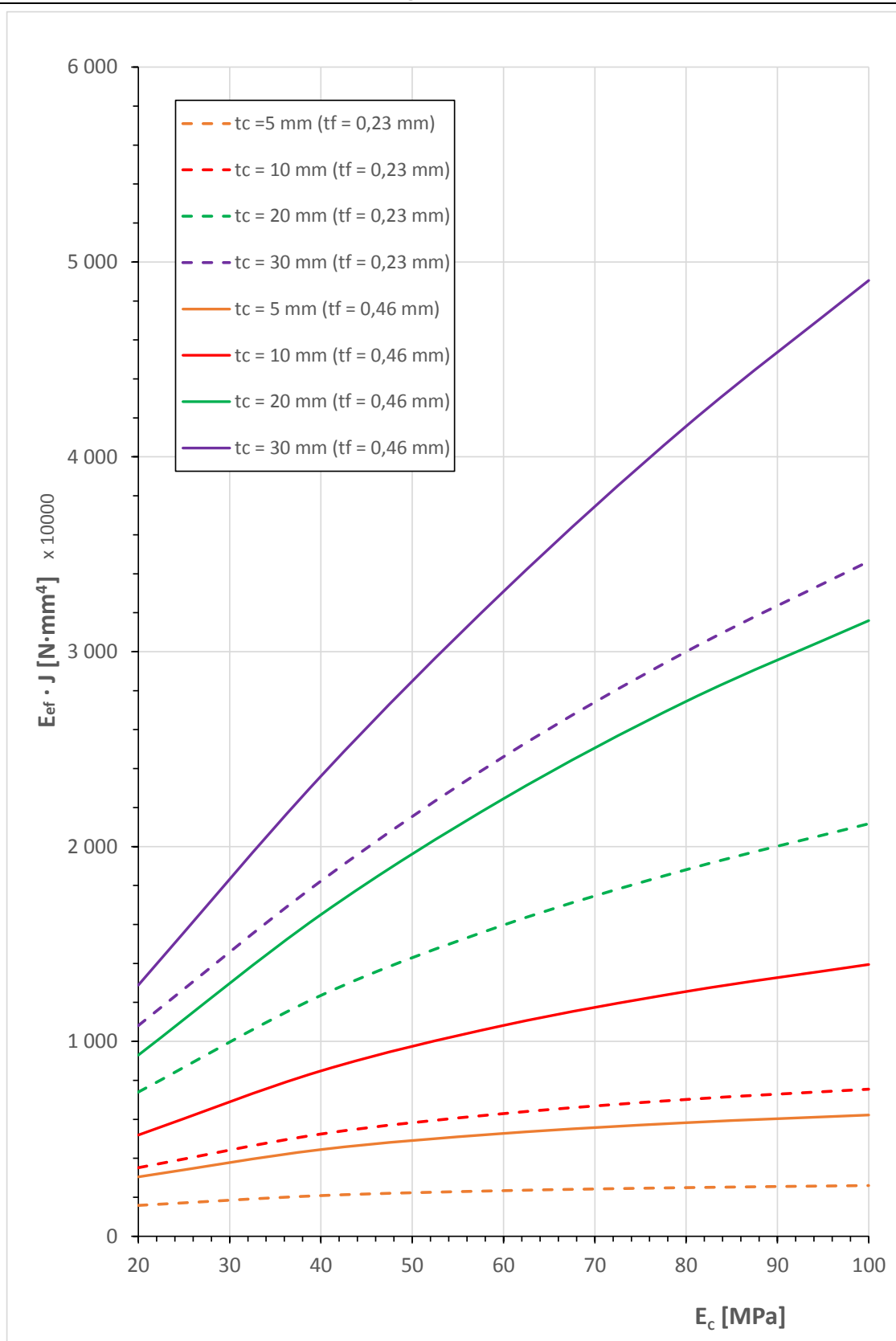
Následující výsledky modelování, uvedené v grafech, odpovídají hodnotám získaným a odečteným z FEM modelu při simulaci trojbodového ohybu rovinných sendvičových konstrukcí, s roztečí podpěr $L = 150$ mm. Rozměry modelového prvku odpovídaly rozměrům sendvičových zkušebních těles připravených pro experimentální měření. Ohybový modul krycích potahů byl experimentálně ověřován a odpovídá hodnotě 22 000 MPa uvedené v materiálovém listu.

V grafech níže (Obr. 6. 49 a Obr. 6. 50) jsou vyobrazeny modelové závislosti efektivního modulu pružnosti, respektive ohybové tuhosti na modulu pružnosti materiálu jádra. Data z těchto grafů jsou platná pouze pro polymerní jádra. V grafech jsou zobrazeny dva typy křivek. Plná čára odpovídá konstrukcím s krycími potahy tloušťky 0,46 mm, přerušovaná čára pak odpovídá tloušťce 0,23 mm. Dané tloušťky odpovídají dvěma, respektive jedné vrstvě prepregu po jeho vytvrzení. Z grafu na Obr. 6. 49 je patrné, že tloušťka potahů značně ovlivňuje efektivní modul celé sendvičové konstrukce. Nejvyšší hodnoty efektivního modulu je možné pozorovat pro konstrukce s jádrem tloušťky 5 mm. Dále je možné pozorovat, že s rostoucí tloušťkou jádra (E_c) se postupně ztrácí rozdíly průběhů efektivního modulu dle tloušťky krycích potahů. Například v případě konstrukce s jádrem tloušťky 5 mm a modulem $E_c = 80$ MPa je rozdíl v efektivním modulu při použití dvou vrstev a vrstvy jedné v krycím potahu roven více jak 45 %. V případě stejného jádra tloušťky 30 mm je tento rozdíl při shodných tloušťkách potahů pouze 21 %. Z grafu je však patrné, že tento rozdíl se díky rozevírající tendenci křivek zvětšuje s rostoucím modulem jádra.

V případě závislosti ohybové tuhosti na modulu jádra (Obr. 6. 50) je situace opačná, neboť sendvičové konstrukce obsahující jádro tloušťky 5 mm vykazují nejnižší tuhost (jejich křivky jsou nejnižše položené v grafu). Nejvyšších hodnot ohybové tuhosti dosahují konstrukce obsahující 30 mm jádro ve své struktuře. Opět se zde značně projevuje vliv počtu vrstev v krycích potazích, avšak rozdíl mezi tuhostí s dvěma a jednou vrstvou není až tak značný jako v případě efektivního modulu u konstrukcí s jádrem tloušťky 5 mm. Tento rozdíl v tuhosti je roven cca 28 %. Na druhou stranu, tento rozdíl v tuhosti konstrukcí s potahy s rozměry $t_f = 0,46$ mm a $t_f = 0,23$ mm má rostoucí tendenci, kdy pro struktury s jádrem tloušťky 5 mm dosahuje rozdíl až 57 %. Vyplývá z toho, že konstrukce s tímto jádrem a jednou vrstvou prepregu dosahují pouze 43 % tuhosti shodné konstrukce, avšak s dvěma vrstvami prepregu v krycích potazích.

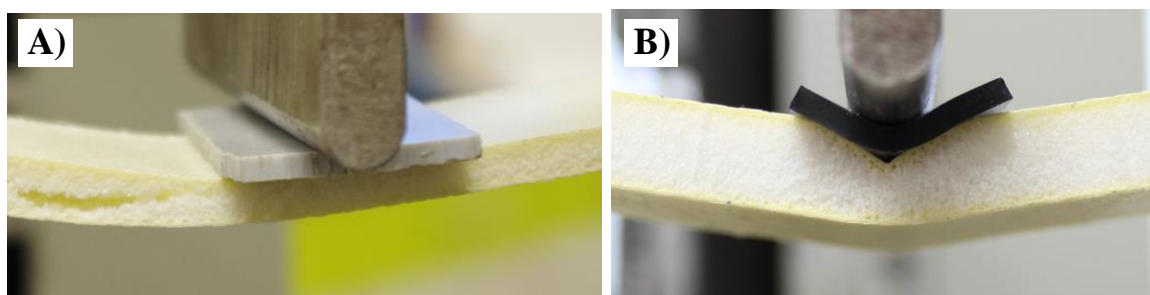


Obr. 6. 49: Modelová závislost efektivního modulu pružnosti na modulu pružnosti polymerního jádra



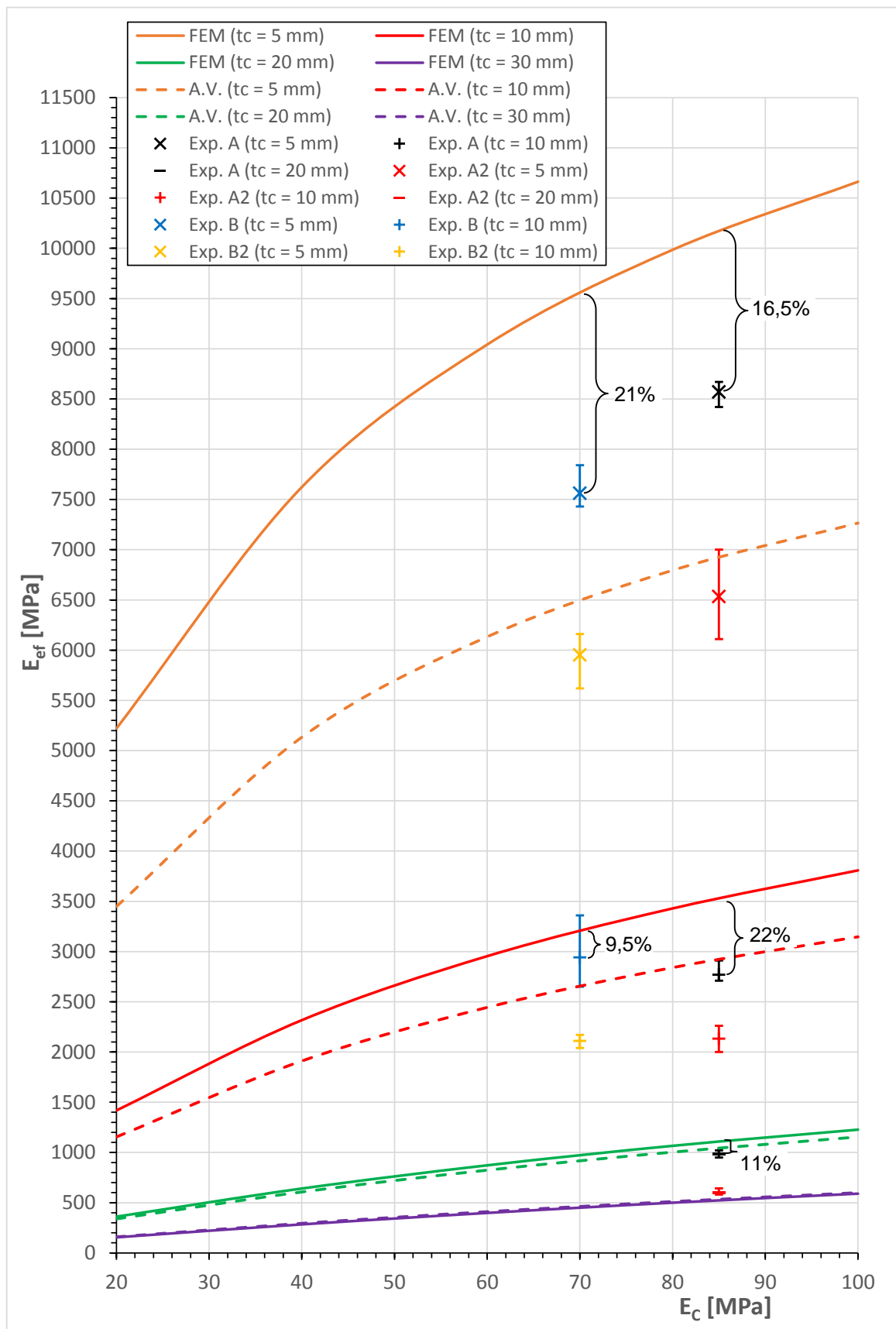
Obr. 6. 50: Modelová závislost ohybové tuhosti na modulu pružnosti polymerního jádra

Srovnání modelové závislosti efektivního modulu pružnosti, závislosti určené na základě analytických vztahů a experimentálně určených hodnot je zobrazeno na následujícím grafu (Obr. 6. 52). Z jednotlivých křivek je patrné, že v případě nízké tloušťky jádra ($t_c = 5$ mm) jsou mezi křivkami značné rozdíly. S rostoucí tloušťkou jádra se rozdíly mezi křivkami snižují. V grafu označené hodnoty jako Exp. A odpovídají hodnotám naměřeným v trojbodovém ohybu při použití tuhé plastové podložky (Obr. 6. 51 A) → zamezení lokální indentace příčnicku, hodnoty Exp. A2 pak hodnotám při použití pružné pryžové podložky pod příčnickem, kterou udává norma ASTM C393 (Obr. 6. 51 B). Intervaly uvedené v grafu odpovídají MIN a MAX hodnotě z naměřeného výběrového souboru. Je zřejmé, že použitím tuhé položky, která ochrání sendvičový nosník před lokální indentací, dojde ke zvýšení efektivního modulu pružnosti. Dále je možné pozorovat, že hodnoty získané z měření s tuhou podložkou jsou blíže analytickým křivkám než hodnoty naměřené s pryžovou podložkou. Hodnoty efektivního modulu v případě sendvičových konstrukcí série A při měření s tuhou podložkou byly přibližně o 30 % vyšší (u nosníků s jádry $t_c = 5$ i 10 mm), v případě nosníků s jádrem o tloušťce 20 mm až o 63,5 % vyšší v porovnání s hodnotami naměřenými při testu s pryžovou podložkou. U nosníků série B byly výsledky obdobné, s tuhou podložkou byly hodnoty modulu pružnosti o 26,8 % ($t_c = 5$ mm), respektive o 39,4 % (pro $t_c = 10$ mm) vyšší oproti hodnotám naměřeným s použitím pryžové podložky. Závěrem lze ke grafu konstatovat, že pro vyšší tloušťky jádra se k sobě průběhy křivek z modelové závislosti a analytického výpočtu značně přibližují, kdy i hodnota efektivního modulu pružnosti pro nosníky s jádrem tloušťky 20 mm je značně blízko těmto křivkám. Rozdíl mezi FEM modelem a experimentálně získanými hodnotami činí pouhých 11 %.



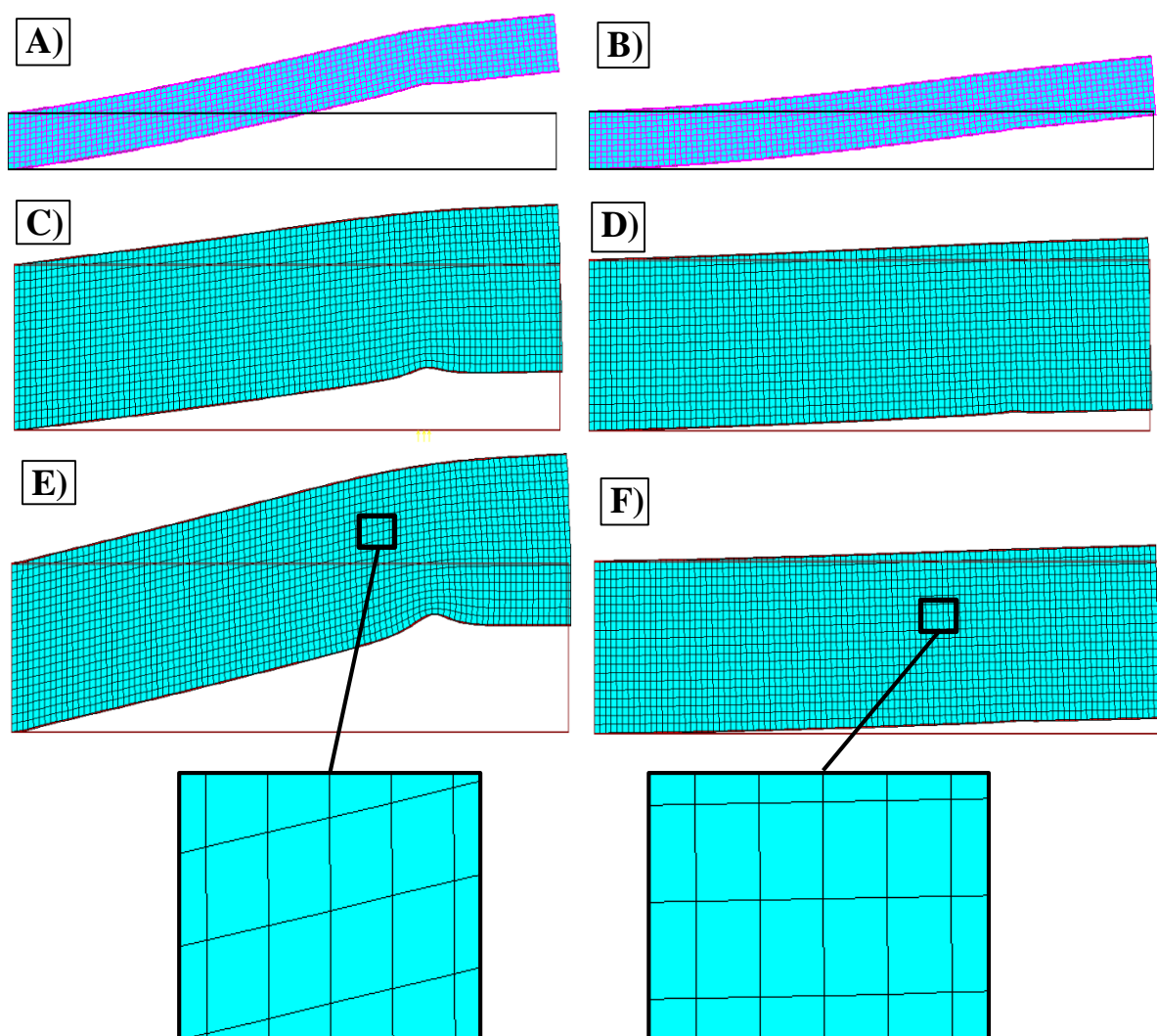
Obr. 6. 51: Typy podložek použitých při 3PB testu

Při použití tuhé podložky při trojbodovém ohybu došlo ve všech případech nosníků ze série A (S5, S10 i S20) ke smykové poruše jádra, u nosníků S20 došlo po smykové poruše vždy ještě k celkové delaminaci spodního potahu. U nosníků série B docházelo opět ke ztrátě stability pěnového jádra a popraskání vláken v potahu.



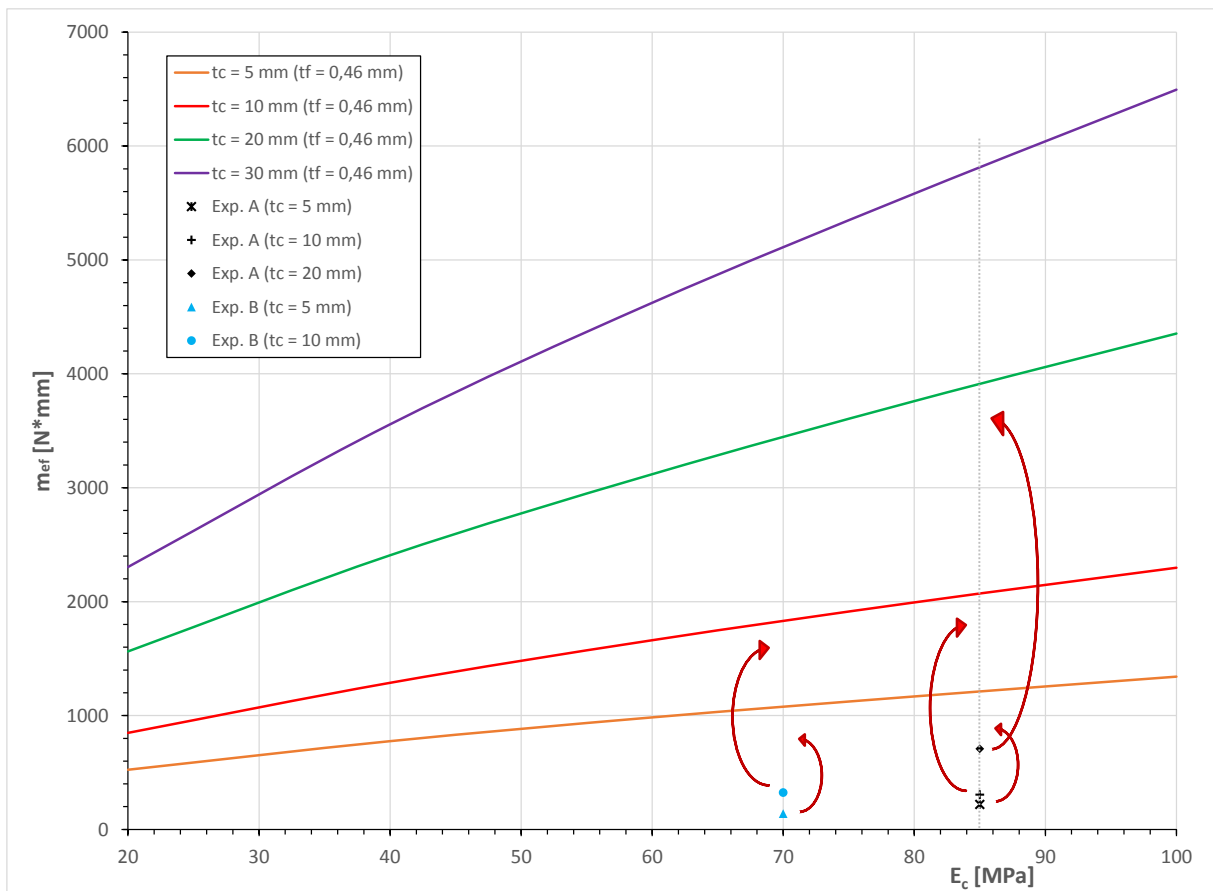
Obr. 6. 52: Srovnání modelové a analytické závislosti efektivního modulu pružnosti sendvičové struktury na modulu pružnosti polymerního jádra spolu s experimentálními hodnotami

Na Obr. 6. 53 jsou vyobrazeny deformace sítě vybraných sendvičových konstrukcí dle FEM modelu. Deformace sítě na Obr. 6. 53 A) a B) odpovídá strukturám s jádrem tloušťky 10 mm s modulem pružnosti 20 MPa, respektive 100 MPa. Je patrné, že s rostoucím modulem pružnosti materiálu jádra se výrazně mění charakter deformace. Pro nízko-modulová jádra je vlivem jejich velké poddajnosti specifická velká smyková deformace (nikoli však porucha), zatímco u vysokomodulových jader jde převážně o ohybový průběh deformace. U Obr. 6. 53 C) až F), jež odpovídají strukturám s jádrem tloušťky 30 mm s moduly 20 MPa, 100 MPa, 10 MPa a 200 MPa je zřejmé, že při 3PB testu dochází u nízko-modulových jader navíc ke značnému zamačkávání podpěr do sendvičových konstrukcí. Právě s ohledem na tuto skutečnost se jeví jako vhodné používat jádra s modulem pružnosti v rozmezí od 80 do 100 MPa, kdy další zvýšení (použití jader o vyšším modulu pružnosti) se již nejeví jako efektivní.



Obr. 6. 53: Průběh deformace sendvičové struktury v závislosti na modulu pružnosti jádra zjištěný při FEM modelování

Následující diagram (Obr. 6. 54) zobrazuje srovnání modelové závislosti jednotkového ohybového momentu (jakožto vyjádření ohybové únosnosti sendvičových struktur) na modulu pružnosti materiálu jádra s experimentálně naměřenými hodnotami únosnosti, přepočítaným na hodnoty m_{ef} . Jak je zřejmé, obdržené experimentální hodnoty (Exp. A a B) nekorespondují s křivkami v diagramu, neboť ty odpovídají meznímu stavu, ke kterému v reálných podmínkách měření nedošlo, tedy ke ztrátě stability tlačené laminy uložené na pružném podkladě. Při měření docházelo nejčastěji k lokální ztrátě stability polymerního jádra, případně ke smykové poruše. Dané mezní stavy ovlivňuje spousta faktorů, zejména pak bimodularita potahů a také obtížně změřitelná, reálná soudržnost vrstev sendvičové struktury.



Obr. 6. 54: Srovnání modelové závislosti jednotkového ohybového momentu jakožto únosnosti sendvičové struktury na modulu pružnosti polymerního jádra spolu s experimentálními hodnotami

7 PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

Hlavní přínos pro vědu je v rozšíření poznatků o ohybovém chování sendvičových konstrukcí, které obsahují krycí potahy vytvořené z prepregů a jádra rozdílných vlastností a typů. Stejně důležité jsou i informace o vlivu zakřivení na ohybový modul, respektive tuhost těchto složených materiálů a také ovlivnění únosnosti právě tvarem sendvičového nosníku, což bylo hlavním cílem práce. Laminátová forma, vytvořená v rámci této disertační práce, může v budoucnu na pracovišti posloužit pro přípravu rozličných typů zakřivených kompozitních či sendvičových panelů, které se mohou stát předmětem dalšího výzkumu. Práce obsahuje řadu teoretických i experimentálně popsaných informací z oblasti sendvičových materiálů a tudíž může posloužit jako studijní materiál pro studenty bakalářského i magisterského stupně studia.

Přínosy pro technickou praxi jsou právě v popisu ovlivnění výsledných vlastností sendvičových dílců (panelů či nosníků) jejich tvarem, dle výzkumu provedeném v této práci - jejich zakřivením. V mnoha aplikacích, a to nejen v dopravním průmyslu, se sendvičové konstrukce vyskytují v designéry definovaném tvaru, který může obsahovat různá zakřivení či obdobné odchylky od tvaru rovinného. Výsledky z měření při různých hodnotách teploty okolí mohou opět posloužit pro predikci chování vrstevnatých materiálů v rozličných podmínkách a aplikacích.

Z FEM modelování vytvořené diagramy mohou být využity pro přibližnou predikci ohybových modulů a zejména tuhostí sendvičových materiálů s ohledem na vlastnosti jádrového materiálu, případně jejich složení. Neméně důležité jsou i informace o srovnání vlastností (hodnot) získaných z ohybu při použití pryžových podložek, které doporučuje norma a při použití tuhých podložek, kdy právě tyto hodnoty více korespondují s technickou teorií ohybu a vytvořeným FEM modelem.

8 ZÁVĚR

Předložená disertační práce se zabývala ohybovým chováním zakřivených sendvičových konstrukcí, lišících se v materiálu a rozměrech jádra, zejména pak srovnáním ohybových vlastností těchto zakřivených struktur s vlastnostmi struktur rovinných. Zvolené materiály spadaly oblastí použití do kolejové a hromadné dopravy. Konkrétně byly použity dva typy polymerních pěn a jeden typ voštiny.

Z naměřených dat pro rovinné sendvičové struktury je patrné, že efektivní ohybový modul s rostoucí tloušťkou klesá, avšak je nutné uvažovat, že samotná tuhost vzrůstá. U struktur s jádry nejmenší testované tloušťky byly ještě identifikovány výrazné rozdíly v případě modulu, kdy ohybový modul struktur s voštinovým jádrem byl výrazně vyšší než u rozměrově shodných struktur s pěnovými jádry, avšak v případě sendvičových konstrukcí s jádry tloušťky 10 mm je tento rozdíl již minimální. Dokonce i nosníky s jádry z PVC této tloušťky měly shodný efektivní modul ve srovnání se sendvičovými nosníky s PET pěny, které mají téměř dvojnásobnou hustotu a o více než 20 % vyšší modul v tlaku. Dá se tedy konstatovat, že hustota u jader vyšší tloušťky ovlivňuje spíše hmotnost panelů, nikoli však efektivní modul pružnosti.

V případě ohybové pevnosti byl pozorován obdobný trend, kdy u sendvičových nosníků nejmenší tloušťky byly ještě patrné rozdíly mezi pevností konstrukcí s PET a PVC jádrem, u struktur s jádry tloušťky 10 mm se rozdíly téměř ztrácely. Pevnost sendvičových nosníků zde však byla zcela jistě ovlivněna lokálními poruchami v místě působícího příčnicku, neboť pryžová podložka nebyla schopna této poruše zamezit, jak je uvedeno v ASTM normě. Tato porucha také souvisí se skutečností, že tlakový modul krycích potahů z prepregu je obtížně určitelný vzhledem k jejich velmi malé tloušťce v porovnání s tloušťkou jádra. Obecně lze tedy na základě výsledků konstatovat, že ohybová pevnost sendvičových konstrukcí v trojbodovém ohybu klesá s rostoucí tloušťkou jádra a že ohybová únosnost ve čtyřbodovém ohybu roste s rostoucí tloušťkou pěnového jádra. S přihlédnutím k účinku teplot je třeba zmínit, že zvýšená teplota značně ovlivňuje (snižuje) oba měřené parametry, tedy jak modul, tak i pevnost u všech typů konstrukcí. Záporná teplota okolí v případě konstrukcí s jádry nejmenší tloušťky ohybovou pevnost snižuje, naopak s rostoucím zastoupením jádra v tloušťce sendvičové struktury dochází k mírnému nárůstu parametru.

Skutečnost, že chování sendvičových materiálu při různých provozních teplotách ovlivňuje materiál jádra, byla také potvrzena DMA analýzou, kdy byla patrná závislost elastické i viskózní složky modulu pružnosti na změně teploty. Naopak kompozit z prepregů se choval při teplotním zatěžování téměř neměnně, tedy konkrétně elastická složka modulu byla ve vybraném teplotním pásmu od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ téměř konstantní.

S ohledem na ohybové poruchy je třeba konstatovat, že v případě konstrukcí s voštinovým jádrem došlo s růstem jeho tloušťky ke změně specifických poruch,

kdy namísto lokální ztráty stability a separace spodního potahu od voštiny u konstrukci s jádrem tloušťky 5 mm docházelo u konstrukci s 10 mm voštinou ke smykové poruše buněk voštiny a jejich trhání.

Při ohybu slabě zakřivených sendvičových konstrukcí nedochází k významné změně efektivního modulu pružnosti v porovnání s hodnotami získanými v případě konstrukcí rovinných. Naopak silné zakřivení nosníku již způsobuje značné snížení tohoto ohybového parametru. Dále je nutné poznamenat, že ohybový modul pružnosti úzce souvisí s tuhostí, je tedy zřejmé, že ač průřez nosníku je shodný ohybová tuhost u silně zakřivených sendvičových konstrukcí klesá. Nejvyšší pokles byl v provedeném experimentálním měření identifikován u konstrukci s jádrem tloušťky 5 mm. V neposlední řadě je také důležité poznamenat, že hodnoty modulu byly u konvexně uložených sendvičových nosníků s polymerními jádrem vždy vyšší, než u shodných nosníků uložených konkávně. Z toho vyplývá, že nejen zakřivení dílu, ale také tvar (uložení) s ohledem na působící zatížení ovlivňují ohybový modul a také samotnou tuhost sendvičových konstrukcí.

Experimentální měření poukázalo také na skutečnost, že hodnoty modulu pružnosti jsou při čtyřbodovém ohybu vyšší, než při ohybu trojbodovém. S rostoucím zakřivením sendvičového nosníku však stejně jakou u 3PB testu dochází u 4PB k poklesu tohoto parametru, avšak u 4PB je u silně zakřivených nosníků tento pokles ještě strmější než v případě shodných nosníků u testu trojbodového.

Změna, konkrétně zvýšení teploty prostředí, která simulovala použití dílů například v tropických oblastech, způsobila u zakřivených sendvičových konstrukcí ještě větší snížení ohybového modulu než v případě rovinných. Nejvíce účinku zvýšené teploty s ohledem na modul a tedy i tuhost sendvičové konstrukce odolávaly nosníky s voštinovým jádrem. Za snížené teploty bylo očekáváno odlišné chování, tedy zvýšení modulu pružnosti, což se potvrdilo u většiny konstrukcí. Avšak k výrazné změně efektivního modulu pružnosti, respektive ke zvýšení samotné ohybové tuhosti vlivem tvaru (zakřivením) při účinku zvýšené či záporné teploty nedošlo. Na základě experimentu je tedy možné konstatovat, že zakřivení nosníků dané parametry při záporné teplotě okolí výrazněji neovlivňuje v porovnání s chováním zakřivených nosníků za teploty pokojové, tedy trend poklesu modulu s ohledem na zakřivení nosníků je shodný.

Dle provedených experimentů je dále možné konstatovat, že u sendvičových konstrukcí s jádrem nejnižší tloušťky byl zjištěn významný pokles jejich únosnosti u silně zakřivených nosníků, zejména pak u konvexně uložených, na které při trojbodovém ohybu působí tzv. uzavírací ohybový moment. Na druhou stranu, sendvičové nosníky s jádrem tloušťky 10 a 20 mm vykazovaly díky slabému zakřivení značné zvýšení ohybové únosnosti, avšak silné zakřivení pak opět způsobilo její pokles. Tento pokles byl opět výraznější u konvexně uložených nosníků.

Na základě výsledků z měření při čtyřbodovém ohybu konkávně uložených zakřivených nosníků bylo zjištěno, že konstrukce s polymerním jádrem s mírným zakřivením vykazují jistý nárůst únosnosti, avšak s dalším růstem zakřivení dojde

opět poklesu, kdy i po něm jsou hodnoty stále mírně vyšší v porovnání se strukturami rovinnými. Rozdílné chování bylo zjištěno u sendvičových struktur s voštinovými jádry. U nosníků nejmenší tloušťky bylo zjištěno značné zvýšení únosnosti ve čtyřbodovém ohybu vlivem zakřivení, naopak u nosníků s jádry tloušťky 10 mm byl naměřen výrazný nárůst únosnosti u slabě zakřivených nosníků, avšak u silně zakřivených pak došlo k poklesu ještě pod úroveň konstrukcí rovinných. Šlo tedy o úplně jiné chování, než bylo zjištěno při trojbodovém ohybu.

Při posuzování vlivu teploty na chování zakřivených sendvičových konstrukcí bylo zjištěno, že jednotlivé konstrukce s jádry o nejnižší tloušťce vykazovaly při zvýšené teplotě mírný pokles únosnosti s rostoucím zakřivením. Chování, respektive trend změny únosnosti za teploty snížené v případě konstrukcí s polymerním jádrem kopíroval chování za teploty pokojové, s tím rozdílem, že hodnoty byly mírně výše položené. Naopak sendvičové konstrukce s voštinou vykazovaly za snížené teploty značný pokles únosnosti vlivem zakřivení. U sendvičových struktur s polymerním jádrem 10 a 20 mm tloušťky mající silné zakřivení byl identifikován nárůst únosnosti při zvýšené teplotě okolí, kdy lze konstatovat, že tvar nosníku pozitivně ovlivnil ohybovou únosnost.

Závěrem je třeba poznamenat, že vliv tvaru - zakřivení na ohybovou únosnost sendvičových konstrukcí je rozdílný dle typu a rozměrů jádrového materiálu.

Z hlediska soudržnosti jednotlivých materiálů, tvořících připravené sendvičové struktury je třeba poznamenat, že soudržnost mezi PET pěnou, respektive voštinou a krycími potahy obsahujícími fenolickou matici je vyšší, než tahová pevnost těchto jader při testu tahem naplocho. Pro určení reálné soudržnosti by bylo vhodnější použít například zkoušku odlupu pomocí navíjecího bubnu (angl. Climbing drum peel test) nebo odlup potahu z nosníku tahem (angl. SCB-type peel test).

Připravený FEM model, respektive diagramy vytvořené z dat z konečně prvko- vého modelování je možné využít pro predikci efektivního ohybového modulu sendvičových konstrukcí, avšak pro malé tloušťky jádra je značný rozdíl mezi FEM modelem a analytickými hodnotami. Připravené diagramy jsou vhodné zejména pro sendvičové konstrukce s jádry tloušťky 10 a více mm. Pokus o modelování ohybové únosnosti pomocí připraveného modelu nebyl úspěšný, neboť tento parametr je obtížně predikovatelný a chování reálné konstrukce ovlivňují různé vlivy jako bimodularita, skutečná soudržnost vrstev a lokální indentace, tedy vlivy, které jsou buď obtížně měřitelné, případně složitě zanesitelné do samotného modelu.

Provedené experimentální i numerické testování ukázalo možnosti dalších výzkumných směrů, mezi které by mohl patřit například výzkum odpružení kompozitních panelů vyrobených na připravené formě, výzkum vlivu tvaru na ohybové vlastnosti dalších druhů sendvičových panelů s ohledem na typy krycích potahů, případně samotných vláknových kompozitů a dále také modelování ohybového chování sendvičových materiálů s ohledem na vzdálenost podpěr, různé mezní stavy, typ ohybového testu apod.

LITERATURA

- [1] EHRENSTEIN, G. W. *Polymerní kompozitní materiály*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství SCIENTIA, 2009, 350 s. ISBN 978-80-86960-29-6
- [2] NIU, M. C. Y. *Composites Airframe Structures; Practical Design Information and Data*. 1st ed. Hong Kong: Conmilit Press Ltd., 1992, 664 s. ISBN 962-7128-06-6
- [3] VINSON, J. R., *The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials*. 1st ed. New York: CRC Press, 1999, 378 s. ISBN 978-1-5667-6699-9
- [4] BITZER, T. N. *Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing*. 1st ed. London: Chapman & Hall, 1997, 233 s. ISBN 978-94-011-5856-5
- [5] ZENKERT, D. *Nordic Industrial Fund, The Handbook of Sandwich Construction*. Worcestershire: EMAS Publishing, 1997, 447 s. ISBN 978-094-7817-961
- [6] Guide to Composites. Gurit. [online]. © 2016 [cit. 2016-01-14]. Dostupný z: <http://www.gurit.com/files/documents/guide-to-compositesv5webpdf.pdf>
- [7] CAMPBELL, F., *Structural Composite Materials*, Ohio, ASM International, 2010, 612 s., ISBN 978-161-5031-405
- [8] MIRACLES D. B., DONALDSON S.L. *ASM Handbook Volume 21: Composites*, Volume 21 Ohio: ASM International, 2001, 1201 s. ISBN: 978-0871707031
- [9] Sandwich in the Railway Industry 3A Composites Airex AG, [online]. © 2014 [cit. 2014-08-18]. Dostupný z: <http://composites-cis.com/proceedings/2013/ru/14.pdf>.
- [10] WANBERG, J. *Composite Materials Fabrication Handbook 2*. Stillwater: Wolfgang Publications Inc., 2010, 144 s. ISBN 978-1-929133-93-2
- [11] CASTANIÉ, B., BARRAU, J.-J., JAOUEN, J.-P. Theoretical and experimental analysis of asymmetric sandwich structures, *Composite Structures*. 2002, Vol. 55, Issue 3, p. 295-306. ISSN 0263-8223
- [12] DAVIES, J. M. *Lightweight Sandwich Construction*, 1st ed. Oxford: Blackwell Science Ltd., 2001, 370 s. ISBN: 978-0-632-04027-8
- [13] HexPly® Prepreg Technology. Hexcel Corporation. [online]. © 2015 [cit. 2016-01-19]. Dostupný z WWW: <http://www.hexcel.com/resources/technology-manuals>
- [14] LEHMHUS D., BUSSE M., HERRMANN A., KAYVANTASH K. *Structural Materials and Processes in Transportation*, 1st ed. New York: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2013, 598s. ISBN: 978-3527327874
- [15] DOSTAL C. A. *Engineered Materials Handbook: Composites*, Volume 1 Ohio: ASM International, 1987, 983 s. ISBN: 978-0871702791
- [16] GUPTA K. M. *Engineering Materials: Research, Applications and Advances*. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2014, 636 s. ISBN 978-1482257977

- [17] FENG L. Y., The Biomaterial for Green Composites. *JEC magazine*. 2010, Issue 55, p. 29-30. ISSN 1639-965X
- [18] LEE S. M. *Handbook of Composite Reinforcements*, 1st ed. New York: Wiley-VCH Verlag GmbH, 1992, 715 s. ISBN: 978-3527896325
- [19] JANČÁŘ, J. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003, 194 s. ISBN 80-214-2443-5
- [20] HAN, B., QIN, K.-K., YU, B., ZHANG, Q.-CH., CHEN, CH.-Q., LU, T. J. Design optimization of foam-reinforced corrugated sandwich beams, *Composite Structures*. 2015, Vol. 130, p. 51-62. ISSN 0263-8223
- [21] YAN, L.L., HAN, B., YU, B., CHEN, C.Q., ZHANG, Q.C., LU, T.J. Three-point bending of sandwich beams with aluminum foam-filled corrugated cores, *Materials & Design*. 2014, Vol. 60, p. 510-519. ISSN 0261-3069
- [22] XU, G., YANG, F., ZENG, T., CHENG, S., WANG, Z.-H. Bending behavior of graded corrugated truss core composite sandwich beams, *Composite Structures*. 2016, Vol. 138, p. 342-351. ISSN 0263-8223
- [23] HEIMBS, S., CICHOSZ, J., KLAUS, M., KILCHERT, S., JOHNSON, A.F. Sandwich structures with textile-reinforced composite foldcores under impact loads, *Composite Structures*. 2010, Vol. 92, Issue 6, p. 1485-1497. ISSN 0263-8223
- [24] GIBSON L. J., ASHBY M. F. *Cellular solids: structure and properties*, 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999, 510 s., ISBN 0521499119
- [25] AIREX T90, *Materiálový list*, AIREX AG. [online]. © 2015 [cit. 2015-10-03]. Dostupný z: <http://www.3accorematerials.com/products/airex/airexreg-t90.html>
- [26] Divinycell P, *Materiálový list*, DIAB Group. [online]. © 2015 [cit. 2015-10-17]. Dostupný z: <http://www.diabgroup.com/Products-and-services/Core-Material/Divinycell-P>
- [27] DIAB Sandwich Composite and Core Manual, DIAB Group. [online]. © 2015 [cit. 2015-10-17]. Dostupný z: <http://www.diabgroup.com/en-GB/Products-and-services/Core-Material>
- [28] ZHOU, J., HASSAN, M. Z., GUAN, Z., CANTWELL, W. J. The low velocity impact response of foam-based sandwich panels, *Composites Science and Technology*. 2012, Vol. 72, Issue 14, p. 1781-1790. ISSN 0266-3538
- [29] GARRIDO, M., CORREIA, J. R., KELLER, T. Effects of elevated temperature on the shear response of PET and PUR foams used in composite sandwich panels, *Construction and Building Materials*. 2015, Vol. 76, p. 150-157. ISSN 0950-0618

- [30] AIREX C70, *Materiálový list*, AIREX AG. [online]. © 2015 [cit. 2015-10-03]. Dostupný z: <http://www.3accorematerials.com/airex-c70-pvc-foam.html>
- [31] Divinycell H, *Materiálový list*, DIAB Group. [online]. © 2015 [cit. 2015-10-17]. Dostupný z: <http://www.diabgroup.com/Products-and-services/Core-Material/Divinycell-H>
- [32] YALKIN, H. E., ICTEN, B. M., ALPYILDIZ, T. Enhanced mechanical performance of foam core sandwich composites with through the thickness reinforced core, *Composites Part B: Engineering*. 2015, Vol. 79, p. 383-391. ISSN 1359-8368
- [33] JIANG, Z., YAO, K., DU, Z., XUE, J., TANG, T., LIU, W. Rigid cross-linked PVC foams with high shear properties: The relationship between mechanical properties and chemical structure of the matrix, *Composites Science and Technology*. 2014, Vol. 97, p. 74-80. ISSN 0266-3538
- [34] CHEMAMI, A., BEY, K., GILGERT, J., AZARI, Z. Behaviour of composite sandwich foam-laminated glass/epoxy under solicitation static and fatigue, *Composites Part B: Engineering*. 2012, Vol. 43, Issue 3, p. 1178-1184. ISSN 1359-8368
- [35] Core materials, NetComposites. [online]. © 2015 [cit. 2015-10-17]. Dostupný z: <http://www.netcomposites.com/guide/core-materials/44>
- [36] TUWAI, H., HOPKINS, M., VOLZ, J., ELGAWADY, M. A., MOHAMED, M., CHANDRASHEKHARA, K., BIRMAN, V. Evaluation of sandwich panels with various polyurethane foam-cores and ribs, *Composites Part B: Engineering*. 2015, Vol. 79, p. 262-276. ISSN 1359-8368
- [37] MOHAMED, M., ANANDAN, S., HUO, Z., BIRMAN, V., VOLZ, J., CHANDRASHEKHARA, K. Manufacturing and characterization of polyurethane based sandwich composite structures, *Composite Structures*. 2015, Vol. 123, p. 169-179. ISSN 0263-8223
- [38] GROVE, S. M., POPHAM, E., MILES, M. E. An investigation of the skin/core bond in honeycomb sandwich structures using statistical experimentation techniques, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2006, Vol 37, Issue 5, p. 804-812. ISSN 1359-835X
- [39] ASTM C297/C297M-04, Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions, *American standard*, 2010.
- [40] ASTM D1781 - 98, Standard Test Method for Climbing Drum Peel for Adhesives, *American standard*, 2012.
- [41] OKADA, R., KORTSCHOT, M. T. The role of the resin fillet in the delamination of honeycomb sandwich structures, *Composites Science and Technology*. 2002, Vol. 62, Issue 14, p. 1811-1819. ISSN 0266-3538
- [42] SEQUEIRA TAVARES, S., CAILLET-BOIS, N., MICHAUD, V., MÅNSON, J.-A.E. Vacuum-bag processing of sandwich structures: Role of

- honeycomb pressure level on skin–core adhesion and skin quality, *Composites Science and Technology*. 2010, Vol. 70, Issue 5, p. 797-803. ISSN 0266-3538
- [43] RION, J., LETERRIER, Y., MÅNSON, J.-A. E. Prediction of the adhesive fillet size for skin to honeycomb core bonding in ultra-light sandwich structures, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2008, Vol. 39, Issue 9, p. 1547-1555. ISSN 1359-835X
- [44] JEN, Y.-M., KO, CH.-W. LIN, H.-B. Effect of the amount of adhesive on the bending fatigue strength of adhesively bonded aluminum honeycomb sandwich beams, *International Journal of Fatigue*. 2009, Vol. 31, Issue 3, p. 455-462. ISSN 0142-1123
- [45] CORMASTER C2, *Materiálový list*, SCHÜTZ GmbH & Co. KGaA. [online]. © 2015 [cit. 2015-10-03]. Dostupný z: [http://www.schuetz.net/schuetz/SCH%20C3%9CTZ%20Germany%20\(HQ\)/en/INDUSTRIAL%20SERVICES/CORMASTER/CORMASTER%20Honeycombs/CORMASTER%20C2/](http://www.schuetz.net/schuetz/SCH%20C3%9CTZ%20Germany%20(HQ)/en/INDUSTRIAL%20SERVICES/CORMASTER/CORMASTER%20Honeycombs/CORMASTER%20C2/)
- [46] HexWeb™ Honeycomb Attributes and Properties, Hexcel. [online]. © 2015 [cit. 2016-01-07]. Dostupný z: http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb_Attributes_and_Properties.pdf
- [47] GIGLIO, M., GILIOLI, A., MANES, A. Numerical investigation of a three point bending test on sandwich panels with aluminum skins and Nomex™ honeycomb core, *Computational Materials Science*. 2012, Vol. 56, p. 69-78. ISSN 0927-0256
- [48] LIU, L., WANG, H., GUAN, Z. Experimental and numerical study on the mechanical response of Nomex honeycomb core under transverse loading, *Composite Structures*. 2015, Vol. 121, p. 304-314. ISSN 0263-8223
- [49] ROY, R., NGUYEN, K.H., PARK, Y.B., KWEON, J.H., CHOI, J.H. Testing and modeling of Nomex™ honeycomb sandwich Panels with bolt insert, *Composites Part B: Engineering*. 2014, Vol. 56, p. 762-769. ISSN 1359-8368
- [50] ZINNO, A., PROTA, A., DI MAIO, E., BAKIS, C.E. Experimental characterization of phenolic-impregnated honeycomb sandwich structures for transportation vehicles, *Composite Structures*. 2011, Vol. 93, Issue 11, p. 2910-2924. ISSN 0263-8223
- [51] WANG, D., BAI, Z. Mechanical property of paper honeycomb structure under dynamic compression, *MATERIALS & DESIGN*, 2015, Vol. 77, p. 59-64. ISSN 0261-3069
- [52] PFLUG, J., CZARNECKI, T. Continuous honeycomb production technology, *JEC Composites Magazine*. 2014, No. 87, p. 121-123. ISSN 1639-965X

- [53] Nidaplast®8, *Materiálový list*, Nidaplast. [online]. © 2014 [cit. 201-01-07]. Dostupný z: http://www.nidaplast.com/sites/default/files/downloads/FT_Nidaplast_8_0.pdf
- [54] ŘEHÁK, M., PRŮCHA, P. Porovnání technologií výroby vytvrzovacích přípravků z kompozitních materiálů, *TRANSFER*. 2011, Vol. 14, p. 5-10. ISSN 1801-9315
- [55] KARLSSON, K. F., TOMASÅSTRÖM, B. Manufacturing and applications of structural sandwich components, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1997, Vol. 28, Issue 2, p. 97-111. ISSN 1359-835X
- [56] RUSNÁKOVÁ, S., ŽALUDEK, M., BAKOŠOVÁ, D. Processing engineering of large composites structures using low-pressure vacuum infusion. *Manufacturing technology*. 2012, Vol. 12, No. 13, p. 83-86. ISSN 1213-2489
- [57] NF F01-281, Railway rolling stock - Parts in fibre-reinforced thermosetting composites, *French standard*, 1989.
- [58] HUDSON, C. W., CARRUTHERS, J. J., ROBINSON, A. M. Multiple objective optimization of composite sandwich structures for rail vehicle floor panels, *Composite Structures*. 2010, Vol. 92, Issue 9, p. 2077-2082. ISSN 0263-8223
- [59] BELINGARDI G., CAVATORTA M. P., DUELLA R., Material characterization of a composite-foam sandwich for the front structure of a high speed train, *Composite Structures*. 2003, vol. 61, p. 13-25. ISSN 0263-8223
- [60] CASTANIÉ, B., BOUVET, C., AMINANDA, Y., BARRAU, J.-J., THEVENET, P. Modelling of low-energy/low-velocity impact on Nomex honeycomb sandwich structures with metallic skins, *International Journal of Impact Engineering*. 2008, Vol. 35, Issue 7, p. 620-634. ISSN 0734-743X
- [61] HERUP, E. J., PALAZOTTO, A. N. Low-velocity impact damage initiation in graphite/epoxy/Nomex honeycomb-sandwich plates, *Composites Science and Technology*. 1998, Vol. 57, Issue 12, p. 1581-1598. ISSN 0266-3538
- [62] RAJANEESH, A., SRIDHAR, I., RAJENDRAN, S. Relative performance of metal and polymeric foam sandwich plates under low velocity impact, *International Journal of Impact Engineering*. 2014, Vol. 65, p. 126-136. ISSN 0734-743X
- [63] ZHOU, J., GUAN, Z.W., CANTWELL, W.J. The impact response of graded foam sandwich structures, *Composite Structures*. 2013, Vol. 97, p. 370-377. ISSN 0263-8223
- [64] YAHAYA, M. A., RUAN, D., LU, G., DARGUSCH, M. S. Response of aluminium honeycomb sandwich panels subjected to foam projectile impact

- An experimental study, *International Journal of Impact Engineering*. 2015 Vol. 75, p. 100-109. ISSN 0734-743X
- [65] ARTEIRO, A., REIS, A. L.M.A. NÓVOA, P. J.R.O. SILVA, L. F.M., ZUPAN, M., MARQUES, A. T. Low velocity impact and flexural performance of sandwich structures with cork and polymer foam cores, *Ciência & Tecnologia dos Materiais*. 2013, Vol. 25, Issue 2, p. 79-84. ISSN 0870-8312
- [66] TORRE, L., KENNY, J.M. Impact testing and simulation of composite sandwich structures for civil transportation, *Composite Structures*. 2000, Vol. 50, Issue 3, p. 257-267. ISSN 0263-8223
- [67] NING, H., VAIDYA, U., JANOWSKI, G. M., HUSMAN, G. Design, manufacture and analysis of a thermoplastic composite frame structure for mass transit, *Composite Structures*. 2007, Vol. 80, Issue 1, p. 105-116. ISSN 0263-8223
- [68] NING, H., JANOWSKI, G. M., VAIDYA, U., HUSMAN, G. Thermoplastic sandwich structure design and manufacturing for the body panel of mass transit vehicle, *Composite Structures*. 2007, Vol. 80, Issue 1, p. 82-91. ISSN 0263-8223
- [69] NING, H., PILLAY, S., VAIDYA, U. Design and development of thermoplastic composite roof door for mass transit bus, *Materials & Design*. 2009, Vol. 30, Issue 4, p. 983-991. ISSN 0261-3069
- [70] SHIN, K. B., LEE, J. Y., CHO, S. H. An experimental study of low-velocity impact responses of sandwich panels for Korean low floor bus, *Composite Structures*. 2008, Vol. 84, Issue 3, p. 228-240. ISSN 0263-8223
- [71] DI BELLA, G., CALABRESE, L., BORSELLINO, C. Mechanical characterization of a glass/polyester sandwich structure for marine applications, *Materials & Design*. 2012, Vol. 42, p. 486-494. ISSN 0261-3069
- [72] GARRIDO, M., CORREIA, J. R., KELLER, T., BRANCO, F. A. Adhesively bonded connections between composite sandwich floor panels for building rehabilitation, *Composite Structures*. 2015, Vol. 134, p. 255-268. ISSN 0263-8223
- [73] GARRIDO, M., CORREIA, J. R., KELLER, T., BRANCO, F. A. Connection systems between composite sandwich floor panels and load-bearing walls for building rehabilitation, *Engineering Structures*. 2016, Vol. 106, p. 209-221. ISSN 0141-0296
- [74] AWAD, Z.K., ARAVINTHAN, T., ZHUGE, Y. Experimental and numerical analysis of an innovative GFRP sandwich floor panel under point load, *Engineering Structures*. 2012, Vol. 41, p. 126-135. ISSN 0141-0296

- [75] SUBA, O. *Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů*. 3. vyd.; Zlín, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 112 s. ISBN 978-80-7318-948-8
- [76] KOVAŘÍK, V. *Válcové skořepiny vrstevnaté struktury*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství ACADEMIA, 1985, 340 s.
- [77] ACHILLES, P. *Design of Sandwich Structures*. Cambridge, 1998. Disertační práce. Cambridge University, Engineering Department. Vedoucí práce Dr M.P.F. Sutcliffe
- [78] SMIDT, S. Bending of curved sandwich beams. *Composite Structures*. 1995, vol. 33, p. 211-225. ISSN 0263-8223
- [79] SMIDT, S. Bending of curved sandwich beams, a numerical approach. *Composite Structures*. 1996, vol. 34, p. 279-290. ISSN 0263-8223
- [80] TOFT, G. Stresses in a curved laminated beam. *Fibre Science and Technology*, 1983, vol. 19, Issue 4, p. 243-267, ISSN 0015-0568
- [81] BABA, B.O., THOPPUL, S. Experimental evaluation of the vibration behavior of flat and curved sandwich composite beams with face/core debond. *Composite Structures*. 2009, vol. 91, p. 110-119. ISSN 0263-8223
- [82] KAPPEL, E. Spring-in of curved CFRP/foam-core sandwich structures, *Composite Structures*. 2015, vol. 128, p. 155-164. ISSN 0263-8223
- [83] FERNLUND, G. Spring-in of angled sandwich panels, *Composites Science and Technology*. 2005, vol. 65, p. 317-323. ISSN 0266-3538
- [84] STEEVES, C. A., FLECK, N. A. Collapse mechanisms of sandwich beams with composite faces and a foam core, loaded in three-point bending. Part I: analytical models and minimum weight design, *International Journal of Mechanical Sciences*. 2004, Vol. 46, Issue 4, p. 561-583. ISSN 0020-7403
- [85] STEEVES, C. A., FLECK, N. A. Collapse mechanisms of sandwich beams with composite faces and a foam core, loaded in three-point bending. Part II: experimental investigation and numerical modelling, *International Journal of Mechanical Sciences*. 2004, Vol. 46, Issue 4, p. 585-608. ISSN 0020-7403
- [86] CRUPI, V., EPASTO, G., GUGLIELMINO, E. Collapse modes in aluminium honeycomb sandwich panels under bending and impact loading, *International Journal of Impact Engineering*. 2012, Vol. 43, p. 6-15. ISSN 0734-743X
- [87] ZENKERT, D., BURMAN, M. Failure mode shifts during constant amplitude fatigue loading of GFRP/foam core sandwich beams, *International Journal of Fatigue*. 2011, Vol. 33, Issue 2, p. 217-222. ISSN 0142-1123
- [88] BANGHAI, J., ZHIBIN, L., FANGYUN, L. Failure mechanism of sandwich beams subjected to three-point bending, *Composite Structures*. 2015, Vol. 133, p. 739-745. ISSN 0263-8223
- [89] NDT 64 4401, Laminátové (kompozitové) díly se sníženou hořlavostí pro aplikace v kolejových vozidlech, *Technická norma společnosti ŠKODA TRANSPORTATION a.s.*, 2013.
- [90] PH840-300-42, *Materiálový list*, Gurit. [online]. © 2015 [cit. 2015-09-28]. Dostupný z: <http://gurit.fangle.co.uk/files/documents/PH840-300-42.pdf>

-
- [91] Prepregs. *Technical brochure*, Gurit. [online]. © 2015 [cit. 2015-10-03]. Dostupný z: <http://www.gurit.com/files/documents/prepreg-brochurev3pdf.pdf>
- [92] ASTM C393/C393M-11, Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure, *American standard*, 2012.
- [93] WHITEHOUSE, D. *Handbook of surface and nanometrology*. 2nd ed., New York: CRC Press, 2011, 1000 s., ISBN 9781420082012
- [94] MELOUN, M., MILITKÝ, J. *Interaktivní statistická analýza dat*. 3. vyd. Praha: Karolinum, 2012, 953 s., ISBN 978-80-246-2173-9

SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA***Publikace evidované v databázi Web of Science***

1. **Fojtl, L.**, Rusnakova, S., Zaludek, M., Rusnak, V.: Influence of Type and Number of Prepreg Layers on Flexural Strength and Fatigue Life of Honeycomb Sandwich Structures, *Materiali in Tehnologie*. 2015, Issue 4, Vol. 49, pp. 515-519, ISSN 1580-2949
2. Rusnak, V., Rusnakova, S., **Fojtl, L.**, Zaludek, M.: Flame Resistance and Mechanical Properties of Composites Based on New Advanced Resin System Fr 4/12, *Materiali in Tehnologie*. 2015, Issue 5, Vol. 49, pp. 821-824, ISSN 1580-2949
3. **Fojtl, L.**, Rusnakova, S., Zaludek, M.: Influence of Honeycomb Core Compression on the Mechanical Properties of the Sandwich Structure. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, Vol. 486, pp. 283-288. ISSN 1660-9336
4. Rusnakova, S., Zaludek, M., **Fojtl, L.**, Rusnak, V.: Design and Verification of Sandwich Structures for High Speed Trains. *Key Engineering Materials*. 2013, Vol. 586, pp. 72-75. ISSN 1013-9826
5. Rusnakova, S., Dvorak, Z., **Fojtl, L.**, Zaludek, M.: Přítlačná membrána pro vakuové lisování dílců z polymerních kompozitů, č. dokumentu 304597, patent, UTB ve Zlíně, 2014

Publikace evidované v databázi SCOPUS

1. **Fojtl, L.**, Rusnakova, S., Zaludek, M., Rusnak, V.: The Effect of Beam Curvature on Bending Properties of Sandwich Structures. *Manufacturing Technology*, 2016. Vol 16. no. 1. pp. 81-86. ISSN 1213-2489
2. Rusnakova, S., **Fojtl, L.**, Zaludek, M., Rusnak, V.: Design of Material Composition and Technology Verification for Composite Front End Cabs. *Manufacturing Technology*, 2014. Vol 14. no. 4. pp. 607-611. ISSN 1213-2489
3. Lukovics, I., Cop, J., **Fojtl, L.**, Lukovics, P., Pata, V.: Prediction of Surface Product Quality and Operation Reliability of Grinding Machines. *Manufacturing Technology*, 2014, Vol 14. no. 2., pp. 213-217. ISSN 1213-2489
4. Cop, J., **Fojtl, L.**, Bilek, O., Pata, V.: Influence of Finishing Operations and Melt Flow Index on Surface Quality of Injection Moulded Parts. *Manufacturing Technology*. 2016. ISSN 1213-2489 – Přijato, v tisku
5. Suba, O., **Fojtl, L.**, Suba jr, O., Sykorova, L., Rusnakova, S., Badurova, J.: On Flexural Stiffness of Polymer Sandwich Walls. *Materials Science Forum*. 2016. ISSN 1662-9752 - Přijato, v tisku

Ostatní publikace

1. **Fojtl, L.**, Rusnakova, S., Zaludek, M., Rusnak, V.: An Experimental Analysis of Bending Behavior of Sandwich Constructions for Transport Industry. *Applied Mechanics and Materials*. 2016, Vol. 827, pp. 61-64. ISBN 978-3-03835-531-1
2. Rusnakova, S., **Fojtl, L.**, Zaludek, M., Rusnak, V.: Analysis of Mechanical and Impact Properties of Prepreg Composites under Elevated Temperature. *Applied Mechanics and Materials*. 2016, Vol. 827, pp. 141-144. ISBN 978-3-03835-531-1
3. Rusnakova, S., **Fojtl, L.**, Zaludek, M., Capka, A., Rusnak, V.: Experimental Investigation of Possibilities Vacuum Infusion Technology to Produce Composite Ribs. *Advanced Materials Research*. 2015, Vol. 1120-1121, pp. 531-534. ISBN 978-3-03835-514-4
4. **Fojtl, L.**, Rusnakova, S., Zaludek, M., Capka, A., Rusnak, V.: Characterization of Carbon Composites Properties for Application in Sport Industry. *Advanced Materials Research*. 2015, Vol. 1120-1121, pp. 515-518. ISBN 978-3-03835-514-4
5. **Fojtl, L.**, Rusnakova, S., Zaludek, M., Rusnak, V.: Experimental Characterization of Multiaxial Glass Laminates for Front End Cab. *Applied Mechanics and Materials*. 2015, Vol. 752, pp. 291-294. ISBN 978-3-03835-442-0
6. **Fojtl, L.**, Rusnakova, S., Zaludek, M., Rusnak, V.: Influence of Adhesive Type on Flexural Properties of Sandwich Structures. *Applied Mechanics and Materials*. 2015, Vol. 732, pp. 373-376. ISBN 978-3-03835-413-0
7. Zaludek, M., **Fojtl, L.**, Rusnakova, S., Rusnak, V.: Experimental Study of Mechanical Behavior of HPL Composites. *Applied Mechanics and Materials*. 2015, Vol. 732, pp. 139-142. ISBN 978-3-03835-413-0
8. **Fojtl, L.**, Rusnakova, S., Labas, V., Bosak, O., Seliga, E., Zaludek, M.: Influence of Carbon Black Type on Electrical Conductivity of FRC in Automotive, *Chemické Listy S*, Issue s1, Vol. 107, pp. 74-76, 2013, ISSN 0009-2770
9. **Fojtl, L.**, Rusnakova, S., Zaludek, M., Kubliha, M., Bosak, O.: Carbon Fibre Composites. Part I: Frequency Dependence of the Electrical Conductivity, *Chemické Listy S*, Issue s1, Vol. 107, pp. 114-115, 2013, ISSN 0009-2770
10. **Fojtl, L.**, Rusnakova, S., Zaludek, M., Minarik, S., Bosak, O.: Carbon Fibre Composites. Part II: Temperature Dependence of the Electrical Conductivity, *Chemické Listy S*, Issue s1, Vol. 107, pp. 116-117, 2013, ISSN 0009-2770

11. Rusnáková, S., Dvorak, Z., **Fojtl, L.**, Zaludek, M.: Sestava formy pro vakuové lisování dílců z polymerních kompozitů, (F), č. dokumentu 25664, užitečný vzor, UTB ve Zlíně, 2013

Konferenční příspěvky (Mezinárodní konference)

1. Capka, A., **Fojtl, L.**, Rusnáková, S., Zaludek, M.: Product dependability testing of polymer composite materials, Production Management and Engineering Sciences - Scientific Publication of the International Conference on Engineering Science and Production Management, ESPM 2015, 16. - 17. dubna 2015, Tatranská Štrba, Slovensko, pp. 361-364. ISBN 978-113802856-2
2. Rusnáková, S., Zaludek, M., **Fojtl, L.**, Capka, A., Drabek, M.: výzkum adheze uhlíkových kompozitů z tkaniny kordcarbon. Polymerní kompozity, PK 2016, 20. – 21. května 2016, Kurdějov, Česká republika, pp. 108-115. ISBN 978-80-905224-2-8
3. **Fojtl, L.**, Rusnáková, S., Zaludek, M., Rusnak, V., Capka, A.: Evaluation of Mechanical Performance of Sandwich Structures for Transport Industry. *Experimentl Stress Analysis 2015 – Book of Extended Abstracts*, 53rd International Conference EAN 2015, 1. - 4. června 2015, Český Krumlov, Česká republika, pp. 39-40. ISBN 978-80-01-05734-6
4. Rusnáková, S., Zaludek, M., **Fojtl, L.**, Capka, A., Rusnak, V.: Experimental Determination of Mechanical Properties of Prepreg Carbon Composites Designed for Bicycle Rims. *Experimentl Stress Analysis 2015 – Book of Extended Abstracts*, 53rd International Conference EAN 2015, 1. - 4. června 2015, Český Krumlov, Česká republika, pp. 153-154. ISBN 978-80-01-05734-6
5. **Fojtl, L.**, Rusnáková, S., Zaludek, M., Rusnak, V.: Effect of Adhesive Type on Peel Strength of Sandwich Structures. *Experimentl Stress Analysis 2014 – Book of Extended Abstracts*, 52nd International Conference EAN 2014, 2. - 5. června 2014, Mariánské lázně, Česká republika, pp. 29-30. ISBN 978-80-261-0376-9
6. Rusnáková, S., Zaludek, M., **Fojtl, L.**, Rusnak, V.: Experimental Study of Mechanical Behavior of HPL Composites. *Experimentl Stress Analysis 2014 – Book of Extended Abstracts*, 52nd International Conference EAN 2014, 2. - 5. června 2014, Mariánské lázně, Česká republika, pp. 179-180. ISBN 978-80-261-0376-9
7. **Fojtl, L.**, Rusnáková, S., Zaludek, M.: Impact performance on sandwich structures produced by Crush-Core technology. *Experimentl Stress Analysis 2013 – CD sborník - Extended Abstracts*, 51th International Conference EAN 2013, 11. - 13. června 2013, Litoměřice, Česká republika. ISBN 978-80-7414-579-7

8. **Fojtl, L.**, Rusnakova, S., Zaludek, M.: Study of resin content influence on flexural strength and fatigue of honeycomb sandwich structures. *The 5th International Conference on Structural Analysis of Advanced Materials – CD sborník*. ICSAAM 2013, 23 – 26th September, 2013, Kos Island, Greece.

Konferenční příspěvky (Národní konference)

1. **Fojtl, L.** et al. Vliv povlakování dutin forem na vizuální a reologické vlastnosti polymerních materiálů. *Plastko*. 2016, Zlín, Univerzita Tomáše Bati, pp. 244-247, 978-80-7454-590-0

CV AUTORA

Jméno a příjmení, titul: Ladislav Fojtl, Ing.
Datum a místo narození: 24. ledna 1988, Šumperk
Adresa: Nový Malín 711, Nový Malín, 788 03
Telefon: +420 776 199 545
E-mail: fojtl@ft.utb.cz
LinkedIn: <https://cz.linkedin.com/in/ladislav-fojtl-jr-947aa4b4>
Státní příslušnost: česká

Vzdělání:

2012 – dosud Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Obor/specializace: Nástroje a procesy

2010 – 2012 Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Studijní program: Procesní inženýrství
Studijní obor: Konstrukce technologických zařízení

2007 – 2010 Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Studijní program: Procesní inženýrství
Studijní obor: Technologická zařízení

2003 – 2007 VOŠ a SPŠ Šumperk
Studijní obor: Strojírenství

Pracovní zkušenosti:

01/01/13 – doposud UTB ve Zlíně, Centrum polymerních systémů
Pozice: Výzkumný projektový pracovník na níže uvede-
ných projektech:

06/2014 – doposud Projekt TE01020216 - Projekt Centra kompetence „Cen-
trum pokročilých polymerních a kompozitních materiálů“
v konsorciu UTB a 5 firem (Fatra a.s., Spur a.s., Quinn
Plastics s.r.o., **Zlin Precision s.r.o.** a 5M s.r.o.)

01/2013 – 05/2014 Projekt TA01011211 - Výzkum a vývoj funkčních vlastností prostředků pasivní ochrany pasažérů automobilů použitím inovativních polymerních materiálů a výrobních technologií (ve spolupráci s firmou INDET SAFETY SYSTEMS a.s.)

Doplňující informace o vzdělání:

Bakalářská práce oceněna firmou Hella Autotechnik spol, s.r.o., diplomová práce a výsledky během studia oceněny rektorem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně.

Členství:

Akademický senát Fakulty technologické (členem od 01/2012, následně v 01/2015 zvolen pro 2. funkční období, člen ekonomické komise).

Pedagogická činnost:

T1PR – Základy výrobních procesů
T1CD, TQCD – Úvod do CAD
TQPP, TQPK1 – Počítačová podpora konstrukce
T4PK – Počítačová podpora konstrukce II
T6CD3 – CAD III

Znalosti a dovednosti:

Jazykové

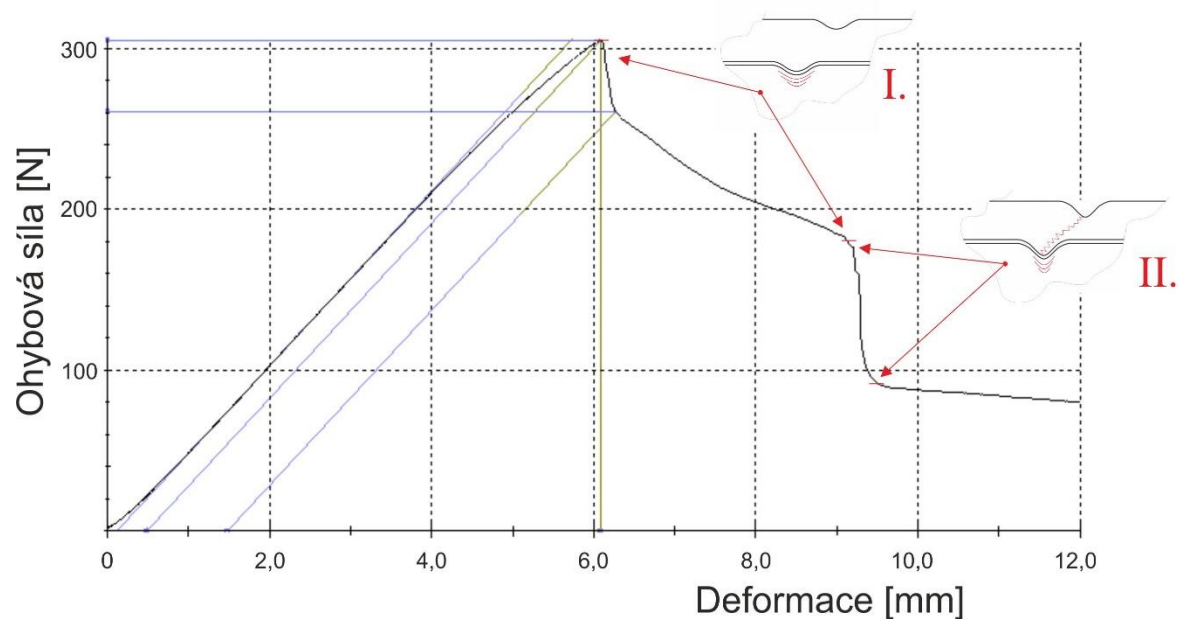
Čeština – mateřský jazyk – C2
Slovenština – pokročilý – C1
Angličtina – pokročilý – C1
Němčina – začátečník – A1

Počítačové

AutoCAD – pokročilý
CorelDraw – pokročilý
CATIA – pokročilý
SolidWorks – středně pokročilý
NX – středně pokročilý
Autodesk Moldflow Insight – pokročilý
CadMould 3D-F – středně pokročilý

PŘÍLOHA PI: OHYBOVÉ KŘIVKY

- Ohybová křivka sendvičové konstrukce S5_B_R/ $t_c=0$ (+25 °C)



- Ohybová křivka sendvičové konstrukce S5_A_R/ $t_c=40$ (+25 °C)

