

# Kompozitní materiály ve stavebnictví

Tomáš Závodný

---

Bakalářská práce  
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2015/2016

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš Závodný**  
Osobní číslo: **T14903**  
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Kompozitní materiály ve stavebnictví**

Zásady pro vypracování:

1. Literární rešerše na dané téma
2. Kompozitní materiály ve stavebním průmyslu (vlastnosti, aplikace, požadavky)
3. Navrhněte kompozitní strukturu pro dané požadavky
4. Experimentální testování dle daných norem
5. Vyhodnocení naměřených dat
6. Závěr a diskuze výsledků

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. Bareš R. A. Kompozitní materiály. Praha, 1988.
2. Ehrenstein, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha : Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
3. Táborský, L., Šebo, P. Konštrukčné materiály spevnenými vláknami. Bratislava, 1982.
4. Laš, V. Mechanika kompozitních materiálů. Plzeň., 2004.
5. Machek, V.; Sodomka J. Polymery a kompozity s polymerní matricí. Praha, 2008. ISBN 978-80-01-03937-4.
6. Agarval, B.D., Broutman, L.J. Vláknové kompozity. SNTL Praha, 1987.
7. Schätz, M., Vondráček, P. Zkoušení polymerů. Praha, 1988.

Vedoucí bakalářské práce:

**doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

**8. ledna 2016**

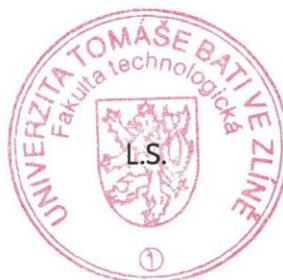
Termín odevzdání bakalářské práce:

**20. května 2016**

Ve Zlíně dne 3. února 2016

doc. Ing. František Buňka, Ph.D.

*děkan*



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.

*ředitel ústavu*

Příjmení a jméno: TOPIŠ ZÁVODNÝ

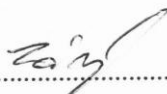
Obor: TECHNOLOGICKÁ ZAŘÍZENÍ

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně 25.4.2016

  
.....

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## **ABSTRAKT**

Cílem této práce je v první řadě podat základní seznámení s kompozitními materiály, jejich rozdělení podle různých typů vláken, nebo podle druhu použité matrice. Další část práce se blíže zabývá kompozitními materiály ve stavebním průmyslu. Zaměřuje se na jejich vlastnosti, požadavky a různé použití ve stavebnictví. Poslední část se věnuje testování daných sendvičových struktur v závislosti na typu použitého lepidla.

Klíčová slova: Kompozit, vlákno, matrice, stavebnictví, výztuž

## **ABSTRACT**

The aim of this work is in the first place to provide a basic introduction to composite materials, their distribution according to various types of fiber or by the type of matrix used. The next part of the work deals closer with composite materials in the building industry. It focuses on their properties, requirements and various applications in the building industry. The last part is dedicated to the testing of the sandwich structures according to the type of adhesive used.

Keywords: Composite, fiber, matrix, building industry, reinforcement

Chtěl bych poděkovat vedoucímu této bakalářské práce doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a ochotu, které mi pomohli při psaní této práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě Forlit & Metal, a.s. za nařezání vzorků potřebných k testování.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>9</b>
<b>1 ZÁKLADY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ</b> .....	<b>10</b>
1.1    OBECNÁ CHARAKTERISTIKA .....	10
1.1.1    Požadavky na kompozitní materiály.....	10
1.1.2    Vlastnosti kompozitního materiálu.....	11
1.2    DĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....	12
1.2.1    Matrice v kompozitech .....	13
1.2.2    Výztuž v kompozitech .....	14
<b>2 KOMPOZITNÍ MATERIÁL Y VE STAVEBNÍM PRŮMYSLU</b> .....	<b>18</b>
2.1    KOMPOZITNÍ MATERIÁLY NA BÁZI DŘEVA .....	18
2.2    SENDVIČOVÉ MATERIÁLY .....	19
2.2.1    Materiály sendvičového jádra.....	20
2.2.2    Metal bonding.....	23
2.3    POLYMERBETON .....	26
2.4    POUŽITÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ VE STAVEBNICTVÍ .....	27
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>30</b>
<b>3 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE</b> .....	<b>31</b>
<b>4 MECHANICKÉ ZKOUŠKY SENDVIČOVÝCH STRUKTUR</b> .....	<b>32</b>
4.1    TŘÍBODOVÝ OHYB .....	32
4.2    FLATWISE TEST (TAH NA PLOCHO) .....	33
4.3    ZKOUŠKA ODLUPEM.....	34
<b>5 TESTOVÁNÍ SENDVIČOVÝCH STRUKTUR</b> .....	<b>35</b>
5.1    PEVNOST – ÚNOSNOST A TUHOST CELOHLINÍKOVÝCH SENDVIČOVÝCH STRUKTUR.....	35
5.2    ANALÝZA ADHEZE VRSTEV SENDVIČE NEREZ-HLINÍK-NEREZ.....	39
5.2.1    Mikročistota nerezové oceli.....	39
5.2.2    Zkouška odlupem .....	42
5.2.3    Zkouška třibodovým ohybem.....	49
5.2.4    Flatwise test (zkouška tahem na plocho).....	61
5.3    ANALÝZA ADHEZE HLINÍKOVÝCH A OCELOVÝCH SENDVIČŮ .....	67
5.3.1    Zkouška třibodovým ohybem.....	68
5.3.2    Flatwise test .....	73
5.4    ANALÝZA ADHEZE OCELOVÝCH A HLINÍKOVÝCH SENDVIČŮ .....	75
5.4.1    Zkouška třibodovým ohybem.....	75
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>84</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>86</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>90</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>91</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>94</b>



## ÚVOD

S kompozitními materiály se v dnešní době člověk setkává téměř na každém kroku. Vyskytují se v různých formách a průmyslových odvětvích, ať už v textilním průmyslu ve formě vláken, nebo v letectví či stavebnictví.

Jejich struktura se odvozuje od materiálů, které se nacházejí v přírodě. Za nejvíce typický přírodní materiál se dá považovat dřevo.

Jako kompozity bývají označovány ty materiály, které vzniknou složením dvou a více složek s rozdílnými vlastnostmi. Výsledkem je tedy nový materiál se specifickými vlastnostmi.

Z historického hlediska se dá říct, že již ve starověku se lidé setkávali s využitím kompozitního materiálu. Příkladem bylo použití hlíny pro stavbu prvních příbytků, která byla obvykle vyztužena slámou nebo rákosem. Vznikl tak materiál, který měl lepší vlastnosti než samotná hlína. Také Římané používali pro některé své monumentální stavby velmi starý kompozitní materiál, cementový beton. Dalším příkladem byl mongolský luk, který byl tvořen kombinací dřeva, šlach a rohoviny.

Od začátku 20. století se začalo kompozitům věnovat čím dál tím více pozornosti. S rozvojem techniky a objevení nových kompozitních materiálů, jako beton vyztužený ocelí, se jejich použití začínalo široce uplatňovat ve stavebnictví (výstavba mostů či dálnic), v leteckém nebo loďařském průmyslu.

Hlavní myšlenkou této práce je seznámit čtenáře s kompozitními materiály ve stavebním průmyslu, jejich aplikace a vlastnosti.

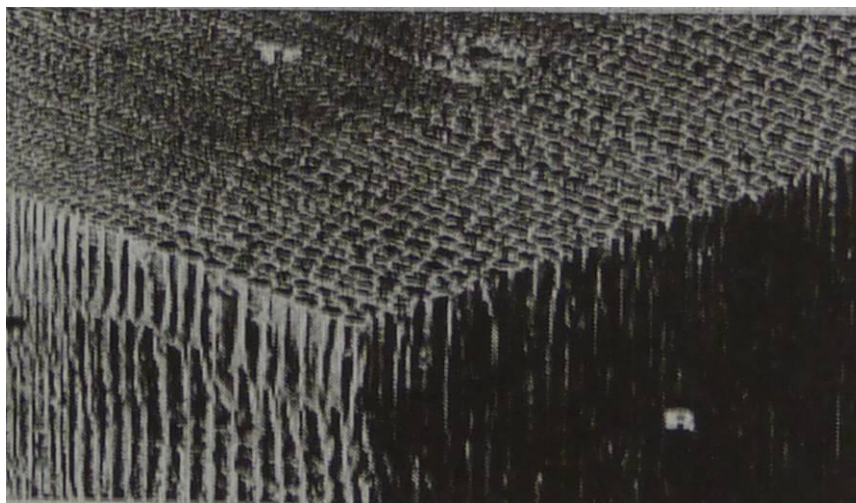
## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 ZÁKLADY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Již od doby, kdy lidstvo začalo vytvářet umělé předměty, bylo nezbytné řešit problém volby nejvhodnějšího materiálu. Původně cesta k lepším materiálům znamenala hledání mezi existujícími materiály, dnes se na základě znalostí základních mechanismů působících v pevných materiálech vytvářejí materiály nové. [1]

### 1.1 Obecná charakteristika

Kompozitními materiály (kompozity) rozumíme heterogenní (různorodé) materiály složené ze dvou nebo více fází, které se vzájemně výrazně liší svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Obvykle bývá jedna fáze v kompozitu spojitá, takovou fázi nazýváme matrice. Nespojitou fází je potom nazývána výztuž. V porovnání s matricí má výztuž obvykle výrazně lepší mechanické vlastnosti (modul pružnosti, pevnost, tvrdost atd.) a hlavním cílem vyztužení je tedy zlepšení uvedených vlastností. [7]



Obr. 1. Příklad kompozitní struktury – mikrostruktura dřeva [2]

#### 1.1.1 Požadavky na kompozitní materiály

Většina klasických materiálů nespĺňuje určité požadavky, které jsou na daný materiál kladeny. Tvorba nových kompozitních materiálů má tedy za úkol tyto požadavky vyplnit. Jedná se nejvíce o tyto požadavky:

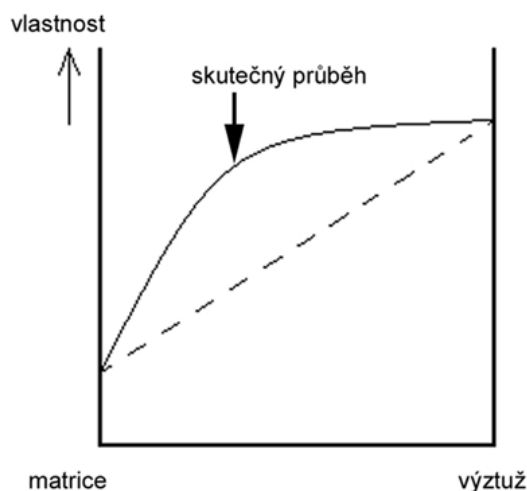
- zvýšení pevnosti (poměru meze pevnosti a hustoty)
- zvýšení houževnatosti (odstranění křehkosti)

- zmenšení teplotní roztažnosti
- zvýšení tuhosti (poměru Youngova modulu a hustoty)
- snížení negativního dopadu na životní prostředí
- redukce hmotnosti (snížení hustoty)
- zvýšení korozní, případně chemické odolnosti
- snížení ceny [2]

### 1.1.2 Vlastnosti kompozitního materiálu

Pro kompozitní materiály bývá typický synergický efekt neboli synergismus. Za synergický efekt se označuje efekt, kdy v kompozitu dochází ke kombinaci pozitivních vlastností jeho složek tak, že celek přesahuje poměrný součet složek (viz obr. 2.). Vlastnosti kompozitu jsou tedy lepší, než by odpovídalo pouhému poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek.

Zpravidla se snažíme připravit kompozitní materiál tak, aby v nich byl synergický efekt co nejsilnější, a to především u těch vlastností, na kterých nám nejvíce záleží. Existence synergismu je tedy velice významná, neboť vede k získávání materiálů kvalitativně zcela nových vlastností. [2,7]



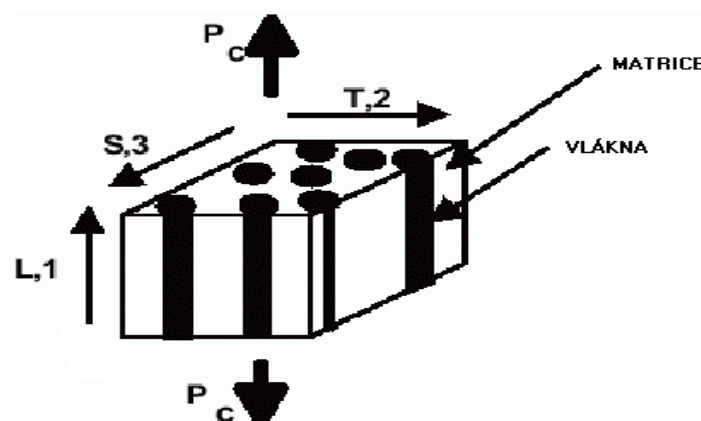
Obr. 2. Synergický efekt v kompozitním materiálu [7]

Vláknové polymerní kompozitní materiály jsou ceněny a používány pro svou lehkost při zachování vysokých hodnot pevnosti a tuhosti. U kompozitního materiálu obvykle platí, že

jeho mechanické vlastnosti stoupají se zvyšujícím se obsahem vyztužující složky až do podílu 80%. Vlákna se musí dokonale smočit pojivem – pryskyřicí. Dobrá adheze mezi vlákny a matricí zaručuje pevnost vláken a tím i vynikající přenos síly z matrice na výztuž. Na povrchu proto bývají vlákna chemicky upravována tak, aby se na rozhraní mezi matricí a vláknem vytvořily pevné chemické vazby.

Pro kompozity je oproti homogenním materiálům charakteristická anizotropie – vlastnosti kompozitu intenzivně závisí na směru uložení (orientaci) výztužných vláken. [3]

Typická je pro kompozitní materiály hlavně příčná rovina izotropie. Z hlediska symetrie to znamená, že se může kompozit natočit o libovolný úhel kolem osy kolmé na rovinu izotropie, aniž by se změnila jeho vlastnosti. Většina kompozitů má jednu nekonečnou osu symetrie – symetrie válce nebo elipsoidu. Tuto symetrii musí mít všechny jejich vlastnosti. [4]



Obr. 3. Jednoosé uspořádání vláken. [4]

## 1.2 Dělení kompozitních materiálů

Kompozitní materiály lze rozdělit dle několika základních hledisek. **Podle materiálu matrice** se dělí na:

- kompozity s organickou (polymerní) matricí
- kompozity s kovovou matricí
- kompozity s keramickou matricí

**Podle tvaru zpevňujícího komponentu (výztuže) se kompozity dělí na:**

- vláknové kompozity – zpevněné vlákny
- částicové kompozity [1]

### **1.2.1 Matrice v kompozitech**

Hlavním úkolem matrice je spojovat vyztužující fázi a chránit ji před vlivy okolí. Funkci pojiva by si matrice měla udržet i po prvních poruchách vláknové výztuže. Z důvodu malých průřezových rozměrů se vlákna nemohou používat v technických aplikacích přímo, a proto jsou vkládána do matrice. Jestliže jsou vlákna namáhána až do meze pevnosti napětím, které přenáší matrice, dosáhne se nejvyššího ztužení. Matrice také plní důležitou funkci při spojení vláken do vhodné struktury a jejich ochraně před povrchovým poškozením, které vede ke ztrátě pevnosti vláken. [5,1]

#### **Kovové matrice**

Nejrozšířenější z kovových matric je hliník a jeho slitiny. Jako výztuž jsou používána borová, uhlíková, popř. křemíkokarbidová vlákna. Použití kovové matrice pro kompozity má oproti polymerní matici některé výhody: elektrická vodivost, teplotní vodivost, nehořlavost, tvárnost, atd. Matrice může být vytvořena z prášku (plazmové nanášení), fólie (lisování za tepla), popř. taveniny (lití). Dalšími často používanými maticemi jsou slitiny titanu. Oproti hliníku (teplota použití 500-600 °C) snesou titanové kompozity vyšší teploty (1000-1200 °C). [1]

#### **Polymerní matrice**

Pro polymerní matrice kompozitů se mohou používat jak reaktoplasty tak termoplasty. Z reaktoplastů se jedná o celou řadu pryskyřic, které se volí podle vlastností, ceny a podle použití v různých odvětvích výroby. U vlastností jde hlavně o chemickou odolnost, nehořlavost, houževnatost, popř. dobrou tepelnou odolnost. Mezi nejznámější pryskyřice patří pryskyřice epoxidové, polyesterové, vinylesterové, polyamidové a další. Termoplasty mají výhodu v kratším výrobním procesu, a tak se nemusí počítat s vytvrzováním matrice. Pro matrice z termoplastů se nejčastěji volí polypropylen, polyamid, polyimid a další. V obou případech se určuje výběr materiálu podle požadovaných vlastností a ceny výrobku. [8]

## Keramické matrice

Keramika je vynikajícím materiálem s mnoha přednostmi: vysoké pevnosti i při vysokých teplotách, malá hustota, odolnost proti oxidaci. Nevýhodou je křehkost. Jako materiál matrice se většinou používají oxidy, nitridy nebo karbidy různých prvků (hliník, hořčík, křemík, sklo). Pro vlákna je vhodný molybden, ocel, kolumbium. Do skupiny kompozitů s keramickou matricí bývají obvykle řazeny i kompozity se skleněnými a uhlíkovými matricemi. [1,7]

### 1.2.2 Výztuž v kompozitech

Mechanismus kompozitních materiálů je silně závislý na geometrii vyztužení. Kompozity mohou obsahovat vyztužující fáze různých rozměrů. Největší význam má ve strojírenství mikrokompozitní materiál, u kterého se největší příčné rozměry výztuže mohou pohybovat okolo  $10^0$  až  $10^2$   $\mu\text{m}$ . Ve stavebnictví se často používají makrokompozity (železobeton vyztužený ocelovými pruty), které obsahují výztuž o velikosti příčného rozměru  $10^0$  až  $10^2$  mm. Nejmenší z kompozitů, nanokompozity, obsahují částice, jejichž největší rozměr se pohybuje v nm. [5,9]



Obr. 4. Rozdělení kompozitů podle tvaru výztuže [1]

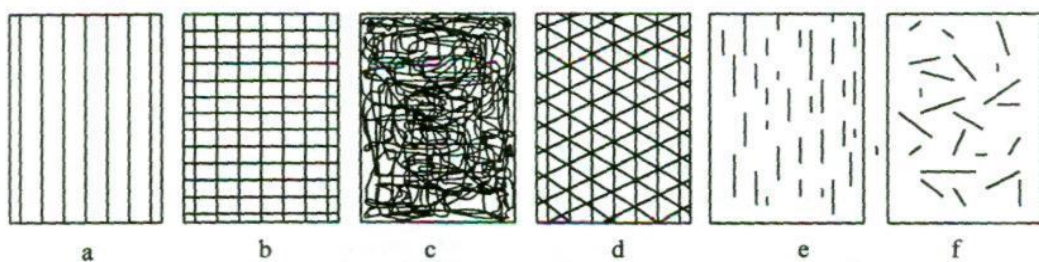
### Částicové kompozity

Jedná se o kompozity plněné částicemi, které jsou definovány jako nevláknový útvar, který nemá rozměr. Mohou být ve tvaru koule, krychle, kvádru, popř. jiného tvaru. Částice se mohou rovněž podílet na přenosu namáhání, ale v mnohem menším měřítku než vlákna. Hlavním význam částic je zlepšení mechanických vlastností materiálu, např. úprava elektrické a tepelné vodivosti, zvýšení odolnosti proti opotřebení, snížení koeficientu tření, apod. Částice v matrici mohou mít náhodnou orientaci, nebo přednostní orientaci z důvodu dosažení požadovaných mechanických vlastností. [10]

## Vláknové kompozity

Způsob přípravy a výroby vláknových kompozitů, druh vláken a jejich povrchová úprava, materiál a vlastnosti matrice závisí na oblasti aplikace vláknových kompozitů. Jiné složení vláken a matrice, druh vláken nebo jejich průměr bude vyžadovat prvek namáhaný staticky nebo dynamicky, za nižších nebo vyšších teplot, v suchém nebo ve vlhkém prostředí. Vlákná jsou charakterizována především svou délkou, která je dominantním vzhledem k jejich průřezu. Vláknové kompozity lze rozdělit na jednovrstvé a vícevrstvé. **Jednovrstvé** kompozity jsou tvořeny buď jednou vrstvou, nebo složeny z několika samostatných vrstev, z nichž každá vrstva má stejnou orientaci a stejné vlastnosti. Dle délky vlákna se jednovrstvé kompozity dělí na dlouhoválkové a krátkoválkové. U **dlouhoválkových** jednovrstvých kompozitů mohou být vlákna uspořádána v jednom směru – jednosměrový kompozit. Takové kompozity jsou velmi pevné ve směru vláken, ale obvykle slabé ve směru kolmém k vláknům. Typickým příkladem je prepreg. Za **krátkoválkový** kompozit se dá považovat takový, ve kterém délka vlákna ovlivňuje jeho vlastnosti. Orientace krátkých vláken v kompozitu nelze snadno řídit, většinou se předpokládá, že vlákna jsou orientována nahodile.

V praxi bývají nejčastěji používány **vícevrstvé** kompozity, které se skládají z několika tenkých různě orientovaných jednosměrových vláknových kompozitů – lamin. Jsou-li materiály v každé vrstvě stejné, např. skelná vlákna v epoxidové pryskyřici, nazývá se tento kompozit laminát. V případě, že jsou vrstvy vyrobeny z různých materiálů, jedná se o tzv. hybridní laminát. [1,10]



Obr. 5. Příklady uspořádání vláknové výztuže: a) jednosměrné uspořádání, b) tkanina, c) rohož, d) víceosá výztuž z kontinuálních vláken, e) krátká jednosměrná vlákna, f) krátká vlákna s nahodilou orientací [5]



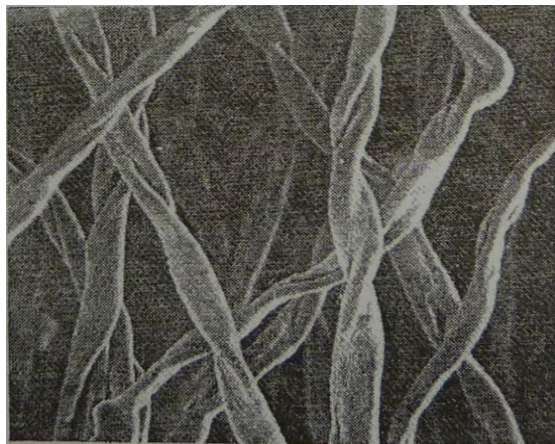
Pro výrobu kompozitů je v současné době k dispozici široké spektrum vláken, a to od vláken přírodních (bavlna, celulóza) až po vlákna kovová a slitinová, polykrystalická vlákna z různých keramických materiálů, skleněná vlákna apod. Volba materiálu závisí na konkrétním použití, matici a na očekávaných vlastnostech výsledného kompozitu. [1]

### **Skleněná vlákna**

Sklo je odolné proti ohni a mnoha chemikáliím. Má poměrně vysokou pevnost v tahu a nízký modul pružnosti. Nízká je ovšem pevnost v oděru a odolnost proti trvalému namáhání. Tepelnou vodivost mají skleněná vlákna o polovinu nižší než u oceli. Ze skleněných vláken se zhotovují izolace proti žáru nebo chemickým vlivům ve formě rohoží a hadic, stuh a šňůr. Velmi často se používají především v kompozitech s plastovou maticí. [2,11]

### **Přírodní vlákna**

Mohou mít překvapivě dobré vlastnosti. Pavoučí vlákno má (při průměru 0,02 až 7 mikrometrů, podle typu) mez pevnosti 1140 MPa a tažnost 31%. Často mají přírodní vlákna velmi složitou fibrilární (vláknitou) strukturu. Vlákna mohou být lněná, bavlněná, jutová, konopná apod. Základem těchto vláken je celulóza. [2]

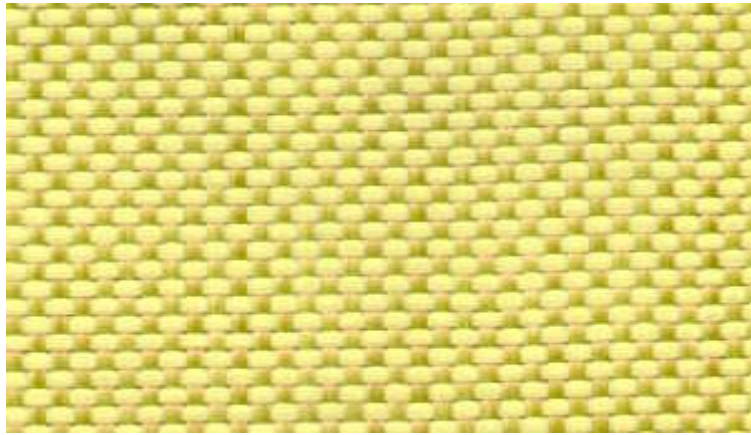


*Obr. 6. Bavlněná vlákna pod optickým zvětšením. Lze vidět nepravidelně zkroucená vlákna. [2]*

### **Aramidová vlákna**

Jsou vlákna na bázi lineárních organických polymerů, jejichž kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna. Předností těchto vláken je vysoká pevnost a tuhost. Jsou hydrofilní, tzn. absorbují vlhkost (až do 7%) → musí být před použitím vysušena. Aramidová vlákna se mohou zpracovávat se všemi běžnými reaktivními pryskyřicemi i termoplasty.

Vyrábějí se v různých druzích, které se liší navzájem hodnotami modulu pružnosti v tahu a tažností. [12]



*Obr. 7. Kompozitní tkanina z aramidových vláken [41]*

### **Uhlíková vlákna**

Velkou předností uhlíkových vláken je kombinace vysoké pevnosti, modulu pružnosti a tepelné odolnosti s nízkou měrnou hmotností. Mají vysokou chemickou odolnost, jejich vlastnosti se nemění až do vysokých teplot (přes 2000 °C ve vakuu), kdy všechny ostatní materiály své původní vlastnosti zcela ztrácejí. Uhlíkové vlákno je nejvíce používané k vyztužení kompozitních materiálů, zvláště u materiálu známého jako uhlíkový laminát, který je používán při výrobě částí letadel, závodních vozidel, závodních kol a dalších. Oproti skleněným vláknům je však jejich cena deseti až stonásobná. [1,11]



*Obr. 8. Kompozitní trubka z uhlíkového vlákna [40]*

## 2 KOMPOZITNÍ MATERIÁL Y VE STAVEBNÍM PRŮMYSLU

Kompozitní materiály se ve stavebním průmyslu začaly používat již velmi dávno. Jejich využití začínalo u jednoduchých staveb a to pomocí hlíny a slámy. Dnes se pro stavbu různých nosných konstrukcí, popř. jejich výztuží využívá modernějších materiálů.

### 2.1 Kompozitní materiály na bázi dřeva

Dřevo patří k nejstarším a nejoblíbenějším přírodním materiálům. Představuje pružný, pevný a přitom lehký materiál, který má dobré teplotně – izolační vlastnosti a je odolný vůči některým chemikáliím. Kompozitní materiály vyrobené z dřevních částic v dnešní době stále častěji nahrazují trámy z masivního dřeva, oproti kterým mají výhodu především v tom, že neobsahují suky, trhliny ani žádné jiné růstové vady. Poměr mezi hmotností a pevností je u těchto materiálů dokonce lepší než u ocelových nosníků. [13,14]

#### **Parallam (PSL – Parallel Strand Lumber)**

Tento materiál se vyrábí jako kompaktní hranol. V porovnání s klasickým dřevem nemá přírodní vady a vykazuje vyšší pevnost v tlaku i tahu. Z Parallamu je možné vyrobit trámy, vaznice, sloupy, nosníky a překlady. Snese vysoká zatížení i na dlouhá rozpětí. Na výrobu se nejčastěji používá borové dřevo. Jednotlivé proužky se uspořádávají tak, aby vlákna probíhala paralelně. Následně je na ně nanášeno vodovzdorné lepidlo. Lze jej kombinovat s obvyklými stavebními materiály. [13]



*Obr. 9. Parallam [14]*

#### **Intrallam (LSL – Laminated Strand Lumber)**

Intrallam se od Parralamu liší tím, že místo dýhových pásků se vyrábí z velkých třísek (převážně z osikového dřeva) dlouhých až 300 mm a širokých až 30 mm. Jeho použití ve stavebnictví je mnohostranné: na stavby lehkých obloukových a portálových střech, jednoduché trámy a sloupy pro krátká a střední rozpětí apod. Intrallam vykazuje vyšší pevnostní

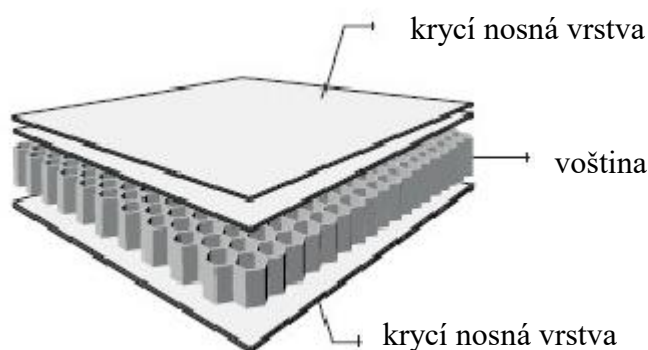
vlastnosti než rostlé dřevo. Velmi dobře se opracovává standardními dřevařskými nástroji. [13,14]

### Vrstvené dřevo (LVL – Laminated Veneer Lumber)

Je vyráběno slisováním sestaveného souboru dých. Výrobní postup je založen na využití několikanásobně vyšší pevnosti dřevních vláken v podélném směru než ve směru příčném. Dýhy (smrkové, bukové) jsou po nanesení lepidla na sebe ukládány tak, aby vlákna byla orientována paralelně se směrem výroby (rovnoběžně s delší stranou lisovací desky). Nese-sychá, nekrotí se a nevykazuje trhliny jako přírodní dřevo. Používá se pro podélné vazníky, krovy a základní nosníky různých dřevěných konstrukcí. Vrstvené dřevo se prodává pod různými obchodními názvy, z nichž nejrozšířenější jsou KERTO a MICROLLAM. [13,14]

## 2.2 Sendvičové materiály

Sendvičové materiály se skládají z několika lepidlem pojených vrstev, které se rozdělují na materiály potahové a výplňové. Sendvičový materiál umožňuje kombinaci různorodých materiálů, které se liší svými mechanickými a fyzikálními vlastnostmi. Kombinací vlastností těchto materiálů vzniká sendvičový materiál, jehož výsledné vlastnosti jsou dány synergickým součtem vlastností potahových a výplňových materiálů. [16]



Obr. 10. Voštinový sendvič [17]

Efektivní struktura sendviče je taková, která je tvořena dvěma tuhými a pevnými potahy zatěžovanými tahovými a tlakovými silami a jádrem o relativně nízké hustotě přenášejícím smykové síly mezi potahy. Mezi přednosti sendvičových materiálů patří zejména vysoká ohybová pevnost a tuhost při nízké hmotnosti, odolnost proti šíření trhlin, odolnost proti rázům, tepelná odolnost a odolnost proti ohni, popř. akustická izolace. Tyto vlastnosti jsou dány především materiálem jádra. [15]

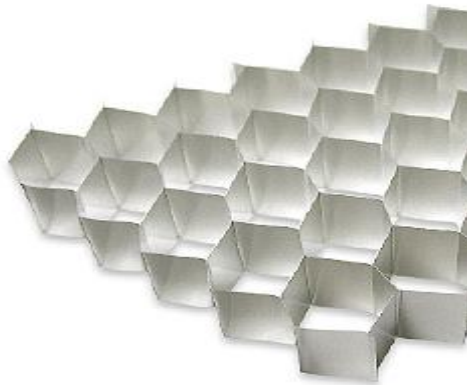
### 2.2.1 Materiály sendvičového jádra

#### Voština

Jedná se o zvláštní druh materiálu, který je určen pro jádra sendvičových konstrukcí a bývá složen z jednoho pevného a jednoho plynného konstituentu. Má různou výšku, velikost a tvar. Voštiny jsou k potahu přilepeny. Při výrobě sendvičů se používá fólie lepidla, kterou se voštiny překryjí před přiložením potahů. Při zvýšené teplotě se fólie roztaví a spojí oba prvky. Materiál voštiny je složen z pravidelných n-úhelníků s vysokým štíhlostním poměrem. Používá se levných hliníkových voštin, voštin se skleněnými vlákny, aramidovými vlákny nebo uhlíkovými vlákny. Výhoda voštinových sendvičů je především ve velmi nízké hmotnosti, vysoké tuhosti, trvanlivosti a úsporách ve výrobních nákladech. [11,18]

#### Hliníková voština

Hliníková voština je lehký materiál, šetrný k životnímu prostředí (recyklovatelný) s dobrými mechanickými vlastnostmi: vysoká tuhost, nízká hmotnost, odolnost proti ohni, tlaku a korozi. Jako jádro sendvičových materiálů se hliníková voština využívá v různých odvětvích, např. v automobilovém průmyslu, pro stavbu lodí, ve stavebnictví (dveře, podlahy, střechy, fasády, příčky) a u všech produktů, které vyžadují optimální poměr tuhosti - hmotnosti. [25]



Obr. 11. Hliníková voština [25]

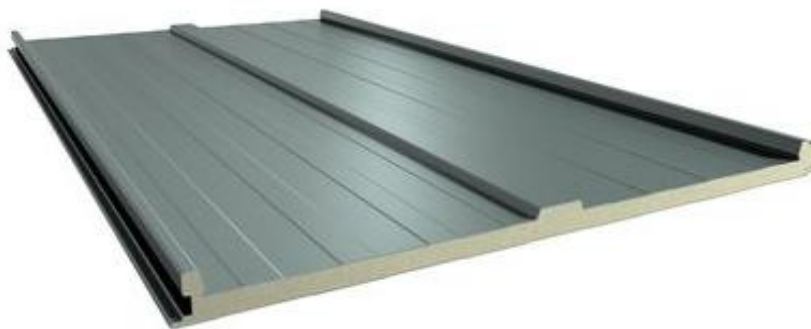
#### Aramidová voština

Jedná se o velmi lehký, pevný, nekovový materiál, vyrobený z aramidových vláken papíru impregnovaného fenolickou tepelně odolnou pryskyřicí. Tento materiál pro sendvičová jádra nabízí jedinečnou kombinaci vlastností, umožňující vynikající elektrickou izolaci.

Aramidová voština se používá v loďařství u lodních trupů, u karosérií závodních aut, pro stavbu vojenských bunkrů, nebo v leteckém a železničním průmyslu. [26]

### Polymerní pěna

Patří mezi typy kompozitů s plynovou disperzí. Disperze bývá většinou obyčejný vzduch, vodík, dusík nebo vodní pára. Jsou vyráběny za účelem snížení tepelné vodivosti, nebo zvýšené tlumení vibrací a zvuku. Mezi nejznámější pěnové materiály patří pěnoplasty, jako je polystyren, polyetylen, polyuretan a polypropylen. V oblasti stavebnictví se nejvíce využívá tvrdá polyuretanová pěna, která má výborné tepelněizolační vlastnosti ( $\lambda = 0,024 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ), téměř dvakrát lepší než pěnový polystyren. [2,16]



*Obr. 12. Střešní sendvičový panel z polyuretanového jádra [19]*

### PVC pěna

Pěna z polyvinylchloridu (PVC) s uzavřenými buňkami, je zesíťně tvrdá pěna s vynikající tuhostí a nízkou hmotností. Vyznačuje se vysokou odolností, nízkou nasákavostí a vynikající chemickou odolností. Snadno se zpracovává a je kompatibilní se všemi běžnými pryskyřicemi (polyester, epoxidové pryskyřice, vinylyster). PVC pěna je ideálním základním materiálem pro řadu lehkých sendvičových konstrukcí, které podléhají dynamickému nebo statickému zatížení, pro konstrukce lodí a člunů či kryty větrných elektráren. [27]

### PET pěna

PET pěna je s uzavřenými buňkami termoplastický a recyklovatelný materiál sendvičových jader s velmi homogenní strukturou buněk, dobrými mechanickými vlastnostmi a dobrou přilnavostí. Dále se vyznačuje mimořádně vysokou odolností proti únavě, je chemicky stabilní, odolná proti UV záření a vodě. PET pěna je vhodná pro vysoce objemové aplikace

lehkých sendvičových konstrukcí, které jsou vystaveny statickým a dynamickým zatížením, nebo zvýšené teplotě při výrobě. [28]



*Obr. 13. Kompozitní panel z PET pěny [30]*

### **PUR pěna**

Polyuretanová pěna existuje dvojího druhu – tvrdá a měkká. Měkká pěna je známá jako molitan, ve stavebnictví se využívá polyuretanová pěna tvrdá – označována jako PUR pěna. Široké uplatnění má v detailech konstrukcí jako výplň a izolace spár apod. Lze ji využít i pro zateplení plošných konstrukcí, stropů, střech. Jelikož pěna na povrchu ulpívá, přizpůsobí se i složitě tvarovaným povrchům. [29]

### **SAN pěna**

Lineární, termoplastická styren akrylonitrilová pěna (SAN) s uzavřenými buňkami spojuje dobré statické mechanické vlastnosti s vysokou houževnatostí, což se odráží na pevnosti a odolnosti proti únavě – poskytuje nejlepší vlastnosti zesíťovaného a lineárního PVC. SAN pěna je chemicky velmi stabilní a odolná vůči pryskyřičným systémům, které se využívají v kompozitních konstrukcích. Vzhledem k vyšší odolnosti vůči teplu se pěnová SAN jádra používají v náročných aplikacích, včetně výroby jádrových prepreg laminátů, kde se vyžaduje teplo a tlak autoklávu. [31,32]

### **Pěnový polystyren**

Pěnový (expandovaný) polystyren je jeden z nejrozšířenějších tepelně izolačních materiálů. Základní surovinou pro výrobu ESP je zpěňovatelný polystyren, ten vzniká suspenzní polymerací styrenu. Pěnový polystyren se nejvíce používá jako tepelná izolace pro fasády, podlahy a ploché střechy. Při své minimální hmotnosti vyniká dobrými mechanickými vlastnostmi, je zdravotně nezávadný a dá se jednoduše recyklovat. [33]



*Obr. 14. Střešní sendvičový panel s pěnovým polystyrenovým jádrem [34]*

### **Balsa**

Jedná se o velmi lehký typ dřeva a jako materiál jádra je jedním z nejpoužívanějších. Struktura dřeva se vyznačuje velkými buňkami, které jsou vyplněny vodou. Stěny buněk jsou tvořeny vlákny celulózy a hemicelulózy v ligninové matici (lignin má třírozměrnou strukturu, nejedná se o lineární polymer). Balsa je ve všech pevnostních kategoriích nejslabší ze všech komerčně využívaných druhů dřeva. Velmi snadno se opracovává a nejlépe ji lze spojovat lepením. Balsa je nejvíce ceněna pro své tepelně izolační vlastnosti, pružnosti a schopnost udržet se na vodě. Používá se v lehkých sendvičových konstrukcích s kovovou konstrukcí, nebo jako vrstvený materiál na podlahy a přepážky letadel. [18,20]



*Obr. 15. Sendvičový panel z překližky a balsaového jádra [21]*

### **2.2.2 Metal bonding**

Jednou z nejnovějších používaných metod při lepení kovových konstrukcí (ať už kov na kov nebo sendvičů) je technologie metal bonding. Používá se především v leteckém prů-



myslu, při různých konstrukcích a opravách, nebo v automobilovém průmyslu. Metodu lze použít pro různé kovové materiály, výhodami jsou zjednodušení konstrukce, snížení hmotnosti, vysoká pevnost ve smyku, popř. odolnost vůči únavě materiálu. Postup lepení zahrnuje několik operací, které musí být prováděny přesně a pečlivě. [47]

### **Povrchové napětí, drsnost a kontaminace povrchu**

Povrchové napětí lze charakterizovat jako rovnovážný stav mezi dvěma lepenými materiály. Kov představuje pevnou látku a lepidlo kapalinu. Pokud je povrchové napětí mezi těmito složkami příliš velké, má kapalina tendenci vytvářet kapky, čímž dochází k vytvoření nerovnovážného rozložení lepidla ve spoji a snížení jeho pevnosti. Je proto nutné u lepení používat jen určená lepidla. Drsnost povrchu je také důležitá a významně se podílí na celkové pevnosti spoje. Musí však být pod kontrolou. Pokud bude reálná drsnost větší než optimální, mohou se zachytit plyny nebo nečistoty. Znečištění (kontaminace) povrchu může negativně ovlivnit typ vazeb na molekulární úrovni, nebo měnit povrchové napětí. Je tedy nutné odstranit zbytky ředidel, olejů a čistících látek. [47]

### **Anodizace povrchu**

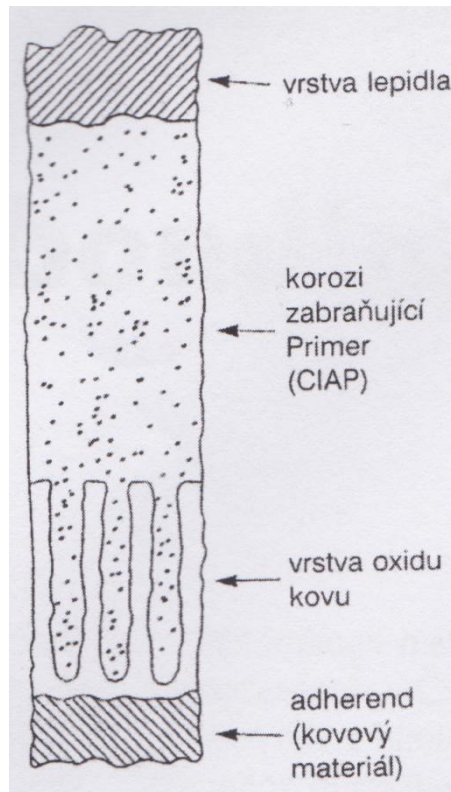
Další operací je chemický proces zvaný anodizace. Jedná se o povrchovou úpravu kovů a některých slitin, nejběžněji je používán u hliníku. Účelem je vytvoření rovnoměrné vrstvy oxidu na povrchu kovu, čímž se spolu s lepidlem zvyšuje odolnost a pevnost lepeného spoje. Anodizace u hliníku bývá nejvíce používána v kyselině fosforečné (PAA), v kyselině chromové (CAA) nebo v kyselině borité (BAA). [47,48]

### **Nástřik primeru**

Po anodizaci následuje nástřik adhezního primeru, který zabraňuje korozi. Nástřik musí být v tenké vrstvě pohybující se v řádech mikrometrů. Po nástřiku se nanosená vrstva nechá zaschnout při pokojové teplotě a následně vytvrdit v peci po dobu 2 hodin při teplotě 90 °C. [47]

### **Lepidlo**

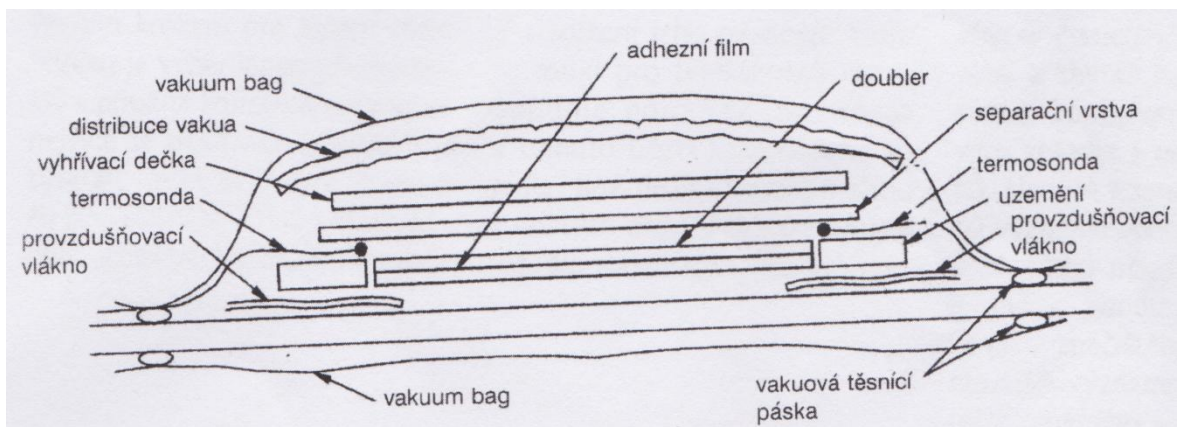
V neposlední řadě přichází aplikace lepidla a to ve formě adhezního filmu nebo pasty. Z pastovitých lepidel bývají používány dvousložkové epoxidové pryskyřice zahuštěné různými druhy plniv. Lepidla ve formě adhezních filmů bývají také epoxidové pryskyřice. Jsou používány k různým účelům, nejvíce však k lepení voštiny na potah a lepení doubletů. [47]



Obr. 16. Vrstvy lepeného spoje [47]

### Vytvrzení

Závěrečným procesem technologie metal bonding je vytvrzení výrobku za předem dané teploty a tlaku. Bývá prováděno obvykle v tzv. vakuu bagu (viz obr. 17.), který se skládá z několika součástí, z nichž ne všechny se stávají součástí dílu. Jako náhradu k vakuu bagu je možno použít vytvrzování ve formě pod lisem za současného vyhřívání, vhodné pro velkosériovou výrobu tvarově nenáročných dílů. [47]



Obr. 17. Princip vytvoření vakuu bagu [47]

### 2.3 Polymerbeton

Polymerbeton je moderní kompozitní materiál, který je tvořen směsí hrubých i jemných částic (plniv) a polymerního pojiva. Typické pryskyřice užívané pro pojivo jsou nenasyčené polyestery, epoxidy a metylmetakryláty popř. jejich některé směsi. Po polymeraci iniciovaného pojiva vznikne tuhá hmota typu vytvrzeného betonu. Polymerní pojivo předává materiálu vlastnosti, které jsou cementovým betonem nedosažitelné. [22]

Polymerbeton může být bez spojitě pórovitosti, tedy nepropustný a tím i odolný vůči mrazu a tání, fyzikálnímu a fyzikálně-chemickému působení agresivních činidel. Pevnost polymerbetonu je několikanásobně vyšší než u cementového betonu a zejména poměr tlakové a tahové pevnosti je značně příznivější a tedy i jeho odolnost rázům. Snadno se likviduje a recykluje, tím nezatěžuje životní prostředí.

Polymerní pojivo předává materiálu i některé nevýhodné vlastnosti, které nelze měnit a je třeba s nimi počítat: spalitelnost (nikoli hořlavost), daná organickou povahou hmoty, nižší modul pružnosti a větší dotvarování pod dlouhodobým zatížením. Teplotní odolnost je nižší než u kovových materiálů v závislosti na konkrétní pryskyřici a způsobu vytvrzení. Polymerní betony jsou podstatě dražší než klasický beton (300-2000 USd/m<sup>3</sup> proti 50-80 USd/m<sup>3</sup>). [22,23]



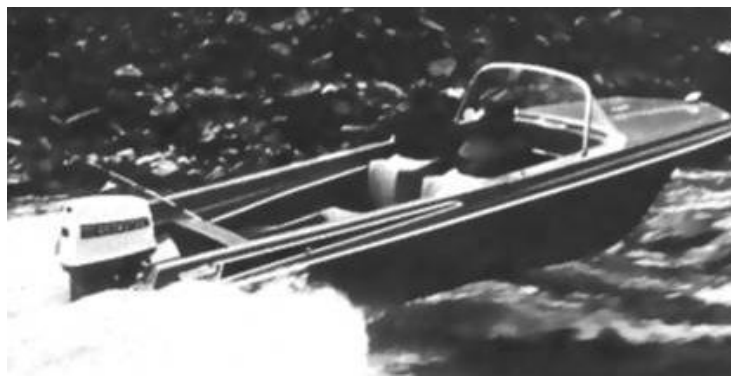
*Obr. 18. Tekutá dlažba z polymerbetonu [22]*

Polymerbeton je ideálním materiálem pro inženýrské stavby. Jeho vysoká pevnost dovolu- je konstrukci velmi štíhlých stavebních dílů. Používá se pro novostavby a rekonstrukce pochůzných kanálů odpadních vod, normalizované šachty, systémy odtokových žlábků pro

stavbu tunelů, rekonstrukce podlah, výrobu silničních a mostových obrubníků nebo pro výrobu dlažeb a syntetického kamene. [22,24]

## 2.4 Použití kompozitních materiálů ve stavebnictví

Kompozitní stavební výrobky jsou dobře známy svojí lehkou hmotností, pevností a nabízí architektonicky neomezenou konstrukční flexibilitu. Ta poskytuje návrhářům a stavitelům ideální stavební materiál, který se využívá v řadě aplikací. Jeden z aspektů kompozitního použití, o kterém se často diskutuje, je jejich životnost. Ve srovnání s ocelí a betonem jsou kompozity relativně novým materiálem. [35]



*Obr. 19. První lodě postaveny z kompozitů – v provozu od počátku 50. let [36]*



*Obr. 20. Nový dům s vlákny vyztuženými kompozitními oblouky [35]*



Obr. 21. Flexibilita použití kompozitů u historických a složitých konstrukcí [36]



Obr. 22. Příklady použití lehkých sendvičových konstrukcí [37]

Moderní kompozity mohou výrazně snížit hmotnost konstrukcí. To vede k menším základům, příznivějším technologiím spojování, jednoduššímu řešení pokud jde o bezpečnost před zemětřesením a v neposlední řadě snížení požadavků na jeřábech a dopravních prostředcích. [37]



*Obr. 23. První sendvičový most ve Švýcarsku [38]*

Tento 11,4 metrů dlouhý most ve městě Bex, obsahující jádro s balsového dřeva, byl položen jako jeden kus za méně než tři hodiny. Nahradil zde 100 let starý silniční most. [38]



*Obr. 24. Aplikace kompozitů na opláštění budov [39]*

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

### 3 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem bakalářské práce je navrhnout vhodné typy lepidel pro sendvičové kompozitní struktury s hliníkovou voštinou jako jádrem a nosnými vrstvami z hliníkových, ocelových a nerezových plechů.

Cíle bakalářské práce se mohou shrnout do:

1. Navrhnout lepidla pro danou aplikaci v stavebnictví (obecně průmyslová aplikace)
2. Výroba sendvičových struktur s definovaným materiálovým složením a navrženým lepidlem
3. Testování jednotlivých struktur na zkoušku třibodovým ohybem, zkoušku odlupem nebo tzv. flatwise test
4. Vyhodnocení výsledků a závěr



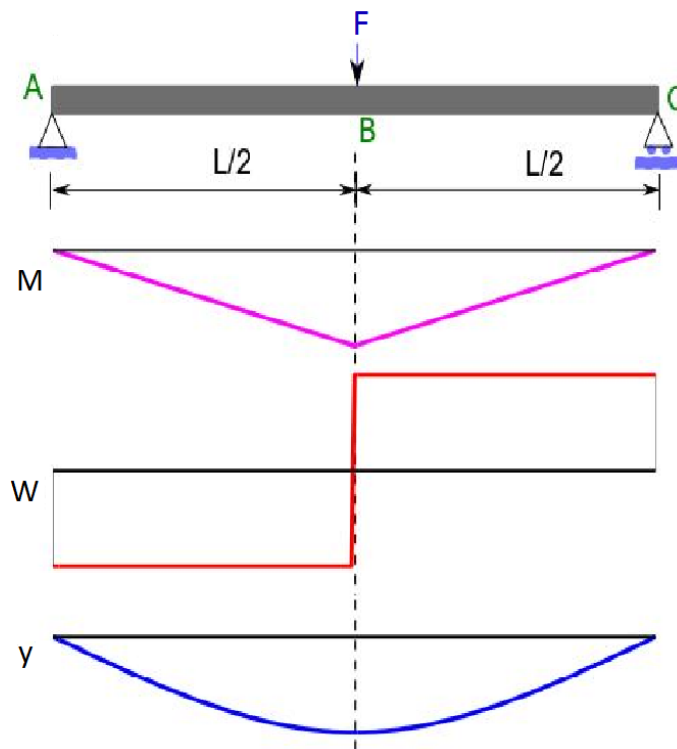
## 4 MECHANICKÉ ZKOUŠKY SENDVIČOVÝCH STRUKTUR

Testování kompozitních materiálů zahrnuje celou řadu různých zkoušek, záleží však, jaké požadavky jsou pro daný materiál kladeny. Mezi nejběžnější patří zkouška tlakem, ohybem, tahem a smykem. [46]

Cílem praktické části je na základě provedených mechanických zkoušek určit, zdali použita lepidla u daných sendvičových struktur vykazují dobrou či špatnou adhezi.

### 4.1 Tříbodový ohyb

Zkouška tříbodovým ohybem je klasickým experimentem v mechanice a je používán k změření Youngova modulu u materiálu ve tvaru nosníku. Nosník o délce  $l$  leží na dvou válečkových podpěrách a je zatěžován silou  $F$ , která působí v jeho středu. [42]



Obr. 25. Schéma tříbodového ohybu [42]

Maximální ohybový moment  $M_{max}$  je dán vztahem

$$M_{max} = \frac{F_{max}}{4} \cdot l \quad (1)$$

Pevnost v ohybu se určí jako

$$\sigma_M = \frac{M_{max}}{W_o} \quad (2)$$

Modul průřezu u obdélníkového tělesa je dán vztahem

$$W_0 = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (3)$$

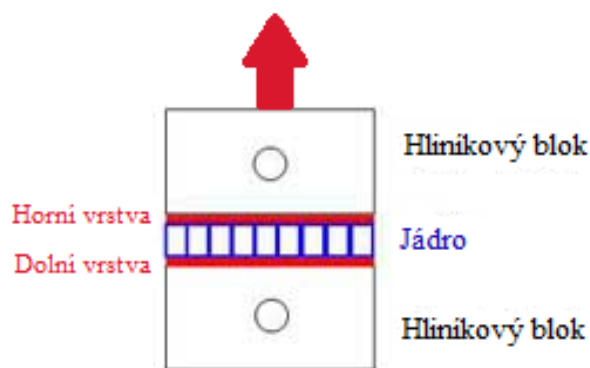
U modernějších zkušebních strojů je mimo síly snímán i průhyb zkušebního tělesa. Pomocí těchto dvou veličin lze určit diagram závislosti síla – průhyb, ze kterého se vyhodnocuje nejen napětí a průhyb v okamžiku lomu, ale z oblasti počáteční lineární části diagramu i hodnota modulu pružnosti  $E$  ze vztahu [43]

$$E = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot I \cdot y} \quad (4)$$

## 4.2 Flatwise test (tah na plocho)

Jedná se o metodu stanovení pevnosti vazby mezi sendvičovým jádrem a jeho obkladem, nebo pevnosti jádra samotného, to za předpokladu, že pevnost vazby mezi obkladem a jádrem je dostatečně silná.

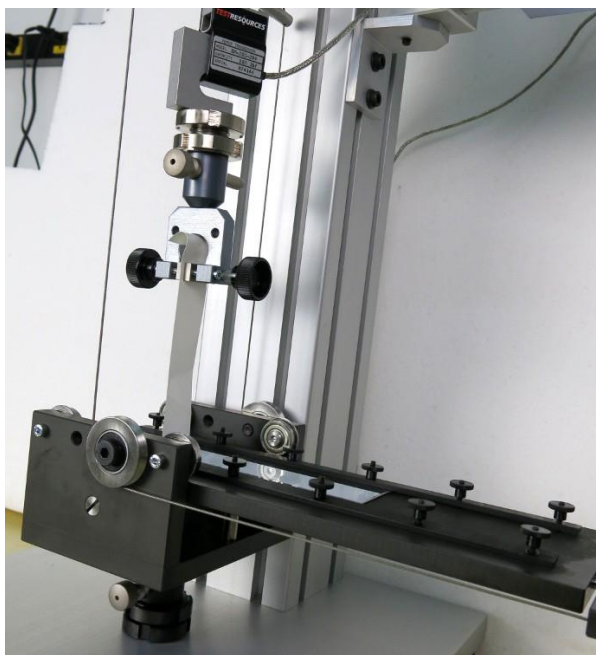
Testované vzorky jsou nařezány ze sendvičových panelů a přilepeny plochou stranou k hliníkovým blokům. Před samotným testováním se musí vyčkat, až lepidlo zaschne. Jeden z hliníkových bloků je uchycen v držáku na stacionární straně univerzálního zkušebního stroje, zatímco druhý blok je uchycen na pohybuující se straně zkušebního stroje. Sestava je pak od sebe odtahována doporučenou standardní rychlostí posuvu 0,50 mm/min dokud nenastane porucha. Porucha mezi hliníkovým blokem a sendvičovou konstrukcí není brána jako výsledek. [44]



Obr. 26. Flatwise test [44]

### 4.3 Zkouška odlupem

Zkouška odlupem je prováděna mezi dvěma substráty, v případě sendvičových struktur se jedná o vnější vrstvu a jádro, které jsou spojeny lepidlem. Cílem testu je obvykle stanovit pevnost přilnutí materiálu, nebo pevnost lepeného spoje mezi dvěma materiály. Tato lepicí síla může být označována jako „lepivost“ materiálu, protože značí míru odolnosti vzorků se navzájem od sebe, po nanesení lepidla, oddělit. Naměřená hodnota pak může být použita pro určení, zda je lepený spoj dostatečně silný, nebo je pro aplikaci příliš silný a zdali není potřeba použít jiný lepicí proces nebo lepidlo. [45]



*Obr. 27. Peel test – zkouška odlupem [45]*

## 5 TESTOVÁNÍ SENDVIČOVÝCH STRUKTUR

Testování jednotlivých sendvičových struktur je zaměřeno na zjištění, zda nedochází k separaci vnějších vrstev od jádra vlivem použitého lepidla, nebo špatně zvolenou technologií lepení. Pro mechanické zkoušky byly dodány vzorky celohliníkových sendvičových panelů a sendviče s ocelovým obložení a hliníkovým jádrem.

### 5.1 Pevnost – únosnost a tuhost celohliníkových sendvičových struktur

Analýze byl podroben 1 typ celohliníkových sendvičových struktur. Zkušební tělesa nařezána (ČSN EN ISO 2818: příprava zkušebních těles obráběním). Zkoušky provedeny za standardních podmínek, dle normy ČSN ISO 291 (Teplota 23°C, relativní vlhkost 50%). Zkouška ohybem provedena v souladu dle norem ČSN EN ISO 178 a 14125 (ASTM D5467). Rychlost zkoušky 10 mm/min, modul pružnosti v ohybu  $E_o$  měřen při  $v = 1$  mm/min.

Pro lepení bylo použito polyuretanové dvousložkové lepidlo od výrobce H.B. Fuller (složka A: Swift-bond 9137, složka B: Hardener 9001) s hustotou směsi 1500 kg/m<sup>3</sup>, viskozitou směsi 10000 mPa·s, poměrem míchání směsí: 100:20 kg a reakčním časem 50-60 min.

Tab. 1. Výsledky zkoušky ohybem u celohliníkových struktur

Číslo měření	E	$\sigma_K$	$\sigma_M$	$\epsilon$	W
Nr	MPa	MPa	MPa	%	Nmm
1	11300	47,1	48,2	0,9	3127,62
2	10400	48,8	50,5	1,0	3821,44
3	10700	46,2	46,4	0,8	2559,26
4	10700	49,1	51,5	1,3	5301,12
5	10200	47,7	49,1	1,0	3753,83
6	10800	49,0	50,9	1,2	4681,70
$\bar{x}$	10700	48,0	49,4	1,0	3874,16
s	352	1,17	1,92	0,2	999,19
v	3,29	2,45	3,88	14,92	25,79

Z výsledků je patrné, že pevnost a tuhost (modul pružnosti) v ohybu vykazuje hodnoty okolo 50 MPa, respektive 10 700 MPa. Tyto hodnoty jsou srovnatelné, anebo lepší než vý-

sledky obdobných sendvičových panelů s Al voštinou a kompozitní nosnou vrstvou, jak je vidět v tab. 2. V případě pevnosti v ohybu vykázala srovnatelnou hodnotu (52MPa) pouze struktura č. 4, všechny ostatní byly horší. U modulu pružnosti je výsledek celohliníkové struktury nejméně 2x vyšší než u testovaných kompozitních struktur (kromě struktury č. 5).

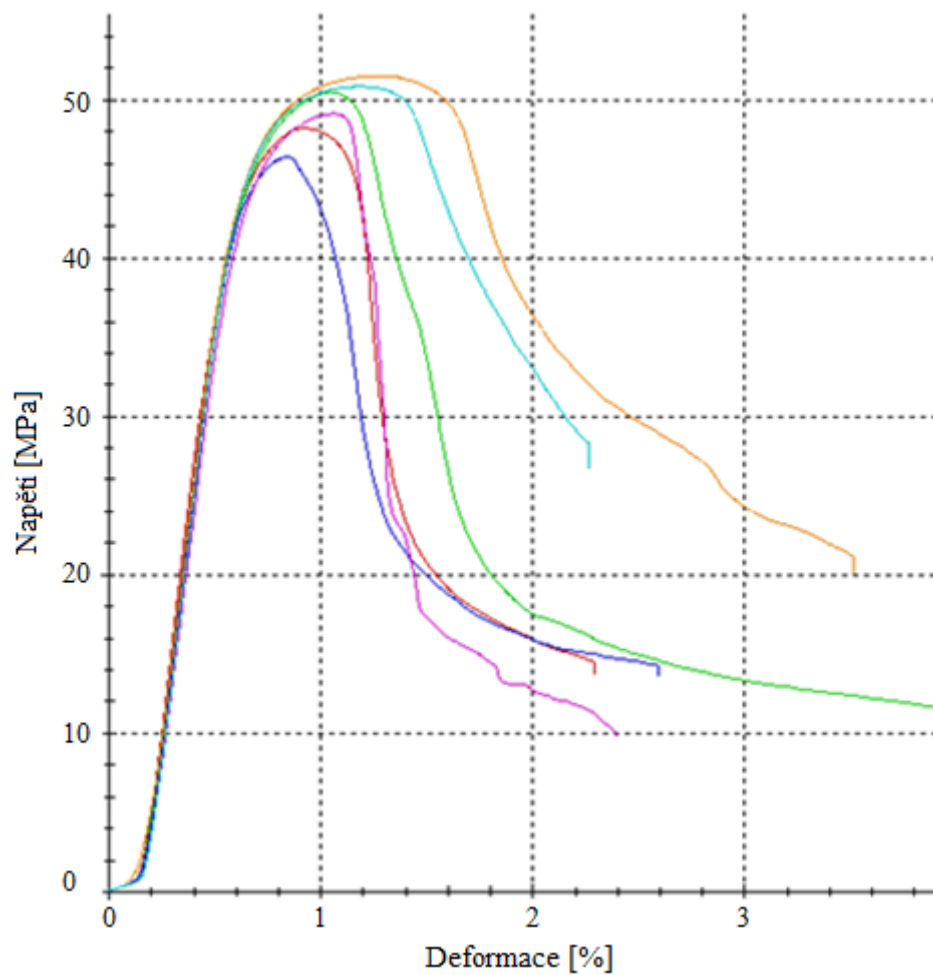
Celohliníkové struktury tedy vykazují zhruba podobnou pevnost, ale dvojnásobnou tuhost oproti kompozitním sendvičovým strukturám při zachování podobné hmotnosti. Z výsledků je také možno usuzovat na vhodnost zvoleného lepidla, neboť k porušení smykem – odseparování jádra od nosné vrstvy došlo pouze v jediném případě. Adheze mezi vrstvami je tedy dostatečná.

Tab. 2. Složení sendvičových vzorků určených pro porovnání s testovanou Al strukturou

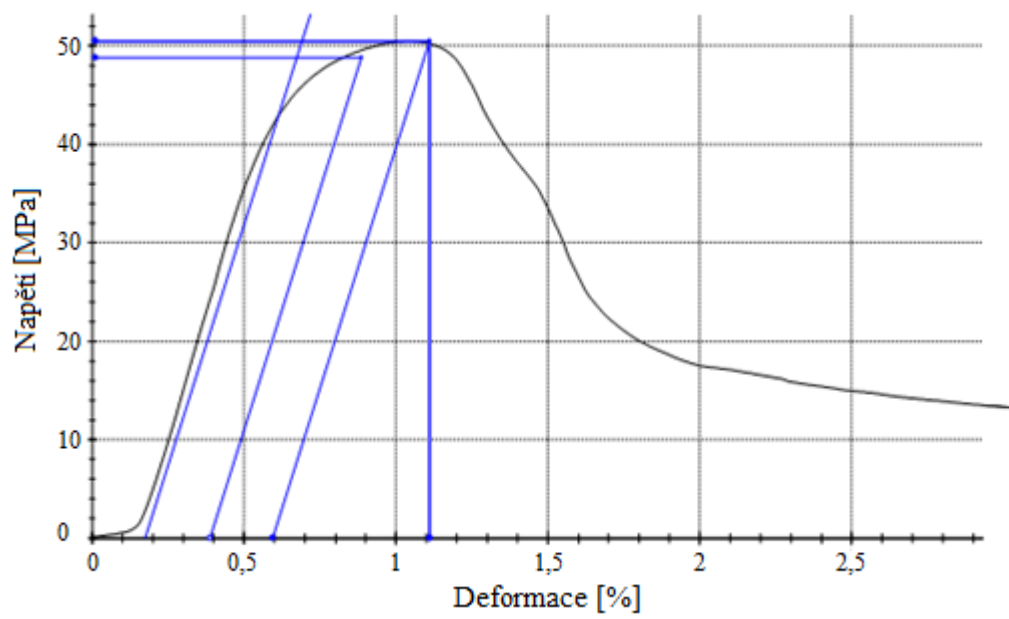
Vzorek č.	Horní vnější vrstva	Jádro	Spodní vnější vrstva
1	2x fenolický prepreg PHG840N-G213-40	hliníková voština tloušťka 9 mm ECM 6.4-82	1x fenolický prepreg PHG840N-G213-40
2	2x fenolický prepreg PHG840N-G213-40	hliníková voština tloušťka 9 mm ECM 6.4-82	2x fenolický prepreg PHG840N-G213-40
3	1x fenolický prepreg PHG840N-G213-40 1x fenolický prepreg PHG840N-F300-47	hliníková voština tloušťka 16 mm ECM 6.4-82	1x fenolický prepreg PHG840N-F300-47 1x fenolický prepreg PHG840N-G213-40
4	2x fenolický prepreg PHG840N-G213-40	hliníková voština tloušťka 9 mm ECM 6.4-82	1x fenolický prepreg PHG840N-G213-40
5	1x fenolický prepreg PHG840N-G213-40 1x fenolický prepreg PHG840N-F300-47	hliníková voština tloušťka 9 mm ECM 6.4-82	1x fenolický prepreg PHG840N-F300-47 1x fenolický prepreg PHG840N-G213-40
6	2x epoxidový prepreg TV 45 EMT 125 PLUS	hliníková voština tloušťka 9 mm ECM 6.4-82	1x epoxidový prepreg TV 45 EMT 125 PLUS
7	1x vysokotlaký laminát HPL 1x epoxidový prepreg TV 45 EMT 125 PLUS	hliníková voština tloušťka 9 mm ECM 6.4-82	1x epoxidový prepreg TV 45 EMT 125 PLUS 1x vysokotlaký laminát HPL

Tab. 3. Dosažené mechanické vlastnosti u sendvičů s Al voštinou

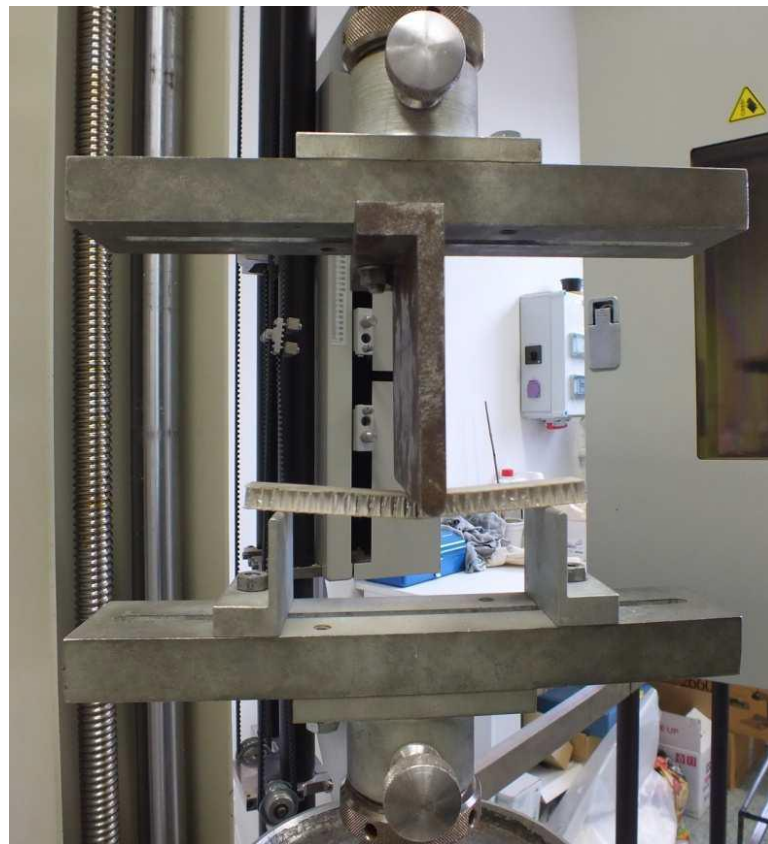
Vzorek č.	E	$\sigma_M$	F <sub>max</sub>
-	MPa	MPa	N
1	4775 ± 216	48,48 ± 1,91	498,2 ± 19,9
2	5430 ± 245	36,90 ± 2,72	405,4 ± 30,1
3	2986 ± 154	22,56 ± 1,36	776,4 ± 47,0
4	5260 ± 379	52,06 ± 6,40	521,8 ± 64,2
5	7480 ± 241	49,14 ± 1,23	623,0 ± 15,5
6	2232 ± 66	35,22 ± 1,24	351,8 ± 12,0
7	4398 ± 193	28,38 ± 2,05	368,8 ± 26,9



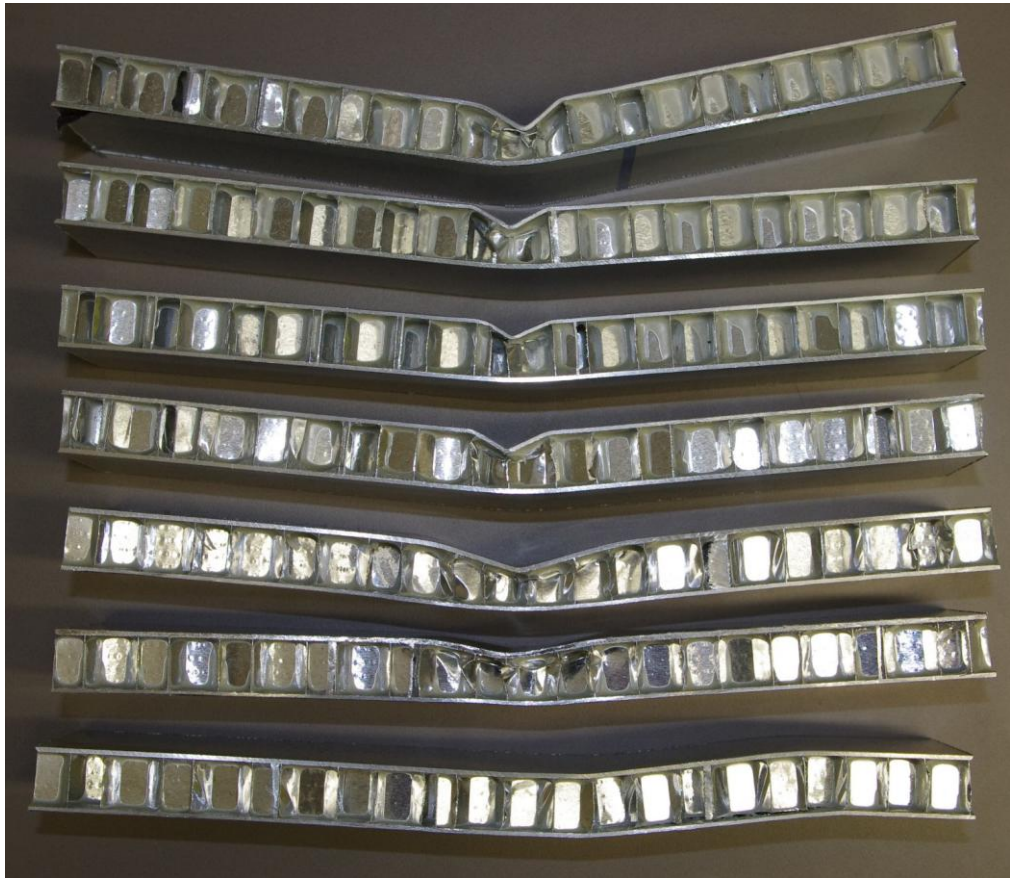
Obr. 28. Záznamy ohybových zkoušek u celohliníkových struktur



Obr. 29. Záznam typické závislosti mezi napětím a pom. deformací



Obr. 30. Těleso při zkoušce tříbodovým ohybem



*Obr. 31. Tělesa po ohybové zkoušce – většinou lokální deformace nosné vrstvy v oblasti tlačného trnu, v posledním případě odseparování nosné vrstvy vlivem smyku*

## **5.2 Analýza adheze vrstev sendviče nerez-hliník-nerez**

Ke zkouškám adheze byly dodány zkušební tělesa pro test odlupem, Flatwise test a test tříbodovým ohybem.

Pro lepení bylo použito dvousložkové epoxidové lepidlo od výrobce 5M (Letoxit PL 20) s pastovitou viskozitou, hustotou směsi  $1100 \text{ kg/m}^3$ , poměrem míchání směsí: 100:40 kg a reakčním časem 30 min.

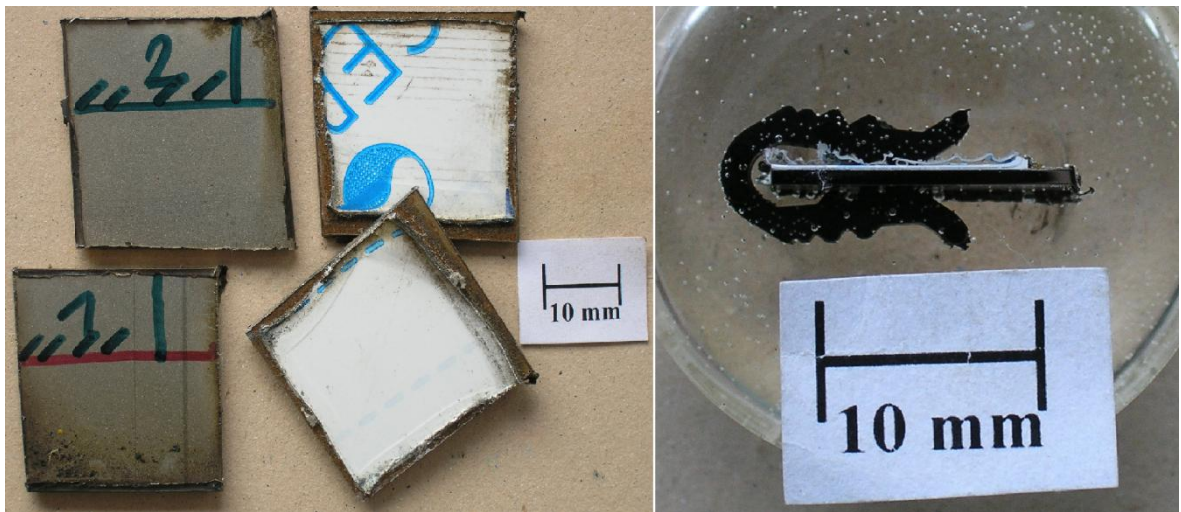
### **5.2.1 Mikročistota nerezové oceli**

Před samotnými zkouškami byly dodány zkušební vzorky nerezové oceli s granexovou úpravou k provedení metalografické analýzy s vyhodnocením mikročistoty materiálu.

Na vzorcích byl proveden příčný řez, viz obr. 32. a po preparaci provedena na řezu metalografická příprava vzorků. Analýza byla provedena na metalografickém mikroskopu

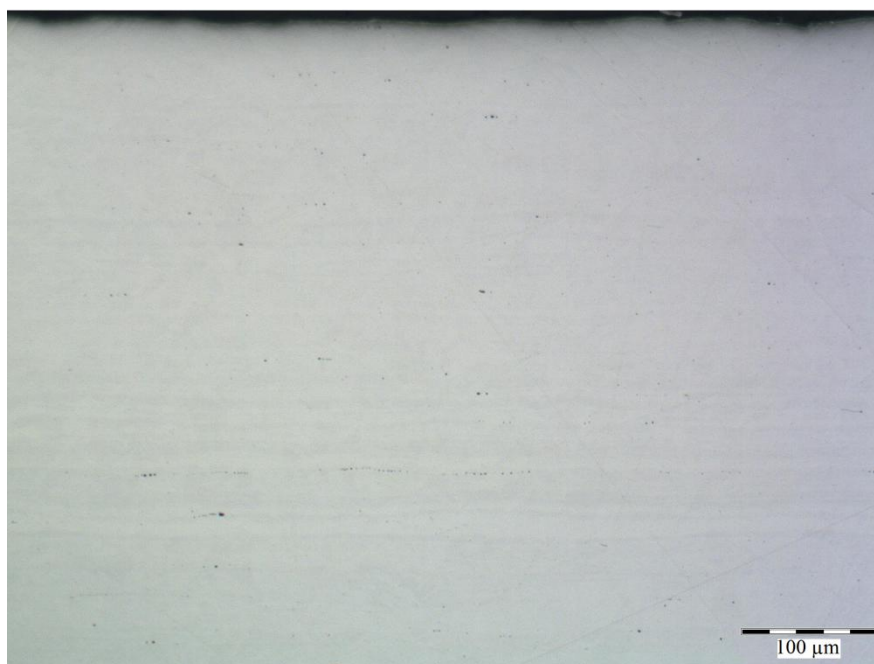


Olympus GX51 a mikročistota vyhodnocena dle normy ČSN ISO 4967 420471. Velikost zrn byla hodnocena podle normy ČSN EN ISO 643.



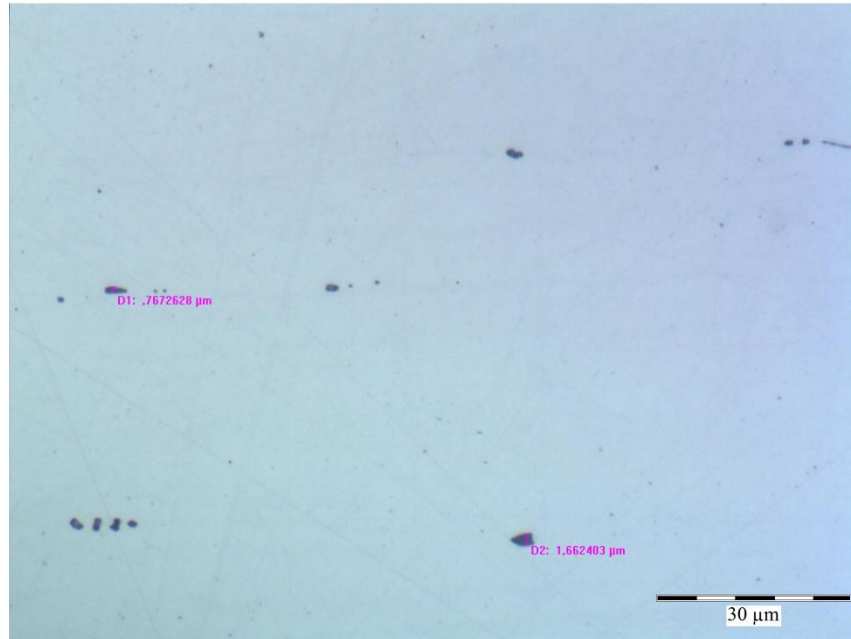
*Obr. 32. Vlevo naznačen příčný řez, vpravo fixace vzorků do pryskyřice za studena*

Pro posouzení mikročistoty byla provedena analýza v neleptaném stavu (obr. 33. a 34.). Je zřejmé, že materiál je vysoce čistý, s minimálním výskytem vměstků.



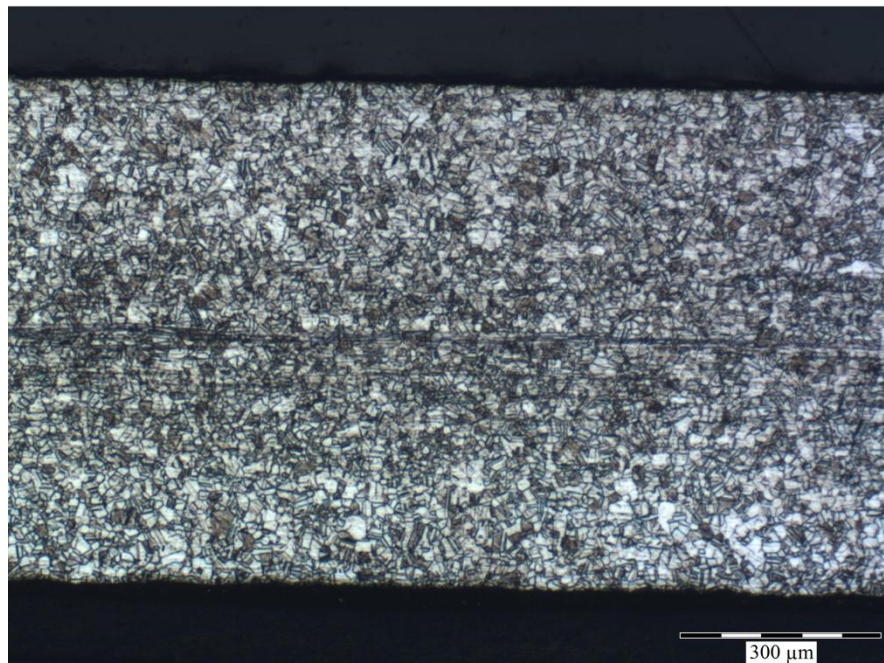
*Obr. 33. Vzorek 200 x zvětšený*

Při těchto zvětšeních byla provedena analýza přítomných vměstků. Na základě jejich morfologie bylo zjištěno, že se jedná o vměstky typu A – sulfidy a B – hlinitany. Jejich tloušťka byla velice malá, menší než 2 μm, takže dle příslušné normy jim nelze přiřadit žádnou číselnou klasifikaci.

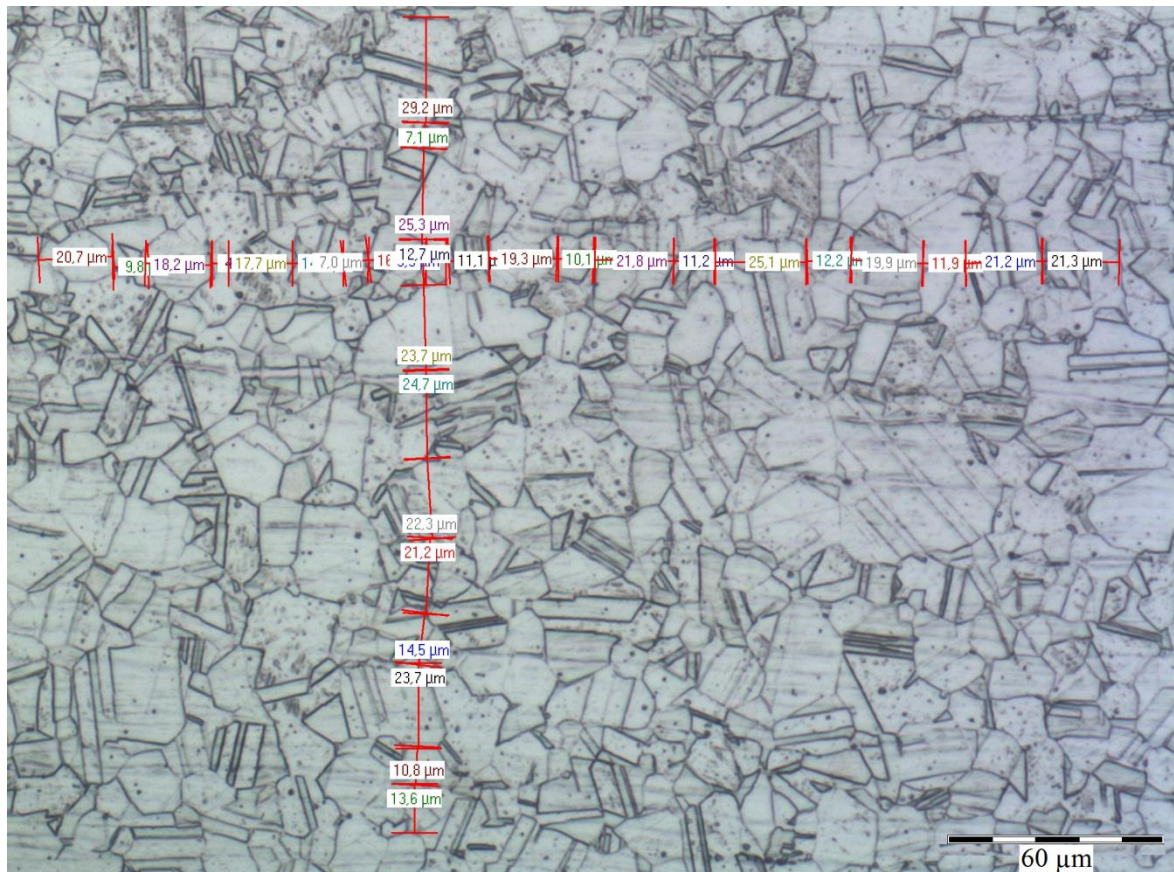


*Obr. 34. Detail vměstků 1000 x*

Na obr. 35. je prezentována struktura základního materiálu po naleptání. Je zřejmé, že se jedná o typickou austenitickou strukturu, která je homogenní, jemnozrná a vykazuje dvojčatovou morfologii.



*Obr. 35. Příčný řez leptanou strukturou 100 x*



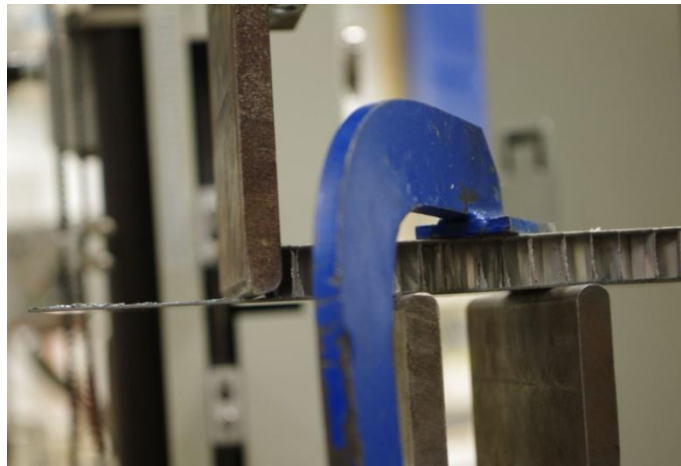
Obr. 36. Hodnocení velikosti zrna 400 x

Z měřených údajů vyplývá, že struktura byla velmi jemnozrná. Střední hodnota zrn činila 16,5 μm, přičemž běžná hodnota austenitických zrn se pohybuje kolem 60 μm.

### 5.2.2 Zkouška odlupem

Test byl prováděn za pokojové teploty  $T = 22\text{ °C}$  na universálním zkušebním stroji Zwick 1456. Z důvodu odřezání popisu u některých zk. těles nebyla provedena měření při vyšší teplotě, neboť zk. těles bylo málo. Neoznačená zk. tělesa jsou uvedena v poslední testované sérii a nepatří vzájemně k sobě.

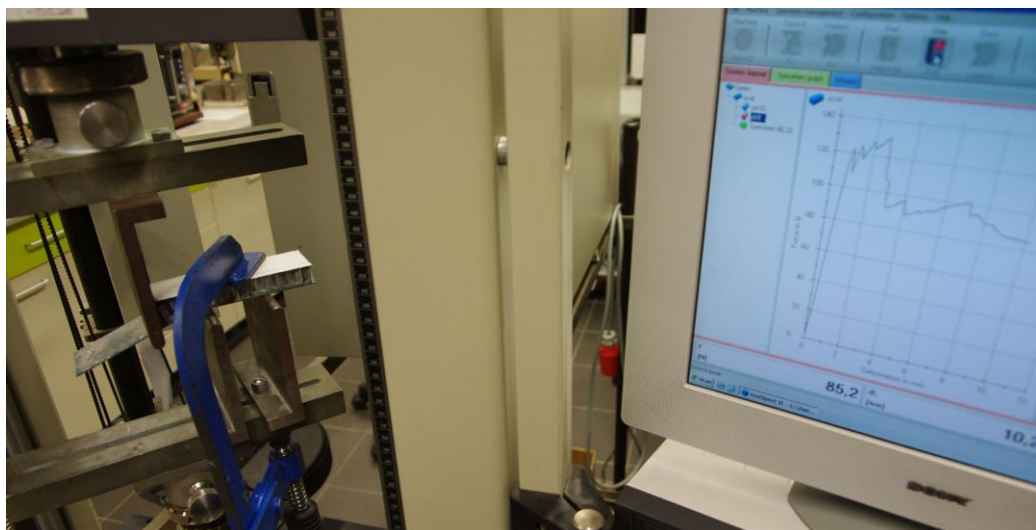
Podmínky zkoušky: rychlost zkoušky  $v = 10\text{ mm/min}$ , délka převisu zkoušeného tělesa 28 mm



*Obr. 37. Těleso před zkouškou odlupem*



*Obr. 38. Těleso po zkoušce*



*Obr. 39. Uchycení zkušebního tělesa v testovacím přípravku a záznam naměřené síly a deformace*

Tab. 4. Naměřené výsledky pro sílu potřebnou k odloupení ocelové vrstvy od Al voštiny

Série	$F_{\max}$	$\epsilon$	W
-	N	%	Nmm
PH10	157	4,1	273,06
PH9	131	3,8	282,00
PH8	109	1,8	94,34
PH7	148	1,3	89,08
PH6	154	3,4	213,08
PH5	167	3,2	258,26
LD8	181	1,6	126,51
LD6	89	1,2	42,92
LD4	125	1,8	106,07
PD5	136	4,1	280,59
PD4	162	1,7	129,16
LH6	48	10,4	248,79
S2	98	3,4	170,39
0	86	4,2	173,72
5svisle	47	7,4	152,10
5podel	124	4,8	305,44
5svisle	172	2,1	169,56
6	85	1,4	49,78
8	204	2,6	219,46

Tab. 5. Statistické vyhodnocení pro sérii PH

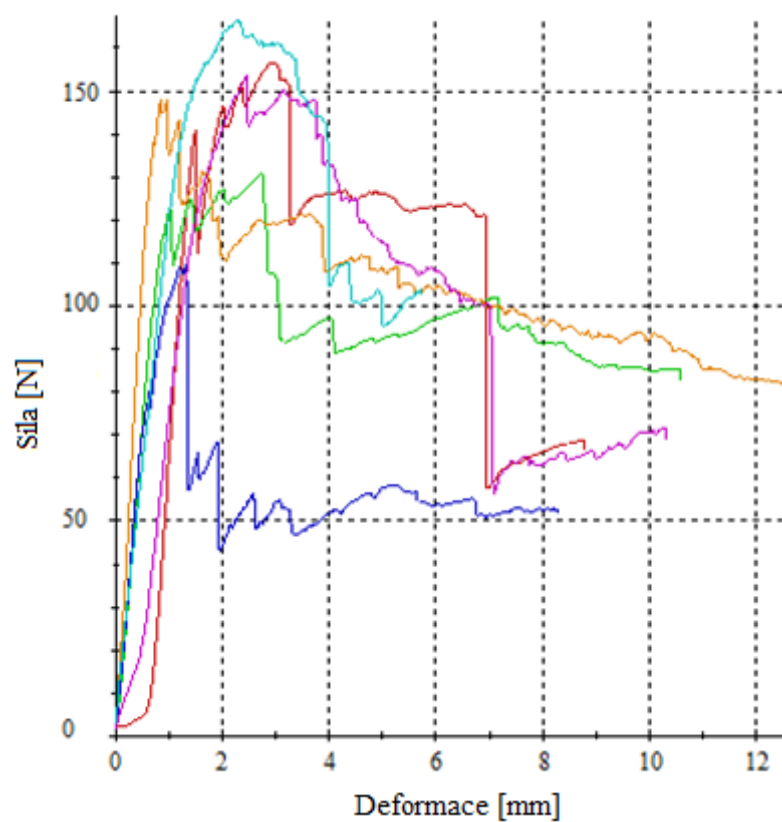
PH	$F_{\max}$	$\epsilon$	W
n = 6	N	%	Nmm
$\bar{x}$	144,3	2,9	201,64
s	20,8	1,1	88,41
v	14,41	37,76	43,84

Tab. 6. Statistické vyhodnocení pro sérii LD

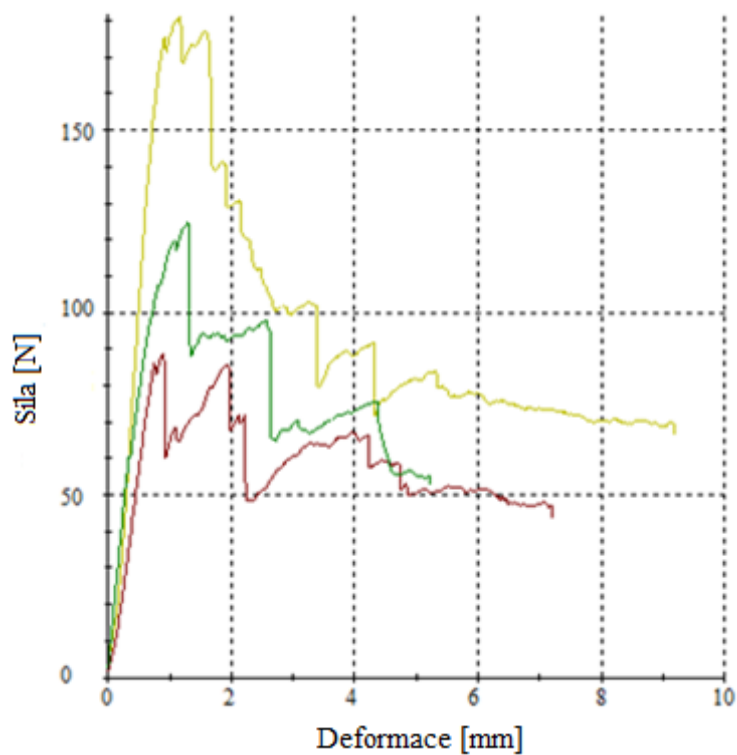
LD	$F_{\max}$	$\epsilon$	W
n = 3	N	%	Nmm
$\bar{x}$	131,7	1,5	91,83
s	46,6	0,3	43,58
v	35,49	18,24	47,45

Tab. 7. Statistické vyhodnocení pro sérii PD

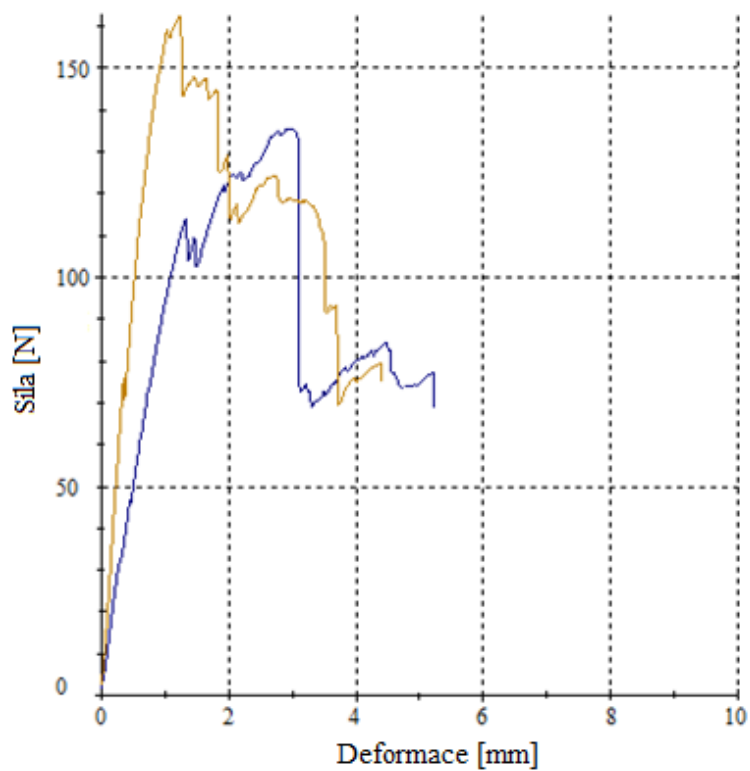
PD	$F_{\max}$	$\epsilon$	W
n = 2	N	%	Nmm
$\bar{x}$	149,0	2,9	204,82
s	18,9	1,7	107,01
v	12,67	57,62	52,25



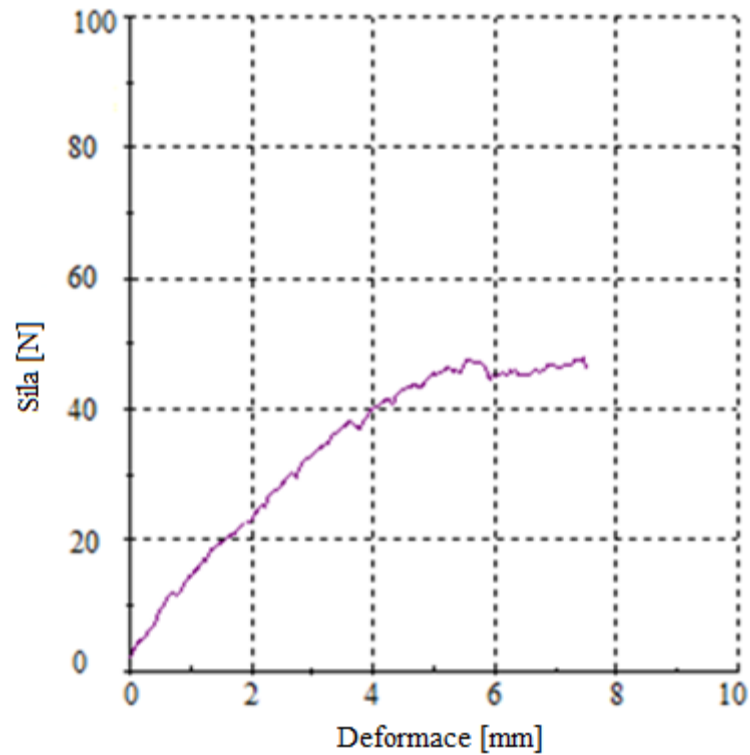
Obr. 40. Grafická závislost mezi silou a deformací pro sérii PH



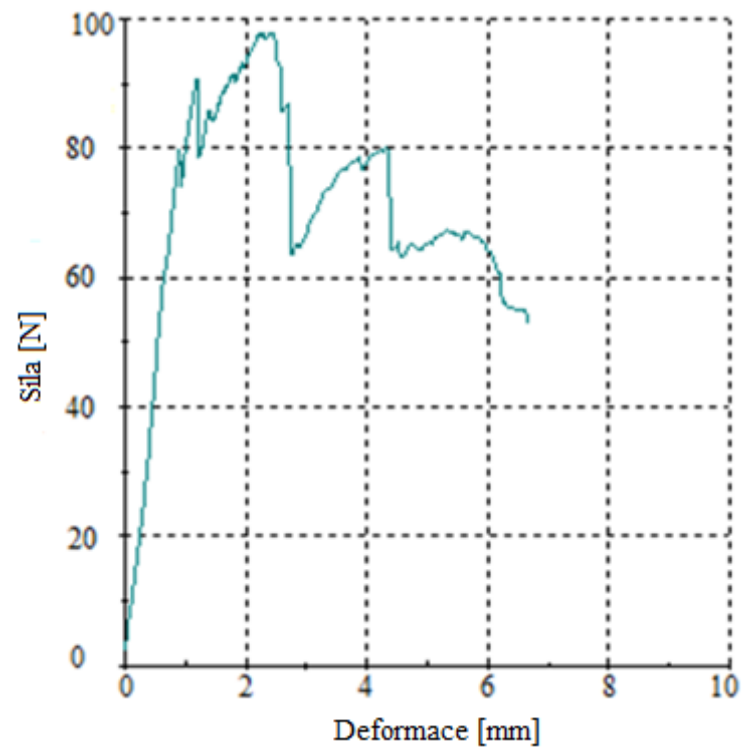
Obr. 41. Grafická závislost mezi silou a deformací pro sérii LD



Obr. 42. Grafická závislost mezi silou a deformací pro sérii PD

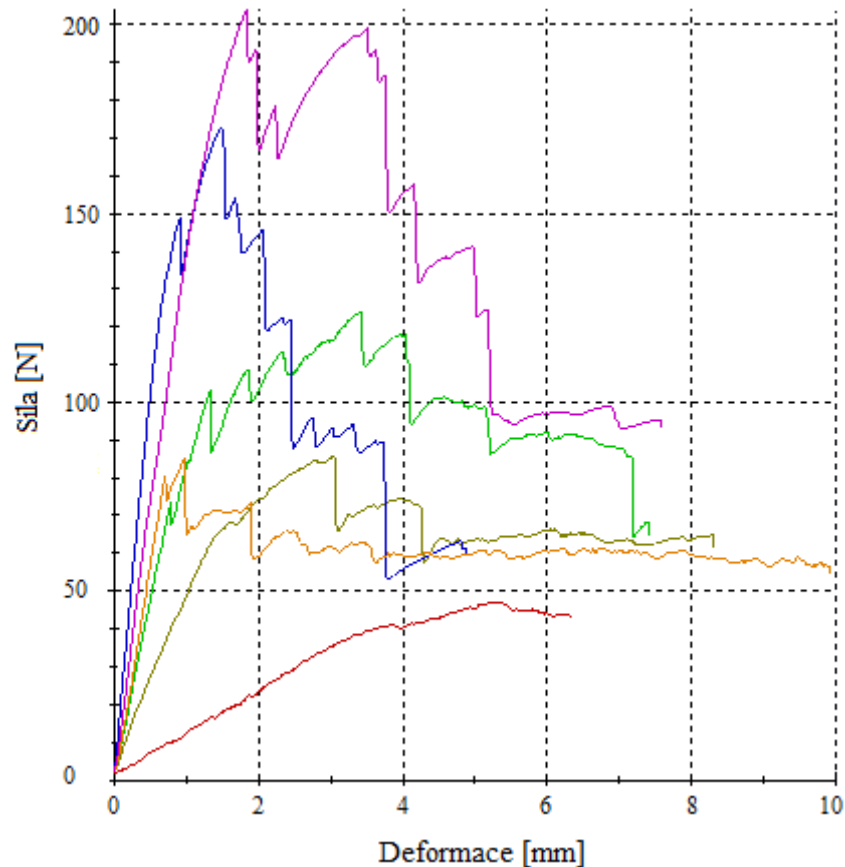


Obr. 43. Grafická závislost mezi silou a deformací pro sérii LH



Obr. 44. Grafická závislost mezi silou a deformací pro sérii S





Obr. 45. Grafická závislost mezi silou a deformací pro tělesa s odřezaným označením



Obr. 46. Vzorek PH6 po zkoušce odlupem

Ze zkoušky odlupem je zřejmé, že průměrná síla nutná pro odloupení ocelového potahu od Al voštiny je zhruba 140 N. Jedná se o nízkou hodnotu, navíc rozptyl jednotlivých měření je značný a ukazuje na nízkou adhezi lepidla k lepeným materiálům. To může být způsobeno nekvalitním odmaštěním povrchu lepených ocelových potahů, neboť se při zkoušce ukázalo, že v některých částech lepidlo drží a v jiných vůbec nebo minimálně. Rozdíly mezi jednotlivými sériemi jsou zanedbatelné a neprůkazné. Pro další zhodnocení

zkoušky je nutné otestovat zk. tělesa lepené jinými typy lepidel a poté vybrat nejvhodnější typ lepidla. Zvolené epoxidové lepidlo se zdá jako tuhé a křehké, navíc má malou smáčivost lepené voštiny.



*Obr. 47. Vzorek S2 s naneseným lepidlem po zkoušce*

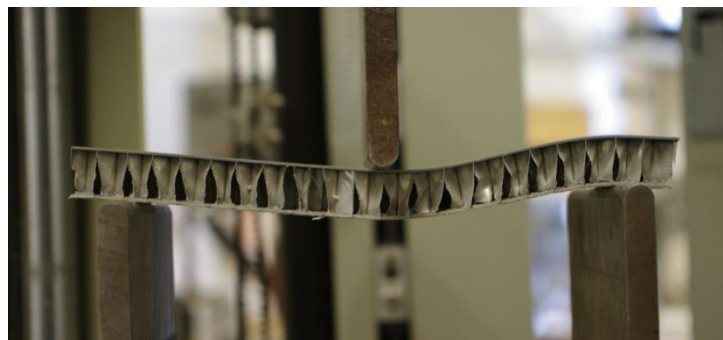


*Obr. 48. Vzorek S2 po zkoušce odlupem*

### 5.2.3 Zkouška tříbodovým ohybem

Test byl prováděn za pokojové teploty  $T = 22 \text{ °C}$  na universálním zkušebním stroji Zwick 1456. Pro zkoušku při vyšších teplotách byla zvolena pouze jedna teplota  $T = 70 \text{ °C}$ , protože zkušebních těles bylo málo. Deformace byla měřena přes příčnick stroje. Vyhodnocena byla mez pevnosti v ohybu.

Podmínky zkoušky: rychlost při měření modulu pružnosti  $E$ :  $v = 1 \text{ mm/min}$ , rychlost zkoušky  $v = 10 \text{ mm/min}$ , vzdálenost podpěr  $L_p = 140 \text{ mm}$ .



*Obr. 49. Průběh zkoušky při 22 °C*

Tab. 8. Naměřené výsledky tříbodového ohybu pro teplotu 22 °C

Série	E	$\sigma_K$	$\sigma_M$	$\epsilon$	W
-	MPa	MPa	MPa	%	Nmm
LD9	3950	10,60	11,0	0,7	737,45
LD10	3960	10,20	10,2	0,5	383,10
LD7	4420	13,10	13,3	0,6	645,43
LD5	4130	11,50	11,9	0,5	469,38
LH10	5100	13,90	14,8	0,8	1019,81
LH9	4510	12,40	12,5	0,6	582,83
LH7	4230	12,20	12,4	0,6	640,71
LH4	3970	11,50	11,6	0,5	484,70
PD10	4000	8,11	9,3	0,3	201,15
PD9	3770	11,70	11,8	0,6	607,21
PD8	4310	10,70	11,0	0,4	367,25
S10	3380	9,62	9,9	0,6	502,43
S9	5340	14,70	15,0	0,7	889,01
S8	2980	9,30	10,3	0,8	774,23
PH3	3250	7,11	7,4	0,5	265,96
PH4	3890	9,41	9,6	0,6	560,62

Tab. 9. Statistické vyhodnocení pro sérii LD za teploty 22 °C

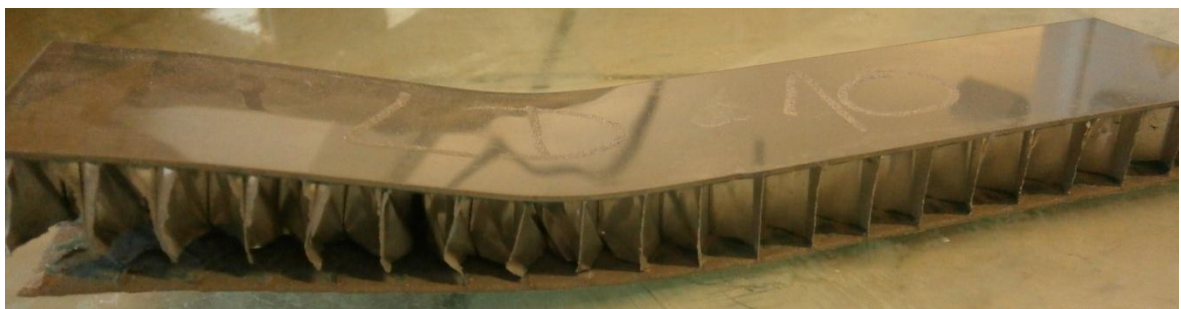
LD	E	$\sigma_K$	$\sigma_M$	$\epsilon$	W
n = 4	MPa	MPa	MPa	%	Nmm
$\bar{x}$	4110	11,40	11,60	0,6	558,84
s	220	1,29	1,32	0,1	161,54
v	5,34	11,3	11,35	19,57	28,91

Tab. 10. Statistické vyhodnocení pro sérii LH za teploty 22 °C

LH	E	$\sigma_K$	$\sigma_M$	$\epsilon$	W
n = 4	MPa	MPa	MPa	%	Nmm
$\bar{x}$	4450	12,50	12,80	0,6	682,01
s	484	0,99	1,38	0,1	234,22
v	10,88	7,94	10,81	17,53	34,34

Tab. 11. Statistické vyhodnocení pro sérii PD za teploty 22 °C

PD	E	$\sigma_K$	$\sigma_M$	$\epsilon$	W
n = 3	MPa	MPa	MPa	%	Nmm
$\bar{x}$	4030	10,20	10,70	0,5	391,87
s	273	1,84	1,28	0,1	204,15
v	6,77	18,16	11,93	32,48	52,1



Obr. 50. Vzorek LD10 po zkoušce 3bodovým ohybem

Tab. 12. Statistické vyhodnocení pro sérii S za teploty 22 °C

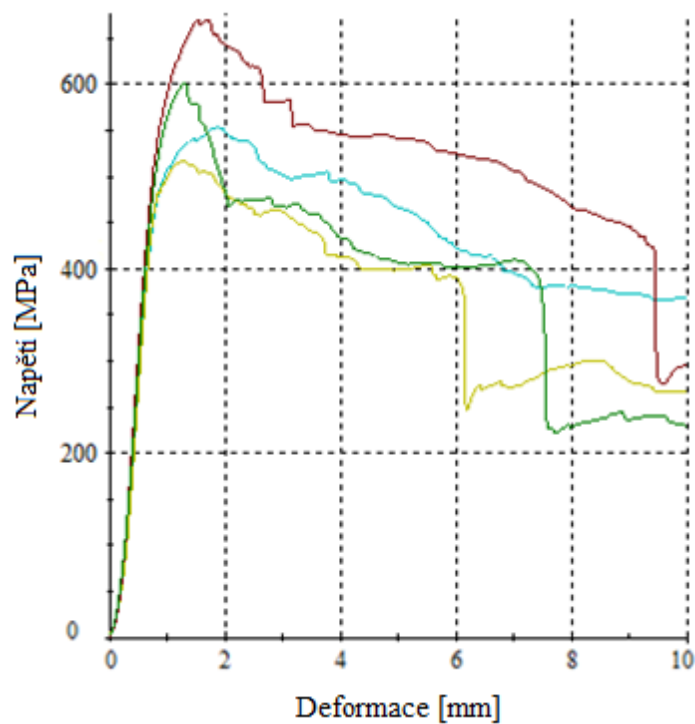
S	E	$\sigma_K$	$\sigma_M$	$\epsilon$	W
n = 3	MPa	MPa	MPa	%	Nmm
$\bar{x}$	3900	11,20	11,70	0,7	721,89
s	1260	3,03	2,84	0,1	198,54
v	32,37	27,03	24,26	18,17	27,5

Tab. 13. Statistické vyhodnocení pro sérii PH za teploty 22 °C

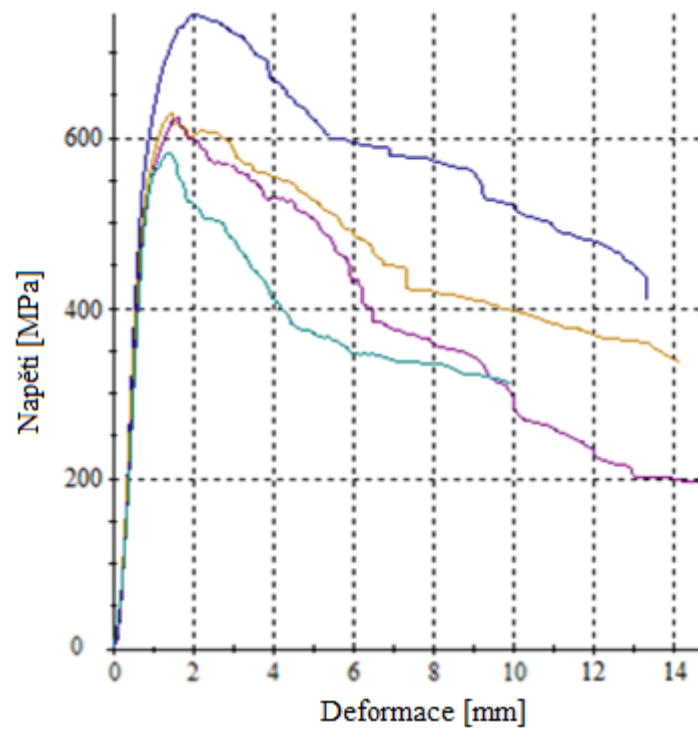
PH	E	$\sigma_K$	$\sigma_M$	$\epsilon$	W
n = 2	MPa	MPa	MPa	%	Nmm
$\bar{x}$	3570	8,26	8,50	0,6	413,29
s	451	1,62	1,58	0,1	208,36
v	12,64	19,66	18,64	22,95	50,41



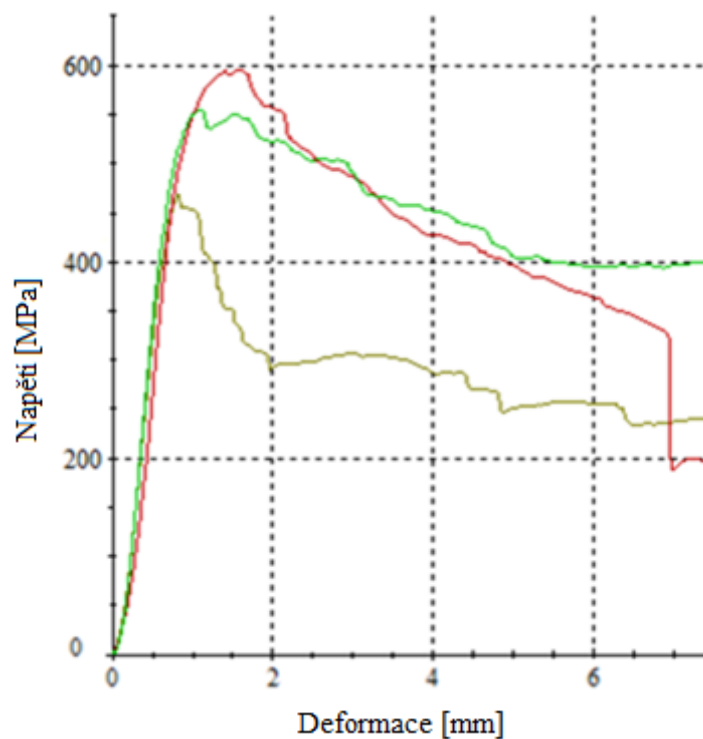
Obr. 51. Vzorek LD10 po zkoušce



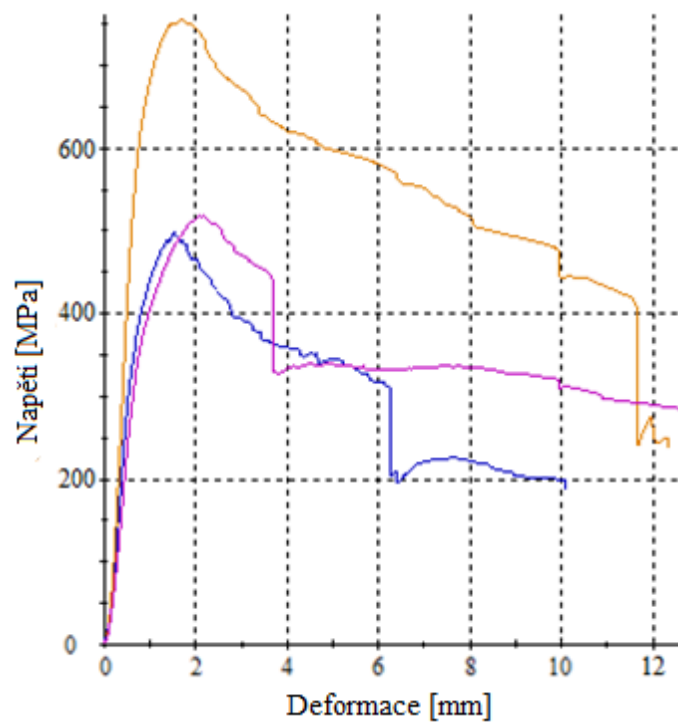
Obr. 52. Grafická závislost mezi napětím a deformací pro sérii LD při 22 °C



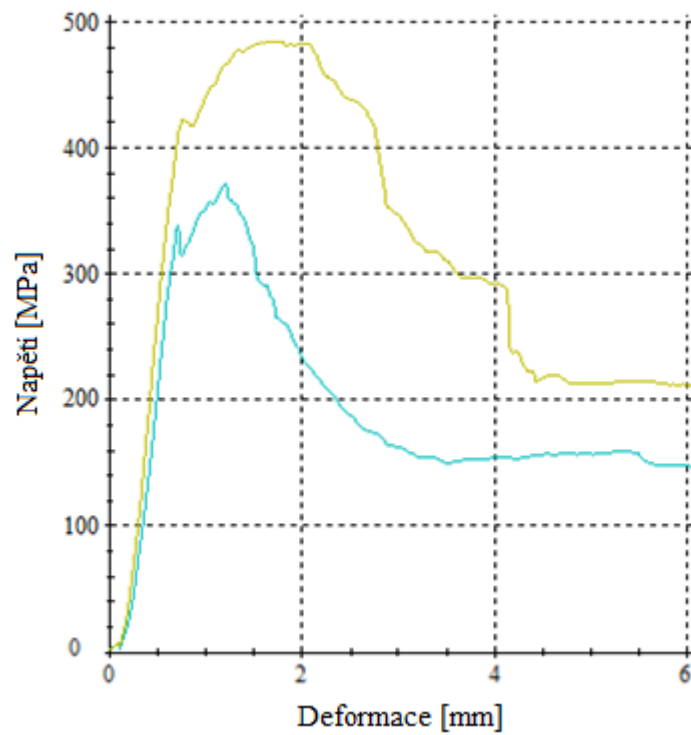
Obr. 53. Grafická závislost mezi napětím a deformací pro sérii LH při 22 °C



Obr. 54. Grafická závislost mezi napětím a deformací pro sérii PD při 22 °C



Obr. 55. Grafická závislost mezi napětím a deformací pro sérii S při 22 °C



Obr. 56. Grafická závislost mezi napětím a deformací pro sérii PH při 22 °C



Obr. 57. Zkouška v teplotní komoře při 70 °C

Tab. 14. Naměřené výsledky třibodového ohybu pro teplotu 70 °C

Série	E	$\sigma_k$	$\sigma_M$	$\epsilon$	W
-	MPa	MPa	MPa	%	Nmm
PD7	1600	7,02	7,05	0,6	313,90
PD2	1370	3,24	3,72	0,3	71,15
PD1	1140	3,68	4,07	0,4	105,38
LD1	1840	4,57	5,76	0,3	117,74
LD2	1980	5,60	6,29	0,8	482,27
LD3	2100	8,68	8,77	0,6	406,37
LH3	2120	5,66	6,70	0,3	137,77
LH2	2020	6,03	6,69	0,4	131,87
LH1	2540	7,71	8,30	0,4	249,57
PH1	1370	4,58	5,23	0,4	127,49
PH2	1550	5,41	6,50	0,4	190,70
S1	1500	5,22	5,25	0,5	231,98
S4	1400	5,67	5,71	0,8	443,85



Tab. 15. Statistické vyhodnocení pro sérii PD za teploty 70 °C

PD	E	$\sigma_K$	$\sigma_M$	$\epsilon$	W
n = 3	MPa	MPa	MPa	%	Nmm
$\bar{x}$	1370	4,64	4,95	0,4	163,48
s	229	2,07	1,83	0,1	131,39
v	16,73	44,51	36,94	32,56	80,37



Obr. 58. Těleso PD2 po zkoušce ohybem

Tab. 16. Statistické vyhodnocení pro sérii LD za teploty 70 °C

LD	E	$\sigma_K$	$\sigma_M$	$\epsilon$	W
n = 3	MPa	MPa	MPa	%	Nmm
$\bar{x}$	1970	6,28	6,94	0,6	335,79
s	131	2,14	1,61	0,2	191,77
v	6,65	34,02	23,14	43,29	57,11

Tab. 17. Statistické vyhodnocení pro sérii LH za teploty 70 °C

LH	E	$\sigma_K$	$\sigma_M$	$\epsilon$	W
n = 3	MPa	MPa	MPa	%	Nmm
$\bar{x}$	2227	6,47	7,23	0,4	173,07
s	276	1,09	0,93	0,1	66,32
v	12,39	16,89	12,82	15,75	38,32



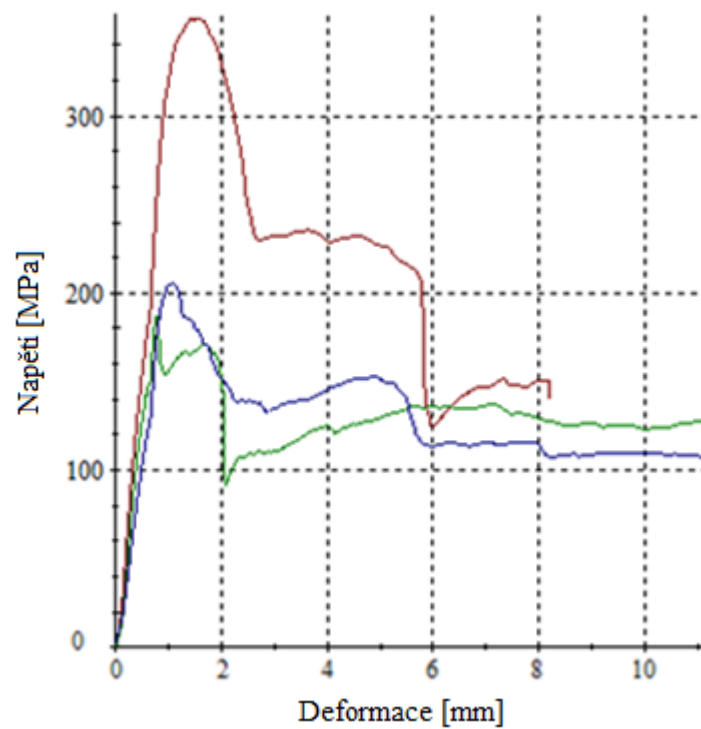
Obr. 59. Vzorek PH2 po zkoušce

Tab. 18. Statistické vyhodnocení pro sérii PH za teploty 70 °C

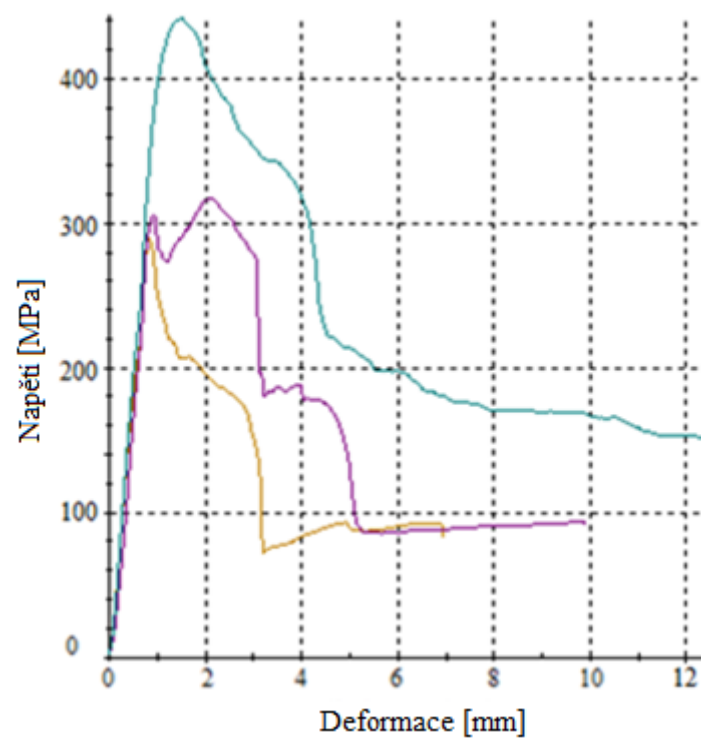
PH	E	$\sigma_K$	$\sigma_M$	$\epsilon$	W
n = 2	MPa	MPa	MPa	%	Nmm
$\bar{x}$	1460	5,00	5,87	0,4	159,10
s	127	0,59	0,90	0	44,69
v	8,72	11,75	15,31	0	28,09

Tab. 19. Statistické vyhodnocení pro sérii S za teploty 70 °C

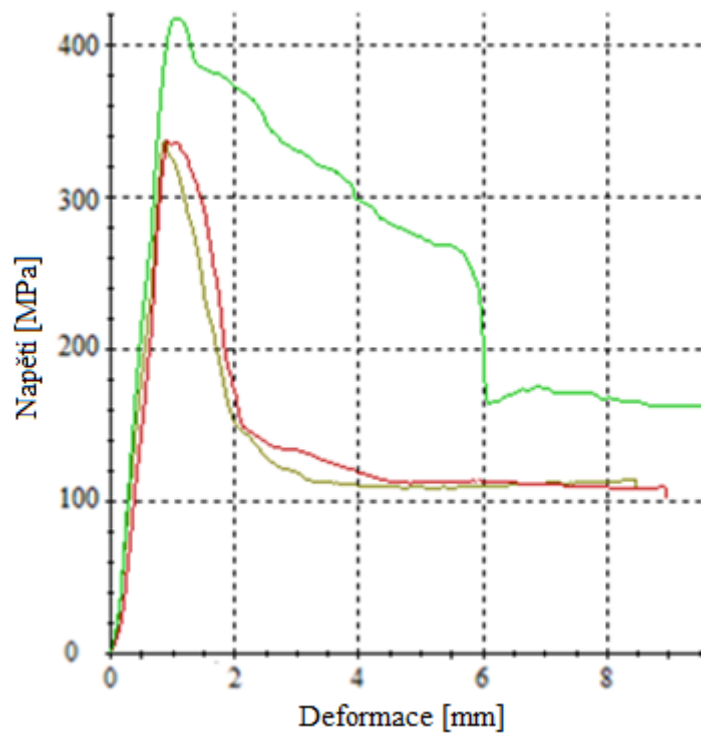
S	E	$\sigma_K$	$\sigma_M$	$\epsilon$	W
n = 2	MPa	MPa	MPa	%	Nmm
$\bar{x}$	1450	5,45	5,48	0,7	337,92
s	71	0,32	0,33	0,2	149,81
v	4,88	5,84	5,94	32,64	44,34



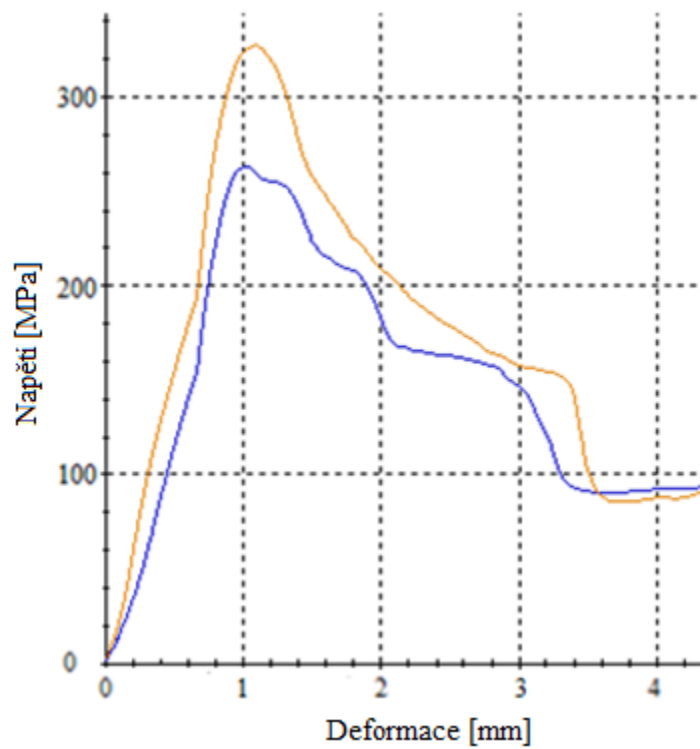
Obr. 60. Grafická závislost mezi napětím a deformací pro sérii PD při 70 °C



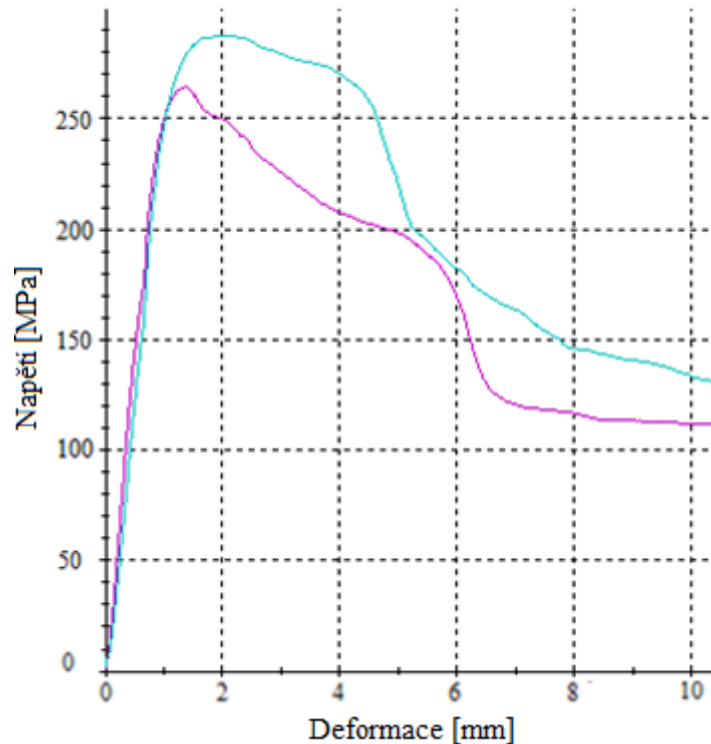
Obr. 61. Grafická závislost mezi napětím a deformací pro sérii LD při 70 °C



Obr. 62. Grafická závislost mezi napětím a de-  
formací pro sérii LH při 70 °C



Obr. 63. Grafická závislost mezi napětím a de-  
formací pro sérii PH při 70 °C



Obr. 64. Grafická závislost mezi napětím a deformací pro sérii S při 70 °C

Jak je z výsledků při teplotě 22 °C patrné, u sérií LD, LH, PD a S vychází mez pevnosti v průměru okolo 10,7-12,8 MPa. Pouze série PH vykazuje nižší hodnotu 8,5 MPa, což může být ovlivněno nízkým počtem zk. těles (2 ks). Také rozptyl naměřených výsledků je vzájemně až třetinový, což ukazuje na nestejnou kvalitu spoje v závislosti na místě ve vyrobeném zkušebním panelu.

Při teplotě 70 °C došlo k očekávanému poklesu meze pevnosti, pro všechny série zhruba na úroveň 5-7 MPa s podobně velkým rozptylem mezi jednotlivými zk. tělesy.

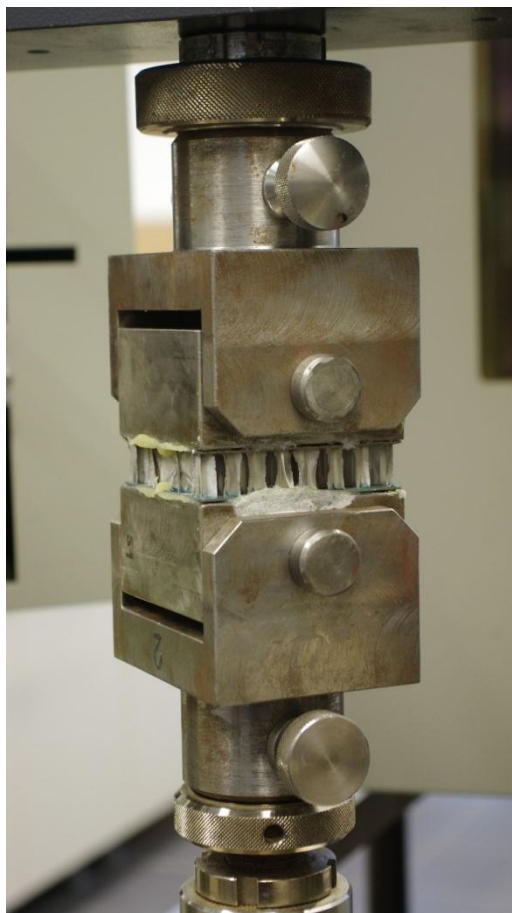
Nejlépeších výsledků při obou teplotách dosáhla série LH (12,8 a 7,2 MPa)

Výsledky meze pevnosti v ohybu nerezo-hliníkových sendvičů zatím není možno porovnat s jinými zkušebními tělesy, pouze s panely celohliníkovými. U nich však pevnost v ohybu činila 50 MPa, tj. je zhruba 5x vyšší hodnota, což je pro ocelový potah zvláště nepříznivý výsledek zapříčiněný zřejmě špatnou adhezí lepidla k povrchu kovu. Tudíž i zkouška tříbodovým ohybem potvrzuje nevhodnost použitého lepidla. Stálo by tedy za úvahu vyzkoušet i lepidlo použité pro lepení celohliníkových panelů.

#### 5.2.4 Flatwise test (zkouška tahem na plocho)

Test byl prováděn za pokojové teploty  $T = 22^{\circ}\text{C}$  na universálním zkušebním stroji Zwick 1456. Zkouška při vyšších teplotách nebyla prováděna, neboť zk. těles bylo málo. Deformace byla měřena přes příčnick stroje. Vyhodnocována je síla nutná pro odtržení potahu od přilepené voštiny ( $F_{\max}$ ). Zkouška byla provedena dle normy ASTM C297/C297M. Pro přilepení sendviče k upínací čelisti bylo použito dvousložkové lepidlo Plexus MA 330. Ocelové potahy nebyly odmastěny, pouze plocha se speciální povrchovou úpravou byla odbroušena smirkovým papírem - pro zajištění dobré adheze.

Podmínky zkoušky: rychlost zkoušky  $v = 5 \text{ mm/min}$



*Obr. 65. Zkušební těleso při Flatwise testu*

*Tab. 20. Naměřené výsledky pro sílu potřebnou k odloupení ocelové vrstvy od Al voštiny*

<b>Série</b>	<b>F<sub>max</sub></b>	<b>W</b>
-	<b>N</b>	<b>Nmm</b>
<b>S1</b>	2670	837,72
<b>S2</b>	1370	381,01
<b>S4</b>	4990	1911,58
<b>S3</b>	3450	1295,15
<b>LH3</b>	2360	586,33
<b>LH1</b>	3010	803,02
<b>LH4</b>	5570	2410,27
<b>LH2</b>	1910	539,90
<b>LD1</b>	3810	1334,26
<b>LD2</b>	2070	800,40
<b>LD4</b>	3420	1065,57
<b>LD3</b>	3300	887,80
<b>PH1</b>	2840	887,35
<b>PH3</b>	1640	479,17
<b>PH4</b>	3180	919,00
<b>PH2</b>	2880	854,09
<b>PD2</b>	2310	1222,58
<b>PD4</b>	3160	1075,89
<b>PD1</b>	2590	619,66
<b>PD3</b>	1870	482,54

Tab. 21. Statistické vyhodnocení pro sérii S

S	$F_{\max}$	W
n = 4	N	Nmm
$\bar{x}$	3120	1106,36
s	1513	653,79
v	48,51	59,09



Obr. 66. Zkušební tělesa po zkoušce

Tab. 22. Statistické vyhodnocení pro sérii LH

LH	$F_{\max}$	W
n = 4	N	Nmm
$\bar{x}$	3213	1084,88
s	1635	891,00
v	50,90	82,13



*Tab. 23. Statistické vyhodnocení pro sérii LD*

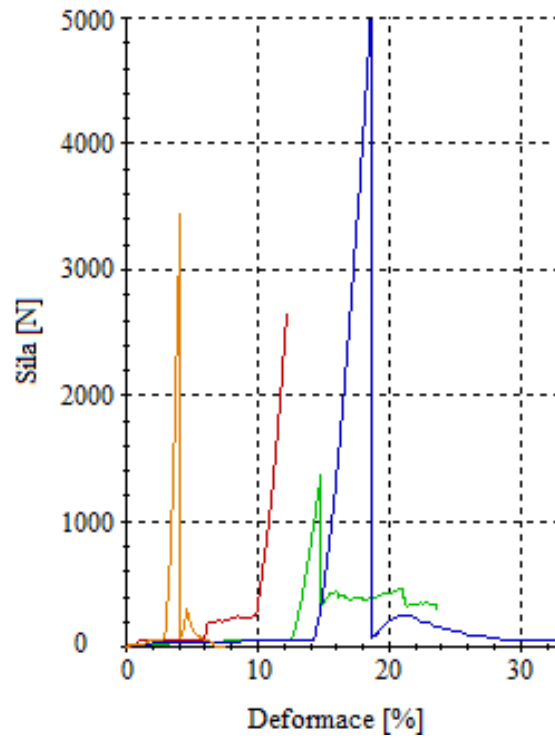
<b>LD</b>	<b>F<sub>max</sub></b>	<b>W</b>
<b>n = 4</b>	<b>N</b>	<b>Nmm</b>
$\bar{x}$	3150	1022,01
<b>s</b>	752	235,60
<b>v</b>	23,88	23,05

*Tab. 24. Statistické vyhodnocení pro sérii PH*

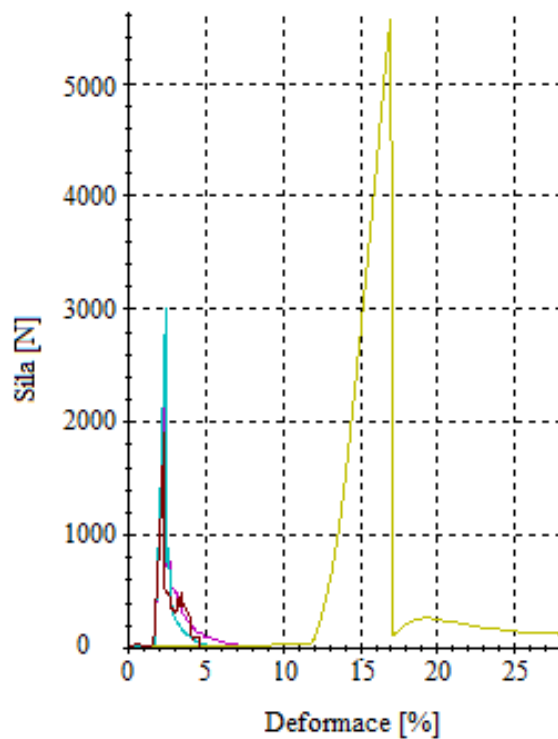
<b>PH</b>	<b>F<sub>max</sub></b>	<b>W</b>
<b>n = 4</b>	<b>N</b>	<b>Nmm</b>
$\bar{x}$	2635	784,90
<b>s</b>	680	205,54
<b>v</b>	25,82	26,19

*Tab. 25. Statistické vyhodnocení pro sérii PD*

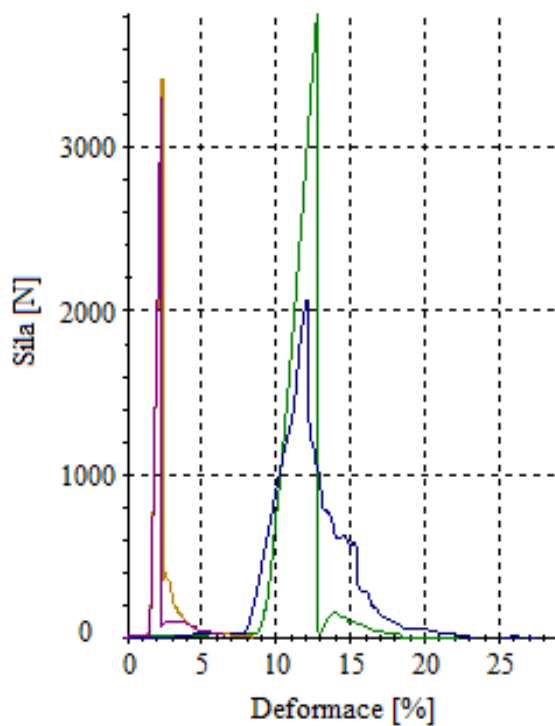
<b>PD</b>	<b>F<sub>max</sub></b>	<b>W</b>
<b>n = 4</b>	<b>N</b>	<b>Nmm</b>
$\bar{x}$	2483	850,17
<b>s</b>	540	354,93
<b>v</b>	21,76	41,75



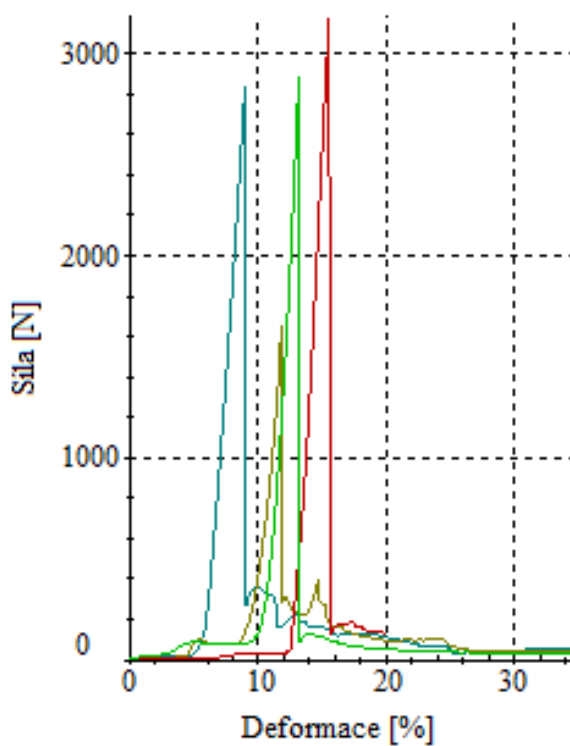
Obr. 67. Grafická závislost mezi silou a pom. deformací pro sérii S



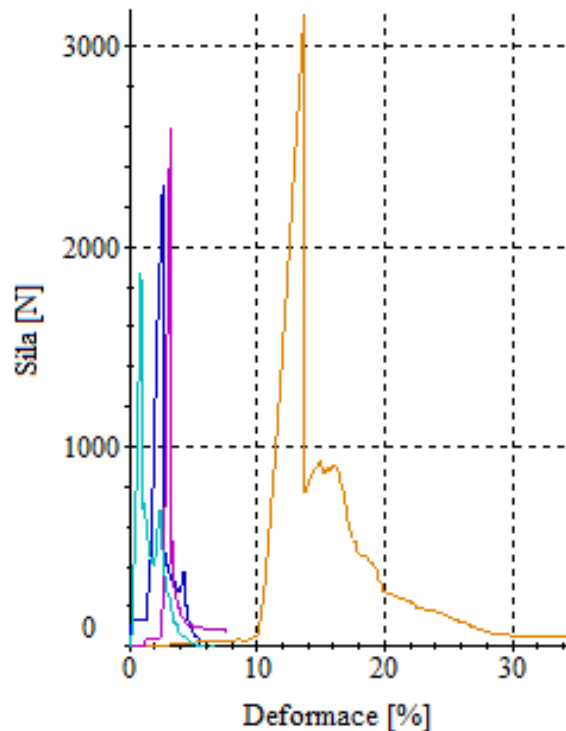
Obr. 68. Grafická závislost mezi silou a pom. deformací pro sérii LH



Obr. 69. Grafická závislost mezi silou a pom. deformací pro sérii LD



Obr. 70. Grafická závislost mezi silou a pom. deformací pro sérii PH



Obr. 71. Grafická závislost mezi silou a pom. deformací pro sérii PD

Ze zkoušky Flatwise test taktéž vyplývá, že pevnost spoje není dostatečná. Je patrný velký rozptyl mezi jednotlivými zkušebními tělesy. Při srovnání jednotlivých sérií, však velký rozdíl není. Nejlépe vychází série S, LH, LD kde činí únosnost hodnoty okolo 3100 N. Série PH a PD vykazují únosnost o něco nižší.

Výsledky u všech 3 provedených mechanických zkoušek potvrzují špatnou adhezi použitého epoxidového lepidla k nerezovému ocelovému povrchu potahů a ukazují na nevhodnost použitého lepidla pro tuto aplikaci. Je nanejvýš nutné vyzkoušet jiné typy lepidel. Použité lepidlo tedy nelze doporučit.

### 5.3 Analýza adheze hliníkových a ocelových sendvičů

Byla připravena zkušební tělesa 2 typů pro zkoušku tříbodovým ohybem a Flatwise test.

1) celohliníkový panel – **lepidlo 1** od výrobce Bayer – dvousložkové polyuretanové lepidlo obsahující složky A: Desmodur 44V20L a B: Baydur AM-A-900 s hustotou  $1100 \text{ kg/m}^3$ , viskozitou směsi  $400 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  a poměrem míchání směsí 100/55 kg.

2) ocel-hliník-ocel – **lepidlo 2** od výrobce Bayer - dvousložkové polyuretanové lepidlo obsahující složky A: Desmodur VL (s hustotou  $1230 \text{ kg/m}^3$ , viskozitou  $90 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ) a B: Desmophen 1150 (s hustotou  $1010 \text{ kg/m}^3$  a viskozitou  $3500 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ).

### 5.3.1 Zkouška tříbodovým ohybem

Test byl prováděn za pokojové teploty  $T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$  na universálním zkušebním stroji Zwick 1456. Pro zkoušku při vyšších teplotách byla zvolena pouze jedna teplota  $T = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ , protože zkušebních těles bylo málo. Deformace byla měřena přes příčnick stroje. Vyhodnocena byla mez pevnosti v ohybu.

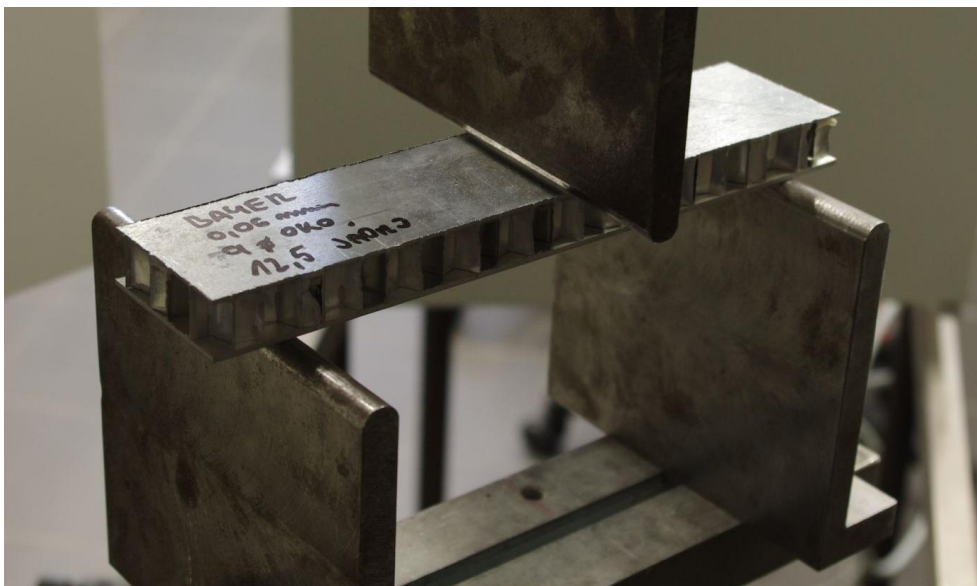
Podmínky zkoušky: rychlost při měření modulu pružnosti E:  $v = 1 \text{ mm/min}$ , rychlost zkoušky  $v = 10 \text{ mm/min}$ , vzdálenost podpěr  $L_p = 140 \text{ mm}$ .

Tab. 26. Naměřené výsledky tříbodového ohybu pro celohliníkové a ocelové panely

Nr	E	$\sigma_K$	$\sigma_M$	$\epsilon$	W
-	MPa	MPa	MPa	%	Nmm
<b>Lepidlo 1</b> <b>T = 22 °C</b>	4560	11,20	11,80	0,3	193,83
	5740	18,60	20,80	0,4	468,37
	937	3,55	3,97	9,4	4090,97
	815	4,35	4,66	1,0	375,87
	4560	18,00	18,20	0,6	788,24
<b>Lepidlo 2</b> <b>T = 22 °C</b>	238	2,49	3,55	8,1	2642,50
	223	2,56	3,59	7,5	2420,44
<b>Lepidlo 1</b> <b>T = 70 °C</b>	153	1,85	3,43	9,9	3423,20
	348	1,95	3,11	8,8	2799,21
	1140	3,88	4,20	0,4	125,90
	249	1,52	3,12	6,9	2097,67
	844	3,85	3,91	0,6	180,04

Tab. 27. Statistické vyhodnocení pro lepidlo 1 za teploty 22 °C

Lepidlo 1 T = 22 °C	E	$\sigma_K$	$\sigma_M$	$\epsilon$	W
n = 5	MPa	MPa	MPa	%	Nmm
$\bar{x}$	3322	11,14	11,89	2,3	1183,46
s	2285	7,18	7,65	4,0	1639,57
v	68,78	64,49	64,38	169,05	138,54



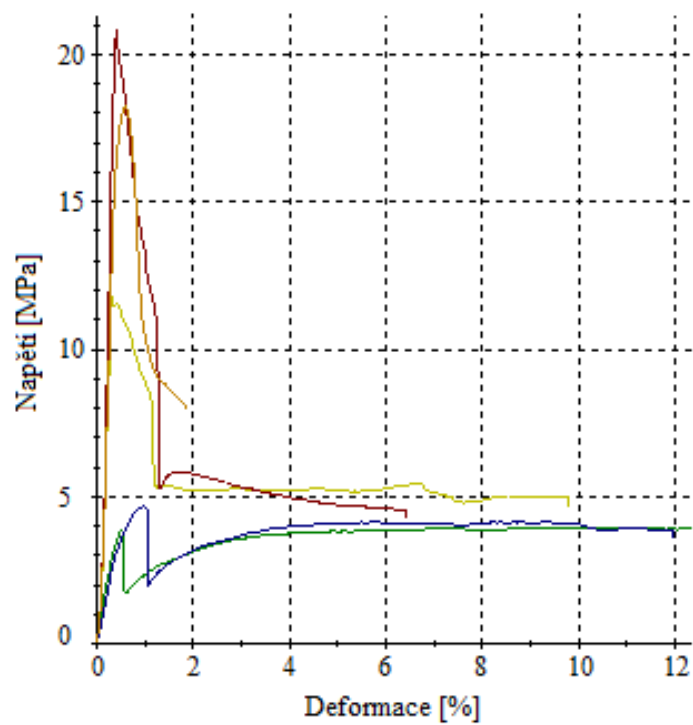
Obr. 72. Celohliníkový sendvič s lepidlem 1 při zkoušce ohybem

Tab. 28. Statistické vyhodnocení pro lepidlo 2 za teploty 22 °C

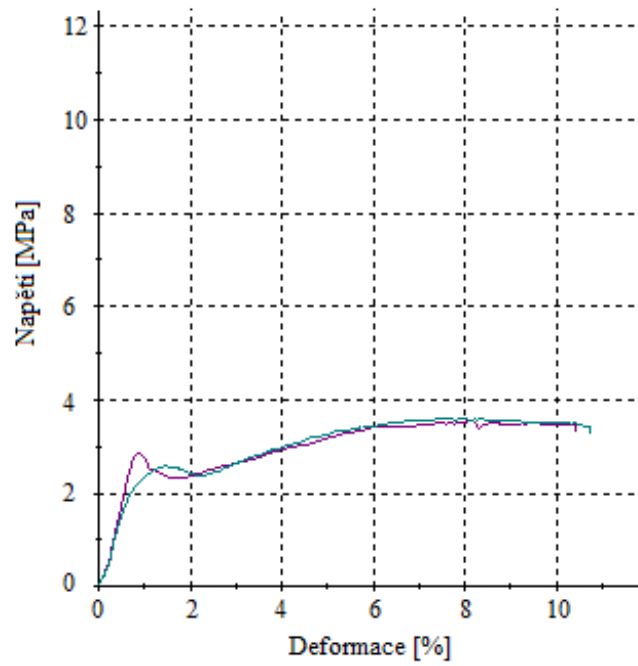
Lepidlo 2 T = 22 °C	E	$\sigma_K$	$\sigma_M$	$\epsilon$	W
n = 2	MPa	MPa	MPa	%	Nmm
$\bar{x}$	231	2,53	3,57	7,8	2531,47
s	11	0,05	0,03	0,4	157,02
v	4,60	1,96	0,79	5,44	6,20

Tab. 29. Statistické vyhodnocení pro lepidlo 1 za teploty 70 °C

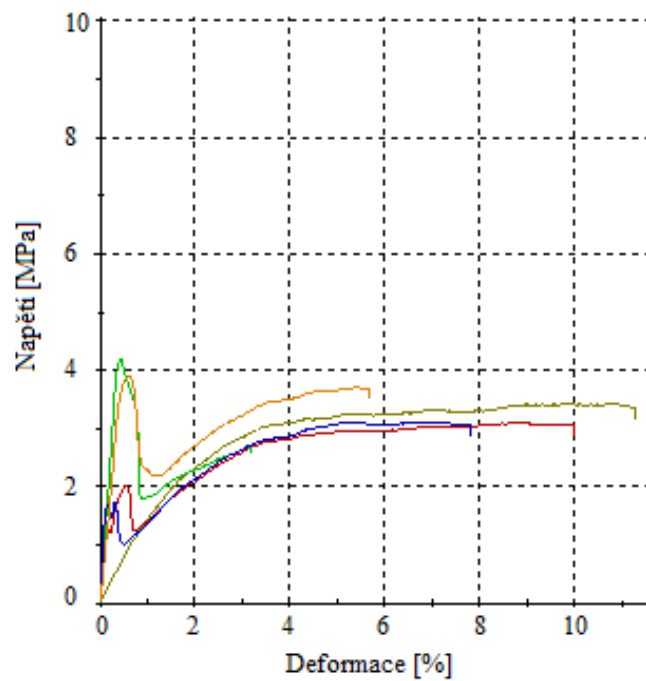
Lepidlo 1 T = 70 °C	E	$\sigma_K$	$\sigma_M$	$\epsilon$	W
n = 5	MPa	MPa	MPa	%	Nmm
$\bar{x}$	547	2,61	3,55	5,3	1725,20
s	425	1,16	0,49	4,5	1510,03
v	77,78	44,32	13,68	85,14	87,53



Obr. 73. Grafická závislost mezi napětím a deformací u lepidla 1 při teplotě 22°C

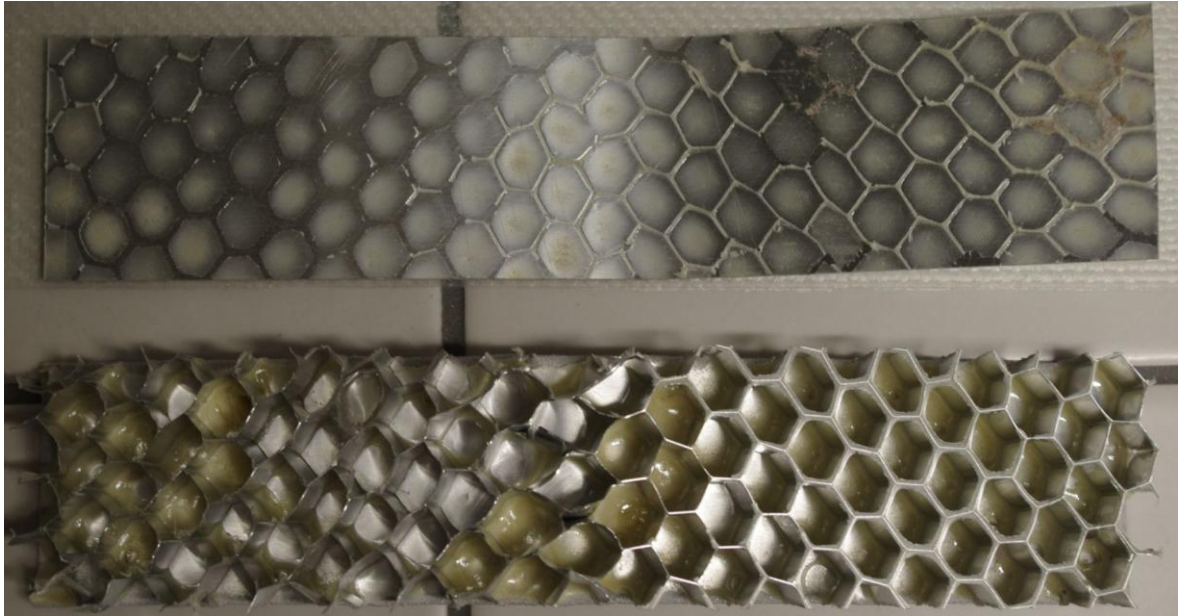


Obr. 74. Grafická závislost mezi napětím a deformací u lepidla 2 při teplotě 22°C

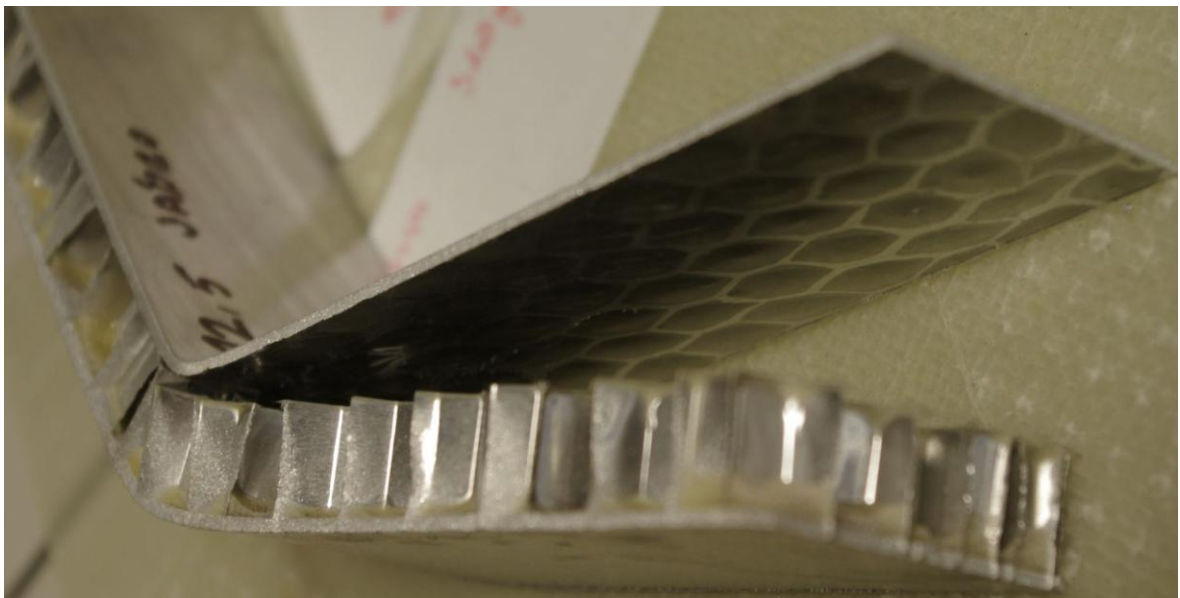


Obr. 75. Grafická závislost mezi napětím a deformací u lepidla 1 při teplotě 70°C





*Obr. 76. Chyba při technologii lepení – lepidlo před vytvrzením odteklo na spodní nosnou vrstvu a horní nosná vrstva zůstala bez lepidla*



*Obr. 77. Těleso po zkoušce ohybem*

Výsledky pro mez pevnosti v ohybu potvrzují chybu při lepení Al voštiny k vnějším ocelovým nebo Al potahům. Pro celohliníkový panel vychází pevnost 12 MPa, což je oproti hodnotě 50 MPa, která byla naměřena u původních celohliníkových panelů, značně nižší hodnota, zapříčiněná absencí lepidla na horním potahu. Nicméně výsledek je srovnatelný pro ocelový potah a epoxidové lepidlo při  $T = 22\text{ °C}$ . Při  $T = 70\text{ °C}$  je zde pevnost nižší, asi 3,6 MPa (oproti 5-7 MPa). Pro lepidlo 2 a ocelový potah byl výsledek ještě horší.

### 5.3.2 Flatwise test

Test byl prováděn za pokojové teploty  $T = 22^{\circ}\text{C}$  na universálním zkušebním stroji Zwick 1456. Deformace byla měřena přes příčnick stroje. Vyhodnocována je síla nutná pro odtržení potahu od přilepené voštiny ( $F_{\max}$ ).

Podmínky zkoušky: rychlost zkoušky  $v = 5 \text{ mm/min}$

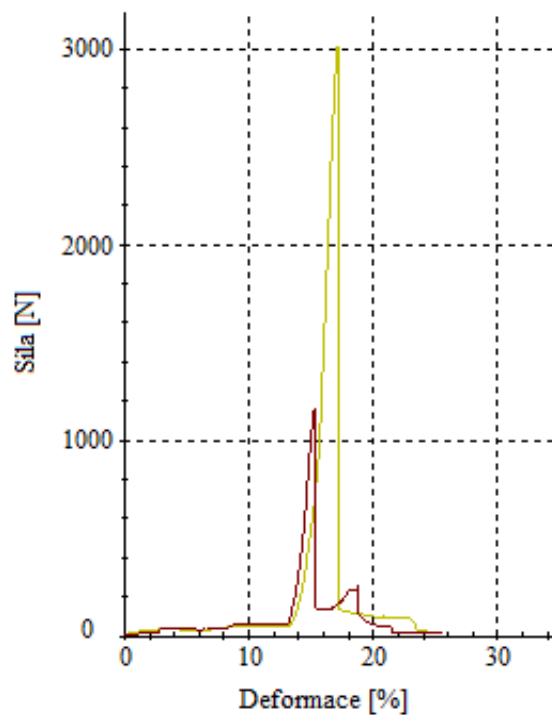
*Tab. 30. Naměřené výsledky pro sílu potřebnou k odloupení nosné vrstvy od voštiny*

Série	$F_{\max}$	W
-	N	Nmm
Lepidlo 1	3020	877,18
	1170	318,45
Lepidlo 2	352	152,73

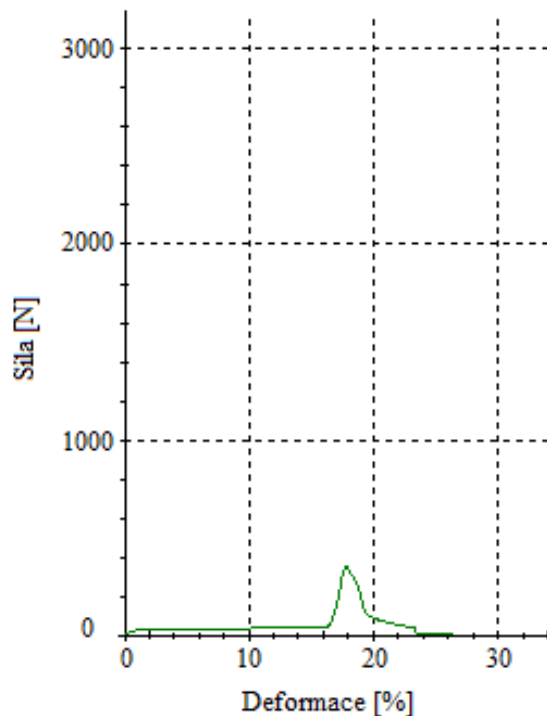
*Tab. 31. Statistické vyhodnocení pro lepidlo 1*

Lepidlo 1	$F_{\max}$	W
n = 2	N	Nmm
$\bar{x}$	2095	597,82
s	1308	395,08
v	62,44	66,09

Při srovnání únosnosti spoje vytvořených nově zvolenými lepidly 1 a 2 s původně použitým epoxidovým lepidlem vidíme ještě nižší hodnoty (ohyb, flatwise). Toto bylo zřejmě ovlivněno nevhodným postupem při lepení, neboť z horního potahu lepidlo steklo na spodní potah ještě před jeho vytvrzením. U lepidla 2 také zřejmě nedošlo k jeho řádnému vytvrzení - lepidlo bylo stále měkké a lepkavé.



Obr. 78. Grafická závislost mezi silou a deformací u lepidla 1



Obr. 79. Grafická závislost mezi silou a deformací u lepidla 2

## 5.4 Analýza adheze ocelových a hliníkových sendvičů

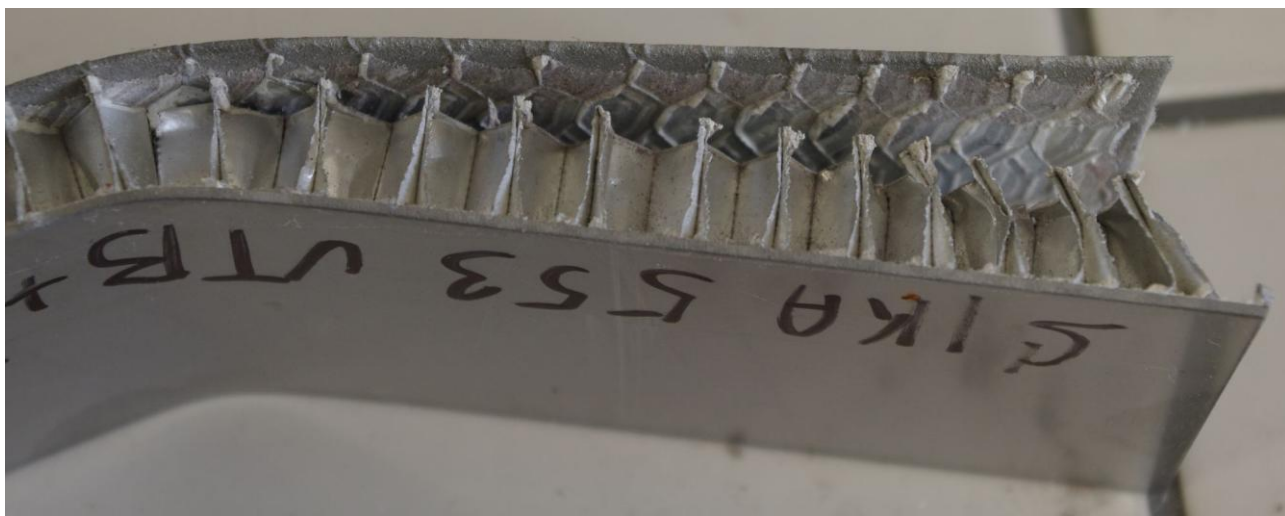
Byla připravena zkušební tělesa několika typů pro zkoušku tříbodovým ohybem.

- 1) ocel-hliník-ocel – **lepidlo 1** – dvoukomponentní polyuretanové lepidlo Sikaflex 553 2K s povrchovou úpravou čišněním (hustota směsi  $1400 \text{ kg/m}^3$ , poměr míchání směsi 11,8:1)
- 2) celohliníkový panel – **lepidlo 2** – polyuretanové lepidlo Gorilla Glue s hustotou 3800-6000  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ , **lepidlo 3** – dvousložkové polyuretanové lepidlo SikaForce 7701 L20 (hustota  $1300 \text{ kg/m}^3$ , viskozita směsi  $3800 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ , poměr míchání směsi 100:29  $\text{kg}$ ) s povrchovou úpravou čišnění/zdrsnění/čistění a obsahující složky A: SikaForce 7701 L20 a B: SikaForce 7010, **lepidlo 4** - SikaForce 7701 L20 s povrchovou úpravou broušením, **lepidlo 5** - SikaForce 7701 L20 s povrchovou úpravou čišněním, **lepidlo 6** – dvousložkové PUR lepidlo od výrobce Agglu (hustota  $1560 \text{ kg/m}^3$ , viskozita směsi  $4000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ , poměr míchání směsi 100:20  $\text{kg}$ ) s aktivátorem a obsahující složky A: Neopur 1943 a B: Adiflex 935, **lepidlo 7** - dvousložkové PUR lepidlo od výrobce Agglu bez aktivátoru.

### 5.4.1 Zkouška tříbodovým ohybem

Test byl prováděn za pokojové teploty  $T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$  na universálním zkušebním stroji Zwick 1456. Deformace byla měřena přes příčník stroje. Vyhodnocena byla mez pevnosti v ohybu.

Podmínky zkoušky: rychlost při měření modulu pružnosti  $E$ :  $v = 1 \text{ mm/min}$ , rychlost zkoušky  $v = 10 \text{ mm/min}$ , vzdálenost podpěr  $L_p = 140 \text{ mm}$ .



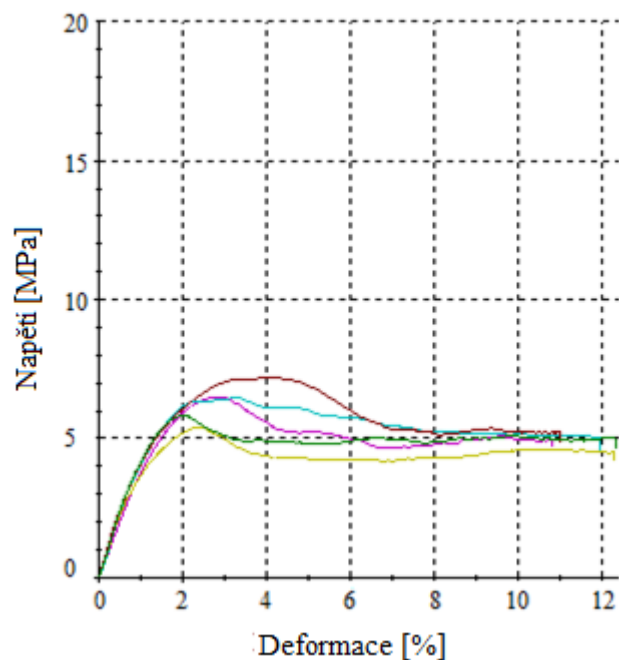
Obr. 80. Ocelový panel s lepidlem 1 po zkoušce ohybem

Tab. 32. Naměřené výsledky tříbodového ohybu pro ocelový panel

Nr	E	$\sigma_K$	$\sigma_M$	$\epsilon$	W
-	MPa	MPa	MPa	%	Nmm
Lepidlo 1	405	4,85	6,47	2,8	1592,44
	474	4,60	6,45	3,2	1988,73
	436	3,82	5,38	2,4	1150,83
	521	4,06	7,18	3,9	2707,11
	494	4,52	5,84	2,0	985,41

Tab. 33. Statistické vyhodnocení pro lepidlo 1

Lepidlo 1	E	$\sigma_K$	$\sigma_M$	$\epsilon$	W
n = 5	MPa	MPa	MPa	%	Nmm
$\bar{x}$	466	4,37	6,26	2,9	1684,90
s	46	0,42	0,69	0,7	692,87
v	9,89	9,62	10,96	25,85	41,12



Obr. 81. Grafická závislost mezi napětím a deformací u lepidla 1

Tab. 34. Naměřené výsledky tříbodového ohybu pro celohliníkové panely

Nr	E	$\sigma_K$	$\sigma_M$	$\epsilon$	W
-	MPa	MPa	MPa	%	Nmm
Lepidlo 2	2430	14,2	14,7	1,1	1767,33
	3160	12,2	14,1	1,4	2349,83
	3420	10,4	11,1	0,5	524,62
	2370	10,3	11,1	0,7	650,04
Lepidlo 3	3920	18,9	22,1	1,6	3498,80
	4090	21,2	23,9	1,5	3559,83
	4100	18,6	22,1	1,7	3761,19
	4100	20,9	23,0	1,3	2844,13
	4950	18,6	21,0	1,1	2286,61
Lepidlo 4	5340	17,8	20,7	1,3	2783,73
	4720	16,9	19,8	1,3	2429,99
	5040	17,7	18,5	0,8	1301,56
	5290	18,4	20,7	1,1	2146,77
	5420	19,8	22,4	1,1	2406,57
Lepidlo 5	7980	30,3	30,6	0,9	2411,18
	9180	30,3	30,4	0,6	1318,77
	9850	36,7	38,0	1,1	4095,06
	9890	34,5	35,0	0,9	2784,01
	8890	30,7	30,8	0,6	1403,49
Lepidlo 6	9890	39,8	42,5	0,6	1759,95
	11300	45,7	47,1	0,6	1926,94
	10700	40,4	43,8	0,5	1650,69
	10800	41,6	42,5	0,6	1877,58
Lepidlo 7	9110	34,6	37,8	0,6	1664,38
	9740	33,0	38,7	0,7	1853,90
	10000	33,6	39,7	0,7	1842,77
	9190	25,8	35,2	0,6	1386,32

Tab. 35. Statistické vyhodnocení pro lepidlo 2

Lepidlo 2	E	$\sigma_K$	$\sigma_M$	$\epsilon$	W
n = 4	MPa	MPa	MPa	%	Nmm
$\bar{x}$	2850	11,78	12,75	0,9	1322,96
s	525	1,84	1,92	0,4	883,57
v	18,45	15,77	15,39	44,39	66,79

Tab. 36. Statistické vyhodnocení pro lepidlo lepidlo 3

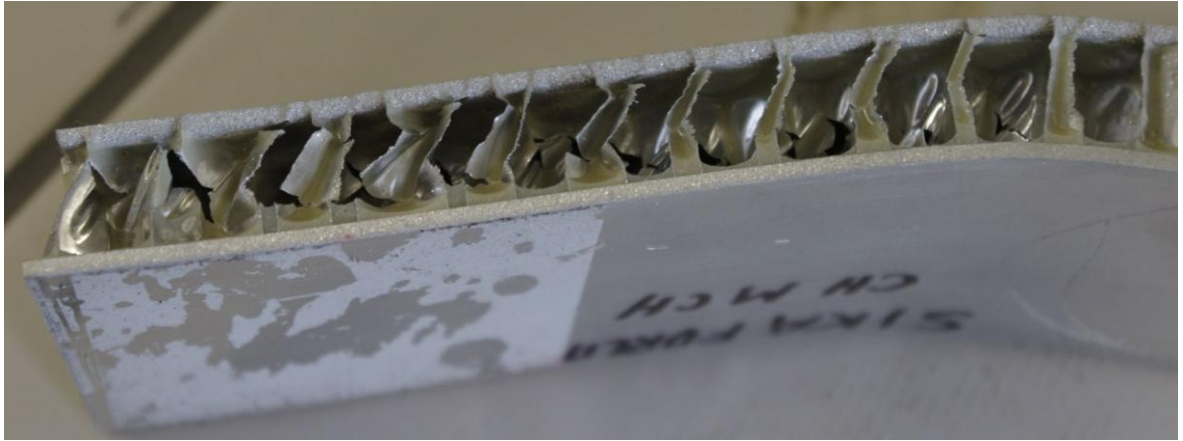
Lepidlo 3	E	$\sigma_K$	$\sigma_M$	$\epsilon$	W
n = 5	MPa	MPa	MPa	%	Nmm
$\bar{x}$	4232	19,64	22,42	1,5	3190,11
s	408	1,29	1,08	0,2	611,17
v	9,65	6,57	4,87	15,64	19,16

Tab. 37. Statistické vyhodnocení pro lepidlo 4

Lepidlo 4	E	$\sigma_K$	$\sigma_M$	$\epsilon$	W
n = 5	MPa	MPa	MPa	%	Nmm
$\bar{x}$	5160	18,12	20,42	1,1	2213,73
s	287	1,08	1,43	0,2	557,99
v	5,55	5,89	6,99	18,76	25,21

Tab. 38. Statistické vyhodnocení pro lepidlo 5

Lepidlo 5	E	$\sigma_K$	$\sigma_M$	$\epsilon$	W
n = 5	MPa	MPa	MPa	%	Nmm
$\bar{x}$	9160	32,50	32,96	0,8	2402,50
s	785	2,94	3,40	0,2	1138,29
v	8,57	8,95	10,31	27,89	47,38



Obr. 82. Hliníkový panel s lepidlem 3 po zkoušce

Tab. 39. Statistické vyhodnocení pro lepidlo 6

Lepidlo 6	E	$\sigma_K$	$\sigma_M$	$\epsilon$	W
n = 4	MPa	MPa	MPa	%	Nmm
$\bar{x}$	10673	41,88	43,98	0,6	1803,79
s	584	2,66	2,17	0,1	123,79
v	5,47	6,35	4,94	8,69	6,86

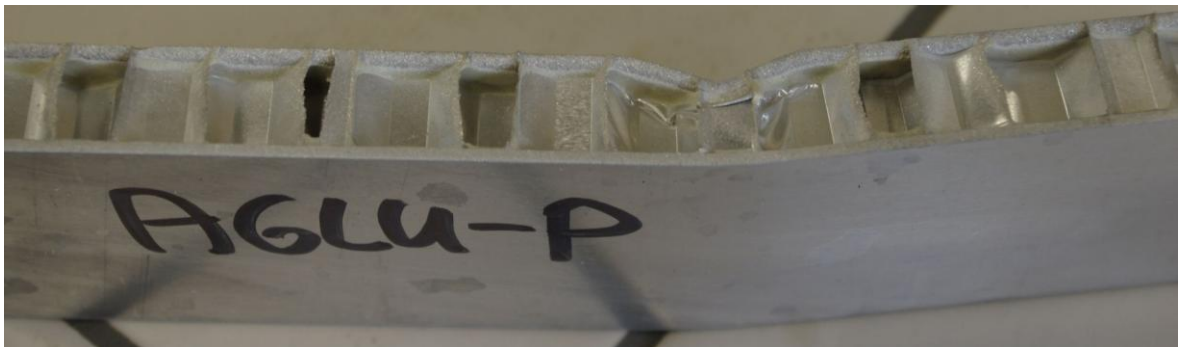


Obr. 83. Hliníkový panel s lepidlem 5 po zkoušce ohybem

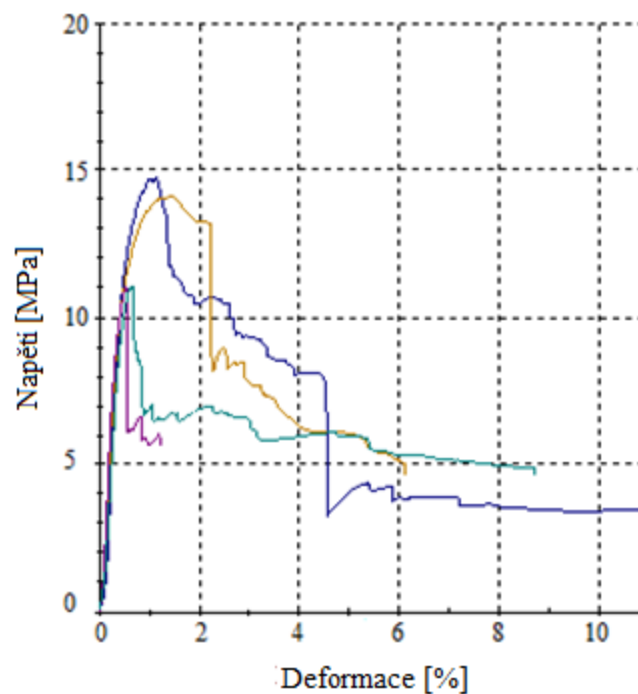


Tab. 40. Statistické vyhodnocení pro lepidlo 7

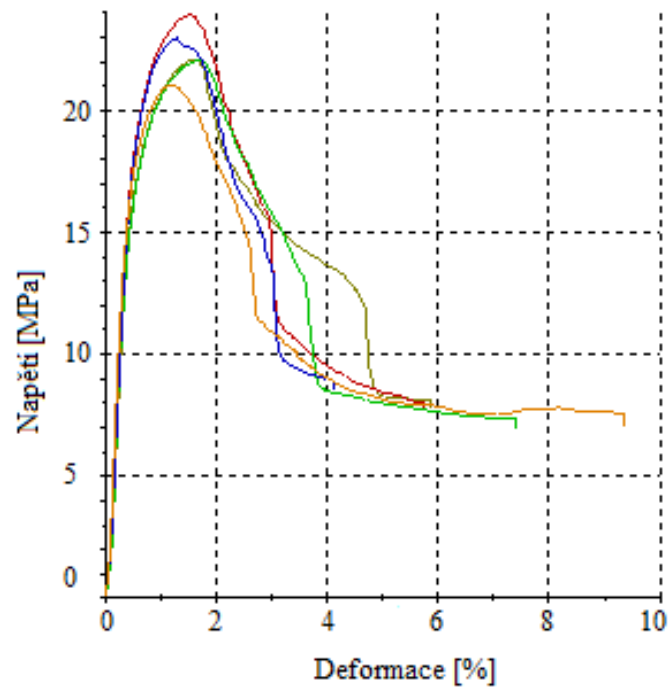
Lepidlo 7	E	$\sigma_K$	$\sigma_M$	$\epsilon$	W
n = 4	MPa	MPa	MPa	%	Nmm
$\bar{x}$	9510	31,75	37,85	0,7	1686,84
s	430	4,02	1,93	0,1	218,36
v	4,52	12,66	5,09	8,88	12,94



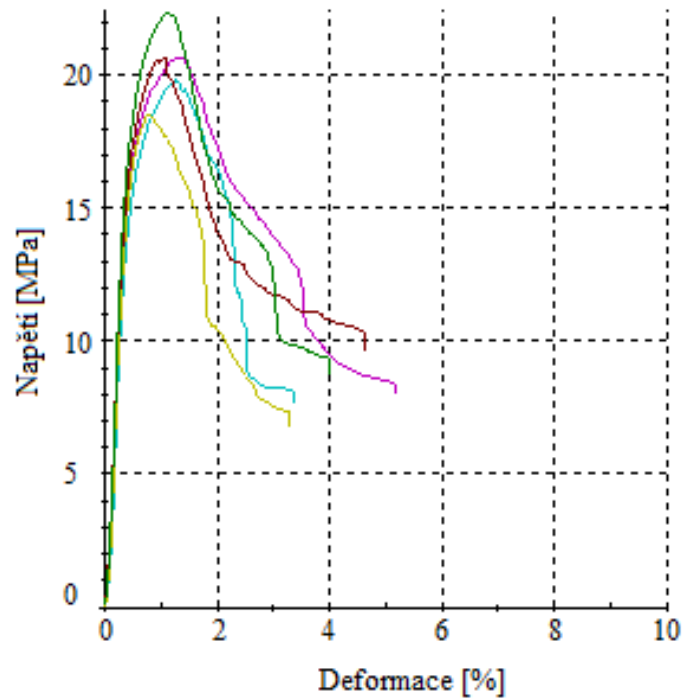
Obr. 84. Hliníkový panel s lepidlem 6



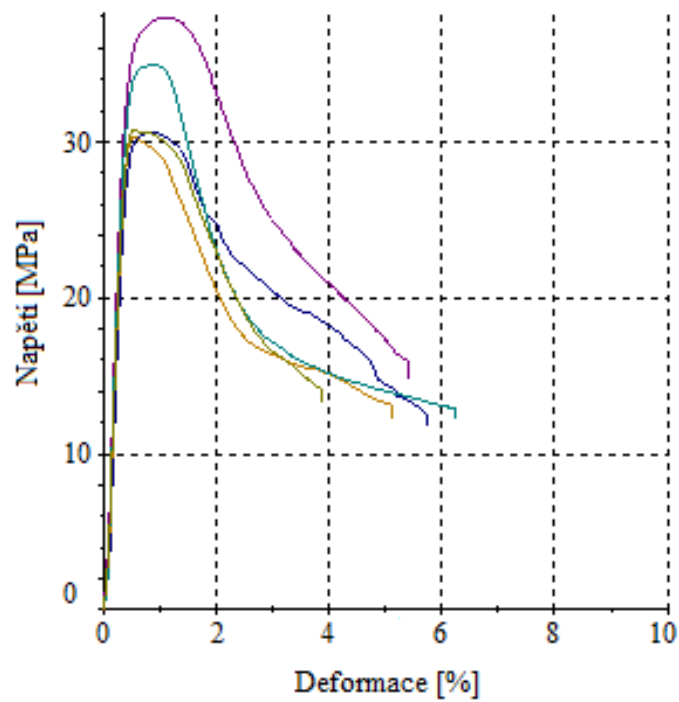
Obr. 85. Grafická závislost mezi napětím a deformací u lepidla 2



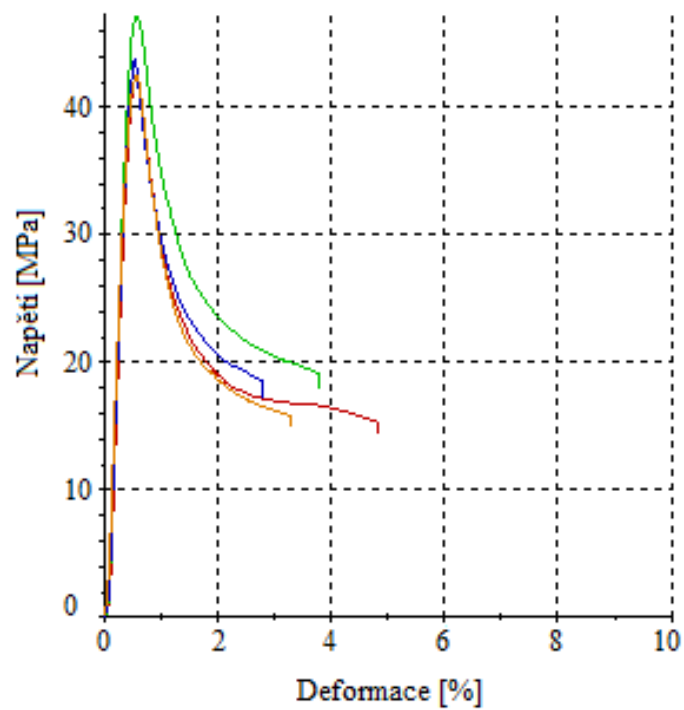
Obr. 86. Grafická závislost mezi napětím a deformací u lepidla 3



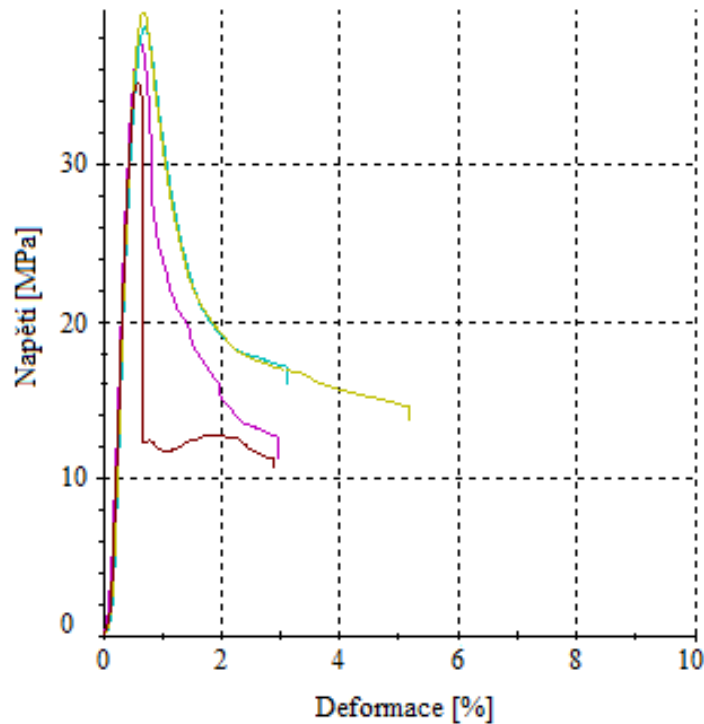
Obr. 87. Grafická závislost mezi napětím a deformací u lepidla 4



Obr. 88. Grafická závislost mezi napětím a deformací u lepidla 5



Obr. 89. Grafická závislost mezi napětím a deformací u lepidla 6



Obr. 90. Grafická závislost mezi napětím a deformací u lepidla 7

Z experimentálních testů vyplývá, že lepidlo 1 je pro lepení ocelových potahů nevhodné. Spoj je příliš měkký a nepevný.

Lepidlo 2 je k lepení hliníkových potahů taktéž nevhodné. Adheze lepidla je nedostatečná.

Spoje vytvořené lepidly 3,4,5 a 7 u hliníkových potahů jsou již dostatečné, k porušení vzorků dochází v oblasti hliníkové voštiny. Použití činidla u lepidla 5 se projevilo významným zvýšením pevnosti (z 20,4 až na 33 MPa)

Nejllepších výsledků bylo dosaženo lepidlem 6. Pevnost činí 38 MPa, přidáním aktivátoru vzrostla až na 44 MPa. Toto lepidlo je možné jednoznačně doporučit.

## ZÁVĚR

Kompozitní materiály patří již řadu let mezi čím dál tím více používané materiály, a to napříč širokým spektrem průmyslu. Jejich unikátních vlastností se cení nejvíce v automobilovém, leteckém a stavebním průmyslu, kde je použití lehkých, ale přitom pevných konstrukcí nesmírnou výhodou.

Ve stavebnictví je používáno mnoho typů kompozitních materiálů. Záleží však na oblasti a na konkrétních požadavcích, které jsou potřeba a vyžadovány pro daný účel. Pro různé trámy, střešní a nosné konstrukce se nejvíce hodí kompozitní materiály na bázi dřeva. Oproti ostatním, běžně používaným materiálům je dřevo lehké, zároveň ale pevné a snese i vysoká zatížení. Sendvičové materiály jsou využívány především tam, kde je třeba odolnosti proti rázům, tepelně-izolačních vlastností, elektrických popř. akustických izolací. Těmihle vlastnostmi se nejvíce vyznačují polymerní pěnové materiály, které jsou používány jako jádro (voština) sendvičových struktur. Patří mezi ně PVC, PUR a PET pěny. Z kovových materiálů je hojně využíváno hliníkových voštin.

Důležitým krokem k tomu, aby kompozitní materiálu vykazoval potřebné vlastnosti, je i volba vhodného lepidla, které drží jednotlivé vrstvy pohromadě. Nejvíce jsou používány epoxidová nebo polyuretanová lepidla a tmely. Neméně důležitou součástí každého lepení je i povrchová úprava samotného lepeného materiálu. Pro zajištění maximální adheze je nutno zdrsnit povrch materiálu a bavit se zbytků různých ředidel, olejů a čistících látek pomocí odmašťovadel. Technologie lepení hraje také svou roli při celkové soudržnosti spoje a je podstatnou částí lepícího procesu. Je nutno dbát na to, aby bylo lepidlo dobře nanášeno a vytvrzeno. V případě sendvičů je potřeba dávat pozor, aby lepidlo nesteklo z horní na dolní potah, tím by se výrazně zvýšila šance na zhoršení mechanických vlastností sendvičového materiálu.

Cílem práce bylo navrhnout vhodné typy lepidel pro nerezové, ocelové a hliníkové sendviče. Výsledky jednotlivých měření poukazují téměř vždy na nevhodnost zvoleného lepidla, či na špatně zvolenou technologii lepení.

U první testované série se nejlépe osvědčilo lepidlo použité u celohliníkových panelů, kde pevnost v ohybu činila okolo 50 MPa. U nerezových panelů s hliníkovou voštinou se projevila špatná adheze použitého lepidla. Všechny 3 zkoušky vykazovaly nízké hodnoty pevností spoje.

U druhé testovací série celohliníkových a ocelových panelů byly hodnoty ještě nižší. To bylo zapříčiněno zřejmě nevhodným postupem při lepení, kdy lepidlo steklo z horní na dolní vrstvu ještě před vytvrzením, nebo bylo stále měkké a lepkavé. Obě lepidla tedy vykazovala špatnou adhezi.

V třetí testované sérii se použití lepidla 1 u ocelových potahů ukázalo jako nevhodné. Spoj byl měkký a vykazoval malou pevnost. U celohliníkových panelů už byla adheze jednotlivých lepidel, mimo 2, dostatečná. K porušení docházelo jen v oblasti hliníkové voštiny. Projevilo se také použití činidla u lepidla 5, kde došlo k výraznému zvýšení pevnosti z 20,4 až na 33 MPa. Z použitých lepidel se nejlépe osvědčilo lepidlo 6 od výrobce Agglu, kde pevnost činila 38 MPa a použitím aktivátoru vzrostla až na 44 MPa.

Kompozitní materiály jsou materiály přítomnosti ale hlavně budoucnosti. Objevení nebo vytvoření nových materiálů bude dávat kompozitům možnost se rozšířit téměř do všech vrstev průmyslu, a nahrazovat tak běžně používané materiály. Budoucnost se tedy, co se materiálů týče, jeví jako věk kompozitních materiálů.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] BODNÁROVÁ, Lenka. *Kompozitní materiály ve stavebnictví*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 8021422661.
- [2] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 9788073722791.
- [3] Vlastnosti kompozitních materiálů. *Altima Bohemia s.r.o* [online]. 2012 [cit. 2015-11-12]. Dostupné z: <http://www.altimaboheemia.cz/vlastnosti-kompozitnich-materialu.html>
- [4] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály definice a rozdělení* [online]. Liberec, 2008 [cit. 2015-11-12]. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defrozd.pdf](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defrozd.pdf)
- [5] *Kompozitní materiály* [online]. Praha, 2014 [cit. 2015-11-12]. Dostupné z: [http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6\\_kompozitni-materialy.pdf](http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf)
- [6] MEISSNER, Bohumil a Václav ZILVAR. *Fyzika polymerů: Struktura a vlastnosti polymerních materiálů* [online]. 1. Praha: SNTL, 1987 [cit. 2015-11-12]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/pol/Fyzika%20polymeru/15%20KAPITOLA%2013.pdf>
- [7] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-708-0568-4.
- [8] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Nauka o materiálu: Polymery a kompozity s polymerní maticí*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03927-4.
- [9] KOŘÍNEK, Zdeněk. *Kompozity: Definice a historie kompozitů* [online]. [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/historie.pdf>
- [10] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-704-3273-X.
- [11] VNOUČEK, Milan. *Kompozitní materiály* [online]. Plzeň [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: [http://www.ateam.zcu.cz/download/kompozity09\\_10.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf)
- [12] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.

- [13] ČÁSLAVA, Petr. *Kompozitní materiály na bázi dřeva* [online]. 2009 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: [http://www.vizage.cz/files/KOMPOZITNI\\_MATERIALY\\_NA\\_BAZI\\_DREVA\\_WWW.pdf](http://www.vizage.cz/files/KOMPOZITNI_MATERIALY_NA_BAZI_DREVA_WWW.pdf)
- [14] BÖHM, Martin, Jan REISNER a Jan BOMBA. *Materiály na bázi dřeva* [online]. Praha: ČZU Praha, 2012 [cit. 2015-11-15]. ISBN 978-80-213-2251-6. Dostupné z: [http://fld.czu.cz/~bohm/materialy\\_na\\_bazi\\_dreva.pdf](http://fld.czu.cz/~bohm/materialy_na_bazi_dreva.pdf)
- [15] Sendvičové konstrukce. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2001, (1), 14 [cit. 2015-11-18]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/sendvicove-konstrukce.html>
- [16] CHOCHOLOUŠ, Petr a Petr VALÁŠEK. *Sendvičové materiály pro stavební a automobilový průmysl* [online]. 2014 [cit. 2015-11-18]. Dostupné z: <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/sendvicove-materialy-pro-stavebni-a-automobilovy-prumysl/>
- [17] *Všeobecný a základní popis materiálů používaných při výrobě kompozitů* [online]. 2014 [cit. 2015-11-18]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecny-a-zakladni-popis-materialu-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitu.html>
- [18] KOŘÍNEK, Zdeněk. *Kompozity: Vlákna* [online]. [cit. 2015-11-19]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/vlakna.pdf>
- [19] Roof sandwich panel. *Archiexpo* [online]. [cit. 2015-11-19]. Dostupné z: <http://www.archiexpo.com/prod/euoperfil/product-50760-145395.html>
- [20] Dřevo: Balsa. *Spibi* [online]. [cit. 2015-11-19]. Dostupné z: <http://prace-se-drevem.spibi.cz/Drevo-Druhy-Balsa.html>
- [21] Decorative panel. *Nauticexpo* [online]. [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: <http://www.nauticexpo.com/prod/nord-compensati/product-23321-188580.html>
- [22] Polymerbeton – materiál který má široké uplatnění. *Stavimedum* [online]. [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: <http://www.stavimedum.cz/polymerbeton-materi%C3%A1l-kter%C3%BD-m%C3%A1-%C5%A1irok%C3%A9-uplatn%C4%9Bn%C3%AD/>
- [23] MINSTER, Jiří. *Polymerní betony* [online]. Praha: ÚTAM AV ČR, 2011 [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: [http://www.csm-kompozity.wz.cz/polymerni\\_betony.pdf](http://www.csm-kompozity.wz.cz/polymerni_betony.pdf)



- [24] *Polymerbeton* [online]. 2015 [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: [http://www.watec.at/downloads/Watec\\_Polymerbeton\\_CZ.pdf](http://www.watec.at/downloads/Watec_Polymerbeton_CZ.pdf)
- [25] Aluminium honeycomb. *Honeycombpanels* [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://www.honeycombpanels.eu/20/aluminium-honeycomb->
- [26] Nomex: honeycomb. *Honeycombpanels* [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://www.honeycombpanels.eu/28/nomex-honeycomb-commercial-grade>
- [27] Airex C70: PVC foam. *Airexbaltekbanova* [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://www.airexbaltekbanova.com/airex-c70-pvc-foam.html>
- [28] Airex T10: PET foam. *Airexbaltekbanova* [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://www.airexbaltekbanova.com/airex-t10-pet-foam.html>
- [29] Izolace PUR, PIR a fenolická pěna. *Tzb-info* [online]. [cit. 2015-11-24]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/299-izolace-pur-pir-a-fenolicka-pena>
- [30] Composite panels. *Carbon-core* [online]. [cit. 2015-11-24]. Dostupné z: <http://www.carbon-core.com/panels-composite.htm>
- [31] BLACK, Sara. *Getting To The Core Of Composite Laminates* [online]. 2003 [cit. 2015-11-24]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/articles/getting-to-the-core-of-composite-laminates>
- [32] San foam core. *Compositesone* [online]. [cit. 2015-11-24]. Dostupné z: <http://www.compositesone.com/product/core-materials/san-foam-core/>
- [33] Polystyren. *Isover* [online]. [cit. 2015-11-26]. Dostupné z: <http://www.isover.cz/polystyren>
- [34] Roof sandwich panel. *Archiexpo* [online]. [cit. 2015-11-26]. Dostupné z: <http://www.archiexpo.com/prod/simonin/product-72546-1290225.html>
- [35] *Recycling Composite Building Materials* [online]. 2013 [cit. 2015-11-26]. Dostupné z: <https://compositebuild.wordpress.com/2013/08/02/recycling-composite-building-materials/>
- [36] MOFFIT, Bob. *Composite Materials in Building and Construction Applications* [online]. 2013 [cit. 2015-11-26]. Dostupné z: <http://compositebuild.com/wp-content/uploads/2013/07/Composite-Materials-in-Building-and-Construction-Applications.pdf>

- [37] Structural foam and balsa. *Airexbaltekbanova* [online]. [cit. 2015-12-02]. Dostupné z: <http://www.airexbaltekbanova.com/market-solutions/building-construction.html>
- [38] FLYNN, Susan. Balsa Wood at the Core of New Bridge. *Composites Manufacturing* [online]. 2013 [cit. 2015-12-02]. Dostupné z: <http://compositesmanufacturingmagazine.com/2013/01/balsa-wood-core-new-bridge/>
- [39] *Building Cladding* [online]. 2013 [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: <https://compositebuild.wordpress.com/2013/07/01/building-cladding/>
- [40] Carbon Fiber Tube. *Edge.rit* [online]. [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: <http://edge.rit.edu/edge/P09226/public/Home>
- [41] Aramid fibre. *Nauticexpo* [online]. [cit. 2015-12-06]. Dostupné z: <http://www.nauticexpo.com/prod/angeloni/product-39168-297810.html>
- [42] *Bend theory* [online]. London: University of Cambridge, 2013 [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: [http://mi.eng.cam.ac.uk/IALego/bender\\_files/bend\\_theory.pdf](http://mi.eng.cam.ac.uk/IALego/bender_files/bend_theory.pdf)
- [43] VLACH, Bohumil a Rudolf FORET. *Mechanické vlastnosti pevných látek* [online]. FSI VUT Brno [cit. 2015-12-18]. Dostupné z: [http://www.sci.muni.cz/chemsekce/c8870/pdf/Uloha12\\_mechan\\_vl.pdf](http://www.sci.muni.cz/chemsekce/c8870/pdf/Uloha12_mechan_vl.pdf)
- [44] Flatwise tensile. *Ptli* [online]. [cit. 2015-12-20]. Dostupné z: <http://www.ptli.com/testlopedia/tests/Flatwise-Tensile-ASTM-C297.asp>
- [45] Peel test. *Testresources* [online]. [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <http://www.testresources.net/applications/by-test-type/peel-test>
- [46] JEŘÁBEK, Ivo. *Zkoušení kompozitních materiálů* [online]. Praha: FS ČVUT v Praze [cit. 2016-01-05]. Dostupné z: [http://www.kompozity.info/seminar/12\\_zkousky\\_kompozitu.pdf](http://www.kompozity.info/seminar/12_zkousky_kompozitu.pdf)
- [47] ČERVENÝ, Petr. Metal bonding hliníkových slitin. *MM Průmyslové spektrum*. 2002, (10), 30-31.
- [48] Eloxování hliníku. *Astronom* [online]. [cit. 2016-01-05]. Dostupné z: <http://www.astronom.cz/procyon/chemistry/elox.html>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$M_{\max}$	maximální ohybový moment [Nm]
$F_{\max}$	maximální síla [N]
$F$	síla [N]
$l$	délka [m]
$\sigma_M$	pevnost v ohybu [MPa]
$W_o$	modul průřezu v ohybu [mm <sup>3</sup> ]
$b$	šířka tělesa [m]
$h$	tloušťka tělesa [m]
$E$	modul pružnosti v ohybu [MPa]
$I$	moment setrvačnosti [m <sup>4</sup> ]
$y$	průhyb tělesa [m]
$W$	deformační práce [Nmm]
$\varepsilon$	poměrná deformace [%]
$\sigma_k$	smluvní mez kluzu při 0,2 plastické deformaci [MPa]
$\bar{x}$	aritmetický průměr
$s$	výběrová směrodatná odchylka
$v$	variační koeficient
$v$	rychlost zkoušky [mm/min]
$L_p$	vzdálenost podpěr [mm]
PH	vpravo nahoře (umístění vzorku v panelu, ze kterého byl vyřezán)
LD	vlevo dole (umístění vzorku v panelu, ze kterého byl vyřezán)
PD	vpravo dole (umístění vzorku v panelu, ze kterého byl vyřezán)
S	střed (umístění vzorku v panelu, ze kterého byl vyřezán)
LH	vlevo nahoře (umístění vzorku v panelu, ze kterého byl vyřezán)

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Příklad kompozitní struktury – mikrostruktura dřeva [2]</i> .....	10
<i>Obr. 2. Synergický efekt v kompozitním materiálu [7]</i> .....	11
<i>Obr. 3. Jednoosé uspořádání vláken. [4]</i> .....	12
<i>Obr. 4. Rozdělení kompozitů podle tvaru výztuže [1]</i> .....	14
<i>Obr. 5. Příklady uspořádání vláknové výztuže: a) jednosměrné uspořádání, b) tkanina, c) rohož, d) víceosá výztuž z kontinuálních vláken, e) krátká jednosměrná vlákna, f) krátká vlákna s nahodilou orientací [5]</i> .....	15
<i>Obr. 6. Bavlněná vlákna pod optickým zvětšením. Lze vidět nepravidelně zkroucená vlákna. [2]</i> .....	16
<i>Obr. 7. Kompozitní tkanina z aramidových vláken [41]</i> .....	17
<i>Obr. 8. Kompozitní trubka z uhlíkového vlákna [40]</i> .....	17
<i>Obr. 9. Parallam [14]</i> .....	18
<i>Obr. 10. Voštinový sendvič [17]</i> .....	19
<i>Obr. 11. Hliníková voština [25]</i> .....	20
<i>Obr. 12. Střešní sendvičový panel z polyuretanového jádra [19]</i> .....	21
<i>Obr. 13. Kompozitní panel z PET pěny [30]</i> .....	22
<i>Obr. 14. Střešní sendvičový panel s pěnovým polystyrenovým jádrem [34]</i> .....	23
<i>Obr. 15. Sendvičový panel z překližky a balsového jádra [21]</i> .....	23
<i>Obr. 16. Vrstvy lepeného spoje [47]</i> .....	25
<i>Obr. 17. Princip vytvoření vakuum bagu [47]</i> .....	25
<i>Obr. 18. Tekutá dlažba z polymerbetonu [22]</i> .....	26
<i>Obr. 19. První lodě postaveny z kompozitů – v provozu od počátku 50. let [36]</i> .....	27
<i>Obr. 20. Nový dům s vlákny vyztuženými kompozitními oblouky [35]</i> .....	27
<i>Obr. 21. Flexibilita použití kompozitů u historických a složitých konstrukcí [36]</i> .....	28
<i>Obr. 22. Příklady použití lehkých sendvičových konstrukcí [37]</i> .....	28
<i>Obr. 23. První sendvičový most ve Švýcarsku [38]</i> .....	29
<i>Obr. 24. Aplikace kompozitů na opláštění budov [39]</i> .....	29
<i>Obr. 25. Schéma tříbodového ohybu [42]</i> .....	32
<i>Obr. 26. Flatwise test [44]</i> .....	33
<i>Obr. 27. Peel test – zkouška odlupem [45]</i> .....	34
<i>Obr. 28. Záznamy ohybových zkoušek u celohliníkových struktur</i> .....	37
<i>Obr. 29. Záznam typické závislosti mezi napětím a pom. deformací</i> .....	38

<i>Obr. 30. Těleso při zkoušce tříbodovým ohybem</i> .....	38
<i>Obr. 31. Tělesa po ohybové zkoušce – většinou lokální deformace nosné vrstvy v oblasti tlačného trnu, v posledním případě odseparování nosné vrstvy vlivem smyku</i> .....	39
<i>Obr. 32. Vlevo naznačen příčný řez, vpravo fixace vzorků do pryskyřice za studena</i> .....	40
<i>Obr. 33. Vzorek 200 x zvětšený</i> .....	40
<i>Obr. 34. Detail vměstků 1000 x</i> .....	41
<i>Obr. 35. Příčný řez leptanou strukturou 100 x</i> .....	41
<i>Obr. 36. Hodnocení velikosti zrna 400 x</i> .....	42
<i>Obr. 37. Těleso před zkouškou odlupem</i> .....	43
<i>Obr. 38. Těleso po zkoušce</i> .....	43
<i>Obr. 39. Uchycení zkušebního tělesa v testovacím přípravku a záznam naměřené síly a deformace</i> .....	43
<i>Obr. 40. Grafická závislost mezi silou a deformací pro sérii PH</i> .....	45
<i>Obr. 41. Grafická závislost mezi silou a deformací pro sérii LD</i> .....	46
<i>Obr. 42. Grafická závislost mezi silou a deformací pro sérii PD</i> .....	46
<i>Obr. 43. Grafická závislost mezi silou a deformací pro sérii LH</i> .....	47
<i>Obr. 44. Grafická závislost mezi silou a deformací pro sérii S</i> .....	47
<i>Obr. 45. Grafická závislost mezi silou a deformací pro tělesa s odřezaným označením</i> .....	48
<i>Obr. 46. Vzorek PH6 po zkoušce odlupem</i> .....	48
<i>Obr. 47. Vzorek S2 s naneseným lepidlem po zkoušce</i> .....	49
<i>Obr. 48. Vzorek S2 po zkoušce odlupem</i> .....	49
<i>Obr. 49. Průběh zkoušky při 22 °C</i> .....	49
<i>Obr. 50. Vzorek LD10 po zkoušce 3bodovým ohybem</i> .....	51
<i>Obr. 51. Vzorek LD10 po zkoušce</i> .....	52
<i>Obr. 52. Grafická závislost mezi napětím a deformací pro sérii LD při 22 °C</i> .....	52
<i>Obr. 53. Grafická závislost mezi napětím a deformací pro sérii LH při 22 °C</i> .....	53
<i>Obr. 54. Grafická závislost mezi napětím a deformací pro sérii PD při 22 °C</i> .....	53
<i>Obr. 55. Grafická závislost mezi napětím a deformací pro sérii S při 22 °C</i> .....	54
<i>Obr. 56. Grafická závislost mezi napětím a deformací pro sérii PH při 22 °C</i> .....	54
<i>Obr. 57. Zkouška v teplotní komoře při 70 °C</i> .....	55
<i>Obr. 58. Těleso PD2 po zkoušce ohybem</i> .....	56
<i>Obr. 59. Vzorek PH2 po zkoušce</i> .....	57

<i>Obr. 60. Grafická závislost mezi napětím a deformací pro sérii PD při 70 °C.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 61. Grafická závislost mezi napětím a deformací pro sérii LD při 70 °C.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 62. Grafická závislost mezi napětím a deformací pro sérii LH při 70 °C.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 63. Grafická závislost mezi napětím a deformací pro sérii PH při 70 °C.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 64. Grafická závislost mezi napětím a deformací pro sérii S při 70 °C.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 65. Zkušební těleso při Flatwise testu .....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 66. Zkušební tělesa po zkoušce .....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 67. Grafická závislost mezi silou a pom. deformací pro sérii S.....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 68. Grafická závislost mezi silou a pom. deformací pro sérii LH.....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 69. Grafická závislost mezi silou a pom. deformací pro sérii LD.....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 70. Grafická závislost mezi silou a pom. deformací pro sérii PH.....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 71. Grafická závislost mezi silou a pom. deformací pro sérii PD.....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 72. Celohliníkový sendvič s lepidlem 1 při zkoušce ohybem .....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 73. Grafická závislost mezi napětím a deformací u lepidla 1 při teplotě 22°C.....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 74. Grafická závislost mezi napětím a deformací u lepidla 2 při teplotě 22°C.....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 75. Grafická závislost mezi napětím a deformací u lepidla 1 při teplotě 70°C.....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 76. Chyba při technologii lepení – lepidlo před vytvrzením odteklo na spodní nosnou vrstvu a horní nosná vrstva zůstala bez lepidla .....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 77. Těleso po zkoušce ohybem.....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 78. Grafická závislost mezi silou a deformací u lepidla 1.....</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 79. Grafická závislost mezi silou a deformací u lepidla 2.....</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 80. Ocelový panel s lepidlem 1 po zkoušce ohybem.....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 81. Grafická závislost mezi napětím a deformací u lepidla 1 .....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 82. Hliníkový panel s lepidlem 3 po zkoušce.....</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 83. Hliníkový panel s lepidlem 5 po zkoušce ohybem .....</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 84. Hliníkový panel s lepidlem 6 .....</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 85. Grafická závislost mezi napětím a deformací u lepidla 2 .....</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 86. Grafická závislost mezi napětím a deformací u lepidla 3 .....</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 87. Grafická závislost mezi napětím a deformací u lepidla 4 .....</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 88. Grafická závislost mezi napětím a deformací u lepidla 5 .....</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 89. Grafická závislost mezi napětím a deformací u lepidla 6 .....</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 90. Grafická závislost mezi napětím a deformací u lepidla 7 .....</i>	<i>83</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1. Výsledky zkoušky ohybem u celohliníkových struktur .....</i>	35
<i>Tab. 2. Složení sendvičových vzorků určených pro porovnání s testovanou Al strukturou .....</i>	36
<i>Tab. 3. Dosažené mechanické vlastnosti u sendvičů s Al voštinou.....</i>	37
<i>Tab. 4. Naměřené výsledky pro sílu potřebnou k odloupení ocelové vrstvy od Al voštiny.....</i>	44
<i>Tab. 5. Statistické vyhodnocení pro sérii PH.....</i>	44
<i>Tab. 6. Statistické vyhodnocení pro sérii LD.....</i>	45
<i>Tab. 7. Statistické vyhodnocení pro sérii PD.....</i>	45
<i>Tab. 8. Naměřené výsledky tříbodového ohybu pro teplotu 22 °C .....</i>	50
<i>Tab. 9. Statistické vyhodnocení pro sérii LD za teploty 22 °C .....</i>	50
<i>Tab. 10. Statistické vyhodnocení pro sérii LH za teploty 22 °C .....</i>	51
<i>Tab. 11. Statistické vyhodnocení pro sérii PD za teploty 22 °C .....</i>	51
<i>Tab. 12. Statistické vyhodnocení pro sérii S za teploty 22 °C .....</i>	51
<i>Tab. 13. Statistické vyhodnocení pro sérii PH za teploty 22 °C .....</i>	52
<i>Tab. 14. Naměřené výsledky tříbodového ohybu pro teplotu 70 °C .....</i>	55
<i>Tab. 15. Statistické vyhodnocení pro sérii PD za teploty 70 °C.....</i>	56
<i>Tab. 16. Statistické vyhodnocení pro sérii LD za teploty 70 °C .....</i>	56
<i>Tab. 17. Statistické vyhodnocení pro sérii LH za teploty 70 °C .....</i>	57
<i>Tab. 18. Statistické vyhodnocení pro sérii PH za teploty 70 °C.....</i>	57
<i>Tab. 19. Statistické vyhodnocení pro sérii S za teploty 70 °C .....</i>	57
<i>Tab. 20. Naměřené výsledky pro sílu potřebnou k odloupení ocelové vrstvy od Al voštiny.....</i>	62
<i>Tab. 21. Statistické vyhodnocení pro sérii S.....</i>	63
<i>Tab. 22. Statistické vyhodnocení pro sérii LH.....</i>	63
<i>Tab. 23. Statistické vyhodnocení pro sérii LD.....</i>	64
<i>Tab. 24. Statistické vyhodnocení pro sérii PH.....</i>	64
<i>Tab. 25. Statistické vyhodnocení pro sérii PD.....</i>	64
<i>Tab. 26. Naměřené výsledky tříbodového ohybu pro celohliníkové a ocelové panely .....</i>	68
<i>Tab. 27. Statistické vyhodnocení pro lepidlo 1 za teploty 22 °C .....</i>	69
<i>Tab. 28. Statistické vyhodnocení pro lepidlo 2 za teploty 22 °C .....</i>	69
<i>Tab. 29. Statistické vyhodnocení pro lepidlo 1 za teploty 70 °C .....</i>	70

---

<i>Tab. 30. Naměřené výsledky pro sílu potřebnou k odloupení nosné vrstvy od voštiny .....</i>	<i>73</i>
<i>Tab. 31. Statistické vyhodnocení pro lepidlo 1 .....</i>	<i>73</i>
<i>Tab. 32. Naměřené výsledky tříbodového ohybu pro ocelový panel .....</i>	<i>76</i>
<i>Tab. 33. Statistické vyhodnocení pro lepidlo 1 .....</i>	<i>76</i>
<i>Tab. 34. Naměřené výsledky tříbodového ohybu pro celohliníkové panely.....</i>	<i>77</i>
<i>Tab. 35. Statistické vyhodnocení pro lepidlo 2 .....</i>	<i>78</i>
<i>Tab. 36. Statistické vyhodnocení pro lepidlo lepidlo 3 .....</i>	<i>78</i>
<i>Tab. 37. Statistické vyhodnocení pro lepidlo 4 .....</i>	<i>78</i>
<i>Tab. 38. Statistické vyhodnocení pro lepidlo 5 .....</i>	<i>78</i>
<i>Tab. 39. Statistické vyhodnocení pro lepidlo 6 .....</i>	<i>79</i>
<i>Tab. 40. Statistické vyhodnocení pro lepidlo 7 .....</i>	<i>80</i>