



# Vliv teploty na pevnost ve smyku vrstveného materiálu

## Bakalářská práce

*Studijní program:* B2301 – Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* 2301R000 – Strojní inženýrství  
*Autor práce:* **Petr Brych**  
*Vedoucí práce:* Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr Brych**

Osobní číslo: **S12000029**

Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Strojní inženýrství**

Název tématu: **Vliv teploty na pevnost ve smyku vrstveného materiálu**

Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popsání základních mechanických zkoušek pro kovové materiály.
2. Materiály používané při stavbě karoserie (jejich základní rozdělení a charakteristiky, současné trendy v oblasti používaných materiálů).
3. Příprava vzorků z vrstveného materiálu pro zkoušku smykem a provedení zkoušky smykem vrstveného materiálu za různých teplot.
4. Vyhodnocení výsledků měření a doporučení pro další výzkum.
5. Závěr.



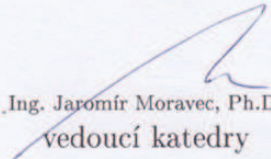
Rozsah grafických prací: **grafy, tabulky**  
Rozsah pracovní zprávy: **cca 30 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

- [1] DAVIES, G. *Materials for Automobile Bodies*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003. s. 277. ISBN 0-7506-5692-1.  
[2] ASM HANDBOOK. *Volume 8 - Mechanical Testing and Evaluation*. 10th ed. Materials Park: ASM International, 2000. s. 998. ISBN 0-87170-389-0.  
[3] POLMEAR, I. *Light Alloy - From traditional Alloys to Nanocrystals*. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. s. 421. ISBN 0-7506-6371-5.  
[4] ASHBY, M.F. *Materials Selection in Mechanical Design*. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005. s. 603. ISBN 0-7506-6168-2.  
[5] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 64 s. Třídící znak 420310.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.**  
Katedra strojírenské technologie  
Konzultant bakalářské práce: **doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.**  
Katedra strojírenské technologie  
Datum zadání bakalářské práce: **1. února 2016**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **1. května 2017**

  
prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan



  
Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. února 2016

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Jiřímu Sobotkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a čas, který mi věnoval při tvorbě této práce. Dále bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D. za přípravu vzorků a pomoc při měření. Poděkování patří také mojí rodině za podporu během celého studia.

Petr Brych

## **Anotace**

Cílem této bakalářské práce je zjištění pevnosti ve smyku vrstveného materiálu za různých teplot. V teoretické části jsou popsány materiály pro výrobu karoserií, s hlavním zaměřením na vrstvené materiály, jejich rozdělení a vlastnosti. V experimentální části je provedeno měření a následné zhodnocení výsledků.

## **Klíčová slova**

kompozity, vrstvený materiál, mechanické zkoušky, voštinové jádro

## **Annotation**

The aim of the thesis is to determine the shear strength of the laminate at various temperatures. In the theoretical part materials are described for the manufacture of car bodies, with the main focus on layered materials, their distribution and properties. In the experimental part the measurement is done as well as subsequent evaluation of the results.

## **Key words**

composites, sandwich material, mechanical tests, honeycomb core

## **Obsah:**

Seznam použitých symbolů a zkratk.....	7
1 Úvod.....	8
2 Teoretická část .....	9
2.1 Materiály používané pro stavbu karoserie .....	9
2.1.1 Hlubokotažné materiály .....	9
2.1.2 Pevnostní materiály.....	10
2.1.3 Kompozitní materiály .....	11
2.1.4 Vrstvené materiály .....	12
2.1.5 Mechanické vlastnosti vrstvených materiálů .....	16
2.2 Zkoušky mechanických vlastností .....	17
2.2.1 Zkouška tahem.....	17
2.2.2 Zkouška tlakem.....	19
2.2.3 Zkouška ohybem.....	19
2.2.4 Zkouška smykem .....	20
3 Experimentální část.....	21
3.1 Testovaný materiál.....	21
3.2 Experimentální měření.....	22
3.2.1 Zařízení TIRA test 2300 .....	22
3.2.2 Postup měření .....	23
3.3 Naměřené hodnoty.....	25
4 Rozbor výsledků .....	31
5 Závěr .....	33
Seznam použité literatury .....	34

## Seznam použitých symbolů a zkratek

Označení	Jednotka	Význam
Al		Hliník
$A_x$	[1]	Tažnost
B		Bor
CP		Complex Phase
CQ		Comercial Quality
Cu		Měď
DDQ		Deep Drawing Quality
DP		Dual Phase
E	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
EDDQ		Extra Deep Drawing Quality
F	[N]	Zatěžující síla
$F_{max}$	[N]	Maximální zatěžující síla
G	[MPa]	Modul pružnosti ve smyku
$L_o$	[mm]	Původní délka vzorku
$L_u$	[mm]	Délka vzorku po zkoušce
Mg		Horčík
Mn		Mangan
$M_{omax}$	[N.mm]	Maximální ohybový moment
PS		Polystyren
PUR		Polyuretan
PVC		Polyvinylchlorid
R	[MPa]	Smluvní napětí
$R_e$	[MPa]	Výrazná mez kluzu v tahu
$R_m$	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
$R_{p0,2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu v tahu
Si		Křemík
$S_{min}$	[mm <sup>2</sup> ]	Minimální průřez tělesa
$S_o$	[mm <sup>2</sup> ]	Průřez zkušební tyče před zkouškou
$S_u$	[mm <sup>2</sup> ]	Průřez zkušební tyče po zkoušce
Ti		Titan
TRIP		Transformation Induced Plasticity
TWIP		Twinning Induced Plasticity
V		Vanad
$W_o$	[mm <sup>3</sup> ]	Modul průřezu v ohybu
Z	[1]	Kontrakce
Zn		Zinek
$\alpha$		Alfa
$\beta$		Beta
$\gamma$	[1]	Zkos
$\Delta L$	[mm]	Absolutní prodloužení
$\varepsilon$	[1]	Poměrné prodloužení
$\sigma$	[MPa]	Normálové napětí
$\sigma_o$	[MPa]	Napětí v ohybu
$\tau$	[MPa]	Napětí ve smyku
$\tau_{DS}$	[MPa]	Dovolené napětí ve smyku
$\tau_{max}$	[MPa]	Maximální napětí ve smyku

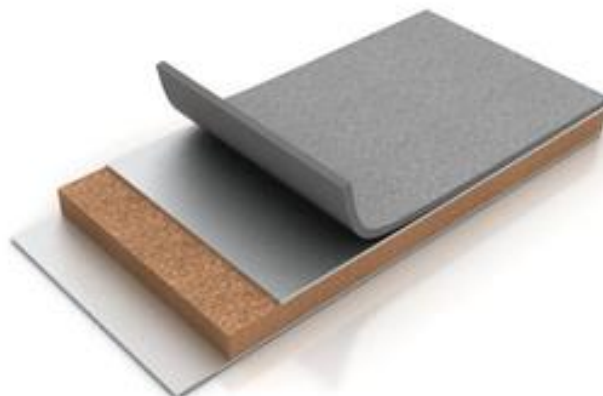


## 1 Úvod

Strojírenský průmysl zastává jedno z předních nejproduktivnějších míst v celosvětovém měřítku. V každé zemi má velký význam od automobilového průmyslu až po výrobu sportovních potřeb.

Doba jde dopředu a na materiály jsou kladeny nároky na zlepšení mechanických, technologických i fyzikálních vlastností, při zachování např. nízké hmotnosti. Z toho důvodu jsou vyvíjeny materiály, které tyto požadavky splňují. Mezi tyto materiály patří mimo jiné i kompozitní materiály. Kompozitní materiál (neboli kompozit) je materiál skládající se ze dvou nebo více částí, které společně dávají výrobku nové vlastnosti, jaké samostatně nemají. Tyto materiály mají vysoký potenciál, a právě kvůli jejich vlastnostem jsou velice žádané. Hmotnost je velkou předností kompozitních materiálů, protože oproti ocelovým materiálům je výrazně nižší. Toho se snaží využít právě automobilový průmysl, který použitím kompozitních materiálů snižuje spotřebu paliva pro pohon dopravních prostředků. Kompozitní materiály vynikají vysokou žáruvzdorností, spolehlivostí a svojí stabilitou. Mezi tyto materiály patří např. skelný laminát, kompozit ze skelných vláken a pryskyřice. Významnou skupinou kompozitních materiálů jsou vrstvené materiály (obr. 2.1). Existuje mnoho druhů vrstvených materiálů, a používají se v mnoha oblastech průmyslu.

Cílem této bakalářské práce je přistoupit k vrstveným materiálům z hlediska jejich smykových vlastností (z pohledu lepených spojů) a zjistit pevnost ve smyku za různých teplot.



**Obr. 2.1:** Vrstvený materiál [1]

## **2 Teoretická část**

V teoretické části této bakalářské práce jsou popsány materiály používané v automobilovém průmyslu a některé zkoušky mechanických vlastností. Velká část je věnována kompozitním materiálům, zejména vrstveným materiálům, které byly použity v praktické části.

### **2.1 Materiály používané pro stavbu karoserie**

V současné době se výrobci automobilů snaží zvýšit tuhost karoserie, a tím dosáhnout zvýšení pasivní bezpečnosti. Pasivní bezpečnost má za cíl snížit důsledky dopravní nehody, pokud by k ní došlo. Zároveň je snahou snížit hmotnost, z důvodu úspory pohonných hmot. Existuje mnoho druhů materiálů používaných pro karoserie. Mezi tyto materiály patří např. pevnostní nebo hlubokotažné materiály. [2]

#### **2.1.1 Hlubokotažné materiály**

Pro vnější pohledové díly karoserie se používají především hlubokotažné plechy. Musejí mít především dobré plastické vlastnosti. Jedná se o nízkouhlíkové oceli s minimálním obsahem uhlíku. Pro zlepšení jejich vlastností se používá mikrolegování. Legovací prvky jsou např. Al, Ti, B nebo V. Existuje mnoho druhů hlubokotažných plechů. Např. plechy běžné kvality CQ, hlubokotažné plechy DDQ a zvláště hlubokotažné plechy EDDQ.

Ocelové plechy jsou buď bez povlaku nebo s povlakem. Povlaky plechů zlepšují jejich vlastnosti jako je např. ochrana proti korozi. V automobilovém průmyslu se často používá Zn povlak. Jeho výhodou je právě vysoká korozní ochrana a nízká cena. Aby plech mohl být povlakován, povrch plechu musí být vytvářen tak, aby splňoval určité požadavky. Musí mít schopnost přijímat mazivo a zároveň se musí zamezit odtékání maziva. Důležitý je také způsob nanášení ochranného povlaku. Jeden ze způsobů je žárové pokovení, kdy se plech ponoří do roztaveného kovu nebo slitiny. Výhodnější způsobem je elektrolytické nanášení povlaku na bázi zinku. Hlavní výhodou tohoto povlakování je, že neovlivňuje mechanické vlastnosti materiálu. Což je důležité pro zachování hlubokotažnosti. Hlubokotažné materiály jsou používány např. v přední části karoserie, kde při čelním nárazu uplatňují svoje vlastnosti. [2, 3]

## 2.1.2 Pevnostní materiály

Plechý z vysokopevnostních ocelí se používají především v rámech karoserie. Vyšší pevnosti ocelí se dosahuje více způsoby. Jedním z nich je možnost legování, kde přísady ovlivňují mechanické vlastnosti materiálu. Proto jsou moderní oceli vyráběny takovými postupy, které odstraňují nepříznivé jevy. Jedná se např. o termomechanické válcování nebo kalení při válcování s následným temperováním. Chemické složení se skoro nemění.

Pro různá místa karoserie se používají různé druhy plechů. Plechy z DP ocelí mají vysokou pevnost a dobrou tvářitelnost, ale jsou citlivé na teplotu (obr. 2.2). Jejich pevnost je až 600 MPa. Plechy z TRIP ocelí jsou velice plastické a mají vyšší pevnost než DP plechy. Ta dosahuje hodnot 600 ÷ 800 MPa. Extrémní hodnoty tažnosti a velmi vysokou pevnost mají plechy z TWIP ocelí. Mez kluzu u TWIP ocelí je větší než 800 MPa. Maximální deformace se dosahuje za určitých technologických podmínek. Mohou se používat při tváření za studena a také při výrobě tvarově složitých výrobků. Jejich výhodou je velká absorpce energie. Proto mají velké využití v automobilovém průmyslu. Vysokou absorpci energie a vysokou pevnost mají taky plechy z CP ocelí. Tyto plechy mají také velké deformační zpevnění. [2, 4]



**Obr. 2.2:** Příklad použití plechu z DP oceli [2]

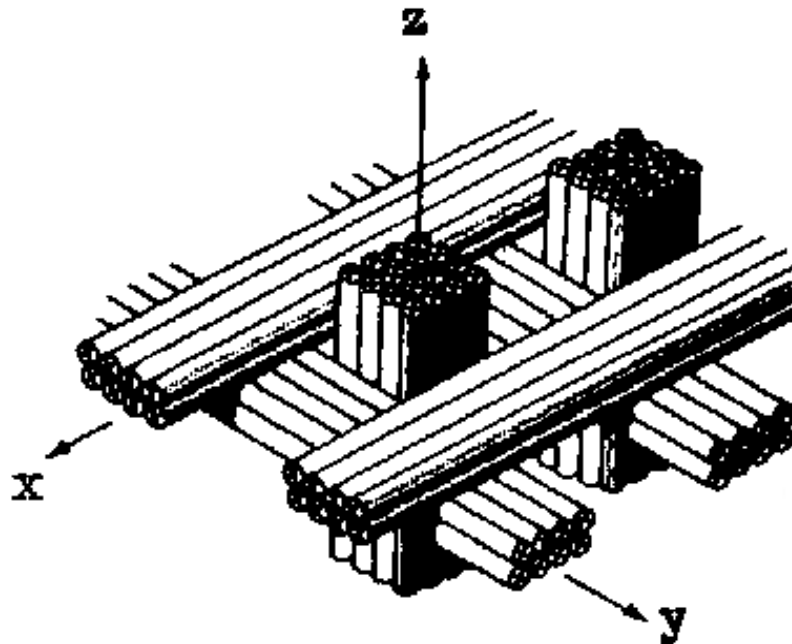
V minulosti byla karoserie automobilů složena především z hlubokotažných materiálů. V současné době jsou nahrazeny pevnostními materiály v oblastech, kde při nehodě dochází k největšímu ohrožení osob ve vozidle. Pevnostní materiály se používají např. ve dveřích automobilu, aby zvýšila bezpečnost při bočním nárazu. [2, 4]

### 2.1.3 Kompozitní materiály

Kompozitní materiály (neboli kompozity) jsou složené ze dvou nebo více fází. Kompozitní materiál se skládá z výztuže a matrice. Výztuž je tvrdá a tuhá fáze. Matrice má obvykle funkci jako pojivo výztuže. Pro lepší vlastnosti kompozitních materiálu je důležitý výběr materiálu výztuže a matrice. Zásadní je také její objemový poměr.

Kompozitní materiály můžeme dělit do různých skupin, např. podle materiálu matrice na kompozity s kovovou, polymerní nebo s anorganickou maticí. Další rozdělení je podle struktury výztuže na částicové a vláknové. Vlákná mohou být například kovová, skleněná nebo uhlíková. Jako kovová vlákna jsou používány drátky z vysokotavitelných kovů. Sklovinu u skelných vláken tvoří přechlazená tavenina směsi oxidů Al, Si, B a Mg. Uhlíková vlákna jsou vyráběna z vláken polyakrylonitrilu nebo vláken celulózy. Tato vlákna mají desetinásobnou tuhost oproti skleněným. Bohužel jsou deseti až stonásobně dražší.

Pokud má mít vláknový kompozit dobré mechanické vlastnosti ve všech směrech, je nutné použít třídimenziální výztuž (obr. 2.3). Pro výrobu třídimenziální výztuže se používají speciální tkací stroje. Vláknové kompozity se používají u pneumatik nebo při výrobě draků letadel a potahů křídel. Dalším typem kompozitních materiálů jsou vrstvené materiály. [5]

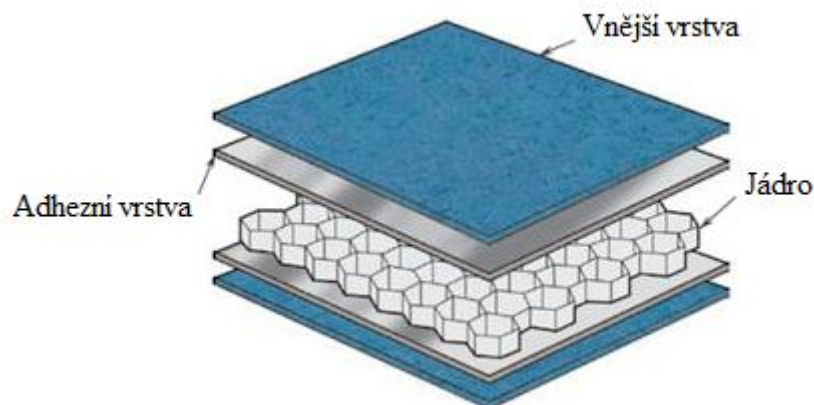


**Obr. 2.3:** Třídimenziální výztuž kompozitního materiálu [5]

## 2.1.4 Vrstvené materiály

Vrstvené materiály (neboli sendviče) jsou díky velkému potenciálu používány v mnoha různých odvětvích. Mají využití od sportovních potřeb až po kosmický průmysl. V automobilovém průmyslu jsou žádané hlavně pro snížení hmotnosti. Nižší hmotností lze snížit spotřebu paliva, která je třeba pro pohon dopravních prostředků. Tyto materiály jsou mimořádným druhem kompozitů, složených z různých materiálů. Spojením těchto materiálů se uplatňují výhodné vlastnosti použitých složek.

Vrstvený materiál je většinou složen ze dvou vnějších vrstev, které jsou spojené s jádrem. Vnější vrstvy jsou tuhé a tenké. Jádro je zřetelně tlustší oproti vnějším vrstvám (obr. 2.4). Spojení je tvořeno adhezní vrstvou účelného druhu adhezního materiálu. Adhezní vrstva je velice důležitá pro správnou funkci vrstveného materiálu. Největší výhoda vrstvených materiálů plyne z porovnání s tenkostěnnou konstrukcí. Vrstvený materiál je z poměru hmotnosti a ohybové tuhosti výhodnější. [6, 8]



**Obr. 2.4:** Schéma vrstveného materiálu [7]

## Rozdělení vrstvených materiálů

### Vnější vrstvy

Vnější vrstvy vrstveného materiálu jsou oproti jádru tenké a velice tuhé. Protože na vnější vrstvy působí okolní prostředí, musejí splňovat několik požadavků. Velmi důležitá je odolnost proti opotřebení, odolnost proti teplotě a chemikáliím a korozivzdornost. Jelikož se vrstvené materiály používají velmi často v automobilovém průmyslu, je důležitá také schopnost absorbovat energii při nárazu. Materiály vnějších vrstev jsou buď kovové, nekovové nebo jejich kombinace. [6, 8]

## Kovové vnější vrstvy

Mají největší zastoupení v dopravním a lodním průmyslu. Materiály pro výrobu vnějších vrstev se především používají:

- oceli,
- hliníkové slitiny,
- měď a její slitiny,
- titanové slitiny.

Al slitiny se používají, protože mají mimo jiné vysokou odolnost proti korozi a nízkou teplotní roztažnost. Např. slitiny Al-Mg vysokou měrnou pevnost a jsou odolné proti korozi zejména v mořské vodě. Proto jsou významným materiálem v lodním průmyslu. [9]

Měď má vysokou tepelnou i elektrickou vodivost. Její mechanické vlastnosti jsou závislé na teplotě. Vlastnosti slitin Cu jsou závislé na druhu slitiny. Např. Ni nebo Mn mosazi mají vysokou pevnost a odolnost proti korozi. [10]

Slitiny Ti se dělí na slitiny  $\alpha$ ,  $\beta$  a  $\alpha+\beta$ . Slitiny  $\alpha$  vynikají skvělou tepelnou stabilitou. Slitiny  $\beta$  jsou stále vyvíjeny a mají dobrou odolnost proti korozi a tvářitelnost. Ti a jeho slitiny mají vysokou pevnost a relativně nízkou hmotnost. Proto má velké využití v leteckém průmyslu. [11]

## Nekovové vnější vrstvy

Do nekovových materiálů vnějších vrstev patří například dřevo, papírová lepenka a plasty. Tyto materiály se používají hlavně v architektuře nebo pro výrobu dekorativního nábytku. Velmi používaný je vláknom vyztužený kompozit (obr. 2.5). Pro výbornou měrnou pevnost a nízkou hmotnost je používán v leteckém a kosmickém průmyslu. Nevýhodou je vysoká cena a náročná výroba. [5, 6]



**Obr. 2.5:** Vrstvený materiál s vnější vrstvou z vláknom vyztuženého kompozitu [12]

## Vnitřní vrstva

Pomocí vnitřní vrstvy (neboli jádra) se dosahuje co největší tuhosti vrstveného materiálu. Zároveň je ale požadována co nejmenší hmotnost. Jádro by tedy mělo mít nízkou hustotu. Důležitá je vysoká pevnost v tlaku, pevnost ve smyku a tuhost. Důraz je kladen také na izolační a tlumící schopnosti. Stejně jako vnější vrstvy by i jádro mělo odolávat vysokým teplotám. Vnitřní vrstvy se dělí podle druhu na:

- pěny,
- voštiny,
- balsa,
- další vnitřní vrstvy.

## Pěny

Jedná se o jedny z nejpoužívanějších materiálů na výrobu jádra, kdy polotovarem je pěnový blok (obr. 2.6). Pěny jsou vyráběny z polymerů, ale vyskytují se u ve formě hliníkové pěny. Pěny mají hustotu  $30 \div 300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . [6, 8, 13]



**Obr. 2.6:** Blok vrstveného materiálu s PS jádrem [14]

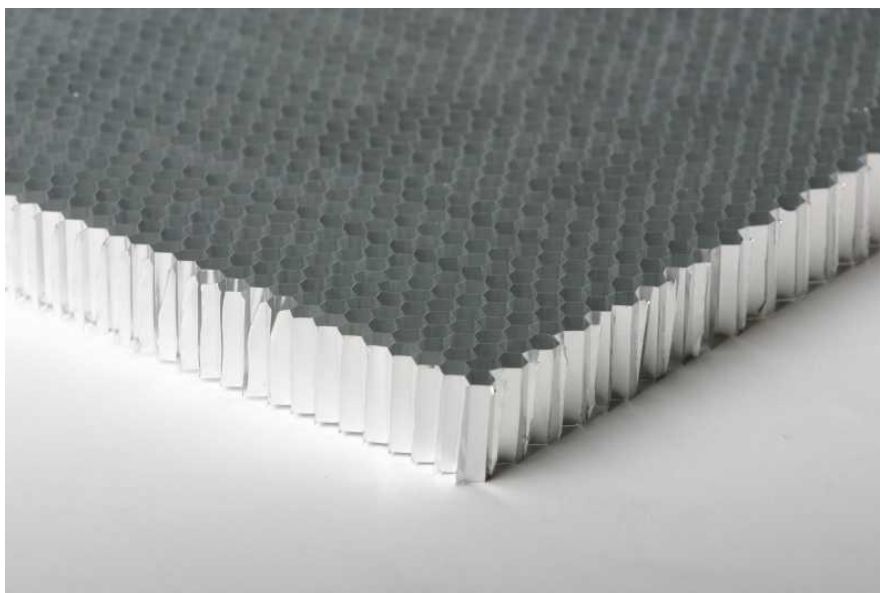
Některé druhy polymerních pěn:

- polyvinylchlorid - PVC,
- polyuretan - PUR,
- polystyren - PS.

PVC pěny jsou odolné vůči některým chemikáliím a jsou odolné vůči absorpci vody. Často používané jsou PVC pěny s uzavřenými buňkami. PUR pěny mají nízkou cenu a používá se jako tepelná izolace v automobilovém průmyslu. Nejlevnější je PS pěna, bohužel má nízké mechanické vlastnosti. [6, 8, 13]

## Voštiny

Voštiny mají většinou tvar šestiúhelníku (obr. 2.7). Obdobný tvar mají včelí plástve. Voštinové jádro je vyráběno ve spoustě geometrických provedeních. Způsob namáhání určuje tvar voštiny. Pro zlepšení mechanických vlastností se voštiny mohou vyplnit pěnou. Tím se zlepší také tepelná a akustická izolace. Materiálem pro výrobu voštin je např. lepenkový papír, ocel, Al a Ti. Hustota voštin je  $16 \div 880 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Z toho plyne, že voštiny mají lepší mechanické vlastnosti než pěny při podobné hustotě. Mechanické vlastnosti jsou závislé na tloušťce stěny voštiny a materiálu. Voštiny z lepenkového papíru, které mají nízkou tuhost a pevnost, jsou používány např. pro domovní dveře. Většina vrstvených materiálů s voštinovým jádrem má však vysokou tuhost, z toho důvodu jsou používány tam, kde je potřebná minimální deformace. Pro spojení voštinového jádra s vnějšími vrstvami se používá např. lepicí fólie. Tato fólie, která se vloží mezi vnější a vnitřní vrstvu, se při vyšší teplotě roztaví a vytvoří pevné spojení. Jako adhezní vrstva se může použít např. epoxidová pryskyřice. [8, 13]



**Obr. 2.7:** Voštinové jádro z hliníku [15]

## Balsa

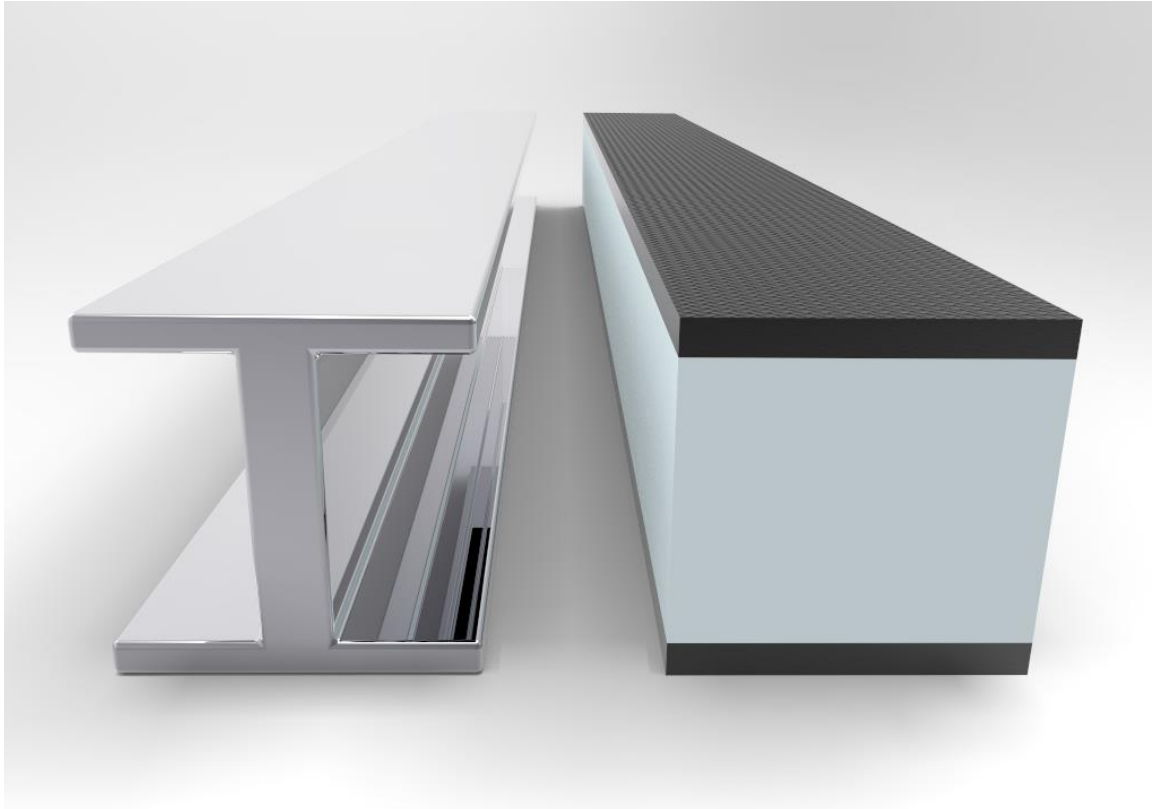
Používá se v dopravním průmyslu a jako součást listů větrných elektráren. Je také využívána jako izolační materiál na chladírenských lodích. Jedná se o přírodní produkt. Má dobré zvukové a vibrační vlastnosti. Její hustota je  $96 \div 288 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a je velice pórovitá. [8, 13]



## 2.1.5 Mechanické vlastnosti vrstvených materiálů

Na materiály působí různé druhy namáhání. Patří sem například tah, tlak, ohyb a smyk. Tato namáhání většinou působí v kombinacích, označována jako složená namáhání. Materiály musí odolávat těmto namáháním, proto mají vlastnosti jako je pevnost, tvrdost, tuhost aj.

Vrstvené materiály mají vysokou ohybovou pevnost a tuhost. Mají podobný profil jako „I“ nosník (obr. 2.8). U tohoto profilu se využívá toho, že větší množství materiálu vzdáleno od neutrální osy a tím přenáší ohybové síly. U vrstvených materiálů je tahové a tlakové napětí přenášeno vnějšími vrstvami. Smykové zatížení přenáší jádro, z toho důvodu je důležité volit materiál s vhodnou pevností ve smyku. Pro co nejlepší mechanické vlastnosti, je důležité volit správné materiály vnějších vrstev i materiál jádra. Důležitá je také adhezní vrstva, která musí přenášet smykové síly mezi vnější a vnitřní vrstvou. V ideálním případě by měla být schopná přenášet stejné smykové napětí jako jádro. Porušení vrstveného materiálu vzniká ve vnější nebo vnitřní vrstvě. Na vnější vrstvě se může vyskytnout například lom. Může také nastat porušení adhezní vrstvy a tím dojde ke zvlnění vnější vrstvy. [8, 16]



**Obr. 2.8:** Podobnost „I“ profilu a vrstveného materiálu [17]

## 2.2 Zkoušky mechanických vlastností

Zkoušky materiálů se provádí, aby byly zjištěny jejich vlastnosti. Zkoušky dělíme například na normalizované, technologické a mechanické. Technologické zkoušky slouží ke zjištění vhodnosti zvoleného materiálu pro další zpracování. Mechanické zkoušky dělíme podle zatížení na statické a dynamické. Mezi zkoušky statické patří například zkouška tahem, tlakem, ohybem a smykem. Do této skupiny patří také zkoušky tvrdosti. Dynamické zkoušení probíhá rázovým, rychle vznikajícím nebo střídavým zatížením. Statické zkoušky vrstvených materiálů v tahu stanovují pevnost v tahu, která je na ploše jádra.

Zkouška probíhá tak, že vrstvený materiál je zatěžován tahovým zatížením ve směru kolmém na jeho plochu. U zkoušky smykem je zatížení s plochou rovnoběžné. Zkouška v tlaku testuje únosnost vrstveného materiálu a jeho tuhost. při dynamických zkouškách se zjišťuje odolnost konstrukce proti rázům. [16, 18],

### 2.2.1 Zkouška tahem

Principem zkoušky tahem je porušení zkušební vzorku s cílem zjistit napěťové a deformační charakteristiky zkoušeného materiálu. Zkušební vzorky jsou normalizované tyče, které mohou mít různý tvar. Například válcový, čtvercový nebo obdélníkový. Zkouškou zjistíme některé vlastnosti materiálu. Konkrétně například mez pevnosti  $R_m$ , výraznou mez kluzu  $R_e$ , kontrakci  $Z$  a tažnost  $A_x$ . [18, 19]

Mez pevnosti se vypočítá ze vzorce:

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \quad [\text{MPa}], \quad (1)$$

kde:  $R_m$  - mez pevnosti [MPa],  
 $F_{max}$  - maximální zatěžující síla [N],  
 $S_0$  - počáteční průřez zkušební tyče [mm<sup>2</sup>].

Tažnost se vypočítá ze vzorce:

$$A_x = \frac{L_u - L_0}{L_0} \quad [1] \quad (2)$$

kde:  $A_x$  - tažnost [1],  
 $L_u$  - délka vzorku po zkoušce [mm],  
 $L_0$  - původní délka vzorku [mm].

Kontrakce se vypočítá ze vzorce:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \quad [1], \quad (3)$$

kde:  $Z$  - kontrakce [1],  
 $S_0$  - průřez zkušební tyče před zkouškou [mm<sup>2</sup>],  
 $S_u$  - průřez zkušební tyče po zkoušce [mm<sup>2</sup>].

Mez kluzu se počítá pouze, pokud je výrazná. Pokud není výrazná, určí se smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$  jako dvě desetiny původní délky vzorku. Při zkoušce tahem můžeme vycházet ze smluvního ( $R-\varepsilon$ ), pracovního ( $F-\Delta L$ ) nebo skutečného diagramu ( $\sigma-\varphi$ ). Strojírenská praxe využívá především smluvní diagram, při kterém jsou hodnoty napětí vázány k původnímu průřezu vzorku. Aby naměřené hodnoty platily pro libovolný průřez, zakreslují se do diagramu jako hodnoty poměrné.

Pro skutečný diagram zkoušky tahem je důležitý Hookeův zákon. Ten platí pouze do meze úměrnosti, kde je normálové napětí přímo úměrné prodloužení. [18, 19]

Hookeův zákon:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad [\text{MPa}], \quad (4)$$

kde:  $\sigma$  - skutečné napětí v tahu [MPa],  
 $E$  - modul pružnosti v tahu [MPa],  
 $\varepsilon$  - poměrné prodloužení [1].

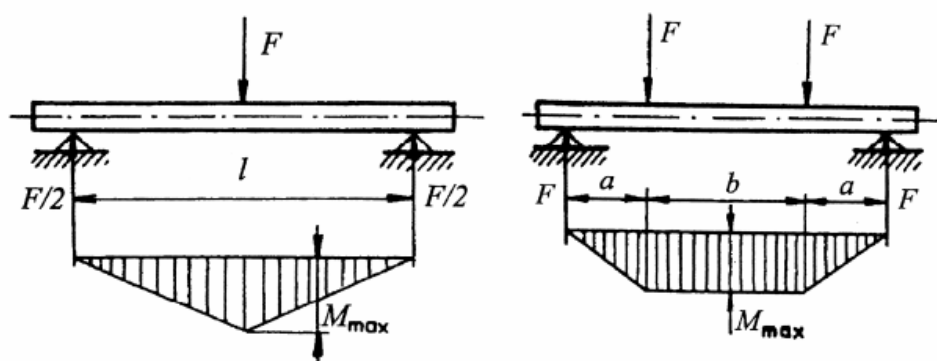
U tažnosti  $A_x$  je důležitý index  $x$ . Tento index charakterizuje zkušební tyčku a označení ho musí vždy obsahovat. Pro plochý průřez se nejčastěji používá označení  $A_{50}$  nebo  $A_{80}$ . V tomto případě index  $x$  značí původní délku zkušební tyčky, tedy 50 mm nebo 80 mm. Označení  $A_5$  nebo  $A_{10}$  se používá pro kruhový průřez, kde index  $x$  značí poměr mezi původní délkou tyčky a jejím původním průměrem.

## 2.2.2 Zkouška tlakem

Tato zkouška se používá pro zjištění pevnosti v tlaku. Kovové materiály mají přibližně stejnou mez kluzu v tlaku a v tahu, proto se u nich tato zkouška většinou neprovádí. Naopak se velmi často používá ve stavebnictví. Při zkoušce tlakem můžeme zjistit například pěchovatelnost, kovatelnost a poměrné zkrácení. Zkušební vzorek je zatěžován rovnoměrně se zvětšující silou, dokud nedojde k porušení. U křehkých materiálů dochází k prasknutí. Tvárné materiály se většinou deformují do soudečkovitého tvaru. [18]

## 2.2.3 Zkouška ohybem

Zkouškou ohybem se zjišťuje pevnost v ohybu, která je rovna největšímu ohybovému napětí ve vzorku při porušení. Zkouška patří do skupiny statických destruktivních zkoušek. Ohybová síla působí na vzorek, která je položen na dvou podporách. Sleduje se deformace, kterou síla působí až do porušení vzorku. Testují se hlavně křehké materiály, jako jsou například grafitické litiny. U tvárných materiálu se zjišťují jejich ohybové vlastnosti. Zkouška ohybem může být třibodová nebo čtyřbodová (obr 2.9). [18]



Obr. 2.9: Zkouška ohybem třibodová (vlevo) a čtyřbodová [18]

Napětí v ohybu se vypočítá ze vzorce:

$$\sigma_o = \frac{M_{o_{max}}}{W_o} \quad [\text{MPa}], \quad (5)$$

kde:  $\sigma_o$  - napětí v ohybu [MPa],  
 $M_{o_{max}}$  - maximální ohybový moment [N·mm],  
 $W_o$  - modul průřezu v ohybu [mm<sup>3</sup>].

## 2.2.4 Zkouška smykem

Namáhání prostým smykem vzniká tehdy, pokud dvě síly stejné velikosti působí opačným směrem v jedné rovině procházející těžištěm průřezu. Tečné napětí se projeví, protože materiál se brání působení těchto vnějších sil. Ve skutečnosti však síly nemají společnou nositelku a posuv ve směru síly je doprovázen ohybem. Pak se jedná o smyk doprovázený ohybem. Deformace u prostého smyku zanedbáme, protože jsou nepatrné. U smyku také díky tečnému napětí dochází ke zkosení. [18]

Napětí ve smyku se počítá z následujícího vzorce:

$$\tau_{max} = \frac{F}{S_{min}} \leq \tau_{DS} \quad [\text{MPa}], \quad (6)$$

kde:  $\tau_{max}$  - maximální napětí ve smyku [MPa],  
F - zatěžující síla [N],  
 $S_{min}$  - minimální průřez tělesa [mm<sup>2</sup>],  
 $\tau_{DS}$  - dovolené napětí ve smyku [MPa].

Stejně jako u tahu platí i u smyku Hookeův zákon. Jedná se o Hookeův zákon pro smyk, který platí do meze úměrnost mezi zkosem a tečným napětím.

$$\tau = G \cdot \gamma \quad [\text{MPa}], \quad (7)$$

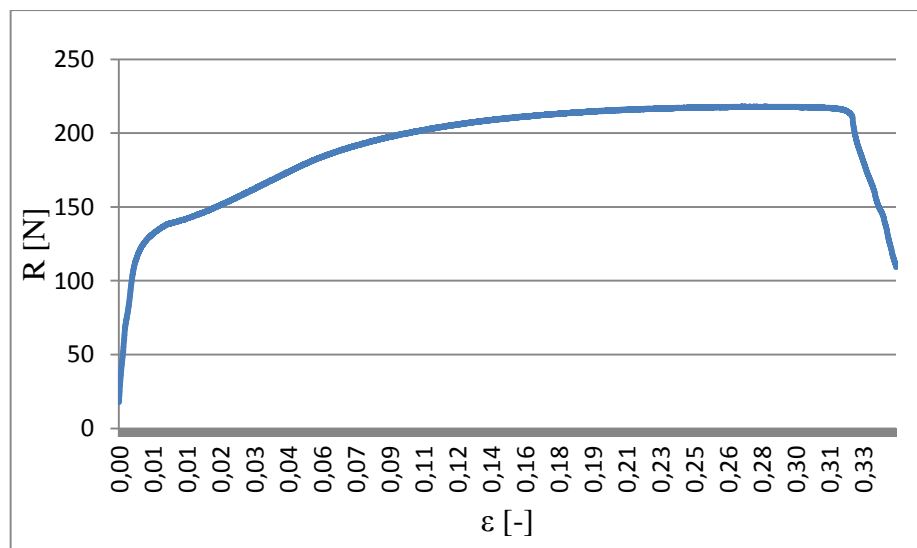
kde:  $\tau$  - napětí ve smyku [MPa],  
G - modul pružnosti ve smyku [MPa],  
 $\gamma$  - zkos [1].

### 3 Experimentální část

Cílem této bakalářské práce bylo zjistit pevnost ve smyku vrstvených materiálů za různých teplot (-35 °C, RT 24,3 °C, 80 °C). Vrstvený materiál je tvořen dvěma plechy z hlubokotažného materiálu a jádrem z folie, která se za působení tepla roztaví a vytvoří spojovací vrstvu. Měření probíhalo v laboratořích Katedry strojírenské technologie TUL na zařízení TIRA test 2300.

#### 3.1 Testovaný materiál

Vnější vrstvy testovaného materiálu tvoří dva plechy z hlubokotažného materiálu. Pro zjištění mechanických vlastností byla provedena zkouška tahem. Její průběh je zobrazen v grafu 1.



**Graf 1:** Smluvní diagram (R-ε) zkoušky tahem pro zkoušený vrstvený materiál

Jádro tvoří folie, která je složena polybutylakrylátu a sulfoethylmethakrylátu. Působením tepla dojde k roztavení této folie, a následnému spojení vnějších vrstev. Tím dojde k vytvoření testovaného vrstveného materiálu (obr. 3.1).

**Tab. 1:** Základní vlastnosti testovaného vrstveného materiálu

Tloušťka [mm]	0,55
Smluvní mez pevnosti v tahu $R_m$ [MPa]	217,94
Smluvní mez kluzu v tahu $R_{p0,2}$ [MPa]	128,71
Homogenní tažnost $A_g$ [%]	18,58
Celková tažnost $A_{80mm}$ [%]	26,05

## 3.2 Experimentální měření

Měření probíhalo na zařízení TIRA test 2300 za tři různých teplot. Pro každou teplotu bylo použito pět vzorků. Výsledky měření byly použity pro výpočet pevnosti ve smyku testovaného materiálu.

### 3.2.1 Zařízení TIRA test 2300

TIRA test 2300 je zkušební zařízení pro stanovení mechanických vlastností materiálů v tahu, tlaku a ohybu. Stroj byl vyroben v roce 1988 a jeho nejvyšší zatížení je 100 kN. Stroj může pracovat jak za pokojové teploty, tak vysokých nebo nízkých teplot. Pro měření za vysokých teplot je stroj vybaven teplotní komorou (obr. 3.1).

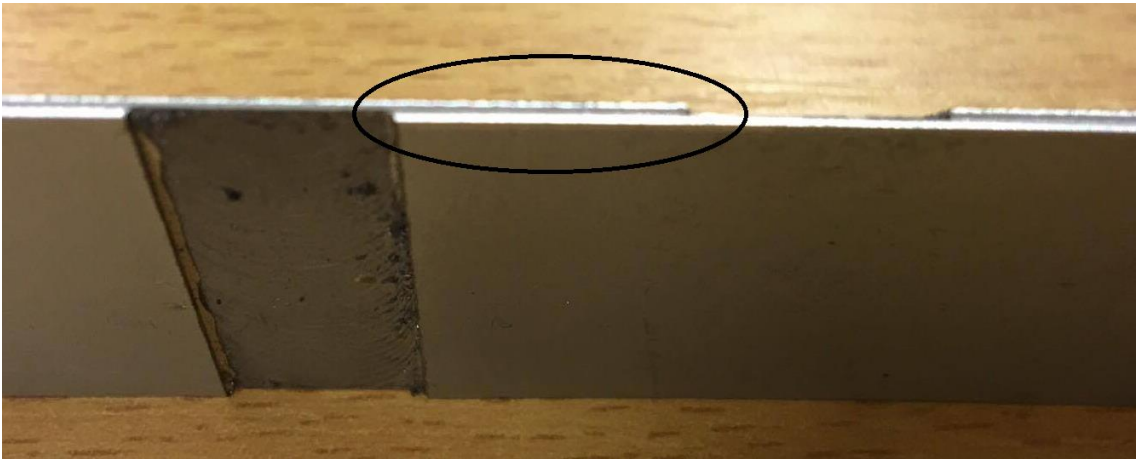


**Obr. 3.1:** TIRA test 2300 (vlevo) a vzorky použité při experimentu

Stroj je propojen s počítačem a pomocí kvalitních snímačů lze dosáhnout velmi přesných výsledků. Díky pneumatickým pedálům je upínání vzorků velice snadné a rychlé. TIRA test 2300 se používá pro testování různých druhů materiálů. Např. plasty, gumy, textilie a kovy.

### 3.2.2 Postup měření

Protože bylo měření prováděno na trhacím stroji pro zkoušku tahem, bylo potřeba upravit vzorek pro následné smykové namáhání. Z toho důvodu byly na vzorku z obou stran vyfrézovány drážky tak, aby vzniklo přeplátování (obr. 3.2). Délka přeplátování byla  $l = 10$  mm a šířka vzorku  $w = 25$  mm. Tyto hodnoty se později použily pro výpočet smykové pevnosti.



**Obr. 3.2:** Detail přeplátování

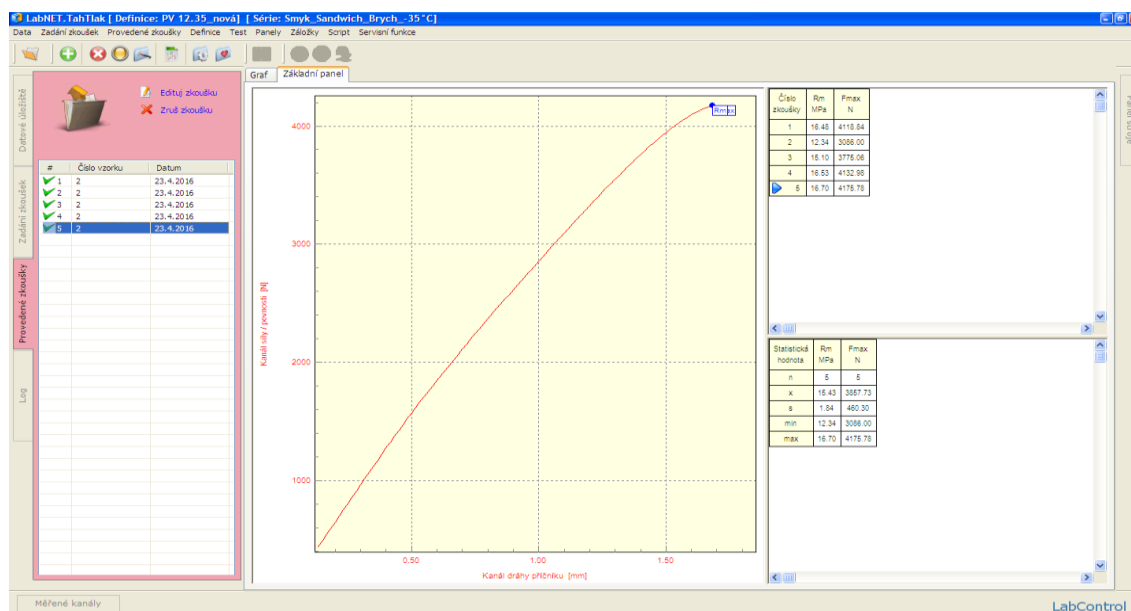
Pevnost ve smyku se určovala za tří různých teplot (  $-35$  °C, RT  $24,3$  °C,  $80$  °C). Při každé teplotě bylo zkoušeno pět vzorků. Celkem tedy patnáct vzorků. Jako první proběhlo měření za pokojové teploty. Vzorky byly upínány do čelistí (obr. 3.3). Každá čelist může být ovládána zvlášť pomocí pneumatických pedálů. To umožňuje rychlé a přesné upínání vzorků.



**Obr. 3.3:** Detail čelisti s upnutým vzorkem



Po upnutí vzorku byla zahájena zkouška. Rychlost zatěžování  $v_L = 10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  byla pro všechna měření stejná. Výsledky zkoušky byly vyhodnoceny na PC pomocí softwaru LabNET (obr. 3.4). Jedním z výsledků byla maximální síla, která se použila pro výpočet napětí ve smyku.



**Obr. 3.4:** Pracovní prostředí softwaru LabNET

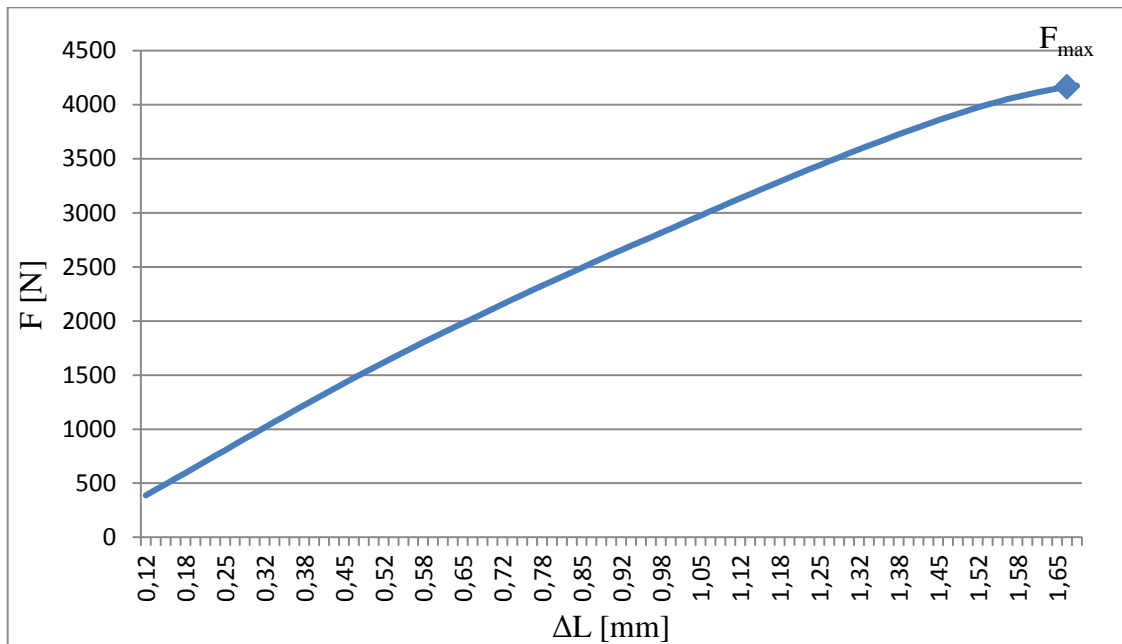
Zkoušky za teploty  $-35 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  probíhaly stejně jako zkoušky za pokojové teploty. Bylo však nutné dosáhnout určené teploty vzorků. Proto bylo použito chladicí zařízení, ve kterém byly vzorky ochlazeny na teplotu  $-35 \text{ }^\circ\text{C}$  a teplotní komora, která slouží k ohřátí vzorků na požadovanou teplotu (obr. 3.5). Ohřátí vzorků na teplotu  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  trvalo cca 10 minut. Manipulace se zmraženými vzorky musela být rychlá, aby nedošlo k jejich teplotnímu ovlivnění.



**Obr. 3.5:** Chladicí zařízení (vlevo) a teplotní komora se vzorky

### 3.3 Naměřené hodnoty

Pro ukázkou postupu výpočtu pevnosti ve smyku byl vybrán vzorek č. 5, který byl zkoušen za teploty  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Vzorek č. 5, stejně jako ostatní vzorky, měl šířku  $w = 25\text{ mm}$  a délku přeplátování  $l = 10\text{ mm}$ . Tyto hodnoty byly použity ve vzorci (8) pro výpočet napětí ve smyku. Maximální síla pro vzorek č. 5  $F_{\max} = 4175,78\text{ N}$ . Tato síla je vyznačena v grafu 2.



**Graf 2:** Pracovní diagram ( $F$ - $\Delta L$ ) vzorku č.5 s vyznačenou  $F_{\max}$

napětí ve smyku se počítá podle:

$$\tau_{LS} = \frac{F_{\max}}{l \cdot w} \quad [\text{MPa}], \quad (8)$$

kde:  $\tau_{LS}$  - napětí ve smyku [MPa],  
 $F_{\max}$  - maximální síla [N],  
 $l$  - délka přeplátování [mm],  
 $w$  - šířka vzorku [mm].

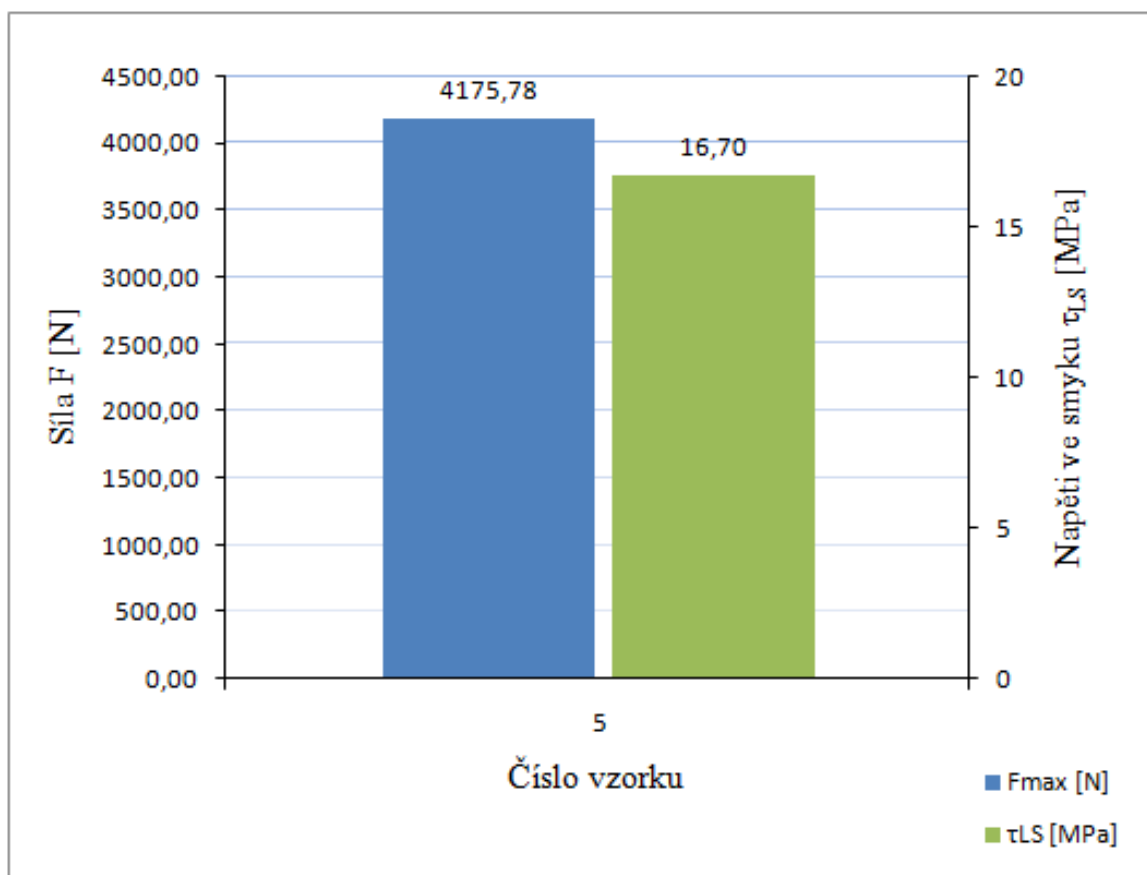
Po dosazení pro vzorek č.5:

$$\tau_{LS} = \frac{F_{\max}}{l \cdot w} = \frac{4175,78}{10 \cdot 25} = 16,70\text{ MPa}$$

Výsledkem dosazení do vzorce (8) bylo napětí ve smyku vzorku č.5, které mělo hodnotu  $\tau_{LS} = 16,70\text{ MPa}$ .

**Tab 2:** Výsledné hodnoty vzorku č.5 za teploty -35 °C

Číslo zkoušky	$F_{\max}$ [N]	$\tau_{LS}$ [MPa]
5	4175,78	16,70



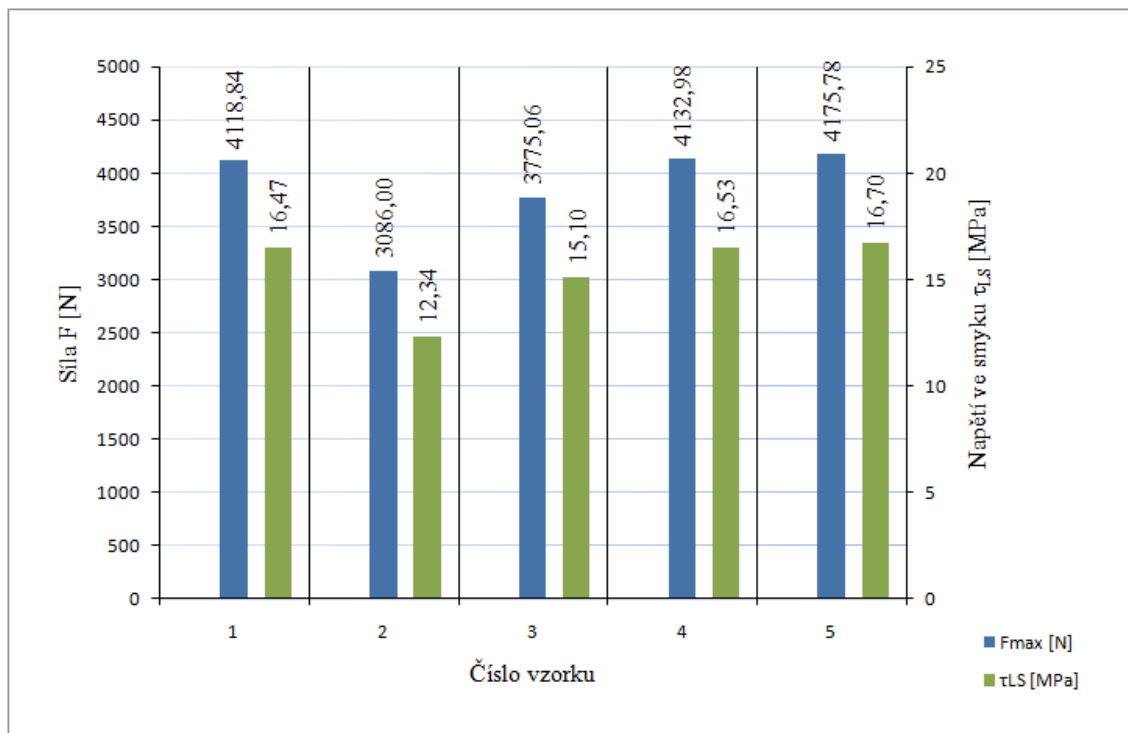
**Graf 3:** Výsledné hodnoty vzorku č.5 za teploty -35 °C

Stejným způsobem se postupovalo i u ostatních vzorků. Při každé teplotě bylo testováno pět vzorků, aby byla zjištěna maximální síla. Následoval výpočet napětí ve smyku. Pro každou teplotu byla z pěti měření vypočítána průměrná hodnota síly, napětí ve smyku a směrodatná odchylka. Z těchto hodnot byly vytvořeny tabulky a grafy.

## Měření za teploty -35 °C

**Tab. 3:** Výsledné hodnoty za teploty -35 °C

Číslo zkoušky	$F_{\max}$ [N]	$\tau_{LS}$ [MPa]
1	4118,84	16,47
2	3086,00	12,34
3	3775,06	15,10
4	4132,98	16,53
5	4175,78	16,70
$\bar{x}$	<b>3857,73</b>	<b>15,43</b>
s	<b>460,30</b>	<b>1,84</b>

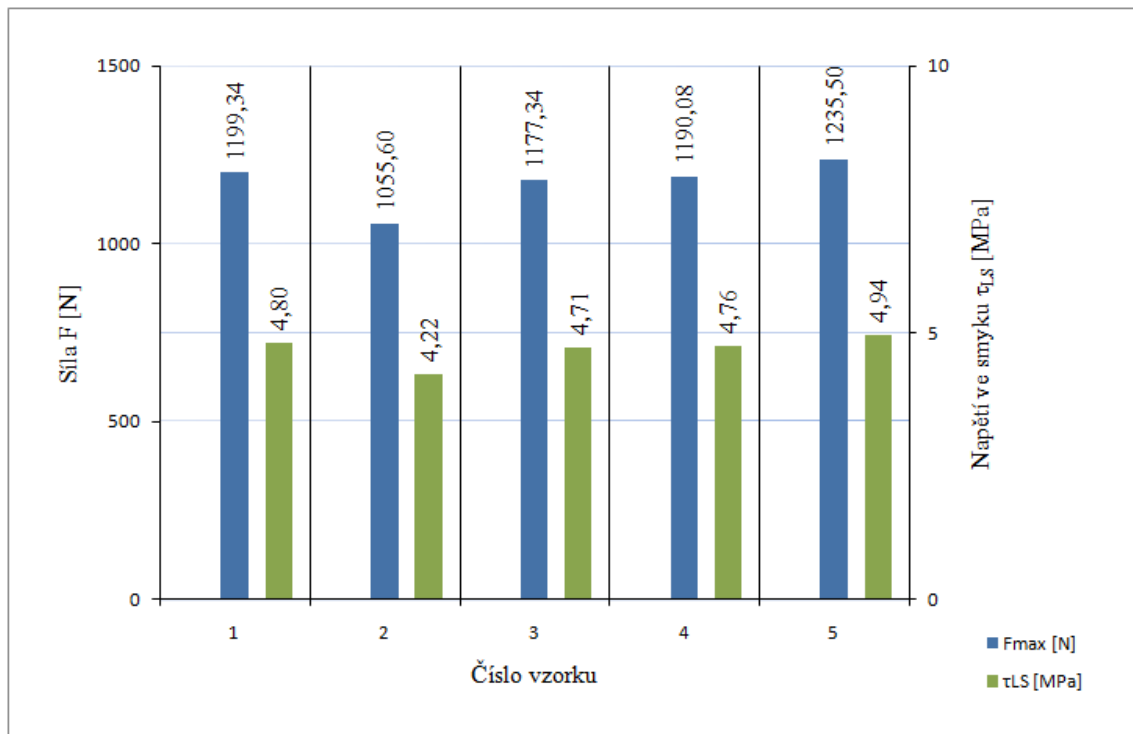


**Graf 4:** Výsledné hodnoty za teploty -35 °C

## Měření za pokojové teploty RT 24,3 °C

**Tab. 4:** Výsledné hodnoty za pokojové teploty RT 24,3 °C

Číslo zkoušky	$F_{\max}$ [N]	$\tau_{LS}$ [MPa]
1	1199,34	4,80
2	1055,60	4,22
3	1177,34	4,71
4	1190,08	4,76
5	1235,50	4,94
$\bar{x}$	<b>1171,57</b>	<b>4,69</b>
s	<b>68,34</b>	<b>0,27</b>

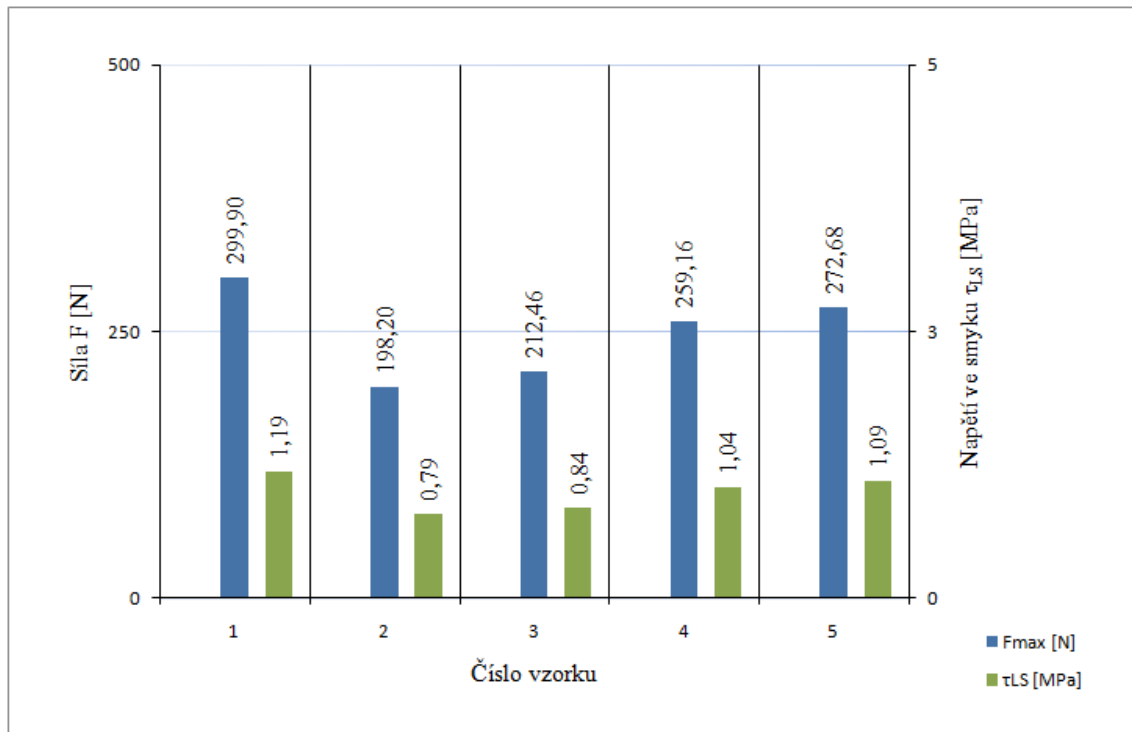


**Graf 5:** Výsledné hodnoty za pokojové teploty RT 23,4 °C

## Měření za teploty 80 °C

**Tab. 5:** Výsledné hodnoty za teploty 80 °C

Číslo zkoušky	$F_{\max}$ [N]	$\tau_{LS}$ [MPa]
1	299,90	1,19
2	198,20	0,79
3	212,46	0,84
4	259,16	1,04
5	272,68	1,09
$\bar{x}$	<b>248,48</b>	<b>0,99</b>
s	<b>42,34</b>	<b>0,17</b>

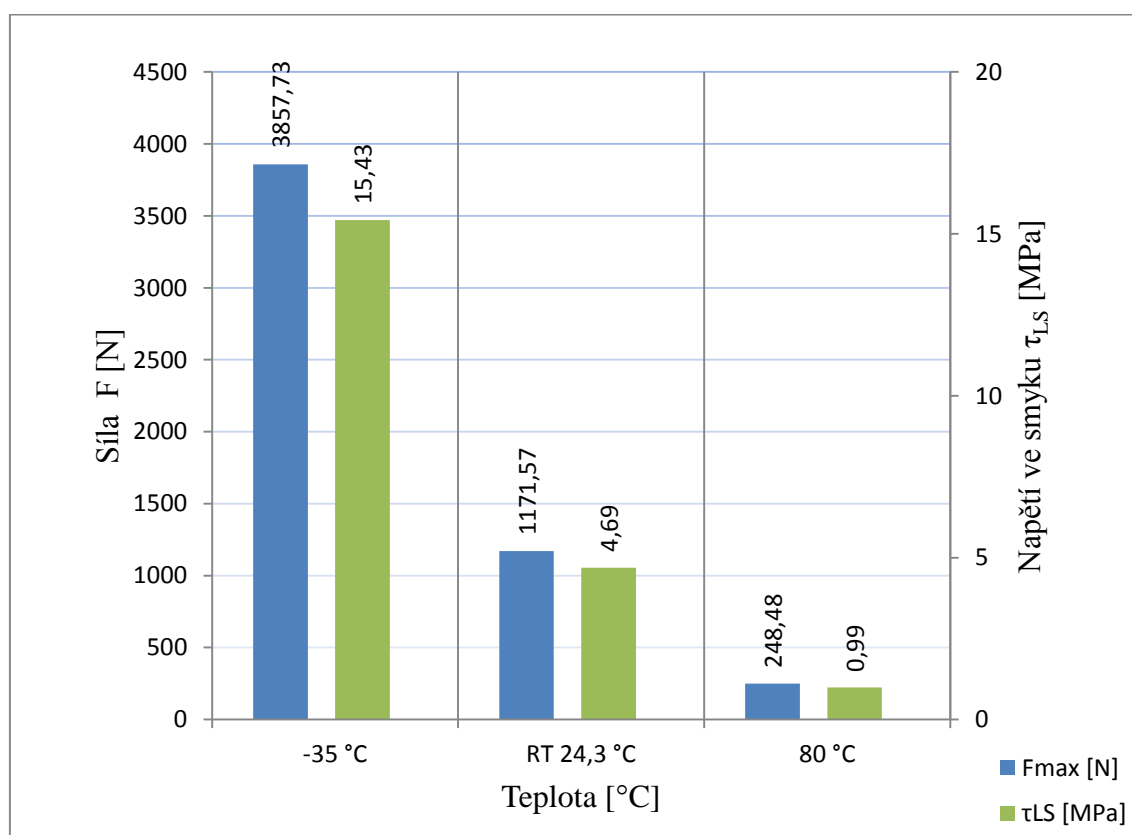


**Graf 6:** Výsledné hodnoty za teploty 80 °C

Pro porovnání výsledků za různých teplot, byla vytvořena tabulka a graf z průměrných hodnot maximálních sil a napětí ve smyku jednotlivých měření. Z tabulky a grafu jsou jasně vidět rozdílné hodnoty sil a napětí ve smyku při různých teplotách.

**Tab. 6:** Přehled průměrných hodnot za různých teplot

Teplota měření	$F_{\max}$ [N]		$\tau_{LS}$ [MPa]	
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
-35 °C	3857,73	460,3	15,43	1,84
24,3 °C	1171,57	68,34	4,63	0,27
80 °C	248,48	42,34	0,99	0,17



**Graf 7:** Přehled průměrných hodnot za různých teplot

## 4 Rozbor výsledků

Podle výsledků naměřených v tabulce 5 a ze zpracovaného sloupcového grafu 5 je zřejmé, že s klesající teplotou roste síla potřebná k porušení a tím i pevnost ve smyku testovaného vrstveného materiálu. Při teplotě  $-35\text{ °C}$  je hodnota pevnosti ve smyku přibližně trojnásobek pevnosti ve smyku tohoto materiálu za pokojové teploty a patnáctinásobek pevnosti ve smyku za teploty  $80\text{ °C}$ .

Průměrná pevnost ve smyku testovaného vrstveného materiálu při pokojové teplotě  $24,3\text{ °C}$  je  $4,69\text{ MPa}$ . Při teplotě  $-35\text{ °C}$  se pevnost ve smyku zvětšila o  $243\%$  oproti této hodnotě. Nejnižší průměrné hodnoty byly za teploty  $80\text{ °C}$ . Při této teplotě došlo ke snížení pevnost ve smyku o  $79\%$  oproti pokojové teplotě. Rozdíl mezi teplotou  $-35\text{ °C}$  a  $80\text{ °C}$  je tedy  $322\%$ . Velice podobné hodnoty vykazovaly průměrné hodnoty síly za různých teplot.

**Tab 7:** Průměrné hodnoty  $F_{\max}$  a  $\tau_{LS}$  za teploty  $24,3\text{ °C}$  a jejich změna při změně teploty

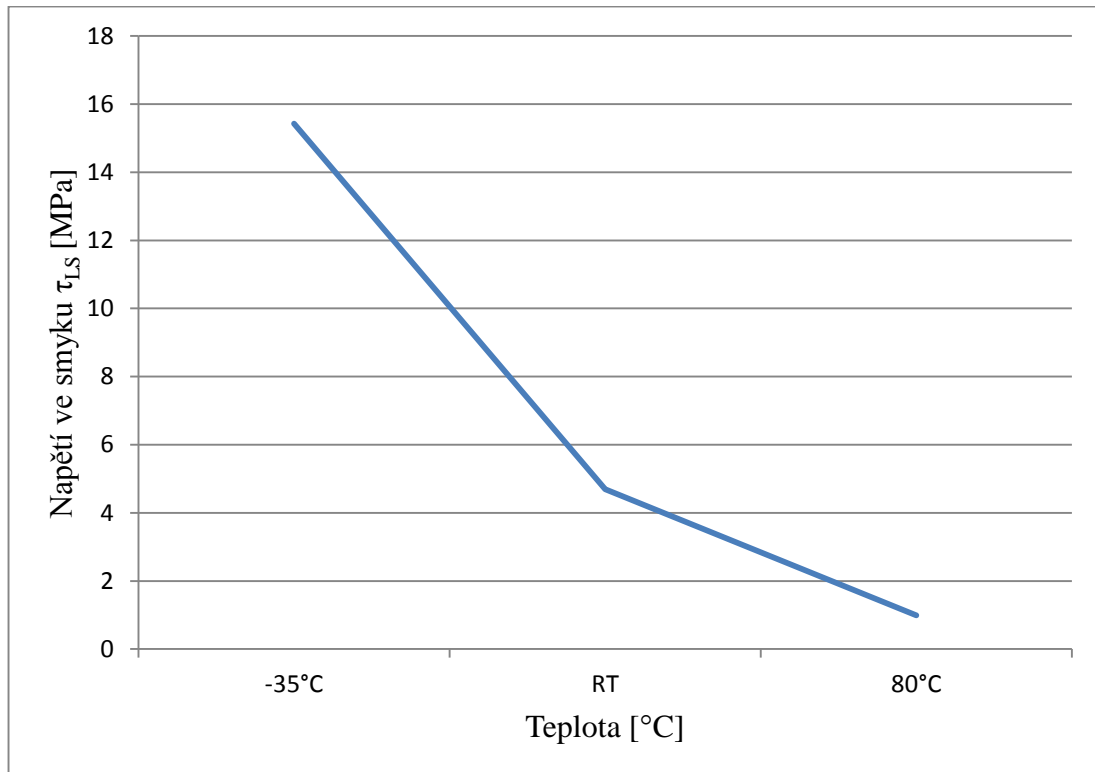
Teplota měření	F [N]	$\tau_{LS}$ [MPa]
$-35\text{ °C}$	229 %	243 %
<b><math>24,3\text{ °C}</math> (100 %)</b>	<b>1171,57</b>	<b>4,69</b>
$80\text{ °C}$	21 %	21 %

Z výsledků uvedených v tabulce 7 je patrné, že při nejnižší teplotě vykazuje testovaný vrstvený materiál nejvyšší pevnost ve smyku. S rostoucí teplotou se pevnost ve smyku snižuje a při teplotě  $80\text{ °C}$  má velikost pouhých  $0,99\text{ MPa}$ . To odpovídá  $21\%$  z velikosti pevnost ve smyku za pokojové teploty. Pokles síly při rostoucí teplotě je stejný jako pokles pevnosti ve smyku. Při nízké teplotě je maximální síla od  $229\%$  větší než maximální síla za pokojové teploty.



Z grafu 8 je patrné, že křivka tvořená z hodnot pevnosti ve smyku za různých teplot má růstový charakter. Proto je pravděpodobné, že při dalším snížení teploty, by pevnost ve smyku mohla být až desetinásobně větší než za pokojové teploty.

Pro potvrzení nebo vyvrácení tohoto tvrzení, by bylo třeba provést několik dalších měření například za teploty  $-50\text{ °C}$  a nižší. Je možné, že materiál by za jiných teplot vykazoval jiné vlastnosti než za teplot, za kterých probíhalo měření v této bakalářské práci.



**Graf 8:** Křivka růstu pevnosti ve smyku s klesající teplotou

## 5 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo zjistit pevnost ve smyku vrstveného materiálu za různých teplot. Vrstvený materiál byl složen ze dvou plechů hlubokotažného materiálu a jádra z folie, která se působením tepla roztavila a vytvořila pevné spojení. Folie byla složená z polybutylakrylátu a sulfoethylmethakrylátu.

Měření probíhalo za tří různých teplot (-35 °C, RT 24,3 °C, 80 °C). Z naměřených hodnot je zřejmé, že s klesající teplotou roste pevnost ve smyku testovaného vrstveného materiálu.

**Tab. 8:** Přehled průměrných hodnot pevnosti ve smyku za různých teplot

Teplota měření	$\tau_{LS}$ [MPa]	
	$\bar{x}$	s
-35 °C	15,43	1,84
RT 24,3 °C	4,63	0,27
80 °C	0,99	0,17

Hlavní příčinou je zřejmě přechodová teplota jádra, která má vliv na nízkou pevnost ve smyku za pokojové teploty a za teploty 80 °C. S tím souvisí i vysoká pevnost ve smyku testovaného materiálu při teplotě -35 °C, která je 3x vyšší než za pokojové teploty. Dalšími faktory, které mohou mít vliv na pevnost ve smyku, může být tloušťka jádra nebo materiál vnější vrstvy.

Materiál testovaný v této práci by bylo vhodné používat v prostředí se stálou teplotou. Pro zlepšení pevnosti ve smyku testovaného vrstveného je třeba použít jiný materiál jádra, jehož mechanické vlastnosti budou stálé i za různých teplot. Lepší vlastnosti by vrstvený materiál mohl mít při použití jiného materiálu na vnější vrstvu. Je možné, že materiál vnější vrstvy není vhodný pro toto jádro, nebo naopak. Proto je třeba vyzkoušet různá složení vrstveného materiálu a testovat jejich vlastnosti. Bylo by také vhodné provést více měření pro přesnější výsledky.

## Seznam použité literatury

- [1] Obrázek: Vrstvený materiál [online]. [cit 2016-06-16]. Dostupné z: [http://www.ukipme.com/emailers/rix\\_20150903/images/AluCORK.fw.png](http://www.ukipme.com/emailers/rix_20150903/images/AluCORK.fw.png)
- [2] KOLNEROVÁ M., AUSPERGER A.: *Metody tváření kovů a plastů*. Studijní materiály k předmětu tváření kovů a plastů. Liberec: KSP TU v Liberci. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/mtk/MTK3.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/mtk/MTK3.pdf)
- [3] KOLNEROVÁ M., AUSPERGER A.: *Metody tváření kovů a plastů*. Studijní materiály k předmětu tváření kovů a plastů. Liberec: KSP TU v Liberci. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/mtk/MTK2.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/mtk/MTK2.pdf)
- [4] LOUDA P., ODEHNALOVÁ D.: *Nauka o materiálu II – oceli*. Studijní materiály k předmětu nauka o materiálu II. Liberec: KMT TU v Liberci. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_bakalari/NOM2/NOM2.htm](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/NOM2/NOM2.htm)
- [5] LOUDA P., ODEHNALOVÁ D.: *Nauka o materiálu II – kompozity*. Studijní materiály k předmětu nauka o materiálu II. Liberec: KMT TU v Liberci. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_bakalari/NOM2/NOM2.htm](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/NOM2/NOM2.htm)
- [6] DAVIES G.: *Materials for automobile bodies*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003. s. 277. ISBN 0-7506-5692-1.
- [7] Obrázek: Schéma vrstveného materiálu [online]. [cit 2016-06-16]. Dostupné z: [http://img.nauticexpo.com/images\\_ne/photo-m2/28043-449087.jpg](http://img.nauticexpo.com/images_ne/photo-m2/28043-449087.jpg)
- [8] POLMEAR I.: *Ligth Alloy – From traditional Alloys to Nanocrystals*. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. S. 421. ISBN 0-471-01214-9
- [9] LOUDA P., ODEHNALOVÁ D.: *Nauka o materiálu II – Hliník a jeho slitiny*. Studijní podklady k předmětu nauka o materiálu II. Liberec: KMT TU v Liberci. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_bakalari/NOM2/NOM2.htm](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/NOM2/NOM2.htm)
- [10] LOUDA P., ODEHNALOVÁ D.: *Nauka o materiálu II – Měď a její slitiny*. Studijní podklady k předmětu nauka o materiálu II. Liberec: KMT TU v Liberci. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_bakalari/NOM2/NOM2.htm](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/NOM2/NOM2.htm)
- [11] LOUDA P., ODEHNALOVÁ D.: *Nauka o materiálu II – Hořčík a jeho slitiny*. Studijní podklady k předmětu nauka o materiálu II. Liberec: KMT TU v Liberci. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_bakalari/NOM2/NOM2.htm](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/NOM2/NOM2.htm)
- [12] Obrázek: Vrstvený materiál s vnější vrstvou z vláknem vyztuženého kompozitu [online]. [cit 2016-06-16]. Dostupné z: <http://www.damtp.cam.ac.uk/research/solids/images/sandwich.jpg>
- [13] ASHBY M.F.: *Materials Selection in Mechanical Design*. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005. S. 603. ISBN 0-7506-6168-2.
- [14] Obrázek: Blok vrstveného materiálu s PS jádrem [online]. [cit 2016-06-16]. Dostupné z: [http://img.archiexpo.com/images\\_ae/photo-g/90136-3401337.jpg](http://img.archiexpo.com/images_ae/photo-g/90136-3401337.jpg)
- [15] Obrázek: Detail voštinového jádra z hliníku [online]. [cit 2016-06-16]. Dostupné z: <http://www.5m.cz/userfiles/image/sendvice/hlinik/honeycomb.jpg>

- [16] ASM HANDBOOK. *Volume 8 – Mechanical Testing and Evaluation*. 10th ed. Materials Park: ASM international, 2000. s. 998. ISBN 0-87170-389-0.
- [17] Obrázek: Podobnost „I“ profilu a vrstveného materiálu [online]. [cit 2016-06-16]. Dostupné z: <http://www.factechology.com/wp-content/uploads/2014/04/ibeam-sandwich.png>
- [18] LOUDA P., ODEHNALOVÁ D.: *Vlastnosti kovů a jejich zkoušení*. Studijní podklady k předmětu nauka o materiálu I. Liberec: KMT TU v Liberci. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_bakalari/NOM1/NOM%20I.htm](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/NOM1/NOM%20I.htm)
- [19] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály – zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 64s. Třídící znak 420310.