



# Zjištění modulu pružnosti pomocí statické zkoušky tahem a tříbodovým ohybem

## Bakalářská práce

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



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel Grof**  
Osobní číslo: **S14000380**  
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojní inženýrství**  
Název tématu: **Zjištění modulu pružnosti pomocí statické zkoušky tahem a třibodovým ohybem**  
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. Přehled konstrukčních materiálů používaných v automobilovém průmyslu. Deformační chování materiálů v oblasti pružných a plastických deformací.
2. Přehled mechanických zkoušek pro stanovení mechanických vlastností materiálu.
3. Experimentální zjištění modulu pružnosti testovaného materiálu pomocí statické zkoušky tahem a zkoušky třibodovým ohybem.
4. Statistické vyhodnocení experimentu, testování hypotéz a doporučení pro další výzkum.
5. Závěr.

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

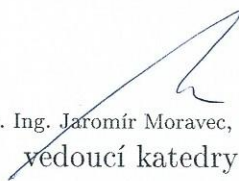
- [1] **ASM HANDBOOK. Volume 8 - Mechanical Testing and Evaluation. 10th ed. Materials Park: ASM International, 2000. s. 998. ISBN 0-87170-389-0.**  
[2] **PÖHLANDT, K. Materials Testing for the Metal Forming Industry. Berlin: Springer-Verlag, 1989. s. 226. ISBN 3-540-50651-9.**  
[3] **MELOUN, M., MILITKÝ, J. Statistické zpracování experimentálních dat. 1. vyd. Praha: PLUS s.r.o., 1994. s. 839. ISBN 80-85297-56-6.**  
[4] **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.**  
[5] **ČSN EN ISO 7438. Kovové materiály - Zkouška ohybem. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005. 12 s. Třídící znak 420401.**

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. listopadu 2016**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **1. dubna 2018**

  
prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan



  
doc. Ing. Jarmír Moravec, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 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 Ing. Jiřímu Sobotkovi, Ph.D. za odborné vedení, pomoc a užitečné rady při zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D. za pomoc při měření. V neposlední řadě děkuji rodině za podporu během celého studia.

## **Abstrakt**

Cílem této bakalářské práce je zjištění modulu pružnosti pomocí statické zkoušky tahem a tříbodovým ohybem. V teoretické části byly popsány materiály používané v automobilovém průmyslu a mechanické zkoušky. V experimentální části bylo provedeno měření dvou materiálů s odlišnými deformačními vlastnostmi. K určení vlivu typu zkoušky na hodnotu modulu pružnosti, bylo provedeno statistické testování hypotéz pomocí Studentova t-testu, který určil, zda mezi oběma metodami měření existují statisticky významné rozdíly.

## **Klíčová slova**

Modul pružnosti, pružná deformace, statická zkouška tahem, zkouška tříbodovým ohybem, Studentův t-test

## **Abstract**

The aim of this bachelor thesis is determination of the Young's modulus by the static tensile test and the three-point bending test. In the theoretical part are described materials that are used in the automotive and mechanical tests. In the experimental part was performed measurement of two materials with different deformation properties. For determination the type of test influence on the Young's modulus magnitude, there was carried out statistical hypothesis testing by means of the Student's t-test that determined if there were statistically significant differences between the used type of test.

## **Key words:**

Young's Modulus, Elastic Deformation, Static Tensile Test, Three-point bending Test, Student's t-test

## Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratek.....	7
1 Úvod.....	8
2 Teoretická část.....	9
2.1 Deformační chování materiálu.....	9
2.1.1 Pružná deformace.....	10
2.1.2 Plastická deformace.....	10
2.2 Mechanické zkoušky materiálů.....	10
2.2.1 Zkouška tahem.....	11
2.2.2 Zkouška ohybem.....	14
2.2.3 Zkouška smykem.....	16
2.3 Materiály používané pro stavbu karoserie.....	17
2.3.1 Ocel.....	18
2.3.2 Lehké kovy.....	20
2.3.3 Hliník.....	20
2.3.4 Hořčíkové slitiny.....	21
3 Experimentální část.....	22
3.1 Zkoušené materiály.....	22
3.2 Příprava vzorků.....	23
3.3 Experimentální měření.....	23
3.3.1 Průběh zkoušky ohybem.....	23
3.3.2 Průběh zkoušky tahem.....	24
3.4 Zpracování výsledků.....	25
3.4.1 Stanovení výsledků modulu pružnosti pomocí zkoušky ohybem.....	25
3.4.2 Stanovení výsledků modulu pružnosti pomocí zkoušky tahem.....	26
3.5 Výsledky zkoušek.....	29
4 Statistické vyhodnocení.....	32
4.1 Výpočet Studentova t-testu pro materiál AW-5182.....	33
4.2 Vyhodnocení výsledků.....	35
5 Závěr.....	36
Seznam použité literatury.....	37

## Seznam použitých symbolů a zkratk

Symbol	Jednotka	Popis
$A_x$	[%]	Tažnost
CGI		Compacted Graphite Iron
CQ		Commercial Quality
DQ		Drawing Quality
DDQ		Deep Drawing Quality
E	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
EDDQ		Extra Deep Drawing Quality
G	[MPa]	Modul pružnosti ve smyku
J	[mm <sup>4</sup> ]	Moment setrvačnosti
k		Směrnice přímky
$\Delta L$	[mm]	Celkové prodloužení
$L_0$	[mm]	Počáteční měřená délka
$L_u$	[mm]	Konečná měřená délka
$M_{omax}$	[N.mm]	Maximální ohybový moment
$n_{1,2}$		Četnost
$p(t)$		Pravděpodobnost testovacího kritéria
$R_m$	[MPa]	Pevnost v ohybu
$R_u$	[MPa]	Mez úměrnosti
$R_p$	[MPa]	Mez pružnosti
$R_{p0,2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu
$R_e$	[MPa]	Mez kluzu
$R_E$	[MPa]	Mez pružnosti
$R_{eH}$	[MPa]	Horní mez kluzu
$R_m$	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
$S_0$	[mm <sup>2</sup> ]	Počáteční plocha průřezu
$S_u$	[mm <sup>2</sup> ]	Plocha průřezu při přetržení
$s_{1,2}$	[MPa]	Výběrová směrodatná odchylka
$t_{(1-\frac{\alpha}{2}; k_{1,2})}$		Testovací kritérium
$t_{krit}$		Kritická hodnota testovacího kritéria
u	[mm]	Vzdálenost podpor
v	[mm/min]	Rychlost zatěžování
$W_0$	[mm <sup>3</sup> ]	Průřezový modul v ohybu
$\bar{x}, \bar{y}$	[MPa]	Výběrová střední hodnota
y	[mm]	Průhyb
Z	[%]	Kontrakce
$\alpha$	[%]	Hladina významnosti
$\varepsilon$	[1]	Poměrné prodloužení
$\sigma$	[MPa]	Normálové napětí
$\sigma_0$	[MPa]	Napětí v ohybu
$\tau$	[MPa]	Napětí ve smyku
$\tau_{DS}$	[MPa]	Dovolené napětí ve smyku
$\tau_{max}$	[MPa]	Maximální napětí ve smyku
$\gamma$	[1]	Zkos



# 1 Úvod

Dnešní doba si žádá velké nároky na materiály, které budou splňovat určitou kvalitu a mechanické vlastnosti. V automobilovém průmyslu se jedná hlavně o snížení váhy automobilu a s tím souvisí i menší spotřeba paliva a snížení emisí. Proto je zapotřebí výzkum nových pevnějších i tvárnějších materiálů a to zejména z hlediska bezpečnosti osob.

Při návrhu strojní součásti využívané v automobilovém průmyslu je zapotřebí určit, k jakému účelu se bude konkrétní součást používat a jaké nároky musí splňovat. Ke zvolení patřičného materiálu, jsou důležité jeho parametry, k nimž patří také modul pružnosti v tahu nebo ohybu  $E$  [MPa]. Pro určování mechanických vlastností se používají zkoušky, které se zabývají charakteristikami materiálů. Do těchto zkoušek lze zahrnout i mechanické zkoušky tahem a ohybem. Tyto zkoušky spočívají v pozorování vlivu vnější síly na daný materiál. Měření pomocí zkoušky tahem se provádí většinou na zkušebních tyčích kruhového nebo plochého tvaru (obr. 1.1). Po vyhodnocení se získané hodnoty z těchto testování dále kvantifikují a normují.

Cílem této bakalářské práce bylo zjištění modulu pružnosti vybraných materiálů a porovnání pro zkoušku tahem a třibodovým ohybem. Následujícím cílem bylo ověření statistických hypotéz o vlivu typu zkoušky na modul pružnosti a zhodnocení, pro jaký materiál je vhodná jedna ze dvou provedených zkoušek a také doporučení výběru zkoušky. Z tohoto důvodu byly v práci uvedeny metody měření modulu pružnosti a vyhodnocení pomocí statistické metody Studentova t-testu. Dále v experimentální části této práce byly představeny materiály, které se testovaly a popsán průběh experimentu.



**Obr. 1.1** Zkušební tyče (zkouška tahem) [1]

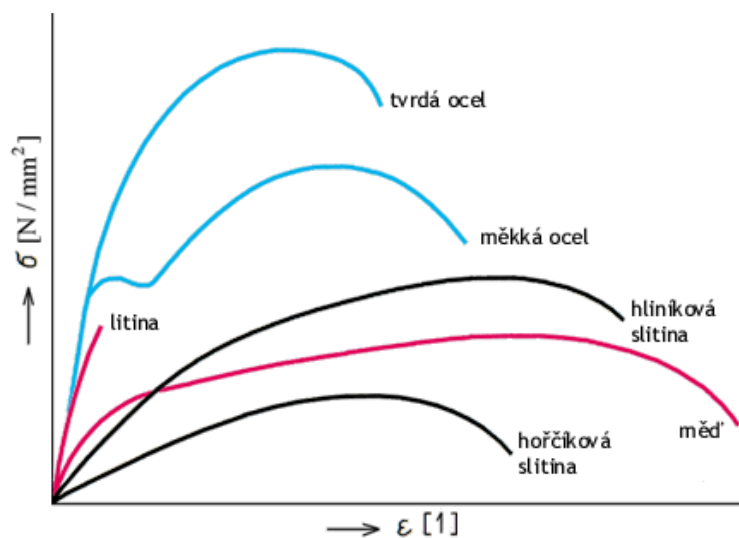
## 2 Teoretická část

Teoretická část práce se zabývá problematikou chování materiálů a popsáním zkoušek mechanických vlastností zejména statickou zkouškou tahem a zkouškou třibodovým ohybem. Dále se zabývá materiály využívané v automobilovém průmyslu.

### 2.1 Deformační chování materiálu

Deformací pevného tělesa rozumíme změnu rozměrů, tvaru nebo objemu způsobenou vnějšími silami. Podle směru působení těchto sil se rozlišuje například deformace v tahu, v tlaku, smyku nebo ohybu.

Deformační křivka ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) pevných látek, kde první fázi se nachází oblast platnosti Hookeova zákona, je normálové napětí přímo úměrné poměrnému prodloužení. Lineární část grafu (obr. 2.1) také přibližně odpovídá elastické deformaci tělesa. Jestliže deformační síly přestanou působit, těleso se vrátí do původního tvaru. Po překročení této meze nastává plastická deformace. Těleso takzvaně „teče“. Poruchy způsobené v krystalové mřížce působícími silami jsou již tak velké, že dochází k posunování celých vrstev materiálu. Délka tělesa se velmi prodlužuje, aniž by bylo nutno působit obrovskými silami. Poté již dochází k přetržení materiálu. [2, 4]



Obr. 2.1 Tahový diagram ocelí a slitin [3]

### **2.1.1 Pružná deformace**

Pružná neboli elastická deformace je dočasná. Když zatěžující síla přestane působit, těleso se vrátí do původního stavu. Největší hodnota normálového napětí, při které je deformace ještě pružná, se nazývá mez pružnosti. Překročí-li normálové napětí tuto hodnotu, zůstává těleso deformováno trvale. [5]

### **2.1.2 Plastická deformace**

Při každém tváření jde zejména o to, udělit příslušnému tělesu trvalou změnu tvaru. Nicméně, pokud má nastat trvalá změna tvaru, je zapotřebí dosáhnout plastické deformace, na jejíž vyvolání je třeba překonat jisté mezní napětí v nejjednodušším případě tzv. mez kluzu. Není-li této podmínky dosaženo, dojde jen k pružné deformaci, po jejímž ukončení se těleso vrátí ke svému původnímu tvaru například ohýbání pružného nože.

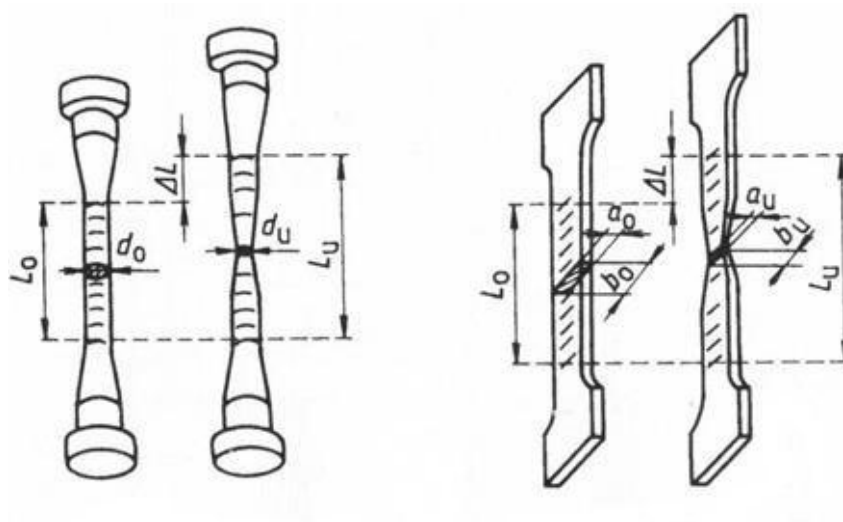
Plastičnost je obecně schopnost materiálu se plasticky deformovat v rozsahu deformací od počátečních po mezní. Počáteční plastičnost vyjadřuje přechod od pružného do plastického stavu, mezní plastičnost odpovídá podmínkám vzniku prvních trhlin. Jedná se o čistě materiálovou vlastnost, jejíž zkoumání by nemělo být ovlivněno tak přízemními faktory, jako je třeba tvar deformovaného tělesa. [4, 5]

## **2.2 Mechanické zkoušky materiálů**

Mechanickými zkouškami se zjišťuje chování materiálu za působení vnějších sil, tzn., že se zkoumají jeho mechanické vlastnosti. Některé mechanické vlastnosti materiálu vyjadřují jeho odpor proti deformaci (např. mez kluzu, mez pevnosti), jiné vyjadřují jeho deformační schopnost (např. tažnost, kontrakce). Materiál schopný velkých deformací před vznikem lomu je tvárný. Materiál, který klade velký odpor proti deformaci je pevný. Pevný a zároveň tvárný materiál je houževnatý, protože k jeho přetvoření je potřeba velké práce. Materiál, u něhož k lomu předchází malé deformace, je křehký. [6, 7]

## 2.2.1 Zkouška tahem

Tahová zkouška představuje jednu z nejdůležitějších zkoušek materiálových vlastností. Jedná se o destruktivní zkoušku, při které se zkušební vzorek nevrátí do původního stavu. Modul pružnosti se nejčastěji zjišťuje touto zkouškou, která je popsána normou ČSN EN ISO 6892-1 pro kovové materiály. Po vyrobení kruhové nebo ploché zkušební tyče (obr. 2.2) se tato tyč nechá zatěžovat silou rostoucí předepsanou rychlostí, při čemž dochází ke změnám vedoucím k roztržení vzorku. Zatěžující síla je vygenerována trhacím strojem a narůstá úměrně s jednoosým tahem. Tato zkouška se aplikuje i na nekovové materiály podle příslušných norem, například pro plasty dle ČSN EN ISO 527-1 nebo pryže dle ČSN ISO 37. [8]



**Obr. 2.2** Zkušební tyč kruhová (vlevo), zkušební tyč plochá (vpravo) [9]

Celkové prodloužení  $\Delta L$  je definováno jako:

$$\Delta L = L_u - L_0 \quad [\text{mm}] \quad (1)$$

kde:

$\Delta L$ - celkové prodloužení [mm],

$L_u$  - délka vzorku po zkoušce [mm],

$L_0$  - původní délka vzorku [mm].

Poměrné prodloužení  $\varepsilon$  je následně vyjádřeno vztahem:

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

kde:

$\varepsilon$  - poměrné prodloužení [1].

Tažnost  $A_x$  je trvalé poměrné prodloužení po přetržení. Vyjadřuje se většinou v procentech jako:

$$A_x = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3)$$

kde:

$A_x$  - tažnost [%].

Index  $x$  charakterizuje zkušební tyčku. Označení  $A_{50}$  u nepoměrných zkušebních tyčí je takto vyjádřena původní délka zkušební tyčky, tedy 50 mm. Označení  $A_5$  nebo  $A_{10}$  se používá pro kruhový průřez, značí poměr mezi původní délkou tyčky a jejím původním průměrem.

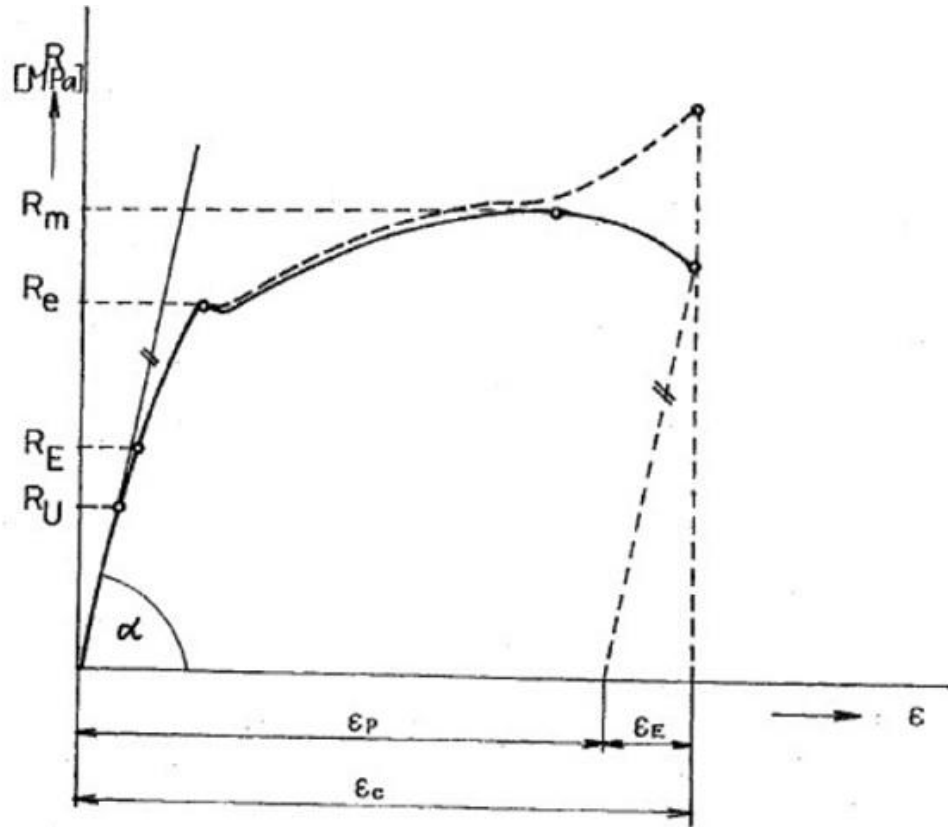
Kontrakce  $Z$  je trvalé poměrné zúžení tyče po přetržení v místě lomu. Vyjadřuje se opět většinou v procentech a je definovaná jako:

$$Z = \frac{S_u - S_0}{S_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4)$$

kde:

$Z$  - kontrakce [%],  
 $S_0$  - průřez zkušební tyče před zkouškou [ $\text{mm}^2$ ],  
 $S_u$  - průřez zkušební tyče po zkoušce [ $\text{mm}^2$ ].

Výsledkem tahové zkoušky je tahový diagram (obr. 2.3). V tomto případě se jedná o smluvní pracovní diagram s výraznou mezí kluzu, který určuje závislost smluvního napětí na poměrné deformaci  $R = f(\epsilon)$ . Ve smluvním tahovém diagramu lze pozorovat vyznačené významné body např. mez kluzu, mez pevnosti atd.



**Obr. 2.3** Tahový diagram s výraznou mezí kluzu,  
smluvní (plně), skutečný (čárkovaně) [8]

**Mez úměrnosti  $R_u$**  – mez úměrnosti má teoretický význam a je definovaná jako napětí, při kterém je deformace zkušebního tělesa přímo úměrná zatížení. Z této definice je zcela zřejmé, že až do tohoto napětí je možné tahový diagram aproximovat přímkou. Tato přímka se v literatuře nazývá Hookeova a je vlastně grafickým vyjádřením Hookeova zákona, který říká že, napětí je přímo úměrné elastické deformaci. Tento zákon lze pojmout i obráceně tak že elastická deformace je přímo úměrná napětí. [4]

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad [\text{MPa}] \quad (5)$$

kde:

$\sigma$  - skutečné napětí v tahu [MPa],

$E$  - modul pružnosti v tahu [MPa],

$\varepsilon$  - poměrné prodloužení [1].

**Mez pružnosti  $R_E$**  – je definovaná jako napětí, při kterém vznikají v materiálu pouze deformace elastické. Problém však je, že takto definované napětí se nedá v technické praxi přesně stanovit. Z těchto důvodů byla zavedena takzvaná smluvní veličina mez pružnosti v tahu  $R_{0,005}$ , která je definovaná jako napětí, které vytvoří trvalou plastickou deformaci  $\varepsilon = 5 \times 10^{-5}$ . Tedy jinými slovy vytvoří trvalé prodloužení vzorku  $\Delta L = 0,005 \%$  na počáteční měřené délce  $L_0$ .

**Mez kluzu  $R_e$**  – je horní mezní napětí, při kterém ve zkoušeném vzorku dochází k prvním plastickým deformacím. Tyč se prodlužuje a napětí zůstává skoro stejné. Napětí se může i snížit z důvodu poklesu schopnosti materiálu odolávat mechanickým napětím. V praxi se určuje smluvní hodnota meze kluzu  $R_{p0,2}$ , která odpovídá hodnotě plastické deformace  $0,2 L_0$  původní délky.

**Mez pevnosti  $R_m$**  – je to maximální hodnota napětí, při níž ještě nedochází k porušení materiálu. U vzorku se začne projevovat značné zúžení průřezu materiálu, kde dojde k vytvoření krčku, po kterém dochází k přetržení vzorku s klesajícím napětím. [4]

## 2.2.2 Zkouška ohybem

Tato zkouška patří mezi zkoušky statické destruktivní a jejím cílem je stanovit maximální průhyb  $y$  daného materiálu. Principem zkoušky je, že zkušební vzorek je položen na podporách a působí na něj ohybová síla (obr. 2.4). Tato síla působí deformaci, která se analyzuje, až po porušení materiálu. Zkouška má význam jak u materiálů křehkých, u kterých dochází k lomu, tak u materiálů tvárných. U tvárných materiálů se používá jako zkouška technologická, která zjišťuje charakteristiky materiálů při ohybu. Speciálními případy této zkoušky jsou vzorky s vruby. Vruby

mohou mít různé tvary a výrazně ovlivňují výsledné hodnoty, protože je narušena celistvost materiálu a změní se průběh napětí v součásti. [10, 11]

Při zkoušce ohybem se vyhodnocují následující veličiny jako pevnost v ohybu, což je napětí, které je dáno vztahem:

$$\sigma_o = \frac{M_{omax}}{W_o} \quad [\text{MPa}] \quad (6)$$

kde:

$\sigma_o$  - napětí v ohybu [MPa],

$M_{omax}$  - maximální ohybový moment [N·mm],

$W_o$  - modul průřezu v ohybu [mm<sup>3</sup>].

Průřezový modul pro kruhový průřez:

$$W_o = \frac{\pi d^3}{32} \quad [\text{mm}^3] \quad (7)$$

Kde:

d - průměr tyče [mm]

Maximální ohybový moment je dán vztahem:

$$M_{omax} = \frac{F}{2} \cdot \frac{u}{2} \quad [\text{N.m}] \quad (8)$$

Kde:

F- síla [N],

u- vzdálenost podpor [mm].

Hodnota průhybu y se spočítá jako:

$$y = \frac{F \cdot u^3}{48 \cdot E \cdot J} \quad [\text{mm}] \quad (9)$$



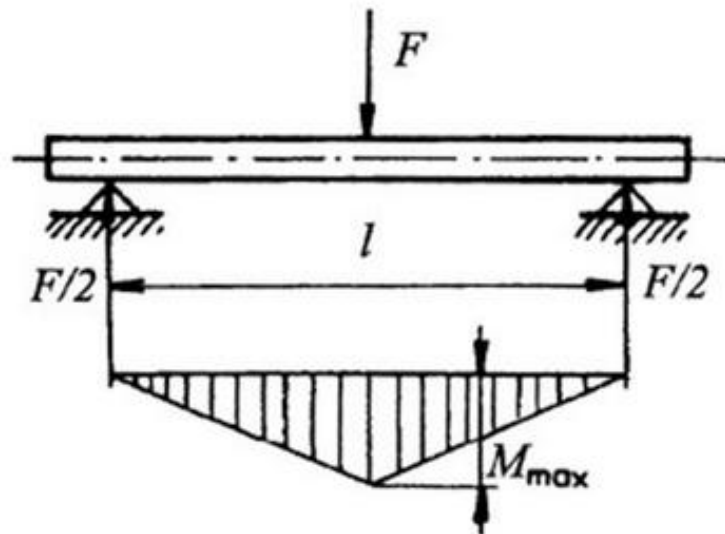
Kde:

$F$  - zatěžující síla [N],

$y$  - průhyb [mm],

$E$  - modul pružnosti v tahu [MPa],

$J$  - moment setrvačnosti průřezu [ $\text{mm}^4$ ].



Obr. 2.4 Třibodový ohyb [11]

### 2.2.3 Zkouška smykem

Namáhání prostým smykem vzniká tehdy, pokud dvě síly stejné velikosti působí opačným směrem v jedné rovině procházející těžištěm průřezu. Ve skutečnosti jsou síly mírně přesazené a tvoří dvojici, která posouvá blízké průřezy tak, že vznikne zkoss. Materiál se brání snaze vnějších sil posunout po sobě obě části vnitřní silou, která se projeví tečným napětím. Síly nemají společnou nositelku a posuv ve směru síly je doprovázen ohybem. Pak se jedná o smyk doprovázený ohybem. Deformace u prostého smyku se zanedbává, protože jsou nepatrné. [11]

Napětí ve smyku se počítá z následujícího vzorce:

$$\tau_{\max} = \frac{F}{S_{\min}} \leq \tau_{DS} \quad [\text{MPa}] \quad (10)$$

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 tzv. o Hookeův zákon pro smyk, který platí do meze úměrnost mezi zkosem a tečným napětím.

$$\tau = G \cdot \gamma \quad [\text{MPa}] \quad (11)$$

kde:

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

### 2.3 Materiály používané pro stavbu karoserie

Karoserie je část vozidla, která slouží k umístění přepravovaných osob nebo nákladu. Karoserie také chrání osoby nebo náklad před vnějšími vlivy. Požadavky na karoserie se netýkají jen její funkčnosti vzhledem k vozidlu, ale týkají se také např. i bezpečnosti provozu. Kromě toho musí konstrukce vozidla jako celek dostatečně snášet podélné, příčné, asymetrické, ohybové a torzní zatížení, bez viditelných projevů. Do kategorie hlavních požadavků patří:

- ochrana osob i nákladu před povětrnostními vlivy,
- estetika vnějšího vzhledu a interiéru,
- snížení následků poranění při srážce s cyklistou či chodcem,
- funkčnost vnějšího tvaru (aerodynamický tvar),
- vysoká pevnost a odolnost proti korozi,

- deformační zóny pro zmenšení následků nehody (zachování prostoru pro přežití posádky),
- zachování stálých klimatických podmínek (topení, klimatizace),
- bezpečný výhled z vozidla,
- redukce vibrací a hluku přenášené do interiéru vozidla.

Hlavní požadavky na vlastnosti použitých materiálů je nízká hmotnost, dostatečná životnost, vhodné deformační chování, vysoká pevnost při zachované tažnosti, korozní odolnost, recyklovatelnost, a dobrá svařitelnost a tvarovatelnost. Materiály ve stavbě karoserií je možno rozdělit do dvou kategorií, na materiály kovové a nekovové. Z kovových materiálů se používá nejčastěji ocel, z lehkých kovů hliník. Z nekovových materiálů se používají zejména plasty. Ze zdravotních důvodů je zakázáno používat zdraví škodlivé materiály jako je např. azbest. Použitý materiál pro výrobu karoserie výrazně ovlivní její hmotnost, případně dle typu použité technologie i cenu. [12, 13,]

### 2.3.1 Ocel

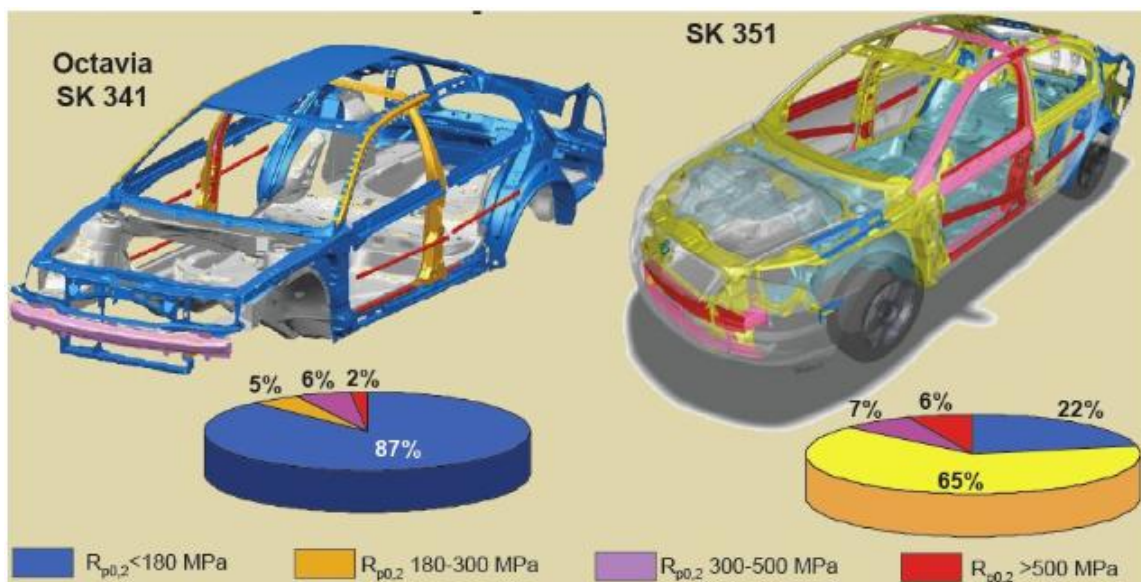
Samonosné karoserie dnešních vozidel jsou z velké části vyráběny z ocelového plechu. Mezi přednosti oceli patří např. vysoká pevnost, dobrá absorpce energie při nárazu, lehká tvarovatelnost i svařitelnost, cenová dostupnost oproti ostatním materiálům. Naopak nevýhodou je větší hmotnost a nízká odolnost proti korozi. V automobilovém průmyslu jsou ve většině případů používány oceli určené pro hluboké tažení a oceli vysokopevnostní (obr. 2.5). Stručný přehled ocelí používaných v automobilovém průmyslu je popsán v následujících kapitolách. [6, 13]

Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem se rozdělují podle kvality na:

- CQ -plechy běžné kvality (Commercial Quality),  $R_{p0,2} = 240-260$
- DQ -tažné plechy (drawing Quality),  $R_{p0,2} = 220-240$
- DDQ -hlubokotažné plechy (Deep Drawing Quality),  $R_{p0,2} = 200-220$
- EDDQ -zvlášť hlubokotažné plechy (Extra Deep Drawing Quality),  $R_{p0,2} = 180-200$
- EDDQ -S-super hlubokotažné (Extra Deep Drawing Quality - Super),  $R_{p0,2} = < 180$

Mezi základní faktory, které nejvíce ovlivňují tvářitelnost plechů patří chemické složení, mikrostruktura, textura materiálu, mechanické vlastnosti, stav zpracování, kvalita, typ povrchu a další.

Nízkouhlíkové hlubokotažné plechy obsahují vedle uhlíku (C) a manganu (Mn) malé množství síry (S), fosforu (P), křemíku (Si) a doprovodné prvky jako chrom (Cr), nikl (Ni) a molybden (Mo). Mezi hlubokotažné oceli, v provedení neuklidněném patří např.: materiály označené jako DC03, DC01. Mezi hlubokotažné ukladněné oceli patří např.: materiál označený jako DC04. Ukladněné oceli obsahují malé množství stabilizujících prvků jako hliník (Al), vanad (V), titan (Ti), niob (Nb) zirkonium (Zr) a bór (B). Na mechanické vlastnosti a tvářitelnost hlubokotažných ocelí má velký vliv charakter mikrostruktury. Základní strukturou je ferit a cementit. Na tváření má největší vliv velikost a tvar feritického zrna a množství, tvar a rozložení cementitu a vměstků. Nejpriznivější stav je takový, při kterém je cementit vyloučen ve formě globulí a je co nejrovnoměrněji rozložen v základní feritické fázi. Nejvýhodnější tvar feritických zrn u hlubokotažných ukladněných ocelí je zploštělý tvar zrna. Nerovnoměrná velikost zrn způsobuje nerovnoměrnou deformaci tvářeného plechu. Velikost feritického zrna udává norma ČSN EN ISO 643. [7]



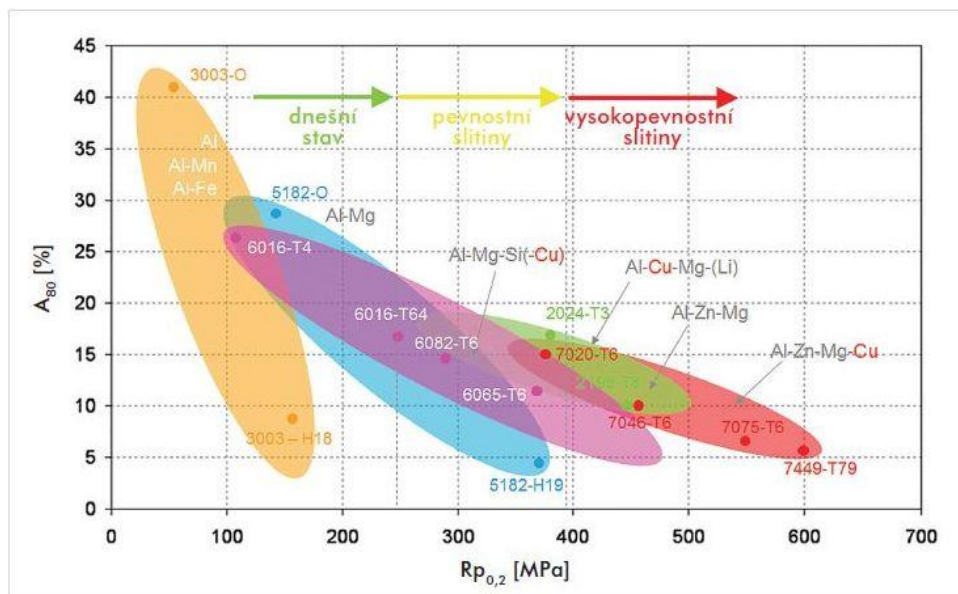
**Obr. 2.5** Složení karoserie auta podle tvářitelnost [13]

### 2.3.2 Lehké kovy

Důvodem použití lehkých kovů při výrobě karoserií je jejich nižší hmotnost oproti ocelovému plechu. Této výhody je často využíváno u sportovních vozidel, kde se často používají hliníkové karoserie. [14]

### 2.3.3 Hliník

Použití hliníku snižuje hmotnost i emisní zatížení vozu. Na úkor ocelových dílů se v konstrukci vozů častěji uplatňují hliníkové materiály i přes vysoké náklady vynaložené na výzkum speciálních materiálů. Ceny hliníku se pohybují v několikanásobně vyšších cenových relacích oproti oceli. Výhodou hliníku oproti oceli je jeho odolnost proti korozi. Nevýhodou použití hliníku je nižší pevnost. Tuto vlastnost lze však zlepšit např. použitím silnějších plechů. Problémem materiálů na bázi hliníku, je vysoká cena hliníku na trhu a není doposud vyřešena ekonomická a i ekologická recyklace. Na trhu jsou výrobci automobilů jako např. automobilka Audi, kteří patří k předním výrobcům hliníkových karoserií nebo jejich komponent. V dnešní době existuje řada firem, které vyrábějí plechy nebo lépe řečeno svitky z běžných či nově vyvinutých hliníkových slitin. Na následujícím obrázku (obr. 2.6) je diagram závislosti meze kluzu na tažnosti, na kterém jsou znázorněny hliníkové slitiny a jejich složení. Použití slitin hliníku je zatím omezeno na viditelné díly luxusních a sportovních automobilů. [4, 14]



**Obr. 2.6** Diagram závislosti meze kluzu na tažnosti pro různé hliníkové slitiny [14]

### 2.3.4 Hořčíkové slitiny

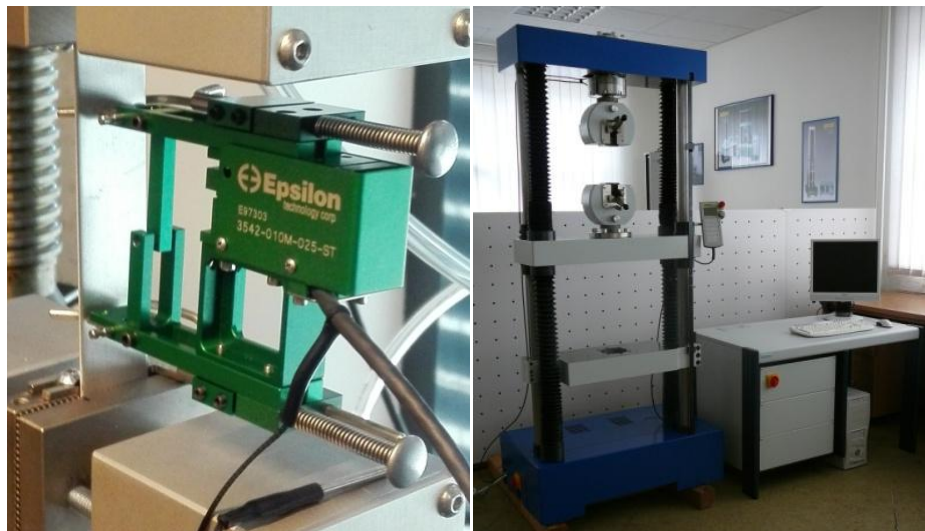
Dlouhou tradici má v automobilovém průmyslu využití hořčíku a jejich slitin. Již v roce 1920 byly využity hořčíkové slitiny v konstrukci sportovních vozů. Čistý hořčík jako prvek má malou pevnost, špatnou tvárnost a anizotropní vlastnosti. Z těchto důvodů se pro konstrukční účely používají téměř výhradně jeho slitiny s dalšími prvky, které výrazně mění vlastnosti tohoto materiálu. Při použití hořčíkových slitin v konstrukci dokáže snížit nejen hmotnost a spotřebu paliva, ale dokáže také ovlivnit i pozici těžiště, respektive posouvá ho směrem do zadní části vozu, čímž ovlivňuje ovladatelnost vozu a jeho manipulaci. Dále redukuje vibrace i celkový hluk generovaný provozem vozidla celkové konstrukce. Hořčíkové slitiny jsou o 35% lehčí než obdobné díly z hliníku. Specifické vlastnosti hořčíku jsou dány šesterečnou krystalovou mřížkou, díky čemuž je jeho tvárnost značně omezená a vyžaduje režim tváření za ohřevu. Materiál zvaný elektron, který obsahuje hořčík s hliníkem, zinkem nebo manganem, po tepelném zpracování dosahuje pevnosti v tahu okolo 225 MPa, meze kluzu 120 MPa a modulu pružnosti v tahu 42 GPa. Hořčík se v konstrukci využívá například na díly dveří a sedadel a také zástrček. Automobilka BMW v novém vozu třetí série používá hořčíková opěradla (obr. 2.7). [6, 15]



**Obr. 2.7** Opěradlo vyvinuté pro BMW-M GmbH. [15]

### 3 Experimentální část

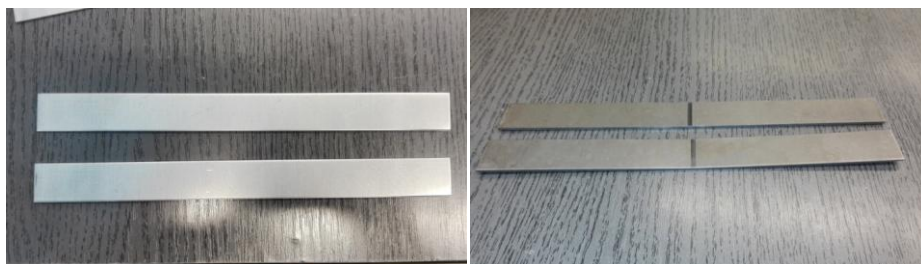
V experimentální části bakalářské práce byla popsána příprava vzorků a samotné měření modulu pružnosti  $E$  [MPa] tahovou i ohybovou zkouškou. Cílem bylo zjistit, jak se liší hodnoty modulu pružnosti při těchto dvou zkouškách. Měření probíhalo v laboratořích katedry strojírenské technologie na univerzálním zkušebním stroji TIRAtest 2300 (obr. 3.1) řízený počítačem. Při zkoušce tahem byl použit průtahoměr Epsilon Tech 3542 (obr. 3.1). Měření bylo prováděno na dvou různých materiálech DOCOL a AW-5182 (AlMg4,5Mn0,4). Každý materiál byl zkoušen na deseti zkušebních vzorcích při zkoušce tahem i ohybem. Výsledky byly vyhodnocovány pomocí lineární aproximace za pomoci programu Microsoft Excel.



Obr. 3.1 Průtahoměr Epsilon Tech 3542 (vlevo) a TIRAtest 2300 (vpravo)

#### 3.1 Zkoušené materiály

K měření u obou zkoušek byly použity dva druhy materiálů (obr. 3.2). Prvním ze zkoušených materiálů byl hliníkový materiál označený AW-5182 (AlMg4,5Mn0,4). Tento materiál je velmi dobře odolný vůči korozi a používá se např. v automobilovém nebo chemickém průmyslu. Hodnota modulu pružnosti v tahu tohoto materiálu dle normy je 70 000 MPa. Druhým testovaným materiálem byla vysokopevnostní ocel DOCOL. Obecně se jedná o moderní vysokopevnostní ocel s vynikající tvářitelností a dobrou svařitelností. Jsou to martenzitické oceli odolné atmosférické korozi, ořezuvzdorné oceli a ocelové plechy s balistickou odolností.



**Obr. 3.2** Materiál AW-5182 (vlevo) a DOCOL (vpravo)

### 3.2 Příprava vzorků

Z tabule plechů byly na strojních tabulových nůžkách vystříženy zkušební tyče obdélníkového průřezu s rozměry pro materiál AW-5182: šířka  $b_0 = 20,15$  mm, tloušťka  $h_0 = 1,5$  mm, délka  $l = 150$  mm DOCOL: šířka  $b_0 = 20,15$  mm, tloušťka  $h_0 = 1,85$  mm, délka  $l = 150$  mm. Všechny tyto vzorky byly vystříženy ve směru válcování ( $0^\circ$ ).

### 3.3 Experimentální měření

Měření pro obě zkoušky probíhalo na univerzálním zařízení TIRAtest 2300, které slouží pro stanovení mechanických vlastností materiálu v ohybu, tahu a tlaku. Pro každé měření bylo použito deset vzorků. Z naměřených dat byl následně vypočítán modul pružnosti  $E$  [MPa].

#### 3.3.1 Průběh zkoušky ohybem

Před zahájením experimentu se nejprve připravily vzorky pro měření, jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole. Pro zkoušku ohybem bylo potřeba deset vzorků od každého materiálu. Dále se zjistily parametry vzorků, které se naměřily digitálním posuvným měřítkem. U vybraných vzorků byla naměřena tloušťka  $h_0$  [mm] a šířka  $b_0$  [mm]. Také se naměřila vzdálenost podpor, která činila  $u = 43,3$  mm. Před položením vzorku na podpory se nastavily v řídicím programu LabNET parametry vzorku pro daný materiál a další údaje pro správné vykonání zkoušky. Mezi tyto parametry patřilo předpětí  $F_0 = 5$  N, rychlost zatěžovací síly  $v = 1$  mm/min a ukončení testu po překročení průhybu pro materiál AW-5182  $y = 1$  mm a DOCOL  $y = 2$  mm. Po umístění zkušebního vzorku na podpěry a sondy měřící průhyb vzorku byla zahájena zkouška (obr. 3.3). Při probíhající zkoušce se výsledky zobrazovaly v pracovním prostředí programu LabNET. Po překročení nastavené deformace se zatěžující pohyblivý váleček vrátil zpět na



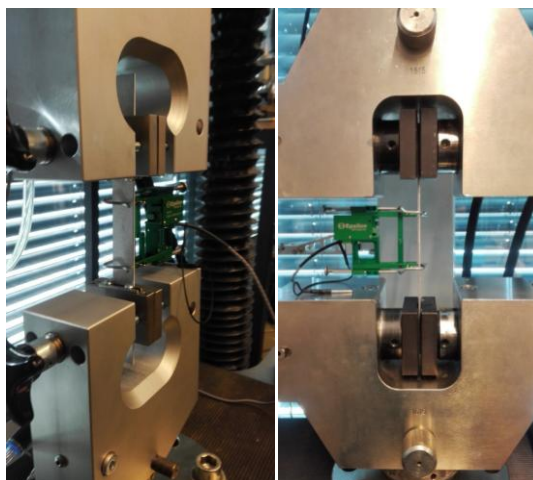
nulovou polohu a po výměně vzorku mohlo dojít k dalšímu měření. Takto měření probíhalo pro všech deset vybraných vzorků daného materiálu.



**Obr. 3.3** Měření vzorku zkouškou ohybem

### 3.3.2 Průběh zkoušky tahem

Měření modulu pružnosti zkouškou tahem proběhlo jako v předchozím případě na stroji TIRAtest 2300. Před samostatným měřením bylo potřeba změřit šířku  $h_0$  [mm] a tloušťku  $b_0$  [mm] vzorků. Tyto údaje byly nastaveny do řídicího softwaru LabNet s dalšími důležitými hodnotami. Zkouška probíhala opět na deseti vzorcích pro daný materiál. Vzorek byl upnut do čelistí trhačího stroje a následně byl připevněn průtahoměr Epsilon Tech 3542 (obr. 3.4). Po odaretování průtahoměru byl spuštěn samotný test. Po celou dobu program vyhodnocoval smluvní napětí  $R$  [MPa] a poměrné prodloužení  $\varepsilon$  [1], ze kterého se vykresloval tzv. smluvní diagram zkoušky tahem. Vzorky nebylo potřeba zatěžovat až do přetrhnutí, protože k našemu vyhodnocení stačilo dosáhnout smluvní meze kluzu  $R_{p0,2}$ .



**Obr 3.4** Detail čelistí s upnutým vzorkem

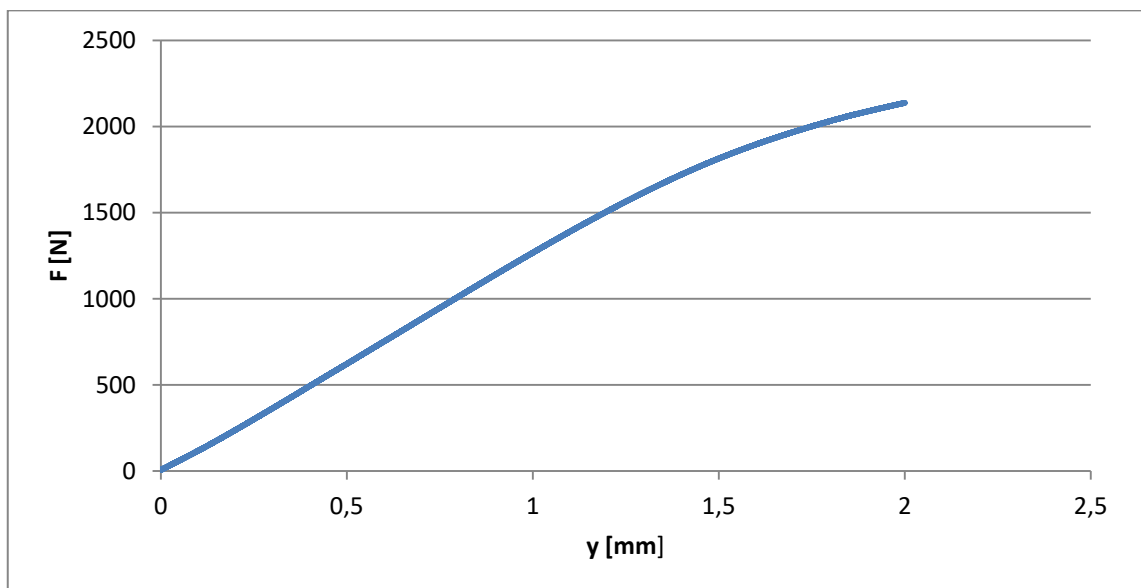
### 3.4 Zpracování výsledků

Výsledné hodnoty pro zkoušky tahem i ohybem byly zpracovány v programu Microsoft Excel. Modul pružnosti se vyhodnocoval pomocí metody nejmenších čtverců, kde byla použita lineární aproximace (proložení přímky množinou bodů v určených intervalech). Intervaly se lišily v rámci vyhodnocování daného materiálu.

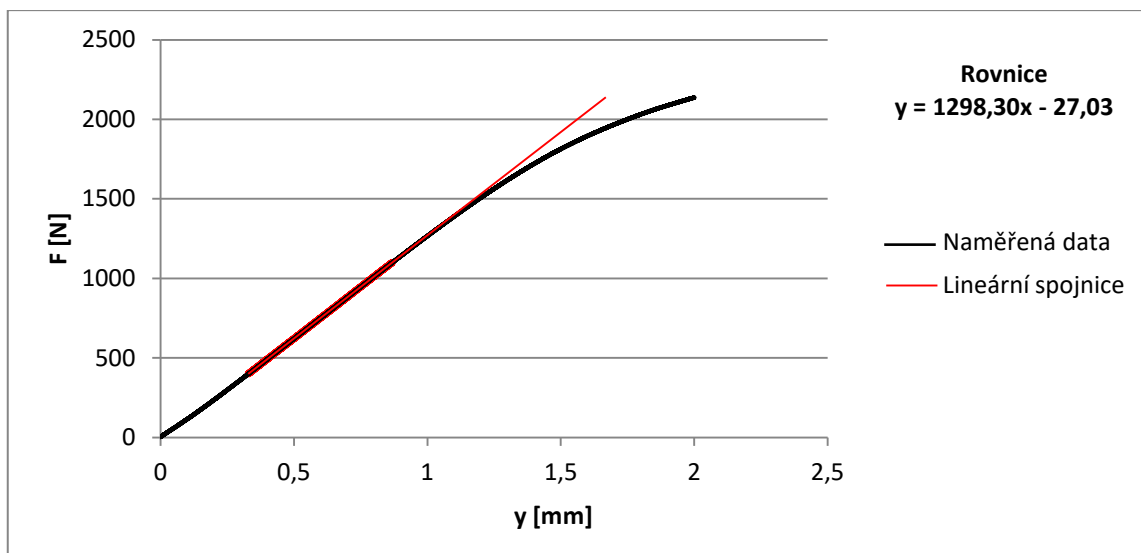
#### 3.4.1 Stanovení výsledků modulu pružnosti pomocí zkoušky ohybem

Ze získaných dat ve formátu Microsoft excel byl vytvořen pomocí tohoto programu graf (F-y). Dále byl vybrán interval pro materiál AW-5182:  $40 \div 120$  N a DOCOL:  $400 \div 1000$  N. Následovala lineární aproximace, ze které se získala rovnice přímky. Směrnice přímky s dalšími hodnotami byly dosazeny do vzorce (12) a toto byl v tomto případě výsledný modul pružnosti.

Na ukázkou stanovení modulu pružnosti byl vybrán vzorek č.4 vysokopevnostního materiálu DOCOL. Ze získaných hodnot zkoušky ohybem následovalo vytvoření grafu 1. Po omezení na interval  $F = 400 \div 1100$  N byla lineární aproximací získána rovnice přímky, která obsahuje směrnici k. (viz graf 2)



**Graf 1** Smluvní diagram vzorku č.4 DOCOL (F-y)



**Graf 2** Lineární část grafu vzorku č.4 DOCOL, rozmezí 400 ÷ 1100 MPa

Modulu pružnosti ze skoušky ohybem se vypočítá vztahem:

$$E = \frac{u^3}{4 \cdot b_0 \cdot h_0^3} \cdot k \quad [\text{MPa}] \quad (12)$$

V tomto případě směrnice přímky k [MPa] byla zjištěna z rovnice přímky a dosazena do rovnice (12). Po dosazení v tomto případě je:

$$E = \frac{43,30^3}{4 \cdot 20,15 \cdot 1,85^3} \cdot 1298,30 \cong \mathbf{206533 \text{ MPa.}}$$

Tento postup byl aplikován u všech měřených vzorků.

### 3.4.2 Stanovení výsledků modulu pružnosti pomocí zkoušky tahem

Z výsledků získaných v souboru Microsoft Excel byla potřeba získat smluvní diagram zkoušky tahem (R-ε). K výpočtu smluvního napětí R byl použit vztah (13):

$$R = \frac{F}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (13)$$

kde: F - síla zatěžující vzorek [N]

$S_0$  – počáteční průřez zkušební vzorku [mm<sup>2</sup>]

$$S_0 = b_0 \cdot h_0 \quad [\text{mm}^2] \quad (14)$$

kde:  $b_0$  - počáteční šířka zkušební vzorku [mm]

$h_0$  - počáteční tloušťka zkušební vzorku [mm]

Pro výpočet poměrného prodloužení  $\varepsilon$  [1] byl použit vztah :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad [1] \quad (15)$$

kde:  $L_0$  - počáteční délka vzorku [mm]

$\Delta L$  - prodloužení vzorku [mm]

Ze získaného grafu bylo potřeba určit modul pružnosti  $E$  [MPa]. Z teorie je známo, že pro pružnou deformaci platí Hookeův zákon, který reprezentuje lineární část grafu. Z tohoto vyplývá, že směrnice lineární části je Youngův modul pružnosti  $E$ . Aby byla získána směrnice přímky je zapotřebí provést lineární aproximaci z důvodů, že tato část se skládá z mnoha přímek spojující hodnoty a jedná se tedy o křivku. Data byla omezena následujícím způsobem pro materiál AW-5182:  $20 \div 100$  MPa a materiál DOCOL:  $100 \div 250$  MPa. Následně byla získána rovnice přímky ve tvaru:

$$y = k \cdot x + q \quad (16)$$

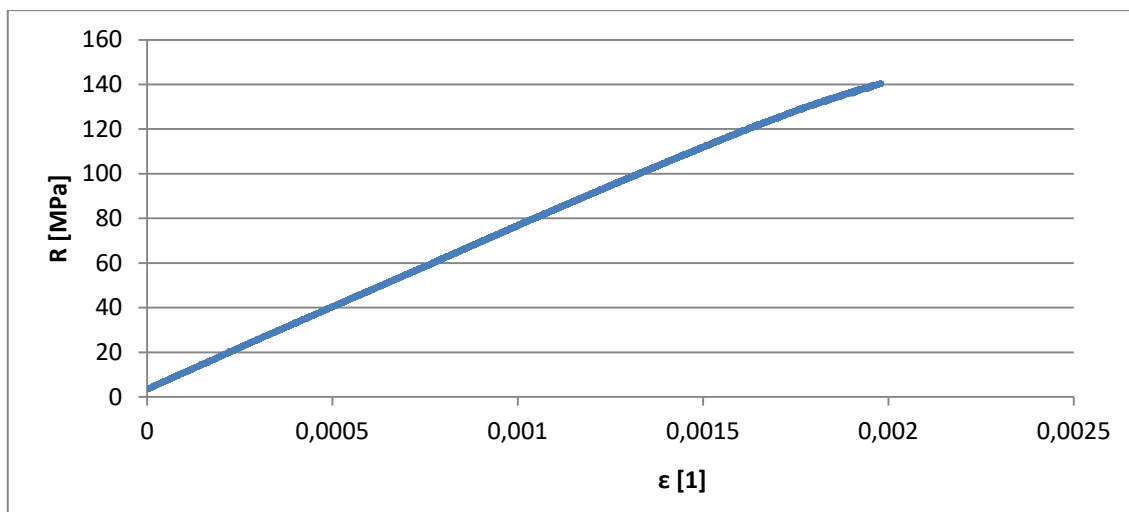
kde:

$k$ - směrnice přímky,

$q$ - koeficient.

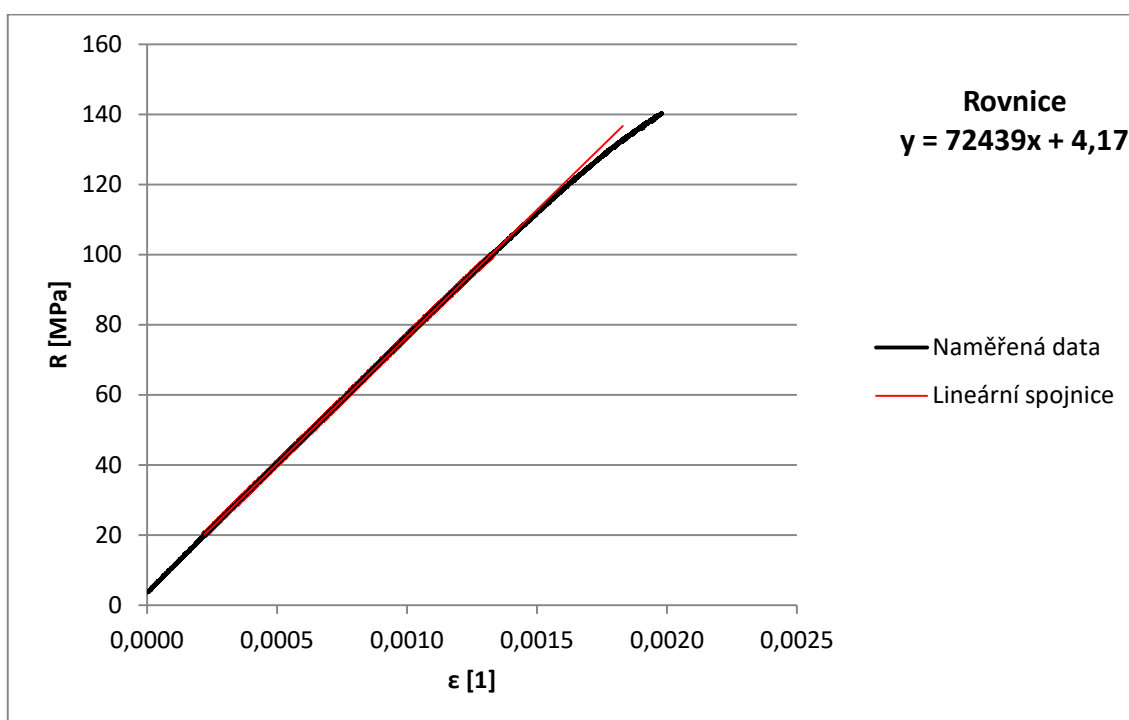
Směrnice  $k$  je v našem případě hledaný modul pružnosti v tahu.

Na ukázkou byl vybrán vzorek č.5 hliníkového materiálu AW-5182. Tento vzorek měl tyto parametry: šířku  $b_0 = 20,15$  mm, tloušťku  $h_0 = 1,5$  mm a délku  $L_0 = 50$  mm. Tyto hodnoty společně se získanými hodnotami zatěžující síly  $F$  [N] a prodloužení  $\Delta L$  [mm] ze softwaru byly dosazeny do vztahu (13), (14) a (15) pro výpočet smluvního napětí  $R$  [MPa] a poměrného prodloužení  $\varepsilon$  [1]. V následujících grafech 3 a 4 vytvořených v programu Microsoft excel jsou zaznamenány výsledná data této zkoušky.



**Graf 3** Smluvní diagram vzorku č.5 (R-ε)

Následovalo omezení grafu na hodnoty smluvního napětí  $R = 20 \div 100$  MPa a byla provedena lineární aproximace (viz graf 4).



**Graf 4** Lineární část grafu vzorku č.5, rozmezí 20 ÷ 100 MPa

Software po aproximaci vyhodnotil rovnici přímky. Směrnice přímky určuje velikost modulu pružnosti v tahu, který v tomto případě je  $E = 72439$  MPa. Tento postup byl proveden pro všechny vzorky obou materiálů.

### 3.5 Výsledky zkoušek

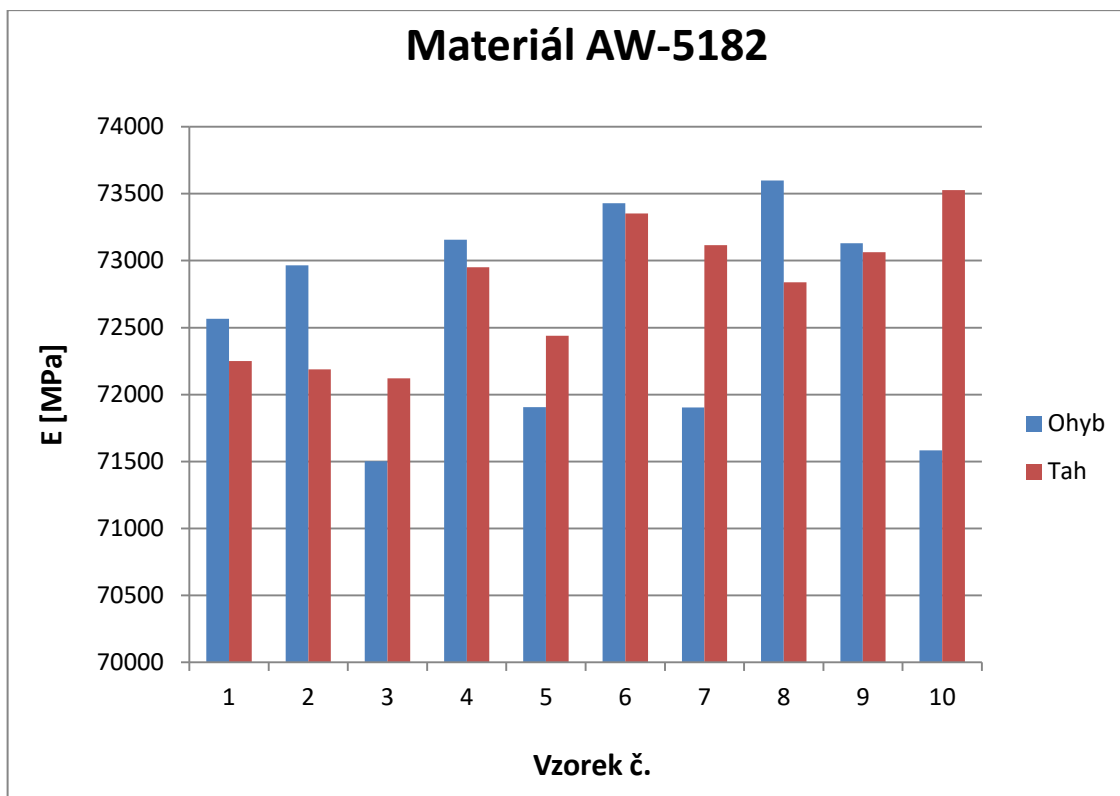
V následujících tabulkách (viz tab. 1 a 2), jsou zobrazeny výsledné hodnoty modulu pružnosti E [MPa] provedené zkouškou tahem a ohybem. Z těchto tabulek následovalo vykreslení grafů (viz grafy 5 a 6), které porovnávají velikosti modulů pružnosti E [MPa] s typem zkoušky na jednotlivých vzorcích. Průměr výsledných hodnot modulu pružnosti pro daný materiál s výběrovou směrodatnou odchylkou, byly porovnány mezi provedenými zkouškami (viz grafy 7 a 8).

**Tab. 1** AW-5182 výsledné hodnoty modulu pružnosti

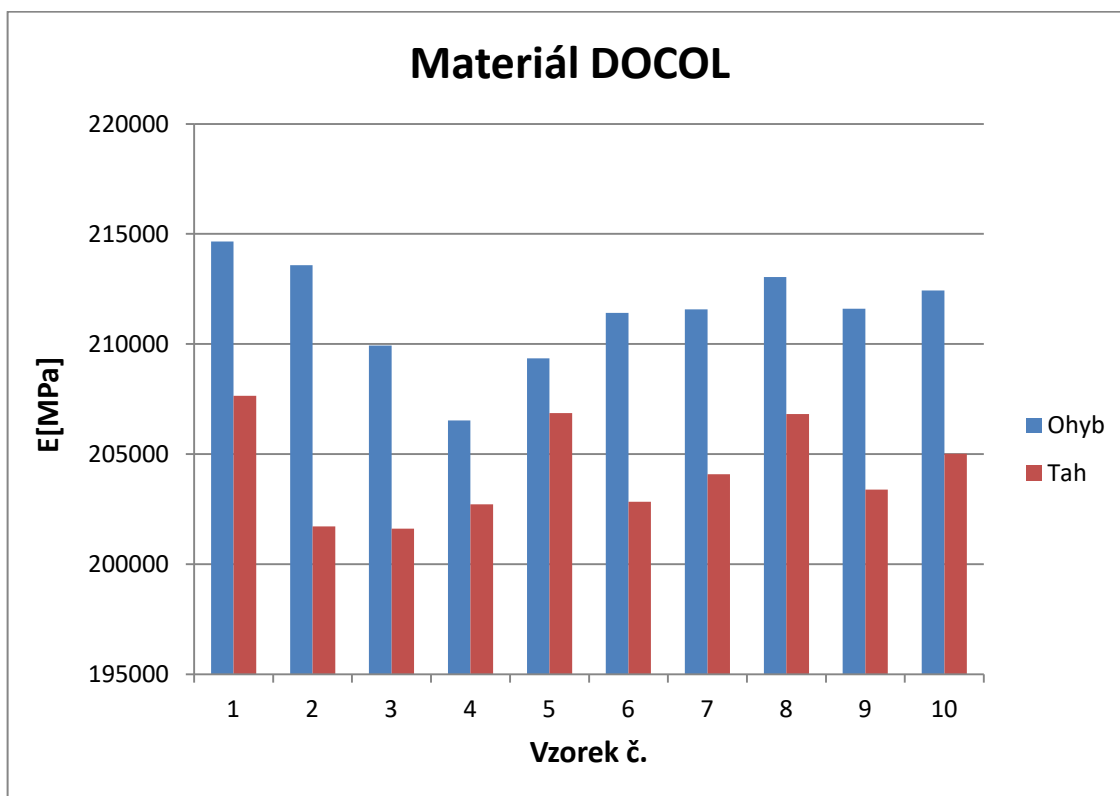
AW-5182 (0°)		
Vzorek č.	Ohyb E [MPa]	Tah E [MPa]
1	72565	72250
2	72965	72188
3	71503	72122
4	73156	72951
5	71906	72439
6	73428	73352
7	71903	73116
8	73598	72838
9	73129	73063
10	71583	73528

**Tab. 2** DOCOL výsledné hodnoty modulu pružnosti

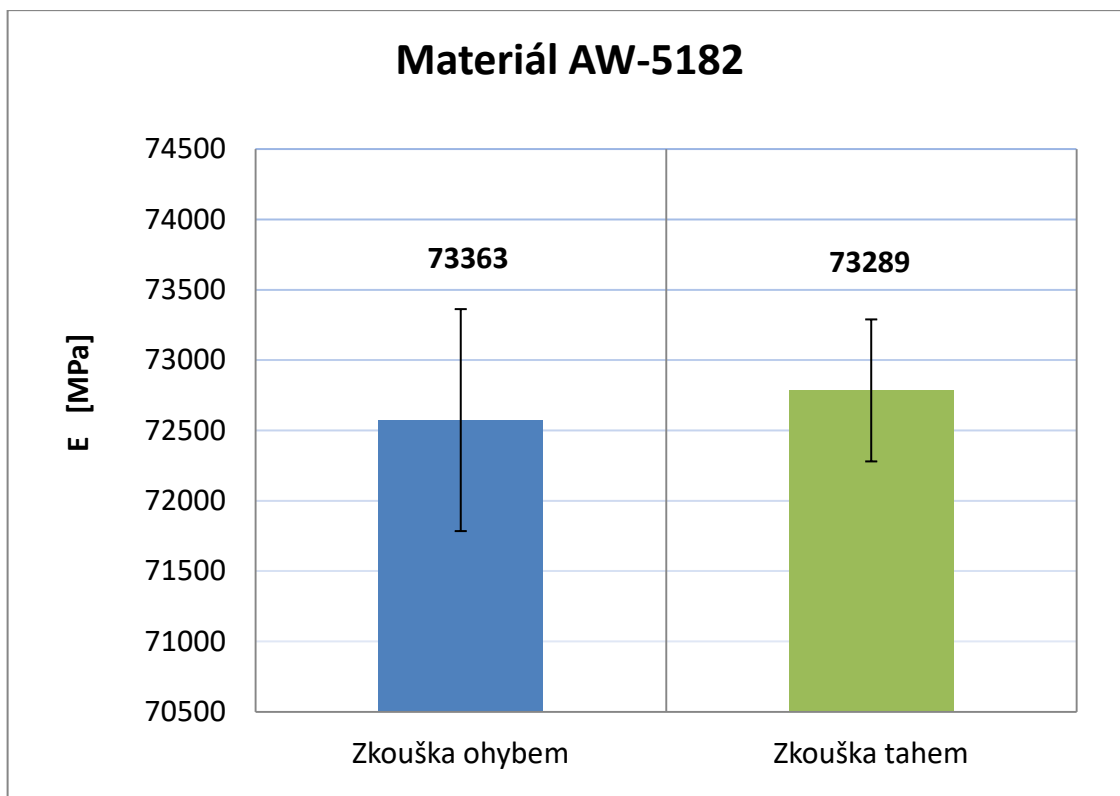
DOCOL (0°)		
Vzorek č.	Ohyb E [MPa]	Tah E [MPa]
1	214662	207651
2	213580	201708
3	209937	201616
4	206533	202716
5	209348	206865
6	211416	202831
7	211575	204080
8	213038	206815
9	211607	203381
10	212434	205017



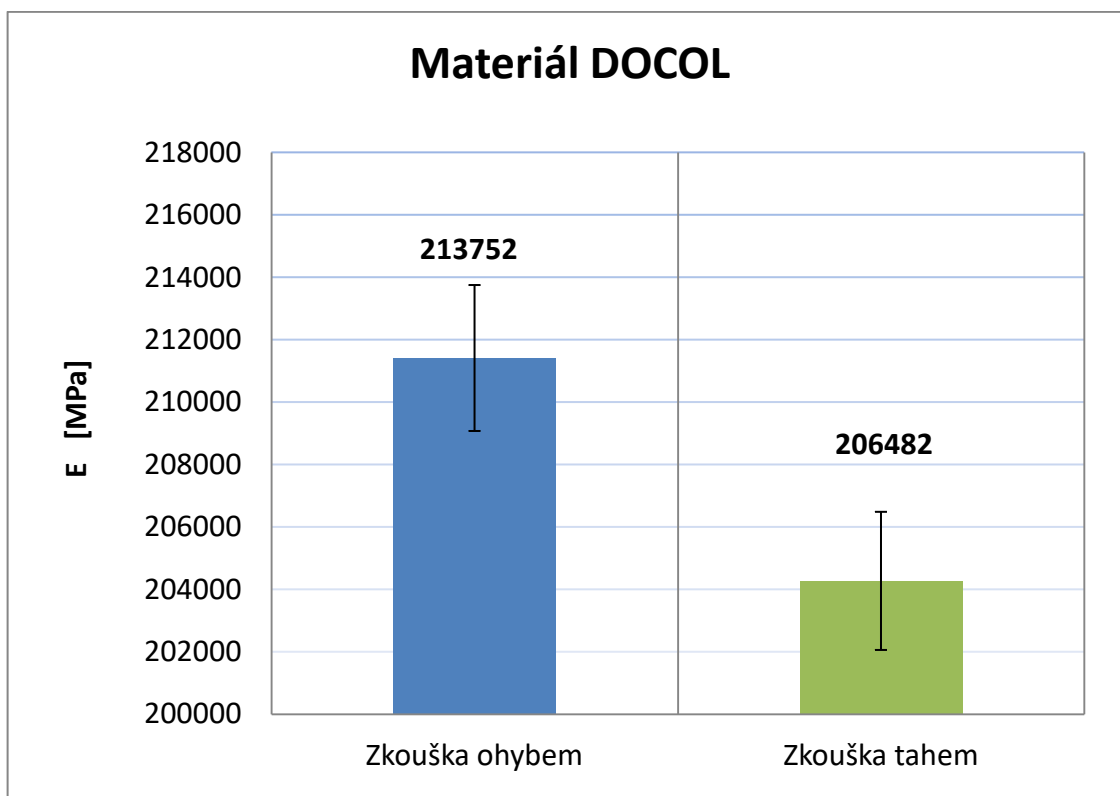
**Graf 5** AW-5182: porovnání modulů pružnosti vzorků ohyb-tah



**Graf 6** DOCOL: porovnání modulů pružnosti vzorků ohyb-tah



**Graf 7** AW-5182: porovnání modulu pružnosti z obou provedených zkoušek



**Graf 8** DOCOL: porovnání modulu pružnosti z obou provedených zkoušek



## 4 Statistické vyhodnocení

Ke zjištění, že mezi výsledky statické zkoušky tahem a zkoušky tříbodovým ohybem je či není statisticky významný rozdíl, byl aplikován Studentův t-test. Tento test je parametrický a pro tento účel se použil dvou výběrový (nepárový) t-test, který slouží k porovnání střední hodnoty jedné skupiny se střední hodnotou jiné skupiny. Studentův t-test vyžaduje podmínku přibližné homogenity rozptylu hodnot v obou skupinách, proto nejprve byl proveden Fisherův test (F-test). F-Test testuje hypotézu o rovnosti rozptylů obou souborů a proto je nezbytnou součástí t-testu. V tabulce 3 jsou zobrazeny výsledné a statistické hodnoty modulu pružnosti. [16]

**Tab. 3** Naměřené hodnoty s průměry a výběrovými směrodatnými odchylkami

AW-5182 (0°)			DOCOL (0°)		
Vzorek č.	Ohyb E [MPa]	Tah E [MPa]	Vzorek č.	Ohyb E [MPa]	Tah E [MPa]
1	72565	72250	1	214662	207651
2	72965	72188	2	213580	201708
3	71503	72122	3	209937	201616
4	73156	72951	4	206533	202716
5	71906	72439	5	209348	206865
6	73428	73352	6	211416	202831
7	71903	73116	7	211575	204080
8	73598	72838	8	213038	206815
9	73129	73063	9	211607	203381
10	71583	73528	10	212434	205017
Průměr $\bar{x}$	72573,6	72784,7	Průměr $\bar{x}$	211413,0	204268,0
Výb. směrodatná odchylka s	789,1	504,7	Výb. směrodatná odchylka s	2339,4	2214,1

## 4.1 Výpočet Studentova t-testu pro materiál AW-5182

Pro splnění podmínky přibližné homogenity musí být nejdříve proveden Fisherův test, který testuje rovnost rozptylů obou souborů.

Vzorec pro výpočet testovacího kritéria F v F-testu:

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2} = \frac{\sum(x_{1i} - \bar{x}_1)^2}{\sum(x_{2j} - \bar{x}_2)^2} \cdot \frac{n_2 - 1}{n_1 - 1} \quad (17)$$

kde:

$n_{1,2}$ - četnosti v obou skupinách,

$s_{1,2}^2$ - rozptyly v obou skupinách,

$x_{1i}$ - jednotlivé hodnoty v první skupině,

$x_{2j}$ - jednotlivé hodnoty v druhé skupině,

$\bar{x}_{1,2}$ - aritmetické průměry v obou skupinách.

Stanovení statistických hypotéz pro F-test:

$H_0$  Rozptyl výsledků ve skupině 1 a 2 je stejně velký.

$H_A$  Rozptyly výsledků v obou skupinách jsou rozdílné.

- zvolená hladina významnosti:  $\alpha = 0,05$

Po dosazení daných do vzorce (17) bylo spočteno:

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2} = \frac{622678,8}{254722,1} = 2,445$$

Kritická hodnota pro hladinu významnosti  $\alpha = 0,05$  v tabulkách  $F_{(0,05;9;9)} = 3,179$

$$\mathbf{F \leq F_{\text{Krit}} \quad 2,445 \leq 3,179}$$

**=> přijata hypotéza  $H_0$ .**

Z hlediska F-testu na hladině významnosti 0,05 nebyly mezi rozptyly v obou skupinách statisticky významné rozdíly a bylo tedy možné následně použít Studentův t-test k hodnocení rozdílnosti aritmetických průměrů.

**Studentův t-test** určil, zda mezi oběma metodami existují statisticky významné rozdíly z hlediska aritmetických průměrů. Pro testování rozdílu středních hodnot byl použit nepárový t-test pro shodné rozptyly.

Stanovení příslušné hypotézy:

$H_0$ - mezi průměrnými hodnotami dosaženým zkouškou ohybem a průměrným hodnotami dosaženým zkouškou tahem není statisticky významný rozdíl.

$H_a$  -mezi dosaženými průměry hodnot ve zkouškách je statisticky významný rozdíl.

- zvolená hladina významnosti:  $\alpha = 0,05$

Testovací kritérium t pro  $n_1 = n_2 = n$  se vypočítá jako:

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{s_1^2 + s_2^2}{n}}} \quad (18)$$

kde:  $n = (n_{1,2} - 1) \cdot 2$

$n$  - četnosti v obou skupinách,

$s$  - výběrová směrodatná odchylka,

$\bar{x}_{1,2}$  - aritmetické průměry v obou skupinách

Rozptyl výběrového souboru se vypočítá vzorcem:

$$s^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (19)$$

Po dosazení do vzorce (18)

$$t = \frac{|72573,6 - 72784,7|}{\sqrt{\frac{622678,8 + 254722,1}{18}}} = 0,956$$

V tabulkách nalezneme kritickou hodnotu  $t_{\text{Krit}(0,05;9)} = 2,262$ . Toto číslo je větší, než Studentovo testovací kritérium  $t = 0,956$ .

$$t \leq t_{\text{Krit}(0,05;9)}$$

Podle studentova t-testu je statisticky nevýznamný rozdíl mezi metodami na hladině významnosti 0,05.

**P-hodnota** (pravděpodobnost nulové hypotézy) byla rovna **0,485** a tedy vyšší než zvolená hladina významnosti 0,05. Což dokazuje přijetí hypotézy  $H_0$ .

Tímto způsobem byl proveden i výpočet pro materiál DOCOL, jeho výsledky jsou zobrazeny v následující kapitole (viz tab. 4).

## 4.2 Vyhodnocení výsledků

Po statistickém výpočtu obou zkoušených materiálů, výsledky (viz tab. 4) vypovídají tomu, že provedené zkoušky mají vliv na výsledné hodnoty materiálu DOCOL. To znamená, že u tohoto materiálu byl prokázán statisticky významný rozdíl. Naopak u materiálu AW-5182 (AlMg4,5Mn0,4) tento statistický rozdíl byl nevýznamný. Po získání těchto výsledků lze doporučit, že testovaný materiál DOCOL je patrně zapotřebí testovat přesnějšími metodami, než je metoda zkoušky tříbodovým ohybem.

**Tab. 4** Výsledné hodnoty Studentova t-testu

Výsledky t-test		AW-5182	DOCOL
Testovací kritérium (F-test)	F	2,445	1,116
Kritická hodnota testovacího kritéria (F-test)	$F_{\text{Krit}}$	3,179	
Pravděpodobnost hypotézy (F-test)	p(f)	0,199	0,872
Testovací kritérium (Studentův t-test)	t	0,956	7,019
Kritická hodnota testovacího kritéria (Studentův t-test)	$t_{\text{Krit}}$	2,262	
Pravděpodobnost hypotézy (Studentův t-test)	p(t)	0,485	$1,5 \times 10^{-6}$
Vliv typu zkoušky na výsledné hodnoty modulu pružnosti		NE	ANO

## 5 Závěr

Předmětem této bakalářské práce bylo zjištění modulu pružnosti  $E$  [MPa] pomocí zkoušky tahem a tříbodovým ohybem a také zjištění, zda mezi výsledky těchto zkoušek je či není statisticky významný rozdíl.

Teoretická část práce se zabírala teorií materiálů používané zejména v automobilovém průmyslu a mechanických zkoušek a to převážně zkoušky tahem a tříbodovým ohybem.

Praktická část této práce se věnovala samotnému měření a popsání postupu, při kterém byly použity dva různé materiály. Konkrétně se jednalo o hliníkový materiál AW-5182 (AlMg4,5Mn0,4) a vysokopevnostní materiál DOCOL. Z výsledných dat byly získány diagramy, ze kterých byl následnou lineární aproximací získán modul pružnosti  $E$  [MPa]. Po získání modulů pružnosti z obou zkoušek bylo zapotřebí vyhodnotit vliv použité zkoušky na velikost modulu pružnosti pro daný materiál. K tomuto vyhodnocení bylo použito statistické vyhodnocení pomocí Studentova t-testu. Zjištěné výsledky tohoto testu jsou zobrazeny v tabulce 5.

**Tab. 5** Výsledky testovaných hypotéz

Materiál	E [MPa]				P(t)	Vliv typu zkoušky na výsledné hodnoty
	Ohyb		Tah			
	$\bar{x}$	$s$	$\bar{x}$	$s$		
AW-5182	72573,6	789,1	72784,7	504,7	0,485	NE
DOCOL	211413,0	2339,4	204268,0	2214,1	$1,5 \times 10^{-6}$	ANO

Studentův t-test prokázal skutečnost, že na výsledný modul pružnosti materiálu AW-5182 (AlMg4,5Mn0,4) nemá vliv typ použité zkoušky a proto není zapotřebí drahých měřících zařízení. Naopak u druhého zkoušeného materiálu DOCOL bylo prokázáno, že typ použité zkoušky má statisticky významný vliv na výsledný modul pružnosti a to poměrně výrazně. V tomto případě je zapotřebí přesnějších měřidel. Jedná se však pouze o jedno měření a k potvrzení těchto závěrů by bylo potřeba vyzkoušet více materiálů. Vzhledem k získaným hodnotám, pro materiál DOCOL lze doporučit, že k přesnějšímu výsledku modulu pružnosti je zapotřebí použít přesnější metodu měření, která v tomto případě je statická zkouška tahem.

## Seznam použité literatury

- [1] Obrázek: *Tensile testing samples* [online]. [cit 2017-05-18]. Dostupné z: <https://www.imrtest.com/mechanical-testing>.
- [2] *Deformační křivka pevných látek* [online]. [cit 2017-05-26]. Dostupné z: <http://fyzweb.cuni.cz/knihovna/deformace/index.htm>.
- [3] Obrázek: *Tahový diagram ocelí a slitin* [online]. [cit 2017-05-26]. Dostupné z: [http://uvp3d.cz/drtic/?page\\_id=2076](http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=2076)
- [4] PÓHLANDT, K. *Materials Testing for the Metal Forming Industry*. Berlin: Springer-Verlag, 1989. s. 226. ISBN 3-540-50651-9.
- [5] Ivo Schindler, Petr Kawulok, *Deformační chování materiálů 2013* Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Dostupné z: <https://www.fmmi.vsb.cz>
- [6] ASM HANDBOOK. Volume 8 - *Mechanical Testing and Evaluation*. 10th ed. Materials Park: ASM International, 2000. s. 998. ISBN 0-87170-389-0.
- [7] AMBROŽ, Oldřich, Milan HORÁČEK a Zdeněk MACHÁČEK. *Technologie slévání, tváření a spojování: Laboratorní cvičení. 1. vyd.* Brno: VUT Brno, 1989, 92 s. ISBN 80-214-0043-9.
- [8] 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.
- [9] Obrázek: *Druhy zkušebních tyčí do trhačích stroje* [online]. [cit 2017-06-10] Dostupné z: [http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06a\\_pruznost\\_pevnost.php](http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06a_pruznost_pevnost.php)
- [10] ČSN EN ISO 7438. *Kovové materiály - Zkouška ohybem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005. 12 s. Třídící znak 420401.
- [11] 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)
- [12] Pavel Němeček.: *Karoserie a rámy motorových vozidel*. TU v Liberci – Fakulta strojní – Katedra vozidel a motorů [online]. [cit 2017-06-10]. Dostupné z: <http://old.kvm.tul.cz/katedra/ped/KDS2/KDS%20II%20-%20I.pdf>
- [13] 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)

- [14] Doc. Ing. Jan Šanovec, CSc., Ing. Tomáš Pilvousek, IWE. *Lehké konstrukce karoserií osobních automobilů. Průmyslové spektrum*, 2016 [online]. [cit 2017-06-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lehke-konstrukce-osobnich-automobilu-pouziti-hliniku.html>
- [15] Doc. Ing. Jan Šanovec, CSc., Ing. Tomáš Pilvousek, IWE *Lehké konstrukce automobilů – využití hořčíku. Průmyslové spektrum* 2016[online].[cit 2017-06-12] Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lehke-konstrukce-automobilu-vyuziti-horciku.html>
- [16] MELOUN, M., MILITKÝ, J. *Statistické zpracování experimentálních dat*. 1. vyd. Praha: PLUS s.r.o., 1994. s. 839. ISBN 80-85297-56-6.