



Vliv doby stárnutí na mech vlastnosti slitiny AW 2024

Bakalářská práce

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



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michaela Štípková**
Osobní číslo: **S15000200**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojní inženýrství**
Název tématu: **Vliv doby stárnutí na mech vlastnosti slitiny AW 2024**
Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**

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

1. Rozdělení slitin hliníku, způsoby výroby a použití v průmyslové praxi.
2. Možnosti tepelného zpracování slitin hliníku pro zvýšení jejich mechanických vlastností.
3. Testování vlastností materiálů pomocí statické zkoušky tahem.
4. Experimentální zjištění vlivu doby stárnutí na výsledné mechanické hodnoty slitiny hliníku EN AW 2024.
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] **POLMEAR, I.** *Ligth Alloy - From traditional Alloys to Nanocrystals.* 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. s. 421. ISBN 0-7506-6371-5.
- [2] **PTÁČEK, L. et al.** *Nauka o materiálu I.* 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademickénakladatelství CERM, 2003. s. 516. ISBN 80-7204-283-1.
- [3] **PTÁČEK, L. et al.** *Nauka o materiálu II.* Brno: Akademickénakladatelství CERM, 1999. s. 350. ISBN 80-7204-130-4.
- [4] **ASM HANDBOOK.** *Volume 8 - Mechanical Testing and Evaluation.* 10th ed. Materials Park: ASM International, 2000. s. 998. ISBN 0-87170-389-0.
- [5] **PÖHLANDT, K.** *Materials Testing for the Metal Forming Industry.* Berlin: Springer-Verlag, 1989. s. 226. ISBN 3-540-50651-9.
- [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.

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

Byla jsem seznámena 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 vědoma 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 vypracovala 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

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem různých podmínek stárnutí na mechanické vlastnosti vytvrditelné hliníkové slitiny EN AW–2024. V teoretické části jsou uvedeny vlastnosti, výroba a použití hliníku a jeho slitin v technické praxi. Dále jsou zde popsány možnosti tepelného zpracování za účelem ovlivnění mechanických vlastností hliníkových slitin. V experimentální části byl zjišťován vliv teploty a směru válcování na časovou změnu mechanických vlastností slitiny EN AW–2024 pomocí statické zkoušky tahem. Naměřené hodnoty byly následně analyzovány a vyhodnoceny.

Klíčová slova

slitina EN AW–2024, vytvrzování, stárnutí, mechanické vlastnosti, statická zkouška tahem

Annotation

This bachelor thesis deals with the influence of different conditions of ageing on mechanical properties of hardenable EN AW–2024 aluminium alloy. The theoretical part describes properties, production and use of aluminium and its alloys in technical field. There are also described possibilities of heat treatment in order to influence mechanical properties of aluminium alloys. In the experimental part, the influence of temperature and rolling direction on time-dependent changes of mechanical properties of EN AW–2024 aluminum alloy was determined by static tensile test. Afterwards the measured values were analyzed and evaluated.

Key words

EN AW–2024 Aluminum Alloy, Hardening, Ageing, Mechanical Properties, Static Tensile Test

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu své bakalářské práce doc. Ing. Pavlovi Solfronkovi, Ph.D. za jeho odbornou pomoc, připomínky, ochotu pomoci a poskytnuté materiály na zpracování této práce. Dále bych mu chtěla poděkovat i za jeho volný čas věnovaný konzultacím ohledně bakalářské práce.

Obsah

| | |
|---|----|
| Seznam použitých zkratk a symbolů | 9 |
| 1 Úvod | 10 |
| 2 Teoretická část | 11 |
| 2.1 Hliník a jeho vlastnosti | 11 |
| 2.2 Použití hliníku | 12 |
| 2.3 Výroba hliníku | 12 |
| 2.3.1 Výroba oxidu hlinitého | 13 |
| 2.3.2 Výroba surového hliníku | 15 |
| 2.3.3 Rafinace surového hliníku | 16 |
| 2.4 Slitiny hliníku | 17 |
| 2.4.1 Slévárenské slitiny hliníku | 19 |
| 2.4.2 Slitiny hliníku určené pro tváření | 20 |
| 2.4.2.1 Tvářené vytvrditelné slitiny | 20 |
| 2.4.2.2 Tvářené nevytvrditelné slitiny | 22 |
| 2.5 Označování hliníku a jeho slitin | 23 |
| 2.5.1 Označování slévárenských slitin hliníku | 23 |
| 2.5.2 Označování slitin hliníku pro tváření | 24 |
| 2.5.3 Označování stavů tepelného zpracování hliníku a jeho slitin | 25 |
| 2.6 Tepelné zpracování hliníku a jeho slitin | 26 |
| 2.6.1 Žhání | 26 |
| 2.6.2 Precipitační (zpevnění) vytvrzování | 28 |
| 2.7 Slitina EN AW-2024 | 31 |
| 2.7.1 Tepelné zpracování | 31 |
| 2.7.2 Vlastnosti | 32 |
| 2.7.3 Oblast použití | 32 |
| 2.8 Statická zkouška tahem | 33 |
| 2.8.1 Zjišťované hodnoty a vlastnosti | 33 |
| 2.8.2 Zkušební tělesa | 35 |
| 3 Experimentální část | 36 |
| 3.1 Specifikace podmínek testování vzorků | 36 |
| 3.2 Statická zkouška tahem | 37 |
| 3.3 Vyhodnocení zkoušky | 38 |

| | | |
|-------|---------------------------------|----|
| 3.3.1 | Zpracování získaných dat | 38 |
| 3.3.2 | Analýza rozptylu (ANOVA)..... | 44 |
| 4 | Závěr..... | 47 |
| | Seznam použité literatury | 48 |
| | Seznam příloh..... | 49 |

Seznam použitých zkratek a symbolů

| | | |
|-------------------|---|--|
| A | Tažnost | [%] |
| $A_{80\text{mm}}$ | Tažnost zkušební tyče délky 80 mm | [%] |
| a_0 | počáteční tloušťka plochého zkušebního tělesa | [mm] |
| α | Hladina významnosti | [%] |
| b_0 | počáteční šířka zkoušené délky plochého zkušebního tělesa | [mm] |
| ε | Poměrné prodloužení zkušební tyče | [1] |
| F | Testovací kritérium pro F-test; síla | [-];[N] |
| FCC | Kubická plošně středěná kryst. struktura | |
| F_e | Síla na mezi kluzu | [N] |
| φ | Skutečná podélná deformace | [1] |
| F_{krit} | Kritická hodnota pro F-test | |
| F_m | Maximální zatížení | [N] |
| $F_{p0,2}$ | Smluvní síla na mezi kluzu | [N] |
| H_0 | Nulová hypotéza | |
| H_1 | Alternativní hypotéza | |
| HB | Tvrдость podle Brinella | |
| k | koeficient proporcionality | [1] |
| L_0 | Počáteční měřená délka zkušební tyče | [mm] |
| L_c | zkoušená délka zkušební tyče | [mm] |
| L_t | celková délka zkušebního tělesa | [mm] |
| L_u | Konečná měřená délka zkušební tyče po porušení | [mm] |
| ΔL | Prodloužení zkušební tyče | [mm] |
| M | Křemíkový modul bauxitu | [1] |
| R_e | Mez kluzu v tahu | [MPa] |
| R_m | Mez pevnosti v tahu | [MPa] |
| $R_{p0,2}$ | Smluvní mez kluzu | [MPa] |
| RT | Room Temperature (pokojová teplota) | |
| RŽ | Rozpouštěcí žíhání | |
| ρ | Objemová hustota | [kg·m ⁻³ , g·dm ⁻³] |
| S_0 | Počáteční průřezová plocha zkoušené délky | [mm ²] |
| S_u | Minimální průřezová plocha po lomu | [mm ²] |
| σ | Napětí | [MPa] |
| t | Teplota (Celsiova teplotní stupnice) | [°C] |
| T | Termodynamická (absolutní) teplota | [K] |
| Z | Kontrakce | [%] |

1 Úvod

Hliník je pro lidstvo z hlediska roční celosvětové spotřeby stále nejdůležitější neželezný kov. Slitiny hliníku díky svým relativně vysokým hodnotám mechanických vlastností k poměrně nízké hmotnosti slouží dlouhodobě jako hlavní konstrukční materiály v leteckém průmyslu. Konkrétně potom vytvrditelná slitina s označením EN AW–2024 a její upravené varianty jsou vůbec nejpoužívanější, co se konstrukcí letadel týče. I když je v poslední době snaha o nahrazení slitin hliníku jinými materiály o ještě menší hmotnosti např. různými kompozity nebo materiály na bázi hořčíku, stále je hliník prakticky nenahraditelný u těch dílů, které jsou vystaveny vyššímu namáhání (např. draky letadel).

Tato bakalářská práce byla řešena ve spolupráci se společností Aerosud, která působí v oblasti leteckého průmyslu a mimo jiné vyrábí díly z hliníkové slitiny EN AW–2024. Za účelem získání optimálních vlastností při zpracování této slitiny technologií tváření definuje společnost technologické požadavky, na základě kterých může být slitina zpracována. Při nesplnění těchto podmínek musí být celý proces tepelného zpracování znovu opakován, což je značně energeticky, časově i finančně náročné. Cílem této práce je analýza vlivů různých, předem definovaných podmínek stárnutí na mechanické vlastnosti slitiny EN AW–2024 a následně na základě získaných výsledků vyhodnotit, do jaké míry jsou současné technologické postupy stanovené společností Aerosud na zpracování této slitiny nutné.

2 Teoretická část

2.1 Hliník a jeho vlastnosti

Hliník (chem. značka Al) je kov stříbrně šedé barvy a patří mezi nejběžnější technické kovy. Vyznačuje se především relativně nízkou hustotou $2669 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$, a proto se zařazuje do skupiny lehkých kovů (spolu s Mg, Be, Ti apod., jejichž hustota je rovněž pod $5000 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$) [1,6]. Mezi jeho další využívané vlastnosti v technické praxi patří i jeho velmi dobrá elektrická vodivost (při teplotách pod $1,2 \text{ [K]}$ dokonce supravodivost [2]), která však klesá s větším množstvím nečistot a tvářením za studena. Krystalizace hliníku probíhá v kubické plošně centrované soustavě (FCC), a proto vykazuje dobrou tvárnost nejen za tepla, ale i za studena. Na druhou stranu se však hliník vyznačuje nízkými hodnotami mezí pevnosti (R_m přibližně 80 [MPa]^1), které se ještě s rostoucí čistotou hliníku snižují. Kromě čistoty ovlivňuje mechanické vlastnosti hliníku mimo jiné i velikost jeho zrn (uplatňuje se tedy i vliv způsobu předchozího zpracování), kdy hliník s jemnozrnnou strukturou vykazuje vyšší hodnoty mechanických vlastností než ten s hrubozrnnější strukturou. U taveniny hliníku se výsledná jemnozrnná struktura může dosáhnout přidáním vhodných přísad a tím ovlivnit jeho krystalizaci, u tvářeného hliníku se výrazně jemnějšího zrna dosáhne např. tvářením za studena a následným rekrystalizačním žiháním, což je podstatně snadnější způsob. Kvůli již zmíněné charakteristice a také poměrně špatným slévárenským vlastnostem se čistý hliník používá ve značně větší míře ke tváření než ke slévání [3].

Tab. 1 Vybrané vlastnosti čistého hliníku [2,6]

| | |
|---|-------------------------------|
| <i>Mez pevnosti v tahu (R_m)</i> | <i>80 MPa</i> |
| <i>Hustota</i> | <i>2669 kg.m⁻³</i> |
| <i>Tvrdość</i> | <i>18-40 HB</i> |
| <i>Teplota tání</i> | <i>660 °C</i> |
| <i>Slévateľnosť</i> | <i>špatná</i> |
| <i>Svařitelnost</i> | <i>dobrá</i> |
| <i>Obrobitelnost</i> | <i>špatná</i> |

Čistota hliníku vyrobeného hutním způsobem (tj. technicky čistý hliník) se pohybuje od 99 % do 99,9 %, přičemž mezi hlavní nečistoty patří Fe, Si, Cu, Mg, apod. [3]. Hliník je nestálý a velmi reaktivní a v přírodě se vyskytuje zejména ve formě sloučenin, z nichž nejvýznamnější je oxid hlinitý (Al_2O_3). S tím souvisí i velmi významná vlastnost hliníku, a to stabilita ve většině oxidačních

¹ Hodnoty R_m se liší v závislosti na stavu materiálu (v měkkém stavu 15 MPa, v tvrdém 110 MPa) [3]

prostředí, kdy dochází k reakci a vzniku pasivační povrchové vrstvy Al_2O_3 , která je velmi tvrdá a zabraňuje další oxidaci a degradaci materiálu. Tohoto jevu se využívá při procesu eloxování, kdy se zvětšuje tloušťka pasivační vrstvy umělou oxidací, a tím i odolnost proti korozi.

Vrstvička oxidů Al_2O_3 představuje však značný problém při svařování hliníku. Tato elektricky nevodivá vrstva brání spojení základního a přídatného materiálu a navíc je hydrofilní (tj. váže vodu), což je nežádoucí, protože přítomnost vodíku ve svaru může způsobovat jeho pórovitost. Nezbytné odstranění vrstvy Al_2O_3 z povrchů součástí před samotným procesem svařování bývá však především kvůli její odolnosti velmi obtížné a v praxi se využívá různých způsobů čištění chemickou, mechanickou i fyzikální cestou.

2.2 Použití hliníku

Technicky čistý hliník se používá hlavně u produktů, kde se využívá jeho příznivých vlastností (viz kap. 2.1), ale kde zároveň nejsou na závadu nízké hodnoty pevnosti. Asi 60 % hliníku se zpracovává na plechy, které se dále mohou tvářet a upravovat. Díky své chemické odolnosti proti korozi v kyselém prostředí nachází hliník uplatnění v chemickém a potravinářském průmyslu jako obalový materiál ve formě plechovek, tub, folií apod. Elektrické vlastnosti hliníku se využívají k výrobě vodičů nebo elektrickým kondenzátorů. Velký význam má také pro plátování ocelových plechů nebo pro alitování (sycení povrchů hliníkem) u výrobků z ocelí nebo slitin niklu, což je technologie zabraňující korozi a okujení [6].

2.3 Výroba hliníku

I když je hliník nejrozšířenější kov v zemské kůře (7-8 %), jeho separace se podařila až v roce 1825 dánskému chemikovi Hansu Christianovi Oerstedovi. Poměrně nákladná a složitá výroba hliníku však bránila většímu průmyslovému rozšíření, a proto byl tento kov velmi drahý, svého času dokonce dražší než zlato. Až v roce 1886, kdy byl objeven způsob výroby hliníku elektrolytickým rozkladem oxidu hlinitého (Al_2O_3) francouzským vědcem Paulem Heroultem a americkým chemikem Charlesem Hallem, došlo k rozmachu jeho průmyslovému využití a tento způsob se stal základem i současné výroby hliníku [2,4].

Celý proces výroby hliníku lze rozdělit do 2 (případně 3 etap):

- **Výroba oxidu hlinitého (Al_2O_3)**
- **Výroba surového hliníku**
- **Rafinace surového hliníku (pro speciální účely)**

2.3.1 Výroba oxidu hlinitého

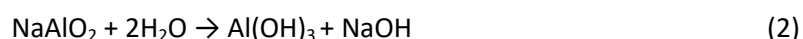
Nejvýznamnější rudou pro výrobu hliníku je *bauxit* ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), jehož obsah Al_2O_3 se pohybuje mezi 40 – 60 %. Bauxit je směs několika různých minerálů obsahující hliník (především gibbsit $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ a boehmit $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) a dalších příměsí např. hydroxidů železa, jílu aj. Z bauxitu se následně poměrně složitým postupem vyrábí čistý oxid hlinitý (Al_2O_3), který lze získat různými způsoby, ale v průmyslové praxi se využívají jen některé z nich. Vhodnost jednotlivých metod se určuje mimo jiné dle tzv. *křemíkového modulu bauxitu* M , neboli hmotnostní poměru oxidu hlinitého a oxidu křemičitého. Křemíkový modul u kvalitních bauxitů je M vyšší než 10, naopak bauxity s hodnotou M menší než 3 nejsou vhodné k výrobě Al_2O_3 [2].

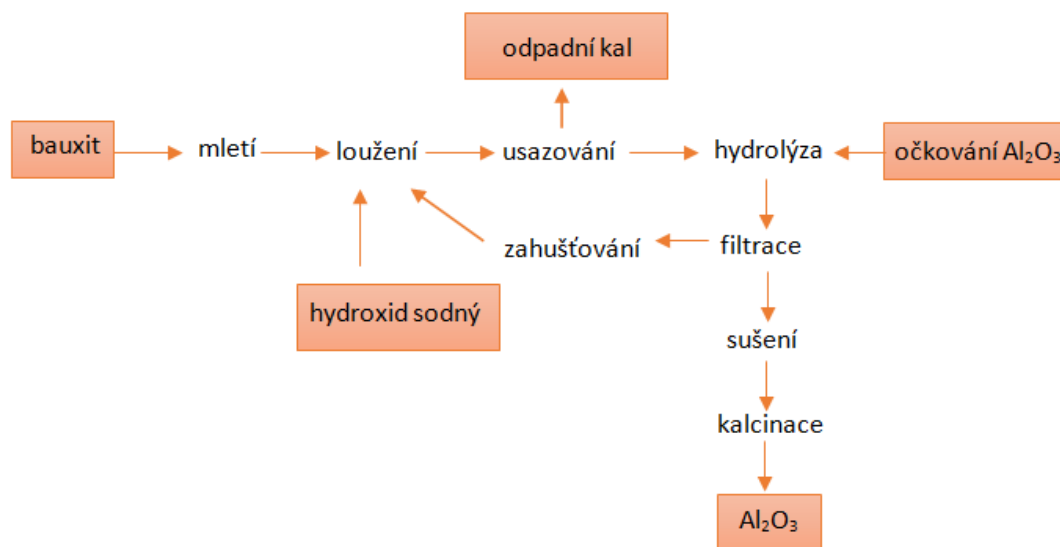
• Alkalické metody

Nejčastější způsob získání Al_2O_3 je pomocí alkalických metod, kdy se při působení zásad (NaOH , resp. Na_2CO_3) na rudu bauxitu slučuje oxid hlinitý a hlinitan sodný. Podle způsobu přeměny oxidu hlinitého na hlinitan sodný rozlišujeme dvě metody, a to mokrou cestu (tzv. *Bayerovou metodu*) a suchou cestu (*spékací metodu*).

a) Bayerova metoda

Bayerova metoda patří k nejhospodárnějším způsobům pro zpracování kvalitního bauxitu ($M \geq 10$), obsahujícího poměrně malé množství oxidu křemičitého. Oxid hlinitý (Al_2O_3) získaný tímto procesem je velmi čistý – obsah nečistot se pohybuje v řádech setin procent. Tato metoda byla objevena rakouským chemikem Karlem Josefem Bayerem na konci 19. století a její podstatou jsou dva pochody. První z nich spočívá v loužení oxidu hlinitého (Al_2O_3) obsaženého v bauxitu roztokem hydroxidu sodného (NaOH) při zvýšeném tlaku a teplotě za vzniku hlinitanu sodného (NaAlO_2). Vzniklý odpadní produkt v podobě tzv. *červeného kalu* je silně zásaditý a nerozpustný, tudíž jeho separace se provádí sedimentací a filtrací. Druhým procesem je následný rozklad roztoku NaAlO_2 pomocí hydrolýzy, kdy dojde k vylučování hydroxidu hlinitého ($\text{Al}(\text{OH})_3$), ze kterého se pak kalcinací při teplotách 1200 °C požadovaný Al_2O_3 zbavuje vody. Chemické reakce předešlých pochodů lze popsat následujícími rovnicemi [2]:





Obr. 1 Schéma výroby oxidu hlinitého Bayerovým způsobem [13]

b) Spékací metoda

Spékací metoda se užívá pro bauxity s křemíkovým modulem $M < 6$. Na rozdíl od Bayerovy metody, kdy se bauxit louží nejprve roztokem NaOH, se ruda spéká se solemi alkalických kovů (většinou Na_2CO_3) a vápencem (CaCO_3) nejčastěji v rotačních nebo elektrických pecích. Tímto způsobem vznikne NaAlO_2 v pevné formě a pro jeho získání ve formě vodního roztoku se dále louhuje ve vodě nebo roztokem NaOH. Následuje rozklad NaAlO_2 působením CO_2 za vzniku Al(OH)_3 , který se po filtraci dále kalcinuje za vzniku požadovaného Al_2O_3 [2].

• Acidické metody

Výroba Al_2O_3 prostřednictvím kyselých metod se v současnosti už příliš nepoužívá, kvůli nákladnosti a složitosti celého postupu. Při těchto procesech se ruda bauxitu vystavuje působení anorganických kyselin (např. H_2SO_4 , HCl , HNO_3), přičemž se oxid hlinitý přeměňuje na příslušnou hlinitou sůl (např. Al_2SO_4). Při rozkladu této soli vzniká Al(OH)_3 , ze kterého se po vyžhání získá výsledný Al_2O_3 zbavený vody.

• Elektrotermické metody

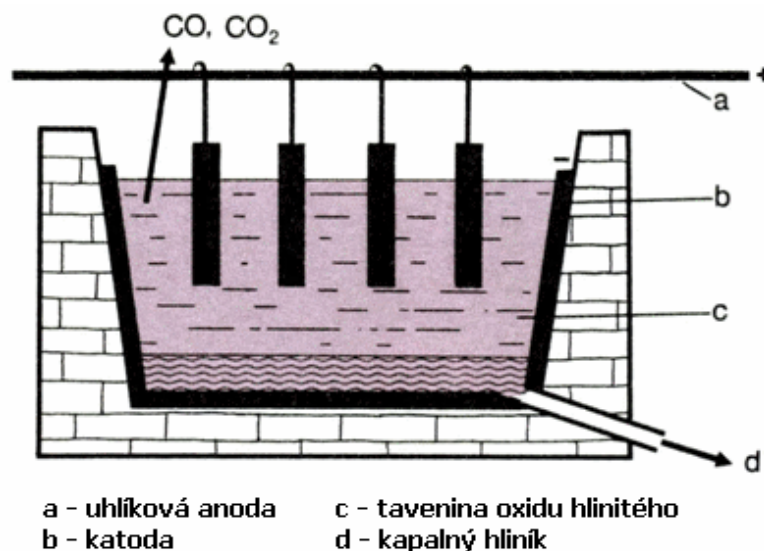
Kvůli požadavkům na ekonomickou průmyslovou výrobu jsou tyto metody vázány na dostatek levné elektrické energie, a proto se jejich použití omezuje jen na několik málo případů. Tento postup je založen na termických procesech, kdy dochází k tavení bauxitu (nebo jiné rudy obsahující hliník) za vysokých teplot spolu s uhlím v elektrické obloukové peci. Vyredukováním příměsí se získá roztavený Al_2O_3 [2].

2.3.2 Výroba surového hliníku

Kovový hliník se z roztaveného čistého oxidu hlinitého (Al_2O_3) získává elektrolytickým způsobem tzv. **Hallův-Héroultův postup**. Tento proces spočívá v elektrolýze roztaveného oxidu hlinitého (Al_2O_3) v kryolitu (Na_3AlF_6), který snižuje teplotu tání Al_2O_3 z 2050 °C na přibližně 950 °C. Vše probíhá v tzv. *elektrolýzerech* (elektrolýzních pecích), což jsou ocelové vany vyložené na dně uhlíkovými deskami sloužícími jako katoda. Anoda je rovněž uhlíková a je položena do lázně elektrolytu (viz obr. 2).

Na začátku procesu se do pece vlévá tavenina kryolitu o teplotě přibližně 960 °C. Po aktivaci uhlíkových anod se v přesně definovaných dávkách a intervalech přidává Al_2O_3 (a různé modifikátory) tak, aby se jeho koncentrace neustále udržovala přibližně kolem 15 % (tehdy má směs minimální pracovní teplotu – 960 °C). Průchodem stejnosměrného proudu se rozpuštěný Al_2O_3 v kryolitu rozkládá na kovový hliník, který putuje k uhlíkové katodě u dna, a kyslík, který velmi rychle reaguje s uhlíkovými anodami za vzniku CO a CO_2 [2, 11].

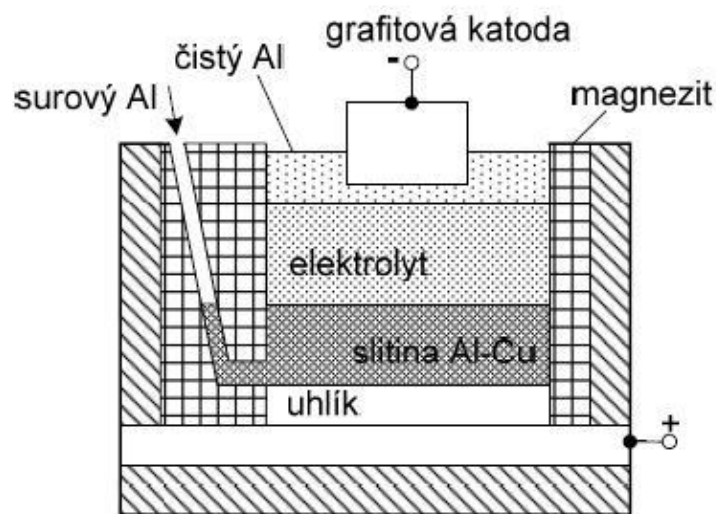
Celý proces je velmi energeticky i cenově nákladný – na výrobu 1 tuny hliníku je potřeba asi 15 MWh elektrické energie a 4 tuny bauxitu, jehož těžba a následné procesy s sebou nesou i environmentální znečištění ať už se jedná o negativní změnu podoby krajiny nebo o vedlejší toxický produkt při výrobě Bayerovým způsobem (viz kap. 2.3.1), tzv. červený kal. Proto je výroba produktů z recyklovaného hliníku velmi důležitá, neboť ušetří až 95 % energie oproti výrobě z bauxitu [2, 11].



Obr. 2 Schéma elektrolyzéry pro výrobu hliníku [12]

2.3.3 Rafinace surového hliníku

Surový hliník získaný elektrolytickým způsobem dosahuje čistoty 99,5%, což pro většinu hliníkových výrobků je vyhovující. Pro některé aplikace (zejména pro elektrotechniku) se však vyžaduje čistota ještě vyšší, a proto se hliník dále různými způsoby rafinuje až na čistotu 99,999 %. Při užití elektrolytického způsobu rafinace se využívá rozdílné hustoty užitých látek, proto se někdy označuje jako *trojvrstvá rafinační metoda*. Elektrolýza probíhá pomocí grafitové katody a anody tvořené slitinou Al-Cu v roztaveném stavu, která se kvůli relativně vysoké měrné hmotnosti (přes 3000 kg/m^3) vyskytuje na dně nádoby. Nad ní je vrstva elektrolytu a na jeho povrchu plave rafinovaný hliník s čistotou 99,99 %, který je soustavně odebírán [11].



Obr. 3 Schéma rafinace hliníku elektrolýzou [11]

2.4 Slitiny hliníku

Pro technické použití mají ve větší míře uplatnění slitiny hliníku než čistý hliník, především kvůli vyšším hodnotám mechanických vlastností při současném zachování korozivzdornosti a relativně nízké měrné hmotnosti. Navíc při vztažení mechanických vlastností na měrnou hmotnost jsou tyto charakteristiky některých slitin hliníku srovnatelné, ne-li lepší než charakteristiky u ocelí.

Co se týče vhodnosti slitin hliníku k obrábění, lze konstatovat, že obecně ve srovnání s jinými kovovými konstrukčními materiály patří slitiny hliníku mezi dobře obrobitelné. Ve srovnání např. s oceli o stejné pevnosti jsou řezné síly u slitin hliníku výrazně menší. Oproti slitinám hliníku je obrobitelnost čistého hliníku naopak velmi špatná, především kvůli odlišné struktuře. Slitiny hliníku jsou při obrábění náchylné na vznik nežádoucích nárůstků a z tohoto důvodu je nutnost vytvořit optimální podmínky, především vhodným výběrem materiálu nástroje, tvaru břitu, použitím řezné kapaliny apod.

Nedostatkem hliníkových slitin je však poměrně snadné poškození povrchu součástí kvůli jeho nízké tvrdosti. Další nechvalně proslulou vlastností hliníku je, že se při mechanickém leštění (především u měkkých slitin) maže.

Při vodivém kontaktu s jinými materiály a kovy (s výjimkou Cd a Zn) podléhají slitiny hliníku elektrochemické korozi. Proto není vhodný přímý vodivý kontakt hliníkových slitin např. s mědí, nerezovými oceli, olovem, niklem a poniklovanými součástmi a v případě nevyhnutelného kontaktu se provádí různá antikorozi opatření, např. pokovování, oddělení kovů izolačními mezivrstvami nebo jiná konstrukční řešení [6].

S většinou přísadových prvků tvoří hliník tuhé roztoky, z nichž nejvýznamnější kovy vyskytující se v hliníkových slitinách jsou Cu, Mg, Mn, Si, Zn, jejichž význam je následující [3,5]:

- **Měď (Cu)** zvyšuje pevnost a tvrdost, ale zhoršuje tvárnost a korozivzdornost. U slitin k tváření bývá její obsah do 6 %, u slitin pro odlévání do 12 %.
- **Hořčík (Mg)** se v malém množství vyskytuje skoro u všech hliníkových slitin. Zlepšuje korozivzdornost a zlepšuje vytvrditelnost. U slitin k tváření bývá jeho obsah do 8 %, u slitin pro odlévání 11 %.
- **Mangan (Mn)** zvyšuje tvárnost, pevnost, houževnatost i korozivzdornost. Dokáže také zjemnit zrna u slitin k vytvrzování a omezit jeho růst při homogenizačním žíhání. Při větším obsahu však dochází ke zvýšení křehkosti a zhoršení slévatelnosti hliníkových slitin.
- **Křemík (Si)** přispívá především k dobré slévatelnosti, ke zlepšení odolnosti proti korozi a zvyšuje pevnost tuhého roztoku. U slitin pro odlévání je výhodná jeho koncentrace od 11 do 13 %, protože

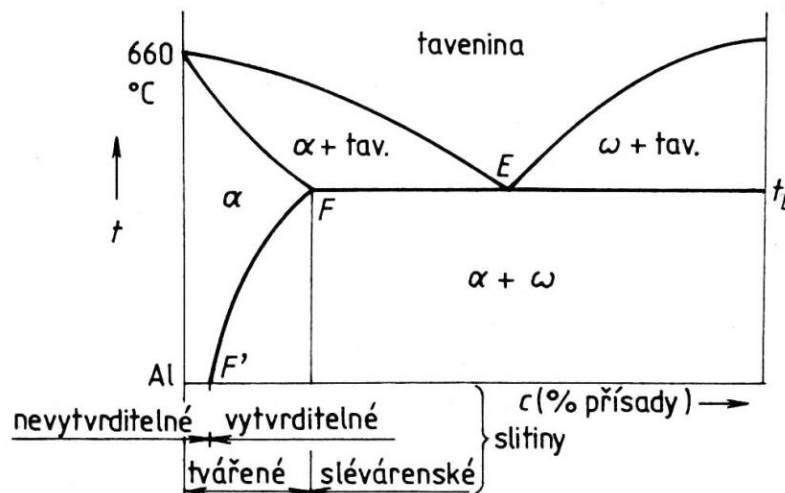
toto množství odpovídá přibližně eutektickému složení, u slitin pro tváření je jeho obsah obvykle do 1 %, ale v dnešní době může být jeho koncentrace až 13,5 % (např. EN AW-4047) [3].

- **Zinek (Zn)** zvyšuje pevnost, ale zhoršuje tvářitelnost a korozivzdornost.
- **Nikl (Ni)** zvyšuje pevnost a houževnatost i za zvýšených teplot, přispívá k odolnosti proti korozi a zlepšuje tepelnou stabilitu slitiny. Jeho obsah nebývá větší než 2 %.

Rozdělení slitin hliníku

Slitiny hliníku lze rozdělit dle různých kritérií (viz obr. 4), z nichž nejčastější dělení je dle technologie zpracování na slitiny pro **slévání** nebo **tváření**. Hliníkové slitiny obou skupin se vzájemně velmi liší svými vlastnostmi (např. v chemickém složení, výsledné struktuře, aj.), což je dáno hlavně vzájemně odlišnými, specifickými nároky obou způsobů jejich zpracování. Jen některé slitiny lze zpracovávat oběma technologiemi.

Dále se uplatňuje i dělení slitin dle schopnosti zvýšit tvrdost po tepelném zpracování (tzv. **precipitační vytvrzování** – viz kap. 2.6.2) na **vytvrditelné** nebo **nevytvrditelné**. Tato schopnost závisí na chemickém složení slitin, tedy polohou v rovnovážném diagramu a mimo jiné je podmíněna dostatečným přesycením tuhého roztoku hliníku přísadovými prvky, kterého se dosáhne při rychlém ochlazení slitin z oblasti tuhého roztoku α v rovnovážném diagramu (viz obr. 4) [6].



Obr. 4 Část obecného binárního diagramu s možným způsobem rozdělení hliníkových slitin [1,6]

2.4.1 Slévárenské slitiny hliníku

Slévárenské slitiny jsou určeny k výrobě tvarových odlitků především technologií gravitačního nebo tlakového lití do pískových nebo kovových forem. Mechanické hodnoty odlitků jsou obecně nižší (R_m max. 250 MPa [6]) v porovnání s tvářenými výrobky. Slévárenské slitiny mají obvykle i vyšší podíl legujících prvků, díky čemuž mají po ztuhnutí heterogenní strukturu (vedle tuhého roztoku α zastoupeny i další fáze). Tvářitelnost takových slitin je proto obtížná a svými vlastnostmi jsou vhodnější ke slévání než k tváření. Při chladnutí (krystalizaci) taveniny dochází k vylučování přísad (tzv. segregaci) a výsledná struktura slitiny závisí nejen na jejím složení, ale i na podmínkách při ochlazování. Neoptimálnější složení slitiny pro slévárenské účely je v oblasti blízko eutektického bodu. Mezi nejvýznamnější slévárenské slitiny hliníku patří:

a) Slitiny Al-Si (siluminy)

Siluminy jsou nejvýznamnější ze slévárenských slitin hliníku. Eutektický bod binárního diagramu obsahuje přibližně 12 % Si. Protože se však koncentrace Si pohybuje běžně mezi 5 a 25 %, rozlišujeme slévárenské slitiny podeutektické (<12 % Si), eutektické (12 % Si) a nadeutektické (12-25 % Si). Podeutektické slitiny se využívají kvůli horším slévárenským vlastnostem především pro výrobu jednodušších odlitků (např. některé součásti motorů), kde je kladen hlavní důraz na nízkou hmotnost. Eutektické složení se vyznačuje nejlepšími slévárenskými vlastnostmi, a proto se takové slitiny využívají pro výrobu komplikovanějších odlitků. Jelikož s vyšším obsahem Si roste i tvrdost Al-Si slitin, jsou siluminy především nadeutektického složení velmi tvrdé a uplatňují se hlavně u výrobků vyžadujících dobrou odolnost proti opotřebení a otěru (např. ložiska, písty).

I když nespornou výhodou binárních siluminů je jejich dobrá odolnost proti korozi, na tvarové odlitky se častěji používají siluminy legované dalšími prvky. Slitiny Al-Si jsou samy o sobě nevytvrditelné, ale při jejich legování hořčíkem a mědí se stávají vytvrditelnými a jejich mez pevnosti v tahu pak dosahuje hodnot až 300 MPa [8]. Za účelem vzniku slitin s příznivějšími vlastnostmi i za vysokých teplot se legují niklem (využití např. k výrobě pístů motorů) [1,8].

b) Slitiny Al-Cu

Obsah Cu nebývá větší než 10 %. Tyto slitiny se hodí k vytvrzování a zásadní výhodou takových odlitků je především odolnost proti mechanickému namáhání. Hlavním nedostatkem těchto slitin je jejich špatná korozivzdornost kvůli obsahu mědi, a proto je nutná povrchová ochrana.

c) Slitiny Al-Mg

Vykazují nejvyšší měrnou pevnost a rázovou houževnatost ze všech slévárenských slitin hliníku [6]. Tyto slitiny se vyznačují výbornou odolností proti korozi a jejich obrobiteľnosť je lepší než u slitin Al-Si. Slévárenské vlastnosti jsou horší, ale s přísadou Si se zlepšuje zabíhavost a snižuje náchylnost ke vzniku trhlin.

2.4.2 Slitiny hliníku určené pro tváření

Jedná se obecně o takové slitiny hliníku, které po ohřevu vytváří homogenní tuhý roztok α , a tudíž jsou tyto slitiny dobře tvárné. Obvykle se však vyznačují nízkou vrubovou houževnatostí. V porovnání se slitinami určených ke slévání mají nižší obsah legujících prvků (obvykle nepřesahuje 10 % [1]). Vyrábí se z nich především plechy, profily, tyče, trubky atd.

2.4.2.1 Tvářené vytvrditelné slitiny

Jedním z nejdůležitějších podmínek vytvrditelnosti hliníkových slitin je jejich příznivá koncentrace přísad, tj. taková, aby se jejich rozpustnost v tuhém roztoku α výrazně zvyšovala s rostoucí teplotou (viz obr. 4) – za nízkých teplot se přísady vylučují ve formě precipitátů. Ne pro všechny vytvrditelné slitiny je však tento proces vhodný, proto se používá jen u těch, u kterých dochází k optimální kombinaci výrazného zvýšení mechanických hodnot s minimálním zhoršením jiných podstatných charakteristik (např. korozivzdornosti).

Rozlišujeme tři hlavní skupiny slitin určené k vytvrzování [1]:

- Slitiny Al-Cu-Mg-(Ni)
- Slitiny Al-Mg-Si
- Slitiny Al-Zn-Mg-(Cu)

a) Slitiny Al-Cu-Mg-(Ni)

Tyto slitiny jsou dle EN zařazeny ve skupině 2XXX (viz kap. 2.5.2). Slitiny na bázi Al-Cu-Mg obsahují 1-6 % Cu, < 2 % Mg [8] a jsou známější pod svým označením *duraly* (z *lat. durus - tvrdý*), resp. *superduraly* při zvýšeném obsahu Mg a Mn. První dural (Al-3,5Cu-0,5Mg-0,5Mn) byl vyroben v roce 1906 Alfredem Wilmem v Německu nedlouho poté, co náhodně objevil jev vytvrzování hliníkových slitin [10]. Tyto slitiny mají schopnost přirozeně vystárnout, kdy následně dosahují velmi vysokých hodnot pevnostních charakteristik (mez pevnosti v tahu až 530 MPa [6]). U slitin s nižším obsahem Cu je výsledný efekt po vytvrzení nízký a lze je i po vytvrzení tvářet za studena.

Za největší nevýhodu duralů se dá považovat horší korozivzdornost při srovnání s čistým hliníkem, a proto se výrobky dlouhodobě vystavené korozivnímu prostředí povlakuji tenkou vrstvou čistého hliníku (tzv. plátování).

Duraly patří mezi nejvíce používané slitiny k tváření, vyrábí se z nich zejména plechy a výlisky a díky svým vlastnostem nachází hlavní uplatnění jako konstrukční materiál v automobilovém a leteckém průmyslu. Jako příklad duralu lze uvést slitinu AlCu4Mg, která se vyznačuje dobrou obrobitelností a vysokou tvárností, díky čemuž se často využívá pro výrobu tenkých fólií o tloušťce až 0,1 mm [2].

U aplikací, kde se vyžaduje dlouhodobá funkčnost i za zvýšených teplot (do 300 °C), se do základní duralové báze přidávají další legury (Ni, Si, Fe, popř. Ti), které přispívají ke stabilitě tuhého roztoku [8].

b) Slitiny Al-Mg-Si

Tyto slitiny jsou dle EN zařazeny ve skupině 6XXX (viz kap. 2.5.2). Hlavními přísadami těchto slitin jsou sice Mg a Si, ale někdy se navíc přidávají i Cu a Mn pro zvýšení pevnosti, přičemž koncentrace legur nepřesahuje 1,5 % [8]. Při vytvrzování se vylučuje fáze Mg₂Si, která má hlavní zpevňující účinky. Oproti duralům vykazují tyto slitiny nižší hodnoty mechanických vlastností (po vytvrzení $R_m < 350$ MPa), ale jejich tvárnost a odolnost proti korozi je vyšší. Navíc se i lépe svařují a nejsou tak náročné na přesné dodržování teplot při tepelném zpracování. Nachází široké využití jak ve stavebnictví (profily), tak v leteckém a v automobilovém průmyslu jako součást karoserií.

c) Slitiny Al-Zn-Mg-(Cu)

Dle EN jsou zařazeny ve skupině 7XXX (viz kap. 2.5.2). Slitiny na bázi Al-Zn-Mg (Zn 3-8 %, Mg 1-3 %, Cu < 2 % [8]) jsou nejpevnějšími slitinami hliníku (AlZn6Mg2Cu po vytvrzení má R_m až 580 MPa), kdy hlavní zpevnění po vytvrzení způsobuje precipitace fáze MgZn₂ [1]. V porovnání s duraly mají však menší vrubovou a lomovou houževnatost. Jejich odolnost proti korozi na vzduchu je poměrně dobrá, avšak vykazují sklon ke korozi pod napětím. Jejich značné pevnosti se využívá na výrobu vysoce namáhaných součástí a dílů (např. ojnice) především v leteckém a automobilovém průmyslu.

Kromě již výše zmíněných slitin lze zmínit i slitiny na bázi **Al-Li**, které se dle EN řadí do skupiny 8XXX (viz kap. 2.5.2). Tyto slitiny byly vyvinuty speciálně pro účely leteckého průmyslu a kosmonautiky. Jejich hlavní přínos spočívá ve snížení hmotnosti hliníkových slitin o 5 až 10 % (2470 až 2620 kg.m⁻³) oproti konvenčním slitinám hliníku a zároveň zvýšení modulu pružnosti v tahu ($E = 77,5 - 81,2$ GPa), přitom hodnoty pevností jsou srovnatelné s durallem [6]. Jsou vhodné

zejména pro technologii tváření, ale dají se využít i na odlitky. Lithium je velice reaktivní a snadno oxiduje na vzduchu, proto je nutné slitiny tavit a odlévat v ochranné atmosféře.

2.4.2.2 Tvářené nevytvrditelné slitiny

Mezi nevytvrditelné slitiny se řadí ty, u kterých se proces vytvrzování neuplatňuje, protože vede jen k poměrně malému zvýšení mechanických hodnot, často i na úkor jiných vlastností. Pevnostní charakteristiky u těchto slitin lze zvýšit tvářením za studena (tzv. dislokačním neboli deformačním zpevněním). Díky absenci Cu v dále zmíněných slitinách vykazují vysokou odolnost proti korozi i bez povrchových úprav. Obecně jsou tyto slitiny dobře svařitelné i tvářitelné a velmi dobře odolávají vibracím [6].

Nejvýznamnějšími slitinami této podskupiny jsou slitiny na bázi **Al-Mg** a **Al-Mn**:

a) Slitiny Al-Mg

Tyto slitiny jsou dle EN zařazeny ve skupině 5XXX (viz kap. 2.5.2). Koncentrace Mg se v technické praxi obvykle pohybuje v mezích 1 - 6 %, protože u slitin s vyšším obsahem se snižuje tvářitelnost a zároveň se zvětší pravděpodobnost vzniku koroze po hranicích zrn, především pak při mechanickém namáhání. Slitiny Al-Mg by teoreticky bylo možné vytvrzovat, ale zároveň by se zhoršila jejich vysoká korozivzdornost. Jejich poměrně nízké pevnostní charakteristiky (R_m max. 200 MPa) lze ale podstatně zvýšit tvářením za studena (R_m max. 420 MPa) [6]. Velkou předností těchto slitin je i odolnost vůči mořské vodě, které se využívá na výrobu některých částí lodních trupů a jiných součástí vystavené tomuto prostředí. Tyto slitiny se rovněž používají na výrobu plechů, dále trubek, nýtů a drátů.

b) Slitiny Al-Mn

Tyto slitiny jsou dle EN zařazeny ve skupině 3XXX (viz kap. 2.5.2). Nízký obsah Mn ve slitinách (max. 1,5 % [9]), a tedy i malé přesycení tuhého roztoku α , neumožňuje výraznější zvýšení pevností po vytvrzení, a proto se tyto slitiny nevytvrzují. Vyznačují se výbornou tvářitelností za studena a zvýšenou korozivzdorností, a proto nachází uplatnění pro výrobu potrubí, plechovek a jiných nepříliš mechanicky namáhaných součástí.

2.5 Označování hliníku a jeho slitin

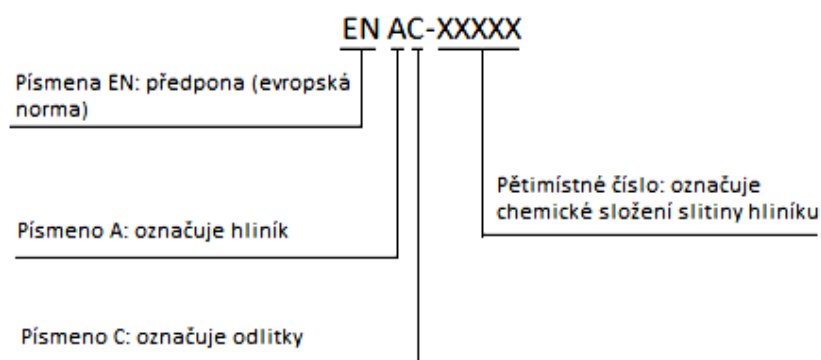
Slitiny hliníku jsou v České republice normovány podle převzatých evropských norem, ale v praxi se často vyskytuje značení podle původních českých či jiných norem.

2.5.1 Označování slévárenských slitin hliníku

Slitiny na odlitky se značí dle normy ČSN EN 1706, která stanovuje značení číselně nebo dle chemického složení. Oba způsoby značení mohou být doplněny značkami oddělenými pomlčkou s přídatnými informacemi o procesu lití a stavu tepelného zpracování, např. EN AC-45100-K-T6.

a) Číselné označení

Norma stanovuje značení slitin ve tvaru: *EN AC* (pomlčka) *5 číslic*, (např. EN AC-21000 [2]).



Obr. 5 Význam jednotlivých znaků v označení slévárenských slitin dle ČSN EN 1706

Význam jednotlivých číslic v pětičíslicí [5]:

- **První číslice** označuje skupinu slitin dle hlavních slitinových prvků (viz tab. 2).
- **Druhá číslice** upřesňuje skupinu slitin.
- **Třetí číslice** rozlišuje slitiny dané skupiny, jejichž rozdíly v chemickém složení jsou minimální.
- **Čtvrtá číslice** je všeobecně 0.
- **Pátá číslice** je 0, mimo slitiny určené pro leteckou výrobu.

Tab. 2 Přehled skupin hliníkových slitin na odlitky dle normy ČSN EN 1706

| Skupina slitin | Hlavní slitinové prvky |
|----------------|------------------------|
| 2XXXX | Cu |
| 4XXXX | Si |
| 5XXXX | Mg |
| 7XXXX | Zn |

b) Označení dle chemického složení

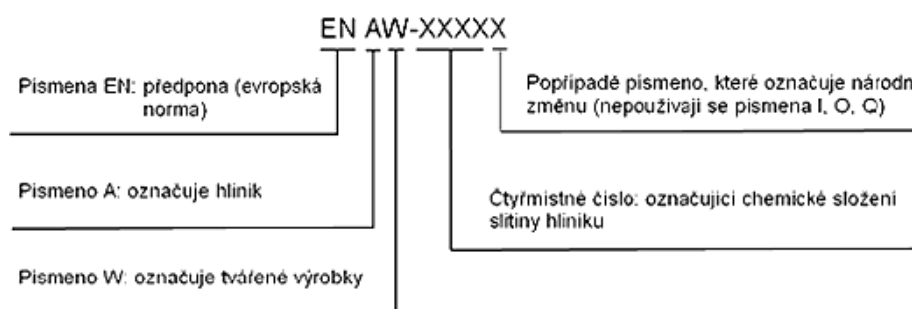
Slitiny na odlitky se označují dle chemického složení ve tvaru: EN AC-*Al*, po kterém následují legující prvky seřazené sestupně dle jejich obsahu, např. EN AC-*Al Si2MgTi*. Percentuální zastoupení prvku se uvádí číslem za jeho chemickou značkou. Pokud je obsah prvku ve slitině méně než 1 %, pak se číslo za značku neuvádí.

2.5.2 Označování slitin hliníku pro tváření

Tvářené slitiny a ingoty určené k tváření se značí dle normy ČSN EN 573-1 až 3, která stanovuje označování číselně nebo dle chemického složení.

a) Číselné označení

Norma stanovuje značení ve tvaru: *EN AW* (pomlčka) *4 číslice*, ve formátu EN AW-XXXX např. EN AW-2024 (viz obr. 6) [2]. Ve většině případů následuje za číselným značením ještě označení stavu materiálu. Základní značení se skládá z písmen, za kterými následují v případě potřeby písmena a číslice označující úpravy nebo tepelné zpracování.



Obr. 6 Význam jednotlivých znaků ve značení slitin pro tváření dle ČSN EN EN 573-1 až 3

Význam jednotlivých číslic ve čtyřčíslí [5]:

- **První číslice** označuje skupinu slitin dle hlavních slitinových prvků (viz tab. 3).
- **Druhá číslice** označuje u 1. skupiny limity pro znečištění, u skupin 2 až 8 určuje modifikaci slitiny, které se označují čísly 1-9 (v případě označení nulou, se jedná o základní slitinu). **První dvojčíslí** ve formátu 10XX označuje nelegovaný hliník, druhé dvojčíslí pak obsah příměsí v desetinách procenta.
- **Třetí a čtvrtá číslice** se u 1. skupiny vztahují k čistotě Al, u skupin 2-8 nemají specifický význam a slouží pouze k rozlišení jednotlivých slitin dané skupiny.

Tab. 3 Přehled skupin hliníkových slitin pro tváření dle normy ČSN EN 573-1 až 3

| Skupina slitin | Hlavní slitinové prvky |
|----------------|-----------------------------|
| 1XXX | Al minimálně 99,00 % a více |
| 2XXX | Cu |
| 3XXX | Mn |
| 4XXX | Si |
| 5XXX | Mg |
| 6XXX | Mg, Si |
| 7XXX | Zn |
| 8XXX | různé jiné prvky (např. Li) |

b) Označování dle chemického složení

Slitiny pro tváření se označují dle chemického složení ve tvaru: EN AW-Al, po kterém následují legující prvky seřazené sestupně dle jejich obsahu, např. EN AW-Al Cu4Mg1. Percentuální zastoupení prvku se uvádí číslem za jeho chemickou značkou. Pokud je obsah prvku ve slitině méně než 1 %, pak se číslo za značku neuvádí.

2.5.3 Označování stavů tepelného zpracování hliníku a jeho slitin

Značení stavů po tepelném zpracování hliníku a jeho slitin se provádí dle normy ČSN EN 515 a může se připojit za základní označení slitiny, oddělené pomlčkou. Toto označení se skládá z písmene a jedné nebo více číslic vyjadřující druh a způsob zpracování.

Tab. 4 Význam písmen pro označení základního stavu dle ČSN EN 515

| Značka stavu | F | O | H | W | T |
|--------------|----------|--------|---------------------|-----------------|---|
| Význam | z výroby | žíhaný | deformačně zpevněný | po rozp. žíhání | tepelně zpracovaný k zisku stavů jiných než F, O, H |

Tab. 5 Význam první číslice po označení stavu písmenem T dle ČSN EN 515

| Označení stavu | Význam |
|----------------|--|
| T1 | Po ochlazení ze zvýšené teploty tváření + přirozeném stárnutí |
| T2 | Po ochlazení ze zvýšené teploty tváření + tváření za studena + přirozeném stárnutí |
| T3 | Po rozpouštěcím žíhání + tváření za studena + přirozeném stárnutí |
| T4 | Po rozpouštěcím žíhání + přirozeném stárnutí |
| T5 | Po ochlazení ze zvýšené teploty tváření + umělém stárnutí |
| T6 | Po rozpouštěcím žíhání + umělém stárnutí |
| T7 | Po rozpouštěcím žíhání + umělém přestárnutí |
| T8 | Po rozpouštěcím žíhání + tváření za studena + umělém stárnutí |
| T9 | Po rozpouštěcím žíhání + umělém stárnutí + tváření za studena |

2.6 Tepelné zpracování hliníku a jeho slitin

Účelem tepelného zpracování je dosažení požadovaných vlastností a struktury hliníku a jeho slitin, které se dají vhodným procesem tepelného zpracování výrazně ovlivnit. Jednotlivé způsoby tepelného zpracování slitin hliníku na odlitky a pro tvářeni se od sebe příliš neodlišují, větší rozdíly se vyskytují mezi vytvrditelnými a nevytvrditelnými slitinami. Hlavními operacemi tepelného zpracování slitin hliníku jsou *žihání* a *vytvrzování*.

2.6.1 Žihání

Žihání u kovů se všeobecně provádí s cílem odstranit nežádoucí vlivy předchozích operací na strukturu materiálu a přiblížit se tak co nejvíce k jeho rovnovážnému stavu. Konkrétně se pak může jednat např. o snížení tvrdosti, zlepšení obrobiteľnosti, eliminace vnitřních pnutí. Celý proces spočívá obecně v pomalém ohřevu na žihací teplotu, výdrži na této teplotě po danou dobu a následném pomalém ochlazení. U hliníku a jeho slitin se v praxi používají následující způsoby žihání.

a) Zotavovací žihání

Provádí se za účelem odstranění vnitřního pnutí především u materiálů zpracovaných za studena. Materiál o stejné pevnosti v tahu vykazuje po zotavovacím žihání lepší tvářitelnost než jeho stav po vytvrzení za studena, proto se často takto vyžihané materiály upřednostňují při tvářecích procesech. Výše teploty závisí jednak na chemickém složení, jednak na požadovaných mechanických vlastnostech, ale obecně se toto žihání provádí za teplot nižších, než žihání rekrytalizační (aby nedocházelo ke strukturním změnám materiálu) [12].

b) Rekrytalizační žihání

Tento způsob žihání je nejčastější tepelné zpracování hliníku a často se zařazuje jako mezioperace při procesu tvářeni za studena, kdy z původního deformovaného zrna po tvářeni za studena dochází ke vzniku nové rekrytalizované struktury. Navíc dochází i ke změnám mechanických vlastností daného materiálu – snižuje se pevnost, tvrdost a zvyšuje se tvárnost materiálu. Rekrytalizační žihání probíhá při vyšších teplotách (obvykle 250 – 500 °C [2]) než zotavovací žihání a závisí především na chemickém složení slitiny hliníku a jejím stupni deformace při předchozím tvářeni za studena (při větším stupni deformace klesá teplota rekrytalizace i velikost zrna). Po skončení rekrytalizace je možno nevytvrditelné slitiny ochlazovat na vzduchu na rozdíl od vytvrditelných slitin, které je nutno chladit pomalu, aby při ochlazení nedošlo k částečnému přesycení tuhého roztoku, a tím i zvýšení pevnostních vlastností.

c) Žihání na odstranění vnitřního pnutí

Účelem je snížit vnitřní pnutí vzniklé např. intenzivním tvářením nebo náhlými tepelnými změnami v součástech při ohřevu nebo ochlazování, zejména tvarově složitějších dílů tvářených za tepla, odlitků v tuhých formách nebo po svařování. Žihání probíhá pod teplotou rekystalizace, přičemž k poklesu pnutí dochází při pomalém ohřevu nad teplotu zhruba 200 °C a pro úplné odstranění vnitřního pnutí se teploty pohybují mezi 300 – 400 °C. Výdrž trvá přibližně 6 až 8 hodin a následuje pomalé ochlazení v peci nebo na vzduchu. Pokud však nedojde k dodržení malé rychlosti ohřevu a ochlazování, může celý proces vést naopak ke zvýšení vnitřního pnutí oproti výchozímu stavu.

d) Homogenizační žihání

Tento proces se provádí zejména u ingotů pro tvářením (zlepšuje tvárnost) a slouží k úplnému nebo aspoň částečnému odstranění heterogenní chemické struktury, která může vzniknout např. po primární krystalizaci při tuhnutí odlitku. Podstata homogenizačního žihání je založena na difuzních procesech. Žihací teploty jsou velmi vysoké – nad teplotou změny rozpustnosti, blízko teplotě solidu. Délka procesu závisí zejména na chemickém složení a struktuře slitiny, přičemž u tvářených slitin s jemnozrnnou strukturou lze dosáhnout homogenního stavu do 1 hod., u hrubé lité struktury za 3 – 16 hod. a v případě ingotů až do 40 hod. Následné ochlazení probíhá pomalu v peci nebo na vzduchu. Obecně se jedná o časově nejnáročnější tepelné zpracování v celém výrobním procesu [2].

e) Stabilizační žihání

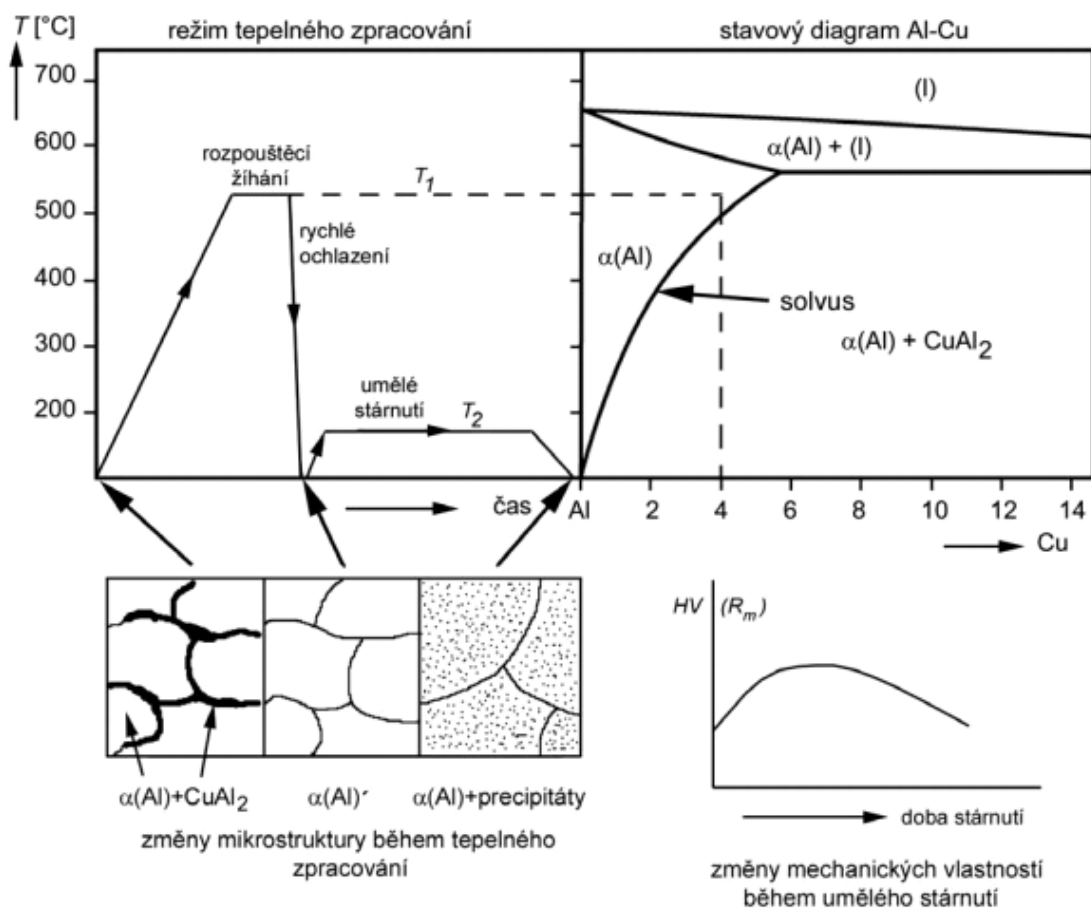
Účelem stabilizačního žihání je dosažení stabilizace rozměrů, struktury a požadovaných vlastností výrobků (především odlitků) i za vysokých provozních teplot. Žihací teplota je proto větší než nejvyšší předpokládaná teplota za provozu a pohybuje se v rozmezí 240 – 350 °C [2]. Chlazení se uskutečňuje obvykle na vzduchu.

2.6.2 Precipitační (zpevnění) vytvrzování

Precipitačním vytvrzováním se dají změnit nejen mechanické, ale i fyzikální a technologické vlastnosti hliníkových slitin. Aby slitina byla vytvrditelná, musí splňovat následující základní nutné podmínky, nikoliv však postačující [8]:

- Slitina musí obsahovat dostačující koncentraci legujícího prvku (prvků).
- Legury musí být dostatečně rozpustné v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$.
- Legury musí mít výraznou změnu rozpustnosti v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$ v závislosti na teplotě.

Celý proces precipitačního vytvrzování se skládá z následně popsaných jednotlivých operací, které na sebe navazují, a jejich dílčí provedení má významný vliv na konečné vlastnosti slitin.



Obr. 7 Schematické znázornění postupu precipitačního vytvrzení [8]

- **Rozpouštěcí žíhání**

Účelem rozpouštěcího žíhání je získání téměř homogenní struktury slitiny, která je za normálních podmínek heterogenní. Spočívá v ohřevu na vhodnou rozpouštěcí teplotu T_1 (viz obr. 7) a dostatečné výdrži na této teplotě, aby došlo k převedení intermetalické fáze (fází) do tuhého roztoku.

Volba vhodné teploty vychází z fázového diagramu dané slitiny (u hliníkových slitin se obecně pohybuje v rozmezí 470 – 530 °C v závislosti na složení), kdy horní hranice se pohybuje přibližně 10 °C pod teplotou solidu. U jednotlivých slitin je však potřeba tuto definovanou teplotu přesně dodržet v rozmezí ± 5 °C, jelikož teplotní interval mezi teplotou solidu a čarou změny rozpustnosti je malý. Při jejím překročení může dojít k natavení hranic zrn a jejich hrubnutí, což vede k úplnému znehodnocení slitiny. Naopak při nižších teplotách nedojde k úplnému rozpuštění segregátů a ve výsledku ani k požadovanému zlepšení vlastností slitin.

Čas výdrže na požadované teplotě by měl být co možno nejkratší, jelikož při zbytečném prodlužování dochází k hrubnutí zrna a zhoršení vlastností. Délka doby závisí mj. na druhu a velikosti fází, kdy rozpouštění jemných vyloučených fází probíhá podstatně rychleji než ty hrubé např. v odlitcích.

- **Ochlazení**

Po rozpouštěcím žíhání následuje velmi rychlé ochlazení *kritickou* (nebo *nadkritickou* rychlostí), což je minimální rychlost ochlazování, při které ještě nestihne dojít k segregaci fází, neboli k rozpadu přesyceného tuhého roztoku. Cílem ochlazení je tedy získání *přesyceného tuhého roztoku $\alpha(Al)'$* i za normální teploty, který má vyšší obsah legury v porovnání s rovnovážnou rozpustností. Pokud je slitina ochlazována menší rychlostí nebo nedojde k ochlazení ihned po vyjmutí z pece po rozpouštěcím žíhání, může docházet k částečné segregaci po hranicích zrn, což se pak negativně projeví ve výsledné zhoršené korozivzdornosti, nižší pevnosti i tažnosti slitiny. Ochlazování u slitin hliníku probíhá obvykle do vody při teplotě 20 °C, u větších součástí, kde je větší riziko vzniku deformací, se používají jiná ochlazovací média. Po ochlazení se tvrdost součástí ještě nijak významně nemění, ale materiál se dostává do stavu výhodného pro vytvrzení.

- **Vytvrzování (stárnutí)**

Přesycený tuhý roztok $\alpha(\text{Al})'$ vzniklý po předchozím procesu je termodynamicky nestabilní a má tendenci se rozpadat (do stabilního stavu). Tento rozpad je doprovázen procesem *precipitace*, kdy dochází k vylučování velmi jemných částic intermediálních fází (řádově desítky až stovky nm) – tzv. precipitátů. Tyto precipitáty brání skluzu dislokací, což vede k významnému zpevnění a zvýšení tvrdosti materiálu, a proto se celý proces souhrnně označuje jako *vytvrzování (stárnutí)* [8].

Někdy se čistě formálně rozlišuje, zda se jedná o proces žádoucí, potom se o něm hovoří jako o vytvrzování, nebo nežádoucí – stárnutí. U některých slitin probíhá vytvrzení (stárnutí) už za normálních podmínek (cca 20 °C) – tzv. *vytvrzení za studena (přirozené stárnutí)*. Jindy se využívá tzv. *vytvrzení za tepla (umělé stárnutí)*, které spočívá v ohřevu na teplotu T_2 přibližně 140 °C – 200 °C (viz obr. 7) a potřebné výdrži na této teplotě, při které dochází k precipitaci. Při volbě teplot u umělého stárnutí obecně platí, že s vyšší teplotou se zkracuje doba k dosažení maximální meze pevnosti, ale zároveň klesá hodnota této pevnosti.

Doba k dosažení nejvyšší tvrdosti u přirozeného stárnutí se pohybuje v řádech dnů, zatímco u umělého stárnutí podstatně rychleji, v řádech několika hodin. Pokud je však doba výdrže delší, hovoříme pak o tzv. *přestárnutí*. Přestárnutí je většinou proces nežádoucí, protože dochází k hrubnutí zrna a poklesu tvrdosti. Někdy se jedná naopak o proces záměrný, jelikož dochází ke zlepšení korozivzdornosti u slitin obsahujících měď.

2.7 Slitina EN AW-2024

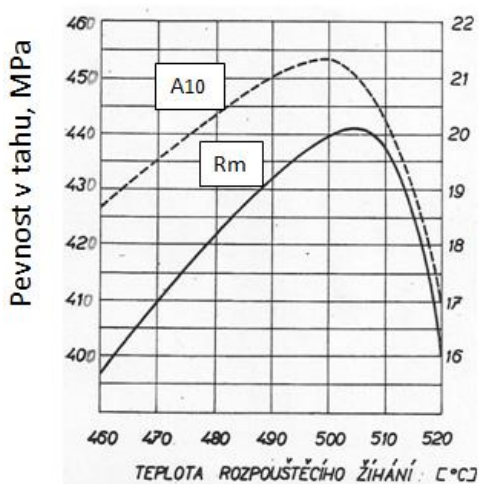
Tato hliníková slitina se na základě označení dle ČSN EN AW-2024, AlCu4Mg řadí do skupiny 2XXX (viz kap. 2.5.2), ze které vyplývá, že hlavním přísadovým prvkem je měď. Ta především zvyšuje pevnost a tvrdost, ale zároveň zhoršuje korozivzdornost i svařitelnost a kvůli jejímu vysokému obsahu je tato slitina nevhodná k eloxování. Další prvky obsažené ve slitině jsou uvedeny v následující tabulce (viz. tab. 6).

Tab. 6 Obsah přísadových prvků ve slitině EN AW-2024 dle ČSN EN 573-3

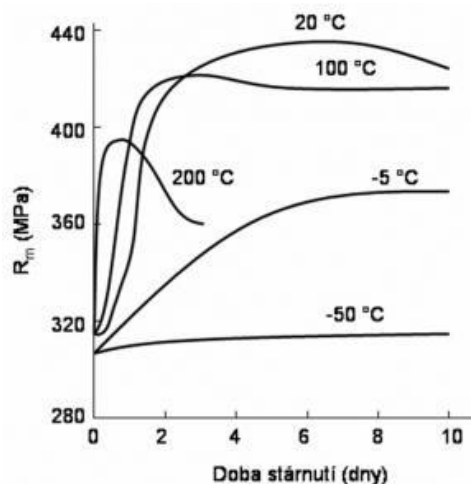
| Chemické složení slitiny EN AW-2024 [hm. %] | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| prvek | Cu | Mg | Mn | Si | Fe | Zn | Ti | Cr |
| min. | 3,80 | 1,20 | 0,30 | – | – | – | – | – |
| max. | 4,90 | 1,80 | 0,90 | 0,50 | 0,50 | 0,25 | 0,15 | 0,10 |

2.7.1 Tepelné zpracování

Slitina EN AW-2024 patří mezi tvářené vytvrditelné slitiny, tudíž hlavní způsob jejího tepelného zpracování za účelem zisku optimální kombinace mechanických vlastností je precipitační vytvrzování (viz kap. 2.6.2), kdy hlavní zpevňující účinky má fáze Al₂Cu. Slitina při tomto postupu je nejdříve vystavena procesu rozpouštěcího žíhání v doporučeném rozmezí teplot 490 – 505 °C (viz obr. 8) a rychlém ochlazení ve vodě. Následně dle doporučených technologických podmínek probíhá přirozené stárnutí při teplotě 20°C po dobu přibližně 6 dnů nebo umělé stárnutí při teplotě 190 °C po dobu 8 až 12 hodin, které je zakončeno ochlazováním na vzduchu [6]. Častěji se však u slitiny EN AW-2024 využívá procesu přirozeného stárnutí kvůli získání vyšších hodnot pevností než při stárnutí umělém (viz obr. 9). V závislosti na chemickém složení, rozměrech a požadovaných vlastnostech slitiny se technologické parametry mohou i výrazně lišit.



Obr. 8 Vliv teploty RŽ na R_m a A [6]



Obr. 9 Vliv teploty a doby stárnutí na R_m [6]

2.7.2 Vlastnosti

Slitina EN AW–2024 se svým chemickým složením a vlastnostmi řadí mezi duraly. Jedná se tedy o konstrukční materiál s vysokými hodnotami mechanických vlastností po tepelném zpracování. Zároveň však vykazuje nízkou odolnost vůči korozi, kvůli které jsou díly z této slitiny často plátovány. Při obrábění tvoří krátké třísky a její obrábitelnost je po vytvrzení dobrá, ale špatná po vyžhání. Hustota slitiny je $2,7 \text{ g.cm}^{-3}$ a teplota tání přibližně $500 \text{ }^\circ\text{C}$.

Mechanické vlastnosti slitiny jsou silně podmíněny způsobem a postupem tepelného zpracování (viz tab. 7).

Tab. 7 Vybrané mechanické vlastnosti EN AW–2024 v závislosti na stavu dle ČSN EN 485-2

| Označení stavu ¹⁾ | Mechanické vlastnosti ²⁾ | | | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|------|-------------|------|------------|---------------------------|
| | $R_{p0,2}$ [MPa] | | R_m [MPa] | | Min. A [%] | Tvrlost HBS ³⁾ |
| | min. | max. | min. | max. | | |
| O | – | 140 | – | 220 | 8 | 55 |
| T3 | 290 | – | 400 | – | 8 | 115 |
| T4 | 275 | – | 425 | – | 8 | 120 |
| T8 | 380 | – | 455 | – | 5 | 135 |

Legenda: 1) viz tab. 5

2) vlastnosti jsou závislé na druhu a příčném rozměru výrobku

3) informativní hodnoty

2.7.3 Oblast použití

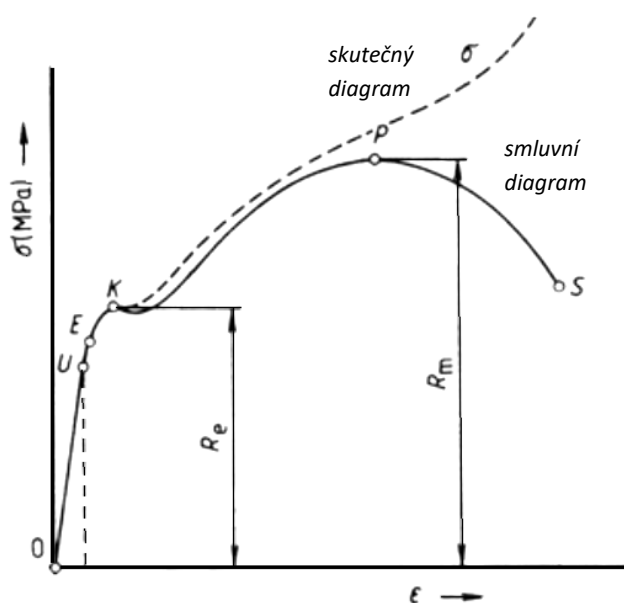
Obecně se tato slitina využívá pro středně a silně namáhané součásti, a to i těch, vyžadujících zvýšenou životnost při proměnném napětí nebo za krátkodobého působení zvýšených teplot. Hlavní oblastí použití této slitiny je díky vysoké pevnosti a dobré lomové houževnatosti letecký průmysl. Kvůli zvýšeným bezpečnostním a spolehlivostním požadavkům v této oblasti se vlastnosti základní slitiny EN AW–2024 dále různě modifikovaly a vyvíjely, např. menší změnou v chemickém složení nebo podmínkami tepelného zpracování. Základní slitina i její upravené varianty jsou vedeny jako nové slitiny v seznamu hliníkových slitin dle Aluminium Association a využívají se zejména na výrobu draků letadel (především součásti trupů a křidel), konkrétně na žebra, přepážky, výztuhy, aerodynamické kryty, výkovky, případně nýty a nosníky. Kromě letadel se základní slitina EN AW–2024 uplatňuje i jako konstrukční materiál pro jiné dopravní prostředky (kolejová vozidla, automobily, aj.) a také ve stavebnictví. Vyrábí se z ní rovněž široký sortiment polotovarů – plechy a pásy, desky, tyče, lisované profily, trubky, výkovky, dráty aj.

2.8 Statická zkouška tahem

Statická zkouška tahem je nejčastější způsob zjišťování mechanických vlastností materiálů. Namáhání materiálu je statické čili při působení stálé nebo plynule rostoucí síly. Jedná se o zkoušku destruktivní, kdy vzorek ze zkoumaného materiálu je zatěžován tahovým napětím na trhacím stroji, a to většinou až do jeho porušení. Následně se zjišťují napěťové a deformační charakteristiky materiálu. Aby byla zaručena objektivita výsledků a bylo možné je mezi sebou porovnávat, jsou podmínky zkoušky a parametry zkušebních vzorků pro kovové materiály stanoveny dle normy ČSN EN ISO 6892.

2.8.1 Zjišťované hodnoty a vlastnosti

Při tahové zkoušce se primárně sleduje závislost prodloužení vzorku ΔL na tahové síle F a tato závislost se znázorňuje do tzv. *pracovního diagramu*. Protože absolutní prodloužení ΔL závisí na počáteční délce tělesa, vztahuje se často na původní délku vzorku L_0 a tento poměr se nazývá jako poměrné prodloužení ε ($\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$). Vztažením síly F na plochu průřezu vzorku S se získá napětí σ . Pro určení skutečného napětí by bylo nutné uvažovat změnu plochy průřezu vzorku v každém okamžiku průběhu zkoušky, což je značně nepraktické a proto se pro zjednodušení nejčastěji uvádí smluvní napětí R , které je vztaženo k původnímu průřezu vzorku S_0 . Závislost skutečného napětí na skutečné podélné deformaci φ ($\varphi = \ln \frac{L}{L_0}$) znázorňuje tzv. *skutečný diagram* a závislost smluvního napětí na poměrném prodloužení ε pak zobrazuje tzv. *smluvní diagram* (viz obr. 10).



Legenda:

- U – mez úměrnosti
(oblast platnosti Hookova zákona)
- E – mez pružnosti (elasticity)
- K – mez kluzu
- P – mez pevnosti
- S – přetržení houževnatých materiálů

Obr. 10 Pracovní diagram tahové zkoušky [15]

Základní normované hodnoty zjišťované zkouškou tahem jsou následující:

- **Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]**

Mez pevnosti v tahu (viz obr. 10 - bod P) je největší napětí, které materiál vydrží bez porušení. Odpovídá maximální síle působící na zkušební vzorek a předchází porušení (přetržení) zkoumaného vzorku.

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (4)$$

F_m maximální zatížení [N]

S_0 počáteční průřezová plocha zkoušené délky [mm²]

- **Mez kluzu v tahu R_e (popř. smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$) [MPa]**

Při tomto napětí se objevují první stálé deformace, které se zvětšují, aniž by docházelo k dalšímu růstu napětí (viz obr. 10 - bod K). Mez kluzu může být u některých materiálů výrazná (např. měkké oceli) nebo nevýrazná (např. hliníkové slitiny). U nevýrazné meze kluzu se proto obvykle uvádí smluvní mez kluzu, která se stanovuje dle předepsaného trvalého prodloužení vyjádřeného v procentech k počáteční délce zkušební tyče, nejčastěji $R_{p0,2}$ při $\varepsilon = 0,002$.

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0}) \quad (5)$$

F_e ($F_{p0,2}$)... síla úměrná napětí na mezi kluzu (smluvní) [N]

S_0 ... počáteční průřezová plocha zkoušené délky [mm²]

- **Tažnost A [%]**

Vyjadřuje trvalé poměrné podélné prodloužení zkušební tyče po přetržení vyjádřené v procentech původní délky. Často je označení doplněno indexem (A_5 nebo A_{10}) vyjadřující tažnost při měření krátké nebo dlouhé zkušební tyče.

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (6)$$

L_u konečná měřená délka zkušební tyče po porušení [mm]

L_0počáteční měřená délka zkušební tyče [mm]

- **Kontrakce Z [%]**

Vyjadřuje největší změnu ploch příčných průřezů (zúžení) v místě lomu vztaženou k původní ploše příčného průřezu.

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

S_u nejmenší průřezová plocha vzorku po porušení [mm²]

S_0počáteční průřezová plocha zkoušené délky [mm²]

2.8.2 Zkušební tělesa

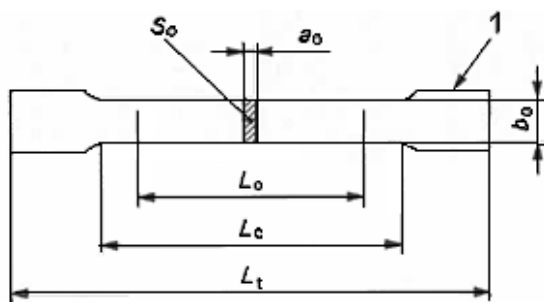
Testované vzorky u tahové zkoušky jsou obvykle zkušební tyče, jejichž tvar a rozměry jsou definovány normou ČSN EN ISO 6892. Tyče mívají nejčastěji kruhový nebo čtvercový průřez a průměr se stanoví na základě velikosti působící síly, kterou je možno na trhacím stroji vyvodit. Krajní konce zkušebních tyčí jsou uzpůsobeny pro upnutí nejčastěji do svěrných nebo závitových čelistí trhacího stroje, aby namáhání působilo pokud možno pouze v osové směru zkušební tyče.

a) Obrobené neobrobené zkušební tyče

Zkušební tyče se můžou dělit na *obrobené* a *neobrobené*. U obrobené tyče se liší průřez mezi upínacími částmi od průřezu ve zkušební části (viz obr. 11). Přechod mezi oběma úseky musí být plynulý. Délka zkušební části u neobrobené tyče musí být dostatečně velká.

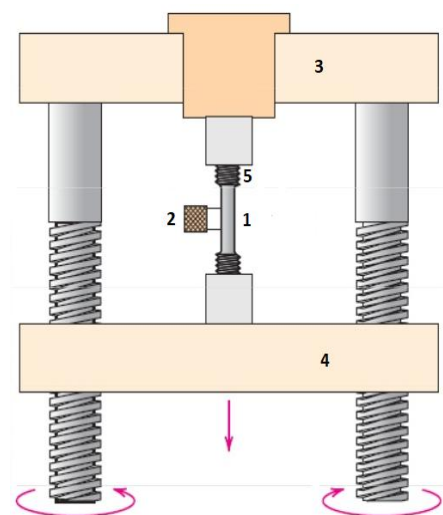
b) Poměrné a nepoměrně zkušební tyče

Pokud vztah mezi počáteční měřenou délkou tyče L_0 a průřezovou plochou S_0 vyplývá dle rovnice $L_0 = k \cdot \sqrt{S_0}$, nazývají se zkušební tyče *poměrné*, v opačném případě *nepoměrné*. Pokud možno, upřednostňují se zkušební tyče poměrné. Konstanta k z uvedeného vztahu je *koeficient proporcionality*, jehož mezinárodně přijatá hodnota je 5,65. Počáteční měřená délka L_0 se zaokrouhluje na nejbližší vyšší násobek 5 mm a zároveň by měla být minimálně 15 mm (nejlépe min. 20 mm). Tato počáteční měřená délka se vyznačuje na zkušební tyči ryskami či jinými značkami s přesností $\pm 1\%$. Pokud by velikost průřezové plochy byla příliš malá, volí se vyšší hodnota koeficientu proporcionality (11,3) nebo nepoměrná zkušební tělesa.



- a_0 - počáteční tloušťka plochého zkušebního tělesa
- b_0 - počáteční šířka zkoušené délky plochého zkušebního tělesa
- L_c - zkoušená délka
- L_0 - počáteční měřená délka zkušebního tělesa
- L_t - celková délka zkušebního tělesa
- S_0 - počáteční průřezová plocha zkoušené délky
- 1 - upnuté konce

Obr. 11 Zkušební těleso pravoúhlého průřezu [16]



- 1 - Zkušební těleso
- 2 - Extenzometr
- 3 - Horní příčník
- 4 - Pohyblivý příčník
- 5 - Upínací čelisti

Obr. 12 Schéma trhacího stroje [17]

3 Experimentální část

Praktická část této práce byla řešena na základě požadavků společnosti Aerosud, která působí jako výrobce a dodavatel integrovaných výrobních systémů interiérů v leteckém průmyslu. Za účelem získání optimálních mechanických vlastností slitiny EN AW–2024 při jejím zpracování technologií tváření si klade společnost Aerosud podmínky, za kterých se může tato slitina zpracovávat. Dle aktuálních požadavků se musí materiál tvářet nejdéle do 1 hodiny po rozpouštěcím žíhání při přirozeném stárnutí, nebo do 75 hodin po rozpouštěcím žíhání v případě podchlazení slitiny v mrazáku o teplotě nižší než $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při nesplnění těchto podmínek je nutné slitinu znovu podrobit rozpouštěcímu žíhání a celý proces opakovat, což je značně nákladné a časově náročné.

Cílem experimentální části je pomocí statické zkoušky tahem vyhodnotit vliv směru válcování a teploty na změnu mechanických vlastností slitiny EN AW–2024 v čase. Dalším cílem je na základě takto získaných výsledků ověřit nutnost dodržování aktuálních technologických podmínek společnosti Aerosud, případně doporučit vhodnější technologický postup zpracování této slitiny.

3.1 Specifikace podmínek testování vzorků

Parametry tepelného zpracování a testování vzorků EN AW–2024 byly stanoveny v souladu s předpisy specifikovanými společností Aerosud, konkrétně:

- 1) Rozpouštěcí žíhání (RŽ) při teplotě $495 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu $28,5 \pm 1,5\text{ min}$
- 2) Nejdéle do 12 s následné ochlazení ve vodě při teplotě max. $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu $3 \pm 1\text{ min}$
- 3) Realizace technologie tváření nejpozději do 1 hodiny po RŽ v případě vzorků neumístěných v mrazicím zařízení
- 4) U vzorků umístěných v mrazicím zařízení při teplotě nižší než $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ realizace technologie tváření do 30 minut od okamžiku vyrovnání teploty na RT (Room Temperature) po jejich vyjmutí z mrazicího zařízení

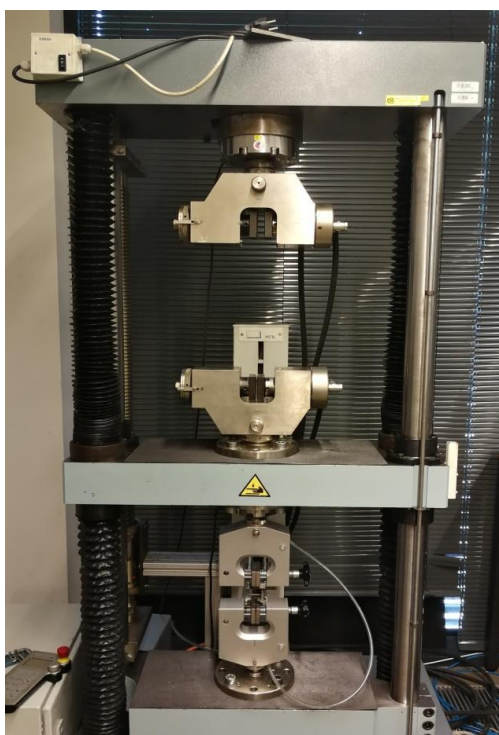
Pro zjištění vlivu různých podmínek na mechanické vlastnosti materiálu byly testované vzorky primárně rozděleny do třech větších skupin v závislosti na teplotních podmínkách jejich uchování, a to konkrétně při okolní pokojové teplotě (dále RT), v mrazáku o teplotě $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a v mrazáku o teplotě $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Každá skupina těchto vzorků byla dále rozdělena do menších podskupin v závislosti na různém časovém intervalu jejich stárnutí, a tedy i testování. Aby se zahrnul i faktor směru válcování vzorků, existoval v každé podskupině stejný počet vzorků válcovaných podélně (ve směru 0 °) a příčně (ve směru 90 °). Všechny podmínky jednotlivých testovaných skupin jsou pro názornost zaznamenány v tab. 8.

Tab. 8 Parametry testování slitiny EN AW–2024

| Parametry testování slitiny EN AW–2024 | | | | | |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|
| RT (22 ± 2 °C) | | -15 °C | | -25 °C | |
| Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° |
| 1 hod. | | 72 hod. | | 72 hod. | |
| 2 hod. | | 120 hod. | | 120 hod. | |
| 5 hod. | | 170 hod. | | - | |
| 9 hod. | | 250 hod. | | 250 hod. | |
| 1 den | | - | | - | |

3.2 Statická zkouška tahem

Mechanické vlastnosti slitiny EN AW–2024 se zjišťovaly pomocí statické zkoušky tahem, která byla uskutečněna na trhacím stroji TIRATest 2300 (viz obr. 13). Testovaly se ploché zkušební vzorky, které byly vystříženy z plechu o tloušťce 2 mm a následně obrobeny tak, aby jejich tvar a rozměry odpovídaly normě ČSN EN ISO 6892-1 (viz obr. 14). Za účelem větší eliminace různých materiálových anomálií testovaného materiálu byly zkušební vzorky z každé jednotlivé podskupiny (viz kap. 3.1) podrobeny statické zkoušce tahem vždy v sérii po 7 kusech.



Obr. 13 Trhací stroj TIRATest 2300



Obr. 14 Zkušební těleso ze slitiny EN AW 2024

Před samotnou zkoušku se jednotlivé vzorky očistily a v případě podchlazených vzorků navíc předcházelo jejich rychlé rozmrazení pod tekoucí vodou a dokonalé vysušení vhodnou savou textilií. Následně byly změřeny jejich rozměry a tyto hodnoty zadány do softwaru LabNet v 4.42, pomocí kterého byl řízen průběh a vyhodnocení zkoušky v souladu s normou ČSN EN ISO 6892-1.

Při statické zkoušce tahem se zkušební těleso upevnilo rovnoměrně do horních a spodních čelistí trhacího zařízení tak, aby podélná osa vzorku odpovídala vertikálnímu směru osy stroje. Po spuštění zkoušky byl přiložen extenzometr MFN-A ke zkušebnímu tělesu, které bylo následně zatěžováno ve směru své podélné osy až do jeho porušení. Rychlost posuvu příčnicku byla proměnná – 1 mm/min. do meze kluzu a následně 15 mm/min až do porušení zkušební vzorku. Ostatní parametry tahové zkoušky jsou uvedeny ve výsledných protokolech, které jsou součástí přílohy bakalářské práce.

3.3 Vyhodnocení zkoušky

Naměřená data průběhu statických zkoušek tahem byla zpracována pomocí softwaru LabNet v. 4.42, kde byly vyhodnoceny základní mechanické hodnoty jednotlivých vzorků (R_m , $R_{p0,2}$ a A_{80mm}) a příslušné pracovní diagramy, které se nachází v příloze. Získané hodnoty mechanických vlastností byly dále zpracovány a statisticky vyhodnocovány.

3.3.1 Zpracování získaných dat

V této podkapitole jsou v tabulkách zaznamenány zjištěné hodnoty mechanických vlastností zkušebních vzorků válcovaných ve směru 0° a 90° . Z důvodu rozsahu prováděných experimentů nejsou v textové části uváděny kompletní výsledky pro každý testovaný vzorek, ale vždy jen výsledky 1. série měření z každé testované skupiny, tzn. vzorků uchovávaných při teplotě označované jako RT, -15°C a -25°C . Pro ostatní série vzorků jsou dále uvedeny pouze tabulky s průměrnými hodnotami \bar{x} a výběrovými směrodatnými odchylkami σ mechanických vlastností. Hodnoty mechanických vlastností všech testovaných vzorků jsou součástí přílohy této práce.

Pro větší přehlednost byly z naměřených hodnot sestrojeny grafy zobrazující změny mechanických vlastností testovaných vzorků v závislosti na čase při různých teplotních podmínkách uchování vzorků. Ve znázorněných grafech přísluší levé svislé ose hodnoty R_m a $R_{p0,2}$ vyjádřené v MPa a pravá svislá osa odpovídá tažnosti A_{80mm} vyjádřené v %. Vyznačené body v grafech, které jsou propojeny lineárními spojnicemi, představují vypočtené průměrné hodnoty odpovídajících mechanických vlastností v dané době stárnutí materiálu. Kvůli názornějšímu srovnání vlivu směru válcování jsou hodnoty obou skupin vzorků zobrazeny v témže grafu. Důležité je také upozornění, že vodorovné osy zobrazující dobu stárnutí nejsou v měřítku.

- **Mechanické vlastnosti zkušebních vzorků uchovávaných při RT**

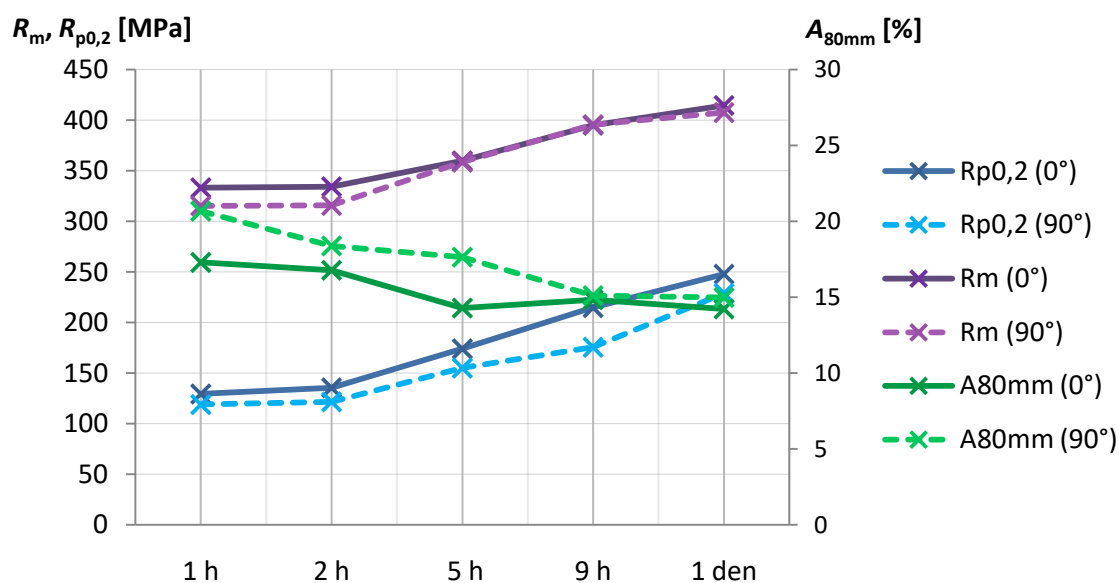
Tab. 9 Mechanické vlastnosti zkušebních vzorků po 1 hod.

| Vzorek | $R_{p0,2}$ [MPa] | | R_m [MPa] | | A_{80mm} [%] | |
|--------|------------------|----------|-------------|----------|----------------|----------|
| | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° |
| 1 | 127,6 | 119,5 | 330,2 | 318,3 | 16,83 | 22,91 |
| 2 | 129,3 | 125,8 | 329,1 | 323,3 | 16,8 | 17,58 |
| 3 | 132,8 | 116,2 | 331,1 | 311,1 | 16,31 | 21,68 |
| 4 | 130,3 | 116 | 343,2 | 310,7 | 18,83 | 21,35 |
| 5 | 125,2 | 117,7 | 325,7 | 312,7 | 16,61 | 19,36 |
| 6 | 129,4 | 117,8 | 329,5 | 313,1 | 16,91 | 19,47 |
| 7 | 130,6 | 119,4 | 344 | 317,7 | 18,79 | 22,36 |

Tab. 10 Průměrné hodnoty a směrodatné odchylky mechanických vlastností v čase

| $R_{p0,2}$ | 1 hod. | | 2 hod. | | 5 hod. | | 9 hod. | | 1 den | |
|------------|-----------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° |
| \bar{x} | 129,3 | 118,9 | 135,5 | 121,5 | 174 | 155 | 214,8 | 175,6 | 248 | 228,8 |
| σ | 2,4 | 3,3 | 3,8 | 3,1 | 9 | 12,7 | 8,8 | 3,5 | 4,8 | 7,8 |
| R_m | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° |
| | \bar{x} | 333,3 | 315,3 | 334,3 | 315,8 | 359,8 | 358,5 | 395,1 | 395,7 | 414,6 |
| σ | 7,3 | 4,7 | 2,1 | 2,9 | 7,3 | 3,5 | 8 | 4,1 | 4,2 | 2,7 |
| A_{80mm} | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° |
| | \bar{x} | 17,3 | 20,67 | 16,78 | 18,38 | 14,3 | 17,65 | 14,84 | 15,12 | 14,22 |
| σ | 1,05 | 1,92 | 1,8 | 1,31 | 1,6 | 0,92 | 1,38 | 1,17 | 0,6 | 0,88 |

Závislost mech. vlastností na čase



Obr. 15 Graf vlivu doby stárnutí a směru válcování na mech. vlastnosti vzorků uchovávaných při RT

U zkušebních vzorků uchovávaných při RT vyplývá z jejich průměrných hodnot mechanických vlastností (uvedených v tab. 10), že vlivem procesu přirozeného stárnutí slitiny došlo k předpokládanému nárůstu hodnot R_m a $R_{p0,2}$ a naopak k poklesu tažnosti A_{80mm} , jak je vidět i z grafu znázorněného na obr. 15. Tyto trendy platí jak pro vzorky, jejichž směr válcování byl podélný (pod úhlem 0°), tak pro vzorky válcovaných příčně (pod úhlem 90°). Pokud uvažujeme pouze průměrné hodnoty mechanických vlastností, činí celkový nárůst hodnot R_m po 1 dni přibližně 25 % u vzorků válcovaných podélně a 30 % u vzorků válcovaných příčně vzhledem k průměrným hodnotám zjištěným po 1 hodině od RŽ. Co se týče hodnot $R_{p0,2}$, je tento nárůst téměř dvojnásobný u obou skupin zkušebních vzorků. Celkový pokles průměrných hodnot tažnosti A_{80mm} činí přibližně 18 % při podélném směru válcování a 28 % při příčném směru válcování.

Pro obě skupiny vzorků dále platí, že hodnoty R_m a $R_{p0,2}$ naměřené z experimentů po 2 hodinách se příliš neliší od hodnot zjištěných po 1 hodině. Poměrně prudký nárůst těchto hodnot vlivem procesu stárnutí slitiny nastává až v dalším měření po 5 hodinách a tento rostoucí trend přetrvává i pro následující měření po 9 hodinách. Další nárůst hodnot naměřených po 1 dni je už pouze pozvolný.

Dle současných požadavků společnosti Aerosud, uvedených v úvodu experimentální části, se musí slitina EN AW–2024 tvářet nejdéle do 1 hodiny po rozpouštěcím žíhání při jejím přirozeném stárnutí. Bohužel nejsou známy konkrétní hodnoty a optimální kombinace mechanických vlastností požadované pro další zpracování této slitiny. Na základě zjištěných hodnot R_m a $R_{p0,2}$ by mohla být slitina dále zpracována i 2 hodiny po RŽ, vzhledem k minimální změně průměrných hodnot R_m a $R_{p0,2}$ oproti průměrným hodnotám naměřených po 1 hodině po RŽ. Protože je však slitina EN AW–2024 určena především pro tváření, je velmi důležité sledovat i výsledné hodnoty tažnosti, které už po 1 hodině klesají. V případě, že je kladen důraz především na vysokou hodnotu tažnosti slitiny, jsou současné požadavky společnosti pro přirozeně stárnoucí slitinu v souladu s výsledky tohoto měření.

- **Mechanické vlastnosti zkušebních vzorků uchovávaných při -15 °C**

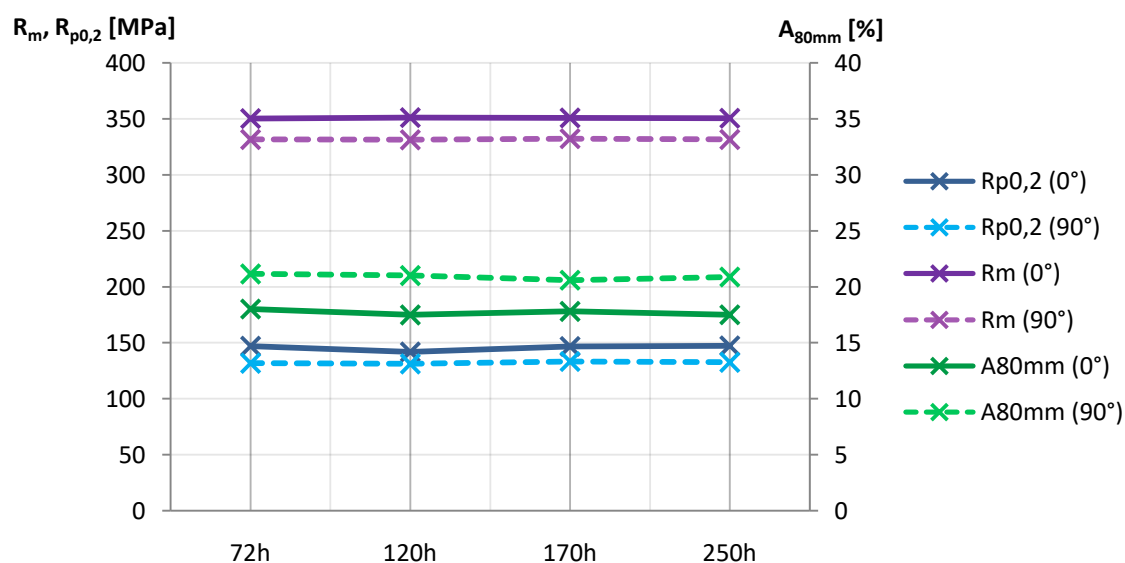
Tab. 11 Mechanické vlastnosti zkušebních vzorků po 72 hod.

| Vzorek | $R_{p0,2}$ [MPa] | | R_m [MPa] | | A_{80mm} [%] | |
|--------|------------------|----------|-------------|----------|----------------|----------|
| | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° |
| 1 | 152,8 | 129,3 | 355,3 | 327,7 | 17,39 | 17,99 |
| 2 | 145,7 | 132,3 | 348,8 | 331,8 | 18,54 | 22,09 |
| 3 | 147,2 | 136,2 | 347,7 | 335,6 | 17,58 | 20,66 |
| 4 | 146,1 | 130,3 | 349,6 | 330,9 | 19,17 | 21,69 |
| 5 | 144,3 | 130,9 | 353,7 | 330,7 | 17,33 | 21,83 |
| 6 | 148,1 | 132,7 | 349,5 | 332,7 | 17,47 | 22,04 |
| 7 | 144,9 | 130,5 | 347 | 331,6 | 18,68 | 21,74 |

Tab. 12 Průměrné hodnoty a směrodatné odchylky mechanických vlastností v čase

| $R_{p0,2}$ | 72 hod. | | 120 hod. | | 170 hod. | | 250 hod. | |
|------------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° |
| \bar{x} | 147 | 131,7 | 141,9 | 131,2 | 146,7 | 133,3 | 147,4 | 132,6 |
| σ | 2,9 | 2,3 | 1,5 | 1,4 | 3,9 | 2,8 | 5,2 | 0,8 |
| R_m | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° |
| \bar{x} | 350,2 | 331,6 | 351,2 | 331,3 | 350,9 | 332,2 | 350,5 | 331,6 |
| σ | 3,1 | 2,4 | 2,5 | 2,2 | 0,8 | 1,8 | 1,7 | 0,5 |
| A_{80mm} | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° |
| \bar{x} | 18,02 | 21,15 | 17,49 | 21 | 17,8 | 20,59 | 17,5 | 20,88 |
| σ | 0,75 | 1,47 | 1,13 | 0,66 | 0,32 | 0,64 | 0,34 | 0,67 |

Závislost mech. vlastností na čase



Obr. 16 Graf vlivu doby stárnutí a směru válcování na mech. vlastnosti vzorků uchovávaných při -15 °C

- **Mechanické vlastnosti zkušebních vzorků uchovávaných při -25 °C**

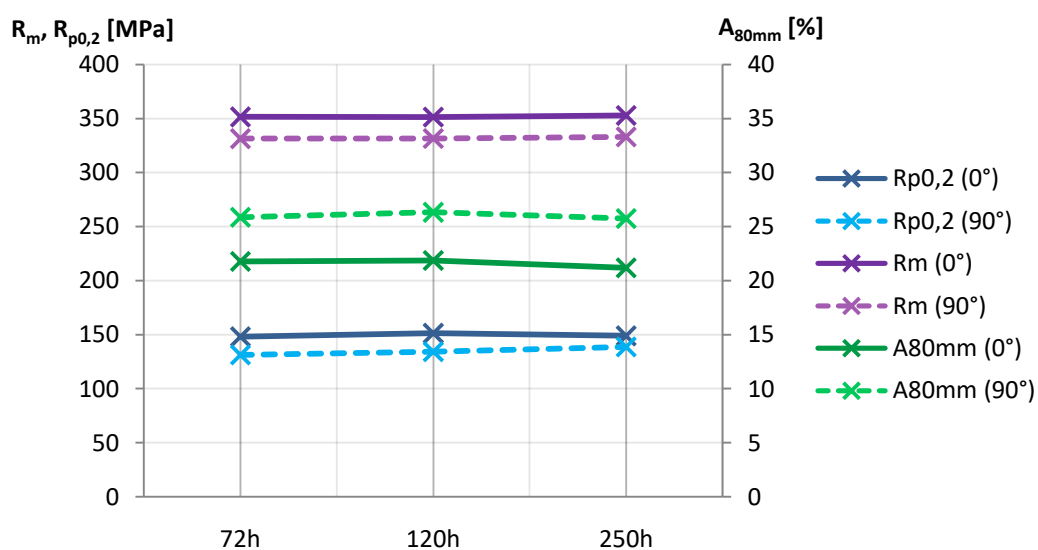
Tab. 13 Mechanické vlastnosti zkušebních vzorků po 72 hod.

| Vzorek | $R_{p0,2}$ [MPa] | | R_m [MPa] | | A_{80mm} [%] | |
|--------|------------------|----------|-------------|----------|----------------|----------|
| | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° |
| 1 | 147,5 | 130,4 | 351,2 | 330 | 21,79 | 26,65 |
| 2 | 147,1 | 130 | 350,5 | 328,4 | 22,08 | 26,29 |
| 3 | 148,1 | 131,8 | 351,5 | 332,1 | 21,41 | 25,27 |
| 4 | 149,3 | 130,1 | 350,1 | 328,8 | 21,8 | 26,34 |
| 5 | 148,6 | 133,1 | 352,6 | 334,3 | 21,33 | 24,88 |
| 6 | 148 | 132,1 | 352,8 | 333 | 22,21 | 25,65 |
| 7 | 150 | 132,4 | 353 | 334 | 21,95 | 26,06 |

Tab. 14 Průměrné hodnoty a směrodatné odchylky mechanických vlastností v čase

| $R_{p0,2}$ | 72 hod. | | 120 hod. | | 250 hod. | |
|------------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° |
| \bar{x} | 148,4 | 131,4 | 151,4 | 134,3 | 149 | 138,7 |
| σ | 1 | 1,2 | 6,8 | 2,7 | 3,2 | 1,9 |
| R_m | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° |
| \bar{x} | 351,7 | 331,5 | 351,5 | 331,7 | 352,9 | 333,1 |
| σ | 1,1 | 2,5 | 1,4 | 1,4 | 1,6 | 1,8 |
| A_{80mm} | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° | Směr 0° | Směr 90° |
| \bar{x} | 21,8 | 25,88 | 21,87 | 26,34 | 21,19 | 25,76 |
| σ | 0,33 | 0,64 | 0,97 | 0,97 | 0,58 | 0,65 |

Závislost mech. vlastností na čase



Obr. 17 Graf vlivu doby stárnutí a směru válcování na mech. vlastnosti vzorků uchovávaných při -25 °C

Zkušební vzorky uchovávané po rozpouštěcím žíhání v mrazáku v $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ vykazují velmi podobné mechanické vlastnosti jako ty uchovávané v $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, co se R_m a $R_{p0,2}$ týče. Mechanické vlastnosti, na rozdíl od přirozeně stárnoucích vzorků, se v průběhu času výrazně nemění a průměrné hodnoty zůstávají téměř konstantní. U obou skupin vzorků uchovaných v mrazáku dosahují hodnoty R_m přibližně 350 MPa v případě příčně válcovaných a 330 MPa u podélně válcovaných vzorků. Číselné hodnoty $R_{p0,2}$ se pohybují okolo 150 MPa u podélně, popř. 130 MPa u příčně válcovaných vzorků. Obě skupiny se však značně odlišují co do velikosti tažnosti. Zatímco příčně válcované vzorky uchované v mrazáku při $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ vykazují tažnost průměrně 26 %, ty podchlazené na $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ mají tažnost pouze 21 %. Stejně tak je tomu i u podélně válcovaných vzorků, které v případě jejich uchování při $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ dosahují tažnosti přibližně 22 %, vzorky uchované při $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ vykazují tažnost jen 18 %.

Dále bude proveden rozbor současných požadavků na zpracování této slitiny ve společnosti Aerosud (specifikovaných v úvodu experimentální části). Při sledování mechanických vlastností vzorků uchovávaných při teplotě $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 72 hodin, tak jak požaduje předpis firmy Aerosud, je vidět, že i u těchto vzorků dochází ke změně mechanických vlastností. Ty u takto skladovaných vzorků odpovídají přibližně hodnotám dosahovaným při přirozeném stárnutí (při RT) v době zhruba mezi 3 až 4 hodinami po rozpouštěcím žíhání. Toto zjištění je však v rozporu s aktuálními podmínkami, neboť pokud jsou mechanické vlastnosti slitiny uchované o teplotě menší než $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 72 hodin vyhovující, pak by měla být prodloužena maximální doba zpracovatelnosti slitiny uchované při RT z 1 hodiny na 3 hodiny. Nebo naopak lze konstatovat, že v případě, kdy jsou optimální mechanické vlastnosti slitiny skladované při RT dosažené max. do 1 hodiny po RŽ, nemá podchlazení slitin žádný význam, neboť se tímto způsobem nedosáhne stabilizace obdobných mechanických vlastností. Z pohledu změny hodnot R_m a $R_{p0,2}$ nemá současný předpis na zmrazování slitiny opodstatnění. Z naměřených výsledků je ale patrný pozitivní vliv nízké teploty uskladnění na stabilizaci tažnosti materiálu. Nízké teploty, při kterých je slitina uchována, potlačují precipitační procesy a nedochází tak ke snižování plastických schopností materiálu.

3.3.2 Analýza rozptylu (ANOVA)

Vlivy jednotlivých faktorů na výsledné mechanické hodnoty slitiny EN AW–2024 vytyčených v úvodu práce byly zjišťovány statistickou metodikou. Konkrétně byla výsledná naměřená data podrobena analýze rozptylu (tzv. ANOVA), což je metoda k posouzení variability výsledných dat opakovaného náhodného pokusu, tj. proměnlivost náhodné veličiny.

Účelem analýzy rozptylu je, na základě výsledných dat experimentu roztříděných dle určitých hledisek (faktorů), určit faktory, které ovlivňují výsledné hodnoty závislé proměnné statisticky významně (tzn. vliv těchto faktorů na výsledek je trvalý a není náhodný) a ty faktory, které mají vzhledem k závislé proměnné pouze náhodný charakter. Použití této statistické metody je podmíněno několika požadavky, které předpokládají u jednotlivých výběrů souboru stejnou četnost prvků, jejich vzájemnou nezávislost, normální rozdělení a srovnatelný rozptyl. Předpokládá se, že jednotlivé výběry souboru vyhovují těmto podmínkám – odchylky od normality rozdělení výběrů lze zanedbat vzhledem k minimálnímu ovlivnění F-testů, které se užívají k vyhodnocení ANOVY.

- **Dvoufaktorová ANOVA s opakováním**

Existuje několik druhů a způsobů vyhodnocení analýzy rozptylu, ale dále bude věnována pozornost zejména analýze rozptylu při dvojném třídění s opakovaným měřením, tzv. dvoufaktorová ANOVA s opakováním, která byla použita pro vyhodnocení výsledků této práce. Tato analýza vyhodnocuje data roztříděná dle dvou faktorů, přičemž předpokládá existenci vzájemné interakce mezi faktory. Interakce se vyskytuje tehdy, pokud účinek od jednoho faktoru na závislou proměnnou není stejný v případě změny úrovně druhého faktoru.

Zkoumaný soubor je rozdělen do skupin dle testovaných faktorů a v každé této skupině je určena střední hodnota a rozptyl prvků. V dalším kroku testu je nutné stanovit nulovou (testovanou) hypotézu H_0 a k ní v případě jejího zamítnutí i alternativní hypotézu H_1 .

- H_0 : Střední hodnoty všech porovnávaných výběrů se shodují.
- H_1 : Alespoň jedna střední hodnota se liší od ostatních.

U dvoufaktorové ANOVY se obvykle stanovují 3 nulové a alternativní hypotézy:

- H_0 : Vliv faktoru A je statisticky nevýznamný. (H_1 : Vliv faktoru A je statisticky významný.)
- H_0 : Vliv faktoru B je statisticky nevýznamný. (H_1 : Vliv faktoru B je statisticky významný.)
- H_0 : Vliv interakce faktorů je stat. nevýznamná. (H_1 : Vliv interakce faktorů je stat. významná.)

Rozhodnutí o přijetí nebo zamítnutí hypotéz H_0 se děje až na základě výsledků testování shody středních hodnot pomocí analýzy rozptylu.

Po stanovení hypotéz se pomocí F-testu, testující shodnost rozptylů všech možných kombinací výběrů, vypočte testovací kritérium F . Po určení pravděpodobnosti chybného zamítnutí nulové hypotézy, tzv. hladiny významnosti α (obvykle 0,05) a jí odpovídající kritické hodnoty F_{krit} pro F-test, se následně porovnávají hodnoty F a F_{krit} . Je-li $F > F_{krit}$, zamítá se H_0 na hladině významnosti α a přijme se H_1 . Dalším parametrem, na základě kterého je možné rozhodnout o (ne)přijetí H_0 , je p -hodnota, která udává nejmenší hladinu významnosti, se kterou se při daných datech ještě zamítá nulová hypotéza. P -hodnota se porovnává s již určenou hladinou významnosti α a v případě, že $p < \alpha$, dojde k zamítnutí H_0 na hladině významnosti α a přijmutí H_1 . V případě, že $p \geq \alpha$, se hypotéza H_0 nezamítá a vliv daného faktoru je tedy staticky nevýznamný se stejnou hodnotou α [18].

S užitím dvoufaktorové ANOVY s opakováním se posuzovaly výsledky mechanických hodnot vzorků v roztříděných dle dvou faktorů – směru válcování (faktor A) a doby stárnutí (faktor B). V každé podskupině se stejnými faktory byl uskutečněn stejný počet sedmi měření. Hladina významnosti α byla zvolena 0,05 (5 %) a na této hladině jsou interpretovány i závěry pod následujícími tabulkami hodnot. Vzhledem k náročnosti celého výpočtu byla ANOVA provedena s pomocí programu MS Excel 2007. V následujících tabulkách jsou uvedeny výsledné hodnoty F , F_{krit} a p jednotlivých faktorů a jejich vzájemné interakce pro příslušné mechanické vlastnosti a teploty uchování vzorků. Statistické charakteristiky jednotlivých úrovní faktorů a buněk zde kvůli své rozsáhlosti nejsou uvedeny.

Tab. 15 Test ANOVA- vliv doby stárnutí a směru válcování na mech. vlastnosti vzorků uchovaných při RT

| ANOVA | $R_{p0,2}$ | | | R_m | | | A_{80mm} | | |
|----------------|------------|----------------------|------------|---------|----------------------|------------|------------|---------------------|------------|
| | F | p | F_{krit} | F | p | F_{krit} | F | p | F_{krit} |
| Směr válcování | 158,630 | $1,7 \cdot 10^{-18}$ | 4,001 | 52,302 | $1,01 \cdot 10^{-9}$ | 4,001 | 34,992 | $1,7 \cdot 10^{-7}$ | 4,001 |
| Čas stárnutí | 703,152 | $1,2 \cdot 10^{-49}$ | 2,525 | 853,064 | $4 \cdot 10^{-52}$ | 2,525 | 26,964 | $8 \cdot 10^{-13}$ | 2,525 |
| Interakce | 9,547 | $4,84 \cdot 10^{-6}$ | 2,525 | 11,045 | $8,88 \cdot 10^{-7}$ | 2,525 | 4,131 | 0,005 | 2,525 |

Na základě porovnání F s F_{krit} , popř. p hodnot s α , byly všechny 3 nulové hypotézy pro dané mechanické vlastnosti vzorků uchovaných při RT zamítnuty a přijaty alternativní hypotézy. Neboli na mechanické vlastnosti zkušebních vzorků byl prokázán statisticky významný vliv nejen jednotlivých faktorů A (směr válcování) a B (doba stárnutí), ale i jejich interakce.

Tab. 16 Test ANOVA- vliv doby stárnutí a směru válcování na mech. vlastnosti vzorků uchovaných při -15 °C

| ANOVA | $R_{p0,2}$ | | | R_m | | | A_{80mm} | | |
|----------------|------------|-----------------------|------------|----------|----------------------|------------|------------|----------------------|------------|
| | F | p | F_{krit} | F | p | F_{krit} | F | p | F_{krit} |
| -15 °C | | | | | | | | | |
| Směr válcování | 299,484 | $2,87 \cdot 10^{-22}$ | 4,043 | 1223,954 | $8,1 \cdot 10^{-36}$ | 4,043 | 207,701 | $4,6 \cdot 10^{-19}$ | 4,043 |
| Čas stárnutí | 4,384 | 0,008 | 2,798 | 0,285 | 0,836 | 2,798 | 0,733 | 0,537 | 2,798 |
| Interakce | 1,659 | 0,188 | 2,798 | 0,281 | 0,839 | 2,798 | 0,518 | 0,672 | 2,798 |

Co se týče vzorků uchovávaných při teplotě -15 °C, byla hypotéza H_0 v celém rozsahu zamítnuta pouze pro faktor A čili na všechny dané mechanické vlastnosti má statisticky významný vliv směr válcování. Dále lze nulovou hypotézu o nevýznamnosti zamítnout i pro faktor doby stárnutí na vliv výsledné $R_{p0,2}$, tzn. existuje statisticky významný vliv na velikost hodnoty $R_{p0,2}$ min. mezi dvěma sériemi vzorků s různými dobami stárnutí. Pro ostatní parametry lze přijmout nulovou hypotézu čili nebyl prokázán vliv doby stárnutí na hodnoty R_m ani A_{80mm} a rovněž ani interakce obou faktorů nemá statisticky významný vliv na mechanické vlastnosti vzorků.

Tab. 17 Test ANOVA- vliv doby stárnutí a směru válcování na mech. vlastnosti vzorků uchovaných při -25 °C

| ANOVA | $R_{p0,2}$ | | | R_m | | | A_{80mm} | | |
|----------------|------------|-----------------------|------------|----------|------------|------------|------------|----------------------|------------|
| | F | p | F_{krit} | F | p | F_{krit} | F | p | F_{krit} |
| RT | | | | | | | | | |
| Směr válcování | 197,593 | $3,44 \cdot 10^{-16}$ | 4,113 | 1457,654 | 10^{-30} | 4,113 | 380,857 | $9,8 \cdot 10^{-21}$ | 4,113 |
| Čas stárnutí | 5,142 | 0,011 | 3,259 | 3,161 | 0,054 | 3,259 | 2,659 | 0,084 | 3,259 |
| Interakce | 4,549 | 0,017 | 3,259 | 0,041 | 0,960 | 3,259 | 0,438 | 0,649 | 3,259 |

Směr válcování má stejně jako u předešlých skupin statisticky významný vliv i na všechny mechanické vlastnosti u vzorků uchovávaných při -25 °C. Na hodnotu $R_{p0,2}$ má kromě samostatného směru válcování statisticky významný vliv doba stárnutí i interakce obou faktorů. Naopak u hodnot R_m a A_{80mm} se doba stárnutí ukázala (byť těsně) jako statisticky nevýznamná a interakce obou faktorů je rovněž náhodného charakteru.

4 Závěr

Z provedených experimentů v rámci řešení bakalářské práce vyplývá, že u přirozeně stárnoucích zkušebních vzorků ze slitiny EN AW–2024 dochází k výrazným změnám jejich mechanických vlastností v průběhu času a naproti tomu obě skupiny podchlazených vzorků vykazují navzájem velmi podobné hodnoty $R_{p0,2}$ a R_m , které se v čase příliš nemění. Ty se však od sebe poměrně významně odlišují svoji tažností A_{80mm} , kde vzorky uchovávané v -25 °C vykazují přibližně o 5 % vyšší tažnost než ty uchované v -15 °C . Všechny tyto uvedené závěry platí pro obě série vzorků, jak válcovaných v příčném, tak i v podélném směru.

Dle získaných dat vyhodnocených pomocí statistického testu analýzy rozptylu vyplývá, že faktor doby stárnutí má statisticky významný vliv na uvedené mechanické vlastnosti přirozeně stárnoucích vzorků a pouze na hodnoty $R_{p0,2}$ u podchlazených vzorků. U zbylých mechanických vlastností podchlazených vzorků vliv času nebyl prokázán. Z naměřených dat je dále patrné, že mechanické vlastnosti vzorků jsou velmi ovlivněny směrem válcování, neboť vzorky válcované v podélném směru (0 °) vykazují téměř vždy větší průměrné hodnoty $R_{p0,2}$ a R_m , a tedy nižší A_{80mm} , než ty válcované příčně (90 °). Tento jev není náhodného charakteru, jak vyplývá i z analýzy rozptylu.

Skupiny výběrů, u kterých byl prokázán statisticky významný vliv daných faktorů, by bylo možné dále podrobit testu mnohonásobného porovnání, pomocí něhož lze určit, které konkrétní střední hodnoty daných výběrů se od sebe liší na hladině významnosti α . Tato metoda už však není předmětem této práce.

Posledním cílem bakalářské práce bylo prokázat nebo vyvrátit nutnost dodržování aktuálních technologických předpisů společnosti Aerosud kladených na zpracování slitiny EN AW–2024, které jsou specifikovány v úvodu experimentální části. I když nejsou známy konkrétní požadované hodnoty mechanických vlastností slitiny, je z provedených měření patrné, že současné požadavky nejsou v souladu s výslednými hodnotami této práce, neboť mechanické vlastnosti podchlazených vzorků měřených po 72 hodinách neodpovídají hodnotám po 1 hodině, nýbrž přibližně po 3 až 4 hodinách u přirozeně stárnoucích vzorků. Doporučení pro společnost Aerosud tak zní následovně:

V případě, že jsou mechanické vlastnosti slitiny uchované max. 72 hodin v mrazáku o teplotě menší než -14 °C vyhovující, pak by měla být požadovaná maximální doba přirozeného stárnutí slitiny prodloužena z 1 hodiny na 3 hodiny. Naopak v případě, že jsou optimální mechanické vlastnosti slitiny skladované při RT dosažené max. do 1 hodiny po RŽ, nemá podchlazení slitin žádný význam, neboť se tímto způsobem nedosáhne obdobných mechanických vlastností.

Seznam použité literatury

- [1] SKÁLOVÁ, Jana, Vladislav MOTYČKA a Jaroslav KOUTSKÝ. *Nauka o materiálech*. 3. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2003. ISBN 80-7043-244-6.
- [2] MICHNA Š. a kol. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin s.r.o., 2005. 700 s. ISBN: 80-89041-88-4.
- [3] SOLFRONK, Pavel, Iva NOVÁ a Iva NOVÁKOVÁ. *Tvařitelnost slitin hliníku*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012. 154 s. ISBN 978-80-7372-825-0.
- [4] SODOMKA, Jaromír. *Hliník a jeho slitiny* [online]. In: . 2015, s. 13
- [5] PÍŠEK, F. *Nauka o materiálu I: Nauka o kovech*. 3. svazek. Neželezné kovy. 2. přepracované vydání. Praha: Academia, 1973. 595 s.
- [6] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [7] Značení neželezných kovů. *Ferona online* [online]. Praha, ©2017 [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/znaceni-nezelezných-kovu/>
- [8] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
- [9] MACEK, Karel. *Kovové materiály*. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03513-1.
- [10] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Dural* [online]. c2017 [citováno 23. 03. 2018]. Dostupný z WWW: <<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Dural&oldid=15351439>>
- [11] MORAVEC, Jan. Zpracování hliníku - od minerálu až po kabel. *OEnergetice.cz* [online]. 29. 9. 2015 [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/uncategorized/zpracovani-hliniku-od-mineralu-az-po-kabel/>
- [12] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
- [13] In: *Chemie pro Starou Paku* [online]. [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <http://home.tiscali.cz/chemie/images/hlinik.gif>
- [14] ZAHRADNIK, Igor. Vybrané průmyslové výroby neželezných kovů ve středoškolské výuce [online]. Olomouc, 2011 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/7124990-Univerzita-palackeho-v-olomouci.html> . Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Prof. RNDr. Jiří Kameníček, CSc.
- [15] PATA, Vladimír. *Statická zkouška tahem* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/3347258/11/images/8/Veli%C4%8Diny+z%C3%ADskan%C3%A9+z+tahov%C3%A9+zkou%C5%A1ky.jpg>
- [16] ČSN ISO 6892. *Kovové materiály: Zkoušení tahem*. 2010.
- [17] MARTINÁK, M. *Kontrola a měření pro 3. ročník SPŠ strojnických*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1989 [online]. [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef_gruber/kom/tah/stroj1.jpg
- [18] BEDÁŇOVÁ, Iveta. ANOVA. Statistika a výpočetní technika [online]. [cit. 2018-06-21]. Dostupné z: <https://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn3/ANOVA.htm>

Seznam příloh

Příloha 1: Protokoly ze statických zkoušek tahem pro vzorky uchovaných při RT

Příloha 1.1: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 1 hod., směr válcování 0°

Příloha 1.2: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 1 hod., směr válcování 90°

Příloha 1.3: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 2 hod., směr válcování 0°

Příloha 1.4: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 2 hod., směr válcování 90°

Příloha 1.5: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 5 hod., směr válcování 0°

Příloha 1.6: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 5 hod., směr válcování 90°

Příloha 1.7: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 9 hod., směr válcování 0°

Příloha 1.8: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 9 hod., směr válcování 90°

Příloha 1.9: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 1 dni, směr válcování 0°

Příloha 1.10: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 1 dni, směr válcování 90°

Příloha 2: Protokoly ze statických zkoušek tahem pro vzorky uchovaných při -15 °C

Příloha 2.1: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 72 hod., směr válcování 0°

Příloha 2.2: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 72 hod., směr válcování 90°

Příloha 2.3: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 120 hod., směr válcování 0°

Příloha 2.4: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 120 hod., směr válcování 90°

Příloha 2.5: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 170 hod., směr válcování 0°

Příloha 2.6: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 170 hod., směr válcování 90°

Příloha 2.7: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 250 hod., směr válcování 0°

Příloha 2.8: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 250 hod., směr válcování 90°

Příloha 3: Protokoly ze statických zkoušek tahem pro vzorky uchovaných při -25 °C

Příloha 2.1: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 72 hod., směr válcování 0°

Příloha 2.2: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 72 hod., směr válcování 90°

Příloha 2.3: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 120 hod., směr válcování 0°

Příloha 2.4: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 120 hod., směr válcování 90°

Příloha 2.5: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 250 hod., směr válcování 0°

Příloha 2.6: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 250 hod., směr válcování 90°

Příloha 1.1: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 1 hod., směr válcování 0°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

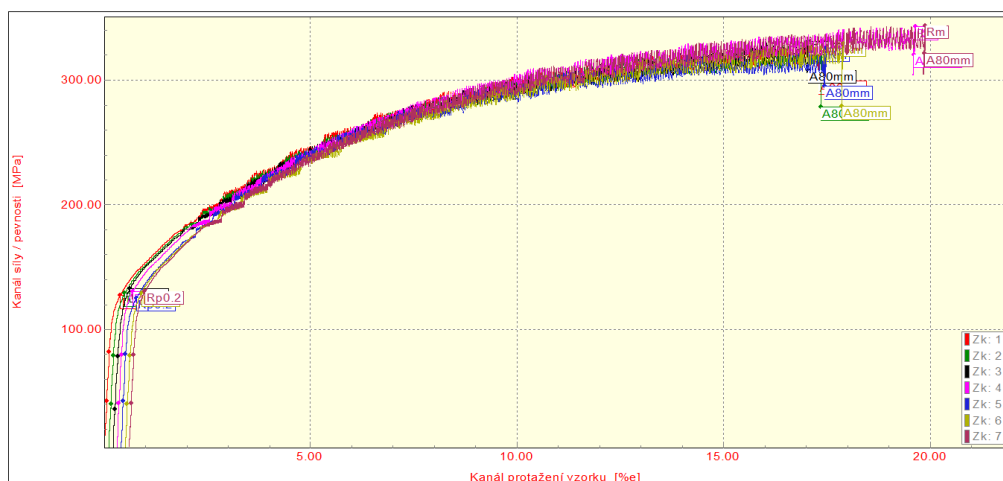
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : EN AW 2024 - T6
 Rozměry vzorku : [20x2] mm
 Směr odebrání vzorku : 0°
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
 Teplota : RT
 Vypracoval : Michaela Štípková
 Datum provedení testu : 5.3.2018

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Zkouška | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------|--------------|-----------|------------|
| 1 | 127.6 | 330.2 | 16.83 |
| 2 | 129.3 | 329.1 | 16.80 |
| 3 | 132.8 | 331.1 | 16.31 |
| 4 | 130.3 | 343.2 | 18.83 |
| 5 | 125.2 | 325.7 | 16.61 |
| 6 | 129.4 | 329.5 | 16.91 |
| 7 | 130.6 | 344.0 | 18.79 |

| Statistika | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek | 7 | 7 | 7 |
| Průměrná hodnota | 129.3 | 333.3 | 17.30 |
| Směrodatná odchylka | 2.4 | 7.3 | 1.05 |
| Minimální hodnota | 125.2 | 325.7 | 16.31 |
| Maximální hodnota | 132.8 | 344.0 | 18.83 |



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

Příloha 1.2: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 1 hod., směr válcování 90°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

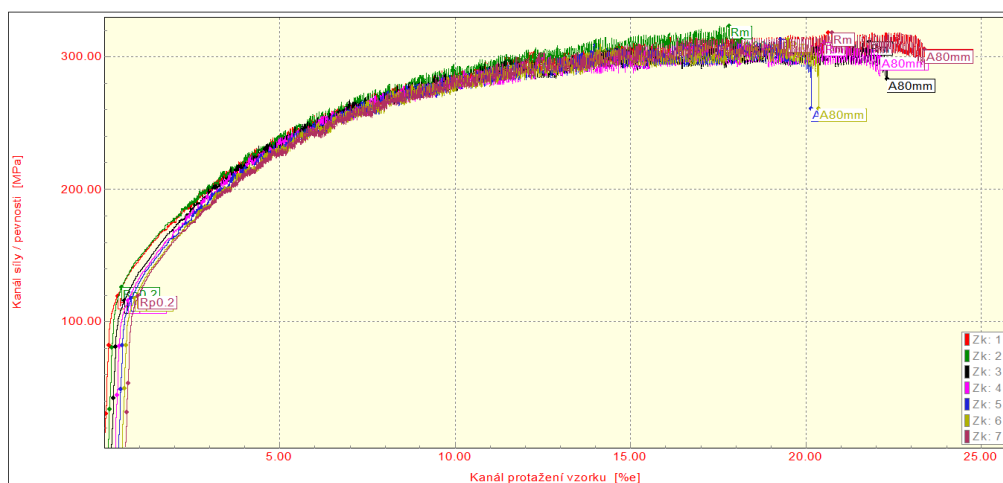
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : EN AW 2024 - T6
 Rozměry vzorku : [20x2] mm
 Směr odebrání vzorku : 90°
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
 Teplota : RT
 Vypracoval : Michaela Štípková
 Datum provedení testu : 5.3.2018

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Zkouška | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------|--------------|-----------|------------|
| 1 | 119.5 | 318.3 | 22.91 |
| 2 | 125.8 | 323.3 | 17.58 |
| 3 | 116.2 | 311.1 | 21.68 |
| 4 | 116.0 | 310.7 | 21.35 |
| 5 | 117.7 | 312.7 | 19.36 |
| 6 | 117.8 | 313.1 | 19.47 |
| 7 | 119.4 | 317.7 | 22.36 |

| Statistika | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek | 7 | 7 | 7 |
| Průměrná hodnota | 118.9 | 315.3 | 20.67 |
| Směrodatná odchylka | 3.3 | 4.7 | 1.92 |
| Minimální hodnota | 116.0 | 310.7 | 17.58 |
| Maximální hodnota | 125.8 | 323.3 | 22.91 |



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

Příloha 1.3: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 2 hod., směr válcování 0°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

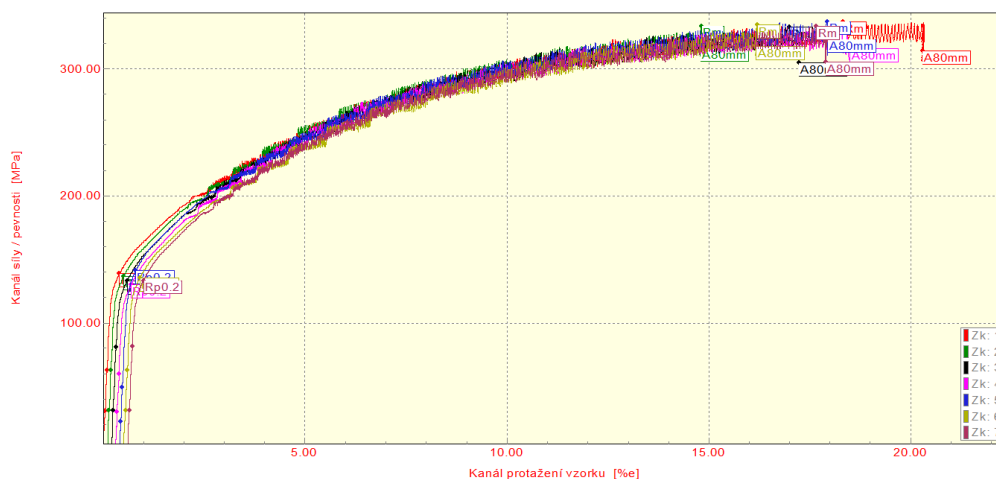
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : EN AW 2024 - T6
 Rozměry vzorku : [20x2] mm
 Směr odebrání vzorku : 0°
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
 Teplota : RT
 Vypracoval : Michaela Štípková
 Datum provedení testu : 5.3.2018

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Zkouška | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------|--------------|-----------|------------|
| 1 | 138.9 | 336.7 | 19.82 |
| 2 | 136.2 | 333.7 | 14.23 |
| 3 | 132.9 | 332.7 | 16.60 |
| 4 | 130.2 | 331.4 | 17.73 |
| 5 | 141.4 | 337.3 | 17.07 |
| 6 | 135.7 | 334.5 | 15.18 |
| 7 | 133.2 | 333.4 | 16.85 |

| Statistika | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek | 7 | 7 | 7 |
| Průměrná hodnota | 135.5 | 334.3 | 16.78 |
| Směrodatná odchylka | 3.8 | 2.1 | 1.80 |
| Minimální hodnota | 130.2 | 331.4 | 14.23 |
| Maximální hodnota | 141.4 | 337.3 | 19.82 |



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

Příloha 1.4: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 2 hod., směr válcování 90°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

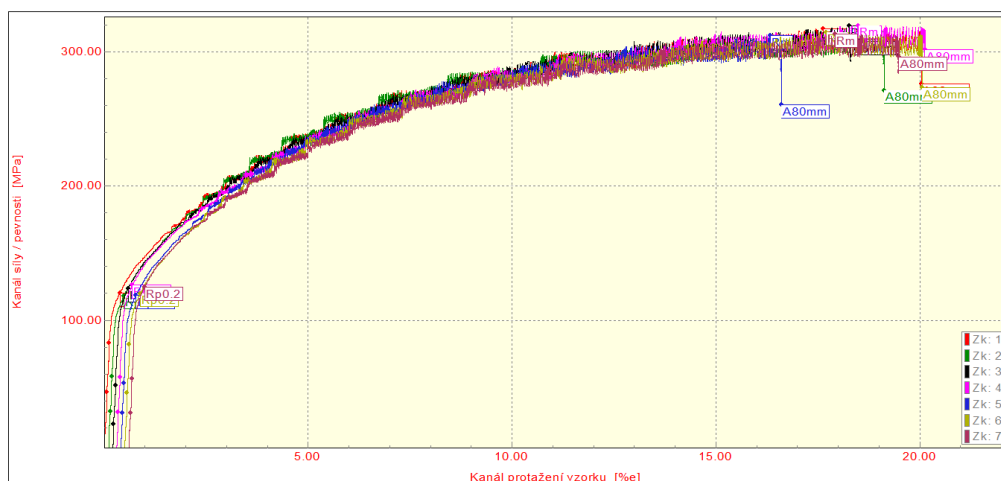
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : EN AW 2024 - T6
 Rozměry vzorku : [20x2] mm
 Směr odebrání vzorku : 90°
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
 Teplota : RT
 Vypracoval : Michaela Štípková
 Datum provedení testu : 5.3.2018

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Zkouška | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------|--------------|-----------|------------|
| 1 | 120.3 | 317.3 | 19.63 |
| 2 | 118.1 | 314.9 | 18.60 |
| 3 | 123.5 | 319.0 | 17.65 |
| 4 | 126.2 | 319.6 | 19.38 |
| 5 | 118.6 | 311.9 | 15.81 |
| 6 | 119.6 | 314.4 | 19.15 |
| 7 | 124.3 | 313.4 | 18.46 |

| Statistika | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek | 7 | 7 | 7 |
| Průměrná hodnota | 121.5 | 315.8 | 18.38 |
| Směrodatná odchylka | 3.1 | 2.9 | 1.31 |
| Minimální hodnota | 118.1 | 311.9 | 15.81 |
| Maximální hodnota | 126.2 | 319.6 | 19.63 |



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

Příloha 1.5: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 5 hod., směr válcování 0°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

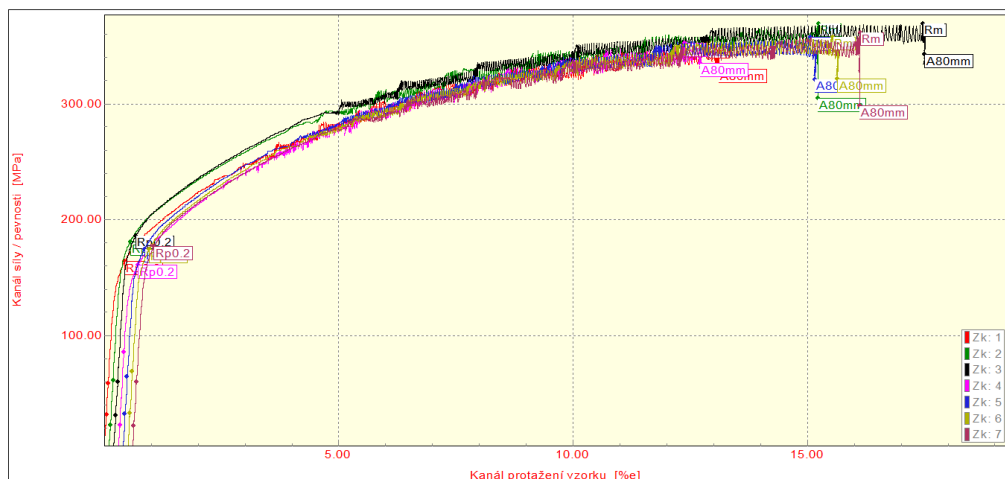
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : EN AW 2024 - T6
 Rozměry vzorku : [20x2] mm
 Směr odebrání vzorku : 0°
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
 Teplota : RT
 Vypracoval : Michaela Štípková
 Datum provedení testu : 5.3.2018

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Zkouška | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------|--------------|-----------|------------|
| 1 | 164.0 | 351.2 | 12.63 |
| 2 | 181.1 | 369.5 | 14.69 |
| 3 | 186.1 | 369.2 | 16.80 |
| 4 | 160.6 | 352.4 | 11.95 |
| 5 | 174.5 | 357.1 | 14.29 |
| 6 | 174.3 | 357.7 | 14.66 |
| 7 | 177.1 | 361.6 | 15.06 |

| Statistika | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek | 7 | 7 | 7 |
| Průměrná hodnota | 174.0 | 359.8 | 14.30 |
| Směrodatná odchylka | 9.0 | 7.3 | 1.60 |
| Minimální hodnota | 160.6 | 351.2 | 11.95 |
| Maximální hodnota | 186.1 | 369.5 | 16.80 |



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

Příloha 1.6: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 5 hod., směr válcování 90°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

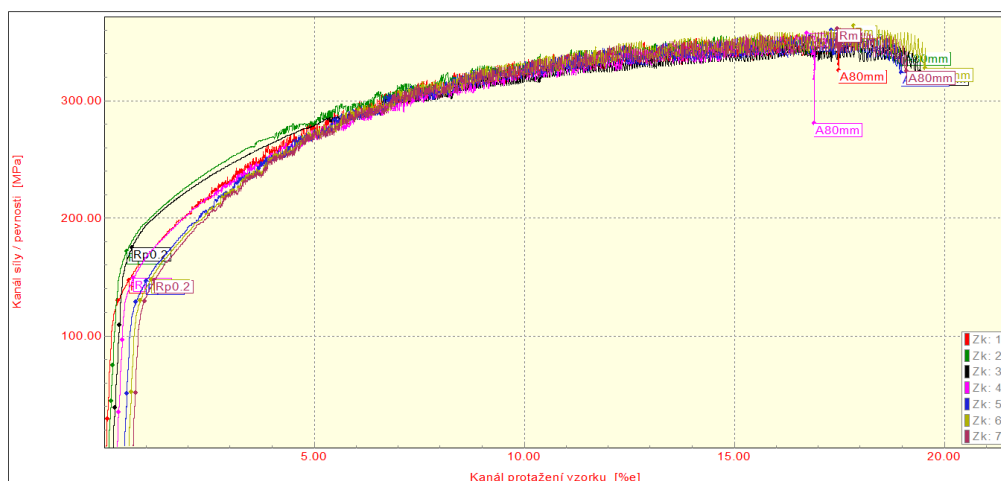
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : EN AW 2024 - T6
 Rozměry vzorku : [20x2] mm
 Směr odebrání vzorku : 90°
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
 Teplota : RT
 Vypracoval : Michaela Štípková
 Datum provedení testu : 5.3.2018

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Zkouška | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------|--------------|-----------|------------|
| 1 | 147.2 | 357.4 | 16.64 |
| 2 | 171.9 | 356.0 | 18.44 |
| 3 | 175.1 | 353.7 | 18.75 |
| 4 | 148.9 | 357.2 | 16.24 |
| 5 | 146.5 | 359.8 | 17.69 |
| 6 | 147.9 | 364.1 | 18.14 |
| 7 | 147.2 | 361.3 | 17.62 |

| Statistika | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek | 7 | 7 | 7 |
| Průměrná hodnota | 155.0 | 358.5 | 17.65 |
| Směrodatná odchylka | 12.7 | 3.5 | 0.92 |
| Minimální hodnota | 146.5 | 353.7 | 16.24 |
| Maximální hodnota | 175.1 | 364.1 | 18.75 |



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

Příloha 1.7: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 9 hod., směr válcování 0°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

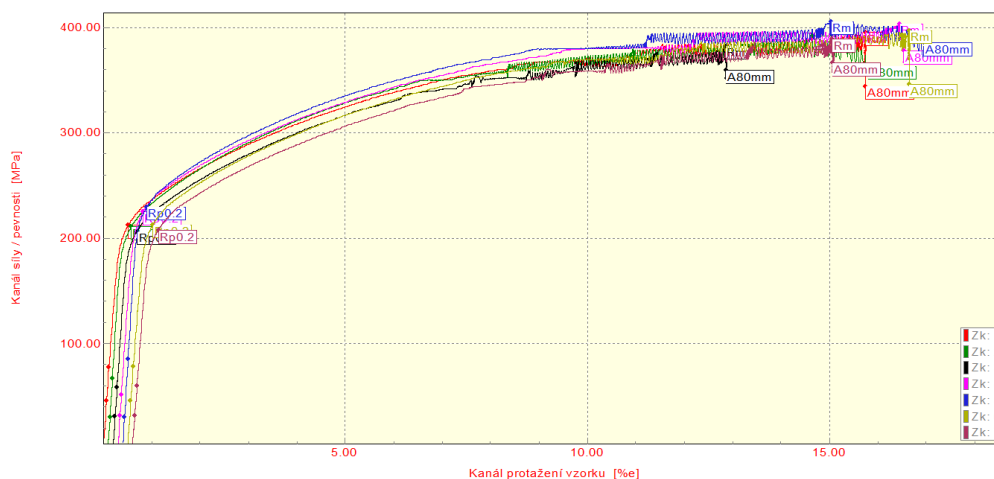
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : EN AW 2024 - T6
 Rozměry vzorku : [20x2] mm
 Směr odebrání vzorku : 0°
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
 Teplota : RT
 Vypracoval : Michaela Štípková
 Datum provedení testu : 5.3.2018

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Zkouška | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------|--------------|-----------|------------|
| 1 | 212.1 | 395.3 | 15.23 |
| 2 | 210.8 | 392.0 | 15.23 |
| 3 | 206.6 | 382.4 | 12.14 |
| 4 | 224.8 | 403.3 | 15.70 |
| 5 | 229.4 | 405.7 | 16.06 |
| 6 | 212.7 | 397.3 | 15.62 |
| 7 | 207.4 | 389.3 | 13.88 |

| Statistika | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek | 7 | 7 | 7 |
| Průměrná hodnota | 214.8 | 395.1 | 14.84 |
| Směrodatná odchylka | 8.8 | 8.0 | 1.38 |
| Minimální hodnota | 206.6 | 382.4 | 12.14 |
| Maximální hodnota | 229.4 | 405.7 | 16.06 |



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

Příloha 1.8: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 9 hod., směr válcování 90°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

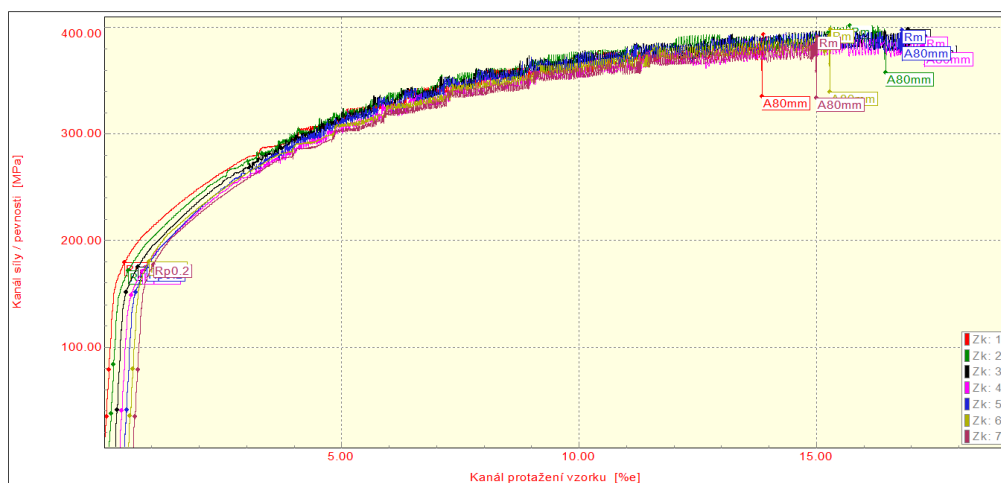
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : EN AW 2024 - T6
 Rozměry vzorku : [20x2] mm
 Směr odebrání vzorku : 90°
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
 Teplota : RT
 Vypracoval : Michaela Štípková
 Datum provedení testu : 5.3.2018

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Zkouška | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------|--------------|-----------|------------|
| 1 | 179.3 | 393.2 | 13.43 |
| 2 | 171.7 | 401.8 | 15.92 |
| 3 | 174.6 | 398.1 | 16.07 |
| 4 | 171.3 | 390.8 | 16.32 |
| 5 | 174.6 | 397.1 | 15.78 |
| 6 | 180.2 | 397.9 | 14.33 |
| 7 | 177.7 | 391.4 | 13.96 |

| Statistika | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek | 7 | 7 | 7 |
| Průměrná hodnota | 175.6 | 395.7 | 15.12 |
| Směrodatná odchylka | 3.5 | 4.1 | 1.17 |
| Minimální hodnota | 171.3 | 390.8 | 13.43 |
| Maximální hodnota | 180.2 | 401.8 | 16.32 |



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

Příloha 1.9: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 1 dni, směr válcování 0°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

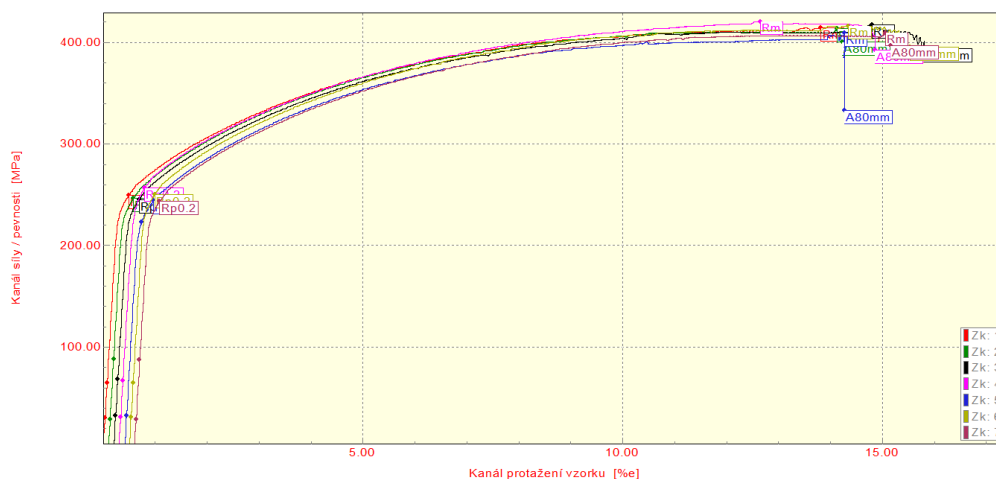
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : EN AW 2024 - T6
 Rozměry vzorku : [20x2] mm
 Směr odebrání vzorku : 0°
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
 Teplota : RT
 Vypracoval : Michaela Štípková
 Datum provedení testu : 6.3.2018

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Zkouška | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------|--------------|-----------|------------|
| 1 | 249.5 | 414.9 | 14.56 |
| 2 | 246.2 | 413.4 | 13.68 |
| 3 | 245.4 | 417.6 | 15.15 |
| 4 | 256.9 | 420.8 | 14.11 |
| 5 | 244.0 | 409.4 | 13.36 |
| 6 | 250.4 | 416.5 | 14.59 |
| 7 | 243.3 | 409.7 | 14.10 |

| Statistika | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek | 7 | 7 | 7 |
| Průměrná hodnota | 248.0 | 414.6 | 14.22 |
| Směrodatná odchylka | 4.8 | 4.2 | 0.60 |
| Minimální hodnota | 243.3 | 409.4 | 13.36 |
| Maximální hodnota | 256.9 | 420.8 | 15.15 |



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

Příloha 1.10: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 1 dni, směr válcování 90°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

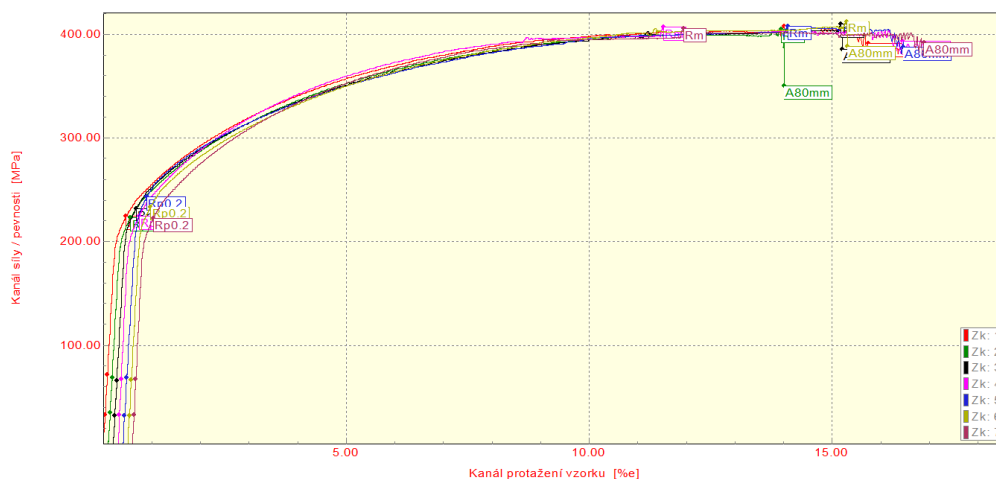
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : EN AW 2024 - T6
 Rozměry vzorku : [20x2] mm
 Směr odebrání vzorku : 90°
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
 Teplota : RT
 Vypracoval : Michaela Štípková
 Datum provedení testu : 6.3.2018

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Zkouška | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------|--------------|-----------|------------|
| 1 | 224.2 | 407.7 | 15.27 |
| 2 | 222.9 | 404.6 | 13.50 |
| 3 | 231.6 | 409.4 | 14.54 |
| 4 | 224.0 | 406.7 | 15.74 |
| 5 | 243.3 | 407.6 | 15.59 |
| 6 | 233.5 | 412.4 | 14.36 |
| 7 | 222.3 | 405.0 | 15.89 |

| Statistika | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek | 7 | 7 | 7 |
| Průměrná hodnota | 228.8 | 407.6 | 14.98 |
| Směrodatná odchylka | 7.8 | 2.7 | 0.88 |
| Minimální hodnota | 222.3 | 404.6 | 13.50 |
| Maximální hodnota | 243.3 | 412.4 | 15.89 |



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

Příloha 2.1: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 72 hod., směr válcování 0°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

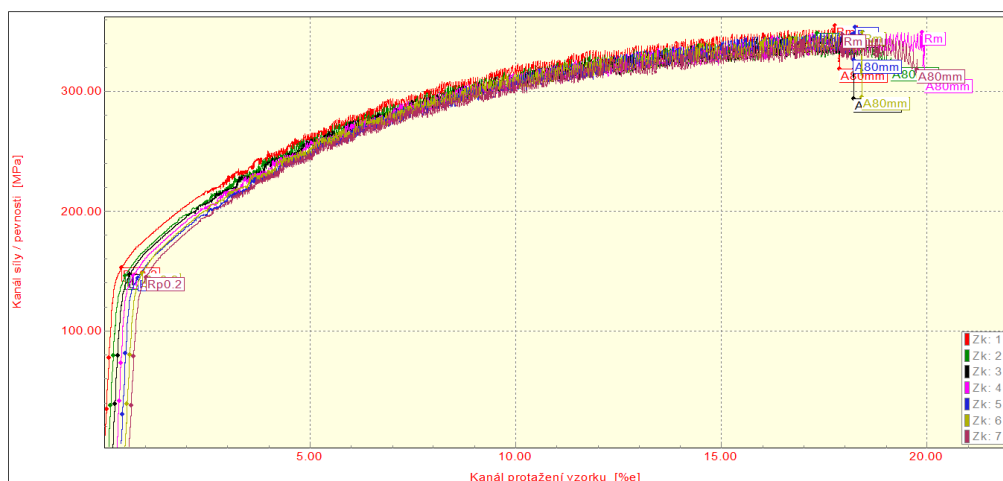
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : EN AW 2024 - T6
 Rozměry vzorku : [20x2] mm
 Směr odebrání vzorku : 0°
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
 Teplota : -15°C
 Vypracoval : Michaela Štípková
 Datum provedení testu : 26.3.2018

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Zkouška | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------|--------------|-----------|------------|
| 1 | 152.8 | 355.3 | 17.39 |
| 2 | 145.7 | 348.8 | 18.54 |
| 3 | 147.2 | 347.7 | 17.58 |
| 4 | 146.1 | 349.6 | 19.17 |
| 5 | 144.3 | 353.7 | 17.33 |
| 6 | 148.1 | 349.5 | 17.47 |
| 7 | 144.9 | 347.0 | 18.68 |

| Statistika | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek | 7 | 7 | 7 |
| Průměrná hodnota | 147.0 | 350.2 | 18.02 |
| Směrodatná odchylka | 2.9 | 3.1 | 0.75 |
| Minimální hodnota | 144.3 | 347.0 | 17.33 |
| Maximální hodnota | 152.8 | 355.3 | 19.17 |



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

Příloha 2.2: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 72 hod., směr válcování 90°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

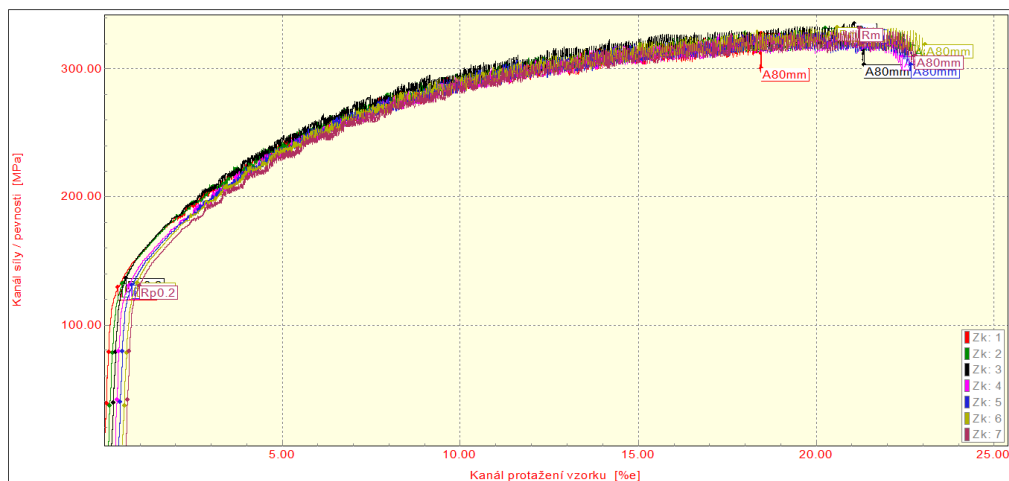
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : EN AW 2024 - T6
 Rozměry vzorku : [20x2] mm
 Směr odebrání vzorku : 90°
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
 Teplota : -15°C
 Vypracoval : Michaela Štípková
 Datum provedení testu : 26.3.2018

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Zkouška | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------|--------------|-----------|------------|
| 1 | 129.3 | 327.7 | 17.99 |
| 2 | 132.3 | 331.8 | 22.09 |
| 3 | 136.2 | 335.6 | 20.66 |
| 4 | 130.3 | 330.9 | 21.69 |
| 5 | 130.9 | 330.7 | 21.83 |
| 6 | 132.7 | 332.7 | 22.04 |
| 7 | 130.5 | 331.6 | 21.74 |

| Statistika | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek | 7 | 7 | 7 |
| Průměrná hodnota | 131.7 | 331.6 | 21.15 |
| Směrodatná odchylka | 2.3 | 2.4 | 1.47 |
| Minimální hodnota | 129.3 | 327.7 | 17.99 |
| Maximální hodnota | 136.2 | 335.6 | 22.09 |



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

Příloha 2.3: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 120 hod., směr válcování 0°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : EN AW 2024 - T6
 Rozměry vzorku : [20x2] mm
 Směr odebrání vzorku : 0°
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
 Teplota : -15°C
 Vypracoval : Michaela Štípková
 Datum provedení testu : 28.3.2018

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Zkouška | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------|--------------|-----------|------------|
| 1 | 144.3 | 351.6 | 15.13 |
| 2 | 143.7 | 355.6 | 17.46 |
| 3 | 141.2 | 349.0 | 17.43 |
| 4 | 140.4 | 350.5 | 18.39 |
| 5 | 141.8 | 352.9 | 18.55 |
| 6 | 140.8 | 348.3 | 17.58 |
| 7 | 141.3 | 350.4 | 17.88 |

| Statistika | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek | 7 | 7 | 7 |
| Průměrná hodnota | 141.9 | 351.2 | 17.49 |
| Směrodatná odchylka | 1.5 | 2.5 | 1.13 |
| Minimální hodnota | 140.4 | 348.3 | 15.13 |
| Maximální hodnota | 144.3 | 355.6 | 18.55 |



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

Příloha 2.4: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 120 hod., směr válcování 90°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

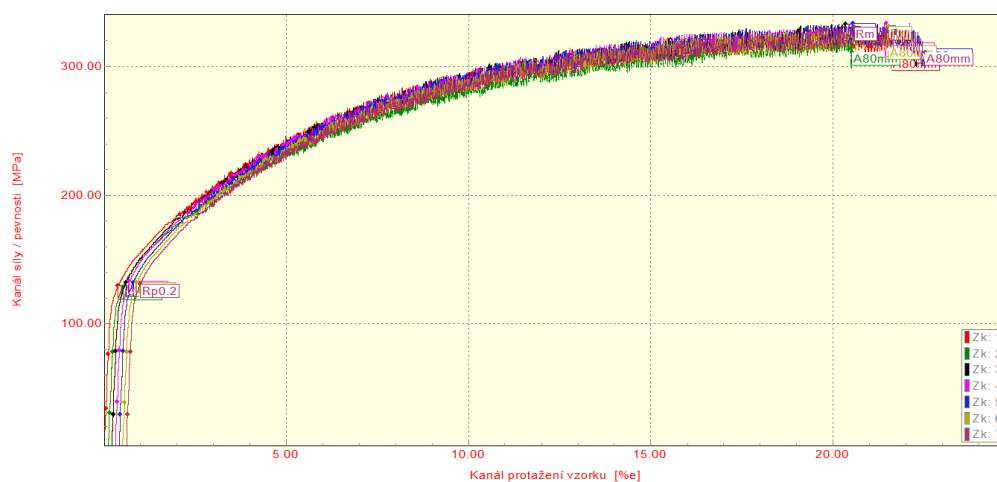
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : EN AW 2024 - T6
 Rozměry vzorku : [20x2] mm
 Směr odebrání vzorku : 90°
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
 Teplota : -15°C
 Vypracoval : Michaela Štípková
 Datum provedení testu : 28.3.2018

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Zkouška | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------|--------------|-----------|------------|
| 1 | 129.6 | 330.1 | 21.17 |
| 2 | 128.9 | 327.5 | 19.89 |
| 3 | 131.8 | 332.9 | 21.63 |
| 4 | 132.9 | 333.7 | 20.68 |
| 5 | 131.9 | 333.2 | 21.63 |
| 6 | 132.0 | 331.1 | 20.55 |
| 7 | 131.0 | 330.7 | 21.47 |

| Statistika | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek | 7 | 7 | 7 |
| Průměrná hodnota | 131.2 | 331.3 | 21.00 |
| Směrodatná odchylka | 1.4 | 2.2 | 0.66 |
| Minimální hodnota | 128.9 | 327.5 | 19.89 |
| Maximální hodnota | 132.9 | 333.7 | 21.63 |



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

Příloha 2.5: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 170 hod., směr válcování 0°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

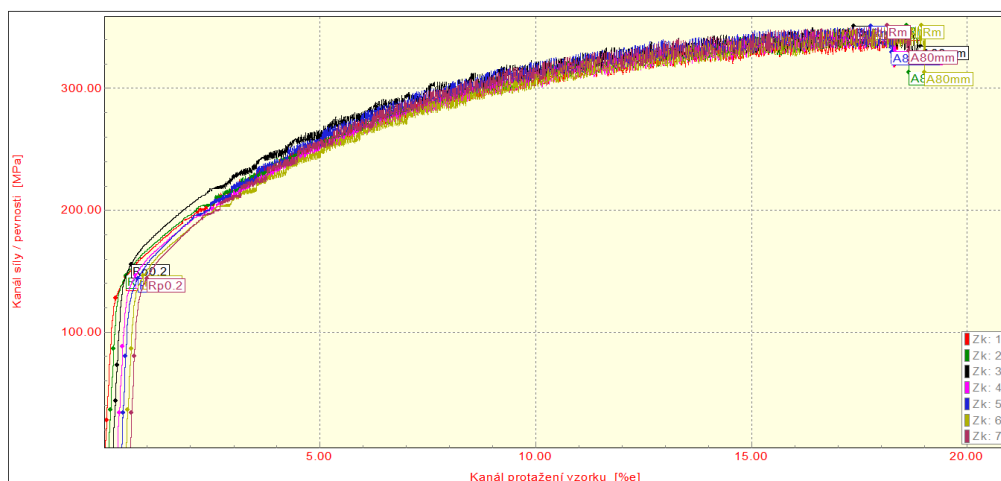
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : EN AW 2024 - T6
 Rozměry vzorku : [20x2] mm
 Směr odebrání vzorku : 0°
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
 Teplota : -15°C
 Vypracoval : Michaela Štípková
 Datum provedení testu : 30.3.2018

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Zkouška | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------|--------------|-----------|------------|
| 1 | 145.1 | 350.3 | 17.63 |
| 2 | 146.4 | 352.0 | 18.10 |
| 3 | 155.3 | 351.0 | 18.25 |
| 4 | 146.5 | 349.5 | 17.51 |
| 5 | 143.8 | 350.8 | 17.43 |
| 6 | 146.1 | 351.3 | 18.05 |
| 7 | 143.9 | 351.4 | 17.63 |

| Statistika | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek | 7 | 7 | 7 |
| Průměrná hodnota | 146.7 | 350.9 | 17.80 |
| Směrodatná odchylka | 3.9 | 0.8 | 0.32 |
| Minimální hodnota | 143.8 | 349.5 | 17.43 |
| Maximální hodnota | 155.3 | 352.0 | 18.25 |



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

Příloha 2.6: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 170 hod., směr válcování 90°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

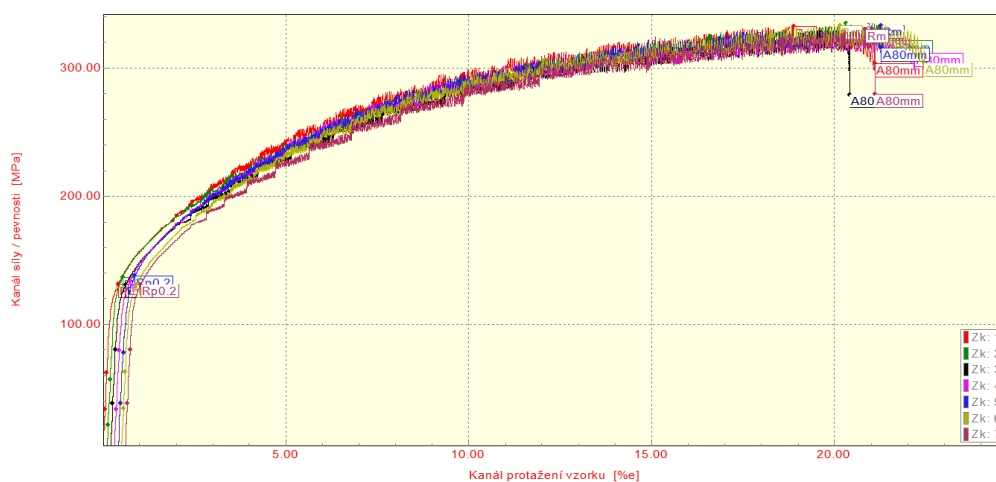
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : EN AW 2024 - T6
 Rozměry vzorku : [20x2] mm
 Směr odebrání vzorku : 90°
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
 Teplota : -15°C
 Vypracoval : Michaela Štípková
 Datum provedení testu : 30.3.2018

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Zkouška | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------|--------------|-----------|------------|
| 1 | 131.6 | 332.4 | 20.59 |
| 2 | 136.9 | 335.1 | 20.71 |
| 3 | 131.0 | 329.8 | 19.73 |
| 4 | 133.7 | 331.9 | 21.34 |
| 5 | 137.4 | 333.3 | 20.28 |
| 6 | 131.2 | 332.9 | 21.43 |
| 7 | 131.1 | 330.3 | 20.02 |

| Statistika | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek | 7 | 7 | 7 |
| Průměrná hodnota | 133.3 | 332.2 | 20.59 |
| Směrodatná odchylka | 2.8 | 1.8 | 0.64 |
| Minimální hodnota | 131.0 | 329.8 | 19.73 |
| Maximální hodnota | 137.4 | 335.1 | 21.43 |



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

Příloha 2.7: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 250 hod., směr válcování 0°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

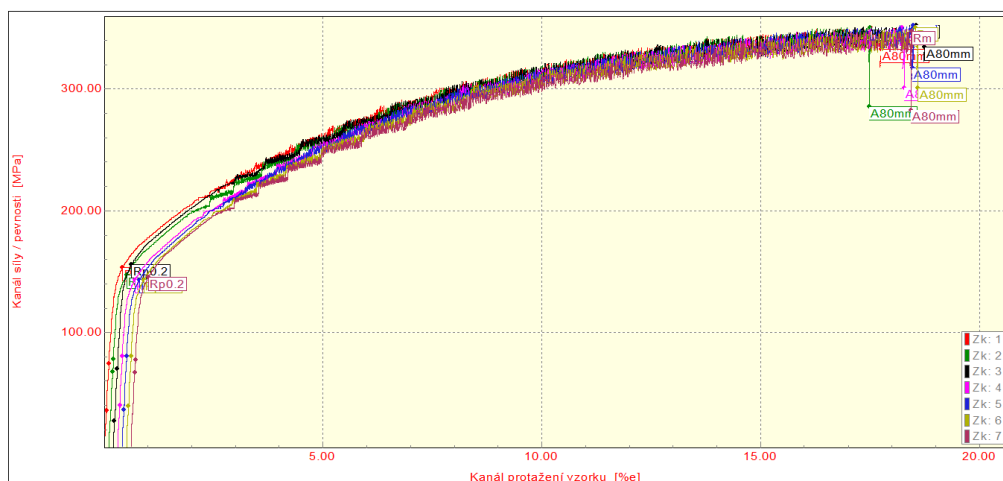
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : EN AW 2024 - T6
 Rozměry vzorku : [20x2] mm
 Směr odebrání vzorku : 0°
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
 Teplota : -15°C
 Vypracoval : Michaela Štípková
 Datum provedení testu : 2.4.2018

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Zkouška | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------|--------------|-----------|------------|
| 1 | 153.3 | 349.6 | 17.27 |
| 2 | 147.4 | 350.5 | 16.97 |
| 3 | 155.8 | 352.4 | 18.05 |
| 4 | 143.4 | 350.8 | 17.54 |
| 5 | 143.0 | 352.5 | 17.62 |
| 6 | 143.1 | 350.3 | 17.65 |
| 7 | 145.5 | 347.5 | 17.41 |

| Statistika | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek | 7 | 7 | 7 |
| Průměrná hodnota | 147.4 | 350.5 | 17.50 |
| Směrodatná odchylka | 5.2 | 1.7 | 0.34 |
| Minimální hodnota | 143.0 | 347.5 | 16.97 |
| Maximální hodnota | 155.8 | 352.5 | 18.05 |



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

Příloha 2.8: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 250 hod., směr válcování 90°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

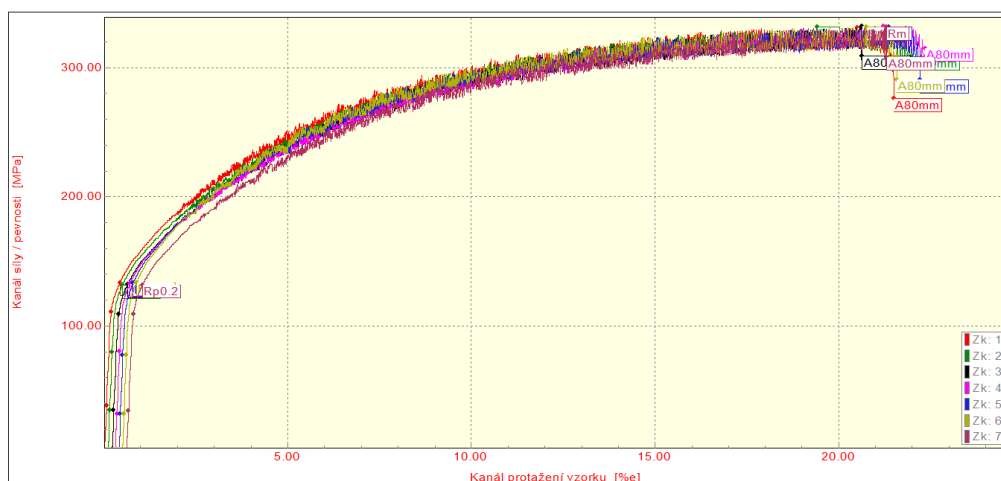
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : EN AW 2024 - T6
 Rozměry vzorku : [20x2] mm
 Směr odebrání vzorku : 90°
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
 Teplota : -15°C
 Vypracoval : Michaela Štípková
 Datum provedení testu : 2.4.2018

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Zkouška | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------|--------------|-----------|------------|
| 1 | 133.4 | 331.1 | 21.03 |
| 2 | 131.2 | 331.4 | 21.42 |
| 3 | 132.4 | 332.2 | 19.87 |
| 4 | 132.6 | 332.3 | 21.59 |
| 5 | 132.9 | 331.2 | 21.41 |
| 6 | 133.5 | 331.6 | 20.68 |
| 7 | 131.9 | 331.3 | 20.13 |

| Statistika | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek | 7 | 7 | 7 |
| Průměrná hodnota | 132.6 | 331.6 | 20.88 |
| Směrodatná odchylka | 0.8 | 0.5 | 0.67 |
| Minimální hodnota | 131.2 | 331.1 | 19.87 |
| Maximální hodnota | 133.5 | 332.3 | 21.59 |



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

Příloha 3.1: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 72 hod., směr válcování 0°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

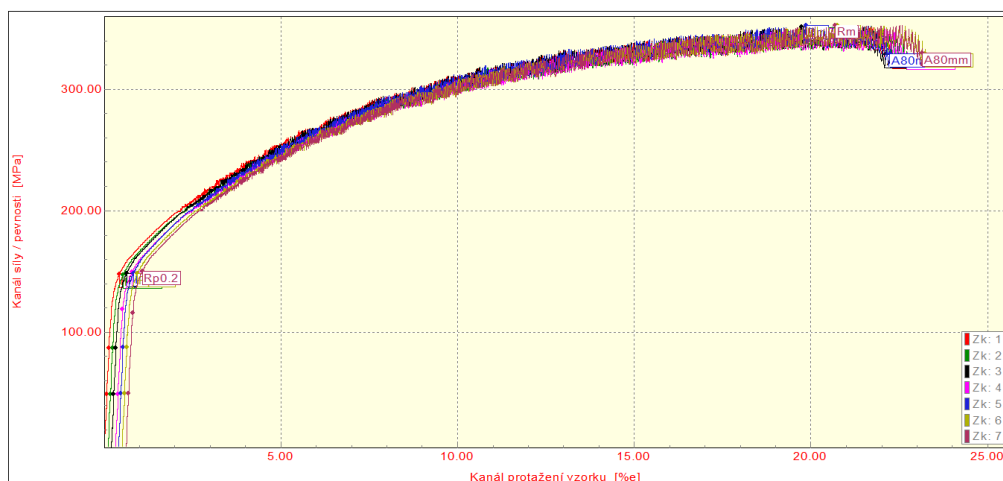
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : EN AW 2024 - T6
 Rozměry vzorku : [20x2] mm
 Směr odebrání vzorku : 0°
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
 Teplota : -25°C
 Vypracoval : Michaela Štípková
 Datum provedení testu : 16.4.2018

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Zkouška | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------|--------------|-----------|------------|
| 1 | 147.5 | 351.2 | 21.79 |
| 2 | 147.1 | 350.5 | 22.08 |
| 3 | 148.1 | 351.5 | 21.41 |
| 4 | 149.3 | 350.1 | 21.80 |
| 5 | 148.6 | 352.6 | 21.33 |
| 6 | 148.0 | 352.8 | 22.21 |
| 7 | 150.0 | 353.0 | 21.95 |

| Statistika | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek | 7 | 7 | 7 |
| Průměrná hodnota | 148.4 | 351.7 | 21.80 |
| Směrodatná odchylka | 1.0 | 1.1 | 0.33 |
| Minimální hodnota | 147.1 | 350.1 | 21.33 |
| Maximální hodnota | 150.0 | 353.0 | 22.21 |



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

Příloha 3.2: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 72 hod., směr válcování 90°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

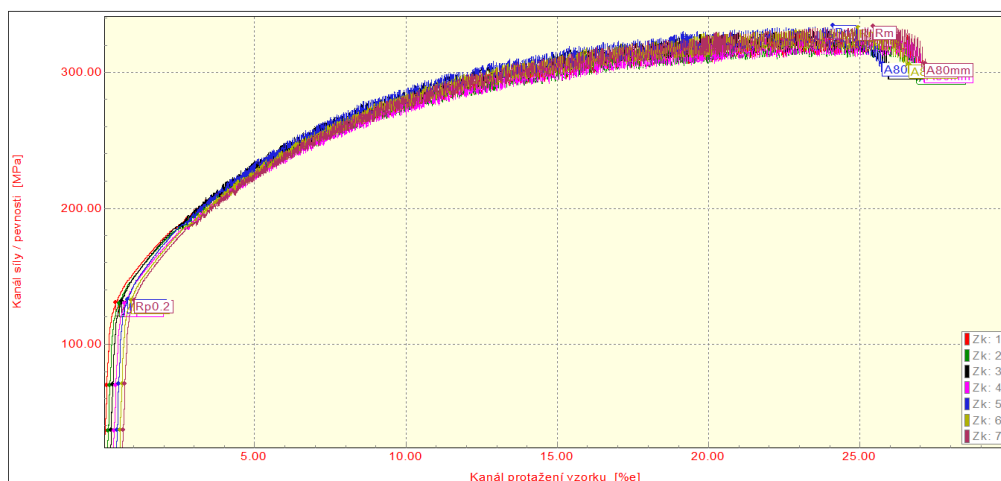
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : EN AW 2024 - T6
 Rozměry vzorku : [20x2] mm
 Směr odebrání vzorku : 90°
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
 Teplota : -25°C
 Vypracoval : Michaela Štípková
 Datum provedení testu : 16.4.2018

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Zkouška | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------|--------------|-----------|------------|
| 1 | 130.4 | 330.0 | 26.65 |
| 2 | 130.0 | 328.4 | 26.29 |
| 3 | 131.8 | 332.1 | 25.27 |
| 4 | 130.1 | 328.8 | 26.34 |
| 5 | 133.1 | 334.3 | 24.88 |
| 6 | 132.1 | 333.0 | 25.65 |
| 7 | 132.4 | 334.0 | 26.06 |

| Statistika | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek | 7 | 7 | 7 |
| Průměrná hodnota | 131.4 | 331.5 | 25.88 |
| Směrodatná odchylka | 1.2 | 2.5 | 0.64 |
| Minimální hodnota | 130.0 | 328.4 | 24.88 |
| Maximální hodnota | 133.1 | 334.3 | 26.65 |



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

Příloha 3.3: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 120 hod., směr válcování 0°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

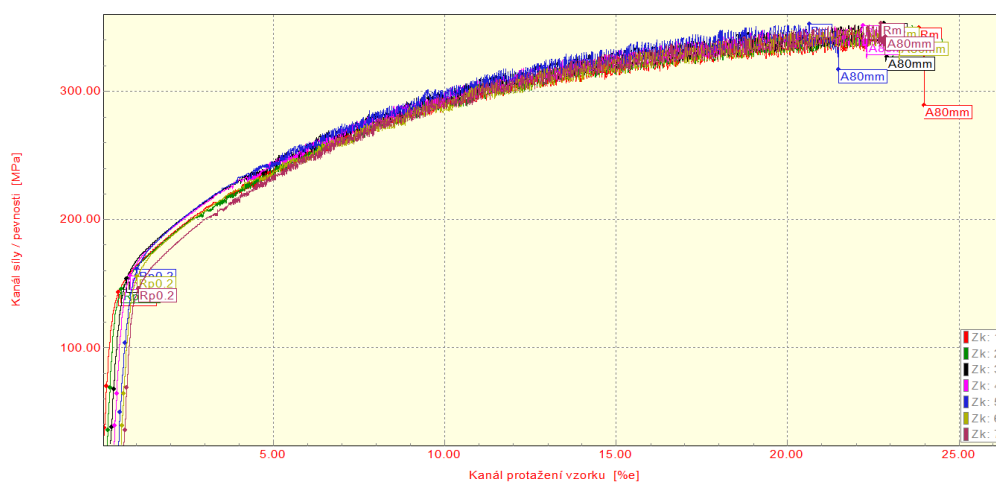
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : EN AW 2024 - T6
 Rozměry vzorku : [20x2] mm
 Směr odebrání vzorku : 0°
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
 Teplota : -25°C
 Vypracoval : Michaela Štípková
 Datum provedení testu : 18.4.2018

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Zkouška | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------|--------------|-----------|------------|
| 1 | 142.9 | 349.6 | 23.43 |
| 2 | 145.0 | 351.7 | 22.35 |
| 3 | 153.4 | 352.9 | 22.03 |
| 4 | 155.9 | 350.9 | 21.34 |
| 5 | 161.2 | 352.5 | 20.26 |
| 6 | 155.1 | 350.2 | 22.07 |
| 7 | 146.0 | 353.0 | 21.63 |

| Statistika | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek | 7 | 7 | 7 |
| Průměrná hodnota | 151.4 | 351.5 | 21.87 |
| Směrodatná odchylka | 6.8 | 1.4 | 0.97 |
| Minimální hodnota | 142.9 | 349.6 | 20.26 |
| Maximální hodnota | 161.2 | 353.0 | 23.43 |



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

Příloha 3.4: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 120 hod., směr válcování 90°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

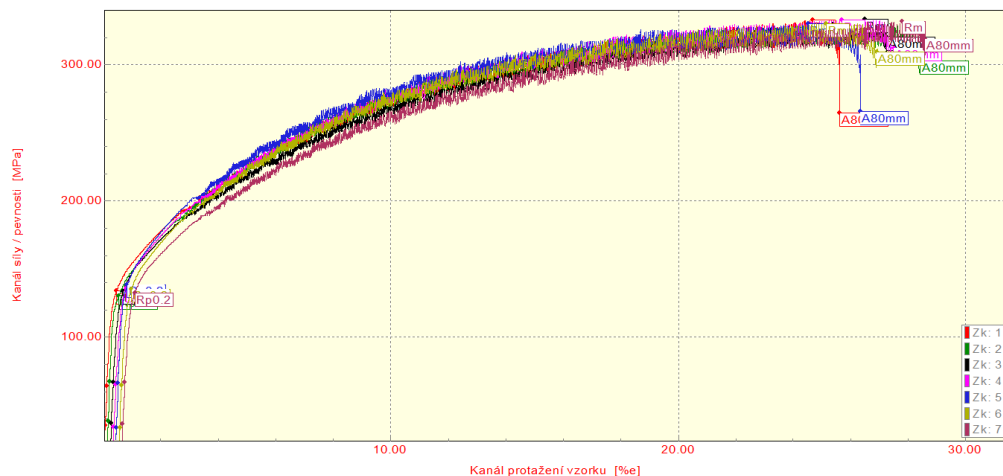
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : EN AW 2024 - T6
 Rozměry vzorku : [20x2] mm
 Směr odebrání vzorku : 90°
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
 Teplota : -25°C
 Vypracoval : Michaela Štípková
 Datum provedení testu : 18.4.2018

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Zkouška | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------|--------------|-----------|------------|
| 1 | 134.1 | 332.8 | 25.10 |
| 2 | 130.1 | 330.6 | 27.80 |
| 3 | 133.7 | 333.5 | 26.38 |
| 4 | 135.8 | 332.8 | 26.55 |
| 5 | 138.6 | 330.1 | 25.49 |
| 6 | 135.4 | 330.1 | 25.78 |
| 7 | 132.4 | 332.2 | 27.29 |

| Statistika | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek | 7 | 7 | 7 |
| Průměrná hodnota | 134.3 | 331.7 | 26.34 |
| Směrodatná odchylka | 2.7 | 1.4 | 0.97 |
| Minimální hodnota | 130.1 | 330.1 | 25.10 |
| Maximální hodnota | 138.6 | 333.5 | 27.80 |



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

Příloha 3.5: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 250 hod., směr válcování 0°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

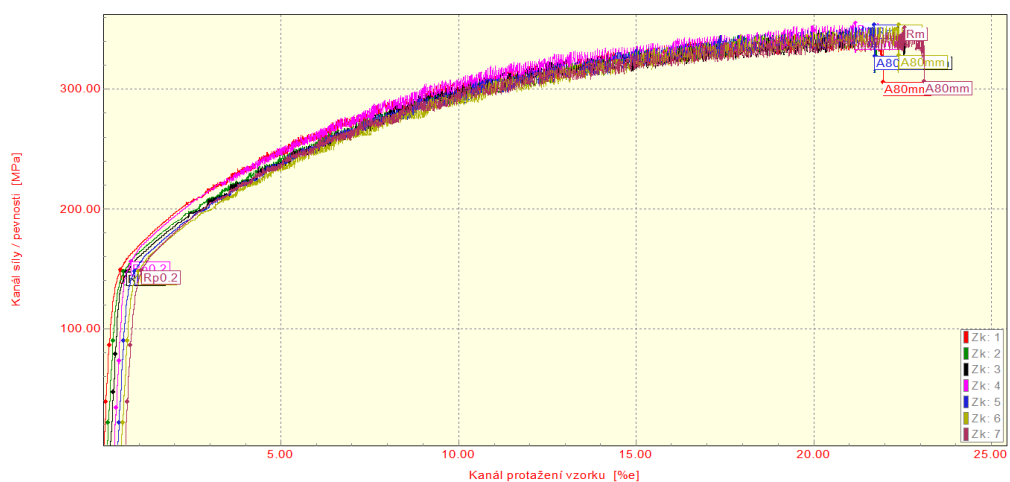
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : EN AW 2024 - T6
 Rozměry vzorku : [20x2] mm
 Směr odebrání vzorku : 0°
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
 Teplota : -25°C
 Vypracoval : Michaela Štípková
 Datum provedení testu : 23.4.2018

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Zkouška | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------|--------------|-----------|------------|
| 1 | 148.9 | 351.0 | 21.38 |
| 2 | 147.4 | 353.5 | 21.03 |
| 3 | 146.9 | 351.6 | 21.77 |
| 4 | 156.0 | 355.4 | 20.26 |
| 5 | 147.7 | 353.8 | 20.71 |
| 6 | 147.6 | 354.0 | 21.27 |
| 7 | 148.6 | 351.3 | 21.93 |

| Statistika | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek | 7 | 7 | 7 |
| Průměrná hodnota | 149.0 | 352.9 | 21.19 |
| Směrodatná odchylka | 3.2 | 1.6 | 0.58 |
| Minimální hodnota | 146.9 | 351.0 | 20.26 |
| Maximální hodnota | 156.0 | 355.4 | 21.93 |



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

Příloha 3.6: Protokol ze statických zkoušek tahem – po 250 hod., směr válcování 90°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

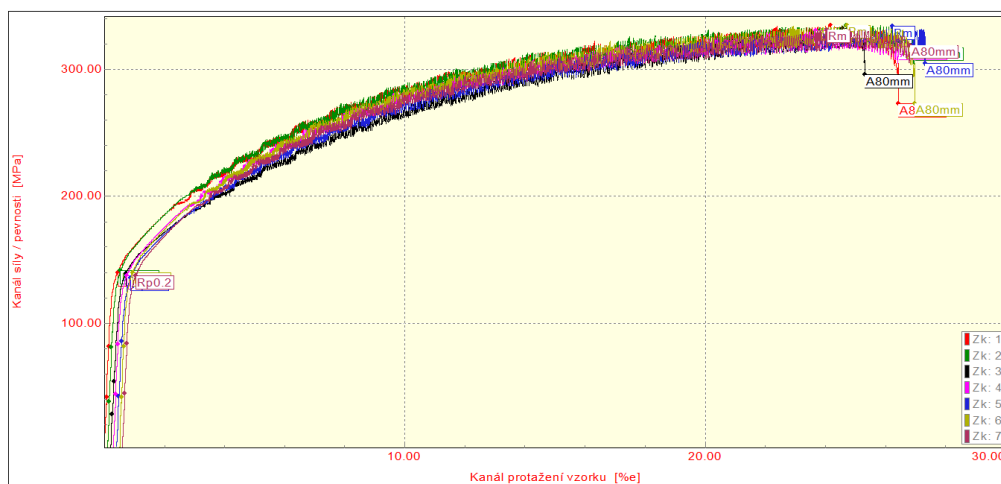
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : EN AW 2024 - T6
 Rozměry vzorku : [20x2] mm
 Směr odebrání vzorku : 90°
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
 Teplota : -25°C
 Vypracoval : Michaela Štípková
 Datum provedení testu : 23.4.2018

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Zkouška | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------|--------------|-----------|------------|
| 1 | 139.7 | 334.5 | 25.97 |
| 2 | 141.6 | 334.6 | 26.34 |
| 3 | 139.4 | 332.3 | 24.44 |
| 4 | 137.2 | 330.4 | 25.58 |
| 5 | 136.1 | 333.7 | 26.32 |
| 6 | 139.8 | 334.9 | 26.01 |
| 7 | 137.3 | 331.1 | 25.66 |

| Statistika | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------------|--------------|-----------|------------|
| Počet zkoušek | 7 | 7 | 7 |
| Průměrná hodnota | 138.7 | 333.1 | 25.76 |
| Směrodatná odchylka | 1.9 | 1.8 | 0.65 |
| Minimální hodnota | 136.1 | 330.4 | 24.44 |
| Maximální hodnota | 141.6 | 334.9 | 26.34 |



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