

# Vliv teploty na mechanické vlastnosti slitiny AW 6082

## Bakalářská práce

*Studijní program:* B2301 – Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* 2301R000 – Strojní inženýrství  
*Autor práce:* **Jakub Bašus**  
*Vedoucí práce:* doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub Bašus**  
Osobní číslo: **S1400026**  
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojní inženýrství**  
Název tématu: **Vliv teploty na mechanické vlastnosti slitiny AW 6082**  
Zadávající 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. Rozdělení slitin hliníku, způsoby výroby a použití v průmyslové praxi.
2. Možnosti tepelného zpracování slitin hliníku pro zvýšení jejich mechanických vlastností. Vliv teploty na změnu mechanických vlastností kovových materiálů.
3. Testování vlastností materiálů pomocí statické zkoušky tahem a Charpyho rázové zkoušky v ohybu.
4. Experimentální zjištění vlivu teploty na změnu mechanických vlastností slitiny hliníku EN AW 6082 (statická zkouška tahem, Charpyho zkouška rázem v ohybu).
5. Vyhodnocení výsledků měření.
6. Závěr.

Rozsah grafických prací: **tabulky, grafy**  
Rozsah pracovní zprávy: **cca 30 stran**  
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] HOSFORD, W.F., CADDEL, R. *Metal Forming (Mechanics and Metallurgy)*. 3rd ed. New York: Cambridge University Press, 2007. s. 312. ISBN 978-0-521-88151-0.
- [3] PTÁČEK, L. et al. *Nauka o materiálu I*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademickénakladatelství CERM, 2003. s. 516. ISBN 80-7204-283-1.
- [4] POLMEAR, I. *Ligth Alloy - From traditional Alloys to Nanocrystals*. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. s. 421. ISBN 0-7506-6371-5.
- [5] TSCHAETSCH, H. *Metal Forming Practise (Processes Machines Tools)*. Berlin: Springer-Verlag, 2006. s. 405. ISBN-10: 3-540-33216-2.
- [6] MICHNA, Š., NOVÁ, I. *Technologie a zpracování kovových materiálů*. Prešov: Adin, 2008. s. 326. ISBN 978-80-89244-38-6.
- [7] MICHNA Š. a kol. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin s.r.o., 2005. 700 s. ISBN: 80-89041-88-4.
- [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] ČSN EN ISO 14556. *Ocel - Zkouška rázem v ohybu na kyvadlovém kladivu tyčí Charpy s V-vrubem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001. 18 s. Třídící znak 420380.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.**

Katedra strojírenské technologie

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Michaela Kolnerová, Ph.D.**


Katedra strojírenské technologie

Datum zadání bakalářské práce: **1. listopadu 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **1. února 2019**

  
prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan



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

V Liberci dne 1. listopadu 2017

## 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:

## **Anotace**

Bakalářské práce se zabývá vlivem teploty na mechanické vlastnosti slitiny EN AW6082. K posouzení vlivu teploty bylo vybráno pro zkušební vzorky rozmezí teplot  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Všechny zkušební vzorky byly zkoušeny mechanickými zkouškami a to statickou zkouškou tahem a Charpyho rázovou zkouškou v ohybu. Pro vyhodnocení vlivu teploty byly naměřené hodnoty použity pro Analýzu rozptylu a na konci práce byly diskutovány vlastní výsledky měření.

Klíčová slova: slitina EN AW 6082, zkouška tahem, Charpy, Anova, mechanické vlastnosti kovů

## **Annotation**

The bachelor thesis deals with the thermal and mechanical properties of the EN AW 6082 alloy. For the assessment of the temperature influence, the test samples were selected in the temperature range of  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ . All the test samples were tested by mechanical tests, that means by static pull test and by Charpy bending impact test. To measure the influence of temperature, the measured values were used for scattering analysis and at the end of the work the actual measurement results were discussed.

Key words: alloy EN AW 6082, static pull test, Charpy, Anova, mechanical properties of metal

## **Poděkování**

Na úvod své práce bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D. za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování. Dále bych chtěl poděkovat všem pedagogům a ostatním lidem, kteří mi pomohli při tvorbě této práce.

# OBSAH

Seznam obrázků .....	9
Seznam tabulek .....	10
Seznam použitých zkratk a symbolů .....	11
1 Úvod .....	14
2 Teoretická část .....	15
2.1 Hliník a jeho slitiny .....	15
2.1.1 Rozdělení Slitin Hliníku .....	17
2.1.1.1 Slévárenské slitiny .....	18
2.1.1.2 Slitiny určené k tváření .....	23
2.1.2 Slitina AW 6082 .....	27
2.2 Tepelné zpracování slitin hliníku .....	29
2.2.1 Žihání .....	29
2.2.2 Vytvrzování .....	32
2.3 Mechanické vlastnosti materiálu .....	36
2.3.1 Zkoušení mechanických vlastností .....	37
2.3.1.1 Statická zkouška tahem .....	37
2.3.1.2 Charpyho rázová zkouška v ohybu .....	40
3 Experimentální část .....	46
3.1 Statická zkouška tahem .....	46
3.1.1 Zkušební vzorky .....	46
3.1.2 Postup měření .....	47
3.1.3 Naměřené hodnoty .....	49
3.1.4 Vyhodnocení výsledků .....	50
3.1.5 Analýza rozptylu .....	51
3.2 Charpyho rázová zkouška v ohybu .....	54
3.2.1 Zkušební vzorky .....	54

3.2.2	Postup měření.....	57
3.2.3	Naměřené hodnoty.....	59
3.2.4	Vyhodnocení výsledků.....	61
3.2.5	Analýza rozptylu.....	62
4	Závěr.....	65
	Seznam použité literatury.....	67
	Seznam příloh.....	69



## Seznam obrázků

Obr. 2.1 Rozdělení slitin hliníku [7] .....	17
Obr. 2.2 Schematické rozdělení nejpoužívanějších slévárenských slitin [8] .....	19
Obr. 2.3 Binární diagram Al- Si s různými obsahy křemíku [11].....	20
Obr. 2.4 Fázový diagram Al-Mg [3] .....	21
Obr. 2.5 Schematické rozdělení hliníkových slitin určených k tváření [8] .....	24
Obr. 2.6 Binární diagram Al-Mn [3].....	25
Obr. 2.7 CHD diagramy slitiny EN AW 6082 [17].....	28
Obr. 2.8 Schéma rekrytalizačního žíhání .....	30
Obr. 2.9 Schéma stabilizačního žíhání.....	30
Obr. 2.10 Schéma žíhání ke snížení pnutí .....	31
Obr. 2.11 Schéma homogenizačního žíhání.....	31
Obr. 2.12 Změna rozpustnosti přísadového prvku v hliníku [12].....	32
Obr. 2.13 Schematické znázornění postupu precipitačního vytvrzování slitiny AlCu4 [13].....	33
Obr. 2.14 Vyloučení precipitační fáze [12].....	34
Obr. 2.15 Časová závislost mechanických vlastností [12] .....	35
Obr. 2.16 Univerzální trhací stroj TiniusOlsen [24] .....	37
Obr. 2.17 Tvar zkušebních tyčí pro statickou zkoušku tahem [23] .....	38
Obr. 2.18 Smluvní diagram napětí-deformace [26] .....	39
Obr. 2.19 Geometrie zkušebního tělesa s V-vrubem a U-vrubem [27].....	41
Obr. 2.20 Ustavení zkušebního tělesa pro Charpyho rázovou zkoušku v ohybu [22].....	41
Obr. 2.21 Charpyho rázové kladivo [29] .....	42
Obr. 2.22 Závislost vrubové houževnatosti na teplotě [30].....	42
Obr. 2.23 Průběh teplotní závislosti vrubové houževnatosti [30] .....	43
Obr. 2.24 Průběh teplotní závislosti vrubové houževnatosti dle tvaru a velikosti vrubu [30].....	44
Obr. 2.25 Orientace podélné osy zkušebního tělesa [32] .....	44
Obr. 3.1 Zkušební vzorek před a po statické zkoušce tahem.....	46
Obr. 3.2 Rozměry zkušebního tělesa pro statickou zkoušku tahem .....	46
Obr. 3.3 Zkušební zařízení TIRATEST 230 .....	48
Obr. 3.4 Prostředí systému LabNET TahTlak .....	48
Obr. 3.5 Sloupcový graf ukazující naměřené výsledné hodnoty statické zkoušky tahem .....	50
Obr. 3.6 Automatická vrubovačka vzorků LabTest VRE .....	54
Obr. 3.7 Rozměry zkušebního vzorku dle normy ČSN EN ISO 14556 .....	54
Obr. 3.8 Detail zkušebního vzorku s vrubem tvaru V.....	55
Obr. 3.9 Stanovení charakteristických hodnot síly .....	56

Obr. 3.10 Rázové kladivo LabTest CHK 450J-I .....	57
Obr. 3.11 Laboratorní mraznička ProfiMaster PMU 0450 .....	58
Obr. 3.12 Laboratorní sušárna Ecocell 55 .....	58
Obr. 3.13 Prostředí systému LabControl.....	58
Obr. 3.14 Sloupcový graf ukazující naměřené hodnoty maximální síly pro Charpyho rázovou zkoušku v ohybu.....	61
Obr. 3.15 Sloupcový graf ukazující naměřené hodnoty celkového průhybu a celkové práce pro Charpyho rázovou zkoušku v ohybu .....	61

## Seznam tabulek

Tab. 2.1 Vlastnosti hliníku v porovnání s mědí [3], [6].....	16
Tab. 2.2 Hliníkové slitiny určené k tváření zařazené do skupin [3] .....	23
Tab. 2.3 Chemické složení materiálu EN AW 6082 v hm. [%] [15].....	27
Tab. 2.4 Přehled mechanických vlastností některých stavů slitin [15] .....	27
Tab. 2.5 Přehled fyzikálních vlastností slitiny EN AW 6082 při teplotě 20 °C [15].....	28
Tab. 3.1 Základní parametry pro statickou zkoušku tahem .....	47
Tab. 3.2 Naměřené hodnoty statistické zkoušky tahem .....	49
Tab. 3.3 Přehled statistických hodnot statické zkoušky tahem .....	50
Tab. 3.4 Tabulka faktor pro hodnoty $R_{p0,2}$ .....	51
Tab. 3.5 Tabulka ANOVA pro hodnoty $R_{p0,2}$ .....	51
Tab. 3.6 Tabulka faktor pro hodnoty $R_m$ .....	52
Tab. 3.7 Tabulka ANOVA pro hodnoty $R_m$ .....	52
Tab. 3.8 Tabulka faktor pro hodnoty $A_{50mm}$ .....	53
Tab. 3.9 Tabulka ANOVA pro hodnoty $A_{50mm}$ .....	53
Tab. 3.10 Rozměry zkušební vzorku pro Charpyho rázovou zkoušku v ohybu dle normy ČSN EN ISO 14556 .....	55
Tab. 3.11 Tabulka rozměrů zkušební vzorku pro charpyho rázovou zkoušku v ohybu .....	56
Tab. 3.12 Sledované hodnoty pro Charpyho rázovou zkoušku.....	57
Tab. 3.13 Přehled naměřených statistických hodnot Charpyho rázové zkoušky v ohybu.....	59
Tab. 3.14 Naměřené hodnoty Charpyho rázovou zkouškou v ohybu .....	60
Tab. 3.15 Tabulka faktor pro hodnoty $F_m$ .....	62
Tab. 3.16 Tabulka ANOVA pro hodnoty $F_m$ .....	62
Tab. 3.17 Tabulka faktor pro hodnoty $W_t$ .....	63
Tab. 3.18 Tabulka ANOVA pro hodnoty $W_t$ .....	63

Tab. 3.19 Tabulka faktor pro hodnoty  $S_t$ ..... 64

Tab. 3.20 Tabulka ANOVA pro hodnoty  $S_t$ ..... 64

## Seznam použitých zkratk a symbolů

Označení	Význam	Jednotka
P	Hustota	[kg/m]
$\gamma$	Teplotní součinitel délkové roztažnosti	[1/K]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
G	Elektrická vodivost	[S/m]
T6	Precipitačně vytvrditelná slitina, zpracována žháním a následném umělém stárnutí	[-]
T5	Slitina po umělém stárnutí při nízkých teplotách bez předchozí homogenizace	[-]
T4	Slitina zpracována rozpouštěcím žháním s přirozeným stárnutím	[-]
T3	Slitina zpracována rozpouštěcím žháním, tvářením za studena a následném přirozeném stárnutí	[-]
T2	Slitina po ochlazení za zvýšené teploty tváření, tváření za studena a přirozeném stárnutí	[-]
T1	Slitinu po ochlazení za zvýšené teploty tváření a přirozeném stárnutí	[-]
O	Slitina, jejíž vlastnosti odpovídají žhánému stavu po tváření za tepla)	[-]
O1	Slitina, jejíž vlastnosti odpovídají stavu po žhání na odstranění vnitřního pnutí)	[-]
O2	Slitina po tepelně-mechanickém zpracování k zvýšení tvářitelnosti	[-]
O3	Slitina, jejíž vlastnosti odpovídají stavu po homogenizačním žhání	[-]
$\lambda$	Tepelná vodivost	[W/mK]
CHD	Anglická zkratka ContinuousHeatingDissolution	[-]
GP	Guinier-Prestonovy zóny	[-]
$R_m$	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
$R_{p0,2}$	Mez kluzu	[MPa]
HV	Tvrdość podle Vickerse	[-]

$L_0$	Počáteční měřená délka zkušební vzorku	[mm]
$S_0$	Počáteční průřezová plocha zkušební tělesa	[mm <sup>2</sup> ]
k	Součinitel proporcionality	[-]
$\bar{\sigma}$	Skutečné napětí	[MPa]
$\sigma$	Smluvní napětí	[MPa]
$\Delta L$	Absolutní prodloužení	[mm]
F	Zatěžující síla	[N]
$\varepsilon$	Poměrné prodloužení	[-]
$\varepsilon_p$	Plastická deformace	[%]
A	Tažnost	[%]
Z	Kontrakce	[%]
$S_u$	Průřez zkušební tělesa v místě lomu	[mm <sup>2</sup> ]
$R_a$	Povrchová drsnost	[ $\mu\text{m}$ ]
$KC_{stř}$	Střední hodnota vrubové houževnatosti	[J/cm <sup>2</sup> ]
$KC_{max}$	Maximální hodnota vrubové houževnatosti	[J/cm <sup>2</sup> ]
$KC_{min}$	Minimální hodnota vrubové houževnatosti	[J/cm <sup>2</sup> ]
$t_p$	Přechodová teplota	[°C]
$L_t$	Celková délka zkušební vzorku	[mm]
$L_c$	Zkoušená délka zkušební vzorku	[mm]
$D_0$	Výchozí průměr zkušební tělesa	[mm]
$A_{50mm}$	Celková tažnost	[%]
RT	Pokožová teplota	[°C]
$L_u$	Konečná měřená délka po lomu	[mm]
A	Hladina významnosti	[-]
$H_0$	Hypotéza pro analýzu rozptylu	[-]
$H_1$	Negace hypotézy $H_0$	[-]
T (F)	Testové kritérium	[-]
$F_{krit}$	Kritická hodnota testového kritéria	[-]
L	Délka zkušební vzorku pro Charpyho rázovou zkoušku	[mm]
H	Výška zkušební vzorku pro Charpyho rázovou zkoušku	[mm]
W	Šířka zkušební vzorku pro Charpyho rázovou zkoušku	[mm]
$F_a$	Velikost síly při zastavení trhliny	[N]
$F_{gy}$	Síla na mezi makroplastických deformací	[N]
$F_{iu}$	Velikost síly při iniciaci trhliny	[N]

$F_m$	Maximální síla	[N]
$S_{By}$	Velikost průhybu odpovídající okamžiku dosažení meze makroplastických deformací	[mm]
$S_{iu}$	Velikost průhybu odpovídající okamžiku iniciace trhliny	[mm]
$S_a$	Velikost průhybu odpovídající okamžiku zastavení trhliny	[mm]
$S_t$	Celkový průhyb	[mm]
$W_s$	Práce odpovídající okamžiku zastavení trhliny	[J]
$W_{iu}$	Práce odpovídající okamžiku iniciace trhliny	[J]
$W_t$	Celková nárazová práce	[J]
$W_m$	Práce do maximální síly	[J]
$KV$	Absorbovaná práce	[J/cm <sup>2</sup> ]
$v$	Zatěžovací rychlost	[m/s]

# 1 Úvod

Hliník patří mezi lehké kovy, dobře odolává korozi a má dobrou elektrickou i tepelnou vodivost. Jedná se o stříbřitě bílý kov a je třináctým prvkem v periodické tabulce prvků.

Hliník je třetím nejvíce zastoupeným prvkem v zemské kůře tvořící 7,5 – 8,3 % zemské kůry. Snadno se váže s jinými prvky, a proto se čistý hliník v přírodě nevyskytuje. Od 19. století, kdy byl tak vzácným kovem, že se používal jako šperk, se stal zcela běžným a v celé řadě odvětví průmyslu nepostradatelným kovem. S další zvyšující se výrobou hliníku a jeho klesající cenou se postupně rozšiřovalo i jeho použití a v průběhu 20. století se stal hliník se svými slitinami nejpoužívanějším neželezným konstrukčním kovem. [4]

Hliník a jeho slitiny nabízejí nízkou měrnou hmotnost spolu s dobrými pevnostními charakteristikami. Pokud neobsahují měď, velmi dobře odolávají korozi v atmosféře a látkám kyselé povahy. V ochranné atmosféře se dobře svařují a mají dobrou tepelnou i elektrickou vodivost. K nedostatkům slitin hliníku patří jejich nízká tvrdost, což znamená snadné poškození povrchu a obtížné třískové obrábění. Dalším problémem je napadení slitin elektrochemickou korozí, jestliže jsou v konstrukci ve vodivém kontaktu s ostatními kovy s výjimkou zinku a kadmia. V současné době se vývoj slitin hliníku zaměřuje především na zlepšování mechanických vlastností již existujících slitin. [3]

V této bakalářské práci bude hodnocen vliv teploty na mechanické vlastnosti slitiny AW 6082 pomocí statické zkoušky tahem a Charpyho rázové zkoušky v ohybu. Pro ověření, zda má teplota vliv na mechanické vlastnosti bude použita Analýza rozptylu (ANOVA), což je metoda matematické statistiky, která umožňuje ověření statistické významnosti některého znaku na hodnotu náhodné veličiny. V tomto případě se jedná o vliv teploty na mechanické vlastnosti zkušební vzorku.

## 2 Teoretická část

V teoretické části jsou popsány základní vlastnosti hliníku a jeho slitin, jejich rozdělení, způsoby výroby a použití v průmyslové praxi. Dále jsou zde popsány možnosti tepelného zpracování pro zvýšení jejich mechanických vlastností a testování vlastností materiálu pomocí statické zkoušky tahem a Charpyho rázové zkoušky v ohybu, které byly použity v experimentální části.

### 2.1 Hliník a jeho slitiny

Hliník patří mezi nejběžnější technické kovy. Krystalizuje v kubické plošně centrované mřížce. Teplota tavení je 660 °C a vyniká nízkou měrnou hmotností a velmi příznivým poměrem pevnosti k měrné hmotnosti. [3]

Vyrábí se v různé čistotě jako hliník prvního tavení (ze surovin) nebo hliník druhého tavení, tj. přetavováním odpadu. Čistota běžně vyráběného hliníku se pohybuje od 99 % do 99,9 %. V čistém stavu má velmi dobrou elektrickou a tepelnou vodivost. Při čistotě 99,9 % lze zpevněním dosáhnout pouze pevnosti 120 MPa, zatímco při běžné technické čistotě 99,5 % lze zpevnit až na 200 MPa.

Hliník má dobrou odolnost proti korozi, která je zajišťována vznikem tenké povrchové vrstvy  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , přičemž korozivzdornost je tím vyšší, čím vyšší je jeho čistota. Tloušťka oxidické vrstvy na povrchu součásti je za normální teploty 10 nm. Oxidická vrstva brání hloubkové oxidaci a zajišťuje velmi dobrou odolnost proti povětrnostním vlivům. Chemická odolnost ve vodných roztocích je závislá na pH elektrolytu. Výborná chemická odolnost je v rozmezí pH 4,5 – 8,5. V technicky čistém hliníku mezi hlavní nečistoty patří železo, křemík, měď, mangan, zinek a titan. Například křemík a železo vytvářejí s hliníkem křehké sloučeniny, které nepříznivě ovlivňují jeho mechanické vlastnosti. [1], [2]

Významnými fyzikálními vlastnostmi hliníku jsou vysoká tepelná a elektrická vodivost. Tepelná vodivost čistého hliníku při teplotě 20 °C dosahuje  $235 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Součinitel elektrické vodivosti hliníku s čistotou 99,9 % je při normální teplotě  $2,6 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ , což je asi 60 % elektrické vodivosti mědi. Součinitel tepelné roztažnosti za normální teploty je přibližně  $23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

Mechanické vlastnosti čistého hliníku jsou špatné. Pevnost v tahu je pod 100 MPa a tvrdost 20 – 30 HB. Porovnání některých fyzikálních a mechanických vlastností s mědí je v tab. 2.1. Plastické vlastnosti jsou dobré díky krystalizaci v kubické plošně centrované mřížce. Jako konstrukční materiál je čistý hliník prakticky nepoužitelný. [4], [9]

Tab. 2.1 Vlastnosti hliníku v porovnání s mědí [3], [6]

	hliník	měď
Hustota $\rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$	2 699	8 890
Teplotní součinitel délkové roztažnosti $\gamma \left[ \frac{1}{K} \right]$	$23,8 \cdot 10^{-6}$	$16,4 \cdot 10^{-6}$
Modul pružnosti v tahu E [MPa]	70 103	130 000
Bod tání [°C]	660	1084,5
Elektrická vodivost $G \left[ \frac{S}{m} \right]$	$37,7 \cdot 10^6$	$6,07 \cdot 10^7$

Hliník se zpracovává hlavně tvářením, svařováním, lepením, slitiny sléváním a obráběním. Tvářením větších polotovarů se provádí za tepla (450 až 500 °C). Při intenzivním tvářením za tepla dochází ke zpevňování a je třeba zařadit rekrystalizační žíhání při teplotách 340 až 380 °C.

Svařování hliníku a jeho slitin se provádí nejčastěji v ochranné atmosféře argonu nebo pod speciálními tavidly. Čistý hliník je špatně slévatelný, používá se pro výrobu odlitků jen tehdy, když záleží na dobré vodivosti odlitku. Odlévá se hlavně ve vakuu nebo odstředivě. Obrobitelnost hliníku není dobrá, tvoří dlouhé a měkké třísky, takže se nehodí pro práci na automatech.

Hliník je na vzduchu stálý, neboť se na jeho povrchu vytváří tenká vrstva oxidu hlinitého, která brání další oxidaci. Tuto vrstvu je možno vytvářet i uměle (tzv. eloxování) a eventuálně ji i barvit. Poměrně dobře odolává mořské vodě, neutrálním nebo oxidačním roztokům soli a koncentrované kyselině dusičné, částečně se rozpouští v kyselině sírové. Koroduje v alkalických prostředích, například v roztocích hydroxidů nebo čpavku. [5], [2]

Hliník tvoří s většinou přísadových prvků tuhé roztoky. Maximální rozpustnost v tuhém stavu je při eutektické teplotě, s poklesem teploty pak rozpustnost klesá a při teplotě okolí je ve většině případů zanedbatelná. Technicky nejvýznamnější jsou slitiny s křemíkem, manganem, hořčíkem, niklem a mědí. Běžné jsou však i slitiny ternární (mají tři složky). Malou přísadou některých prvků jako je titan, molybden, chrom, nebo olovo můžeme ovlivnit některé vlastnosti slitin. Tyto přísadové prvky způsobují ve slitinách hliníku zvýšení pevnosti. Ke zvýšení pevnosti může dojít vyloučením tvrdé fáze již při tuhnutí slitiny nebo přítomností prvku v tuhém roztoku. V důsledku zvyšování pevnosti dochází většinou k snížení tvárnosti. Nepříznivý vliv na tvárnost má obzvláště železo, jehož obsah ve slitinách musí být na nízké úrovni.

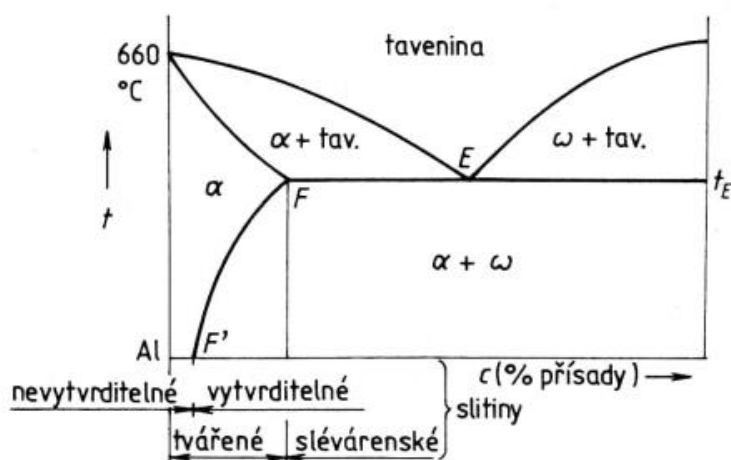


Naopak příznivý vliv na tvárnost i houževnatost má nikl a mangan, který kompenzuje škodlivý vliv železa. Měď a železo nepříznivě ovlivňují korozní odolnost, naopak příznivý vliv má mangan, hořčík, křemík, zinek a nikl. [1], [3], [5]

Je samozřejmostí, že hliník a jeho slitiny vzhledem ke svým vlastnostem našly uplatnění ve všech oblastech lidské činnosti. [5]

### 2.1.1 Rozdělení Slitin Hliníku

Slitiny hliníku lze rozdělit podle různých kritérií. Nejčastější a základní rozdělení je podle způsobu zpracování a to na dvě velké skupiny – slitiny hliníku určené k tváření a slévárenské slitiny. Dalším často používaným kritériem pro rozdělení hliníkových slitin je jejich schopnost zlepšit mechanické vlastnosti (zvýšit tvrdost a pevnost) tepelným zpracováním tzv. vytvrzováním. Tato schopnost úzce souvisí s chemickým složením slitin, tedy jejich polohou v rovnovážném diagramu dané odpovídající soustavy a dále je podmíněná dostatečným přesycením tuhého roztoku přísadovými prvky, dosahovaném při rychlém ochlazení slitin z oblasti existence tuhého roztoku  $\alpha$ . Tento způsob klasifikace je ve zjednodušené formě pro binární slitiny vyjádřen schematicky na obr. 2. 1. [7], [8]



Obr. 2.1 Rozdělení slitin hliníku [7]

### 2.1.1.1 Slévárenské slitiny

Mechanické vlastnosti odlitků jsou podstatně nižší oproti tvářeným výrobkům. Dosahovaná mez pevnosti se pohybuje maximálně do hodnot 250MPa. V dnešní době se nejčastěji používají slitiny hliníku s křemíkem, které jsou označovány jako siluminy. K méně používaným patří slitiny soustavy hliník-měď a hliník-hořčík.

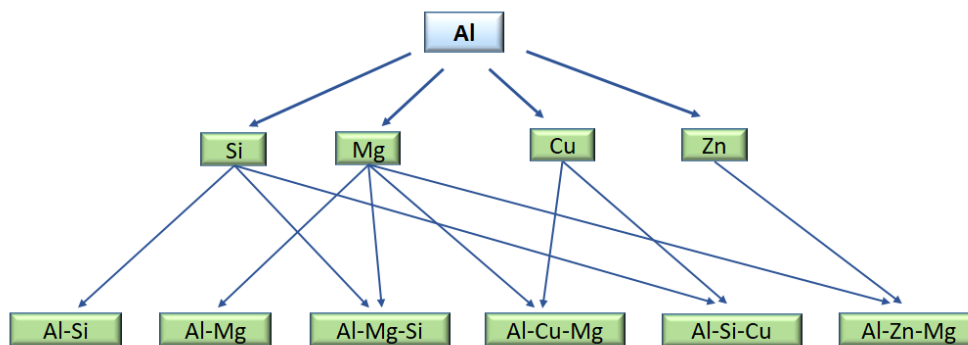
Slévárenské slitiny mají na rozdíl od tvářených vyšší obsah legujících prvků, což zaručuje dobré slévací vlastnosti, i když větší obsah intermetalických fází zhoršuje tvářitelnost těchto slitin. To lze zlepšit získáním jemnozrnné struktury rychlejším tuhnutím, nebo očkovaním taveniny před odlitím přísadami, způsobujícími přechlazení taveniny. [1], [3], [10]

Slitiny hliníku mají vůči slévárenským slitinám z jiných kovů řadu výhod, které lze formulovat následovně:

- dobrá slévatelnost, která se výrazně zlepšuje se zvyšujícím se podílem příslušného eutektika podle chemického složení
- nízká teplota tavení
- malý interval krystalizace
- obsah vodíku v odlitku, který je jediným rozpustným plynem v hliníku. Lze minimalizovat vhodnými technologickými podmínkami
- dobrá chemická stabilita (odolnost vůči korozi)
- dobré povrchové vlastnosti odlitku
- u většiny slitin je nízká náchylnost k tvorbě trhlin za tepla

Slévárenské slitiny jsou určeny k výrobě tvarových odlitků litím:

- do písku (vznik hrubé struktury, nejnižší pevnostní charakteristika)
- do kovových forem (vznik jemné struktury)
- nebo tlakově (vznik jemné struktury)



Obr. 2.2 Schematické rozdělení nepoužívanějších slévárenských slitin [8]

### Slitiny typu Al-Si

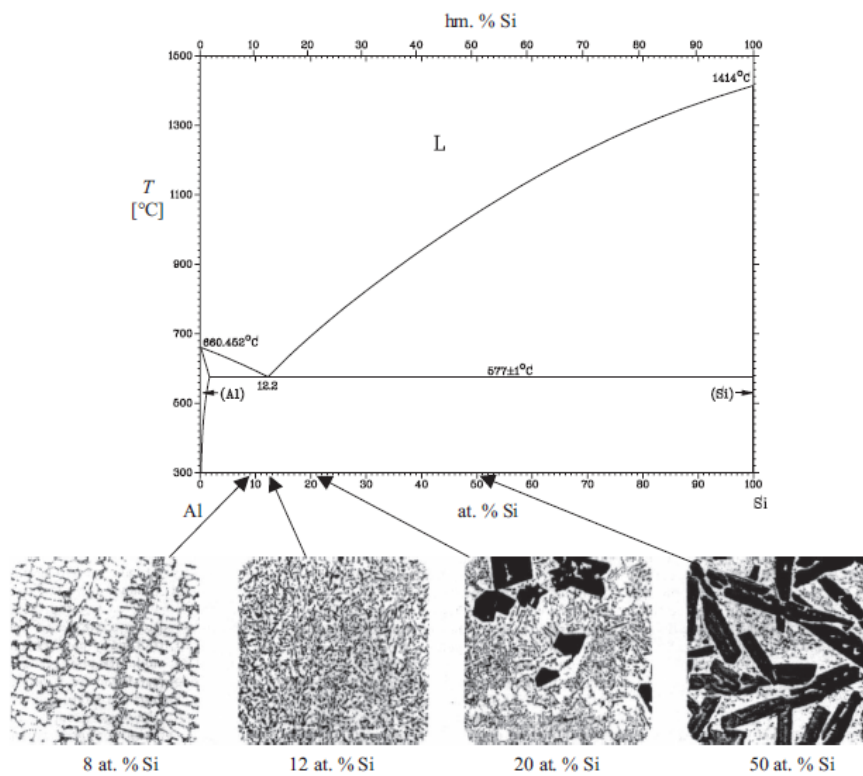
Slévárenské slitiny hliníku a křemíku jako hlavního legujícího prvku, obvykle označovány jako Siluminy, patří k nejvýznamnějším slitinám. Jsou značně houževnaté a zejména slitiny s nižší tvrdostí se obtížně obrábějí. K přednostem těchto slitin, patří dobrá odolnost proti korozi a dobré slévárenské vlastnosti. Tyto slitiny mají uplatnění především v automobilovém a leteckém průmyslu. Některé automobilové součásti se v současnosti odlévají výhradně z těchto hliníkových slitin (např. bloky motorů, písty, ojnice, chladiče, převodové skříně apod.). [3]

Slitiny Al-Si krystalizují podle rovnovážného diagramu eutektického typu s omezenou rozpustností křemíku v hliníku (obr. 2.3). Eutektická reakce ( $L \rightarrow \alpha + \beta$ ) probíhá při teplotě  $577 \pm 1^\circ\text{C}$  a obsahu až 12,6 % křemíku v eutektiku. Fáze  $\alpha$  je substitučním tuhým roztokem křemíku v hliníku s maximální rozpustností 1,65 % křemíku při eutektické teplotě  $577^\circ\text{C}$  a 0,05 až 0,1 % křemíku při teplotě  $200^\circ\text{C}$ . V binárních soustavách představuje eutektikum směs substitučního tuhého roztoku  $\alpha$  a krystaly téměř čistého eutektického křemíku (fáze  $\beta$ ), vznikající přímo z taveniny při eutektické přeměně.

Podle obsahu křemíku v hliníku je můžeme rozdělit:

- podeutektické se strukturou ( $\alpha + E$ ) s obsahem křemíku pod 12,6 %
- eutektické se strukturou (E) s obsahem křemíku okolo 12,6 %
- nadeutektické se strukturou (E+ Si) s obsahem křemíku nad 12,6 %

Množství, tvar, velikost a rozložení volného křemíku úzce souvisí s mechanickými vlastnostmi binárních slitin. Fáze  $\alpha$  je měkká, houževnatá a tvoří souvislou složku eutektika, které obsahuje okolo 90 %  $\alpha$  fáze a 10 % křemíku. Přítomné eutektikum v množství 40 až 75 % dává slitinám Al-Si nejen výbornou zabíhavost, ale také snižuje jejich lineární smrštění a sklon k tvorbě trhlin za tepla i sklon ke vzniku mikropórovitosti. [10], [3]



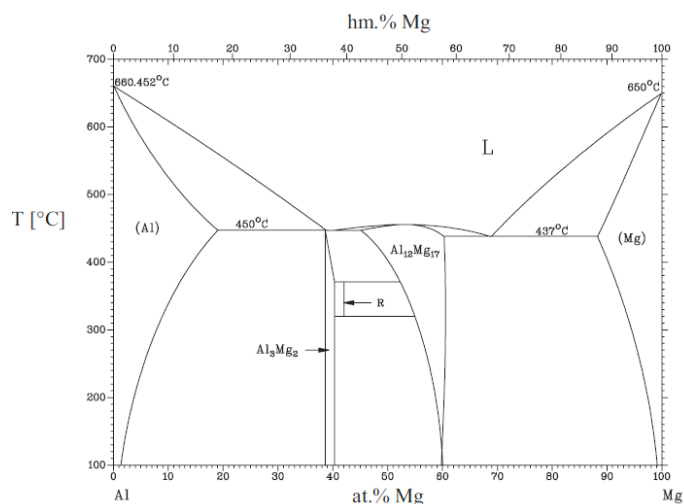
Obr. 2.3 Binární diagram Al- Si s různými obsahy křemíku [11]

Strukturu a vlastnosti slévárenských slitin lze ovlivnit úpravami tekutého kovu, spočívající v přidání malého množství vhodně zvolené látky, která ovlivní proces krystalizace. Tyto úpravy lze rozdělit:

- **očkování**, kterým se zjemňují primární krystaly záměrným vnášením zárodků krystalů a dochází ke zjemnění struktury.
- **modifikování**, kterým se ovlivňuje způsob růstu krystalizačních zárodků a dochází k morfologickým změnám vyloučených fází.

## Slitiny typu Al-Mg

Používají se v případech, kdy se vyžaduje vysoká odolnost proti korozi, zvláště proti mírnému alkalickému prostředí a proti mořské vodě, např. při stavbě lodí, v chemickém průmyslu nebo v potravinářství. V porovnání se Siluminy mají horší slévárenské vlastnosti, a proto se obtížněji odlévají. Tyto slitiny jsou dobře lešitelné, z toho důvodu jsou vhodné pro dekorativní účely. Lešitelnost je tím lepší, čím nižší je obsah křemíku. Výborně se eloxují (eloxováním se dále zlepšuje odolnost proti korozi). Značné naplynění a oxidace při tavení, lití a krystalizaci jsou příčinou jejich horších slévárenských vlastností, větší pórovitostí a snížené těsnosti odlitků. Příznivou vlastností těchto slitin je vynikající obrobitelnost. Rovnovážný fázový diagram je na obr. 2. 4. [3], [11]



Obr. 2.4 Fázový diagram Al-Mg [3]

Rozsah výroby odlitků ze slitin Al-Mg je velmi malý a důvodem pro jejich volbu je pouze korozní odolnost a možnost dosažení výborného vzhledu povrchu. V jiných případech se raději volí slitina typu Al-Si. [12]

## Slitiny typu Al-Cu-Mg

Mají velmi dobré mechanické vlastnosti, ale jejich odolnost proti korozi je nízká. Jednotlivé přísady se ve slitinách vzájemně ovlivňují, což se projeví na konečných vlastnostech těchto slitin. Měď je udržována v rozmezí 4 až 4,8 hm. %. Slitiny, u kterých je obsah mědi snížen přibližně o polovinu uvedeného rozmezí, má nižší pevnost, naopak tvárnost v tomto stavu je velmi dobrá. Hořčík je nezbytnou přísadou, která zlepšuje možnosti precipitačního vytvrzování a zároveň působí na zvýšení pevnosti po vytvrzování. Jeho množství se pohybuje v rozmezí od 0,4 do 1,8 hm. % dle druhu slitiny. [3],[12]

### **Slitiny typu Al-Mg-Si**

Tyto slitiny mají velmi nízký obsah mědi, tudíž se vyznačují dobrou korozní odolností. Jsou dobře tvárné i svařitelné. Na rozdíl do slitin Al-Mg je lze tepelným zpracováním vytvrdit. Pevnost této slitiny je po precipitačním vytvrzení a pod deformaci za studena okolo 400 MPa. Jejich uplatnění je zejména v letectví, stavebnictví nebo v bytové architektuře. [7], [10]

### **Slitiny typu Al-Si-Cu**

Jsou to takzvané speciální siluminy. Přísady hořčíku a mědi mají největší vliv na zlepšení mechanických vlastností a díky tomu se dají vytvrzovat. Přítomná měď zlepšuje jejich vlastnosti za zvýšených teplot, avšak působí na zhoršení jejich odolnosti proti korozi. Tyto slitiny lze mechanicky zatěžovat až do teplot 250 až 275 °C. Používají se pro výrobu nepropustných odlitků, jako jsou armatury benzinových motorů nebo karburátory. Slévárenské vlastnosti těchto speciálních siluminů jsou však horší než u binárních siluminů (Al-Si). [3], [7]

### **Slitiny typu Al-Zn-Mg**

Obsahují kolem 6 % zinku a 0,5 % manganu, v některých případech také chrom, měď nebo titan. Výhodou této slitiny je dobrá korozivzdornost, obrobitelnost a dají se vytvrzovat i za pokojové teploty. Nejsou dobře slévatelné, používají se zejména na odlitky, které se zpracovávají dodatečně pájením. [10]

### 2.1.1.2 Slitiny určené k tváření

Tvářené slitiny mají obsah legujících prvků obvykle v rozsahu tuhého roztoku, většina slitin je málo legovaná s obsahem legujících prvku do 10 %. Díky moderním technologiím se v dnešní době aplikují pro tváření i slitiny, které se dříve aplikovaly pouze pro výrobu odlitků. Hliníkové slitiny určené k tváření lze zařadit dle EN 573-1 do skupin viz tabulka 2. [3], [13]

Tab. 2.2 Hliníkové slitiny určené k tváření zařazené do skupin [3]

Hlavní legující prvek	Označení Série	Charakteristika
Hliník čistoty minimálně 99,00 %	1000	V oblastech, kde se požadují vysoké hodnoty fyzikálních vlastností. Použití v elektrochemickém a chemickém průmyslu.
Měď	2000	Jsou tepelně zpracovatelné v tomto stavu lze dosáhnout maximálních pevnostních vlastností. Špatná odolnost proti korozi.
Mangan	3000	Nejsou tepelně zpracovatelné. Jejich aplikace je především v oblasti výměníku tepla a v architektuře.
Křemík	4000	Většinou nejsou tepelně zpracovatelné. S obsahem Si do 12 % se aplikují při sváření (svářecí dráty).
Hořčík	5000	Aplikován především v potravinářském průmyslu, lodní dopravě, architektuře a komponentech pro dopravu.
Hořčík a křemík	6000	Výborná schopnost ke tváření, svařitelnost, odolnost vůči korozi, mechanická obrobiteľnosť. Použití v oblasti sportovních potřeb, architektury nebo v segmentech mostních konstrukcí
Zinek	7000	Po tepelném zpracování dosahují nejvyšších pevnostních vlastností, ale zároveň mají špatnou odolnost vůči korozi. Použití v leteckém a automobilovém průmyslu.

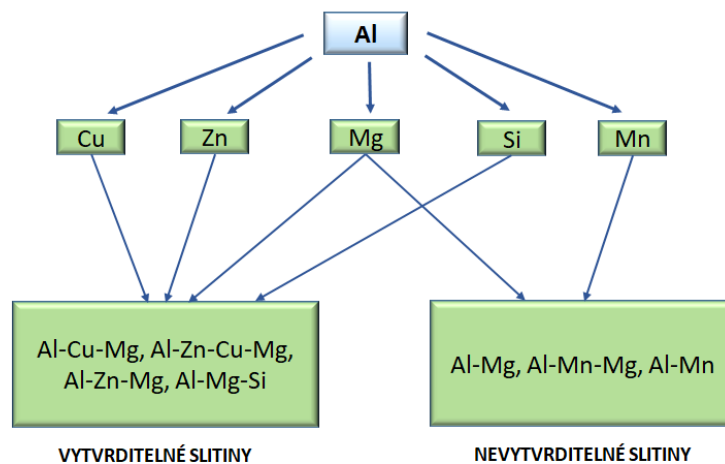
Nejběžnějším způsobem rozdělení je do dvou podskupin:

- **Nízko pevnostní slitiny s dobrou odolností proti korozi**

Jejich předností je dobrá tvářitelnost, svařitelnost, odolnost proti vibračnímu zatížení a dobrá lomová houževnatost. Na druhou stranu je nelze tepelným zpracováním zpevnit (vytvrdit). Tyto slitiny neobsahují měď, a proto mají dobrou odolnost proti korozi i bez povrchové ochrany. Do této podskupiny patří slitiny typu Al-Mg, Al-Mn, Al-Mg-Mn.[8], [13]

- **Slitiny s vyšší a vysokou pevností, avšak s nízkou odolností proti korozi**

Nejvíce používané materiály z této podskupiny jsou slitiny Al-Cu-Mg, označované jako Duraly. Po vytvrzení tepelným zpracováním dosahují značné pevnosti ( $R_m$  až 530 MPa). Jejich předností je přirozené stárnutí, nevýhodou je nízká odolnost proti korozi, proto se plechy plátují tenkou vrstvou čistým hliníkem, aby došlo ke zvýšení korozní odolnosti.[8], [13]



Obr. 2.5 Schematické rozdělení hliníkových slitin určených k tváření [8]

### ***Nevytvrditelné slitiny***

U těchto slitin nelze mechanické vlastnosti vytvrzováním příliš zlepšovat. V porovnání s hliníkem jejich vyšší pevnost souvisí zejména se substitučním zpevněním tuhého roztoku. Zvýšení pevnosti lze dosáhnout pouze tvářením za studena, kdy dochází k deformačnímu zpevnění (deformace krystalové mřížky a vznik překážek pro omezení pohybu dislokace). Do této skupiny patří slitiny typu Al-Mg, Al-Mn a Al-Mg-Mn. [13], [14]

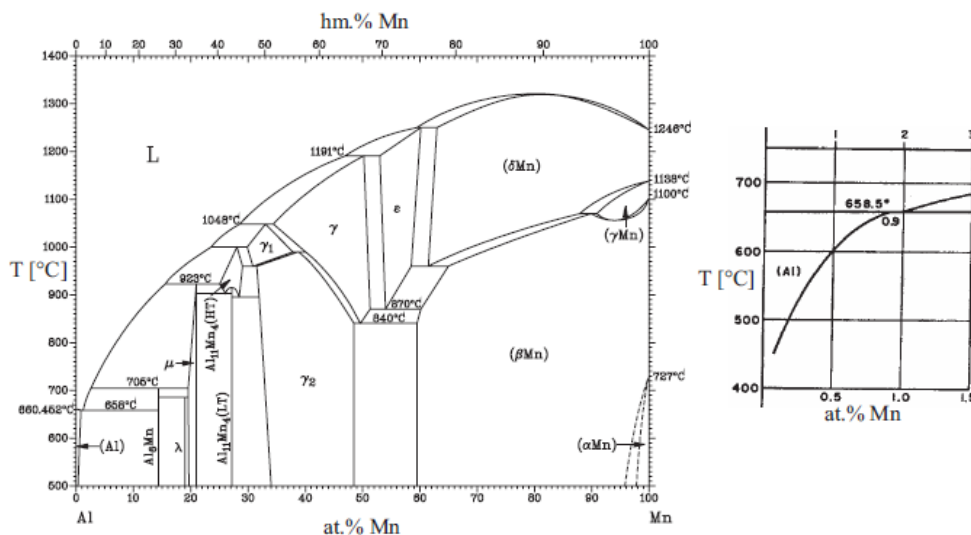


## Slitiny typu Al-Mg

Jsou základem skupiny tepelně nezpevňovaných slitin. Přidaný hořčík zvyšuje pevnost, ale snižuje tvárnost. Do obsahu 2 % hořčíku je ještě tvárnost velmi dobrá, při větších přídavcích tvárnost rychle klesá, ale roste korozní odolnost. Nelze je tepelným zpracováním podstatně zpevnit (vytvrdit). Předností je dobrá svařitelnost, tvářitelnost a dobrá lomová houževnatost. Pevnost těchto slitin lze zvýšit tvářením za studena (až 400 MPa). Tyto slitiny lze anodicky oxidovat a díky dobré tekutosti mají sklon k pórovitosti. [2], [7], [10]

## Slitiny typu Al-Mn

Přídavky Manganu zpevňují hliník, avšak korozní odolnost zůstává velmi vysoká. Z důvodu malého přesycení tuhého roztoku  $\alpha$  se tepelně nevytvrzují, a proto je jejich pevnost kolem 250 MPa. Tuhý roztok při pokojové teplotě obsahuje 0,36 % manganu. Vlastnosti a použití jsou obdobné jako u slitin Al-Mg. Fázový diagram Al-Mn s detailem je na obrázku 2.6. Tyto slitiny se používají v případech, kdy pevnost čistého hliníku již nevystačuje. [2], [7], [10]



Obr. 2.6 Binární diagram Al-Mn [3]

## Vytvrditelné slitiny

Vytvrzením se výrazně zvýší mechanické vlastnosti slitiny a zároveň dojde k poklesu plasticity. Podmínkou, aby byla slitina vytvrditelná je dosažení příznivé koncentrace přísad, tedy aby měli velkou změnu rozpustnosti v tuhém roztoku v závislosti na teplotě. Nejvýznamnějšími prvky, které se podílejí na vzniku vytvrzujících fází jsou Cu a Mg. V této skupině jsou slitiny typu Al-Cu-Mg, Al-Zn-Cu-Mg, Al-Zn-Mg, Al-Mg-Si. [13], [14]

### **Slitiny typu Al-Cu-Mg**

V praxi nejrozšířenější a nejvýznamnější. Běžně se označují názvem Duraly. Obsahují do 0,4% mědi a 0,5% manganu. Bez tepelného zpracování se u nich nedosahuje optimálních vlastností. Po správném vytvrzení se dosahuje pevnosti až 450 MPa při tažnosti 10% a tvářením za studena je lze zpevnit na 300 MPa při poklesu tažnosti na 5%. Stárnutí probíhá při 20 °C až 100 hodin. Často se z těchto materiálů vyrábějí různé válcované či protlačované profily nejrůznějších tvarů. [2], [10]

### **Slitiny typu Al-Mg-Si**

Tyto slitiny běžně obsahují 1 % hořčíku a 1 % křemíku. S rostoucím obsahem hořčíku klesá rozpustnost křemíku v tuhém roztoku a klesá precipitační zpevnění. Dosahuje nižší mechanické hodnoty než dural, ale má vyšší houževnatost, dobrou elektrickou vodivost a podstatně vyšší korozní odolnost. Po precipitačním vytvrzení a po deformaci za studena je pevnost okolo 400 MPa. Pro dobrou leštitelnost se též užívá v architektuře. [2], [10]

### **Slitiny typu Al-Zn-Mg**

Na vlastnost těchto ternárních slitin má rozhodující vliv rozpustnost manganu a zinku v tuhém roztoku hliníku. Při větším obsahu zinku než manganu probíhá stárnutí za postupné tvorby precipitátů koherentních zón a fáze  $MgZn_2$ . Pevnost mají v rozmezí 300 až 450 MPa ve stárnutí umělém i přirozeném. Slitiny tohoto typu jsou určeny převážně pro letecké účely. [2], [10]

### **Slitiny typu Al-Zn-Mg-Cu**

Jedná se o nejpevnější slitinu hliníku. Po tepelném zpracování dosahuje pevnosti  $R_m=500$  až 580 MPa. K nedostatkům těchto slitin patří sklon ke korozi pod napětím, nižší lomová houževnatost a vyšší vrubová citlivost než u duralů. [10]

## 2.1.2 Slitina AW 6082

Vytvrditelná slitina, která se široce používá převážně u výrobků, u kterých je důležitá kombinace pevnosti, hmotnosti a odolnosti proti korozi. Pro vysokou pevnost se používá zejména pro vysoce zatížené konstrukční aplikace. Typické použití těchto slitin je v oblasti stavebního, automobilového i železničního průmyslu. Z důvodu jemně zrnité struktury vykazuje zvýšenou odolnost vůči dynamickým zatěžovacím podmínkám. Předepsané chemické složení slitiny AW 6082 je v tabulce 2.3. Specifické vlastnosti se mění podle způsobu tepelného zpracování této slitiny. Způsob zpracování označen jako T6 značí precipitačně tvrditelnou slitinu, materiál je zpracován rozpouštěcím žíháním a poté následuje umělé stárnutí. T5 označuje slitinu po umělém stárnutí při nízkých teplotách bez předchozí homogenizace. Stav T4 představuje zpracování rozpouštěcím žíháním s přirozeným stárnutím slitiny. Slitina ve stavu T3 je po rozpouštěcím žíhání, tváření za studena a následném přirozeném stárnutí. Stav T2 značí slitinu po ochlazení za zvýšené teploty tváření, tváření za studena a přirozeném stárnutí. T1 představuje slitinu po ochlazení za zvýšené teploty tváření a přirozeném stárnutí. [15], [16],

Další stav může být O (slitina, jejíž vlastnosti odpovídají žíhanému stavu po tváření za tepla), O1 (vlastnosti odpovídají stavu po žíhání na odstranění vnitřního pnutí), O2 (slitina po tepelně-mechanickém zpracování k zvýšení tvářitelnosti) nebo O3 (vlastnosti odpovídají stavu po homogenizačním žíhání). [16]

Tab. 2.3 Chemické složení materiálu EN AW 6082 v hm. [%] [15]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ostatní	
								Jednotl.	Celk.
0,70- 1,30	max. 0,50	max. 0,10	0,40- 1,10	0,60- 1,20	max. 0,25	max. 0,20	max. 0,10	max. 0,05	max. 0,15

Tab. 2.4 Přehled mechanických vlastností některých stavů slitin [15]

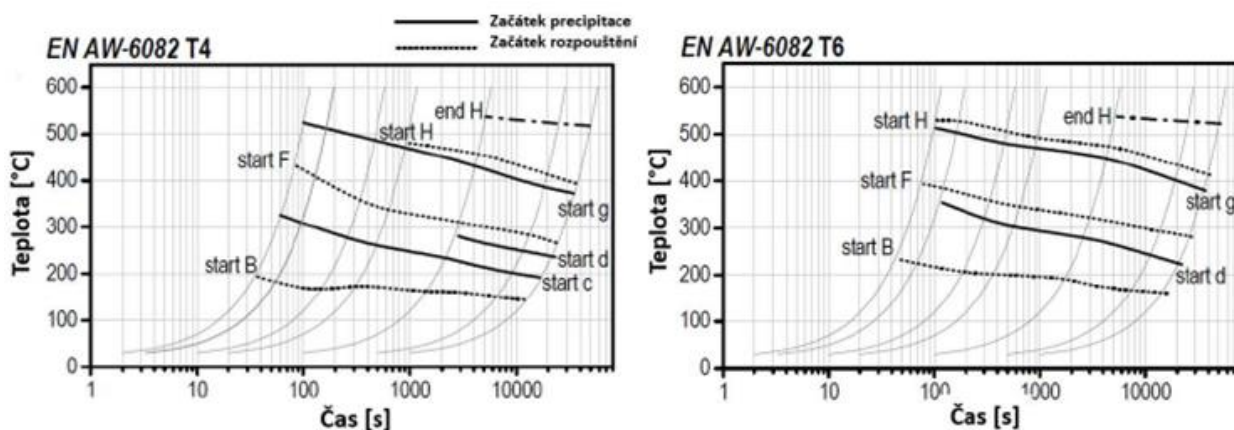
Stav	Tloušťka stěny t [mm]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Pevnost v tahu $R_m$ [MPa]	Prodloužení A [%]	Tvrdost HB
T4	≤ 25	110	205	14	65
T5	≤ 5	230	270	8	80
T6	≤ 5	250	290	8	95
	5 < t ≤ 25	260	310	10	95

Tab. 2.5 Přehled fyzikálních vlastností slitiny EN AW 6082 při teplotě 20 °C [15]

Hustota $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Teplota tání [°C]	Elektrická vodivost G [MS/m]	Tepelná vodivost $\lambda$ [W/m.K]	Koef. tepelné roztlačnosti $\gamma$ [10 <sup>-6</sup> /K]	Modul pružnosti v tahu E [GPa]
2700	585-650	24-32	170-220	23,4	~70

Nejběžnějším způsobem tepelného zpracování této slitiny je rozpouštěcí žihání, které spočívá v ohřevu do oblasti homogenního tuhého roztoku (výskyt jedné fáze v rovnovážném diagramu), dostatečně dlouhé výdrže na této teplotě (dochází k rozpouštění precipitátu) a rychlého ochlazení.

Z diagramu CHD (Continuous Heating Dissolution) lze odvodit chování materiálu při ohřevu. CHD diagramy vybraných slitin jsou na obrázku 2.7 a popisují jednotlivé fáze precipitace a rozpouštění fází při ohřevu z teploty 20 °C na 600 °C s rychlostí ohřevu od 0,01 °C/s do 5°C/s. Z diagramu lze odečíst časy a teploty počátku rozpouštění GP zón (Guinier-Prestonovy zóny), fáze  $\beta$ , počátku precipitace nebo rozpouštění metastabilních fází. GP zóny mají destičkovitý tvar, tloušťku řádově 10 nm a s tuhým roztokem  $\alpha(\text{Al})$  tvoří koherentní rozhraní. Vznikají především, jsou-li velké rozdíly mezi mřížkou precipitátu a tuhého roztoku. Křivka označená jako „end H“, označuje konečné rozpouštění všech zbývajících fází a vznik homogenního tuhého roztoku. [16]



Obr. 2.7 CHD diagramy slitiny EN AW 6082 [17]

Slitina AW 6082 se nejčastěji používá v podobě plechu, profilu nebo kulatiny. Předností těchto slitin je velmi dobrá odolnost proti korozi, velmi dobrá svařitelnost a při teplotách v rozmezí 450 °C – 500 °C vykazuje velmi dobrou tvářitelnost. [18]

## 2.2 Tepelné zpracování slitin hliníku

Tepelné zpracování slitin hliníku zahrnuje procesy, při nichž je výrobek (nebo jeho část) v tuhém stavu podroben jedné nebo více změnám teploty v určitém rozmezí v závislosti na čase, za účelem zvýšení mechanických vlastností, snížení vnitřního pnutí nebo ovlivnění rozložení prvků ve struktuře. Mezi tepelným zpracováním slitin pro tváření a pro odlévání není zásadní rozdíl, a proto jsou všechny způsoby zahrnuty do jednoho celku.

Nejčastějším způsobem pro získání vysokých pevnostních vlastností je u hliníkových slitin vytvrzování. Při vytvrzování se využívá změny rozpustnosti některých přísadových prvků v tuhém roztoku  $\alpha$  (Al) během chladnutí. Podle toho, zda dojde k dostatečnému zvýšení mechanických vlastností po tomto způsobu tepelného zpracování se hliníkové slitiny rozdělují na vytvrditelné a nevytvrditelné. [12], [19]

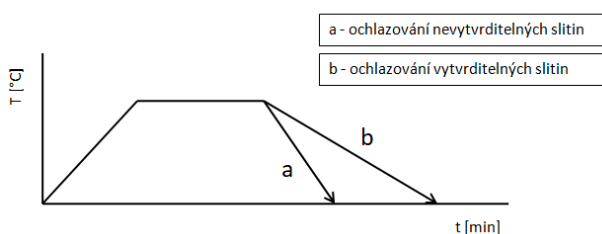
### 2.2.1 Žihání

Žihací teplota závisí na druhu slitiny a na jejím stavu před žiháním. Nedá se jednoznačně určit podle křivek změny rozpustnosti v rovnovážném diagramu, jako například u slitin železa. Rozsah žihacích teplot je podstatně menší než u slitin železa a provádí se v pecích s přesnou regulací teplot, kde jsou přípustné výchylky ve velmi malých mezích. Žihání se používá z důvodu, aby se soustava co nejvíce přiblížila rovnovážnému stavu. U hliníku a jeho slitin se používají následující způsoby žihání:

- Rekrystalizační
- Stabilizační
- Ke snížení pnutí
- S částečnou rekrystalizací
- Homogenizační

## Rekrystalizační žíhání

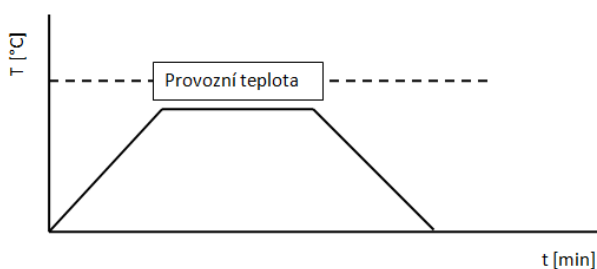
Je to způsob tepelného zpracování, při kterém dochází ke vzniku nové rekrystalizované struktury z původně deformované struktury. Tento způsob se uplatňuje u součástí tvářených za studena. Dochází při něm ke zvýšení plastických vlastností, ale zároveň se snižují pevnostní charakteristiky materiálu. Použitá teplota závisí především na rozsahu předcházející deformace, chemickém složení a rozměru polotovaru. Nejčastěji probíhá při teplotách v rozmezí 250 – 500 °C. Slitiny, které nejsou schopny vytvrzování, mohou být po skončení rekrystalizace ochlazovány na vzduchu. Naopak slitiny schopné vytvrzování je nutno ochlazovat pomalu, aby nedošlo k částečnému přesycení tuhého roztoku – získání nerovnovážného stavu struktury a následné zvýšení pevnostních vlastností. Schéma rekrystalizačního žíhání je na obrázku 2.8. [3], [20]



Obr. 2.8 Schéma rekrystalizačního žíhání

## Stabilizační žíhání

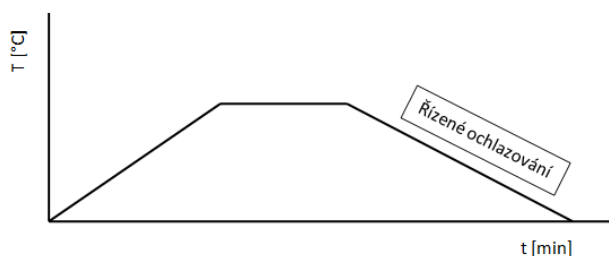
Stabilizační žíhání se používá pro slitiny, které mají v provozu pracovat za zvýšených teplot nebo když dochází ke kolísání teplot. Žíhací teplota je vyšší, než maximální předpokládaná provozní teplota a bývá v rozsahu (240 – 350 °C). Cílem je stabilizace rozměrů, struktury a mechanický vlastností. Tento způsob žíhání se nejčastěji používá u odlitků. Schéma stabilizačního žíhání je na obrázku 2.9. [3], [12], [20]



Obr. 2.9 Schéma stabilizačního žíhání

## Žihání ke snížení pnutí

Dochází k ohřevu pod rekrytalizační teplotu s následnou výdrží na této teplotě a řízeném ochlazení v peci nebo na vzduchu. Žihací teplota se obvykle pohybuje v rozsahu 300 – 400 °C po dobu 6 – 8 hodin. Schéma žihání ke snížení pnutí je na obrázku 2. 10. [3], [12]



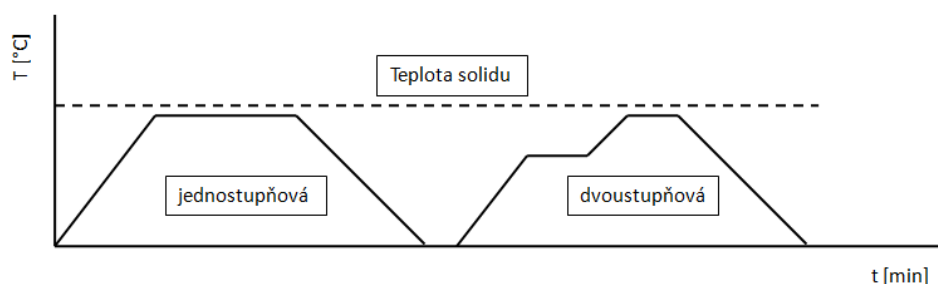
Obr. 2.10 Schéma žihání ke snížení pnutí

## Žihání s částečnou rekrytalizací

Tento způsob žihání se uplatňuje u součástí tvářených za studena a vede ke vzniku částečně rekrytalizované struktury. Teploty jsou ve stejném rozmezí, jako u rekrytalizačního žihání (250 – 500 °C), ale je nutné volit kratší čas, aby nedošlo k plné rekrytalizaci. [3]

## Homogenizační žihání

Způsob tepelného zpracování při vysoké teplotě (blízke solidu) sloužící k odstranění nebo snížení chemické heterogenity, která vzniká během tuhnutí. Délku doby žihání ovlivňuje především chemické složení a struktura slitiny. Z hlediska časové náročnosti se jedná o nejdelší tepelné zpracování v celém procesu výroby. U jemnozrnných tvářených výrobků proběhne homogenizace za několik desítek minut, u slévárenské slitiny je nutné žihat několik hodin (až 16). Během žihání dochází k hrubnutí zrna, čímž se zhoršují mechanické vlastnosti slitiny. Homogenizace může být prováděna i dvoustupňově, kdy se aplikují dvě po sobě následující různé teploty. [3], [12], [20]

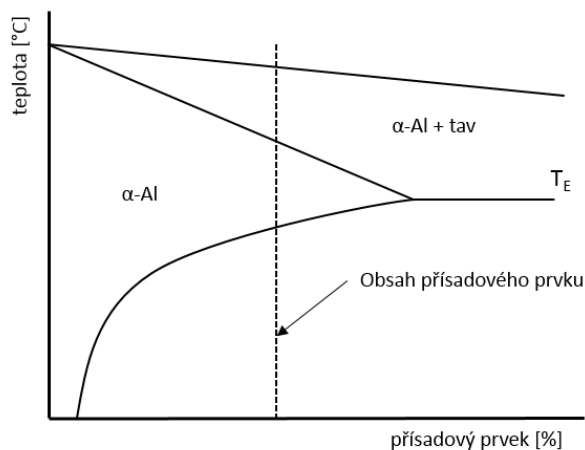


Obr. 2.11 Schéma homogenizačního žihání

## 2.2.2 Vytvrzování

Vytvrzování je nejdůležitějším způsobem tepelného zpracování slitin hliníku. Tímto způsobem tepelného zpracování se dosahuje podstatného zvýšení meze pevnosti  $R_m$ , meze kluzu  $R_{p0,2}$  a tvrdosti. Tažnost slitin se obvykle snižuje. Princip vytvrzování je závislý na podmínce přítomnosti přísadového prvku, který má dostatečně výraznou změnu rozpustnosti v tuhém roztoku  $\alpha$  (Al) viz obrázek 2.12. Takové prvky jsou zejména měď a mangan, případně nikl nebo zinek. Obsah těchto prvků ve slitině musí být vyšší, než je jejich rozpustnost při normální teplotě, ale nižší než je maximální rozpustnost v  $\alpha$  (Al) při eutektické teplotě.

Vytvrzovat lze binární slitiny hliníku s vytvrzujícím prvkem, např. slitiny Al-Cu, nebo vícesložkové slitiny ve kterých je vytvrzující prvek dalším prvkem (legurou). Nejčastěji to jsou Al-Si-Cu nebo Al-Si-Mg. Cílem tohoto způsobu tepelného zpracování je zpětné rozpuštění intermetalických fází do homogenního roztoku  $\alpha$ -Al a jejich následné vyloučení v podobě koherentních nebo semi-koherentních útvarů, které způsobují požadované zpevnění slitiny. [3], [12], [13]

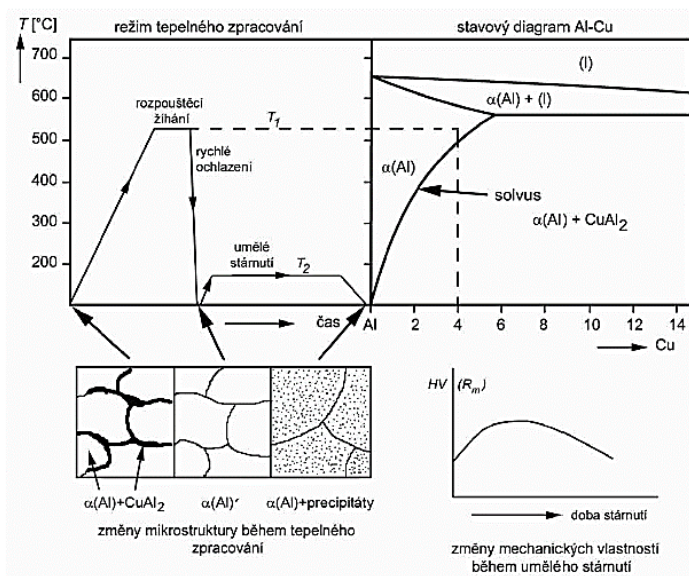


Obr. 2.12 Změna rozpustnosti přísadového prvku v hliníku [12]

Vytvrzování se skládá ze tří základních kroků:

1. Rozpouštěcí žíhání – získávání homogenního tuhého roztoku  $\alpha$ (Al)
2. Rychlé ochlazení – výsledný tuhý roztok  $\alpha$ (Al)
3. Precipitační vytvrzování – tvorba precipitátu a následné zpevnění struktury





Obr. 2.13 Schematické znázornění postupu precipitačního vytvrzování slitiny AlCu4 [13]

## Rozpuštěcí žhání

Rozpuštěcí žhání (obr. 2.13) je třeba provádět při teplotě ( $T_1$ ) nad křivkou změny rozpustnosti a dochází při něm k rozpuštění intermetalických fází obsahujících vytvrzující přísadové prvky. U hliníkových slitin leží teploty rozpuštěcího žhání v rozmezí 470 – 530°C (tj. 10 až 15 °C pod eutektickou teplotou). U slitin, u kterých se množství přísadového prvku blíží k maximální rozpustnosti ve fázi  $\alpha(\text{Al})$  se volí co nejvyšší rozpuštěcí teplota. Při překročení optimální teploty, dojde k natavení slitiny na hranicích zrn, ke hrubnutí zrna a k tepelnému zborcení odlitku. Naopak při odchylce k nižším teplotám dochází k nedokonalému rozpuštění segregátu a vytvrzením se nedosáhne požadovaných vlastností. Hodnotu žhací teploty je nutno dodržet v tolerancích  $\pm 3$  K až maximálně 5 K a doba rozpuštěcího žhání musí být dostatečně dlouhá, aby došlo k dokonalému rozpuštění segregovaných fází vytvrzovacího prvku, ale neměla by být zbytečně dlouhá, neboť dochází k hrubnutí zrna. Prodleva na homogenizační teplotě se obvykle pohybuje v intervalu od 3 do 6 hodin.[3], [12]

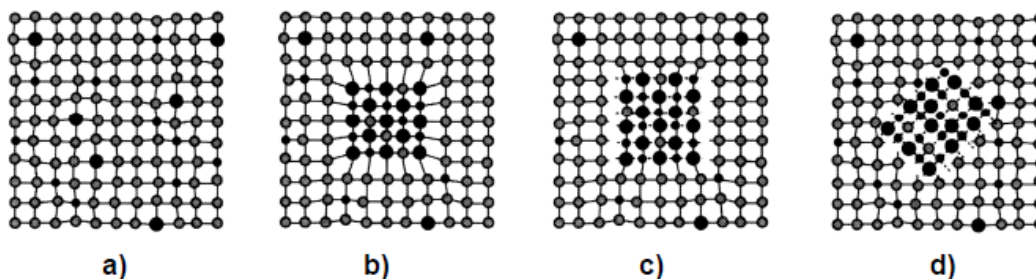
## Rychlé ochlazení

Po rozpuštěcím žhání následuje rychlé ochlazení z homogenizační teploty s cílem zamezit vyloučení intermetalické fáze přísadového prvku z přesyceného roztoku fáze  $\alpha(\text{Al})$ . Jako ochlazovací médium se používá studená voda. Celý proces musí být velmi rychlý a veškerá manipulace se slitinou se musí provádět co nejrychleji, aby nedocházelo k částečnému rozpadu tuhého roztoku hliníku. Po ochlazení je struktura slitiny tvořena přesyceným tuhým roztokem  $\alpha(\text{Al})$ , u něhož je obsah legujícího prvku vyšší v porovnání s rovnovážnou rozpustností. [3], [12]

## Precipitační vytvrzování

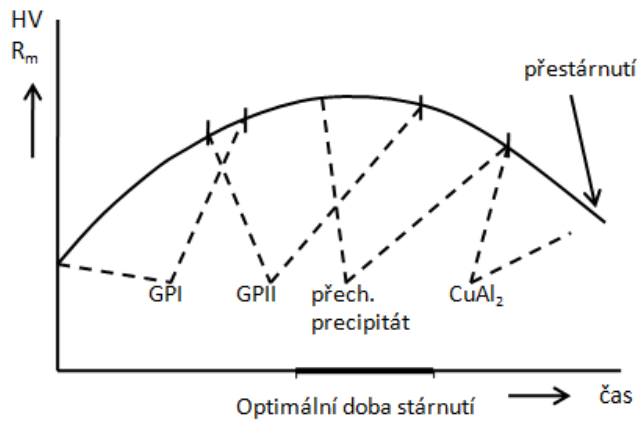
Po rychlém ochlazení obvykle následuje precipitační vytvrzování (umělé stárnutí), což je ohřev a potřebná výdrž při zvýšené teplotě ( $T_2=140 - 200^\circ\text{C}$ ). Při tomto procesu dochází k postupnému rozpadu přesyceného tuhého roztoku  $\alpha(\text{Al})$ . V tuhém roztoku dochází k difuzi přísadového prvku do mikroskopických oblastí bohatších tímto prvkem a v nich dochází k nukleaci nové fáze. Růstem zárodku vznikají koherentní precipitáty, označují se jako Guinier-Prestonovy zóny (obr. 2.14 b). Tyto zóny zaujímají destičkovité uspořádání vytvrzujícího prvku s tloušťkou řádově  $10^9$  až  $10^{10}$  m. Koherentnost v tomto případě znamená, že tyto oblasti jsou součástí krystalické mřížky tuhého roztoku, jehož mřížku částečně deformují a vyvolávají v ní vnitřní pnutí. Díky pnutí dochází k výrazným zpevněním (nárůst  $R_m$  a tvrdosti HV) slitiny.

V dalším průběhu dochází k postupné ztrátě koherence, to znamená, že tato fáze začíná tvořit samostatné útvary, které přestávají být krystalicky propojeny s původním přesyceným tuhým roztokem. Částečně spojené s tuhým roztokem se nazývají semikoherentní částice (obr. 2.14c). Tento proces je ještě doprovázen zvýšením tvrdosti a pevnosti. Slitiny po vytvrzení koherentně nebo semikoherentně obvykle obsahují vyloučenou vytvrzovací fázi. Posledním stádiem stárnutí je tvorba rovnovážného precipitátu  $\text{CuAl}_2$  s nekoherentním rozhraním s matricí. Dochází k přeměně protínajícího mechanismu interakce dislokací na protlačovací což znamená, že s růstem částic klesá vytvrzující efekt. Neokoherentní vytvrzující fáze již nemá krystalickou vazbu na tuhý roztok  $\alpha(\text{Al})$  a dochází ke snižování pevnosti a tvrdosti (obr. 2.14d). Tento stav se označuje jako přestárnutí slitiny. Důvodem přestárnutí je příliš dlouhá výdrž na teplotě stárnutí nebo dlouhá doba vytvrzování. V dalším průběhu by došlo k úplné ztrátě koherence, vyloučení rovnovážných fází přísadového prvku a postupné snížení pevnosti a tvrdost téměř až na původní hodnoty před tepelným zpracováním. Optimální doba umělého stárnutí odpovídá maximu na časové závislosti mechanický vlastností viz obr.2.15. [3], [12]



Obr. 2.14 Vyloučení precipitační fáze [12]

a) tuhý roztok; b) koherentní precipitát; c) semikoherentní částice; d) nekoherentní precipitát



Obr. 2.15 Časová závislost mechanických vlastností [12]

Rozpad přesyceného tuhého roztoku při umělém stárnutí probíhá přes několik stádií:

→  $\alpha(Al)$  → zóny GPI → zóny GPII → přechodný precipitát →  $\alpha(Al)$  + rovnovážný precipitát  $CuAl_2$

V některých případech se kromě umělého stárnutí využívá také tzv. přirozené stárnutí, což znamená, že slitina je ponechána při pokojové teplotě po rychlém ochlazení. Získání mechanických vlastností je nižší než u umělého stárnutí a probíhá mnoho dní. [12]

## 2.3 Mechanické vlastnosti materiálu

Mechanické vlastnosti vyjadřují chování materiálu za působení vnějších sil. Mezi základní mechanické vlastnosti patří pružnost, pevnost, houževnatost, plasticita a vlastnosti jako tvrdost, odolnost proti únavě, odolnost proti tečení jsou brány jako odvozené z těchto základních za určitých podmínek namáhání. Ve všech těchto případech, se jedná o vlastnosti strukturně citlivé, to znamená, že závisí na velikosti zrna, dokonalosti krystalové mřížky, ale i na tepelném zpracování materiálu. [2], [31]

*Pružnost (elasticita)* – schopnost materiálu se před porušením pružně deformovat. K jejímu vyhodnocení se používá modul pružnosti, mez pružnosti a energie elastické napjatosti.

*Pevnost* – odolnost materiálu proti deformaci a porušení vnějšími silami. Podle způsobu namáhání rozlišujeme pevnost v tahu, tlaku, ohybu, krutu a stříhu. Podle fyzikální povahy veličin, rozlišujeme druhy pevnosti:

- *Skutečná pevnost* vyjadřuje odolnost materiálu proti porušení a jedná se o skutečné napětí v okamžiku lomu.
- *Ideální (teoretická) pevnost* určuje odolnost proti porušení odtržením v pružném stavu a závisí na krystalografické stavbě.
- *Konvenční (smluvní) pevnost* je zjišťovaná mechanickými zkouškami a je stanovena podílem maximální síly a původní plochy průřezu (nebere v úvahu změnu průřezu zkušebního tělesa v průběhu zatěžování).

*Houževnatost* – materiálová vlastnost odolávat bez porušení velkým napětím a je závislá na pevnosti a plasticitě. V praxi se houževnatost vyhodnocuje pomocí normovaných empirických zkoušek. Například zkouška rázem, kde se měří energie potřebná k přeražení zkušebního tělesa předepsaného tvaru.

*Plasticita* – schopnost materiálu zachovat trvalé deformace vyvolané vnějšími silami. Je definována velikostí přetvoření tělesa až do porušení soudržnosti materiálu při určitých podmínkách. [21], [22]

### 2.3.1 Zkoušení mechanických vlastností

Základní mechanické vlastnosti vyjadřují obecné požadavky na kvalitu materiálu a jsou tedy většinou uváděny v materiálových listech. Aby bylo možné vlastnosti navzájem porovnávat, musí být zkušební postupy, zkušební podmínky jednotné a přesně definované. Proto je většina mechanický zkoušek normalizována a lze je rozdělit:

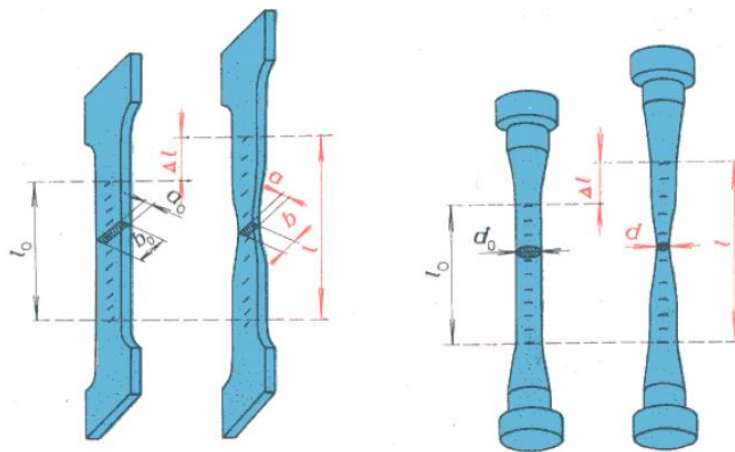
- *podle způsobu zatěžování* – zkouška tahem, tlakem, ohybem, krutem a stříhem
- *podle časového průběhu zatěžující síly* – zkouška statická (působení klidného rovnoměrného zatížení na zkušební těleso), zkouška dynamická (síla působí nárazově po zlomek sekundy)
- *podle stavu napjatosti* – zkoušky při jednoosé napjatosti (jednoosý tah), dvouosé i trojosé napjatosti (zkoušky vrubovaných těles)[21], [22]

#### 2.3.1.1 Statická zkouška tahem

Nejpoužívanější statická zkouška, která se používá téměř pro všechny materiály. Slouží k získání základních hodnot potřebných pro výpočet konstrukčních prvků a pro volbu vhodného materiálu. Princip spočívá v postupném zatěžování zkušební tyče předepsanou rychlostí, většinou až do přetržení s cílem zjistit napěťové a deformační charakteristiky zkoušeného materiálu. Zkouška tahem se zpravidla neprovádí na přímo vyrobené součásti, ale na zkušebních tyčích (vzorcích), které mají tvar a rozměry dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Tyto tyče mohou být krátké nebo dlouhé, kruhové nebo ploché (obr. 2.17). Zkušební vzorek se zkouší na trhacím zařízení (obr. 2.16), dle potřeby, často až do roztržení (trvalá plastická deformace). Tyto vzorky se volí dle zkoušeného materiálu a upínacího zařízení trhacího stroje, které bývá výměnné. [21], [22], [23], [25]



Obr. 2.16 Univerzální trhací stroj TinusOlsen [24]



Obr. 2.17 Tvar zkušebních tyčí pro statickou zkoušku tahem [23]

Upřednostňovaná zkušební tělesa mají dle normy ČSN EN ISO 6892-1 přímý vztah mezi počáteční měřenou délkou  $L_0$  a počáteční průřezovou plochou  $S_0$  vyjádřenou rovnicí  $L_0 = k \cdot \sqrt{S_0}$ , kde  $k$  je součinitel proporcionality, a nazývají se poměrná zkušební tělesa. Mezinárodně přijatá hodnota pro  $k$  je 5,65. Počáteční měřená délka musí být nejméně 15 mm. Jestliže je průřezová plocha zkušební tyče příliš malá na to, aby hodnota  $k=5,65$  splnila tento požadavek, může se použít vyšší (přednostně 11,3) nebo nepoměrná zkušební tělesa (počáteční měřená délka  $L_0$  nezávisí na počáteční průřezové ploše  $S_0$ ).[25]

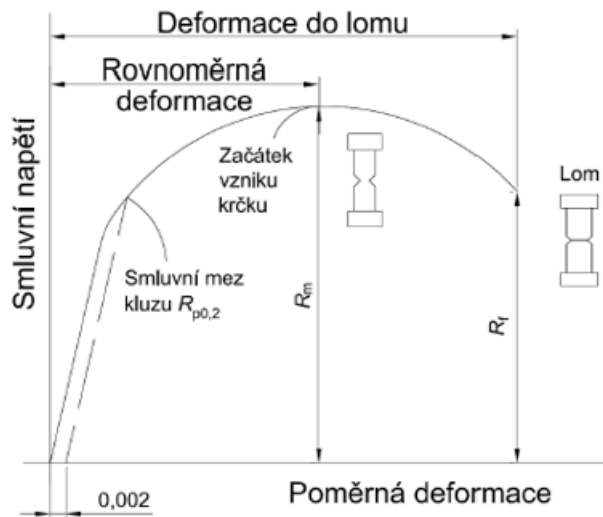
U všech statických zkoušek vzniká v materiálu napětí, které je způsobeno působením vnějších sil. Číselná hodnota tohoto napětí se určí jako podíl síly a plochy, na níž síla působí. Podíl skutečné plochy průřezu v kterémkoliv okamžiku zkoušky se nazývá skutečné napětí  $\bar{\sigma}$ . Běžnější je však smluvní napětí  $\sigma$ , protože se neuvažuje změna průřezu tyče. Zatížení se vztahuje na počáteční průřez  $S_0$ . [23], [25]

Z provedené zkoušky se vyhodnocuje mez kluzu, mez pevnosti, tažnost a kontrakce. Všechny tyto hodnoty lze získat z diagramu tahové zkoušky, který může mít několik podob.[22]

*Pracovní diagram* je diagram, který kreslí zkušební zařízení v průběhu zkoušky. Jedná se o závislost absolutního prodloužení  $\Delta L$ [mm] měřené délky  $L_0$ [mm] zkušebního tělesa na zatěžující síle  $F$ [N].

*Smluvní diagram* (obr. 2.18) vyjadřuje závislost smluvního napětí  $\sigma = \frac{F}{S_0}$  [MPa] na poměrném prodloužení (deformaci)  $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$  [-].

*Skutečný diagram* vyjadřuje závislost skutečného napětí  $\bar{\sigma} = \frac{F}{S}$  [MPa] na logaritmičtém prodloužení  $\bar{\varepsilon} = \ln \frac{L}{L_0}$  [-].



Obr. 2.18 Smluvní diagram napětí-deformace [26]

Počáteční část diagramu je považována za přímkovou, která odpovídá elastické deformaci. Platí Hookův zákon:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \text{ [MPa]} \quad (2.1)$$

kde značí:  $E$  – modul pružnosti v tahu [MPa]  
 $\varepsilon$  – poměrné prodloužení [-]

V další části diagramu nejprve dochází k odklonu od přímkové závislosti, kdy se měřená část zkušební tyče deformuje rovnoměrně a poté před přetržením nastává vznik krčku.[26]

Z výsledků zkoušky se dále vyhodnocují napěťové charakteristiky – smluvní mez pevnosti  $R_m$  a mez kluzu  $R_e$ . Smluvní mez pevnosti je definována jako maximální dosažené napětí ve smluvním diagramu (obr. 2.18), vypočítá se tedy:

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (2.2)$$

kde značí:  $F_{max}$  – maximální síla dosažená při zkoušce [N],  
 $S_0$  – původní průřez zkušební tělesa [mm<sup>2</sup>].

Mez kluzu  $R_e$  označuje napětí, při kterém vzniká plastická deformace a dochází k prvním trvalým deformacím zkušební tyče. V praxi by takto zjištěná hodnota nebyla přesná a byla by závislá na citlivosti snímače, a proto se zavádí smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$ , která představuje napětí vyvolávající plastickou (trvalou) deformaci o velikosti  $\varepsilon_p = 0,002$  (0,2 %).[22], [23], [26]

Kromě zmíněných napěťových charakteristik se ještě ze statické zkoušky tahem vyhodnocují dvě deformační charakteristiky – Tažnost  $A$  a Kontrakce  $Z$ , které se vypočítají následovně:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L_u}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.3)$$

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.4)$$

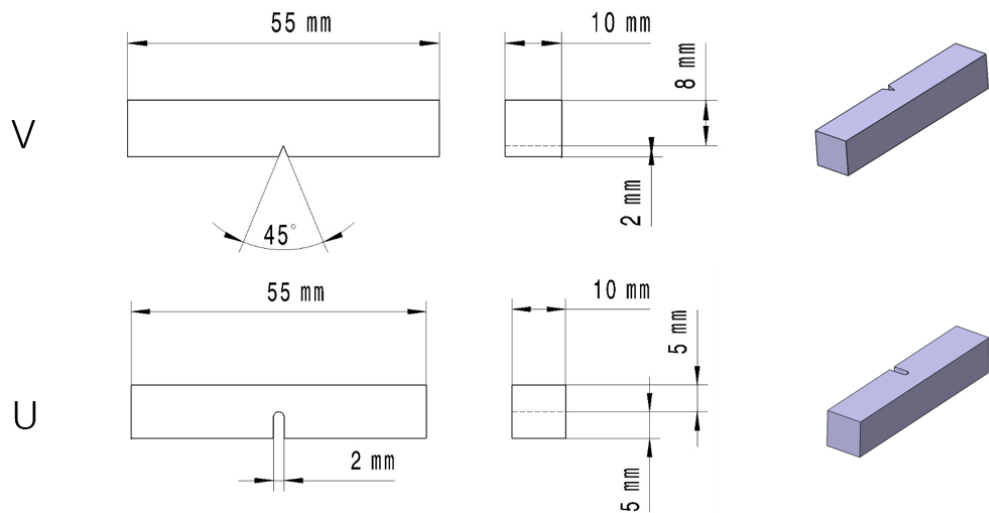
kde značí:  $L_0$  – vzdálenost vyznačených rysek před přetržením [mm],  
 $L_u$  – vzdálenost vyznačených rysek po přetržení [mm],  
 $S_0$  – původní průřez zkušební tělesa [mm<sup>2</sup>],  
 $S_u$  – průřez zkušební tělesa v místě lomu [mm<sup>2</sup>].

### 2.3.1.2 Charpyho rázová zkouška v ohybu

Podstata zkoušky spočívá v přeražení zkušební tělesa s vrubem jedním rázem kyvadlového kladiva za předem stanovených podmínek. Vrub s předepsanou geometrií se nachází uprostřed zkoušeného tělesa mezi dvěma podporami na protilehlé straně k místu úderu při zkoušce. Měřená veličina – nárazová práce, která je měřítkem odolnosti materiálu proti rázovému namáhání a stanovuje se v Joulech. Zkoušky se musí provádět při specifikované teplotě, protože hodnoty rázu se u mnoha kovových materiálů mění s teplotou. Jedná-li se o jinou teplotu, než je teplota okolí, musí být zkušební těleso zahřáté nebo ochlazené na danou teplotu za řízených podmínek. [23], [28]

Standardní zkušební těleso musí mít dle normy ČSN EN ISO 14556 čtvercový průřez o stranách 10 mm a délku 55 mm. Ve středu délky musí být vrub ve tvaru V, nebo U, jak je patrné z obr. 2.19. V-vrub tvaru V musí mít úhel 45°, hloubku 2 mm a poloměr kořene 0,25 mm. U-vrub tvaru U musí mít hloubku 5 mm a poloměr kořene 1 mm. Jestli není možné z materiálu vyrobit standardní zkušební těleso, musí se použít jedno z náhradních zkušebních těles o šířce 7,5 mm, 5 mm nebo 2,5 mm. Povrchová drsnost zkušební tělesa musí být lepší než  $R_a=5 \mu\text{m}$  s výjimkou konců tělesa. [22], [27]

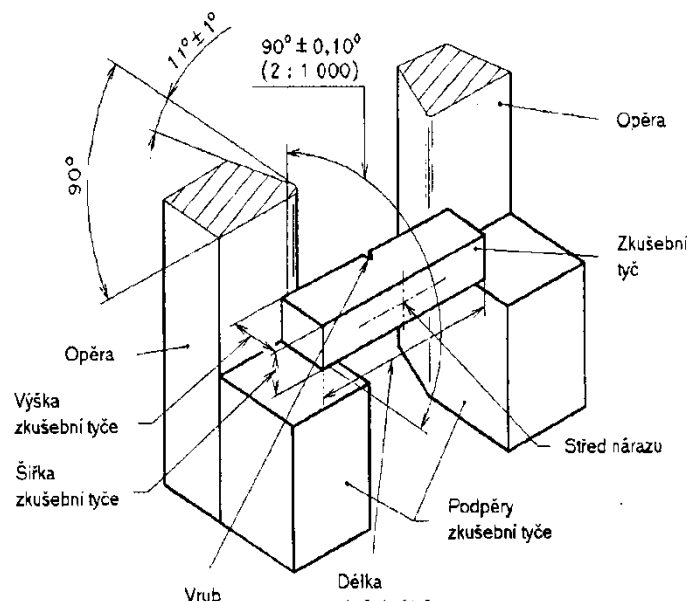




Obr. 2.19 Geometrie zkušební tělesa s V-vrubem a U-vrubem [27]

l- délka, h-výška, w-šířka, 1- úhel vrubu, 2 – výška pod vrubem, 3 – poloměr zakřivení kořene, 4 – vzdálenost roviny symetrie vrubu od konců zkušební tělesa, 5 – úhel mezi přilehlými podélnými povrchy zkušební tělesa [27]

Zkušební těleso musí být vloženo přímo proti opěrám zkušebního stroje, přičemž rovina souměrnosti musí ležet do 0,5 mm od středové roviny opěr. Těleso musí být udeřeno břitem kladiva v rovině souměrnosti a na opačné straně proti vrubu jak ukazuje obr. 2.20. [27], [28]



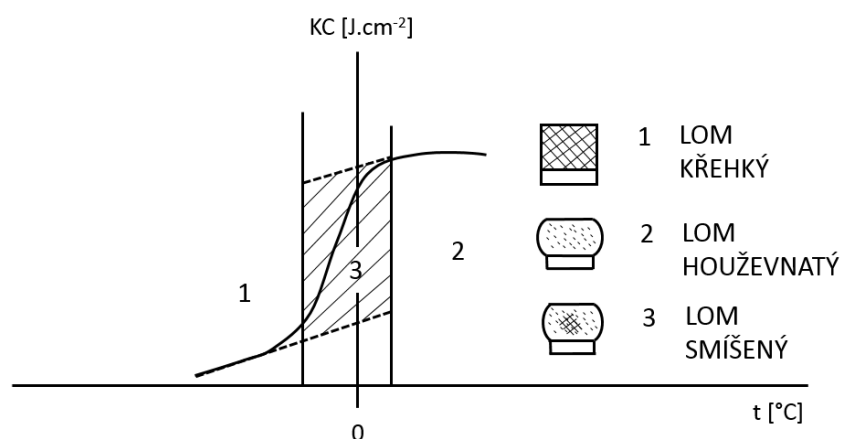
Obr. 2.20 Ustavení zkušební tělesa pro Charpyho rázovou zkoušku v ohybu [22]

Zkušební zařízení (obr. 2.21) musí být zkonstruováno tak, aby tvořilo tuhý celek, a musí být v souladu s evropskou normou ČSN EN ISO 148-1. Zařízení se označuje jako rázové kladivo. Vyrábí se v různých velikostech, z důvodu požadavků na vykonání různé velikosti nárazové práce při zkoušení různých materiálů. Kladiva jsou nejčastěji s maximální hodnotou potenciální energie 150 J, 300 J nebo 400 J, případně 50 J. [28]



Obr. 2.21 Charpyho rázové kladivo [29]

Důležitou mechanickou veličinou je takzvaná přechodová teplota, která se určuje z křivky teplotní závislosti vrubové houževnatosti, získané na souboru více zkušebních vzorků, přeražených při různých teplotách viz obr. 2.22. Přechodová teplota udává teplotu, při které dochází k přechodu houževnatého porušení materiálu na křehký charakter porušení. Sníží-li se teplota při zkoušce, klesá nárazová práce potřebná k přeražení zkušebního vzorku. Za vyšších teplot se zjišťovaný houževnatý (tvárný) lom při poklesu teploty mění v lom křehký, který je obecně charakteristický pro nižší teploty. [30], [32]



Obr. 2.22 Závislost vrubové houževnatosti na teplotě [30]

Podstatou přechodové teploty je, že v závislosti na teplotě a rychlosti deformace se lomová pevnost významně nemění, kdežto mez kluzu je značně závislá na jejich změně. Křivky lomové pevnosti a meze kluzu se protnou v bodě, který odpovídá přechodové teplotě  $t_p$ .

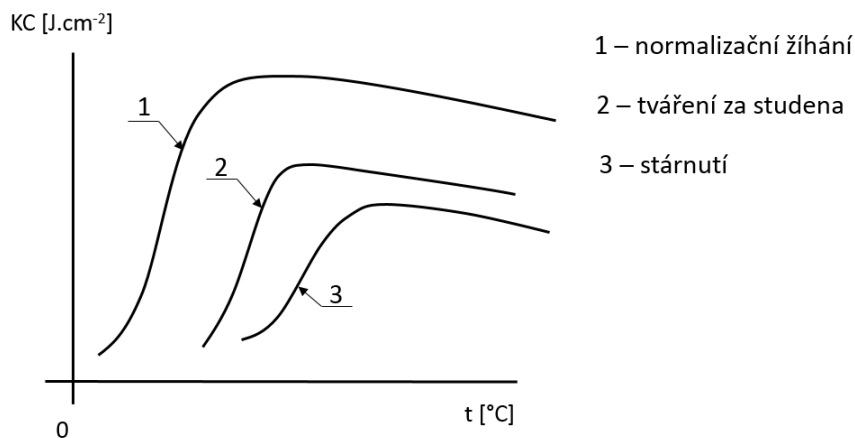
Pro stanovení přechodové teploty neexistuje žádná závazná norma. Lze ji zjistit některým z následujících způsobů:

1. Nejnižší teplota, při níž je lom zkušební tyče v celém průřezu houževnatý.
2. Teplota, při níž houževnatý lom tvoří 50% celkové lomové plochy zkušební tělesa.
3. Teplota odpovídající střední hodnotě vrubové houževnatosti.

$$KC_{stř} \equiv \frac{KC_{max} + KC_{min}}{2}$$

4. Teplota odpovídající inflexnímu bodu křivky teplotní závislosti vrubové houževnatosti.
5. Teplota odpovídající dohodnuté vrubové houževnatosti.

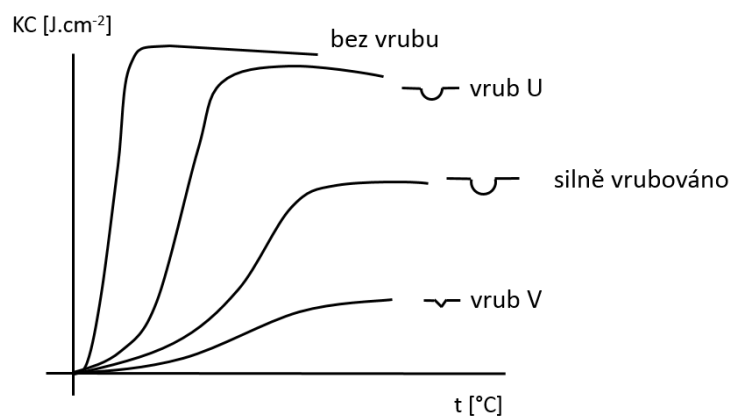
Průběhy teplotní závislosti vrubové houževnatosti se mění nejen podle druhu zkoušeného materiálu, ale i podle strukturního stavu, který je dán technologií výroby a provozními podmínkami. Obr. 2.23 zobrazuje posuv křivky teplotní závislosti vrubové houževnatosti k vyšším teplotám, v důsledku vlivu technologie výroby a způsobu zpracování. [30]



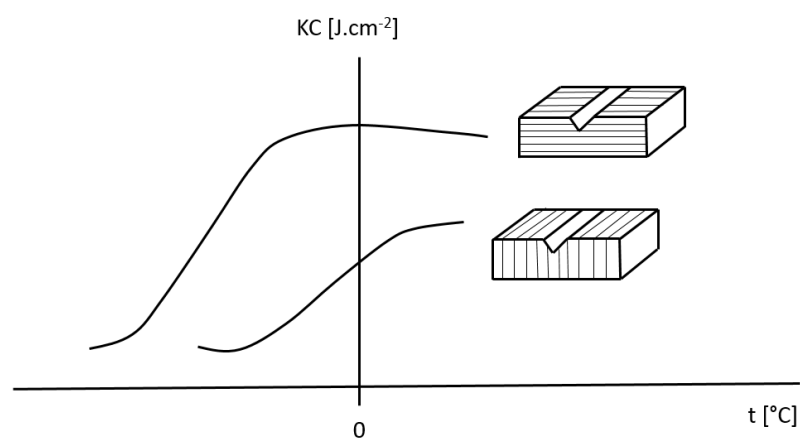
Obr. 2.23 Průběh teplotní závislosti vrubové houževnatosti [30]

Přechodovou teplotu, při které může dojít ke křehkému porušení lze snižovat těmito způsoby:

- snížením obsahu uhlíku
- zvýšením obsahu manganu, křemíku, niklu, hliníku, molybdenu, titanu nebo boru
- snížením rychlosti deformace
- zmenšení hloubky vrubu
- zvětšení rádiusu vrubu
- snížením velikosti zrna
- tvar a velikost vrubu (čím je vrub větší, tím více se  $t_p$  posouvá k vyšším teplotám) (obr. 2.24)
- vliv orientace podélné osy zkušebního tělesa (obr. 2.25)



Obr. 2.24 Průběh teplotní závislosti vrubové houževnatosti dle tvaru a velikosti vrubu [30]



Obr. 2.25 Orientace podélné osy zkušebního tělesa [32]

Podle provedeného druhu tepelného zpracování nebo tváření se může teplota  $t_p$  zvyšovat nebo snižovat. Přechodovou teplotu ovlivňují procesy:

Přechodovou teplotu **zvyšují**:

- Kalení
- Tváření za studena (deformace tlakem, malá deformace tahem)
- Postupy, které mají za následek zhrubnutí struktury
- Postupy, které mají za následek heterogenitu struktury

Přechodovou teplotu **snižují**:

- Žíhání
- Zušlechťování
- Tváření za studena, po kterém následuje rekrytalizace
- Postupy, které mají za následek zjemnění struktury. Čím je menší velikost feritického zrna, tím je nižší teplota
- Postupy, které mají za následek vznik homogenní struktury

### 3 Experimentální část

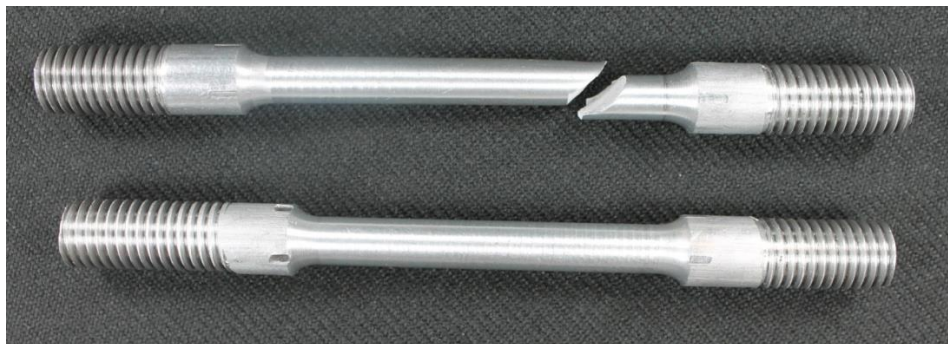
Cílem práce je pomocí normalizovaných zkoušek zjistit, zda teplota ovlivňuje mechanické vlastnosti slitiny EN AW 6082. Na vzorcích této slitiny byla provedena statická zkouška tahem a Charpyho rázová zkouška v ohybu. Pro vyhodnocení vlivu teploty byly zkušební vzorky zkoušeny za teplot v rozmezí od  $-50^{\circ}\text{C}$  do  $85^{\circ}\text{C}$ . Porovnání výsledných hodnot ukazují sloupcové grafy. Zda teplota ovlivňuje mechanické vlastnosti bylo zjištěno pomocí Analýzy rozptylu (ANOVA).

#### 3.1 Statická zkouška tahem

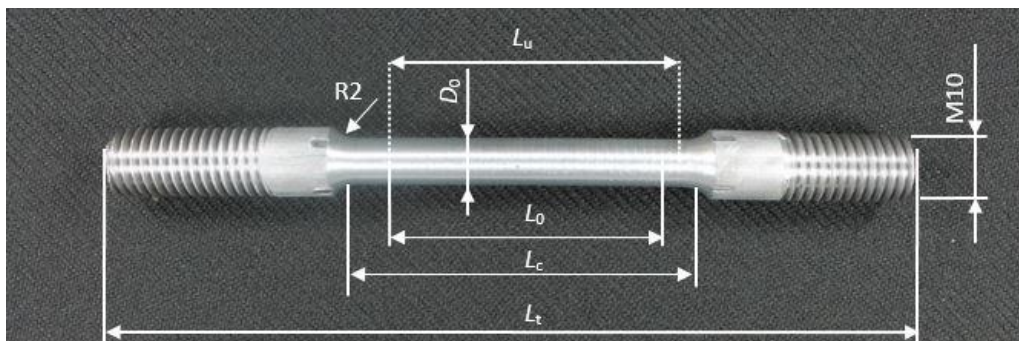
##### 3.1.1 Zkušební vzorky

Z tyče kruhového průřezu o průměru 10 mm bylo na soustruhu vyrobeno třicet zkušebních vzorků. Jejich tvar a velikost je navržena v souladu s normou ČSN EN ISO 6892-1. Ukázka zkušebního vzorku je na obr. 3.1.

Z důvodu upnutí do závitových čelistí, musel být zkušební vzorek na každé straně opatřen vnějším závitem M10. Základní rozměry zkušební tělesa společně s dalšími parametry jsou popsány v tabulce 3.1



Obr. 3.1 Zkušební vzorek před a po statické zkoušce tahem



Obr. 3.2 Rozměry zkušebního tělesa pro statickou zkoušku tahem

Tab. 3.1 Základní parametry pro statickou zkoušku tahem

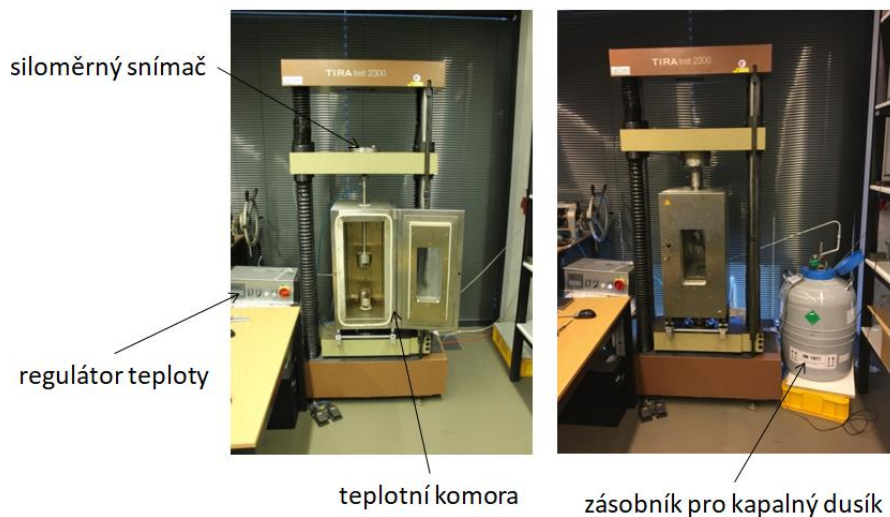
Zkoušená teplota [°C]		-50	-25	0	RT	40	85
Zatěžovací rychlost		proměnná 1(15) mm/min					
Rozměry	celková délka $L_t$	110 mm					
	zkoušená délka $L_c$	50 mm					
	výchozí průměr $D_0$	8 mm					
Sledované hodnoty	$R_{p0,2}$ [MPa]	mez kluzu v tahu					
	$R_m$ [MPa]	mez pevnosti v tahu					
	$A_{50mm}$ [%]	celková tažnost					

### 3.1.2 Postup měření

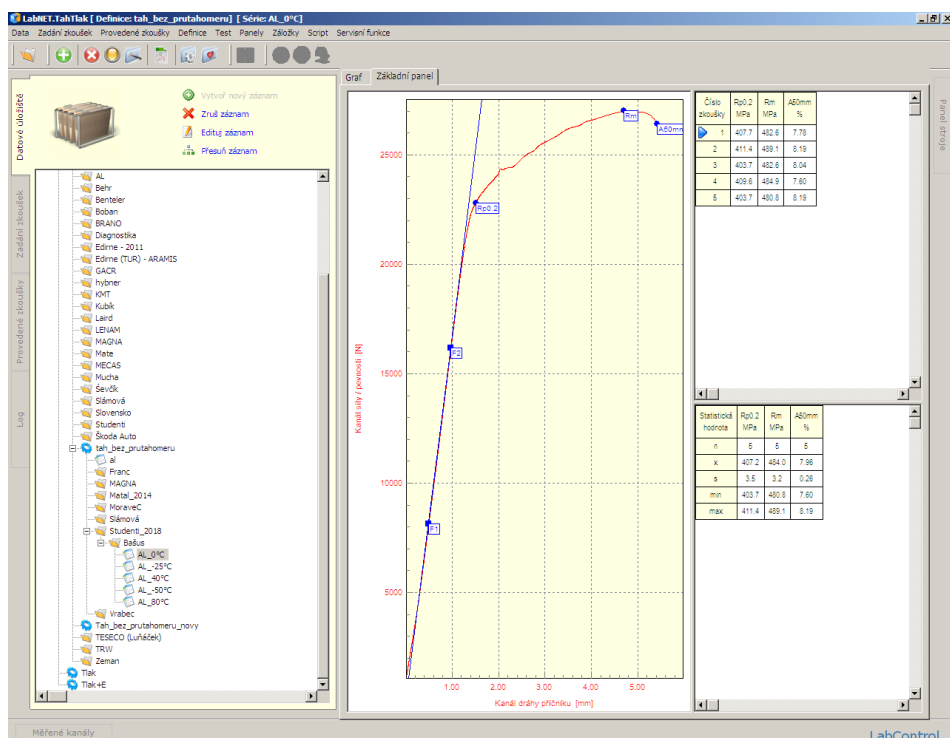
Měření byla prováděna na zkušebním zařízení TIRATEST 2300 (obr. 3.3) s měřicím rozsahem do 100 kN, se softwarem LABCONTROL a teplotní komorou (-80 °C až +230 °C). Zkušební vzorky o teplotách 40 °C a 85 °C se ohřívaly v teplotní komoře, která je součástí zkušebního zařízení a pro zkušební vzorky o teplotách 0 °C, -25 °C a -50 °C bylo využito kapalného dusíku, který se přivedl do teplotní komory zkušebního zařízení. Každý zkušební vzorek byl temperován na požadované teplotě 30 minut.

Zatěžování zkušebního vzorku bylo provedeno posuvem čelistí rychlostí 1 mm/min do meze kluzu a poté se rychlost zvýšila na 15 mm/min. Pro teplotu RT (20 °C) byla zkouška tahem realizována tak, že při měření byla deformace měřena pomocí průtahoměru MFN-A-4-500, tzn., byla zjišťována závislost napětí na deformaci měřenou z průtahoměru. Pro ostatní testy prováděné v teplotní komoře se deformace měřila pomocí hodnoty  $L_u$ , která byla změřena posuvným měřítkem, jak dovoluje norma ČSN EN ISO 6892-1. Před začátkem zkoušky bylo nutné zkušební vzorek přeměřit a to zejména počáteční délku  $L_0$  a počáteční průměr  $D_0$ . Tyto hodnoty byly zadány do pracovního softwaru LabNet pro výpočet napěťových charakteristik (mez pevnosti v tahu a mez kluzu v tahu) udávaných v normě. V tomto softwaru bylo nutné před každou zkouškou nastavit vstupní parametry a tímto způsobem se zjišťovala závislost napětí na posuvu příčnicku zkušebního stroje.

Po skončení testu se změříla posuvným měřítkem konečná měřená délka  $L_u$  po lomu a doplnila se do softwaru LabNet, který zobrazil výsledky měření (obr. 3.4). V levé části jsou uloženy jednotlivé zkoušky, uprostřed je zobrazen smluvní diagram tahové zkoušky aktuálního měření. V pravé části jsou tabulky s vypočítanými hodnotami meze pevnosti v tahu  $R_m$  mez kluzu v tahu  $R_{p0,2}$  a celkové tažnosti  $A_{50mm}$ . Pod těmito výsledky je tabulka se statistickými hodnotami aktuálního měření.



Obr. 3.3 Zkušební zařízení TIRATEST 230



Obr. 3.4 Prostředí systému LabNETTahTlak



### 3.1.3 Naměřené hodnoty

Pro každou teplotu bylo testováno pět zkušebních vzorků a výsledné naměřené hodnoty (mez kluzu v tahu, mez pevnosti v tahu a tažnost) jsou v tab. 3.2. V tabulce 3.3 jsou uvedeny výsledné statistické hodnoty (aritmetický průměr každé teploty spolu se směrodatnou odchylkou), které slouží pro výpočet statistické významnosti. Výsledné diagramy jsou v příloze č. 1–6.

Tab. 3.2 Naměřené hodnoty statistické zkoušky tahem

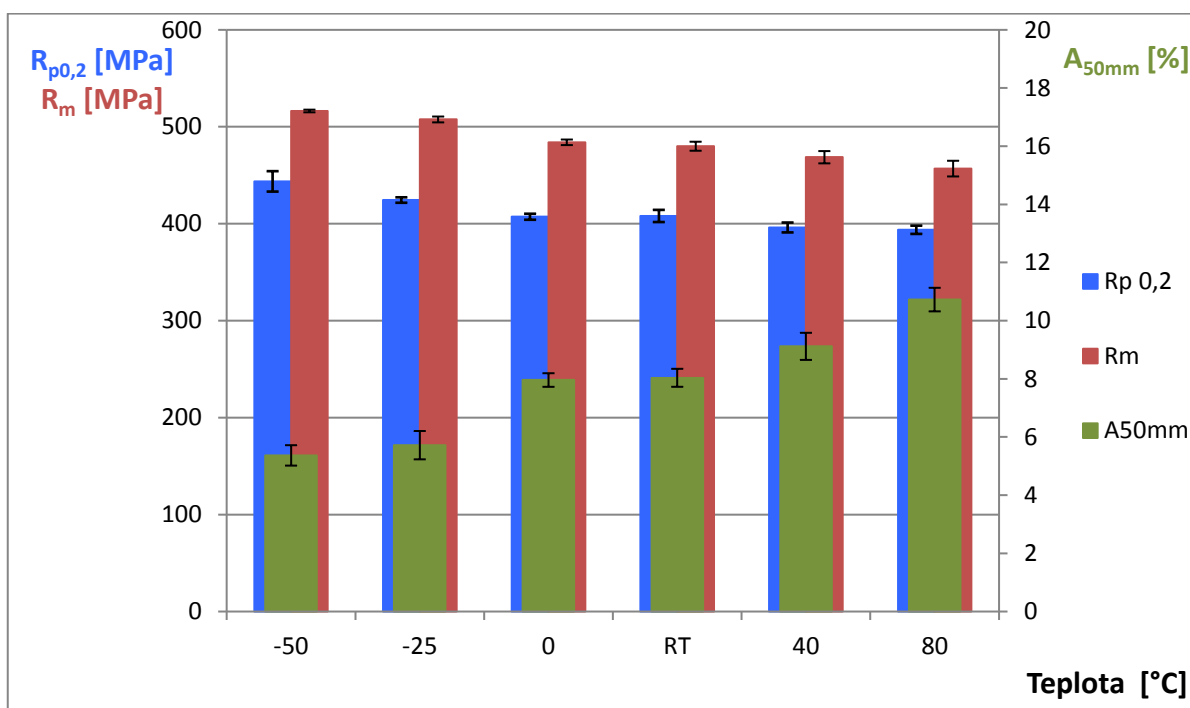
Teplota [°C]	vzorek	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{50mm}$ [%]
-50	1	430,2	514,7	5,94
	2	455,4	518,6	5,32
	3	453,3	516,7	4,98
	4	447,3	516,5	5,55
	5	432,3	515,1	5,05
-25	1	423,0	506,4	5,92
	2	425,1	508,2	6,02
	3	427,1	509,1	4,83
	4	427,3	511,6	5,61
	5	419,8	502,6	6,22
0	1	407,7	482,6	7,78
	2	411,4	489,1	8,19
	3	403,7	482,6	8,04
	4	409,6	484,9	7,60
	5	403,7	480,8	8,19
RT	1	401,5	484,9	8,21
	2	418,5	480,3	8,40
	3	401,9	485,1	8,18
	4	410,6	476,0	7,52
	5	407,7	473,5	7,87
40	1	389,4	465,8	9,07
	2	392,7	470,9	9,59
	3	401,8	457,7	9,70
	4	402,3	475,4	8,71
	5	394,6	473,3	8,52
80	1	389,0	460,3	10,34
	2	394,9	464,8	11,12
	3	401,3	454,6	10,25
	4	390,6	442,2	11,26
	5	393,1	462,5	10,66

Tab. 3.3 Přehled statistických hodnot statické zkoušky tahem

Teplota [°C]	Aritmetický průměr		
	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{50mm}$ [%]
-50	443,7±10,5	516,3±1,4	5,4±0,4
-25	424,5±2,8	507,6±3,0	5,7±0,5
0	407,2±3,1	484,0±2,9	7,9±0,2
RT	408,0±6,3	479,9±4,7	8,0±0,3
40	396,2±5,1	468,6±6,3	9,1±0,5
80	393,8±4,3	456,9±8,1	10,7±0,4

### 3.1.4 Vyhodnocení výsledků

Již při prvním pohledu na výsledný sloupcový graf (obr. 3.5) porovnávající hodnoty meze kluzu v tahu, meze pevnosti v tahu a tažnosti je vidět, že při zvyšování teploty zkušební vzorku dochází v rozmezí teplot od -50 °C do 80 °C k poklesu průměrné hodnoty meze kluzu ze 443,7 MPa na 393,8 MPa a také k poklesu meze pevnosti v tahu z 516,3 MPa na 456,9 MPa. Zároveň při poklesu teploty dochází ke zvyšování průměrné hodnoty tažnosti z 5,4 % na 10,7 %.



Obr. 3.5 Sloupcový graf ukazující naměřené výsledné hodnoty statické zkoušky tahem

### 3.1.5 Analýza rozptylu

Z naměřených hodnot statické zkoušky tahem můžeme určit, zda má teplota vliv na změnu mechanických vlastností slitiny hliníku EN AW6082 pomocí analýzy rozptylu (ANOVA z anglického ANalysisOfVAriance). Tento výpočet byl proveden v programu Microsoft Office Excel na hladině významnosti  $\alpha=0,05$ . Vstupní hodnoty pro výpočet jsou uvedeny v tabulce 3.3. Výsledkem jsou tabulky faktor a ANOVA.

#### Mez kluzu v tahu $R_{p0,2}$

Tab. 3.4 Tabulka faktor pro hodnoty  $R_{p0,2}$

<i>Faktor</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>
-50	5	2218,5	443,7	138,555
-25	5	2122,3	424,46	9,823
0	5	2036,1	407,22	12,037
RT	5	2040,2	408,04	49,138
40	5	1980,8	396,16	32,403
80	5	1968,9	393,78	22,807

Tab. 3.5 Tabulka ANOVA pro hodnoty  $R_{p0,2}$

<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	8906,1867	5	1781,2373	40,366003	2,620654147
Všechny výběry	1059,052	24	44,127167		
Celkem	9965,2387	29			

Při vyhodnocení analýzy rozptylu je nejprve nutné stanovit hypotézy, a poté na základě výsledných výpočtů rozhodnout, zda hypotéza platí. V tomto případě jsou hypotézy následující:

$H_0$  – teplota nemá vliv na mechanické vlastnosti,  $H_1$  – negace hypotézy  $H_0$ . Hodnota  $F$  z tabulky 3.5 vyjadřuje testové kritérium  $T=40,37$ . Hodnota  $F_{krit}$  rozděluje číselnou řadu na obor přijetí  $<0; 2,62>$  a na kritický obor  $(2,62; +\infty)$ . Testové kritérium leží v tomto případě v intervalu kritického oboru, tzn., že hypotéza  $H_0$  je zamítnuta. Výsledkem tedy je, že na hodnoty  $R_{p0,2}$  má zkušební teplota statisticky významný vliv.

## Mez pevnosti v tahu $R_m$

Tab. 3.6 Tabulka faktor pro hodnoty  $R_m$

<i>Faktor</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>
-50	5	2581,6	516,32	2,372
-25	5	2537,9	507,58	11,262
0	5	2420	484	10,245
RT	5	2399,8	479,96	27,088
40	5	2343,1	468,62	50,067
80	5	2284,4	456,88	81,677

Tab. 3.7 Tabulka ANOVA pro hodnoty  $R_m$

<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	12871,788	5	2574,3576	84,53867364	2,620654
Všechny výběry	730,844	24	30,4518333		
Celkem	13602,632	29			

Hodnota  $F$  z tabulky 3.7 vyjadřuje testové kritérium  $T=84,54$ . Hodnota  $F_{krit}$  rozděluje číselnou řadu na obor přijetí  $\langle 0; 2,62 \rangle$  a na kritický obor  $(2,62; +\infty)$ . Testové kritérium leží v tomto případě v intervalu kritického oboru, tzn, že hypotéza  $H_0$  je zamítnuta. Výsledkem tedy je, že na hodnoty  $R_m$  má zkušební teplota statisticky významný vliv.

## Tažnost $A_{50\text{mm}}$

Tab. 3.8 Tabulka faktor pro hodnoty  $A_{50\text{mm}}$

<i>Faktor</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>
-50	5	26,84	5,368	0,15357
-25	5	28,6	5,72	0,29605
0	5	39,8	7,96	0,06855
RT	5	40,18	8,036	0,11933
40	5	45,59	9,118	0,27197
80	5	53,63	10,726	0,20508

Tab. 3.9 Tabulka ANOVA pro hodnoty  $A_{50\text{mm}}$

<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	103,090947	5	20,61818933	110,9946938	2,62065415
Všechny výběry	4,4582	24	0,185758333		
Celkem	107,549147	29			

Hodnota  $F$  z tabulky 3.9 vyjadřuje testové kritérium  $T=110,99$ . Hodnota  $F_{\text{krit}}$  rozděljuje číselnou řadu na obor přijetí  $\langle 0; 2,62 \rangle$  a na kritický obor  $(2,62; +\infty)$ . Testové kritérium leží v tomto případě v intervalu kritického oboru, tzn., že hypotéza  $H_0$  je zamítnuta. Výsledkem tedy je, že na hodnoty  $A_{50\text{mm}}$  má zkušební teplota statisticky významný vliv.

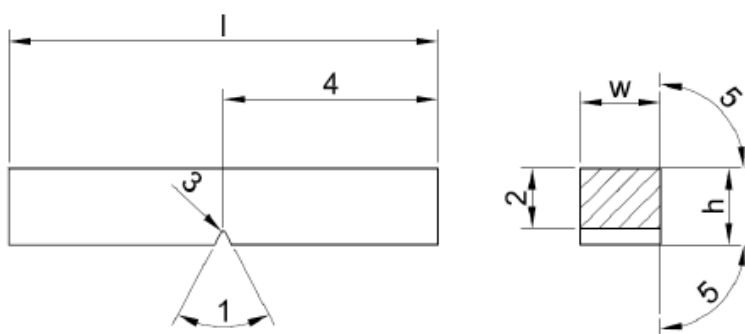
## 3.2 Charpyho rázová zkouška v ohybu

### 3.2.1 Zkušební vzorky

Z tyče o čtvercovém průřezu byly vyrobeny vzorky, které odpovídají normě ČSNEN ISO 14556. Tyto vzorky byly nejprve z tyče nařezány pomocí pásové pily, poté zbaveny ostrých hran pomocí brusného papíru a na závěr byl na všech vzorcích zhotoven vrub tvaru V na jednoúčelovém zařízení LabTest VRE pomocí technologie protahování, jak je vidět na obr. 3.6. Rozměry zkušebního vzorku dle normy jsou na obrázku 3.7 a jejich popis v tabulce 3.10.



Obr. 3.6 Automatická vrubovačka vzorků LabTest VRE

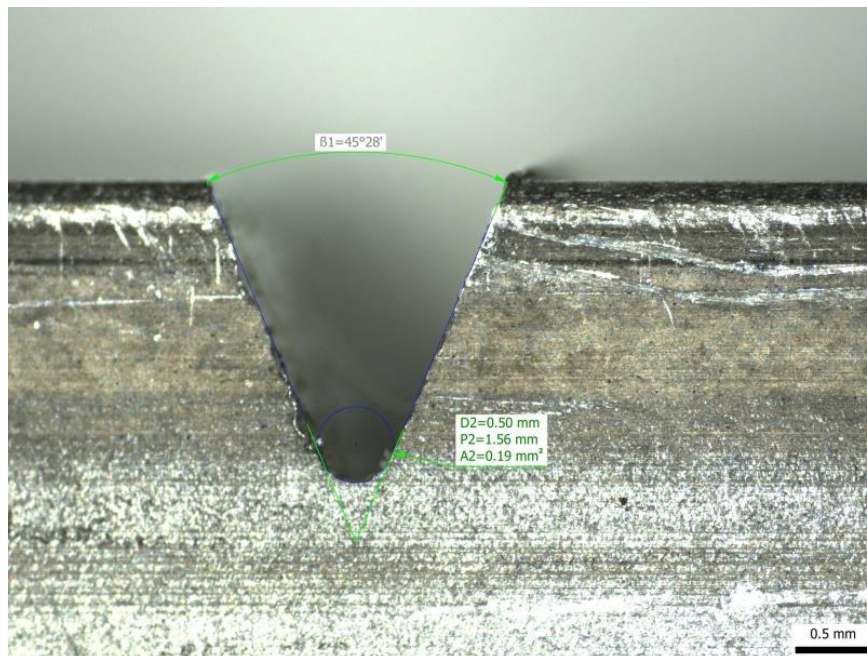


Obr. 3.7 Rozměry zkušebního vzorku dle normy ČSN EN ISO 14556

Tab. 3.10 Rozměry zkušebního vzorku pro Charpyho rázovou zkoušku v ohybu dle normy ČSN EN ISO 14556

Délka	l	55 mm ± 0,60 mm
Výška	h	10 mm ± 0,075 mm
Šířka	w	10 mm ± 0,11 mm
úhel vrubu	1	45° ± 2°
výška pod vrubem	2	8 mm ± 0,075 mm
poloměr zakřivení kořene vrubu	3	0,25 mm ± 0,025 mm
vzdálenost roviny symetrie vrubu od konců zkušebního tělesa	4	27,5 mm ± 0,42 mm
úhel mezi přilehlými podélnými povrchy zkušebního tělesa	5	90° ± 2°

Rozměry zkušebních vzorků pro toto měření (průměrné hodnoty ze souboru deseti vzorků) jsou na obr. 3.8 a popsány v tabulce 3.11. Všechny tyto rozměry byly v souladu s rozměry, které jsou uvedeny v normě.

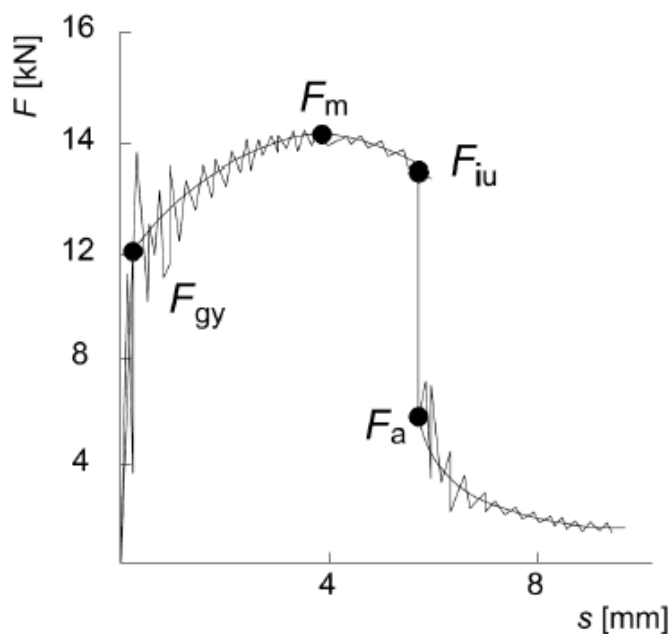


Obr. 3.8 Detail zkušebního vzorku s vrubem tvaru V

Tab. 3.11 Tabulka rozměrů zkušební vzorku pro Charpyho rázovou zkoušku v ohybu

Délka	l	55,12 mm
Výška	h	10,020 mm
Šířka	w	10,05 mm
úhel vrubu	1	45°28'
výška pod vrubem	2	8,017 mm
poloměr zakřivení kořene vrubu	3	0,25 mm
vzdálenost roviny symetrie vrubu od konců zkušební tělesa	4	27,5 mm
úhel mezi přilehlými podélnými povrchy zkušební tělesa	5	90°

Ze závislosti síla-průhyb (obr. 3.9) se podle normy ČSN EN ISO 14556 vyhodnotí charakteristické hodnoty síly  $F_{gy}$ ,  $F_m$ ,  $F_{iu}$  a  $F_a$ . Hodnoty deformace (průhybu) se odečtou na příslušné ose podle zmíněných sil a hodnoty nárazové práce se určí vyhodnocením plochy pod křivkou síla- průhyb. Všechny hodnoty vyhodnocené hodnoty jsou popsány v tabulce 3.12.



Obr. 3.9 Stanovení charakteristických hodnot síly



Tab. 3.12 Sledované hodnoty pro Charpyho rázovou zkoušku

Typ vrubu	V-vrub	
Sledované hodnoty	$F_a$ [N]	Velikost síly při zastavení trhliny
	$F_{gy}$ [N]	Síla na mezi makroplastických deformací
	$F_{iu}$ [N]	Velikost síly při iniciaci trhliny
	$F_m$ [N]	Maximální síla
	$S_{gy}$ [mm]	Velikost průhybu odpovídající okamžiku dosažení meze makroplastických deformací
	$S_{iu}$ [mm]	Velikost průhybu odpovídající okamžiku iniciace trhliny
	$S_a$ [mm]	Velikost průhybu odpovídající okamžiku zastavení trhliny
	$S_t$ [mm]	Celkový průhyb
	$W_s$ [J]	Práce odpovídající okamžiku zastavení trhliny
	$W_{iu}$ [J]	Práce odpovídající okamžiku iniciace trhliny
	$W_m$ [J]	Práce do maxima síly
	$W_t$ [J]	Celková nárazová práce
	KV [J/cm <sup>2</sup> ]	Absorbovaná práce

### 3.2.2 Postup měření

Pro měření bylo použito instrumentované rázové kladivo LabTest CHK 450J-I (obr. 3.10), které zaznamenává grafický průběh síly v závislosti na čase nebo na dráze s automatickým výpočtem parametrů v závislosti na chování materiálu při nárazu břitem kladiva na zkušební vzorek při měnící se teplotě.



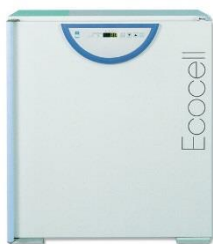
Obr. 3.10 Rázové kladivo LabTest CHK 450J-I

Zkušební vzorky, které bylo potřeba ochladit na teploty  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  byly ochlazeny pomocí laboratorní mrazničky ProfiMaster PMU 0450 (obr. 3.11) a pro ohřev zkušebních vzorků na teploty  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$  byla použita Laboratorní sušárna EcoCell 55 (obr. 3.12)

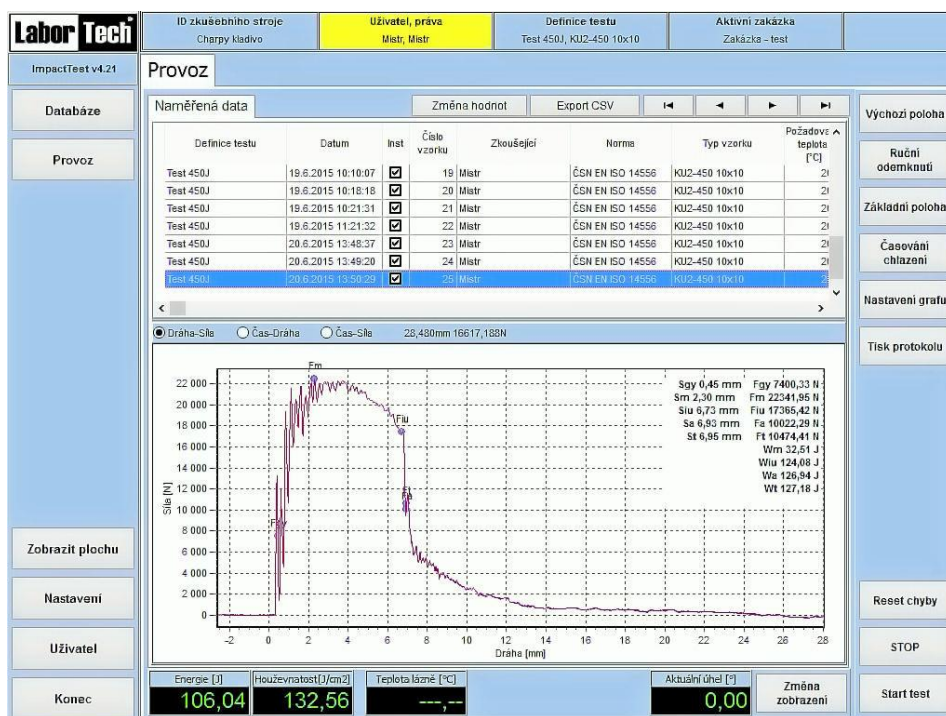
Zkušební vzorky byly následně ustaveny tak, aby břit kladiva vyvozoval sílu v rovině souměrnosti na opačné straně vrubu. Po skončení testu zobrazil software LaborTech (obr. 3.13) výsledné hodnoty a graf závislosti síly na dráze.



Obr. 3.11 Laboratorní mraznička ProfiMaster PMU 0450



Obr. 3.12 Laboratorní sušárna EcoCell 55



Obr. 3.13 Prostředí systému LabControl

### 3.2.3 Naměřené hodnoty

Při této zkoušce bylo testováno stejně jako u statické zkoušky tahem pět zkušebních vzorků pro každou teplotu. Pro vyhodnocení jsem zvolil výsledné hodnoty maximální síly  $F_m$ , celkového průhybu  $S_t$  a celkové nárazové práce  $W_t$ , které jsou uvedeny v tabulce 3.14. Zbylé naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze č. 7–15. Statistické hodnoty (aritmetický průměr každé teploty spolu se směrodatnou odchylkou) sloužící pro výpočet statistické významnosti jsou v tabulce 3.13

Tab. 3.13 Přehled naměřených statistických hodnot Charpyho rázové zkoušky v ohybu

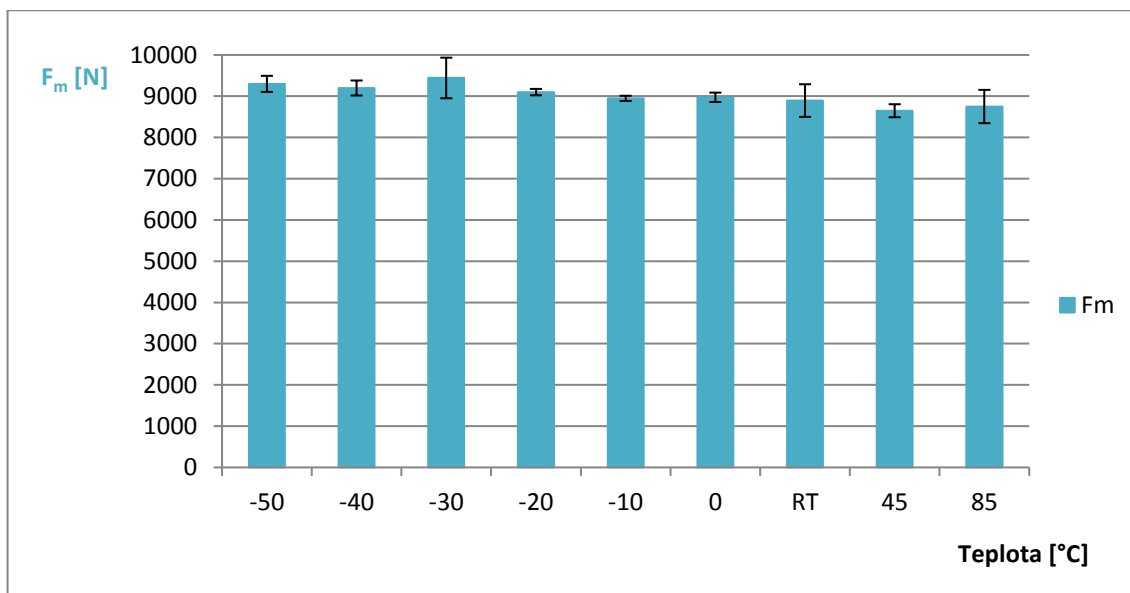
Teplota [°C]	Aritmetický průměr		
	$F_m$ [N]	$W_t$ [J]	$S_t$ [mm]
-50	9299±194,8	15,67±0,1	5,58±0,0
-40	9200±182,2	15,60±0,5	5,49±0,1
-30	9442±492,4	16,70±2,0	5,52±0,2
-20	9100±77,3	15,61±0,2	5,41±0,3
-10	8947±63,0	15,28±0,1	5,41±0,3
0	8973±114,1	15,50±0,3	5,40±0,3
RT	8894±395,9	15,26±0,7	5,57±0,1
45	8648±157,7	15,28±0,5	5,44±0,3
85	8750±403,8	14,90±0,2	5,56±0,2

Tab. 3.14 Naměřené hodnoty Charpyho rázovou zkouškou v ohybu

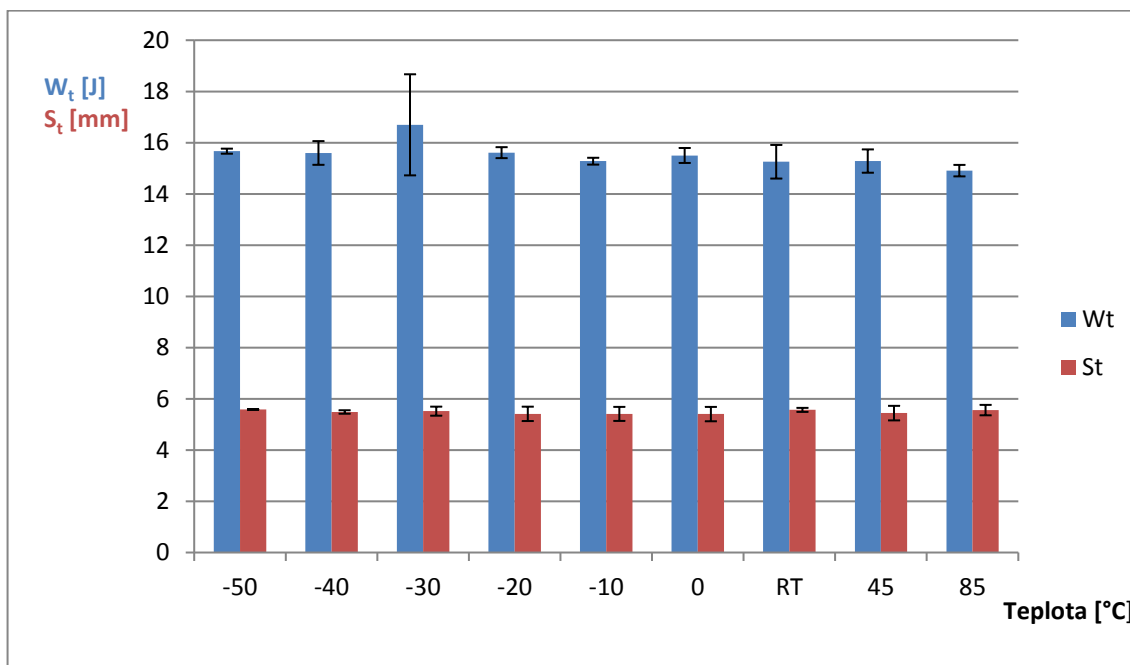
Teplota [°C]	vzorek	$F_m$ [N]	$W_t$ [J]	$S_t$ [mm]
-50	1	9292	15,67	5,58
	2	9157	15,72	5,58
	3	9187	15,54	5,58
	4	9677	15,58	5,60
	5	9180	15,81	5,58
-40	1	9390	15,70	5,41
	2	8866	15,24	5,48
	3	9170	15,29	5,49
	4	9322	16,46	5,44
	5	9249	15,29	5,60
-30	1	10140	16,05	5,17
	2	9210	15,74	5,56
	3	9893	20,51	5,59
	4	8831	14,84	5,65
	5	9135	16,33	5,61
-20	1	9160	15,31	4,87
	2	9143	15,52	5,52
	3	8948	15,56	5,44
	4	9128	15,97	5,61
	5	9120	15,69	5,63
-10	1	8931	15,25	5,61
	2	9021	15,48	5,58
	3	8838	15,32	5,55
	4	8951	15,07	4,87
	5	8995	15,27	5,44
0	1	9072	15,88	5,53
	2	8953	15,17	5,50
	3	8898	15,30	4,87
	4	8814	15,33	5,42
	5	9128	15,82	5,70
RT	1	9660	14,91	5,62
	2	8697	15,70	5,62
	3	8536	14,16	5,44
	4	8729	15,47	5,52
	5	8848	16,03	5,65
45	1	8585	14,88	5,44
	2	8655	15,68	5,62
	3	8892	15,90	5,65
	4	8699	15,25	5,60
	5	8407	14,70	4,90
85	1	8915	14,65	5,21
	2	8242	15,25	5,76
	3	8342	15,05	5,63
	4	9327	14,91	5,73
	5	8923	14,68	5,46

### 3.2.4 Vyhodnocení výsledků

Sloupcové grafy (obr. 3.14 a obr. 3.15) ukazují, že při zvyšování teploty v rozmezí od -50 °C do 85 °C dochází k postupnému klesání průměrných hodnot maximální síly a to z 9299 N na 8750 N. Celková nárazová práce a celkový průhyb v tomto rozmezí teplot nevykazuje žádnou významnou a výraznou změnu hodnot.



Obr. 3.14 Sloupcový graf ukazující naměřené hodnoty maximální síly pro Charpyho rázovou zkoušku v ohybu



Obr. 3.15 Sloupcový graf ukazující naměřené hodnoty celkového průhybu a celkové práce pro Charpyho rázovou zkoušku v ohybu

### 3.2.5 Analýza rozptylu

Stejným způsobem jako u statické zkoušky tahem můžeme určit, zda má teplota vliv na změnu mechanických vlastností slitiny hliníku EN AW 6082. Výpočet byl proveden stejným způsobem na hladině významnosti  $\alpha=0,05$ . Vstupními hodnotami je tab. 3.13 a výsledkem jsou tabulky faktor a ANOVA.

#### Maximální síla $F_m$

Tab. 3.15 Tabulka faktor pro hodnoty  $F_m$

<i>Faktor</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>
-50	5	46492,712	9298,5424	47448,01917
-40	5	45996,0406	9199,20812	41493,17426
-30	5	47208,8711	9441,77422	303048,7957
-20	5	45497,5144	9099,50288	7467,82957
-10	5	44735,4902	8947,09804	4971,575756
0	5	44865,058	8973,0116	16259,88617
RT	5	44471,0768	8894,21536	195921,1286
45	5	43238,3343	8647,66686	31078,3712
85	5	43748,398	8749,6796	203797,6124

Tab. 3.16 Tabulka ANOVA pro hodnoty  $F_m$

<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	2642048,565	8	330256,0707	3,490724763	2,208518074
Všechny výběry	3405945,571	36	94609,5992		
Celkem	6047994,137	44			

Hodnota  $F$  z tabulky (3.16) vyjadřuje testové kritérium  $T=3,49$ . Hodnota  $F_{krit}$  rozděluje číselnou řadu na obor přijetí  $\langle 0; 2,20 \rangle$  a na kritický obor  $(2,20; +\infty)$ . Testové kritérium leží v tomto případě v intervalu kritického oboru, tzn., že hypotéza  $H_0$  je zamítnuta. Výsledkem tedy je, že na hodnoty  $F_m$  má zkušební teplota statisticky významný vliv.

## Celková nárazová práce $W_t$

Tab. 3.17 Tabulka faktor pro hodnoty  $W_t$

<i>Faktor</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>
-50	5	78,337	15,6674	0,0121073
-40	5	77,9899	15,59798	0,268037677
-30	5	83,4828	16,69656	4,863796493
-20	5	78,0545	15,6109	0,057466685
-10	5	76,3825	15,2765	0,021958095
0	5	77,4978	15,49956	0,106669703
RT	5	76,2735	15,2547	0,538507255
45	5	76,4123	15,28246	0,258752813
85	5	74,5407	14,90814	0,062888998

Tab. 3.18 Tabulka ANOVA pro hodnoty  $W_t$

<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	9,899034288	8	1,237379286	1,799043735	2,208518074
Všechny výběry	24,76074008	36	0,687798335		
Celkem	34,65977436	44			

Hodnota  $F$  z tabulky (3.18) vyjadřuje testové kritérium  $T=1,79$ . Hodnota  $F_{krit}$  rozděluje číselnou řadu na obor přijetí  $\langle 0; 2,20 \rangle$  a na kritický obor  $(2,20; +\infty)$ . Testové kritérium leží v tomto případě v intervalu oboru přijetí. Výsledkem tedy je, že na hodnoty  $W_t$  nemá zkušební teplota statisticky významný vliv.

## Celkový průhyb $S_t$

Tab. 3.19 Tabulka faktor pro hodnoty  $S_t$

<i>Faktor</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>
-50	5	27,922	5,5844	5,78E-05
-40	5	27,42794	5,485588	0,00579565
-30	5	27,58871	5,517742	0,039329307
-20	5	27,06621	5,413242	0,098066778
-10	5	27,05473	5,410946	0,094147816
0	5	27,01913	5,403826	0,098045872
RT	5	27,84134	5,568268	0,007836082
45	5	27,20976	5,441952	0,101016793
85	5	27,80001	5,560002	0,05173472

Tab. 3.20 Tabulka ANOVA pro hodnoty  $S_t$

<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	0,212691584	8	0,026586448	0,482385415	2,208518074
Všechny výběry	1,984123269	36	0,055114535		
Celkem	2,196814852	44			

Hodnota  $F$  z tabulky (3.20) vyjadřuje testové kritérium  $T=0,48$ . Hodnota  $F_{krit}$  rozděluje číselnou řadu na obor přijetí  $<0; 2,20>$  a na kritický obor  $(2,20; +\infty)$ . Testové kritérium leží v tomto případě v intervalu oboru přijetí. Výsledkem tedy je, že na hodnoty  $S_t$  nemá zkušební teplota statisticky významný vliv.



## 4 Závěr

Cílem této práce bylo pomocí statické zkoušky tahem a Charpyho rázové zkoušky v ohybu zjistit, zda má teplota vliv na změnu mechanických vlastností hliníkové slitiny EN AW6082. Zkušební vzorky této hliníkové slitiny jsou ve stavu T4, který představuje zpracování rozpouštěcím žiháním a následné přirozené stárnutí. Práce je rozdělena na dvě hlavní části – teoretickou a experimentální.

Při statické zkoušce tahem bylo měřeno celkem třicet zkušebních vzorků vždy po pěti vzorcích o teplotách  $-50\text{ °C}$ ,  $-25\text{ °C}$ ,  $0\text{ °C}$ , RT ( $20\text{ °C}$ ),  $40\text{ °C}$  a  $80\text{ °C}$ . Sledovanými parametry u této zkoušky byla dle normy ČSN EN ISO 6892-1 mez kluzu v tahu, mez pevnosti v tahu a tažnost. Z výsledných hodnot statické zkoušky tahem znázorněných ve sloupcových grafech je zřejmé, že při zvyšování teploty zkušební vzorku v rozmezí od  $-50\text{ °C}$  do  $80\text{ °C}$  dochází k poklesu hodnot meze kluzu v tahu, meze pevnosti v tahu a zároveň ke zvýšení tažnosti.

Při porovnání naměřených hodnot meze kluzu v tahu  $R_{p0,2}$  s referenční hodnotou teploty RT ( $20\text{ °C}$ ) dochází při teplotě  $-25\text{ °C}$  k nárůstu hodnoty o 4 % a při teplotě  $-50\text{ °C}$  až o 8 %. Při teplotě  $0\text{ °C}$  je hodnota nižší pouze o 0,2 %. Při ohřevu na teplotu  $40\text{ °C}$  dochází ke snížení hodnoty o 2,89 % a při  $80\text{ °C}$  o 3,5 %.

Pro ověření, zda má teplota statisticky významný vliv na mechanické vlastnosti zkušební vzorku byla použita Analýza rozptylu (ANOVA). Testové kritérium  $T=40,37$  je větší než kritická hodnota  $F_{\text{krit}}=2,62$ , tzn., že pro hodnoty meze kluzu v tahu má teplota statisticky významný vliv na mechanické vlastnosti.

Dalším parametrem byla mez pevnosti v tahu  $R_m$ . Při stejném porovnání těchto hodnot s referenční hodnotou teploty RT ( $20\text{ °C}$ ) při  $-50\text{ °C}$ , došlo ke zvýšení hodnoty o 7,6 % a při  $-25\text{ °C}$  o 5,8 %. Při teplotě  $0\text{ °C}$  byl nárůst hodnoty pouze o 0,9 %. Za teploty  $40\text{ °C}$  se hodnota snížila o 2,4 % a u teploty  $80\text{ °C}$  došlo k poklesu hodnoty až o 4,8 %. Podle Analýzy rozptylu (ANOVA) vyšlo testovací kritérium  $T=84,54$ , které je mnohonásobně vyšší než kritická hodnota  $F_{\text{krit}}=2,62$ , takže i pro mez pevnosti v tahu má teplota statisticky významný vliv na mechanické vlastnosti.

Posledním sledovaným parametrem u statické zkoušky tahem byla tažnost  $A_{50\text{mm}}$ . V porovnání s referenční hodnotou teploty RT ( $20\text{ °C}$ ) došlo u zkušební vzorku ohřátého na teplotu  $-50\text{ °C}$  k poklesu hodnoty o 32,5 % a u teploty  $-25\text{ °C}$  o 28,7 %. Při teplotě  $0\text{ °C}$  došlo ke snížení hodnoty pouze o 1,2 %. S teplotou  $40\text{ °C}$  se hodnota meze pevnosti v tahu zvýšila o 13,8 % a při teplotě  $80\text{ °C}$  až o 33,8 %.

Testovací kritérium u tohoto parametru vyšlo  $T=110,10$  a je také mnohonásobně vyšší než kritická hodnota  $F_{krit}=2,62$ , tzn., že stejně jako u předchozích dvou parametrů, tak i pro tažnost má teplota statisticky významný vliv na mechanické vlastnosti.

Pro Charpyho rázovou zkoušku v ohybu byly zkušební vzorky zkoušeny za teplot  $-50\text{ °C}$ ,  $-40\text{ °C}$ ,  $-30\text{ °C}$ ,  $-20\text{ °C}$ ,  $-10\text{ °C}$ ,  $0\text{ °C}$ , RT ( $20\text{ °C}$ ),  $45\text{ °C}$  a  $85\text{ °C}$ . Hlavními sledovanými parametry byla dle normy ČSN EN ISO 14556 maximální síla, celková nárazová práce a celkový průhyb.

Při porovnání naměřených hodnot maximální síly  $F_m$  s referenční hodnotou teploty RT ( $20\text{ °C}$ ), došlo při zkušební teplotě  $-50\text{ °C}$  ke zvýšení průměrné hodnoty o 4,6 %, při teplotě  $-40\text{ °C}$  zvýšení o 3,4 %, při  $-30\text{ °C}$  o 6,2 %, pro teplotu  $-20\text{ °C}$  zvýšení o 2,3 % a při  $-10\text{ °C}$  se hodnota zvýšila pouze o 0,6 %. Za teploty  $0\text{ °C}$  se průměrná hodnota maximální síly zvýšila o 0,9 %, při teplotě  $45\text{ °C}$  došlo k poklesu o 2,8 % a u teploty  $85\text{ °C}$  se hodnota snížila o 1,6 %. Testové kritérium  $T=3,49$  je větší než kritická hodnota  $F_{krit}=2,209$ , tzn., že změna teploty má statisticky významný vliv pro maximální sílu.

Naměřené hodnoty celkové nárazové práce  $W_t$  v porovnání s referenční hodnotou teploty RT ( $20\text{ °C}$ ) se moc neliší. Při teplotě  $-50\text{ °C}$  dochází ke zvýšení průměrné hodnoty o 2,7 %, při  $-40\text{ °C}$  se zvýší o 2,2 %, při  $-30\text{ °C}$  o 2,9 %, při  $-20\text{ °C}$  o 2,3 %, při  $-10\text{ °C}$  o 0,1 %, při  $0\text{ °C}$  o 1,6 a při  $45\text{ °C}$  o 2,4 %. Jen při teplotě  $85\text{ °C}$  došlo ke snížení průměrné hodnoty o 2,4 %. Testové kritérium  $T=1,799$  je menší než kritická hodnota  $F_{krit}=2,209$ , takže teplota nemá statisticky významný vliv pro celkovou nárazovou práci.

Celkový průhyb  $S_t$  v porovnání s referenční hodnotou teploty RT ( $20\text{ °C}$ ) se stejně jako u celkové nárazové práce moc neliší. Při teplotě  $-50\text{ °C}$  se průměrná hodnota zvýší pouze o 0,2 %. Při  $-40\text{ °C}$  došlo ke snížení hodnoty o 1,4 %, při  $-30\text{ °C}$  o 0,9 %, při  $-20\text{ °C}$  a  $-10\text{ °C}$  o 2,9 %, při  $0\text{ °C}$  o 3,1 %, při  $85\text{ °C}$  o 0,2 % a u  $45\text{ °C}$  o 2,3 %. Testové kritérium  $T=0,48$  je menší než kritická hodnota  $F_{krit}=2,209$ , tzn., že stejně jako u celkové nárazové práce, tak i u celkového průhybu nemá teplota statisticky významný vliv.

U statické zkoušky tahem má teplota prokazatelný vliv na mechanické vlastnosti, zatímco u Charpyho rázové zkoušky v ohybu vyšlo, že teplota má významný vliv pouze na maximální sílu. Pro hodnoty celkové nárazové práce a celkového průhybu nikoliv. Vzhledem k malému rozdílu mezi testovacím kritériem  $T$  a kritickou hodnotou  $F_{krit}$  bych u Charpyho rázové zkoušky pro korektní posouzení vlivu teploty doporučoval větší počet zkušebních vzorků. Diametrálně odlišné chování při prováděných zkouškách, je zapříčiněno rychlostí deformace, při kterých byly zkoušky prováděny.

Slitiny hliníku jsou v praxi používané pro výrobu strojních součástí a mohou být používány v širokém rozmezí teplot. Daná práce může sloužit jako podpůrný materiál při konstrukci daného dílu s ohledem na provozní podmínky, při kterých pracuje.

## Seznam použité literatury

- [1] SKÁLOVÁ, Jana, Jaroslav KOUTSKÝ a Vladislav MOTYČKA. *Nauka o materiálech*. 4. Plzeň: FST ZČU, 2010. ISBN 978-80-7043-244-0.
- [2] ALAXIN, Ján. *Nauka o materiálu*. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1989. ISBN 80-7083-000-X.
- [3] MICHNA, Štefan, Ivan LUKÁČ, Vladivoj OČENÁŠEK, Rudolf KOŘENÝ, Jaromír DRÁPAL, Heinz SCHNEIDER a Andrea MIŠKUFOVÁ. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
- [4] *Hliník* [online]. [cit. 2018-06-26]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Hlin%C3%ADk>
- [5] JONŠTA, Zdeněk. *Nauka o kovech 2*. 2. Ostrava: VŠB-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2000. ISBN 80-7078-958-1.
- [6] *Vlastnosti mědi* [online]. [cit. 2018-06-26]. Dostupné z: [https://pt.kle.cz/cs\\_CZ/med.html](https://pt.kle.cz/cs_CZ/med.html)
- [7] PLUHAŘ, Jaroslav a Josef KORITTA. *Strojírenské materiály*. 3. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981.
- [8] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. [1. vyd.]. Brno: CERM, 1999. ISBN 80-7204-130-4.
- [9] KAUFMAN, John Gilbert a Elwin L ROOY. *AluminumAlloyCastings: Properties, Processes, and Applications*. AmericanFoundry Society, 2014. ISBN 9780871708038 0871708035.
- [10] HRUBÝ, Vojtěch, Miroslav GREGER, Jiří NĚMEC a Arnošt SILBERNAGEL. *Přehled materiálového inženýrství*. Ostrava: Kovosil, 2010. ISBN 978-80-903694-5-0.
- [11] *Hliník a slitiny hliníku* [online]. [cit. 2018-06-26]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/12907143-Hlinik-a-slitiny-hliniku.html>
- [12] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
- [13] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
- [14] ROLEČEK, Jakub. *Mechanické vlastnosti a struktura slitiny hliníku po tepelném zpracování*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [15] *Slitina hliníku EN-AW6082* [online]. [cit. 2018-06-27]. Dostupné z: <https://www.nedal.com/wp-content/uploads/2017/11/Nedal-alloy-Datasheet-EN-AW-6082.pdf>

- [16] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008. ISBN 978-80-7361-051-7.
- [17] Dissolution and Precipitation Behaviour during Continuous Heating of Al–Mg–Si Alloys in a Wide Range of Heating Rates [online]. [cit. 2018-06-27]. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/8/5/2830/htm>
- [18] *Tabulka slitin* [online]. [cit. 2018-06-27]. Dostupné z: <http://www.strojmetal.cz/tabulka-slitin>
- [19] *Tepelné zpracování* [online]. [cit. 2018-06-27]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/tepelne-zpracovani>
- [20] VANĚK, Mojmír. *Vývoj modelů chování slitin pro aplikaci v numerických simulacích svařování a tepelného zpracování*. Brno, 2017. Dizertační. Vysoké učení technické.
- [21] JANOVEC, Jiří a Jiří CEJP. *Nauka o materiálu: Struktura a vlastnosti materiálu a jejich zkoušení* [online]. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ - Fakulta strojní - Ústav materiálového inženýrství [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: [http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/3\\_2\\_\\_struktura-a-vlastnostni-materialu-a-jejich-zkouseni.pdf](http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/3_2__struktura-a-vlastnostni-materialu-a-jejich-zkouseni.pdf)
- [22] *Vlastnosti kovů a jejich zkoušení* [online]. [cit. 2018-06-27]. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_bakalari/NOM1/Vlastnosti\\_podklady.pdf](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/NOM1/Vlastnosti_podklady.pdf)
- [23] *Základní vlastnosti materiálů a jejich zkoušení* [online]. [cit. 2018-06-27]. Dostupné z: [http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky\\_mat.pdf](http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf)
- [24] Trhací stroj [online]. [cit. 2018-06-27]. Dostupné z: <https://www.logismarket.cz/anamet/trhaci-stroj/1787784862-1344467985-p.html>
- [25] *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty: ČSN EN ISO 6892-1*. 2010.
- [26] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: Cerm, 2003. ISBN 80-7204-283-1.
- [27] *Ocel - Zkouška rázem v ohybu na kyvadlovém kladivu tyčí Charpy s V-vrubem - Instrumentovaná zkušební metoda: ČSN EN ISO 14556*.
- [28] *Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy - Část 1 - Zkušební metoda: ČSN ISO 148-1*. 2017.
- [29] *Rázová kladiva a padostroje* [online]. [cit. 2018-06-27]. Dostupné z: <http://www.labortech.cz/produkty/razove-kladiva-a-padostroje/>

[30] *Oceli do nízkých a kryogenních teplot* [online]. [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/6977373-Oceli-do-nizkych-a-kryogennich-teplot-podkladem-pro-prednasku-byla-zprava-pro-vyzkumne-centrum-kolejovych-vozidel.html>

[31] *Mechanické vlastnosti* [online]. [cit. 2018-06-27]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/8934105-3-2-mechanicke-vlastnosti.html>

[32] ODEHNALOVÁ, Daniela. *Zkoušení materiálových vlastností I: Zkoušky mechanické* [online]. TUL – FS, Katedra materiálu [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/kestaz/KMT\\_NMI\\_NM-P\\_PR04\\_CZE\\_Odehnalova\\_Zkouseni%20materialovych%20vlastnosti%20I.pdf](http://www.kmt.tul.cz/kestaz/KMT_NMI_NM-P_PR04_CZE_Odehnalova_Zkouseni%20materialovych%20vlastnosti%20I.pdf)

## Seznam příloh

Příloha č. 1: Zkouškový protokol statické zkoušky tahem pro zkušební teplotu -50 °C

Příloha č. 2: Zkouškový protokol statické zkoušky tahem pro zkušební teplotu -25 °C

Příloha č. 3: Zkouškový protokol statické zkoušky tahem pro zkušební teplotu 0 °C

Příloha č. 4: Zkouškový protokol statické zkoušky tahem pro zkušební teplotu RT (20 °C)

Příloha č. 5: Zkouškový protokol statické zkoušky tahem pro zkušební teplotu 40 °C

Příloha č. 6: Zkouškový protokol statické zkoušky tahem pro zkušební teplotu 80 °C

Příloha č. 7: Naměřené hodnoty Charpyho rázové zkoušky v ohybu pro zkušební teplotu -50 °C

Příloha č. 8: Naměřené hodnoty Charpyho rázové zkoušky v ohybu pro zkušební teplotu -40 °C

Příloha č. 9: Naměřené hodnoty Charpyho rázové zkoušky v ohybu pro zkušební teplotu -30 °C

Příloha č. 10: Naměřené hodnoty Charpyho rázové zkoušky v ohybu pro zkušební teplotu -20 °C

Příloha č. 11: Naměřené hodnoty Charpyho rázové zkoušky v ohybu pro zkušební teplotu -10 °C

Příloha č. 12: Naměřené hodnoty Charpyho rázové zkoušky v ohybu pro zkušební teplotu 0 °C

Příloha č. 13: Naměřené hodnoty Charpyho rázové zkoušky v ohybu pro zkušební teplotu RT

Příloha č. 14: Naměřené hodnoty Charpyho rázové zkoušky v ohybu pro zkušební teplotu 45 °C

Příloha č. 15: Naměřené hodnoty Charpyho rázové zkoušky v ohybu pro zkušební teplotu 85 °C

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

## EN ISO 6892-1

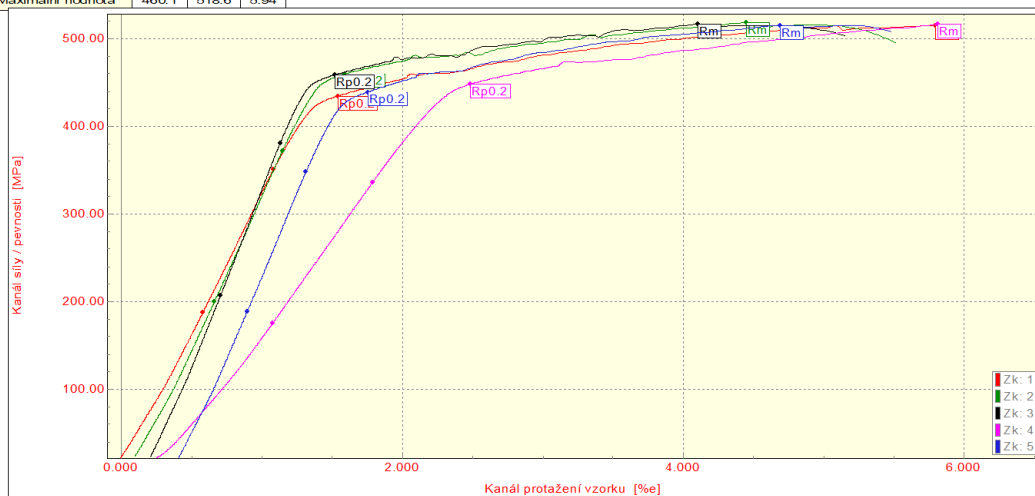
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : EN AW 6082 T4  
 Norma: :  
 Rozměr vzorku: : pr. 8 mm  
 Rychlost zatěžování: : proměnná 1(15) mm/min.  
 Vypracoval: : Jakub Bašus  
 Datum: : 4.4. 2018  
 Teplota: : -50°C

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
1	434.7	514.7	5.94
2	460.1	518.6	5.32
3	458.9	516.7	4.98
4	448.2	516.5	5.55
5	439.2	515.1	5.05

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
Počet zkoušek	5	5	5
Průměrná hodnota	448.2	516.3	5.37
Směrodatná odchylka	11.4	1.5	0.39
Minimální hodnota	434.7	514.7	4.98
Maximální hodnota	460.1	518.6	5.94



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
 Katedra strojírenské technologie  
 Oddělení tváření kovů a plastů  
 Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

## EN ISO 6892-1

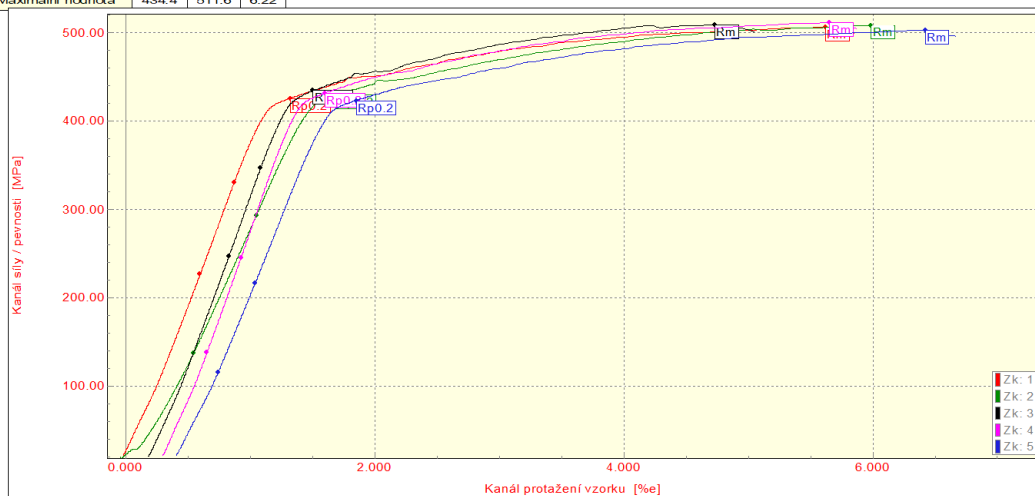
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : EN AW 6082 T4  
 Norma: :  
 Rozměr vzorku: : pr. 8 mm  
 Rychlost zatěžování: : proměnná 1(15) mm/min.  
 Vypracoval: : Jakub Bašus  
 Datum: : 4.4. 2018  
 Teplota: : -25°C

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
1	425.8	506.4	5.92
2	429.3	508.2	6.02
3	434.4	509.1	4.83
4	431.6	511.6	5.61
5	423.2	502.6	6.22

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
Počet zkoušek	5	5	5
Průměrná hodnota	428.9	507.6	5.72
Směrodatná odchylka	4.5	3.3	0.54
Minimální hodnota	423.2	502.6	4.83
Maximální hodnota	434.4	511.6	6.22



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
 Katedra strojírenské technologie  
 Oddělení tváření kovů a plastů  
 Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

## EN ISO 6892-1

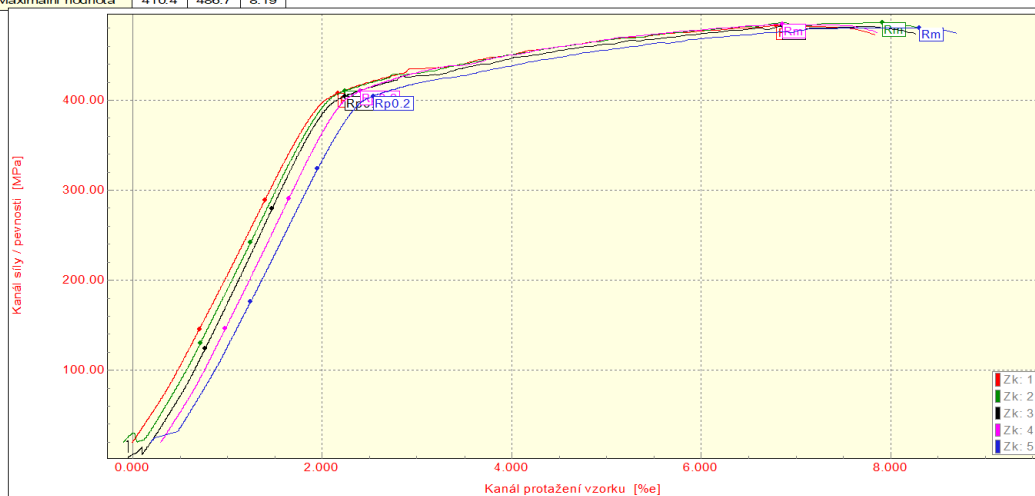
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : EN AW 6082 T4  
 Norma: :  
 Rozměr vzorku: : pr. 8 mm  
 Rychlost zatěžování: : proměnná 1(15) mm/min.  
 Vypracoval: : Jakub Bašus  
 Datum: : 4.4. 2018  
 Teplota: : 0°C

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
1	408.0	482.6	7.78
2	410.4	486.7	8.19
3	404.4	482.6	8.04
4	410.3	484.9	7.60
5	404.6	480.8	8.19

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
Počet zkoušek	5	5	5
Průměrná hodnota	407.5	483.5	7.96
Směrodatná odchylka	2.9	2.3	0.26
Minimální hodnota	404.4	480.8	7.60
Maximální hodnota	410.4	486.7	8.19



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
 Katedra strojírenské technologie  
 Oddělení tváření kovů a plastů  
 Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ



# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

## EN ISO 6892-1

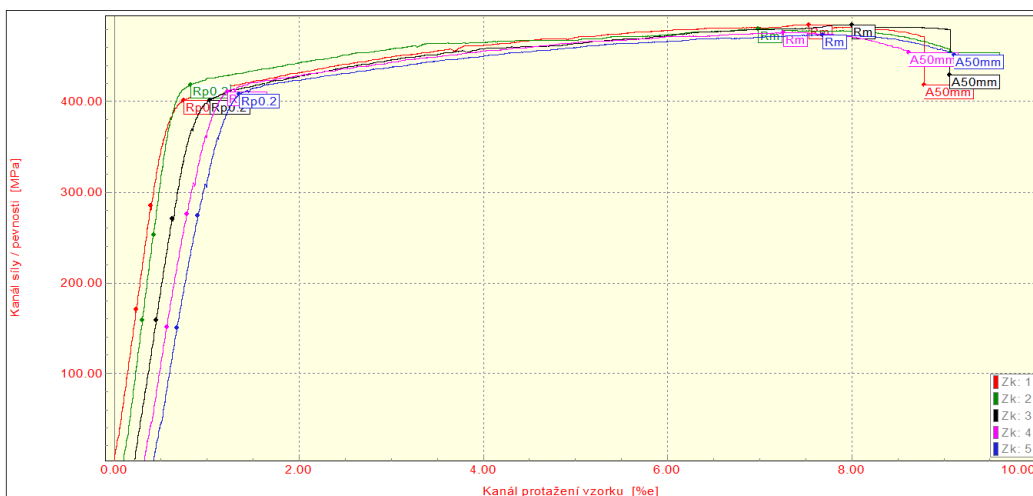
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Materiál : EN AW 6082 T4  
 Norma :  
 Rozměr vzorku : pr. 8 mm  
 Rychlost zatěžování : proměnná 1(15) mm/min.  
 Vypracoval : Jakub Bašus  
 Datum : 4.4. 2018  
 Teplota : 20°C (RT)

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A50mm %
1	401.5	484.9	8.21
2	418.5	480.3	8.40
3	401.9	485.1	8.18
4	410.6	476.0	7.52
5	407.7	473.5	7.87

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A50mm %
Počet zkoušek	5	5	5
Průměrná hodnota	408.0	480.0	8.04
Směrodatná odchylka	7.0	5.2	0.34
Minimální hodnota	401.5	473.5	7.52
Maximální hodnota	418.5	485.1	8.40



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
 Katedra strojírenské technologie  
 Oddělení tváření kovů a plastů  
 Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

## EN ISO 6892-1

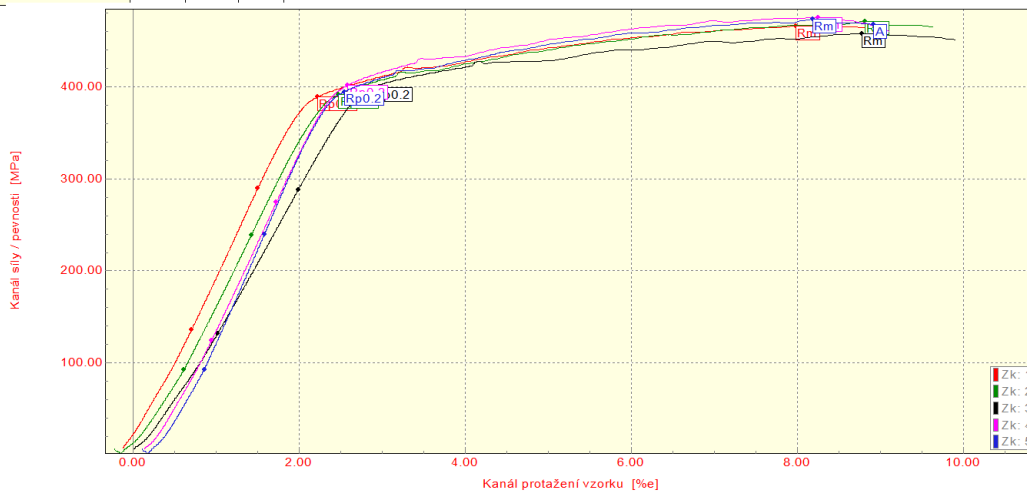
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : EN AW 6082 T4  
 Norma: :  
 Rozměr vzorku: : pr. 8 mm  
 Rychlost zatěžování: : proměnná 1(15) mm/min.  
 Vypracoval: : Jakub Bašus  
 Datum: : 4.4. 2018  
 Teplota: : 40°C

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
1	388.5	465.8	9.07
2	391.4	470.9	9.59
3	399.1	457.7	9.70
4	401.5	475.4	8.71
5	394.6	473.3	8.52

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
Počet zkoušek	5	5	5
Průměrná hodnota	395.0	468.6	9.12
Směrodatná odchylka	5.3	7.1	0.52
Minimální hodnota	388.5	457.7	8.52
Maximální hodnota	401.5	475.4	9.70



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
 Katedra strojírenské technologie  
 Oddělení tváření kovů a plastů  
 Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

## EN ISO 6892-1

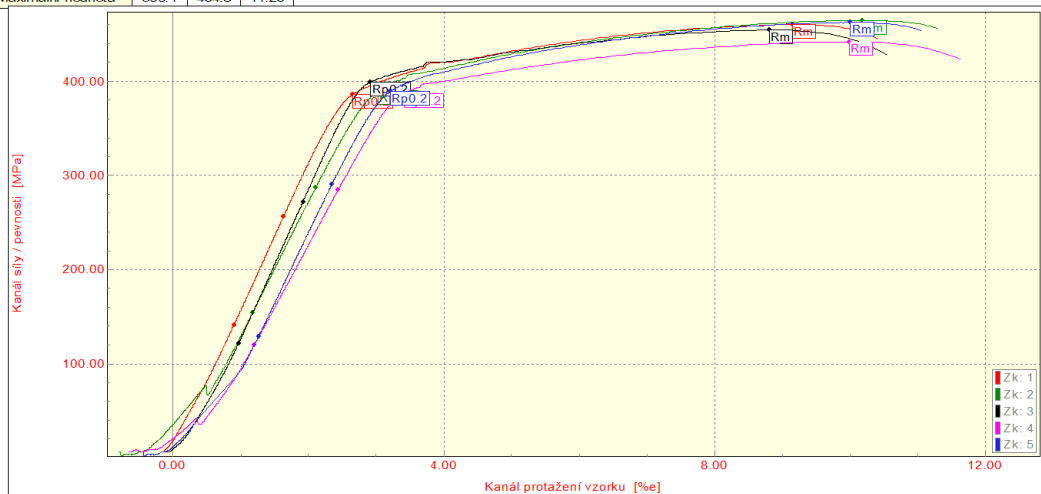
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : EN AW 6082 T4  
 Norma: :  
 Rozměr vzorku: : pr. 8 mm  
 Rychlost zatěžování: : proměnná 1(15) mm/min.  
 Vypracoval: : Jakub Bašus  
 Datum: : 4.4. 2018  
 Teplota: : 80°C

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
1	386.1	460.3	10.34
2	390.1	464.8	11.12
3	399.1	454.6	10.25
4	387.1	442.2	11.26
5	389.1	462.5	10.66

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
Počet zkoušek	5	5	5
Průměrná hodnota	390.3	456.9	10.72
Směrodatná odchylka	5.2	9.0	0.45
Minimální hodnota	386.1	442.2	10.25
Maximální hodnota	399.1	464.8	11.26



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
 Katedra strojírenské technologie  
 Oddělení tváření kovů a plastů  
 Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

## Příloha 7

Teplota	-50 °C				
vzorek	1	2	3	4	5
$F_{gy}$ [N]	7738,358	2593,779	2660,494	2558,172	2594,899
$F_m$ [N]	9291,665	9157,112	9187,046	9677,002	9179,887
$F_{iu}$ [N]	7326,515	7473,212	9187,046	6448,009	5776,126
$F_a$ [N]	4186,431	5223,268	5246,656	5499,146	4265,190
$S_{gy}$ [mm]	0,689	0,510	0,448	0,431	0,459
$S_t$ [mm]	5,581	5,581	5,581	5,598	5,581
$S_{iu}$ [mm]	1,952	1,912	1,722	1,946	2,119
$S_a$ [mm]	2,314	2,311	2,222	2,124	2,398
$W_m$ [J]	9,874	9,236	9,724	7,588	9,476
$W_{iu}$ [J]	11,699	11,924	11,874	11,519	12,514
$W_a$ [J]	13,670	13,210	12,987	12,581	13,910
$W_t$ [J]	15,673	15,720	15,539	15,587	15,818
$KV$ [J/cm <sup>2</sup> ]	21,804	22,123	22,008	21,995	22,328
$v$ [m/s]	5,426	5,426	5,426	5,426	5,426

## Příloha č. 8

Teplota	-40 °C				
vzorek	1	2	3	4	5
$F_{gy}$ [N]	2642,366	2471,174	2933,837	2597,733	2463,199
$F_m$ [N]	9389,517	8865,503	9169,980	9321,869	9249,172
$F_{iu}$ [N]	7270,664	8564,940	6245,154	5814,576	6926,526
$F_a$ [N]	5434,992	5246,842	5106,616	4986,761	4848,726
$S_{gy}$ [mm]	0,431	0,431	0,442	0,448	0,442
$S_t$ [mm]	5,409	5,478	5,489	5,443	5,610
$S_{iu}$ [mm]	1,912	1,602	1,958	2,119	1,803
$S_a$ [mm]	2,188	2,119	2,136	2,356	2,136
$W_m$ [J]	7,557	7,538	7,545	9,682	7,554
$W_{iu}$ [J]	11,426	8,857	11,384	12,847	10,314
$W_a$ [J]	13,091	12,350	12,363	14,136	12,239
$W_t$ [J]	15,700	15,245	15,291	16,463	15,291
$KV$ [J/cm <sup>2</sup> ]	22,264	21,117	32,742	23,154	21,358
$v$ [m/s]	5,426	5,426	5,426	5,426	5,426

Příloha č. 9

Teplota	-30 °C				
	1	2	3	4	5
<b>vzorek</b>					
$F_{gy}$ [N]	9419,072	2548,591	2525,649	2222,554	7009,609
$F_m$ [N]	10139,784	9209,965	9893,381	8831,035	9134,706
$F_{iu}$ [N]	10139,784	6728,890	6679,546	5756,519	8909,166
$F_a$ [N]	6397,023	4547,610	5660,810	4811,364	4693,852
$S_{gy}$ [mm]	0,896	0,431	0,436	0,431	0,689
$S_t$ [mm]	5,168	5,564	5,592	5,650	5,615
$S_{iu}$ [mm]	1,137	1,929	2,463	1,912	1,636
$S_a$ [mm]	1,292	2,305	2,704	2,101	2,384
$W_m$ [J]	3,303	9,070	12,796	7,358	7,403
$W_{iu}$ [J]	3,470	11,465	17,024	10,662	9,020
$W_a$ [J]	4,270	13,516	18,500	11,644	14,121
$W_t$ [J]	16,054	15,740	20,512	14,843	16,334
$KV$ [J/cm <sup>2</sup> ]	22,857	22,174	28,832	20,512	22,727
$v$ [m/s]	5,426	5,555	5,555	5,426	5,426

Příloha č. 10

Teplota	-20 °C				
	1	2	3	4	5
<b>vzorek</b>					
$F_{gy}$ [N]	2328,676	2829,994	2397,568	2303,464	2464,032
$F_m$ [N]	9160,031	9142,522	8947,373	9127,875	9119,714
$F_{iu}$ [N]	7454,300	6673,928	7462,721	5608,382	6583,152
$F_a$ [N]	4457,482	4536,723	5196,747	4800,874	4522,413
$S_{gy}$ [mm]	0,442	0,419	0,448	0,425	0,425
$S_t$ [mm]	4,869	5,518	5,443	5,610	5,627
$S_{iu}$ [mm]	1,810	1,935	1,822	2,090	2,016
$S_a$ [mm]	2,337	2,310	2,268	2,337	2,268
$W_m$ [J]	7,466	7,340	7,334	7,476	7,537
$W_{iu}$ [J]	10,354	11,261	10,349	12,361	11,978
$W_a$ [J]	13,393	13,266	13,158	13,640	13,340
$W_t$ [J]	15,313	15,525	15,562	15,965	15,689
$KV$ [J/cm <sup>2</sup> ]	21,804	21,995	21,970	22,599	22,072
$v$ [m/s]	5,512	5,409	5,348	5,512	5,443

Příloha č. 11

Teplota	-10 °C				
	vzorek	1	2	3	4
$F_{gy}$ [N]	2 803,553	3 119,092	2 291,253	2 724,592	3 142,354
$F_m$ [N]	8 930,792	9 021,059	8 838,166	8 950,720	8 994,753
$F_{iu}$ [N]	6 342,809	7 574,187	7 229,360	8 490,901	6 440,223
$F_a$ [N]	5 411,270	4 514,473	5 630,688	4 379,954	5 415,464
$S_{gy}$ [mm]	0,431	0,431	0,431	0,431	0,431
$S_t$ [mm]	5,610	5,581	5,552	4,875	5,437
$S_{iu}$ [mm]	1,926	1,774	1,809	1,705	1,946
$S_a$ [mm]	2,153	2,308	2,153	2,274	2,176
$W_m$ [J]	7,187	7,362	7,305	7,325	7,345
$W_{iu}$ [J]	10,787	10,028	10,141	9,390	11,073
$W_a$ [J]	12,036	13,189	12,229	12,881	12,375
$W_t$ [J]	15,246	15,478	15,326	15,067	15,266
$KV$ [J/cm <sup>2</sup> ]	21,511	21,702	21,549	21,434	21,676
$v$ [m/s]	5,469	5,512	5,555	5,512	5,555

Příloha č. 12

Teplota	0 °C				
	vzorek	1	2	3	4
$F_{gy}$ [N]	6384,782	2657,624	2658,673	2927,036	2780,617
$F_m$ [N]	9072,389	8953,240	8897,588	8814,275	9127,566
$F_{iu}$ [N]	7547,099	6367,889	5359,031	7029,135	7882,500
$F_a$ [N]	4696,870	5533,537	5003,988	4222,265	6441,744
$S_{gy}$ [mm]	0,689	0,431	0,431	0,425	0,436
$S_t$ [mm]	5,529	5,495	4,875	5,420	5,700
$S_{iu}$ [mm]	1,826	1,933	2,084	1,796	1,952
$S_a$ [mm]	2,384	2,136	2,336	2,285	2,136
$W_m$ [J]	7,149	7,379	7,289	7,305	8,533
$W_{iu}$ [J]	10,264	11,058	12,018	9,991	10,961
$W_a$ [J]	13,637	12,197	13,296	12,885	12,139
$W_t$ [J]	15,882	15,166	15,301	15,330	15,818
$KV$ [J/cm <sup>2</sup> ]	22,483	21,472	22,098	21,791	22,200
$v$ [m/s]	5,426	5,555	5,426	5,443	5,323

## Příloha č. 13

Teplota	RT				
	1	2	3	4	5
<b>vzorek</b>					
$F_{gy} [N]$	2003,007	2417,944	2496,605	2887,089	2704,785
$F_m [N]$	9660,423	8697,449	8535,690	8729,134	8848,380
$F_{iu} [N]$	8044,258	7018,189	5728,369	5469,842	7049,809
$F_a [N]$	6065,393	5171,952	4557,291	4381,482	3977,091
$S_{gy} [mm]$	0,448	0,431	0,431	0,431	0,431
$S_t [mm]$	5,621	5,615	5,437	5,518	5,650
$S_{iu} [mm]$	1,946	1,791	1,912	2,101	2,015
$S_a [mm]$	2,274	2,239	2,107	2,325	2,463
$W_m [J]$	5,864	8,904	7,090	8,795	8,776
$W_{iu} [J]$	10,101	10,054	10,504	12,109	11,591
$W_a [J]$	11,724	12,743	11,502	13,223	13,953
$W_t [J]$	14,916	15,698	14,160	15,469	16,029
$KV [J/cm^2]$	21,791	22,200	20,386	21,842	22,637
$v [m/s]$	5,348	5,426	5,426	5,426	5,426

## Příloha č. 14

Teplota	45 °C				
	1	2	3	4	5
<b>vzorek</b>					
$F_{gy} [N]$	2971,592	3161,470	2059,800	2568,276	3607,841
$F_m [N]$	8584,672	8654,736	8892,250	8699,418	8407,259
$F_{iu} [N]$	5294,168	6913,498	7003,054	5245,455	6479,771
$F_a [N]$	4408,968	3962,173	4163,694	4340,739	3704,902
$S_{gy} [mm]$	0,431	0,431	0,454	0,425	0,431
$S_t [mm]$	5,443	5,621	5,650	5,604	4,892
$S_{iu} [mm]$	2,136	2,015	1,969	2,113	2,015
$S_a [mm]$	2,343	2,498	2,331	2,320	2,429
$W_m [J]$	7,323	9,106	7,115	8,560	7,163
$W_{iu} [J]$	11,923	11,301	11,001	11,880	11,148
$W_a [J]$	12,916	13,822	13,005	12,889	13,143
$W_t [J]$	14,883	15,685	15,892	15,254	14,699
$KV [J/cm^2]$	21,029	21,919	22,059	21,536	21,067
$v [m/s]$	5,374	5,297	5,323	5,512	5,426

<b>Teplota</b>	<b>85 °C</b>				
<b>vzorek</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
$F_{gy}$ [N]	2284,935	2502,904	3118,435	2411,416	2455,153
$F_m$ [N]	8914,790	8241,789	8341,876	9327,437	8922,505
$F_{iu}$ [N]	7468,153	7824,857	6775,939	9327,437	6411,691
$F_a$ [N]	5759,982	4360,001	3510,732	7372,620	6196,144
$S_{gy}$ [mm]	0,448	0,436	0,448	0,465	0,448
$S_t$ [mm]	5,212	5,765	5,633	5,730	5,460
$S_{iu}$ [mm]	1,969	1,608	1,822	1,206	1,912
$S_a$ [mm]	2,153	2,434	2,567	1,378	2,153
$W_m$ [J]	4,172	6,723	8,732	4,394	4,376
$W_{iu}$ [J]	10,188	8,012	9,683	4,595	9,870
$W_a$ [J]	11,280	13,119	13,502	5,510	11,350
$W_t$ [J]	14,652	15,246	15,047	14,917	14,678
$KV$ [J/cm <sup>2</sup> ]	21,067	21,231	20,902	21,016	20,890
$v$ [m/s]	5,512	5,426	5,426	5,555	5,426