

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ  
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VYUŽITÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN V HOROLEZECTVÍ

APPLICATION OF ALUMINIUM ALLOYS IN MOUNTAINEERING

AUTOR: Matěj Jakubec  
STUDIJNÍ PROGRAM: TZSI  
VEDOUCÍ PRÁCE: Doc. Ing. Jana Sobotová, Ph.D.

PRAHA 2019

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jakubec** Jméno: **Matěj** Osobní číslo: **465362**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Využití hliníkových slitin v horolezectví**

Název bakalářské práce anglicky:

**The use of aluminum alloys in mountaineering**

Pokyny pro vypracování:

1. Literární rešerše
2. Experimentální část
  - a. Měření tvrdosti
  - b. Zkouška tahem
3. Zhodnocení výsledků, závěry, sepsání BP

Seznam doporučené literatury:

- [1] PTÁČEK, L. Nauka o materiálu II. Brno: CERM, c1999. ISBN 80-720-4130-4.
- [2] SOBOTOVÁ, J. Nauka o materiálu I. a II.: cvičení. Dotisk 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [3] ŠVEC, Pavol. Konštrukčné materiály. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2010. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3386-1.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

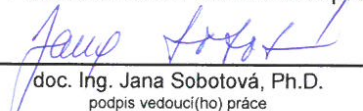
**doc. Ing. Jana Sobotová, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS**


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

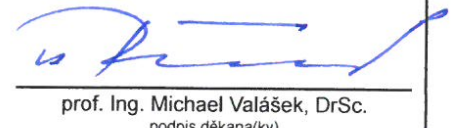
Datum zadání bakalářské práce: **01.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

  
doc. Ing. Jana Sobotová, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

  
prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

18.4.2019  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne: .....

.....Podpis

## Anotace

Bakalářská práce se zabývá aplikací hliníkových slitin v horolezectví, shromažďuje poznatky z více jak 30 odborných publikací, článků a výsledků praktické části.

Samotná práce je rozdělena do dvou částí, teoretické a praktické. Teoretická část specifikuje konkrétní typ horolezeckého vybavení, friend. Dále popisuje výrobu hliníku, rozdělení slitin hliníku, mechanismy zlepšující užité vlastnosti a technologie zpracování těchto slitin. Praktická část hodnotí rozdíly mezi dvěma friendy, které jsou vyrobeny rozdílnou technologií. Jsou sledovány mechanické vlastnosti a chemické složení.

Na základě výsledků praktické části jsou popsány možné pohledy na optimalizace friendu a doporučení pro výrobu.

## Klíčová slova

Friend, hliníkové slitiny, aplikace materiálů v horolezectví, tváření hliníkových slitin, zápusťkové kování, chemické složení, zkouška tahem, tvrdost

## Annotation

Bachelor thesis deals with the application of aluminium alloys in mountaineering. It collects data from more than 30 technical publications, articles and results of experimental part.

The work itself is divided into two parts, theoretical and experimental. The theoretical part is focused on description of specific mountaineering equipment named friend. The thesis describes aluminium production, division of aluminium alloys, mechanisms that improve utility properties and technological processing of these alloys. The experimental part judges contrasts of two friends. It's observed its mechanical properties and chemical composition.

There are described mechanisms of friend optimization and recommendations based on results of experimental part.

## Keywords

Friend, aluminium alloys, climbing materials application, forming processes of aluminium alloys, swaging, chemical composition, tensile test, hardness

## Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Doc. Ing. Janě Sobotové, Ph.D. za její odborné vedení, cenné informace a přísnou korekci. Děkuji i všem pracovníkům Ústavu materiálového inženýrství FS ČVUT za jejich odbornou pomoc při experimentální části.

# OBSAH

POUŽITÉ ZKRATKY A SYMBOLY	9
1. Úvod	12
2. Teoretická část	13
2.1. Friend	13
2.1.2. Norma EN 12276	14
2.2. Materiály vhodné pro výrobu segmentů	16
2.2.1. Výroba hliníku	16
2.2.2. Vlastnosti hliníku	17
2.3. Hliníkové slitiny	18
2.3.1. Základní význam prvků v Al slitinách	18
2.3.2. Mechanizmy podporující fyzikálně-metalurgické vlastnosti	18
2.3.2.1. Substituční zpevnění	18
2.3.2.2. Precipitační zpevnění	19
2.4. Rozdělení slitin hliníku	22
2.4.1. Tvářené slitiny hliníku podle ČSN 573-1-3	22
2.4.1.1. Slitiny Al-Cu-Mg (série 2000)	23
2.4.1.2. Slitiny Al-Mg-Si (série 6000)	24
2.4.1.3. Al-Zn-Mg-(Cu) (série 7000)	24
2.5. Hliníkové slitiny vhodné pro zápustkové kování	25
2.5.1. Zápustkové kování	25
2.5.2. Faktory ovlivňující tvářitelnost	26
2.5.3. Materiály vhodné pro zápustkové kování	27
2.6. Povrchová úprava	29
3. Experimentální část	30
3.1. Zkušební tělesa	30
3.2. Chemická analýza	31
3.3. Zkouška tvrdosti	33
3.4. Zkouška tahem	34
4. Výsledky a jejich diskuze	36
4.1. Vyhodnocení chemické analýzy	36
4.2. Vyhodnocení zkoušky tvrdosti	39

4.3. Vyhodnocení zkoušky tahem	40
5. Optimalizace friendů	42
5.1. Optimalizace spoje	43
5.2. Optimalizace hmotnosti	44
5.3. Shrnutí poznatků a doporučení pro výrobu	45
6. Závěr	46
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	47



## POUŽITÉ ZKRATKY A SYMBOLY

Symbol	Veličina	Jednotka
$R_a$	Drsnost (průměrná aritmetická úchylka profilu)	$\mu\text{m}$
$R_{max}$	Drsnost (maximální úchylka profilu)	$\mu\text{m}$
$R_0$	Frikční napětí (materiálová konstanta)	MPa
$R$	Smluvní napětí	MPa
$R_m$	Mez pevnosti	MPa
$R_e$	Mez kluzu	MPa
$R_{eH}$	Horní mez kluzu	MPa
$R_{eL}$	Dolní mez kluzu	MPa
$R_{p\ 0,2}$	Smluvní mez kluzu	MPa
$E$	Youngův modul pružnosti	MPa
$F$	Zatěžující síla	N
$F_{max}$	Maximální zatěžovací síla	N
$A$	Tažnost	%
$Z$	Kontrakce	%
$S_0$	Plocha počátečního průřezu	$\text{mm}^2$
$S_u$	Plocha průřezu po přetržení	$\text{mm}^2$

$\Delta l$	Absolutní prodloužení	mm
D	Průměr kuličky (HBW)	mm
d	Průměr vtisku (HBW)	mm
d	Střední velikost zrna	mm
$l_0$	Počáteční délka zkušebního materiálu	mm
$l_u$	Délka zkušebního materiálu po zkoušce tahem	mm
k	Materiálová konstanta (Hall-petchův vztah)	$N \cdot mm^{-3/2}$
$\varepsilon$	Poměrné prodloužení	
HBW	Tvrdost dle Brinella	
$\mu$	Koeficient tření	
Al	Hliník	
Fe	Železo	
Ni	Nikl	
Mg	Hořčík	
Mn	Mangan	
Cu	Měď	
Zn	Zinek	
Si	Křemík	

Cl	Chlór
Br	Brom
Zr	Zirkon
$Al_2O_3$	Oxid hlinitý
$Al(OH)_3$	Hydroxid hlinitý
NaOH	Hydroxid sodný
KOH	Hydroxid draselný
$CuAl_2$	Hlinitan měďnatý
$Mg_2Si$	Silicid hořečnatý
$Al(OH)_3 \cdot 2H_2O$	Bauxit
G.P.	Guiner-Preston
BP	Bakalářská práce

## 1. Úvod

Bakalářská práce se zabývá aplikací hliníkových slitin v horolezectví. Téma práce vzniklo z autorova blízkého vztahu k horolezení ve spolupráci se zadavatelem Petrem Koubou, který se více než 20 let aktivně věnuje výrobě horolezeckého materiálu.

Obecně platí, že horolezecký materiál musí být bezpečný. Na tento požadavek se musí nahlížet komplexně, důležitou roli hrají mechanické a fyzikální vlastnosti, jakými jsou např.: pevnost, odolnost proti opotřebení a korozi, měrná hmotnost [1]. Neméně důležité je i konstrukční provedení, stejně jako způsob užívání, tedy lidský faktor.

Předložená práce je věnována hodnocení specifického horolezeckého materiálu, který je běžně označován jako friend a používá se při tradičním lezení [1]. Na jeho výrobu jsou dlouhodobě využívaným materiálem slitiny hliníku, protože splňují výše uvedené požadavky [2] [3]. V teoretické části práce je proveden rozbor slitin hliníku, včetně technologií pro jejich zpracování.

V praktické části je provedena chemická analýza dvou friendů, kdy jeden je vyroben třískovým obráběním a druhý zápusťkovým kováním. Dále jsou obě tělesa testována zkouškou tahem [1].

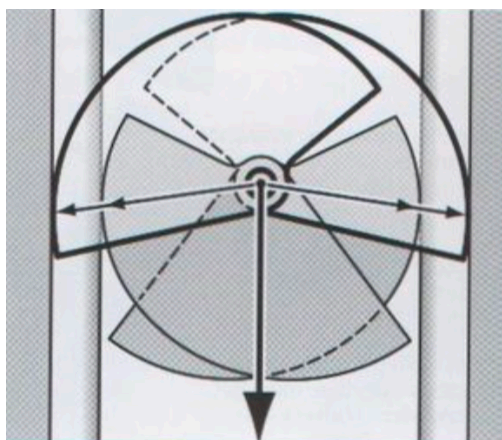
Cílem této práce je porovnání vlastností dvou friendů z rozdílných hliníkových slitin, vyrobených odlišnou technologií. V návaznosti na tyto výsledky, je pak doporučen návrh vhodného materiálu a technologie výroby friendu pro jejich výrobce.

## 2. Teoretická část

Současným trendem horolezení je zdolávání obtížných cest za použití minima pomůcek. Klade se důraz na co nejllehčí horolezecký materiál a bezpečnost při zachování velmi dobrých mechanických vlastností vybavení. Jednou z důležitých pomůcek při tradičním lezení je friend. Materiály používané na jeho výrobu jsou tématem této bakalářské práce.

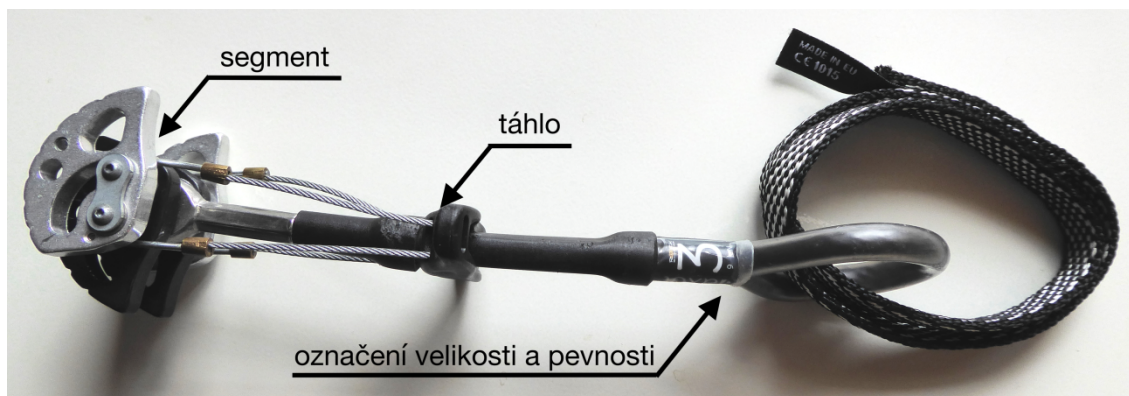
### 2.1.Friend

Friend je horolezecká pomůcka, která slouží pro založení postupového jištění při horolezeckém výstupu a po dokončení cesty dojde k jejímu vyjmutí ze skály. Friend je slovo přejaté a v cizojazyčné literatuře lze nalézt jeho synonymum jako Spring-loaded camming device nebo pouze cam [1]. Původ systému friendu spočívá zaprvé na principu lomené páky, kdy je potřeba, aby se na stěnu vytvořil dostatečně vysoký tlak a zadruhé na principu logaritmické spirály, uplatněné ve tvaru oblouku jednotlivých segmentů. Na výrobu segmentů se používají hliníkové slitiny, v současné době jsou segmenty friendů vyráběny třískovým obráběním hliníkových slitin, dříve byly vyráběny zápustkovým kováním (*Obr. 1*).



**Obr. 1** Princip lomené páky a logaritmické spirály [1]

Friend je aktivní mechanický vklíněnc, který se skládá z několika součástí vůči sobě pohyblivých (*Obr. 2*). Zatažením za ovládací páčku (táhlo) se výstředníky friendu zúží, poté se friend vloží do skalní pukliny, ovládací páčka se povolí, výstředníky friendu se roztáhnou a vklíní se v puklině. Z principu mechanismu plyne, že čím více je nosné oko friendu zatěžováno, tím se výstředníky friendu více roztahují a tím lépe drží ve skalní spáře. Friend se musí do skály umístit tak, aby protilehlé výstředníky byly zatěžovány rovnoměrně, z toho důvodu nesmí být do skály založen v absolutně zúženém stavu. Navíc při zatížení v absolutně zúženém stavu se friend může vklínit natolik, že jej nebude možné zpět vytáhnout. [1]



**Obr. 2** Friend velikosti č.3 s pevností 9 kN

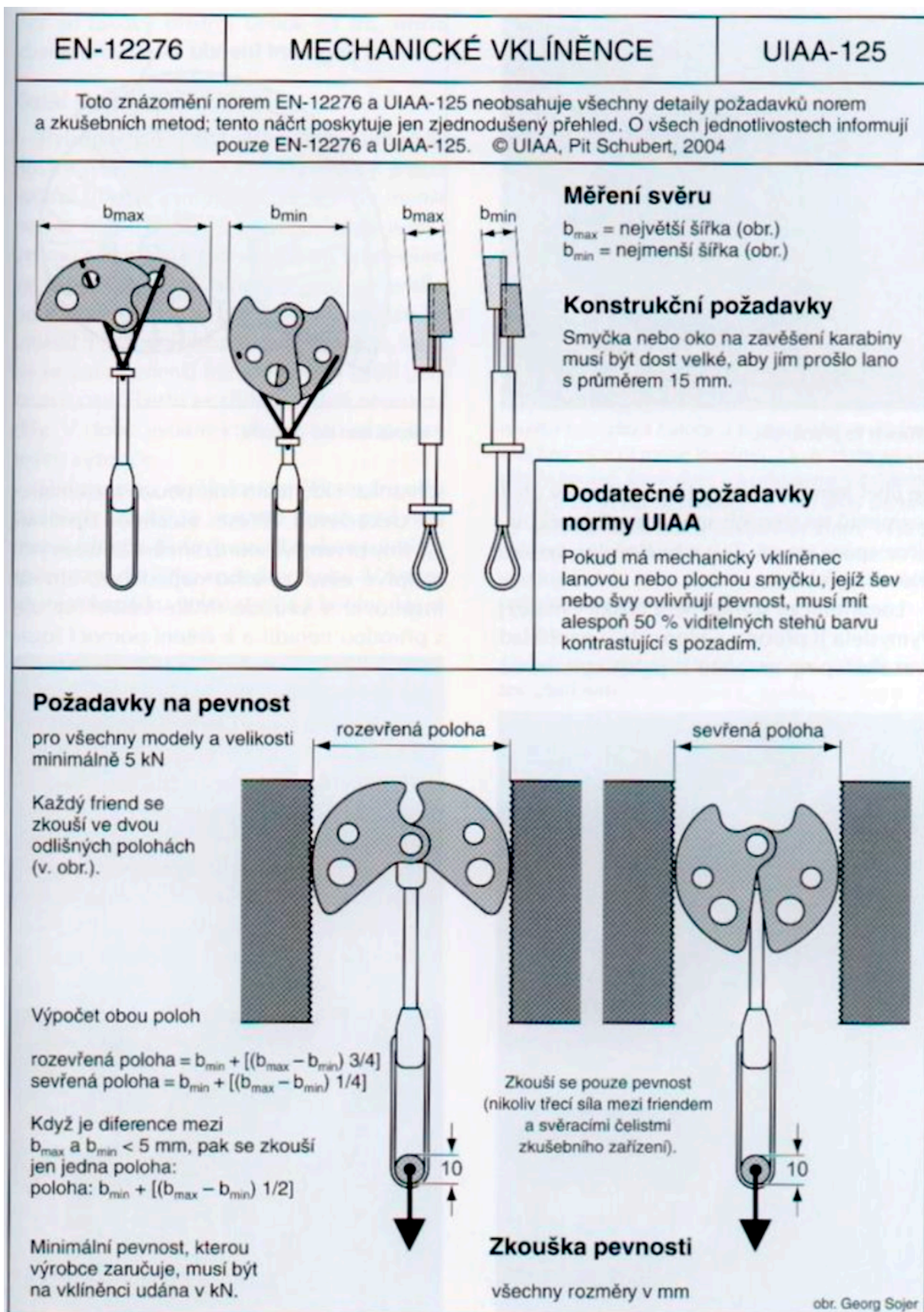
Z výše uvedeného odstavce vyplývá, že na horolezecké vybavení se vztahují přísné normy. Samotní výrobci často naddimenzují vybavení na úkor váhy, aby předešli případným obviněním, z jeho selhání, která jsou způsobena nejčastěji nesprávným užíváním.

### 2.1.1. Norma EN 12276

Norma EN 12276 definuje bezpečnostní požadavky a zkušební metody, které musí splňovat friend jako celek. Definuje friend jako nastavitelné klínové těleso, které je vlivem tření schopné odolat zatížení v podélném směru. Minimální zatěžující síla je 5 kN, rozměry rozevření jsou patrné z obrázku Obr. 3. Dále norma deklaruje střední aritmetickou drsnost povrchu segmentů  $R_a = 0,8 \mu m$  a nejvyšší výšku nerovností profilu, určenou z pěti stejně velkých základních délek  $R_{max} = 6,3 \mu m$ .

Provádí se zkouška tahem, dle normy ČSN EN ISO 6892-1 při teplotách  $(23 \pm 0,5)^\circ C$  v rozevřené poloze i sevřené poloze, pokud diference rozevření nepřesáhne 5 mm, tak se zkouší jen jedna poloha. Samotný friend musí nést označení pevnosti, respektive velikosti největší možné zatěžující síly v kN, patrný z popisu obrázku Obr. 2.

Jak již bylo uvedeno, pro výrobu friendů se používají hliníkové slitiny. Pro lepší pochopení mechanických vlastností hliníkových slitin bude v následujících kapitolách popsána jejich výroba, možnosti zpracování a fyzikálně metalurgické vlastnosti.



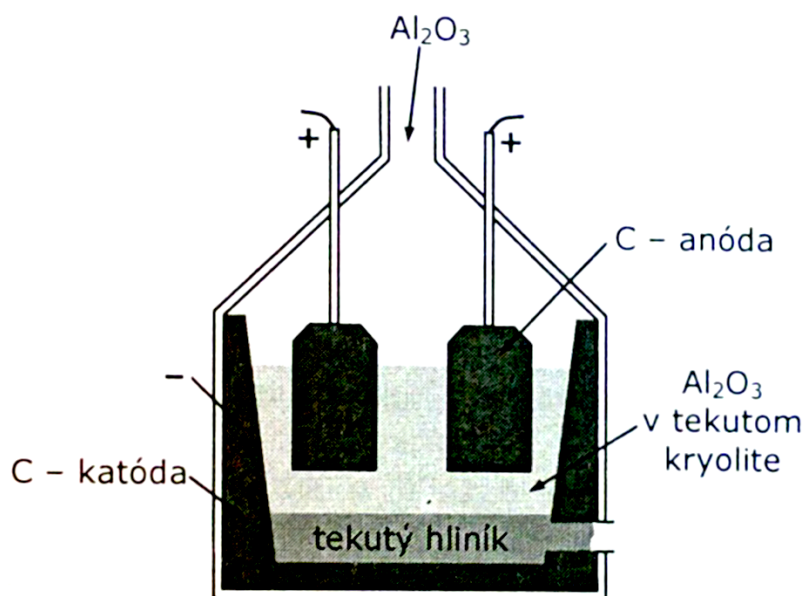
Obr. 3 Popis poloh zatěžovného tělesa [1]

## 2.2. Materiály vhodné pro výrobu segmentů

Jak již bylo uvedeno, při volbě materiálu je nutné mít na paměti, že horolezecký materiál musí být pevný, lehký, ale hlavně spolehlivý. Jedním z nejvhodnějších materiálů, zohledníme-li cenu, jsou slitiny hliníku, které splňují požadavky horolezců, navíc některé slitiny jsou i korozivzdorné a odolné vůči opotřebení. Samotný čistý hliník je však nevhodný. V následující kapitole bude popsána výroba hliníku pro pochopení vlastností a obecných charakteristik.

### 2.2.1. Výroba hliníku

Hliník je kov stříbrno-šedé barvy s kubickou plošně středěnou mřížkou K12, který má největší zastoupení v zemské kůře a to 7,5 % hmotnosti [2] [3]. Svým významem je to druhý nejpoužívanější kov mezi konstrukčními materiály. Výroba hliníku je relativně náročný a drahý proces. Nejdůležitějšími minerály na jeho výrobu jsou gibbsit, bohmit, diaspor, které tvoří hlavní složky bauxitu  $Al(OH)_3 \cdot 2H_2O$ . Bauxit je ruda složená z různých oxidů a hydroxidů, hlavně hliníku, dále pak železa a křemíku. Výroba hliníku probíhá ve dvou krocích. V prvním kroku se získává  $Al_2O_3$  Bayerovou metodou, kdy dochází k separaci složky pevné matrice působením loužicích roztoků za vzniku hydroxidu hlinitého. V druhém kroku se elektrolýzou (Obr. 4) oxidu hlinitého získává hliník [3]. Elektrolýza  $Al_2O_3$  probíhá podle Hall-Heroultovoo procesu. Při elektrolýze se používají grafitové elektrody a hliník se na základě vyšší měrné hmotnosti usazuje na dně.



Obr. 4 Výroba Al elektrolýzou [3]



## 2.2.2. Vlastnosti hliníku

Hliník se vyznačuje nízkou měrnou hmotností  $2,7\text{g}/\text{m}^3$  (zhruba třetinová oproti běžným ocelím s měrnou hmotností  $7,83\text{g}/\text{m}^3$ ), velmi dobrou tepelnou a elektrickou vodivostí, nízkou teplotou tavení  $660\text{ }^\circ\text{C}$  a relativně dobrou tvářitelností, jak za tepla, tak i za studena. Tyto vlastnosti spolu s pevnostními charakteristikami některých hliníkových slitin umožňují konstrukci lehkých a odolných konstrukcí, které jsou v současné době velmi žádané [2].

Hliník odolává atmosférickým vlivům, mořské vodě, apod. Není odolný vůči silnějším hydroxidům (NaOH, KOH) a kyselinám obsahující halové prvky (Fluor, Cl, Br). Jeho odolnost proti korozi je ovlivněna jeho samovolnou pasivací, kdy dochází k reakci s kyslíkem a na povrchu vzniká tenká ochranná vrstva  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , která činí hliník stálým na vzduchu a chrání jej před další korozi. Tato vrstva je velmi přilnavá a její vrstva na očištěném materiálu dosahuje hodnoty  $0,001\mu\text{m}$ . Po několika dnech tato vrstva zesílí až o řád [2].

Mechanické vlastnosti čistého hliníku lze ovlivnit dvěma způsoby. Za prvé změnou velikost zrna, kdy se na základě Hall-Petchova vztahu (1) uplatňuje zpevnění hranicemi zrn, patrně z rovnice [3].  $R_{p0,2}$  je smluvní mez kluzu,  $R_0$  a  $k$  jsou materiálové konstanty a písmeno  $d$  značí střední velikost zrna. Další možností je tváření za studena, kdy dochází k deformačnímu zpevnění [3].

$$R_{p0,2} = R_0 + kd^{-1/2} \quad (1)$$

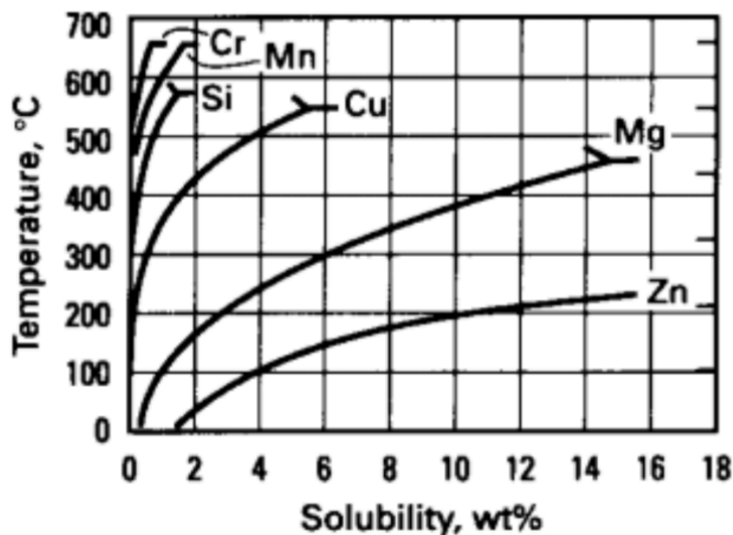
Z rovnice vyplývá, že pro zvýšení pevnosti materiálu je potřeba zajistit jemnozrný materiál. Hrubost zrna je ovlivněna hlavně technologií výroby, například při tlakovém lití nebo odlévání do kokil se získává jemnozrná struktura v důsledku rychlosti ochlazování [3].

## 2.3. Hliníkové slitiny

Hliníkové slitiny mají mnohem širší využití než čistý hliník, díky legování a použitým technologiím. Níže uvedené podkapitoly vysvětlují předpoklady pro zlepšení pevnostních charakteristik, lomových, korozních a technologických vlastností hliníku.

### 2.3.1. Základní význam prvků v Al slitinách

Nejpoužívanějšími legujícími prvky jsou Ni a Fe, díky jejich malé rozpustnosti a schopnosti společně vytvářet stabilní intermediální fáze. Ni zlepšuje mechanické vlastnosti při zvýšených teplotách. Mg přispívá k zvýšené odolnosti proti tečení. Mn zvětšuje pevnost, tvářitelnost, odolnost slitin vůči oxidaci a zvyšuje rekrystalizační teplotu. Cu a Zn umožňují vytvrzování, ale zhoršují tvářitelnost. Závislost rozpustnosti, legujících prvků v hliníkových slitinách na teplotě je zobrazena na obrázku (Obr. 5) [4]. Největší rozpustnost v Al mají Mg a Zn, následuje Cu.



Obr. 5 Rozpustnost nejběžnějších legujících prvků v hliníku [4]

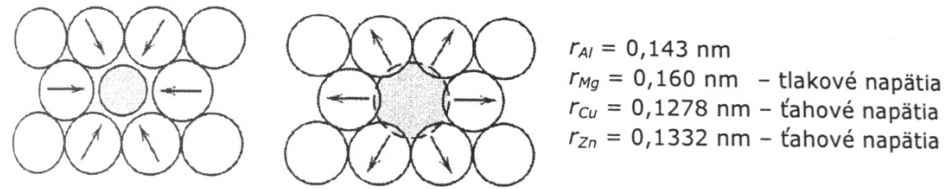
### 2.3.2. Mechanizmy podporující fyzikálně-metalurgické vlastnosti

V následujících podkapitolách budou popsány zpevňující mechanismy, které přispívají k požadovanému zlepšení užitných vlastností popisovaných slitin.

#### 2.3.2.1. Substituční zpevnění

Principem substitučního zpevnění je tvorba napětíových zón, které jsou způsobeny atomy tvořící s hliníkem tuhý roztok. Napětí může být tlakové nebo tahové (Obr. 6). Pokud je rozměr cizího atomu větší než rozměr atomu hliníku, jedná se o napětí tlakové. Je-li atom hliníku větší, jde o napětí tahové. Z obrázku je patrné že Mg vyvolává tlakové a Cu i Zn tahové napětí v Al

slitinách. Vlivem působení napěťových zón okolo cizích atomů s pohybujícími se dislokacemi dochází k růstu skluzového napětí, což zvyšuje povrchovou energii zóny a vede k dalšímu zvýšení energetické bariéry [3].

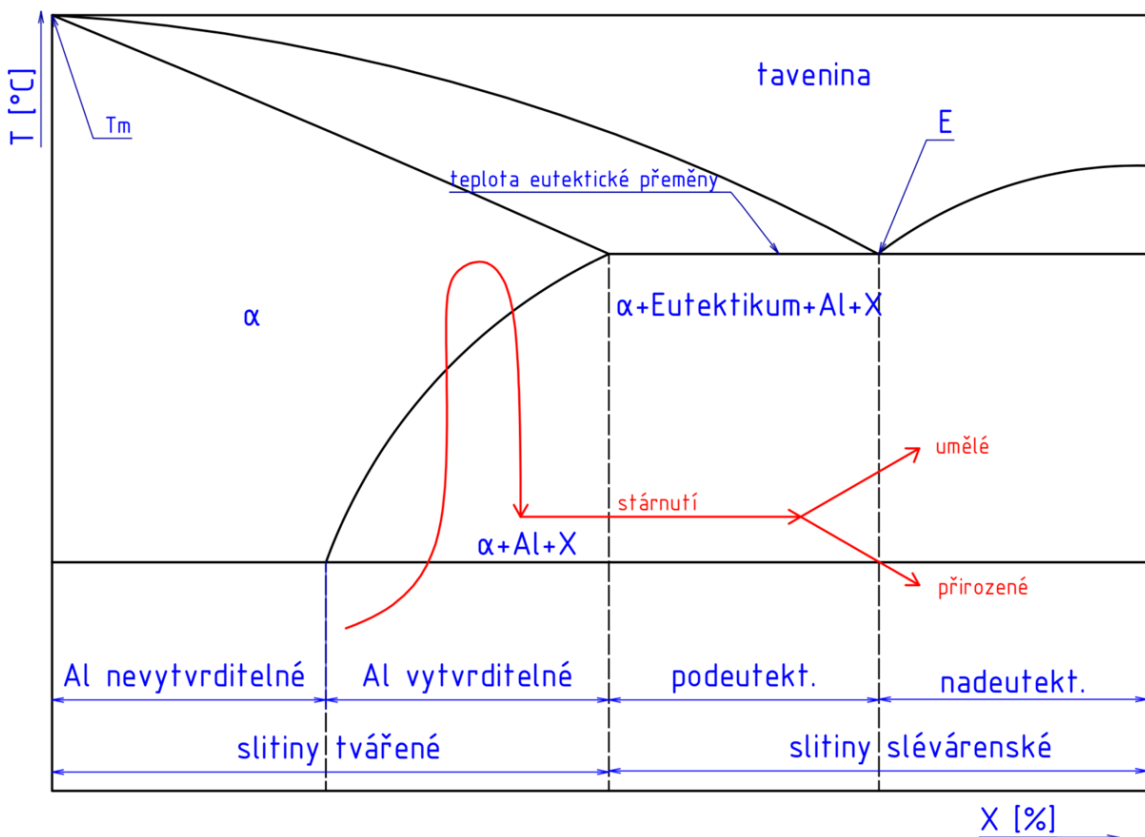


Obr. 6 Vznik tahových/tlakových napětí mezi atomy hliníku a legujícími prvky [3]

### 2.3.2.2. Precipitační zpevnění

Precipitační zpevnění je proces tepelného zpracování, který je tvořen rozpouštěcím žiháním, ochlazením a následně přirozeným nebo umělým stárnutím. Tento druh zpevnění je využitelný pro některé hliníkové slitiny.

Možnost zpevnění je ovlivněna rozpustností prvků v Al a vzniku fází. Většina legujících prvků má s Al klesající rozpustnost v tuhém roztoku  $\alpha$  (Obr. 7). Tato skutečnost je podmínkou pro možnost využití precipitačního zpevnění u hliníkových slitin. Obsah legujících prvků ve slitině musí být vyšší než rozpustnost při normální teplotě. Maximální rozpustnosti lze dosáhnout při teplotě eutektické přeměny [5].



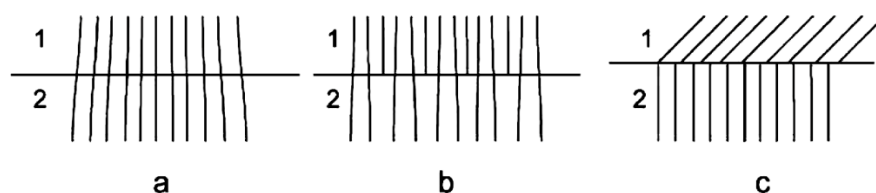
Obr. 7 Rovnovážný diagram Al-X

Princip precipitačního zpevnění autor práce schématicky znázornil v Obr.7. a lze jej podrobněji popsat následujícím způsobem: Rozpouštěcím žíháním se rozumí ohřev výrobku na požadovanou teplotu, za získáním tuhého roztoku  $\alpha$ . Dále následuje výdrž na konstantní teplotě. Toto žíhání probíhá nad křivkou změny rozpustnosti, dochází při něm k rozpuštění intermetalických fází obsahujících vytvrzující legující prvky. Výdrž na stále teplotě nesmí být příliš dlouhá, jelikož v důsledku povrchového napětí dochází k hrubnutí zrna.

Následuje rychlé ochlazení kritickou nebo nadkritickou rychlostí (u hliníkových slitin do vody při pokojové teplotě), k získání přesyceného tuhého roztoku  $\alpha$ . Kritická rychlost ochlazování je nejmenší rychlost ochlazování z rozpouštěcí teploty, při které nenastává rozpad přesyceného tuhého roztoku. Takto prudce ochlazený tuhý roztok je termodynamicky nestabilní a podléhá precipitačnímu rozpadu, které se nazývá také stárnutí [3]. Precipitáty zabraňují volnému pohybu dislokací, čímž dochází k posunu hranice meze pevnosti a dochází ke zpevnění [6].

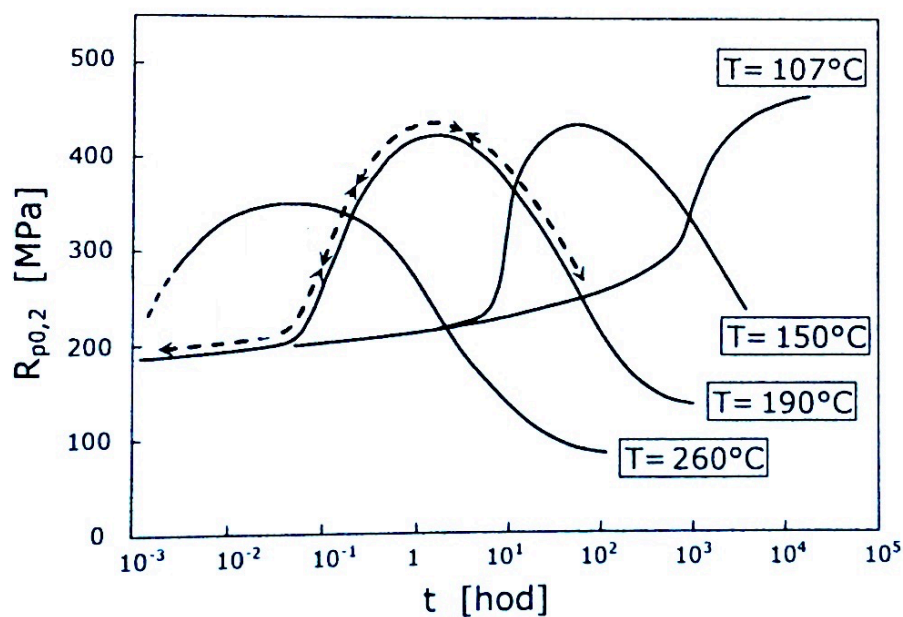
Během stárnutí dochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku  $\alpha$ , difúzi legujícího prvku do mikroskopických oblastí bohatších tímto prvkem a v nich k nukleaci nové fáze. Při růstu těchto zárodků dochází ke vzniku segregáčnických jevů, které jsou charakteristické shlukováním do Guiner-Preston zón (G.P. zón). Podmínkou vzniku těchto oblastí je velká změna rozpustnosti v tuhém stavu, dostatečně nízká teplota stárnutí a malý rozdíl ve velikosti atomů Al a legujícího prvku. G.P. zóny se významně podílejí na precipitačním vytvrzování, protože zvyšují potřebné napětí pro pohyb dislokace. Význam a vlastnosti G.P. nebudou v této práci dále popsány, jelikož se jedná o téma, jež je nad rámec zadání BP.

Precipitáty lze rozdělit podle souhlasu s krystalografickou mřížkou na koherentní, semikoherentní a nekoherentní (Obr.8.). Pokud jsou precipitáty s mřížkou částečně spjaty, nazýváme rozhraní semikoherentní, projevují se lepší pevností a vytvrditelností, než rozhraní koherentní. Pokud se materiál nechá vytvrzovat příliš dlouhou dobu, dochází ke ztrátě spjatosti precipitátů a vzniku nekoherentního rozhraní. Tento proces se nazývá přestárnutí a dochází k značnému poklesu pevnosti [7] [8], které jsou patrné z Obr.9.



**Obr. 8** Schéma rozhraní: a) koherentní, b) semikoherentní, c) rozhraní mezi dvěma fázemi [8]

Precipitačním zpevněním lze dosáhnout nejlepších pevnostních vlastností, které jsou však specifické pro každou slitinu hliníku. Vytvrzování rozlišujeme na přirozené (za pokojové teploty) a umělé stárnutí (za zvýšených teplot). Z technologických důvodů se někdy aplikuje stupňovité stárnutí, kdy po rozpouštěcím žíhání dvakrát či vícekrát zvýšíme teplotu během žíhacího procesu. Čas stárnutí je závislý na chemickém složení slitiny. Z obrázku (Obr.9) je patrné, že čím vyšší je teplota umělého stárnutí, tím nižší jsou maximální dosažitelné pevnostní charakteristiky, čím vyšší je teplota umělého vytvrzování, tím dříve lze dosáhnout maximální pevnostních charakteristik při dané konstantní teplotě [3] [6].



Obr. 9 Vliv teploty a času vytvrzování na pevnost slitiny Al4Cu, upraveno [3]

## 2.4. Rozdělení slitin hliníku

Slitiny hliníku lze dělit podle různých kritérií. Nejčastější je dělení podle způsobu zpracování, vycházející z normy ČSN. V ČSN bylo ke dni 1.1.1995 registrováno 18 slitin hliníku pro tváření a 16 slitin hliníku pro odlitky. V současnosti je platné označování jak podle norem ČSN, tak podle norem ČSN EN, které mají v technické praxi přednost. Při užívání norem ČSN následuje šestimístná číslice, kdežto u ČSN EN následuje čtyřmístná číslice plus chemické označení [3]. Dalším kritériem pro dělení slitin je schopnost zvýšení jejich pevnosti vytvrzováním, pak rozlišujeme vytvrditelné a nevytvrditelné. Podrobně budou popsány pouze vytvrditelné slitiny vhodné k tváření (*Tabulka 1*) [9], protože výrobce friendů Petr Kouba dříve vyráběl segmenty zápusťkovým kováním a v současné jsou třískově obráběny z válcovaných plechů. Oblast hliníkových slitin, vhodných pro tváření je patrná z Obr.7., včetně vymezení vytvrditelnosti.

**Tabulka 1** - Upravený přehled mechanických a technologických vlastností vytvrditelných slitin hliníku, vhodných k tváření [9]

označení dle EN AW	chemické složení	pevnost v tahu Rm (MPa)	mez kluzu Rp (Mpa)	tažnost A (%)	vhodnost k eloxování	korozní odolnost	svařitelnost	obrobitelnost
2007	AlCu4PbMgMn	330-370	210	8,00	špatná	špatná	špatná	velmi dobrá
2017A	AlCu4Mg	min.360	240	10	příjatelná	příjatelná	příjatelná	dobrá
2024	AlCu4Mg1	min.400	270	8	špatná	příjatelná	špatná	velmi dobrá
6060	AlMg4,5Mn0,7/AlMg5	190	150	8	velmi dobrá	velmi dobrá	velmi dobrá	příjatelná
6063	AlMg0,7Si	min.200	170	8	dobrá	velmi dobrá	velmi dobrá	dobrá
6082	AlSiMgMn	min.300	240	4	dobrá	velmi dobrá	dobrá	dobrá
7075	AlZn5,5MgCu	min.470	400	6	špatná	příjatelná	špatná	velmi dobrá

### 2.4.1. Tvářené slitiny hliníku podle ČSN 573-1-3

Nejčastějšími legujícími prvky, které zásadně ovlivňují vytvrditelnost těchto slitin jsou Mg, Mn, Cu, Zn a Ni. Význam jednotlivých prvků byl uveden v kapitole 2.3.1.

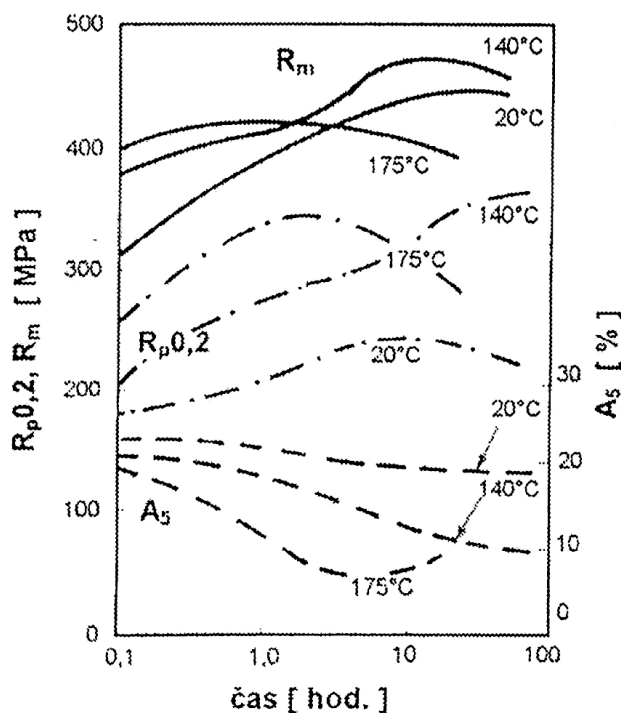
Uvedená norma se vztahuje na výrobky a ingoty ze slitin hliníku určených k tváření a stanovuje označení EN AW plus čtyři číslice. První předpona „EN“ značí evropskou normu, následující písmeno „A“ označuje hliník (Aluminium), třetí písmeno „W“ označuje výrobky pro tváření. Čtyři číslice např.: „2017“ označují sérii hliníku a její chemické složení. Poslední písmeno „A“ označuje národní změnu materiálu, ale nemusí být uvedeno [10]. Z tabulky 1 jsou patrné základní technologické vlastnosti vytvrditelných hliníkových slitin: dobrá korozní odolnost, velmi dobrá obrobitelnost, možnost svařitelnosti a vhodnost některých slitin k eloxování.

### 2.4.1.1. Slitiny Al-Cu-Mg (série 2000)

Měď je hlavním legujícím prvkem této série, obecně s hořčíkem jako vedlejším přísadou. Do této podskupiny patří především slitina AlCu4Mg (dural), ze kterého jsou nejčastěji vyráběny horolezecké segmenty a dále AlCu4Mg1 (superdural). Číslice „4“ označuje koncentraci Cu ve slitině, stejně tak číslice „1“ označuje koncentraci Mg. [11]. V současné době zadavatel BP vyrábí segmenty z materiálu EN AW 2017A T4, jehož chemické složení a vlastnosti jsou uvedeny tabulce 1. Písmeno T označuje stav po tepelném zpracování. Označením T4 se rozumí stav materiálu, který prodělal rozpouštěcí žíhání a přirozené stárnutí, jež bylo provedeno k dosažení dostatečně stabilního stavu materiálu.

Tyto slitiny vyžadují tepelného zpracování pro získání vhodných užitných vlastností. Práce [11] uvádí, že po přirozeném stárnutí, které probíhá při následujících podmínkách: (495–515 °C, chladicí médium: voda při 20 °C), čas: 4 dny, se dosahuje pevnosti až  $R_m > 400 \text{ MPa}$ . Při umělém stárnutí lze dosáhnout podobné pevnosti, jako při přirozeném stárnutí a vždy je dosaženo vyšší meze kluzu (*Obr. 10*), na úkor tažnosti.

Korozní odolnost je možné výrazně zlepšit nanesením povlaku čistého hliníku, slitinou obsahující do 1 % Zn nebo slitinou Al-Mg-Si. Povlak zajišťuje galvanickou ochranu a obvykle tvoří 2-5 % z každé strany materiálu [4].



Obr.10 Závislost mech. vlastností slitiny AlCu4Mg1, vlivem stárnutí na času a teplotě [12]

### 2.4.1.2. Slitiny Al-Mg-Si (série 6000)

Druhou skupinou vytvrditelných slitin jsou Al-Mg-Si (avial) slitiny, které se využívají ve dvou základních složeních AlMgSi, AlMg1Si. Jedná se o slitiny vytvrditelné s pomocnou fází  $Mg_2Si$ . Vytvrzení probíhá při 535 °C, následuje ochlazení vodou a ohřev na 160 °C, doba stárnutí je 5 hodin. Oproti Al-Cu-Mg dosahují o čtvrtinu nižší meze pevnosti  $R_m \approx 300 \text{ MPa}$ . Avialy jsou dobře leštitelné, odolávají vůči korozi a oproti duralům je lze dobře svářet. Využití naleznou v automobilovém, leteckém, chemickém a potravinářském průmyslu [3] [4].

### 2.4.1.3. Al-Zn-Mg-(Cu) (série 7000)

Třetí skupinou vytvrditelných slitin jsou Al-Zn-Mg a Al-Zn-Mg-(Cu). Obsah zinku se pohybuje v rozmezí od 1-8 %. Na rozdíl od předchozích slitin, lze přesycený tuhý roztok získat i ochlazováním na vzduchu. Přirozené stárnutí probíhá asi 14 dní, umělé trvá 8 hodin za primárního ohřevu do 440 °C, dále následuje ochlazení na vzduchu a následné ohřátí na 150 °C. Odolávají dobře korozi a zachovávají si vysokou pevnost  $R_m > 300 \text{ MPa}$ . Série 7000 se využívají v leteckém průmyslu pro trupy letadel, tak i v automobilovém průmyslu, využití najdou i v odvětví sportu, např.: horolezecké karabiny [3] [4].



## 2.5. Hliníkové slitiny vhodné pro zápustkové kování

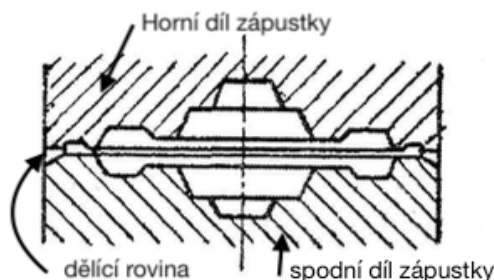
Jak již bylo uvedeno, výrobce friendů a zároveň zadavatel tématu této bakalářské práce, Petr Kouba, se chce vrátit k výrobě segmentů zápustkovým kovááním. Již v minulosti byly segmenty vyráběny touto technologií, nicméně finální výrobek měl výraznou dělicí rovinu, která byla pro výrobce nadále nepřijatelná a vznikaly značné náklady na její odstranění. Druhým nedostatkem prvních výkovků byla také vyšší hmotnost segmentů, oproti konkurenci. V následujících kapitolách bude popsána technologie zápustkového kování a řešerše materiálů vhodných pro výrobu touto technologií.

### 2.5.1. Zápustkové kování

Jedná se o technologii objemového tváření, jež se uplatňuje při zakázkách střední až sériové výroby. Zápustka je nástroj tvořený dvěma díly, které mají uprostřed dutinu, ta dává tvar samotnému výkovku (*Obr.11*). Výhodou této technologie je vysoká produktivita, stejnoměrnost struktury, přesnost rozměrů. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena nástroje. Zápustkové kování lze nadále rozdělit do dvou kategorií, kování s výronkem a bez výronku [13].

Pokud se jedná o tvarově nenáročný díl, je možné zvolit kování s výronkem, kde bude pořizovací cena zápustky ekonomičtější než bezvýronkové kování. Naopak drahou operací bude následné obrábění výkovku na požadované rozměry.

Současným trendem je tzv. přesné kování hliníkových slitin, kde lze docílit velmi přesných rozměrů a velmi dobré kvality povrchu ( $R_a = 3,2 \mu m$ ). Následné nákladné obrábění tím odpadá, v mnoha případech se ještě využívá vrtání. Jak již bylo uvedeno v odstavci 2.1.1., friendy musí splňovat normu EN 12276, kde je stanovena maximální drsnost segmentů  $R_a = 0,8 \mu m$ , proto by v tomto případě přibýlo ještě případné broušení, nicméně tato skutečnost je až otázkou samotné výroby a záleží na kvalitě vykovaného segmentu. Nástroje jsou přesné a také vyhříváné, aby docházelo k rovnoměrnému tečení kovu v zápustce. Kování se aplikuje na mechanicko-hydraulických lisech [11].

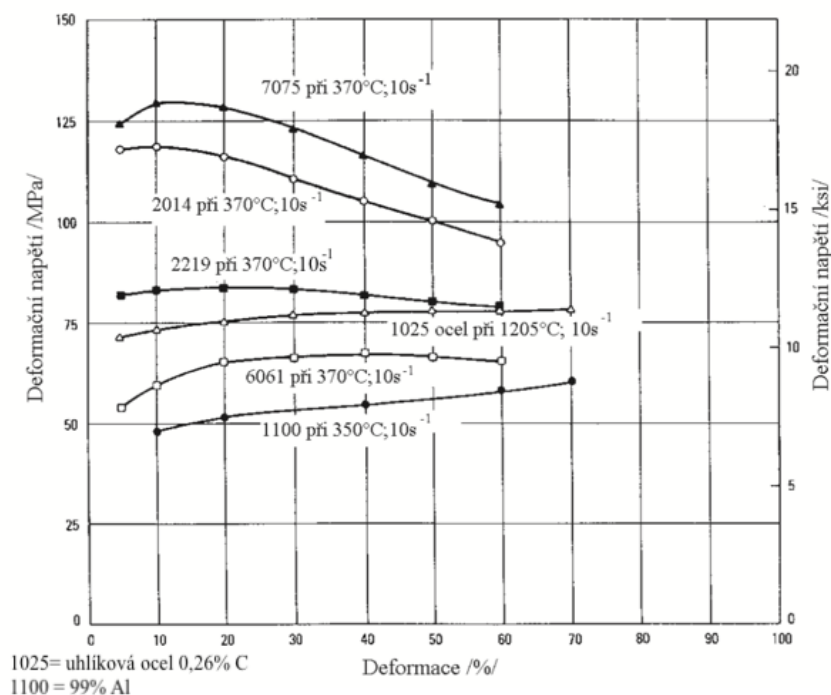


**Obr. 11** Jednoduché schéma zápustky s výronkem [13]

Při kování dochází k chladnutí výkovku sáláním, tudíž je v některých případech nutné kovat s mezi ohřevem. Pro přímé a přesné kování jsou používané nástroje, které jsou buď předeřháté nebo vyhřívány během samotného procesu externím zdrojem tepla. Nástroje bývají obvykle zahřívány na teploty v rozmezí 150-300 °C. Dalším důležitým aspektem je koeficient tření  $\mu$ , který mezi slitinami hliníku a ocelí dosahuje hodnoty  $\mu = 0,46$  a je potřeba zajistit mazání [11]. Nejčastějším mazivem je olej nebo voda s grafitem, která snižuje tuto hodnotu na zhruba čtvrtinu.

## 2.5.2. Faktory ovlivňující tvářitelnost

Tvářitelností lze rozumět schopnost vytvořit požadovaný jakostní výrobek plastickou deformací [14]. Plastická deformace je geometrická změna tvaru probíhající působením tvářecího nástroje, při přemístování elementárních objemů materiálu [13]. Hlavním faktorem ovlivňující tvářením je: teplota při níž probíhá deformace, rychlost a velikost deformace (*Obr.12*) [11]. Z obrázku 12 je patrné porovnání tvářitelnosti čistého hliníku, hliníkových slitin a vybrané uhlíkové oceli. Obecně lze na hliníkové slitiny nahlížet, jako na hůře kovatelné materiály, v porovnání s uhlíkovou nebo legovanou ocelí. [11].



**Obr. 12** Závislost deformačního napětí na velikosti deformace pro čistý Al (1100), Al slitiny a uhlíkovou ocel (1025) [11]

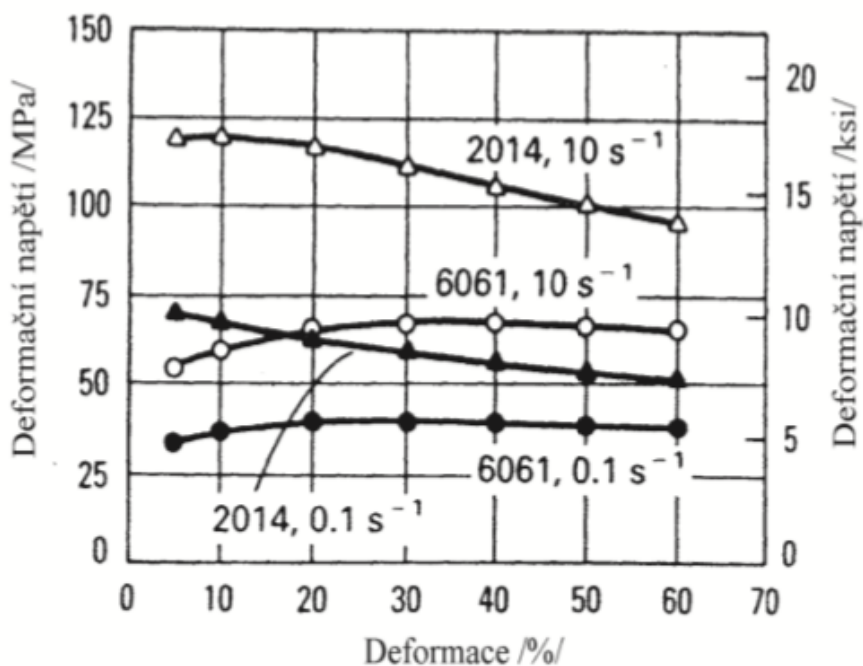
Dále je možné rozlišit kování za tepla a za studena, toto rozdělení je dáno rekrytalizační teplotou daného kovu. Rekrytalizační teplota odpovídá zhruba 35-40 % teploty tavení daného

kovu ve stupních Kelvina. Pro tváření hliníkových slitin bude zmíněno pouze tváření za tepla, jež se používá nejčastěji pro vysoce namáhané díly [11], kde bezpečnost a životnost dílu je zásadní. Hlavní výhodou tváření za tepla je zvýšená plasticita materiálu, se kterou souvisí snížení přetvárné pevnosti, resp. odporu materiálu proti deformaci. Tvářecí teploty pro hliníkové slitiny se pohybují v rozmezí od 350 – 500 °C, [13] v závislosti na chemickém složení.

### 2.5.3. Materiály vhodné pro zápuštěkové kování

V kapitole 2.4.1. již byly uvedeny hliníkové slitiny, vhodné ke tváření. Obecně platí, že pro slitiny série 1xxx a 6xxx dosahuje deformační napětí a s ním související přetvárný odpor nízkých hodnot, hodnot nižších než pro uhlíkovou ocel (Obr. 12). Naopak u slitin série 7xxx a 2xxx, které jsou legovány mědí a hořčíkem, dosahuje deformační napětí hodnot vyšších než již zmíněná uhlíková ocel.

Rychlost deformace a teplota jsou parametry, které zásadně určují průběh deformace a tím také konečné vlastnosti výrobku (Obr. 13). Při zvýšené teplotě vlivem vyšší rychlosti deformace může vést u některých slitin k fatálnímu poškození struktury, konkrétně u slitin série 2xxx. Proto jsou pro série 2xxx užívány nižší rychlosti deformace na hydraulických lisech. Pro slitiny série 6xxx tomu tak není a vyšších rychlostí deformace tak lze dosahovat na bucharech či mechanických lisech. [11]



**Obr. 13** Závislost deformačního napětí a parametrů deformace (velikost deformace, rychlost tváření) pro slitiny 6xxx a 2xxx [11]

Pro náročnější výkovky, konkrétně série 2xxx, 6xxx, 7xxx se používá materiál, jež byl v litém stavu homogenizačně žhán (vysokoteplotně). Žhánání se využívá pro odstranění nehomogenity lité struktury jež vznikla nerovnovážnou krystalizací při tuhnutí a pro zlepšení tvárnosti.

Po samotném výronkovém kování dochází k odstranění výronku, moření a následně jsou výkovky tepelně zpracovány, pro dosažení lepších mechanických vlastností. V tomto případě vytvrditelných slitin jsou všechny série podrobeny rozpouštěcími žhánání, dále následuje ochlazení nadkritickou rychlostí a umělé stárnutí [11] [15].

## 2.6. Povrchová úprava

U hliníkových slitin se nejčastěji užívá povrchové úpravy, nazývané eloxování. Zadavatel BP, Petr Kouba, zmiňuje, že v jeho případě je barevné eloxování pouze dekorativního charakteru. Aplikuje se pouze na některé segmenty, jež jsou vyráběny na zakázku pro jiné firmy. Eloxování probíhá v Galvanice Fiala u Prahy nebo v Eproně v Rokytnici nad Jizerou. Princip barevného eloxování slouží v zásadě k rozlišení velikostí friendů ve vybavení horolezce.

Eloxování je druh anodické oxidace elektrochemickým způsobem, kterým lze ovlivnit následujících vlastností: změna barvy, tvrdost, pórovitost a hloubka povrchové vrstvy. Podstata elektrochemické oxidace spočívá v tom, že v lázni, kterou tvoří elektrolyt, se hliník málo rozpouští. Průchodem stejnosměrného proudu mezi elektrodami dochází na počátku k rozpouštění hliníku na anodě, ale současně se zvyšuje počet hydroxylových iontů  $\text{OH}^-$ . Chemickou reakcí mezi ionty  $\text{Al}^{3+}$  a  $\text{OH}^-$  se tvoří na předmětech povlak nerozpustného hydroxidu hlinitého  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [16].

Vrstvy vzniklé anodickou oxidací, dle parametru a kritéria jakosti mají velmi dobrou ochranu proti korozi. Jsou trvalé i za vyšších teplot a odolávají dobře mechanickému opotřebení. Vrstvy mají velmi dobrý vzhled (snižují drsnost povrchu), který lze zlepšit barvením anodické vrstvy. Eloxování se však stále více používá i na předměty silně korozně namáhané (konstrukce letadel, lodí, sportovní vybavení ap.) nebo ve stavebnictví (např. portály, zárubně oken ap.) [16].

### 3. Experimentální část

V první etapě experimentální části jsou analyzovány vlastnosti současného obráběného segmentu a dříve kovaného. U segmentů je sledováno chemické složení, pevnostní charakteristiky a tvrdosti. Druhá etapa hodnotí vhodné hliníkové slitiny, jež by v budoucnosti mohly být použity pro výrobu zápustkovým kováním. Hlavním faktorem pro vyhodnocení optimálních slitin je pevnostní charakteristika, tvářitelnost a také cena materiálu.

#### 3.1. Zkušební tělesa

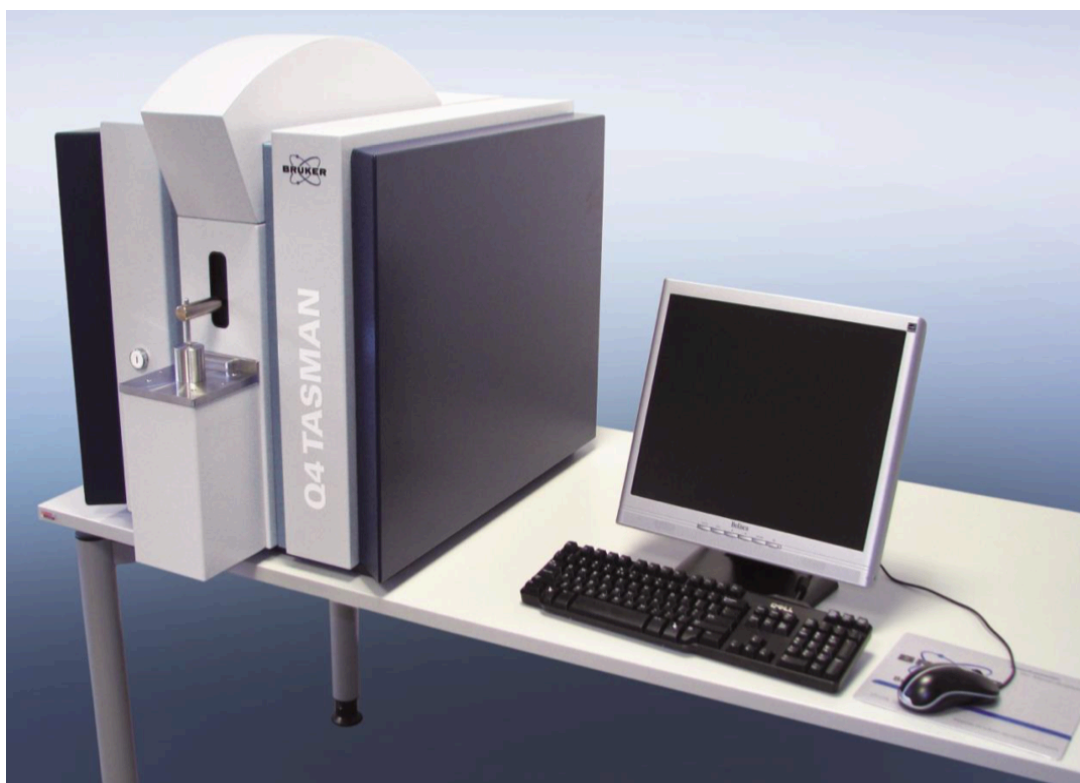
Jako zkušební materiál jsou použity dva friendly (kapitola 2.1.), stejné velikosti s odlišnými typy segmentů. Tento zkušební materiál je určen pro zkoušku tahem. Dalším zkušebním materiálem jsou samotné segmenty (*Obr.14*) rozebraného friendly, jež budou využity pro chemickou analýzu a měření tvrdosti.



**Obr.14** Zkušební materiál – segmenty (obráběný vlevo, kovaný vpravo)

### 3.2. Chemická analýza

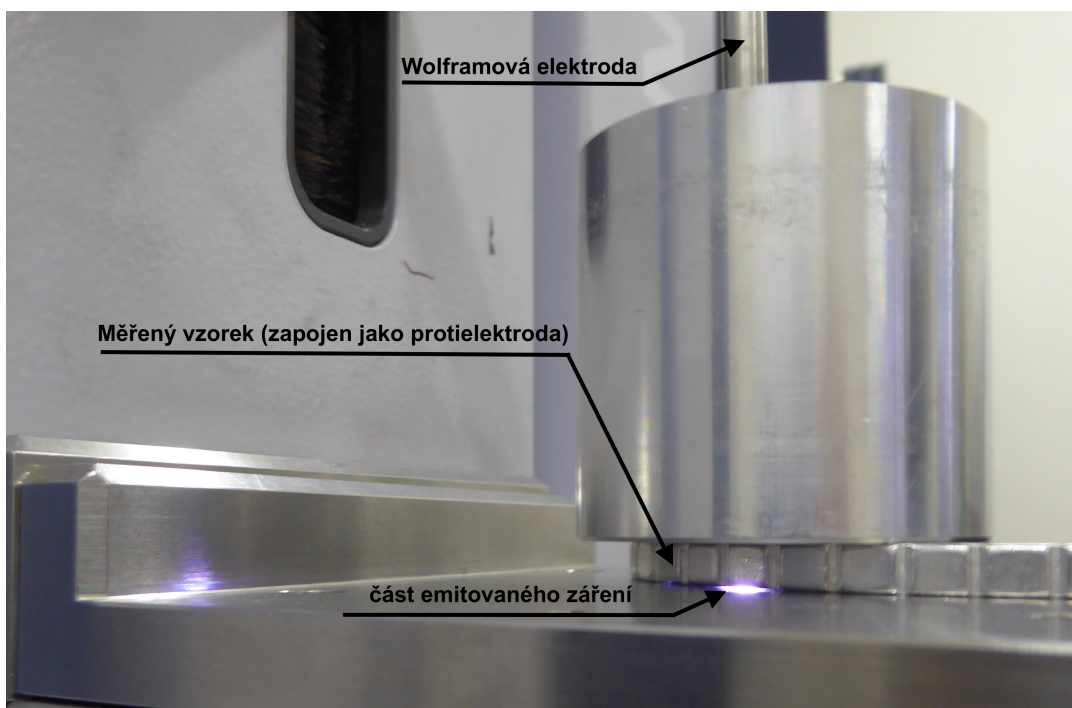
Provedl jsem chemickou analýzu segmentů s cílem zjistit, chemické složení a zda-li koncentrace prvků odpovídá normě pro daný materiál. V případě obráběného segmentu bylo sděleno zadavatelem BP, že se jedná o hliníkovou slitinu EN AW 2017A, u druhého kovaného segmentu konkrétní typ materiálu neznám. Analýzu jsem provedl na stolním jiskrovém optickém emisním spektrometru Q4 tasman (*Obr.15*).



**Obr.15** Optický spektrometr Q4 tasman

Vzorky bylo nutné před analýzou zbrusit na jednotnou drsnost a z kovaného segmentu byla odbroušena vystouplá část (*Obr.14*). Při úběru vystouplé části byl vzorek chlazen vodou, aby se předešlo teplotnímu ovlivnění povrchu, k broušení byla použita Bruska LECO GPX 300. Vzorky byly zbruseny dvěma brusnými papíry s hrubým a jemným abrazivem (P180, P2000) [17].

Optická emisní spektrometrie je v dnešní době preferovaná metoda ke stanovení chemického složení kovových materiálů, díky krátkému času a přesnosti vyhodnocení analýzy. Spektrometr je složen z budícího zdroje, optického systému, detektoru a vyhodnocující jednotky. Metoda je založena na snímání fotonů, které vznikají přechodem valenčních elektronů na nižší energetické úrovně. Jako budič slouží přerušovaný střídavý výboj s vysokým napětím. Z pracovní elektrody se výbojem odpaří nepatrné množství vzorku, které ve výboji excituje. Vzorek je zapojen jako jedna elektroda a protielektroda je z wolframu (*Obr.16*). Měří se celkové emitované záření, z vlnové délky se určuje kvalitativní složení vzorku a z intenzity záření jeho kvantitativní složení. [18] [19].



**Obr.16** Schéma měření optické emisní spektrometrie

### 3.3. Zkouška tvrdosti

Tvrdot je mechanická vlastnost, jež je definována jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa (indentoru). Jedná se o nedestruktivní zkoušky. Zkoušky tvrdosti můžeme rozdělit do více kategorií a to podle principu vnikání indentoru, velikosti zatěžující síly nebo rychlosti zatěžování (statické/dynamické). Nejčastěji se využívají statické zkoušky, které jsou založené na vtláčování indentoru do materiálu, který působí vůči tuhé podložce. Indentor vniká kolmo do hladkého předmětu, jež je očištěn od masnot. Tvrdot naměřená statickou zkouškou lze rozdělit podle typu indentorů na tvrdosti dle Brinella, Vickerse, Rockwella. Dále bude popsána pouze zkouška podle Brinella, jež je experimentálně V BP využita [20].

Zkouška podle Brinella [20] spočívá ve vtláčování kuličky z tvrdokovu do zkušební vzorku. Indentor o specifickém průměru  $D$  pro daný materiál je vtláčován silou  $F$ , doba zatížení se udržuje mezi 10 -15 s. Síla  $F$  je uvedena v kilopondech [kp] a platí vztah  $1\text{kp} = 9,81\text{N}$ . Po odlehčení se měří průměr vtisku ve dvou navzájem kolmých směrech a dále se odečte střední hodnota průměru vtisku  $d$ . Tvrdot se označuje HBW a lze jí dopočítat z níže uvedené rovnice (2).

$$HBW = 0,102 \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2)$$

V dnešní době se často používají digitální tvrdoměry, jež jsou přesnější a rychlejší než analogové tvrdoměry, kde je potřeba hodnoty odečítat na mikroskopu. Při digitálním snímání probíhá vyhodnocení tvrdosti optikou CCD kamery. [21]



### 3.4. Zkouška tahem

Zkouška tahem je jednou z nejčastěji využívaných statických mechanických zkoušek a to z důvodu jednoduchosti, dostupnosti provedení a reprodukovatelnosti výsledků. Zkouška probíhá na stroji, jež je tvořen pevným rámem a poháněnými čelistmi. Do čelistí, které jsou opatřeny dynamometry pro zaznamenávání síly, je upnuto zkušební těleso, jež je zatěžováno. [22]

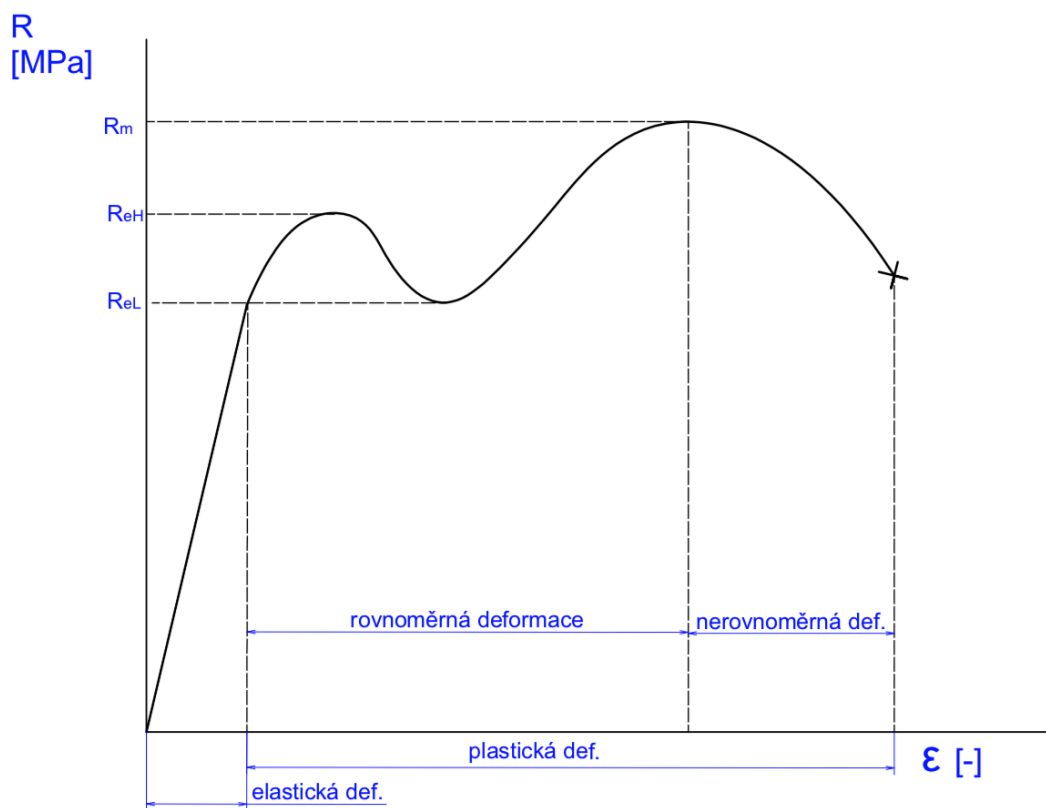
Samotná zkouška hodnotí deformaci zkušební tělesa v závislosti na tahové síle. Během zkoušky se zaznamenává působící síla  $F$  na prodloužení zkušební tělesa  $\Delta l$ , jež je možné zapsat vztahem  $F = f(\Delta l)$ , tato závislost pak bývá převedena na smluvní diagram  $R = f(\epsilon)$ . Pokud tento vztah vykazuje linearitu (Obr. 17), tak pro zkušební těleso platí Hookeův zákon, jež definuje oblast pružných (elastických) deformací a platí  $R = E \cdot \epsilon$ , kde  $R$  je smluvní napětí [MPa],  $E$  je Youngův modul pružnosti [MPa] a je  $\epsilon$  poměrné prodloužení [-]. Smluvní napětí a poměrné prodloužení lze určit z následujících vztahů:

$$R = \frac{F}{S_0} \quad (3)$$

kde  $F$  je zatěžovací síla [N],  $S_0$  je příčný průřez tělesa před zkouškou v [ $mm^2$ ].

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (4)$$

kde ve jmenovateli vystupuje absolutní prodloužení  $\Delta l = l - l_0$  [mm] a v čitateli původní délka  $l_0$  [20].

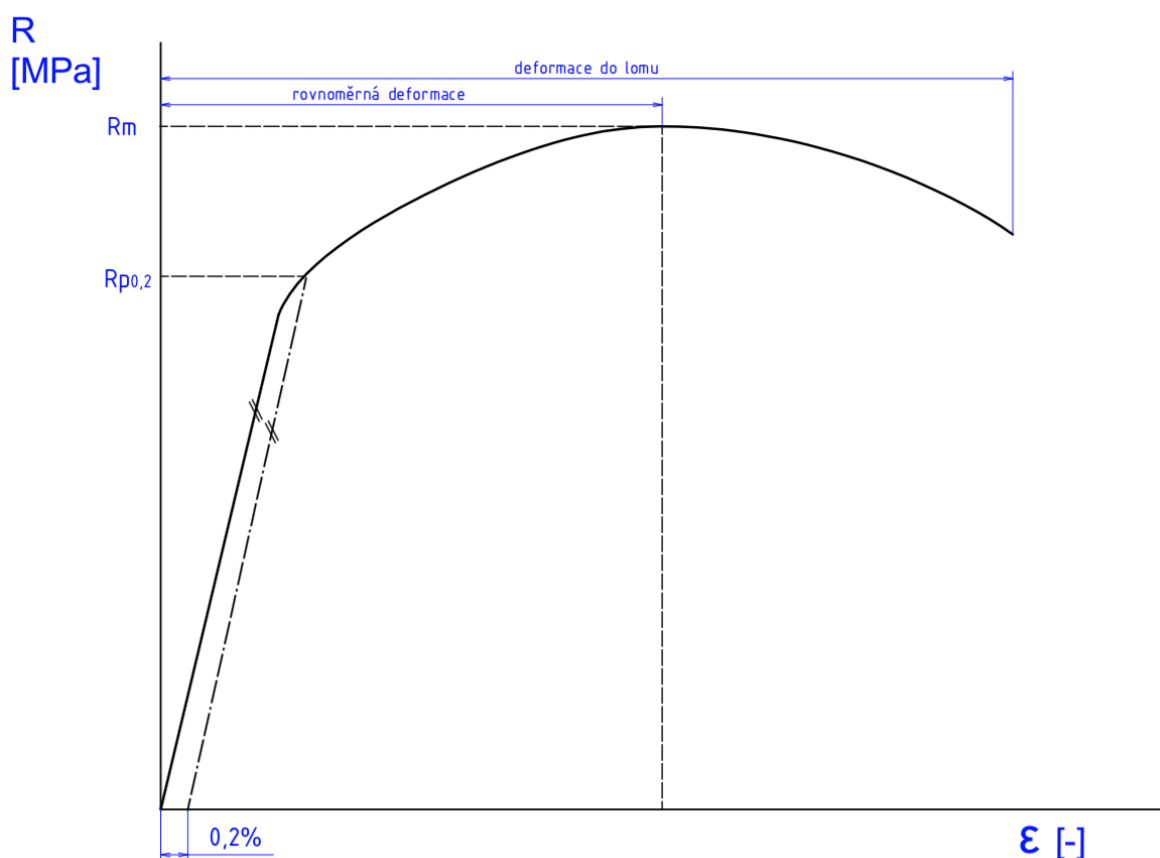


Obr.17 Smluvní tahový diagram s výraznou mezí kluzu

Na *Obr.17* je příklad smluvního diagramu s výraznou mezí kluzu, jeho průběh je charakteristický pro tzv. měkké oceli. Z obrázku jsou dále patrné následující body: horní mez kluzu  $R_{eH}$ , spodní mez kluzu  $R_{eL}$  a mez pevnosti  $R_m$ . Horní mez kluzu  $R_{eH}$  se nachází na konci lineární oblasti a vyjadřuje oblast vzniku plastických deformací. Vlivem rozšíření plastické deformace přes nosný průřez zkušební materiálu, dochází k poklesu napětí na hodnotu spodní meze kluzu  $R_{eL}$ , jež vyjadřuje nejnižší hodnotu napětí v průběhu plastického kluzu zkušební materiálu [22]. Při dalším zatěžování dochází k deformačnímu zpevnění, které vzniká pohybem dislokací, až na hodnotu meze pevnosti. Mez pevnosti  $R_m$  [MPa] je maximální napětí dosažené v tahovém diagramu a lze jej vyjádřit jako poměr maximální zatěžovací síly  $F_{max}$  [N] k počátečnímu průřezu  $S_0$  [mm<sup>2</sup>].

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \quad (5)$$

Tvrdé oceli a jiné kovové slitiny nevykazují výraznou mez kluzu, proto je nutné zavést smluvní mez kluzu. Tato smluvní hodnota vyjadřuje napětí, při kterém zkušební těleso dosáhne předepsané hodnoty prodloužení z počáteční měřené délky, uvádí v procentech. Nejčastěji je předepsaná pro 0,2 %  $l_0$  a označuje se  $R_{p0,2}$  (*Obr.18*) [23].



**Obr.18** Smluvní tahový diagram

Deformačními charakteristikami získanými ze zkoušky tahem jsou tažnost a kontrakce. Tažnost  $A$  [%] vyjadřuje poměrné prodloužení délky zkušebního materiálu při přetržení a je definována vztahem:

$$A = \frac{(l_u - l_0)}{l_0} \cdot 100 \quad (6)$$

kde  $l_u$  [mm] je finální měřená délka zkušebního materiálu po přetržení a  $l_0$  [mm] je délka zkušebního materiálu na počátku. Kontrakce  $Z$  [%] je poměrné příčné zúžení, kde  $S_0$  je počáteční průřez a  $S_u$  je plocha průřezu po přetržení v [ $mm^2$ ] [24].

$$Z = \frac{(S_0 - S_u)}{S_0} \cdot 100 \quad (7)$$

## 4. Výsledky a jejich diskuze

### 4.1. Vyhodnocení chemické analýzy

Na každé testované součásti byla provedena tři měření v různých místech, spočítána průměrná hodnota chemického složení a směrodatná odchylka. U obráběného segmentu jsou experimentálně zjištěné hodnoty (*Obr.19*) v souladu s normou pro Al slitinu EN AW 2017 A. U kovaného segmentu (*Obr.20*) chemické složení nejvíce odpovídá hliníkové slitině AlCu2SiMn, specifikované v normě ČSN 42 4206. Tato slitina je určena pro volné a zápusťkové výkovky velmi složitých tvarů. Dle [25] se ve vytvrzeném stavu řadí mezi hliníkové slitiny střední pevnosti a jeví dobré technologické vlastnosti při tváření za tepla. K roku 2005 byla výše uvedená norma zrušena. Ekvivalentem pro slitinu AlCu2SiMn je ruská Al slitina hliníku AK6 [25].

Nejbližším ekvivalentním materiálem pro kovaný segment by byla slitina EN AW 2014, nicméně naměřené hodnoty segmentu jeví nižší koncentraci Cu a to o cca 2 %. Z tohoto důvodu bych doporučil měření opakovat. Taková hodnota není v žádném případě zanedbatelná, nicméně v dostupné literatuře (dle konzultace s Ing. Jakubem Horníkem, Ph.D.) není k dispozici materiál, který by vykazoval obdobné tvárné vlastnosti a stejnou pevnost. Pro lepší přehlednost jsou naměřená data porovnána v Tabulce 2 s chemickým složením ekvivalentních materiálů. Doporučení volby materiálu pro eventuální výrobu jsou uvedena v kapitole 5.3.

**Tabulka 2** - Porovnání chemického složení segmentů

Zkoušený materiál	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	Al [%]
naměřená hod. - Kovaný	0,9	0,3	2,1	0,7	0,5	95,5
Ekvivaletní mat. (ČSN 42 4206) - Kovaný	0,7-1,2	max 0,7	1,8-2,6	0,4-0,8	0,4-0,8	zbytek
Ekvivaletní mat. (EN AW 2014) - Kovaný	0,5-1,2	max 0,7	3,9-5	0,4-1,2	0,2-0,8	zbytek
naměřená hod. - Obráběný	0,65	0,2	4,15	0,6	0,55	93,7
EN AW 2017A	0,7	0,7	3,8-4,8	0,4-0,8	0,4-0,8	zbytek

## Atest - Q4 TASMAN

Popis vzorku										
SampleNo	Oráběný									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ag
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.645	0.200	4.109	0.572	0.545	0.0084	0.0088	0.048	0.056	<0.00050
2.	0.635	0.189	4.114	0.575	0.559	0.0080	0.0049	0.050	0.057	<0.00050
3.	0.661	0.191	4.216	0.575	0.555	0.0083	0.0036	0.050	0.056	<0.00050
∅	<b>0.647</b>	<b>0.193</b>	<b>4.146</b>	<b>0.574</b>	<b>0.553</b>	<b>0.0082</b>	<b>0.0058</b>	<b>0.049</b>	<b>0.056</b>	<b>&lt;0.00050</b>
σ	0.013	0.0059	0.060	0.0017	0.0072	0.00021	0.0027	0.0012	0.00071	
ν	2.009	3.057	1.447	0.296	1.302	2.561	46.55	2.449	1.268	
	B	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Co	Ga	In	Li
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.00039	<0.0010	<0.00030	<0.0030	<0.00020	<0.00050	0.0013	0.0082	<0.0020	0.00004
2.	<0.00030	<0.0010	<0.00030	<0.0030	<0.00020	<0.00050	<0.0010	0.0084	<0.0020	0.00009
3.	0.00032	<0.0010	<0.00030	<0.0030	<0.00020	<0.00050	<0.0010	0.0087	0.0026	0.00023
∅	<b>0.00034</b>	<b>&lt;0.0010</b>	<b>&lt;0.00030</b>	<b>&lt;0.0030</b>	<b>&lt;0.00020</b>	<b>&lt;0.00050</b>	<b>0.0011</b>	<b>0.0084</b>	<b>0.0022</b>	<b>0.00012</b>
σ	0.00005						0.00017	0.00025	0.00035	0.00010
ν	14.71						15.45	2.976	15.91	83.33
	Mo	Na	P	Pb	Sn	Sr	V	Zr	Sb	Hg
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	<0.0010	<0.00050	<0.0020	<0.0050	0.0044	<0.0010	0.0079	<0.0020	<0.0070	<0.0020
2.	<0.0010	<0.00050	<0.0020	<0.0050	0.0043	<0.0010	0.0079	<0.0020	<0.0070	<0.0020
3.	<0.0010	<0.00050	<0.0020	<0.0050	0.0041	<0.0010	0.0081	<0.0020	<0.0070	<0.0020
∅	<b>&lt;0.0010</b>	<b>&lt;0.00050</b>	<b>&lt;0.0020</b>	<b>&lt;0.0050</b>	<b>0.0043</b>	<b>&lt;0.0010</b>	<b>0.0080</b>	<b>&lt;0.0020</b>	<b>&lt;0.0070</b>	<b>&lt;0.0020</b>
σ					0.00016		0.00012			
ν					3.721		1.500			
	Al									
	%									
1.	93.76									
2.	93.76									
3.	93.63									
∅	<b>93.72</b>									
σ	0.075									
ν	0.080									

Obr. 19 Naměřené hodnoty chemického složení – obráběný segment

## Atest - Q4 TASMAN

Popis vzorku										
SampleNo	Kovaný									
	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Ni %	Zn %	Ti %	Ag %
1.	0.904	0.300	2.050	0.664	0.499	0.058	<0.0020	0.0092	0.057	<0.00050
2.	0.867	0.281	1.996	0.661	0.498	0.058	<0.0020	0.0091	0.054	<0.00050
3.	0.975	0.306	2.181	0.668	0.518	0.056	<0.0020	0.0092	0.052	<0.00050
∅	<b>0.915</b>	<b>0.296</b>	<b>2.076</b>	<b>0.664</b>	<b>0.505</b>	<b>0.057</b>	<b>&lt;0.0020</b>	<b>0.0092</b>	<b>0.054</b>	<b>&lt;0.00050</b>
σ	0.055	0.013	0.095	0.0035	0.011	0.0012		0.00007	0.0025	
ν	6.011	4.392	4.576	0.527	2.178	2.105		0.761	4.630	
	B %	Ba %	Be %	Bi %	Ca %	Cd %	Co %	Ga %	In %	Li %
1.	0.00069	<0.0010	<0.00030	<0.0030	0.00098	<0.00050	<0.0010	0.0096	<0.0020	0.00013
2.	0.00048	<0.0010	<0.00030	<0.0030	0.00092	<0.00050	<0.0010	0.0097	<0.0020	0.00006
3.	0.00042	<0.0010	<0.00030	<0.0030	0.0011	<0.00050	<0.0010	0.0097	0.0030	0.00024
∅	<b>0.00053</b>	<b>&lt;0.0010</b>	<b>&lt;0.00030</b>	<b>&lt;0.0030</b>	<b>0.0010</b>	<b>&lt;0.00050</b>	<b>&lt;0.0010</b>	<b>0.0097</b>	<b>0.0023</b>	<b>0.00014</b>
σ	0.00014				0.00009			0.00007	0.00058	0.00009
ν	26.42				9.000			0.722	25.22	64.29
	Mo %	Na %	P %	Pb %	Sn %	Sr %	V %	Zr %	Sb %	Hg %
1.	<0.0010	<0.00050	<0.0020	<0.0050	0.0029	<0.0010	<0.0020	<0.0020	<0.0070	<0.0020
2.	<0.0010	<0.00050	<0.0020	<0.0050	0.0031	<0.0010	<0.0020	<0.0020	<0.0070	<0.0020
3.	<0.0010	<0.00050	<0.0020	<0.0050	0.0037	<0.0010	<0.0020	<0.0020	<0.0070	<0.0020
∅	<b>&lt;0.0010</b>	<b>&lt;0.00050</b>	<b>&lt;0.0020</b>	<b>&lt;0.0050</b>	<b>0.0032</b>	<b>&lt;0.0010</b>	<b>&lt;0.0020</b>	<b>&lt;0.0020</b>	<b>&lt;0.0070</b>	<b>&lt;0.0020</b>
σ					0.00042					
ν					13.13					
	Al %									
1.	95.41									
2.	95.53									
3.	95.19									
∅	<b>95.38</b>									
σ	0.172									
ν	0.180									

**Obr. 20** Naměřené hodnoty chemického složení – kovaný segment

## 4.2. Vyhodnocení zkoušky tvrdosti

V praxi se zapisuje hodnota tvrdosti, následuje označení HBW, dále pak průměr kuličky v milimetrech a velikost zatěžující síly v kilopondech. Při měření byl využit univerzální tvrdoměr EMCOTEST M4C 075/750, jež vyhodnocuje tvrdost prostřednictvím CCD kamery se zobrazením na grafickém LCD displeji.

Na povrchu analyzované součásti bylo provedeno 10 vtisků a spočítána průměrná hodnota se směrodatnou odchylkou. Naměřené hodnoty jsou patrné z tabulky 3. Při měření byl použit indentor ve tvaru kuličky o průměru  $D = 2,5$  mm, se zatížením 62,5 kp a dobou zatížení 15 s. K naměřeným tvrdostem se mi nepodařilo dohledat normované hodnoty tvrdostí, rozdíl mezi nimi je zanedbatelný, tudíž z tohoto měření není možné porovnávat mechanické vlastnosti materiálů.

Dle [26] je udávaná tvrdost pro Al slitinu EN AW 2017: 107 HBW 2,5/62,5. Experimentálně naměřená hodnota obráběného segmentu je o 24 HBW vyšší. Lze předpokládat, že tato skutečnost může být dána jiným způsobem zpracování. V práci [26] není uvedené konkrétní zpracování, stejně jako není známé u testovaného segmentu.

V kapitole 4.1. bylo uvedeno, že kovaný segment odpovídá chemickým složením AlCu<sub>2</sub>SiMn. Pro tuto slitinu nejsou k dispozici hodnoty tvrdosti, nicméně práce [27] uvádí experimentálně naměřená data pro ruský ekvivalent AK6: 150 HBW. Práce [27] uvádí tvrdost nekorektním zápisem bez dat průměru indentoru a bez hodnoty zatížení. Experimentálně naměřená hodnota kovaného segmentu se o 18 HBW nižší, než hodnota dle [27]. Tento rozdíl je možné si zdůvodnit neúplností informací práce [27] nebo podobně jako v předchozím odstavci. Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, tak současným ekvivalentním materiálem kovaného segmentu je EN AW 2014. Dle [26] se hodnoty tvrdostí EN AW 2014 shodují s experimentálně naměřenými hodnotami.

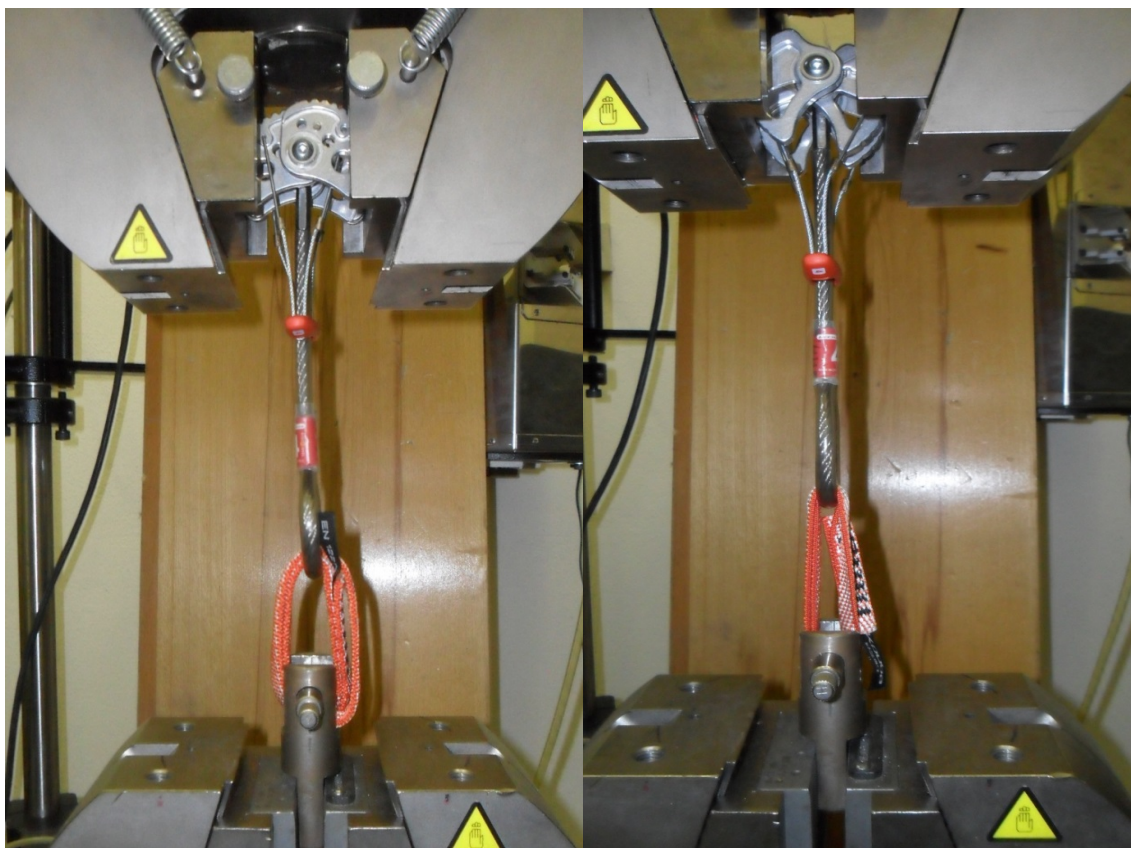
**Tabulka 3** – Porovnání hodnot tvrdosti segmentů

HBW 2,5/62,5	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	„ $\bar{x}$ “	$\sigma$
Kovaný vzorek	132	134	134	131	131	133	133	129	132	133	132	±1,45
Obráběný vzorek	132	133	131	131	133	131	129	129	133	132	131	±1,45

### 4.3. Vyhodnocení zkoušky tahem

Zkoušku tahem provádím primárně za účelem kontroly, zda friendy splňují pevnost, jež je udávaná výrobcem. Dále pro analýzu nejslabšího článku celého mechanismu s možnostmi optimalizace konstrukce. Zkouška byla provedena na univerzálním trhačím stroji INSTRON 5582 v laboratořích ÚMI ČVUT dle normy EN 12276 (kapitola 2.1.1.). Zde je potřeba upozornit na skutečnost, že zkouška tahem friendů nebyla v této laboratoři dosud prováděna.

Pro dodržení normy bylo nutné vysadit mezikus čelistí, aby bylo možné vklínit zkušební materiál. Pro zkoušku tahem byly použity friendy velikosti č.4. norma definuje provádět zkoušku v sevřené a rozevřené poloze. Z důvodu nedostatku zkušebního materiálu byla provedena zkouška v rozevřené poloze pro friend s kovanými segmenty a pro sevřenou polohu friend s obráběnými segmenty (*Obr. 21*). Sevřená poloha byla 55 mm a rozevřená 65 mm (kapitola 2.1.1., Norma EN 12276).



**a) rozevřená poloha**

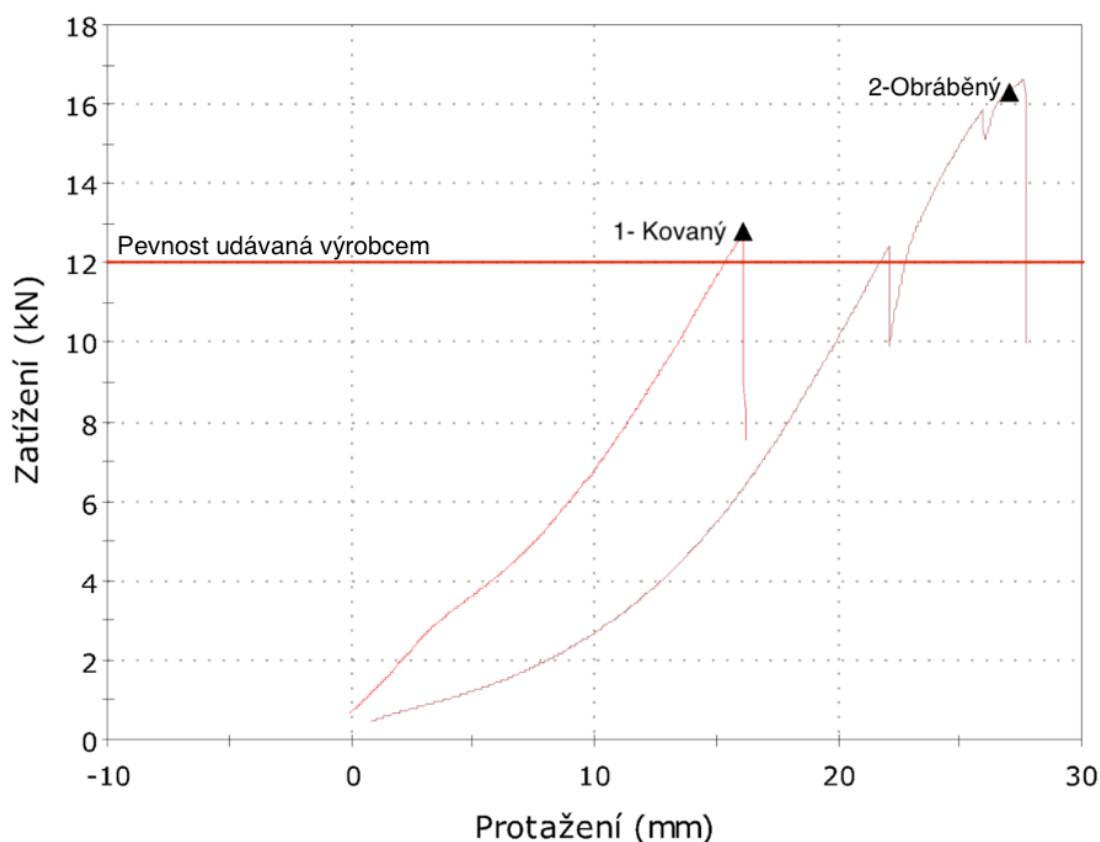
**b) sevřená poloha**

**Obr.21** Polohy upnutí friendů do univerzálního trhačím stroje



Výsledkem tahové zkoušky je, že oba zkušební materiály splnily pevnostní podmínku, která je výrobcem specifikována maximální zatěžovací silou 12 kN. Tuto skutečnost dokumentuje (Obr.22), ze kterého jsou odečteny hodnoty maximální zátěžné síly a maximálního protažení. U průběhu druhého obráběného friendu jsou patrné dva poklesy zatížení. Tuto skutečnost je možné vysvětlit prokluzem segmentů friendu a čelistí. Příčinou této situace mohl být vliv mastnoty, který snížil tření. Dále je patrné, že po prvním poklesu má průběh stejnou směrnici jako původní růst. Druhý pokles zatížení nastal při necelých 16 kN a je možné ho vysvětlit povolením spoje v oblasti nalisované objímky.

V obou případech nedošlo k lomu segmentu, ale k přetržení ocelového lanka. Z informací dostupných na internetu, kde jiní výrobci publikují výsledky a videa je patrné, že nejčastěji dochází k přetržení friendu vlivem 2 faktorů. V jednom případě dochází k přetržení ocelového lanka v oblasti lisovaného spoje. V druhém případě dochází k lomu segmentu. V horolezecké praxi častěji dochází k lomu segmentu, z důvodu nevhodného založení do skalní pukliny, kde se výstředníky nezatěžují rovnoměrně. V níže přiložené tabulce 4 jsou uvedeny hodnoty maximálních sil, jichž bylo dosaženo při přetržení a hodnota maximálního protažení.

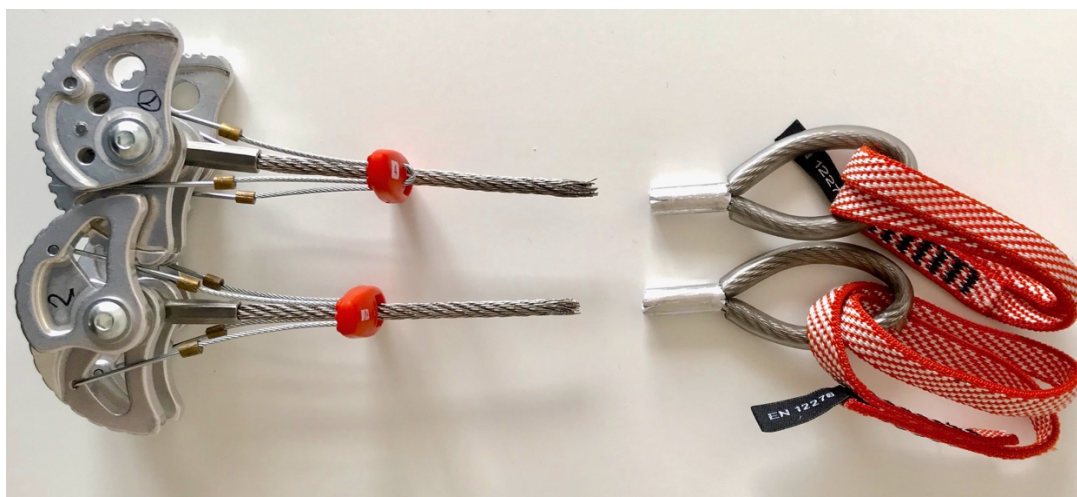


**Obr.22** Pracovní tahový diagram pro sledované friendy

**Tabulka 4** – Experimentálně zjištěné hodnoty pevnosti friendů

Zkušební těleso	Max. síla [kN]	Max. protažení [mm]
1 - Kovaný	12,8	16
2 - Obráběný	16,3	26

Jak již bylo uvedeno, v obou případech došlo k přetržení ocelového lanka v oblasti pevnostního oka (*Obr.23*), kde jsou lanka nalisována. Lze předpokládat, že nalisováním došlo ke zúžení průměru lanka, kde tím pádem vznikla oblast největší koncentrace napětí. Z výsledku tahových zkoušek friendů je sice patrné, že vyhovely předepsané normě, ale interpretace výsledků je složitá vzhledem k malému počtu vzorků a skutečnosti, že na maximální zátěžnou sílu mají vliv i další prvky friendu např. již zmíněné ocelové lanko. Nicméně, z porovnání zkoušek friendů po přetržení (*Obr.23*) je opravdu možné předpokládat, že v jejich případě je nejslabším místem objímka lanka.



**Obr.23** Přetržené friendy

## 5. Optimalizace friendů

Optimalizací lze chápat, jako proces výběru nejlepší varianty z množství dostupných jevů. Existuje řada variant, jak se postavit k optimalizaci vlastností friendu. První možností pevnostní optimalizace je zlepšení konstrukce spoje ocelového lanka v oblasti pevnostního oka. Druhou možností, jež by byla pro zadavatele BP zajímavější, je optimalizace konstrukce segmentů, z hlediska jejich odlehčení. Další variantou by mohlo být nahrazení hliníkových slitin lehčím materiálem, jež by vykazoval obdobné mechanické vlastnosti. Dále je proveden rozbor těchto možností.

## 5.1. Optimalizace spoje

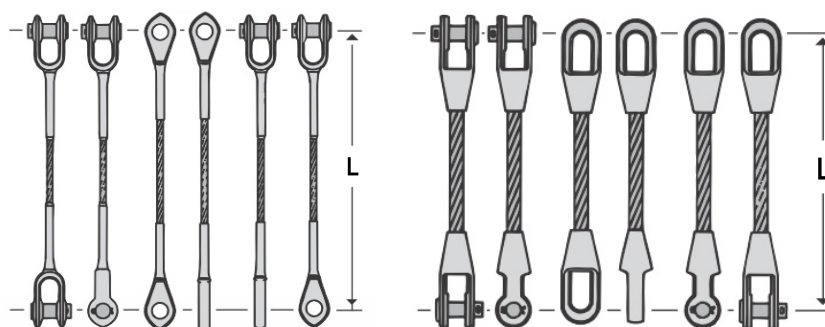
V konstrukci současného friendu je použita lisovaná hliníková objímka (*Obr.24*). Obrázek detailně dokumentuje místo, kde, jak již bylo uvedeno, došlo k přetržení friendu při zkoušce tahem.

Nalisovaný spoj je pevné spojení dvou součástí, kdy se využívá elastické a částečně i plastické deformace. Součásti jsou k sobě přitlačovány vlivem napětí, jež je způsobeno elastickými deformacemi. V důsledku třecích sil je možné součásti osově namáhat, důležité je však přesné sousední spojení. Nalisování je spolehlivé, jednoduché a jeho předpokladem je většinou válcový nebo kuželový nerozebíratelný spoj [28].



**Obr.24** Hliníková objímka friendu

Konstrukci ukončení ocelového lanka lze vyřešit například spojem se zalitou koncovkou dvousložkovým epoxidem Wirelock anebo spojem se zalisovanou koncovkou [29]. Příklady spojů jsou patrné z (*Obr.25*), nicméně se jedná pouze o teoretickou konstrukci, jež by bylo nutné otestovat.



**Obr. 25** Spoj se zalisovanou koncovkou (vlevo), spoj se zalitou koncovkou (vpravo) [29]

## 5.2. Optimalizace hmotnosti

Jak již bylo uvedeno, dalším pokrokem v konstrukci friendu by mohlo být, odlehčení nosné části Al segmentu. U dříve kovaných segmentů byly vrtané průchozí válcové díry, u současných třískově obráběných segmentů dochází k odlehčení frézováním oválných tvarů, ale v porovnání s konkurencí zahraničních firem je patrné, že váhu je stále možné redukovat (*Obr. 26*). Tento krok by byl možný pomocí metody konečných prvků. Metoda je oblastí analytické mechaniky, jejíž základem je přibližný výpočet reakcí poddajných těles na zatížení [30]. Na základě reakcí se dále mohou dimenzovat rozměrové parametry. Aplikace této metody a konkrétní simulace jsou nad rámec zadané BP.

Pokud by došlo k volbě lehčího materiálu, nabízejí se například hořčíkové slitiny. Hořčíkové slitiny se vyznačují nízkou měrnou hmotností, jsou zhruba o 40 % lehčí než hliníkové slitiny a mají podobné mechanické vlastnosti. Ačkoliv jsou hořčíkové slitiny dražší než hliníkové, tak existuje více faktorů, jež se projeví na finální ceně. Ve prospěch hořčíkových slitin hovoří jejich velmi dobrá obrobiteľnosť a levnější zpracování [31]. Hlavním negativem těchto slitin je elektrochemická koroze při kontaktu s většinou kovů a špatná odolnost vůči opotřebení. Těmto uvedeným negativním vlastnostem se dá předejít vhodnou povrchovou úpravou. V současné době jsou perspektivním materiálem v oblasti počítačového, automobilového, leteckého průmyslu, ale využití naleznou i ve sportovních potřebách [32].

Stejně jako u hliníkových slitin lze hořčíkové slitiny rozdělit na slévárenské a k tváření. Slitiny vhodné pro tváření se vyznačují hexagonální mřížkou a za normálních teplot mají pouze jeden skluzový systém [22]. S teplotou přesahující 220 °C jsou k dispozici další skluzové systémy, tváriteľnosť se zlepšuje. Nejčastější tvářecí teploty pro volné nebo zápusťkové kování se pohybují v rozmezí 200-300 °C. Slitiny vhodné pro tváření můžeme dle obsahu legujících prvků rozdělit do 3 skupin. Slitiny Mg-Al-Zn, Mg-Mn, Mg-Zn-Zr [33].



**Obr.26** Konstrukce konkurenčního friendu [34]

### 5.3. Shrnutí poznatků a doporučení pro výrobu

Zadavatel BP chtěl analyzovat vhodný materiál pro výrobu segmentů. Přikláněl se k volbě zápusťkového kování. Vzhledem k poznatkům, které jsem získal studií problematiky jsem došel k následujícím variantám.

Osobně se přikláním k volbě technologie tváření za studena. Polotovarem v tomto případě mohou být již válcované, zpevněné plechy. Stříhání bych prováděl na hydraulických lisech na jednu operaci. Pokud by existovala numerická simulace stříhu, přiklonil bych se k rozdělení na více operací. Nevýhodou této technologie je nutnost střížného nástroje na každou velikost segmentu. Na základě konzultace možností výroby v českobudějovické firmě, zabývající se lisováním, se cena za střížný nástroj na jednu velikost segmentu pohybuje v rozmezí 8 000 – 12 000 Euro. Při využití technologie „Fineblanking“, kdy vznikají minimální otřepy, je výstřížek skoro hotovým výrobkem. Následovalo by omílání pro sražení hran. Konkrétní popis technologie výroby by závisel na technické dokumentaci.

Při volbě zápusťkového kování, k němuž se zadavatel přiklání, bych postupoval následovně. Polotovarem by byly plechy, zvolil bych materiál EN AW 2014. Hlavní faktory ovlivňující tváření již byly uvedeny v kapitole 2.5.2., konkrétně jsou patrné z Obr.12 právě pro tuto hliníkovou slitinu EN AW 2014. Lze předpokládat, že náklady na výrobu zápusťky by byly obdobné, jako na výrobu střížného nástroje. Další náklady by byly závislé na kvalitě zápusťky.

## 6. Závěr

Na základě provedených experimentů a studia odborné uvedené literatury byly vyvozeny tyto závěry.

- Dle chemické analýzy je obráběný segment v souladu s tabulkovou hodnotou složení pro EN AW 2017 A. Materiál kovaného segmentu odpovídá chemickým složením hliníkové slitině AlCu2SiMn, specifikované v ČSN 42 4206. Norma byla zrušena. Nejbližším ekvivalentem je EN AW 2014.
- Chemické složení a způsob výroby neměl vliv na tvrdost testovaných segmentů.
- Při tahové zkoušce oba friendy splnily pevnostní podmínku, výrobcem specifikovanou maximální zátěžnou silou 12 kN. Pro friend s kovanými segmenty byla  $F_{max} = 12,8 \text{ kN}$  a pro friend s obráběnými segmenty byla  $F_{max} = 16,3 \text{ kN}$ .
- U obou případů došlo při tahové zkoušce k přetržení ocelového lanka v oblasti nalisování objímky.
- Byl proveden návrh vhodného materiálu a optimální technologie pro výrobu segmentů ve firmě Kouba Climbing
- Cíle práce byly splněny

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SCHUBERT, P. *Bezpečnost a riziko na skále a ledu*. Praha : Freytag & Berndt, 2011. ISBN 978-80-7316-312-9.
- [2] MACEK K., a ZUNA P. *Nauka o materiálu*. Praha : České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01507-6.
- [3] ŠVEC, P. *Konstruktivní materiály*. Bratislava : Nakladatel'stvo STU, 2010. ISBN 978-80-227-3386-1.
- [4] MAFFIA, E.G. *Aluminio y sus aleaciones*.  
[ing.unlp.edu.ar/catedras/M0624/descargar.php?secc=0&id=M0624&id\\_inc=2717](http://ing.unlp.edu.ar/catedras/M0624/descargar.php?secc=0&id=M0624&id_inc=2717).  
[Online] 2013. [Citace: 29. 04 2018.]
- [5] ÚŘEDNÍČEK, A. *Optimalizace tepelného zpracování hliníkových slitin*.  
[http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/25169/uredn%C3%ADcek\\_2013\\_bp.pdf?sequence=1](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/25169/uredn%C3%ADcek_2013_bp.pdf?sequence=1). [Online] 2013. [Citace: 7. 05 2018.]
- [6] KRUŽÍK, J. *Vliv mikrostruktury polotovaru na mechanické vlastnosti slitin Al-Mg-Si pro automobilový průmysl*. [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63329/F2-DP-2015-Altera-David-Altera%20David\\_Diplomova%20prace.pdf?sequence=-1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63329/F2-DP-2015-Altera-David-Altera%20David_Diplomova%20prace.pdf?sequence=-1&isAllowed=y). [Online] 2017. [Citace: 7. Květen 2018.]
- [7] HANDRK, J. *Pevnostní a materiálová analýza horolezeckých karabin*.  
<https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/3629?show=full>. [Online] Brno 2011. [Citace: 7. Květen 2018.]
- [8] DALIBOR, V. *Kovové materiály I*. Praha : Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
- [9] *Přehled mechanických a technologických vlastností*.  
<https://www.ehlinik.cz/prilohy/zakladni-technicke-informace.pdf>. [Online] [Citace: 9. Květen 2018.]
- [10] KRŮŽ, R. *Tabulky materiálů a předvýrobků pro strojírenství*. Ostrava : Montanex, 2002. ISBN 80-7225-017-5.
- [11] *Encyklopedie hliníku*. Děčín : Alcan Děčín Extrus, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
- [12] SKOČOVSKÝ, P., a PALČEK. *Konstruktivní materiály*. Žilina : EDIS - vydavatel'stvo ŽU, 2000. ISBN 80-7100-608-4.

- [13] NĚMEC M., ŠANOVEC J., a SUCHÁNEK J. *Základy technologie I*. Praha : Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03530-1.
- [14] VLASTIMIL, M. Nauka o materiálu. [http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/3-5\\_technologicke-vlastnosti.pdf](http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/3-5_technologicke-vlastnosti.pdf). [Online] 1997. [Citace: 7. Srpen 2018.]
- [15] KULHMAN, G.W. ASM handbbok. <https://materialsdata.nist.gov/bitstream/handle/11115/223/Forging%20of%20Aluminu%20Alloys.pdf?sequence=1>. [Online] 2005. [Citace: 24. 8 2018.]
- [16] KRAUS, V. *Povrchy a jejich úpravy*. Plzeň : Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-668-1.
- [17] MÁDL, J. *Technologie obrábění*. Praha : ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02-091-6.
- [18] MILDE, D. Optická emisní spektrometrie. <http://ach.upol.cz/user-files/intranet/vmach-03-1347906958.pdf>. [Online] 2005. [Citace: 23. Prosinec 2018.]
- [19] Jiskrový spektrometr Q4 tasman. [https://www.bas.cz/bruker-quantron/q4\\_tasman.php](https://www.bas.cz/bruker-quantron/q4_tasman.php). [Online] [Citace: 23. Prosinec 2018.]
- [20] SOBOTOVÁ J., a ČIŽMÁROVÁ E. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. Praha : České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [21] Technická měřidla a počítačové systémy. <http://www.tempos.cz/zkusebni-stroje/tvrdomery/tvrdomery-univerzalni>. [Online] [Citace: 23. Únor 2019.]
- [22] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu I*. Brno : CERM, 2001. ISBN 80-7204-193-2.
- [23] CHVOSTOVÁ, E. APLIKACE MINIATURIZOVANÝCH ZKUŠEBNÍCH TĚLES PŘI HODNOCENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ A ODOLNOSTI PROTI KŘEHKÉMU LOMU. <https://otik.uk.zcu.cz/handle/11025/24956>. [Online] 2016. [Citace: 25. Únor 2019.]
- [24] ČSN ISO 6892-1, *Zkoušení tahem: Část 1 Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha : Český normalizační institut, 2010.
- [25] PROAL. <http://www.proal.cz/info/424206.htm>. [Online] [Citace: 1. Březen 2019.]
- [26] STROJMETAL Aluminium forging. <https://www.strojmetal.cz/en/alloys>. [Online] [Citace: 14. Březen 2019.]
- [27] KASANA, S. USE OF AK6 ALUMINIUM FORGEABLE ALLOY FOR DEFENCE AND AEROSPACE. [https://www.researchgate.net/publication/321419385\\_USE\\_OF\\_AK6\\_ALUMINIUM\\_FORGEABLE\\_ALLOY\\_FOR\\_DEFENCE\\_AND\\_AEROSPACE\\_A\\_BRIEF\\_REVIEW\\_AB](https://www.researchgate.net/publication/321419385_USE_OF_AK6_ALUMINIUM_FORGEABLE_ALLOY_FOR_DEFENCE_AND_AEROSPACE_A_BRIEF_REVIEW_AB)



*OUT\_THE\_PROCESSING\_HEAT\_TREATMENT\_MECHANICAL\_PROPERTIES\_AND\_APPLICATIONS*. [Online] [Citace: 14. Březen 2019.]

[28] BOLEK A., a KOCHMAN J. *Části strojů. 1. svazek, 5. přeprac. vyd.* Praha : Nakladatelství technické literatury, 1989. ISBN 80-03-00046-7.

[29] Ocelová lana. <https://www.tedox.cz/vazaci-ocelova-lana>. [Online] [Citace: 25. Únor 2019.]

[30] ŠPANIEL M., a HORÁK Z. *Úvod do metody konečných prvků*. Praha : České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04665-4.

[31] KÖHLER, T. Použití slitin hořčíku.

[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=102970](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=102970).

[Online] [Citace: 14. Březen 2019.]

[32] KAŠPAROVÁ, E. Jediná slévárna hořčíkových slitin v ČR.

<https://www.mmspektrum.com/clanek/jedina-slevarna-horcikovych-slitin-v-cr.html>.

[Online] 12. Únor 2014. [Citace: 26. Únor 2019.]

[33] PTÁČEK, L. Slitiny hořčíku – současný stav vývoje a použití.

[http://metal2013.tanger.cz/files/proceedings/metal\\_01/papers/204.pdf](http://metal2013.tanger.cz/files/proceedings/metal_01/papers/204.pdf). [Online] 15-17.

5 2001. [Citace: 26. Únor 2019.]

[34] Black Diamond Equipment.

[https://eu.blackdiondequipment.com/en\\_CZ/climbing-cams-stoppers-nuts-](https://eu.blackdiondequipment.com/en_CZ/climbing-cams-stoppers-nuts-hexes/camalot-ultralight-BD262164_cfg.html#start=1)

[hexes/camalot-ultralight-BD262164\\_cfg.html#start=1](https://eu.blackdiondequipment.com/en_CZ/climbing-cams-stoppers-nuts-hexes/camalot-ultralight-BD262164_cfg.html#start=1). [Online] [Citace: 1. Březen

2019.]