



# Posouzení vlivu podmínek vytvrzování na mechanické vlastnosti slitiny AW 7022

## Bakalářská práce

*Studijní program:*

B2301 Strojní inženýrství

*Studijní obor:*

Strojní inženýrství

*Autor práce:*

**Lukáš Břeň**

*Vedoucí práce:*

Ing. Iva Nováková, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

*Konzultant práce:*

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie





## Zadání bakalářské práce

# Posouzení vlivu podmínek vytvrzování na mechanické vlastnosti slitiny AW 7022

*Jméno a příjmení:* **Lukáš Břeň**  
*Osobní číslo:* S18000019  
*Studijní program:* B2301 Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* Strojní inženýrství  
*Zadávací katedra:* Katedra strojírenské technologie  
*Akademický rok:* **2021/2022**

### Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se slitinami hliníku používanými v průmyslové praxi, zaměřte se zejména na slitiny řady AW 7XXX .
2. Prostudujte možnosti tepelného zpracování slitin hliníku za účelem zvýšení jejich mechanických vlastností.
3. Navrhněte a proveďte experimenty zaměřené na posouzení vlivu podmínek vytvrzování na mechanické vlastnosti.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky a formulujte dílčí závěry.

Rozsah grafických prací:  
Rozsah pracovní zprávy:  
Forma zpracování práce:  
Jazyk práce:

obrázky, tabulky, grafy  
cca 30 stran textu  
tištěná/elektronická  
Čeština



### Seznam odborné literatury:

- [1] MICHNA, Š. et al. *Encyklopedie hliníku*. 1. vyd., Prešov 2005.
- [2] ROUČKA, J. *Metalurgie neželezných kovů* [skripta]. Akademické nakladatelství Cerm, Brno, 2004.
- [3] PTÁČEK, L. et al. *Nauka o materiálu I*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. s. 516. ISBN 80-7204-283-1.
- [4] PTÁČEK, L. et al. *Nauka o materiálu II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1999. s. 350. ISBN 80-7204-130-4.
- [5] ASM HANDBOOK. *Volume 8 – Mechanical Testing and Evaluation*. 10th ed. Materials Park: ASM International, 2000. s. 998. ISBN 0-87170-389-0.
- [6] Mezinárodní normy.

*Vedoucí práce:*

Ing. Iva Nováková, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie

*Konzultant práce:*

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie

*Datum zadání práce:*

30. listopadu 2021

*Předpokládaný termín odevzdání:*

30. května 2023

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan

L.S.

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

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, 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 nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

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

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

27. června 2022

Lukáš Břeň

## **Abstrakt**

Tématem této bakalářské práce je posouzení vlivu podmínek vytvrzování na mechanické vlastnosti slitiny EN AW-7022. Hliníkové slitiny jsou často používané jako konstrukční materiál, protože mají dobrou kombinaci vlastností, jako jsou nízká měrná hmotnost, dobré mechanické vlastnosti, odolnost vůči korozi. Nejčastěji jsou dodávány ve stavech T6xx. Pokud jsou během dalšího zpracování vystaveny teplotním cyklům, např.: při svařování, dochází k poklesu mechanických vlastností. Cílem této práce je nalézt vhodné parametry tepelného zpracování pro obnovu mechanických vlastností nebo jejich zvýšení na co nejvyšší hodnoty.

Práce je rozdělena na teoretickou a experimentální část. Teoretická část popisuje rozdělení a vlastnosti hliníkových slitin, možnosti tepelného zpracování a doporučená tepelná zpracování pro vytvrditelnou slitinu EN AW-7022.

V experimentální části jsou popsány vlastnosti slitiny ve výchozím stavu. Následně je popsán vliv rozpouštěcího žíhání na vlastnosti slitiny. Sledoval se vliv teploty a doby výdrže rozpouštěcího žíhání. Další experimenty byly zaměřeny na vliv přirozeného a umělého stárnutí na mechanické vlastnosti slitiny. Mechanické vlastnosti byly zjištěny měřením tvrdosti dle Brinella a statickou zkouškou tahem.

## **Klíčová slova**

slitina EN AW-7022, tepelné zpracování, vytvrzování, mechanické vlastnosti, měření tvrdosti

## **Abstract**

The topic of this bachelor thesis is the assessment of the effects of hardening conditions on the mechanical properties of EN AW-7022 alloy. Aluminum alloys are often used as a construction material because they have a good combination of properties such as low density, good mechanical properties, corrosion resistance. They are most often delivered in T6xx states. If during the next manufacturing they are exposed to thermal cycles, eg: welding, there will be decrease of mechanical properties. The aim of this thesis is to find the parameters of heat treatment to restore or increase the mechanical properties.

The thesis is divided into theoretical and experimental part. The theoretical part describes the partition and properties of aluminum alloys, methods of heat treatment and recommended heat treatments for hardenable alloy EN AW-7022.

The experimental part describes the properties of the alloy in the initial state. After that is described the influence of solution annealing on the alloy. Monitored was the influence of temperature and time duration of solution annealing. Further experiments were focused on the influence of natural and artificial aging on the mechanical properties of alloy. Mechanical properties were evaluated by Brinell hardness measurement and static tensile testing.

## **Key words**

alloy EN AW-7022, heat treatment, hardening, mechanical properties, hardness measurement

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucí mé bakalářské práce paní Ing. Ivě Novákové, Ph.D. za odborné vedení, ochotu, trpělivost, poskytnuté materiály a věcné připomínky při zpracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině, která mě podporovala během celého studia.

## Obsah

Seznam zkratk a symbolů .....	9
1. Úvod .....	10
2. Teoretická část .....	11
2.1 Hliník a jeho slitiny .....	11
2.2 Hliníkové slitiny určené pro tváření .....	12
2.3 Tepelné zpracování hliníkových slitin .....	14
2.3.1 Tepelné zpracování slitiny AW 7022 .....	19
3. Experimentální část .....	20
3.1 Charakteristika základního materiálu .....	20
3.2 Tepelné zpracování .....	26
3.2.1 Vliv rozpouštěcího žíhání .....	27
3.2.2 Vliv přirozeného stárnutí .....	29
3.2.3 Vliv umělého stárnutí .....	30
4. Diskuze výsledků .....	34
5. Závěr .....	43
Použitá literatura .....	44



## Seznam zkratk a symbolů

$A_{40mm}$	celková tažnost v procentech měřené délky 40 mm	[%]
$A_g$	homogenní tažnost	[%]
$E$	modul pružnosti v tahu	[MPa]
$L_0$	počáteční délka vzorku	[mm]
$L_c$	zkoušená délka	[mm]
$L_t$	celková délka vzorku	[mm]
$R_m$	mez pevnosti v tahu	[MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu	[MPa]
$S_0$	počáteční plocha na měřeném průměru vzorku	[mm <sup>2</sup> ]
$d_0$	počáteční průměr vzorku	[mm]
$\alpha$	tuhý roztok	
BSE	detektor zpětně odražených elektronů	
EDX	energie-disperzní analýza	
HB	tvrdost dle Brinella	
RŽ	rozpouštěcí žihání	
TOO	tepelně ovlivněná oblast	
TZ	tepelné zpracování	

## 1. Úvod

V dnešní době je v řadě oborů vyžadováno snižování hmotnosti výrobků při zachování jejich stávajících vlastností. Pomocí moderních simulačních programů jsme schopni velmi přesně analyzovat možné zatížení a tím pádem navrhnout díl přesně na míru bez nutnosti naddimenzování. V řadě případů to umožňuje použití menšího množství stávajícího materiálu, ale i použití zcela jiného. Například materiálu, jehož hustota je výrazně nižší než u běžných konstrukčních ocelí, ale jeho pevnostní parametry jsou dostatečné na použití v daném případě. Takovýmto materiálem může být například hliníková slitina.

Hliník a jeho slitiny našel uplatnění v mnoha oblastech především kvůli jeho nízké hustotě a výborné elektrické vodivosti. Během dlouhé řady let byla vyvinuta řada hliníkových slitin především proto, aby se zvýšily jejich mechanické vlastnosti. Mezi laiky jsou z tohoto pohledu známé tzv. duraly, což v latině znamená tvrdý hliník. Duralové slitiny mají násobně lepší mechanické vlastnosti než čistý hliník, ale některé slitiny z řady 7000 dosahují ještě o něco vyšších hodnot.

Hliníkové slitiny řady 7000 náleží do skupiny tepelně vytvrditelných slitin s možností svařování. V rámci hliníkových slitin patří mezi ty s nejvyššími hodnotami mechanických vlastností, proto jsou používány jako konstrukční materiály v automobilovém a vesmírném průmyslu. Polotovary jsou většinou dodávány ve vytvrzeném stavu, kdy vlivem tepelného působení může dojít k výraznému poklesu mechanických vlastností. Kromě umělého stárnutí se tyto slitiny vytvrzují samovolně (přirozeně), což umožňuje jejich použití u svařovaných konstrukcí i v případě, že už u takové konstrukce nelze znovu provést tepelné zpracování.

Cílem této bakalářské práce je najít pro slitinu EN AW-7022 vhodný postup tepelného zpracování, který zajistí obnovu mechanických vlastností materiálu v případě, že původní mechanické vlastnosti v důsledku technologického zpracování ztratí.

## 2. Teoretická část

Vzhledem k tématu bakalářské práce jsou v teoretické části popsány vlastnosti hliníku a jeho slitin, a především tepelné zpracování vytvrditelných slitin hliníku.

### 2.1 Hliník a jeho slitiny

Hliník je lesklý, lehký a neželezný kov šedostříbrné barvy, jehož využití je dáno zejména jeho fyzikálními vlastnostmi, mezi které patří hlavně tepelná a elektrická vodivost, dále to jsou dobré chemické a technologické vlastnosti, především výborná tvářitelnost za tepla i za studena a také možnost svařování. Díky těmto vlastnostem je využíván v mnoha oborech, přesto se ale vzhledem k nízkým mechanickým vlastnostem v praxi přednostně využívají jeho slitiny [1].

**Tab. 2.1** Vybrané vlastnosti hliníku [1,2]

Vlastnost	Hodnota
Hustota	2 700 kg.m <sup>-3</sup>
Teplota tání	660 °C
Teplota vypařování	2 520 °C
Tepelná vodivost	247 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> (při 25 °C)
Mřížková konstanta	a = 4,05.10 <sup>-10</sup> m
Atomové číslo	13
Atomová hmotnost	26,98

Slitiny vznikají úmyslným přidáním legujících prvků do základního materiálu (v tomto případě hliníku). Účelem těchto prvků bývá především zlepšit mechanické vlastnosti. Legující prvky se rozdělují na hlavní přísadové a vedlejší přísadové prvky. Hlavní přísadové prvky mají ve slitině většinou druhý nejvyšší podíl a jsou rozhodující pro určení vlastností slitiny. U hliníkových slitin to jsou měď, křemík, hořčík, zinek a mangan. Vedlejší přísadové prvky ovlivňují pouze některé vlastnosti slitiny. Např.: zlepšují obrobiteľnost, ovlivňují strukturu nebo kompenzují nepříznivý účinek, některých doprovodných prvků. Doprovodné prvky jsou ty prvky, které nebyly do slitiny přidány záměrně [2].

Ve slitinách hliníku **křemík** zlepšuje slévárenské vlastnosti (zvyšuje zabíhavost, zmenšuje součinitel smrštění při tuhnutí a snižuje nebezpečí vzniku trhlin a prasklin) [2].

**Měď** zvyšuje pevnost a tvrdost. Také dost výrazně zlepšuje obrobiteľnost (krátká tříška a hladký povrch). Naopak zhoršuje odolnost proti korozi a tvárnost. Umožňuje vytvrzování hliníkových slitin [2].

**Hořčík** zlepšuje odolnost proti korozi a podmínky pro tepelné zpracování [2].

**Mangan** zvyšuje pevnost a tvárnost, dále zlepšuje odolnost proti korozi. Do slitin hliníku se přidává hlavně kvůli kompenzaci vlivu železa, které při vyšším obsahu snižuje obrobiteľnosť a odolnosť vůči korozi [2].

**Nikl** se využívá u slévárenských slitin, protože snižuje součinitel teplotní roztažnosti a slitina si zároveň uchovává dobré mechanické vlastnosti [2].

**Zinek** se používá pro zvýšení pevnostních vlastností slitin, zlepšuje zabíhavost a obrobiteľnosť. Slitiny hliníku s touto legurou ale mají menší odolnost proti korozi a sníženou houževnatost [2].

**Chrom** zlepšuje vytvrditelnost hliníkových slitin, které je možno vytvrzovat [2].

Obecně lze slitiny hliníku rozdělit na slitiny určené k tváření a ke slévání. Slitiny určené k tváření obvykle mají nižší obsah přísadových prvků. Při teplotách určených k tváření mají dobré plastické vlastnosti, protože obsahují pouze homogenní tuhý roztok. Podle tvářecích teplot se ještě rozdělují na slitiny určené k tváření za tepla a za studena. Slévárenské slitiny mají naopak vyšší podíl přísadových prvků. Obvykle tyto slitiny mají větší pevnost a tvrdost, ale nižší plastické vlastnosti. Mezi důležité slévárenské vlastnosti patří zabíhavost, sklon ke vzniku staženin a sklon k naplynění. Slévárenské slitiny jsou určeny normou ČSN EN 1706. Další rozdělení slitin hliníku je dle toho, zda je slitina vytvrditelná či nikoliv [2].

## 2.2 Hliníkové slitiny určené pro tváření

Slitiny jsou dle normy ČSN EN 573-1 až 3 rozděleny do 8 skupin, viz tab. 2.2 a označovány písmeny EN AW a čtyřmi číslicemi. Číselné označení lze doplnit i chemickým označením. Předpona EN následována mezerou, písmeno A určuje hliník, W tvářené výrobky, spojovací čárka a čtyři číslice označující chemické složení, např.: EN AW-7022 [11,12].

**Tab. 2.2** Rozdělení slitin hliníku k tváření [11]

Označení řady slitin	Slitiny na bázi
řada 1000	technicky čistý hliník
řada 2000*	AlCu
řada 3000	AlMn
řada 4000	AlSi
řada 5000	AlMg
řada 6000*	AlMgSi
řada 7000*	AlZn
řada 8000	různé

řady označené hvězdičkou lze vytvrzovat [4]

Další možností je použít chemické značení, kdy místo čtyřčíslí jsou vypsány legující prvky podle podílu ve slitině s číslem vyjadřující jejich procentuální podíl, např.: EN AW – Al Zn5Mg3Cu [12].

**Řada 1000** v principu není hliníkovou slitinou, protože se jedná o hliník s minimální čistotou 99 %. Využívá se především pro v elektrotechnickém a potravinářském průmyslu [1]. Jeho hlavními vlastnostmi jsou skvělá tvářitelnost, výborná odolnost vůči korozi a nízké mechanické vlastnosti, které lze zlepšit vytvrzením [10].

**Řada 2000** jsou slitiny hliníku, kde je hlavním legujícím prvkem měď a sekundárním hořčík. Tyto slitiny mají nízkou odolnost vůči korozi a mohou být citlivé na interkrystalickou korozi. Po tepelném zpracování u nich lze dosáhnout vysokých hodnot mechanických vlastností ve srovnání s dalšími vytvrditelnými hliníkovými slitinami [1,2].

**Řada 3000** jsou slitiny hliníku s manganem. Tyto slitiny nelze tepelně zpracovávat, takže mechanické vlastnosti jsou asi jenom o 20 % vyšší než u řady 1000. Z technických důvodů je možno hliník legovat manganem pouze do obsahu 1,5 % [1]. Používá se jako materiál pro nápojové plechovky, kanystry nebo dopravní značky [10].

**Řada 4000** jsou slitiny hliníku s křemíkem. Většina těchto slitin není tepelně zpracovatelná. Obsah křemíku může být až 12 %, přidává se kvůli snížení bodu tání bez výrazného vlivu na křehkost. Z těchto důvodů se slitiny této řady používají především jako přídavné a pájecí materiály. Jako přídavný materiál při svařování vytvrditelných slitin může tepelně ovlivněná oblast po smíchání vykazovat známky vytvrzení [1,10].

**Řada 5000** je legována hořčíkem, který má na substituční zpevnění vyšší vliv než mangan. Asi 0,8 % hořčíku má stejný účinek jako 1,25 % manganu. Slitiny této řady mají dobrou odolnost vůči korozi v mořském prostředí. Z tohoto důvodu nacházejí uplatnění v loďařství a dále se používají jako dekorativní materiály v architektuře nebo také jako materiál pro výrobu nápojových plechovek [1,2].

**Řada 6000** jako jediná obsahuje dva hlavní legující prvky, a to hořčík a křemík. Tyto slitiny jsou vytvrditelné díky přítomnosti intermetalické fáze  $Mg_2Si$ . Tato vytvrditelná fáze určuje, že mezi hlavní vlastnosti těchto slitin patří výborné mechanické vlastnosti. Dále mají tyto slitiny výbornou tvářitelnost, svařitelnost, odolnost vůči korozi. Používají se především v dopravním průmyslu, jako materiál pro komponenty dopravních prostředků, a také v segmentech mostních konstrukcí atd. [1,10].

V **řadě 7000** je hlavním přísadovým prvkem zinek s podílem 1 až 8 %. Slitiny, kde se jako vedlejší prvek používá hořčík, dosahují nejvyšších pevnostních vlastností ze všech hliníkových slitin. Další přísadové prvky jsou obvykle měď a chrom. Při snaze dosáhnout, co nejvyšších pevnostních vlastností mají tyto slitiny špatnou odolnost vůči korozi. Tepelným zpracováním (přestárnutím), lze navýšit korozní odolnost, ale dojde ke snížení pevnostních hodnot. Používají se v letectví a přenosných konstrukcích [1,10].

Vzhledem k tomu, že v rámci experimentální části práce bude využíván materiál EN AW-7022, jsou níže popsány vlastnosti této slitiny.

Slitina **EN AW-7022** se používá především pro výrobu rámu jízdních kol a motocyklů, lehkých přenosných konstrukcí jako jsou například pódia a hlediště, dále sportovních zařízení nebo vstřikovacích forem pro plasty [3]. Tato slitina má nízkou odolnost proti korozi, není vhodná k tváření za studena a je vhodná pro eloxování a nátěry [11]. Její chemické složení dle normy je uvedeno v tab. 2.3. V tab. 2.4 jsou dále uvedeny mechanické vlastnosti této slitiny dodané ve stavu T6 a T651.

**Tab. 2.3** Chemické složení EN AW-7022 [13]

Prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr+Ti
hmot. %	≤ 0,5 %	≤ 0,5 %	≥ 0,5 % ≤ 1 %	≥ 0,1 % ≤ 0,4 %	≥ 2,6 % ≤ 3,7 %	≥ 0,1 % ≤ 0,3 %	≥ 4,3 % ≤ 5,2 %	≤ 0,2 %

**Tab. 2.4** Minimální mechanické vlastnosti EN AW-7022 po tepelném zpracování [7]

Stav materiálu	Tloušťka materiálu [mm]	Mez pevnosti v tahu ( $R_m$ )	Smluvní mez kluzu ( $R_{p0,2}$ )	Tažnost (A)	Tvrdość dle Brinella (HB)
T6	3 - 50	450 MPa	370 MPa	7%	133
	50 - 100	430 MPa	350 MPa	5%	127
	100 - 200	410 MPa	330 MPa	3%	121
T651	3 - 50	450 MPa	370 MPa	7%	133
	50 - 100	430 MPa	350 MPa	5%	127
	100 - 200	410 MPa	330 MPa	3%	121

## 2.3 Tepelné zpracování hliníkových slitin

Tepelné zpracování hliníkových slitin lze rozdělit do dvou skupin: **žihání** a **vytvrzování**. Žihání rozdělujeme na několik druhů: rekrytalizační žihání, žihání s částečnou rekrytalizací, stabilizační žihání, žihání ke snížení vnitřního pnutí a homogenizační žihání. Délka doby žihání závisí na chemickém složení slitiny a její struktuře. Žihání je časově náročné.

**Rekrytalizační žihání** se používá ke zpracování za studena tvářeného kovu, kdy dojde k tomu, že se z deformované struktury vznikne nová rekrytalizovaná struktura. Tím pádem dojde ke změnám vlastností: sníží se pevnost a zvýší se vlastnosti pro plastické deformace. Běžně se používají teploty od 250 °C do 500 °C, kdy závisí na velikosti už provedené deformace (čím vyšší deformace tím klesá teplota rekrytalizace a velikost zrn) a na čistotě hliníku. Nevytvrditelné slitiny se mohou ochlazovat na vzduchu, zatímco

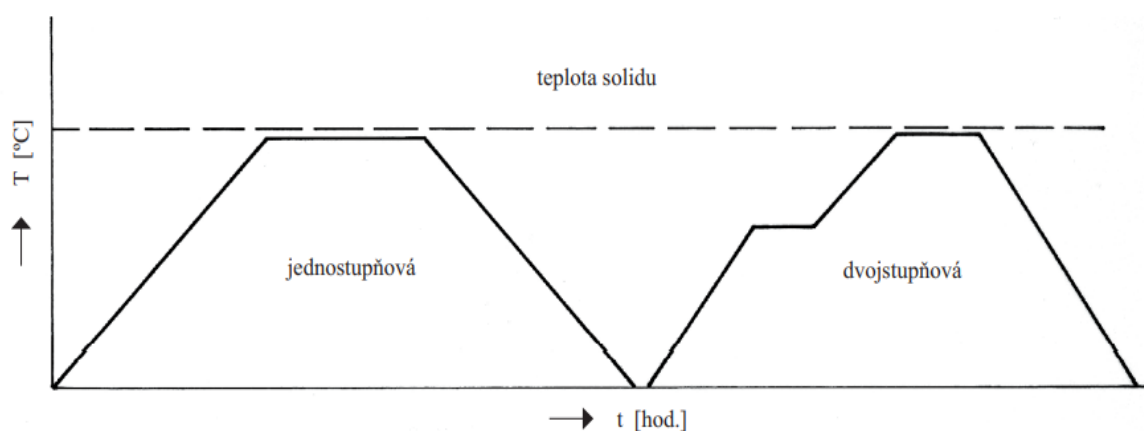
vytvrditelné slitiny je třeba ochlazovat pomaleji, protože při ochlazování na vzduchu by mohlo dojít k částečnému přesycení tuhého roztoku (zvýšení pevnostních parametrů) [1].

**Žihání s částečnou rekrytalizací** se provádí ve stejném rozsahu teplot jako rekrytalizační žihání (250 až 500 °C), ale volí se kratší čas, aby došlo ke vzniku pouze částečně rekrytalizované struktury [1].

**Stabilizační žihání** se používá za účelem stabilizace struktury, mechanických, fyzikálních, chemických vlastností a rozměrů výrobků. K tomuto způsobu tepelného zpracování se přistupuje, pokud má být slitina použita v prostředí se zvýšenou teplotou nebo by v provozu docházelo k jejímu ohřevu (např.: tření). Provádí se za teplot vyšších, než je předpokládaná maximální provozní teplota. Obvyklý rozsah teplot je 240 °C až 350 °C [1].

**Žihání ke snížení vnitřního pnutí** se provádí pod rekrytalizační teplotou, s výdrží a následným kontrolovaným ochlazováním. Běžný rozsah teplot je od 300 °C do 400 °C. Řízené ochlazování se musí provádět minimálně do teploty 200 °C [1].

**Homogenizační žihání** se provádí při vysoké teplotě (velmi blízké solidu). Jeho účelem je odstranění nebo snížení chemické heterogenity difúzními procesy. Existuje i tzv. dvoustupňová homogenizace, při které se aplikují dvě po sobě následující různé teploty [1].

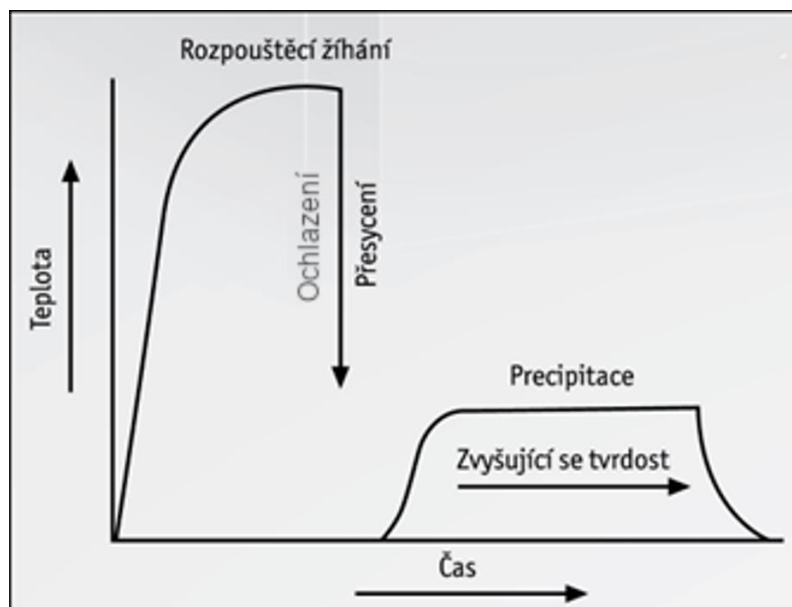


**Obr. 2.1** Schéma jednodušňové a dvoustupňové homogenizace [1]

Tepelné zpracování za účelem zvýšení mechanických vlastností je **vytvrzování**. Při vytvrzování se využívá změny rozpustnosti některých legujících prvků v tuhém roztoku  $\alpha$  (Al) během ochlazování [2]. Podmínku vytvrzování splňují slitiny k tváření řady 2000, 6000 a 7000 (slitinu **EN AW-7022** tedy lze vytvrzovat) [4].

**Vytvrzování** je složeno ze dvou základních procesů, a to rozpouštěcího žihání a stárnutí. Podmínkou vytvrzování je výrazná změna rozpustnosti legujícího/ch prvku/ů na teplotě z hlediska příslušného rovnovážného diagramu. Cílem je opětovné rozpuštění intermetalických fází tuhého roztoku  $\alpha$ , které se následně vyloučí do struktury jako

koherentní či semi-koherentní útvary, které budou zpevňovat slitinu [1-2]. Proces vytvrzování je znázorněn na obr. 2.2.



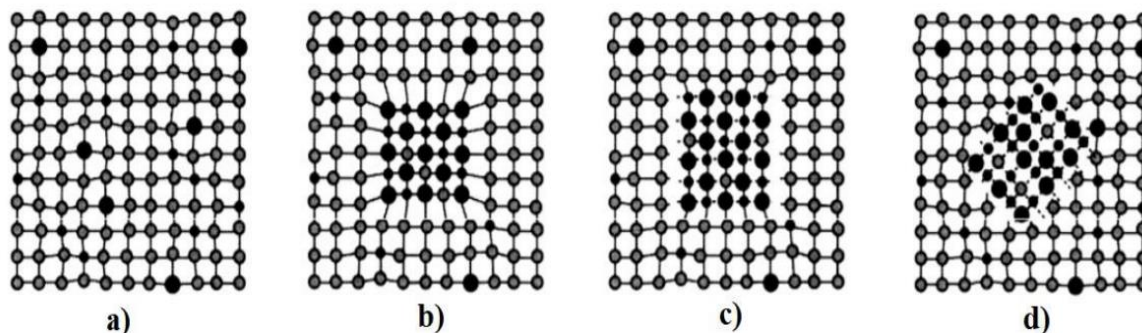
Obr. 2.2 Znázornění tepelného ošetření [4]

**Rozpouštěcí žihání** je proces, kdy se materiál ohřeje na vhodnou rozpouštěcí teplotu, následuje výdrž na této teplotě po dobu nutnou k převedení jedné či více intermetalických fází do tuhého roztoku. Po těchto úkonech následuje poměrně rychlé ochlazení kritickou nebo nadkritickou rychlostí k získání přesyceného tuhého roztoku  $\alpha$ . Kritická rychlost je taková rychlost ochlazování, při které nenastává rozpad přesyceného tuhého roztoku [1]. Rozpouštěcí žihání se běžně provádí na vzduchu při teplotách 450 °C až 575 °C. Ochlazení se provádí ve studené nebo horké až vařící vodě, roztoku vody a polymeru (glykol), vodní sprše nebo nuceným větráním [5]. Slitiny hliníku řady 7000 jsou na rychlost ochlazování velice citlivé. To samozřejmě ovlivňuje i kritickou rychlost ochlazování [1].

**Stárnutí** je proces, při kterém se postupně rozpadá přesycený tuhý roztok  $\alpha$ . Při stárnutí dochází k difuzi přísadového prvku do mikroskopických oblastí bohatších na tento prvek, což vede k nukleaci nové fáze. Při výskytu těchto zárodků vzniknou koherentní precipitáty, které se také označují jako Guinier-Prestonovy zóny. Tyto zóny jsou součástí krystalické mřížky tuhého roztoku, kde způsobují deformace mřížky a tím vzniká vnitřní pnutí, které je příčinou zvýšení pevnosti a tvrdosti slitiny hliníku [2]. Tento proces se buďto provádí za pokojové teploty (přirozené stárnutí) nebo za zvýšených teplot (umělé stárnutí) [1]. U přirozeného stárnutí dosáhne většina vytvrditelných slitin stabilního stavu po 96 hodinách. Umělé stárnutí pro stavy T6 a T7 (a jejich podmnožiny) se provádí při teplotách 90 °C až 250 °C [5]. Při příliš vysoké teplotě nebo příliš dlouhé době stárnutí dojde k tzv. přestárnutí. Dochází k postupné ztrátě koherence, kdy nekoherentní vytvrzující fáze už



nemá krystalickou vazbu na tuhý roztok  $\alpha$ . Tím pádem dochází ke snížení pevnosti a tvrdosti slitiny [2].



**Obr. 2.3** Vylučování precipitátu; a) tuhý roztok, b) koherentní precipitát, c) semikoherentní částice, d) nekoherentní precipitát [1]

**Stavy tepelného zpracování hliníkových slitin** jsou označovány podle normy ČSN EN 515. Existuje několik základních stavů, v kterých se mohou materiály vyskytovat. Podle toho se označují příslušným písmenem: F – z výroby, O – žíhaný, H – deformačně zpevněný, W – po rozpouštěcím žíhání a T – tepelně zpracovaný k získání stabilních stavů jiných než F, O nebo H (pouze pro vytvrditelné slitiny) [8].

Vzhledem k zaměření bakalářské práce jsou v tab. 2.5 uvedeny jednotlivé varianty stavu **T**. Tyto stavy jsou označeny T1 – T10, další číslice jsou přidávány pro označení varianty zpracování, které významně mění charakteristické vlastnosti výrobku s ohledem na výchozí zpracování. Např.: Tx51x nebo Txx51x je označeno snížení pnutí vypínáním, Tx52 nebo Txx52 pro snížení pnutí tlačení, Tx54 nebo Txx54 pro snížení pnutí kombinací vypínání a stlačení [8].

Tab. 2.5 Specifikace tepelného zpracování dle normy [8]

Stav	Definice stavu
T1	Po ochlazení ze zvýšené teploty tváření a přirozeném stárnutí.
T2	Po ochlazení ze zvýšené teploty tváření a přirozeném stárnutí.
T3	Po rozpouštěcím žíhání, tváření za studena a přirozeném stárnutí.
T4	Po rozpouštěcím žíhání a přirozeném stárnutí.
T5	Po ochlazení ze zvýšené teploty tváření a umělém stárnutí.
T6	Po rozpouštěcím žíhání a umělém stárnutí
	T61 Po rozpouštěcím žíhání a umělém stárnutí za podmínek nedostárnutí ke zlepšení tvářitelnosti.
	T6151 Po rozpouštěcím žíhání, uvolnění vnitřního pnutí vypnutím řízenou velikostí plastické deformace (0,5 - 3 % pro plechy a desky, 1 - 3% pro tyče, 1 - 5 % pro výkovky a válcovaný kruh) a umělém stárnutí za podmínek nedostatečných ke zlepšení tvářitelnosti. Po vypnutí se výrobky dále nevyrovnávají.
	T62 Po rozpouštěcím žíhání a umělém stárnutí. Používá se pro zkoušky tepelného zpracování materiálu ze stavu žíhaného nebo ze stavu F anebo u výrobků tepelně zpracovaných u uživatele z libovolného stavu
	T64 Po rozpouštěcím žíhání a umělém stárnutí za podmínek nedostatečných (mezi T6 a T61) ke zlepšení tvářitelnosti.
	T651 Po rozpouštěcím žíhání, uvolnění vnitřního pnutí vypnutím řízenou velikostí (pro plech - trvalá deformace 0,5 % až 3 %, pro desku 1,5 % až 3 %, pro válcovanou nebo za studena dokončenou tyč – 1 % až 3 %, pro volně kovaný a kruhový výkovek a válcovaný kruh – 1 % až 5 %) a umělém stárnutí. Po vypnutí se tyto výrobky dále nevyrovnávají.
	T6510 Po rozpouštěcím žíhání, uvolnění vnitřního pnutí vypnutím řízenou velikostí (pro lisovanou tyč, profil a trubku – trvalá deformace 1 % až 3 %, pro taženou trubku 0,5 % až 3 %) a umělém přestárnutí k dosažení nejlepší odolnosti proti vrstevnaté korozi. Po vypnutí se tyto výrobky dále nevyrovnávají.
	T6511 Stejný jako T6510 s tím rozdílem, že po vypnutí se připouští mírné vyrovnání za účelem vyhovění normalizovaným mezním úchytkám.
	T652 Po rozpouštěcím žíhání, uvolnění vnitřního pnutí stlačením trvalou deformací 1 - 5% a umělém stárnutí.
	T654 Po rozpouštěcím žíhání, uvolnění vnitřního pnutí omezeným tvářením za studena v konečné záпустce a umělém stárnutí.
T66 Po rozpouštěcím žíhání a umělém stárnutí - úroveň mechanických vlastností je vyšší než u T6, čehož se dosáhne speciálně řízeným zpracováním (pro slitiny série 6000)	
T7	Po rozpouštěcím žíhání a umělém přestárnutí.
T8	Po rozpouštěcím žíhání, tváření za studena a umělém stárnutí.
T9	Po rozpouštěcím žíhání, umělém stárnutí a tváření za studena.
T10	Ochlazený ze zvýšené teploty tváření, tvářený za studena a uměle stárnutý.

### 2.3.1 Tepelné zpracování slitiny AW 7022

Jak již bylo uvedeno v kap. 2.2, hlavním legujícím prvkem řady 7000 je zinek a dalšími prvky jsou hořčík a měď. Možnost vytvrzení těchto slitin je podmíněna přítomností intermetalických fází, jejichž vznik udává poměr zinku k hořčíku. Pokud je poměr zinku k hořčíku větší než dva, bude přítomna fáze  $MgZn_2$  a naopak pokud bude poměr zinku k hořčíku menší než dva, vznikne fáze  $Al_2Mg_3Zn_3$ . Rozpustnost těchto fází, v závislosti na teplotě, v hliníku poskytuje možnosti pro vytvrzování těchto slitin. Fáze  $MgZn_2$  a  $Al_2Mg_3Zn_3$  jsou v hliníkové matici rozpustné ve značném množství. To umožňuje výrobu širokého sortimentu těchto slitin s rozdílnými vlastnostmi [1].

Teplota rozpouštěcího žíhání se pohybuje v intervalu 440 °C až 500 °C. Ochlazení z těchto teplot lze provést minimální rychlostí do teplé vody nebo na vzduchu, protože stabilita tuhého roztoku  $\alpha$  je vysoká. Umělé stárnutí se standardně provádí v teplotním intervalu 120 °C až 140 °C. Čas stárnutí se běžně udává v intervalu 12 až 24 hodin, ale záleží především na požadovaných vlastnostech [1].

Problematice tepelného zpracování této slitiny se věnovali autoři publikace [6], kteří sledovali vliv podmínek dvoustupňového vytvrzování na strukturu a výsledné mechanické vlastnosti materiálu. V rámci experimentu bylo vždy použito rozpouštěcí žíhání při teplotě 475 °C po dobu 24 hodin a byl sledován vliv teploty chladícího média, resp. zchlazení do vody o teplotě 0 °C a 10 °C nebo ponechání na vzduchu. Umělé stárnutí bylo provedeno jako jednostupňové, dvoustupňové s mezi zchlazením a dvoustupňové s různými rychlostmi náběhu na finální teplotu. Na základě provedených experimentů autoři doporučují tepelné zpracování s následujícími technologickými parametry: Rozpouštěcí žíhání 475 °C po dobu 24 hodin, zchlazení do ledové vody (0 °C) a následně provádět dvoustupňové stárnutí, nejprve stárnutí při teplotě 70 °C po dobu 12 hodin, poté zvýšení na konečných 135 °C rychlostí 30 °C/h a setrvání na této teplotě dalších 8 hodin.

Autoři publikace [9] se zabývali optimalizací tepelného zpracování slitiny  $AlZn_5Mg_3Cu$ . V experimentu sledovali vliv tváření za studena, teploty a doby umělého stárnutí. Vždy použili rozpouštěcí žíhání o teplotě 500 °C s výdrží 2 hodiny a následné ochlazení. Dále provedli předběžné umělé stárnutí při teplotě 100 °C po dobu jedné hodiny. Poté na vzorky aplikovali tváření za studena o velikostech 10 %, 20 % a 30 % a poté umělé stárnutí při různých teplotách a s různými dobami výdrže. Na základě provedených zkoušek autoři doporučují teplotu rozpouštěcího žíhání 500 °C s výdrží 2 hodiny a následné ochlazení. Předběžné umělé stárnutí při teplotě 100 °C po dobu jedné hodiny. Bez ohledu na velikost tváření nejvyšší tvrdosti a mechanických vlastností bylo dosaženo při použití umělého stárnutí při teplotě 120 °C po dobu 16 hodin.

### 3. Experimentální část

Vzhledem k předpokládanému použití slitiny **EN AW-7022** ve svařovaných konstrukcích, kdy při svařování základního materiálu ve vytvrzeném stavu vždy dochází k poklesu mechanických vlastností v tepelně ovlivněné oblasti (TOO), si experimentální část klade za cíl optimalizovat parametry případného následného tepelného zpracování.

Nejprve byly stanoveny vlastnosti základního materiálu, tj. chemické složení, struktura a mechanické vlastnosti. Na základě provedené rešerše byl naplánován experiment zaměřený na stanovení vlivu parametrů tepelného zpracování na mechanické vlastnosti. Tento vliv byl hodnocen pomocí měření tvrdosti metodou dle Brinella. V první fázi byl sledován vliv teploty a doby setrvání na teplotě rozpouštěcího žíhání. Ve druhé fázi byl sledován vliv přirozeného stárnutí a v poslední fázi vliv teploty a doby setrvání na teplotě umělého stárnutí. U vybraných parametrů tepelného zpracování byla provedena také zkouška tahem a stanoveny mez pevnosti v tahu  $R_m$ , smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$ , celková tažnost  $A_{40mm}$  a homogenní tažnost  $A_g$ .

#### 3.1 Charakteristika základního materiálu

Materiál EN AW-7022 byl dodán ve formě desek o tloušťce 12 mm ve stavu T651 (po rozpouštěcím žíhání, uvolnění vnitřního pnutí vypnutím řízenou velikostí a umělém stárnutí, po vypnutí se tyto výrobky dále nevyrovnávají). Nejprve bylo provedeno ověření chemického složení slitiny pomocí stolního jiskrového optického emisního spektrometru Bruker Q4 Tasman, viz obr. 3.1. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v **tab. 3.1**. Po porovnání s tolerancemi v normě ČSN EN 573-3 bylo zjištěno, že testovaný materiál odpovídá požadovaným rozmezím.



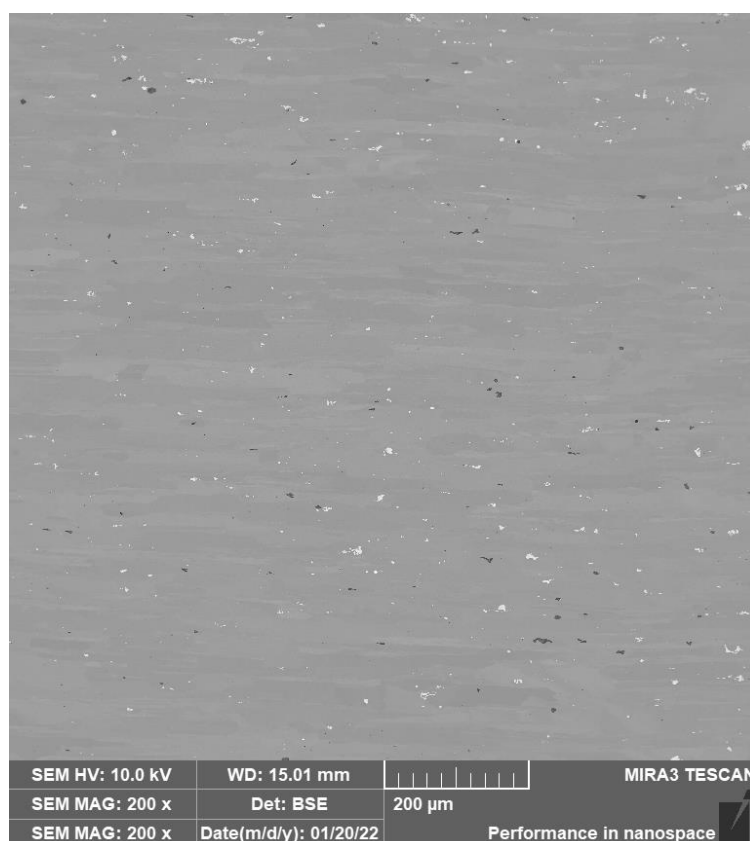
**Obr. 3.1** Spektrometr Bruker Q4 Tasman

**Tab. 3.1** Naměřené chemické složení EN AW-7022

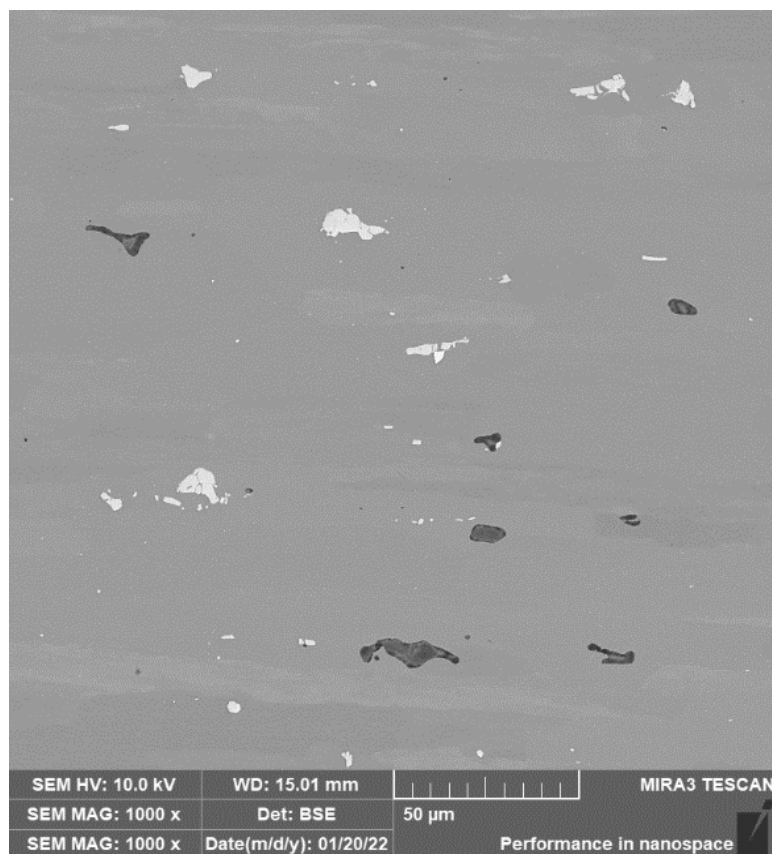
Prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr+Ti
hmot. %	0,054	0,14	0,564	0,181	2,809	0,135	4,605	0,0239

**Struktura** materiálu ve výchozím stavu byla sledována na elektronovém mikroskopu MIRA3 TESCAN. Vzorky pro metalografické pozorování byly připraveny běžným metalografickým postupem (broušení a leštění). Struktura základního materiálu je zobrazena na následujících obrázcích obr. 3.2 a obr. 3.3.

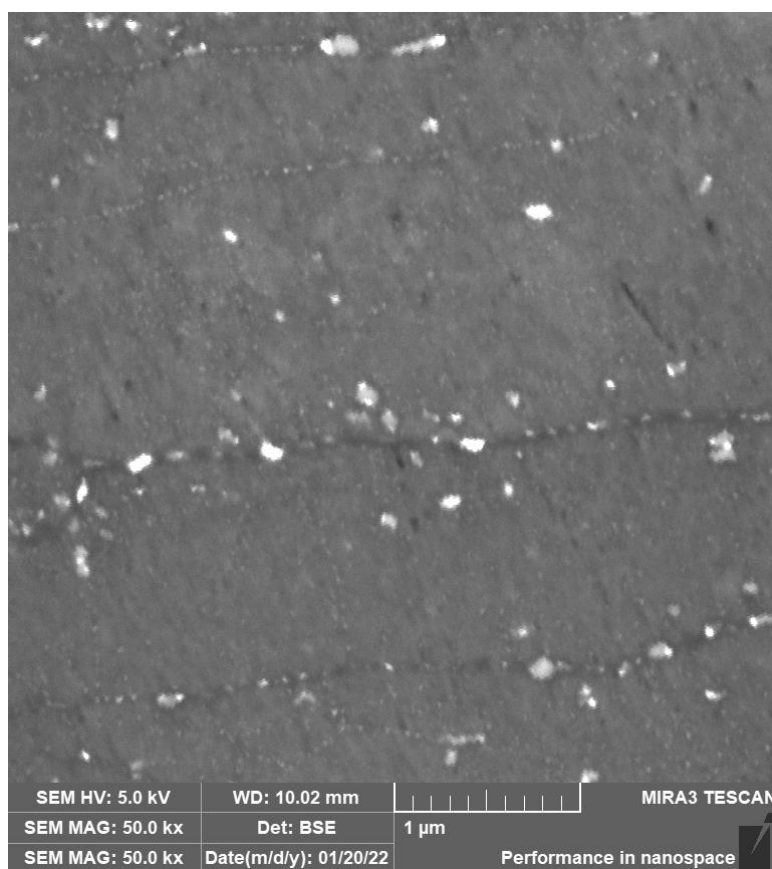
Na obr. 3.4 je zachycen detail struktury v základním stavu, z něhož je patrné, že jak po hranicích zrn, tak uvnitř se vyskytují velmi jemné precipitáty. Tyto precipitáty mohou přispívat ke zpevnění. Jejich přesná identifikace by vzhledem k jejich velikosti musela být provedena pomocí difraktometru.



**Obr. 3.2** Struktura AW-7022 ve výchozím stavu T651 (10 kV, BSE)

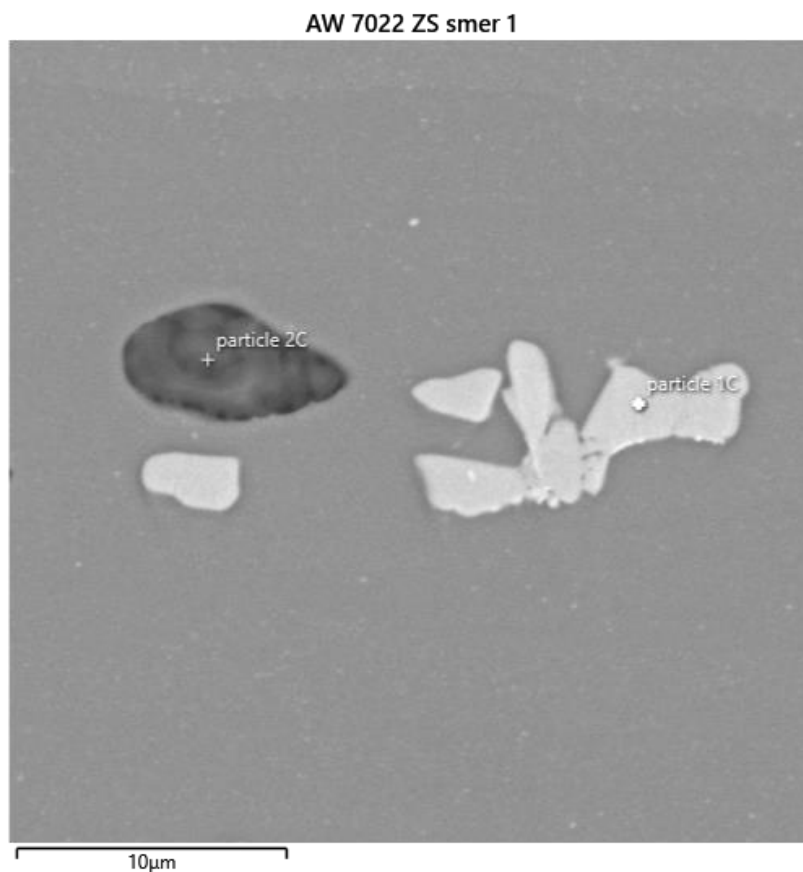


**Obr. 3.3** *Struktura AW-7022 ve výchozím stavu T651 (10 kV, BSE)*

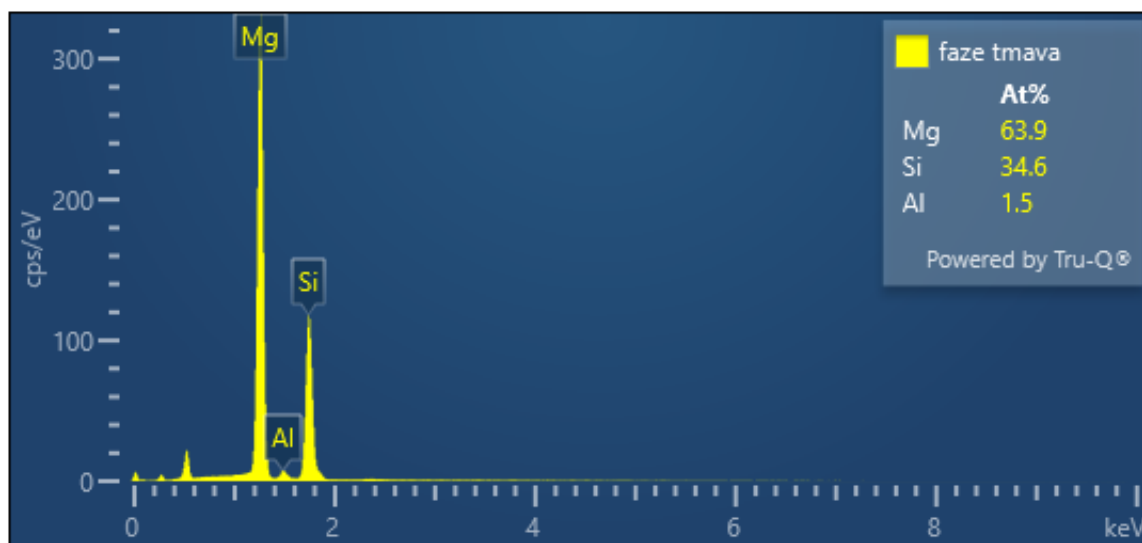


**Obr. 3.4** *Struktura AW-7022 ve výchozím stavu T651 (5 kV, BSE)*

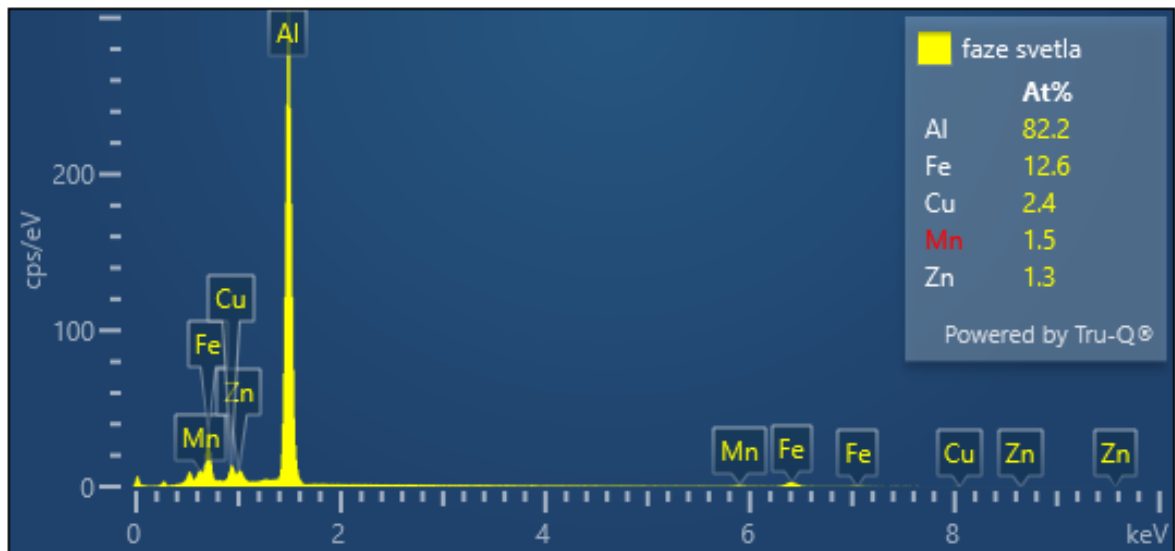
Ve struktuře se nachází 2 typy precipitátů, tmavé a světlé, viz obr. 3.5. Tmavé precipitáty byly pomocí EDX stanoveny jako částice  $Mg_2Si$ , viz obr. 3.6. Přibližné chemické složení světlých částic je uvedeno na obr. 3.7, ale pro jejich přesnou identifikaci by bylo nutné provést fázovou analýzu prostřednictvím difraktometru, který používá difrakci rentgenového záření.



**Obr. 3.5** Struktura AW-7022 ve výchozím stavu T651 – identifikace fází

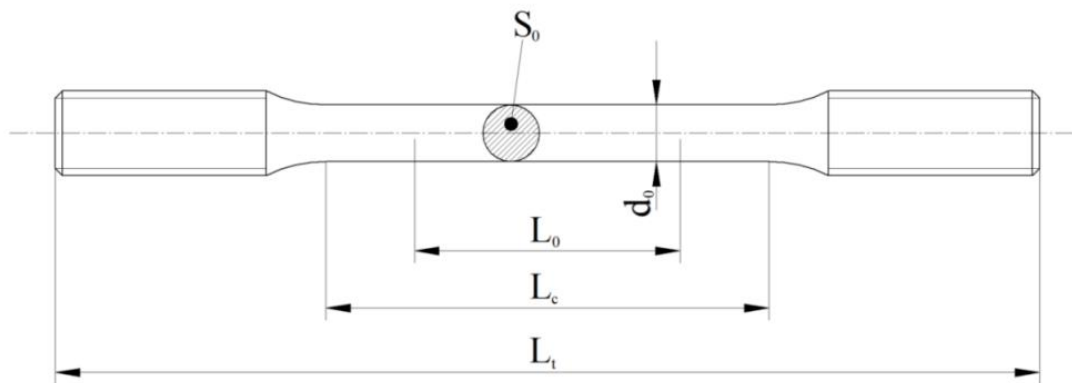


**Obr. 3.6** EDX analýza - tmavá fáze ve struktuře EN AW-7022 ve výchozím stavu T651



**Obr. 3.7** EDX analýza - světlá fáze ve struktuře EN AW-7022 ve výchozím stavu T651

Po ověření chemického složení a struktury materiálu byly změřeny mechanické vlastnosti materiálu ve výchozím stavu, které byly stanoveny statickou zkouškou tahem. Naměřené mechanické vlastnosti výchozího materiálu ve stavu T651 jsou uvedeny v **tab. 3.2**. Zkušební vzorky pro tahovou zkoušku použité v rámci této bakalářské práce, byly připraveny podle normy ČSN EN ISO 6892-1 [14].



**Obr. 3.8** Zkušební vzorek podle normy ČSN EN ISO 6892-1 [14]

Statická zkouška tahem byla provedena na trhacím přístroji TIRA TEST 2300 (obr. 3.9) a měření zajišťoval extensometr MFX 500-B. Nejdříve bylo provedeno předzatížení na hodnotu 100 N, následně se zatěžovalo rychlostí posuvu příčnicku stroje 1,5 mm/min, po dosažení meze kluzu se zatěžovací rychlost zvyšovala až na hodnotu 15 mm/min. Výsledky byly vyhodnoceny podle požadavků normy ČSN EN ISO 6892-1 pro statickou zkoušku tahem při pokojové teplotě s použitím počítačového softwaru Labtest. Byla vyhodnocena mez pevnosti v tahu  $R_m$ , smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$ , celková tažnost  $A_{50mm}$  a homogenní tažnost  $A_g$ .





Obr. 3.9 Statická zkouška tahem na přístroji TIRA test 2300

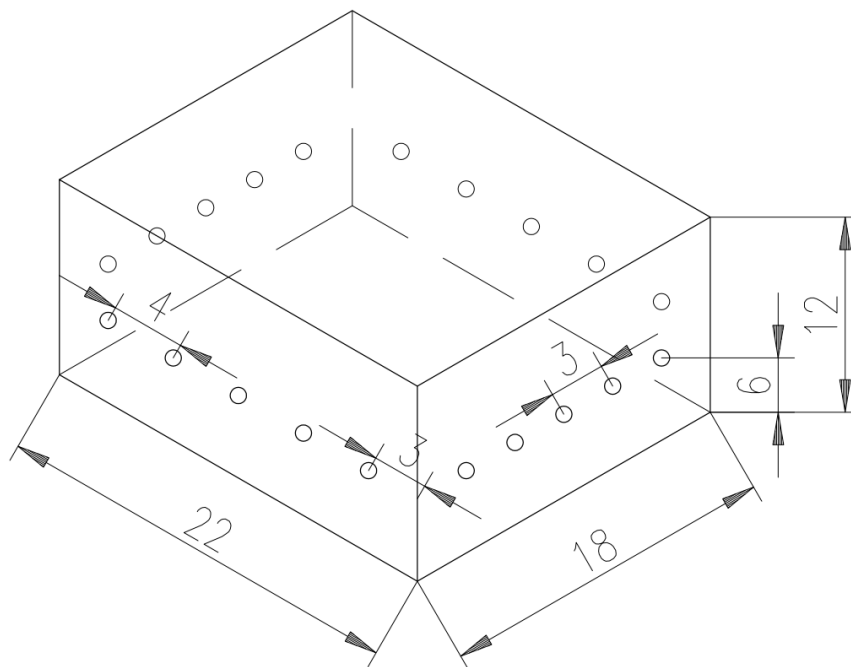
Tab. 3.2 Mechanické vlastnosti EN AW-7022 ve stavu T651

Číslo vzorku	Mez pevnosti v tahu $R_m$ [MPa]	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Homogenní tažnost $A_g$ [%]	Tažnost $A_{40mm}$ [%]	E [MPa]
1	527,7	483,9	8,15	13,71	66 893
2	530,2	492,0	8,17	13,55	65 744
3	529,6	489,6	8,34	14,01	70 893
<b>průměr</b>	529,6	488,5	8,22	13,76	67 843
<b>směrodatná odchylka</b>	1,3	4,2	0,10	0,23	2 703

Naměřené hodnoty jsou vyšší než minimální mechanické hodnoty uvedené pro stav T651 v normě ČSN 485-2, takže dodaný materiál splňuje všechny požadované vlastnosti stanovené normou.

Další důležitou vlastností je tvrdost. Pro měření za účelem zjištění tvrdosti byly vzorky nařezány na pásové pile z dodaných desek do tvaru kvádrů o rozměrech 20 x 18 x 12 mm. Všechna měření tvrdosti, v rámci této bakalářské práce, proběhla podle normy ČSN EN ISO 6506-1. Měřicím přístrojem byl tvrdoměr HPO 250 a vyhodnocení bylo provedeno pomocí softwaru LabControl CCD. Parametry měření byly HBW 2,5/62,5/12. Tvrdost byla vždy měřena na obrobených plochách dle požadavků normy ČSN EN ISO

6506-1. Tedy tak aby vzdálenosti mezi středem vtisku a okrajem vzorku byla nejméně dvou a půl násobek středního průměru vtisku. Dále musí být vzdálenosti mezi jednotlivými vtisky větší než trojnásobek středního průměru vtisku. Místa měření tvrdosti na připravených vzorcích jsou uvedena na obr. 3.10 [15].



Obr. 3.10 Zobrazení míst pro měření tvrdosti

Tab. 3.3 Hodnoty tvrdosti naměřené na obrobené ploše ve stavu T651

Tvrdost podle Brinella HBW 2,5/62,5/12												
T651	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	průměr	směrodatná odchylna
1	167	168	167	166	171	170	165	165	166	170	168	2,2
2	166	171	169	164	164	165	164	167	168	164	166	2,5
3	158	157	159	153	155	155	158	153	154	156	156	2,1

### 3.2 Tepelné zpracování

Jak již bylo uvedeno v kap. 2.3, tepelné zpracování hliníkových slitin za účelem zvýšení mechanických vlastností se provede pomocí rozpouštěcího žíhání, ochlazení a vytvrzení. V literatuře se doporučuje u slitiny hliníku třídy AW 7xxx volit parametry tepelného zpracování dle jejich chemického složení, resp. poměru zinku k hořčíku. V případě slitiny AW 7022, kdy je poměr zinku k hořčíku nižší než dva, je doporučováno tepelné zpracování s následujícími parametry: Rozpouštěcí žíhání při teplotě 490 – 500 °C po dobu dvou hodin, následně ochlazení ve vodě a umělé stárnutí při teplotě 120 °C po dobu dvaceti až čtyřadvaceti hodin a následné ochlazení na vzduchu [1].

### 3.2.1 Vliv rozpouštěcího žíhání

V průběhu experimentu byl nejprve sledován vliv teploty rozpouštěcího žíhání v rozmezí 480 °C až 530 °C s dobou výdrže třicet minut, jedna hodina a dvě hodiny. Jednotlivé provedené varianty jsou uvedeny v tab. 3.4. Bylo provedeno rozpouštěcí žíhání při teplotě 480 °C po dobu půl hodiny a hodiny, 495 °C po dobu půl hodiny, hodiny a dvou hodin, 510 °C po dobu půl hodiny, hodiny a dvou hodin, a nakonec při teplotě 530 °C po dobu půl hodiny a hodiny. U použitých variant rozpouštěcího žíhání bylo provedeno stejné umělé stárnutí při teplotě 120 °C po dobu 24 hodin.

**Tab. 3.4** Přehled použitých parametrů rozpouštěcího žíhání

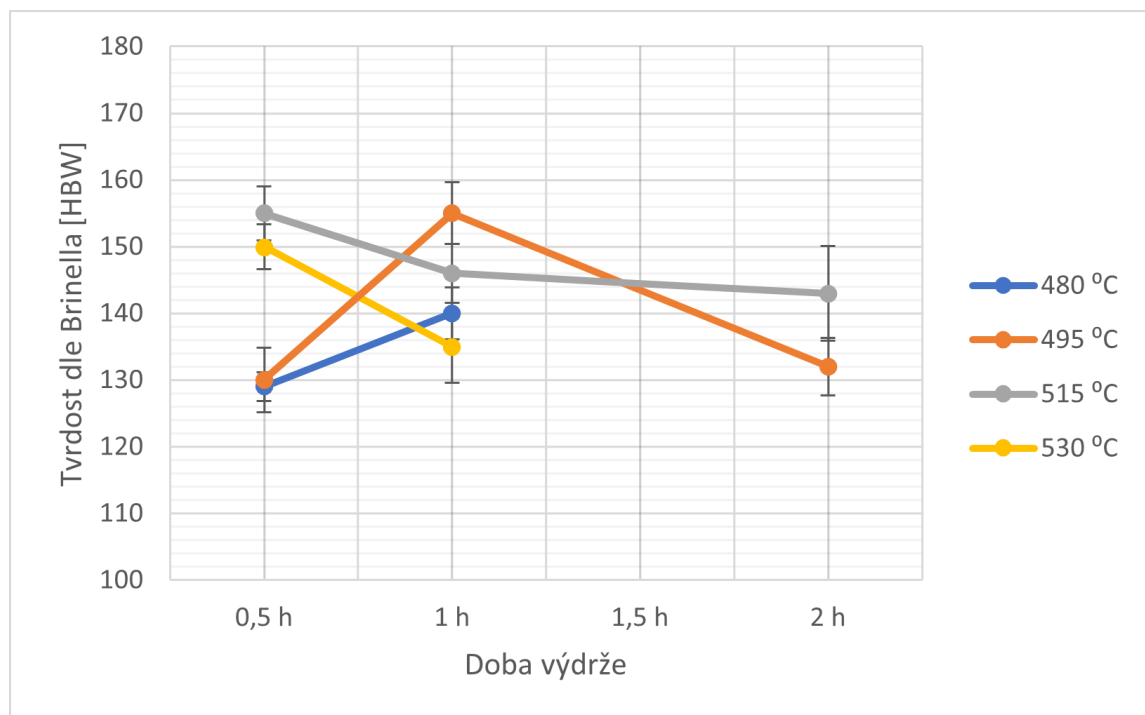
	480 °C	495 °C	515 °C	530 °C
30 min	x	x	x	x
1 hod	x	x	x	x
2 hod		x	x	

Vliv parametrů rozpouštěcího žíhání na mechanické vlastnosti byl hodnocen pomocí zkoušky tvrdosti. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 3.5.

**Tab. 3.5** Naměřené hodnoty tvrdosti po RŽ a vytvrzení 120 °C – 24 h

Tvrdost podle Brinella HBW 2,5/62,5/12										
číslo měření	480 - 0,5 h	480 - 1 h	495 - 0,5 h	495 - 1 h	495 - 2 h	515 - 0,5 h	515 - 1 h	515 - 2 h	530 - 0,5 h	530 - 1 h
1	130	139	127	160	136	160	146	146	148	143
2	129	134	132	150	131	161	145	145	155	130
3	126	139	132	154	123	151	144	135	147	130
4	130	137	137	154	132	157	138	130	146	134
5	132	144	128	163	131	153	140	140	151	141
6	131	144	132	154	134	152	146	136	150	134
7	132	135	122	152	135	148	147	150	150	130
8	129	134	125	151	126	155	154	148	148	132
9	126	140	135	162	127	156	148	146	156	140
10	131	143	125	153	134	157	148	151	153	143
<b>průměr</b>	129	140	130	155	132	155	146	143	150	135
<b>směrodatná odchylna</b>	2,2	3,9	4,8	4,6	4,3	4,1	4,4	7,1	3,4	5,5

Grafické zpracování naměřených hodnot tvrdosti na vzorcích po rozpouštěcím žíhání s různými technologickými parametry, zchlazení a umělém stárnutí při 120 °C po dobu 24 h je uvedeno na obr. 3.11.



**Obr. 3.11** Grafický přehled naměřených tvrdostí po RŽ a vytvrzení 120 °C – 24 h

Na základě výsledků měření tvrdosti (nejvyšší hodnoty tvrdosti) byly pro další zkoušky vybrány teploty rozpouštěcího žíhání 495 °C po dobu jedné hodiny a 515 °C po dobu 0,5 h. U obou variant rozpouštěcího žíhání bylo provedeno umělé stárnutí při teplotě 120 °C po dobu 24 h. U takto tepelně zpracovaných vzorků byly pomocí statické zkoušky v tahu změřeny mechanické vlastnosti. Naměřené hodnoty mechanických vlastností pro jednotlivé varianty parametrů rozpouštěcího žíhání jsou uvedeny v tab. 3.6 a tab. 3.7.

**Tab. 3.6** Mechanické vlastnosti - RŽ při 495 °C – 1 h a vytvrzení při 120 °C – 24h

Zkouška	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_g$ [%]	$A_{40mm}$ [%]	$E$ [MPa]
1	449,6	517,4	9,92	14,88	70 986
2	448,9	516,4	10,05	14,80	70 719
<b>průměr</b>	449,3	516,9	9,99	14,84	70 853

**Tab. 3.7** Mechanické vlastnosti - RŽ při 515 °C – 0,5 h a vytvrzení při 120 °C – 24 h

Zkouška	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_g$ [%]	$A_{40mm}$ [%]	$E$ [MPa]
1	405,6	505,6	13,73	17,22	65 453
2	380,4	493,6	12,66	19,65	70 800
<b>průměr</b>	393,0	499,6	13,20	18,44	68127

Na základě naměřených vlastností ( $R_m$  a  $R_{p0,2}$ ) byla jako optimální zvolena teplota rozpouštěcího žíhání 495 °C s výdrží po dobu jedné hodiny. Tyto parametry

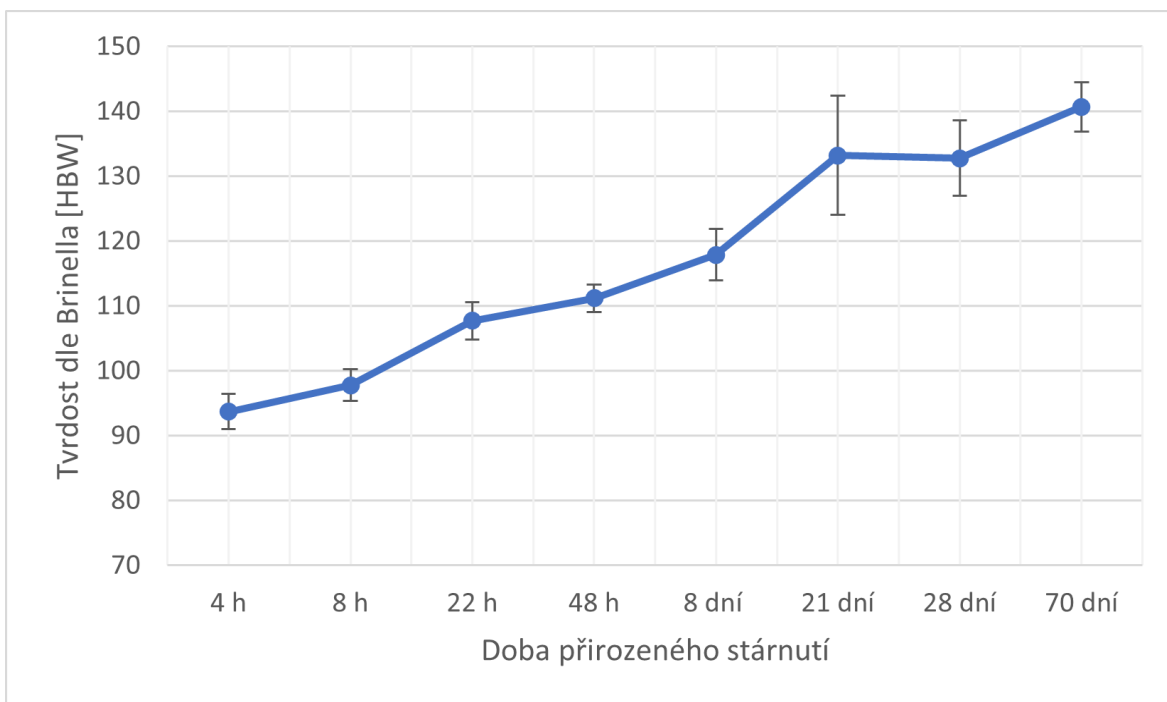
rozpouštěcího žíhání byly následně použity pro sledování vlivů vytvrzování na mechanické vlastnosti.

### 3.2.2 Vliv přirozeného stárnutí

Pro sledování vlivu přirozeného stárnutí bylo provedeno rozpouštěcí žíhání s parametry 495 °C s výdrží 1h, zchlazení do vody. Vzorky byly poté ponechány při běžné pokojové teplotě. Zkoušky tvrdosti po přirozeném stárnutí byly provedeny v rozmezí 4 hodin až 70 dnů, přesné doby včetně výsledných tvrdostí jsou uvedeny v **tab. 3.8**.

**Tab. 3.8** Naměřené hodnoty tvrdosti - RŽ při 495 °C – 1 h a přirozené vytvrzení

Tvrdost podle Brinella HBW 2,5/62,5/12									
číslo měření	RŽ	4 h	8 h	22 h	48 h	8 dní	21 dní	28 dní	70 dní
1	79	92	100	107	109	111	121	129	138
2	77	96	99	102	109	119	120	125	141
3	80	96	100	103	108	119	125	124	143
4	79	92	96	109	110	120	128	133	138
5	78	89	101	109	112	110	131	133	141
6	79	96	94	109	114	119	141	139	146
7	79	96	97	109	114	120	141	138	142
8	81	95	100	110	111	120	142	142	138
9	79	90	96	110	112	120	141	133	134
10	79	95	95	109	113	121	142	132	146
<b>průměr</b>	79	94	98	108	111	118	133	133	141
<b>směrodatná odchylka</b>	1,1	2,7	2,5	2,9	2,1	4,0	9,2	5,8	3,8



**Obr. 3.12** Grafické zpracování naměřených hodnot tvrdosti - RŽ při 495 °C – 1 h a přirozené stárnutí

V rámci sledování vlivu přirozeného stárnutí na mechanické vlastnosti materiálu byla provedena i statická zkouška tahem a to po osmadvaceti dnech přirozeného stárnutí, tedy po době, kdy došlo k významnému nárůstu tvrdosti. Výsledky této zkoušky jsou uvedeny v tab. 3.9. Při srovnání mechanických vlastností s vlastnostmi dodaného materiálu (ve výchozím stavu T651) má slitina po tomto způsobu vytvrzení nižší pevnostní vlastnosti a vyšší tažnost.

**Tab. 3.9** Mechanické vlastnosti - RŽ při 495 °C – 1 h a přirozené stárnutí

Zkouška	$R_{p0.2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_g$ [%]	$A_{40mm}$ [%]	$E$ [MPa]
1	288,8	471,7	17,50	21,22	65 759
2	286,4	469,9	17,83	20,94	82 153
<b>průměr</b>	287,6	470,8	17,67	21,08	73 956

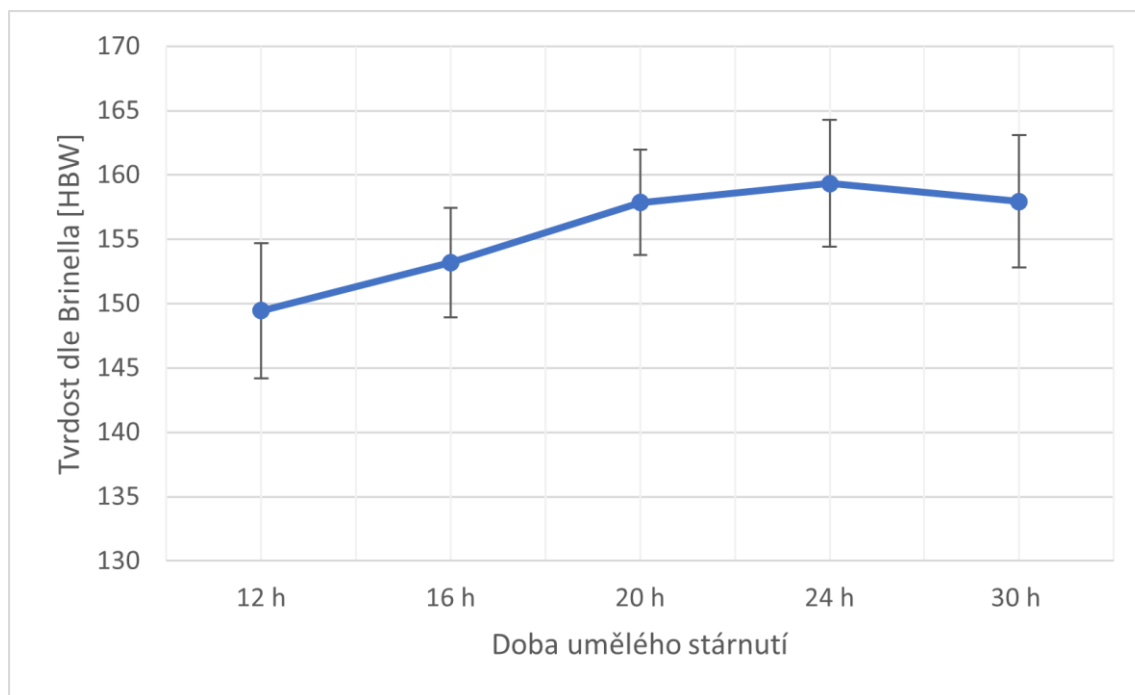
### 3.2.3 Vliv umělého stárnutí

Při provádění experimentů zaměřených na stanovení vlivu parametrů umělého stárnutí na mechanické vlastnosti slitiny EN AW-7022 bylo použito rozpouštěcí žihání (teplota 495 °C se setrváním na této teplotě po dobu 1 hodiny). Na základě doporučení literatury a výsledků experimentů jiných autorů uvedených v rešerši, byla pro umělé vytvrzení použita teplota 120 °C a byl sledován pouze vliv doby výdrže na této teplotě.

V rámci tohoto experimentu byly zvoleny doby výdrže dvanáct, šestnáct, dvacet, čtyřicet a třicet hodin. Výsledky ze zkoušek tvrdosti jsou uvedeny v následující tab. 3.10.

**Tab. 3.10** Naměřené hodnoty tvrdosti - RŽ při 495 °C – 1 h a umělém stárnutí 120 °C

<b>Tvrdość podle Brinella HBW 2,5/62,5/12</b>					
<b>číslo měření</b>	<b>12 h</b>	<b>16 h</b>	<b>20 h</b>	<b>24 h</b>	<b>30 h</b>
1	137	154	152	146	152
2	147	149	160	163	148
3	148	157	164	163	154
4	149	159	161	160	155
5	136	154	158	163	163
6	150	159	156	164	153
7	150	148	157	165	157
8	154	153	163	164	167
9	150	157	160	158	154
10	152	157	148	159	166
11	154	151	155	163	160
12	151	158	162	157	161
13	151	156	158	148	166
14	151	152	163	160	157
15	150	157	159	159	152
16	154	146	153	157	156
17	144	147	158	157	160
18	156	153	154	161	160
19	150	149	156	159	159
20	155	148	160	161	159
<b>průměr</b>	149	153	158	159	158
<b>směrodatná odchyľka</b>	5,3	4,3	4,1	4,9	5,1



**Obr. 3.13** Grafické zpracování naměřených hodnot tvrdosti - RŽ při 495 °C – 1 h a umělé stárnutí 120 °C

Po zkouškách tvrdosti byly vzorky s vybranými parametry tepelného zpracování podrobeny statické zkoušce tahem. Při měření mechanických vlastností bylo vynecháno umělé vytvrzení s dobou výdrže šestnáct hodin. K tomu to kroku se přistoupilo z důvodu velmi podobných hodnot tvrdosti u doby výdrže 12 h a 16 h. Z tab. 3.10 a obr. 3.13 je patrné, že se u těchto výdrží jejich hodnoty tvrdosti překrývají. Statické zkoušky tahem byly provedeny za stejných podmínek jako předchozí. Naměřené mechanické vlastnosti pro jednotlivé doby výdrže umělého vytvrzení jsou uvedeny v tab. 3.11 až tab. 3.14. Pro větší přehlednost byla všechna tato data znázorněna graficky na obr. 3.14.

**Tab. 3.11** Mechanické vlastnosti - RŽ při 495 °C – 1 h a umělé stárnutí (120 °C – 12 h)

Zkouška	$R_{p0.2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_g$ [%]	$A_{40mm}$ [%]	$E$ [MPa]
1	407,0	488,9	12,13	16,34	69 541
2	406,4	488,7	11,53	15,95	68 692
<b>průměr</b>	406,7	488,8	11,83	16,15	69 117

**Tab. 3.12** Mechanické vlastnosti - RŽ při 495 °C – 1 h a umělé stárnutí (120 °C – 20 h)

Zkouška	$R_{p0.2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_g$ [%]	$A_{40mm}$ [%]	$E$ [MPa]
1	443,2	509,3	10,22	15,17	71 020
2	440,1	506,0	9,59	15,84	68 021
<b>průměr</b>	441,6	507,7	9,91	15,51	69 521

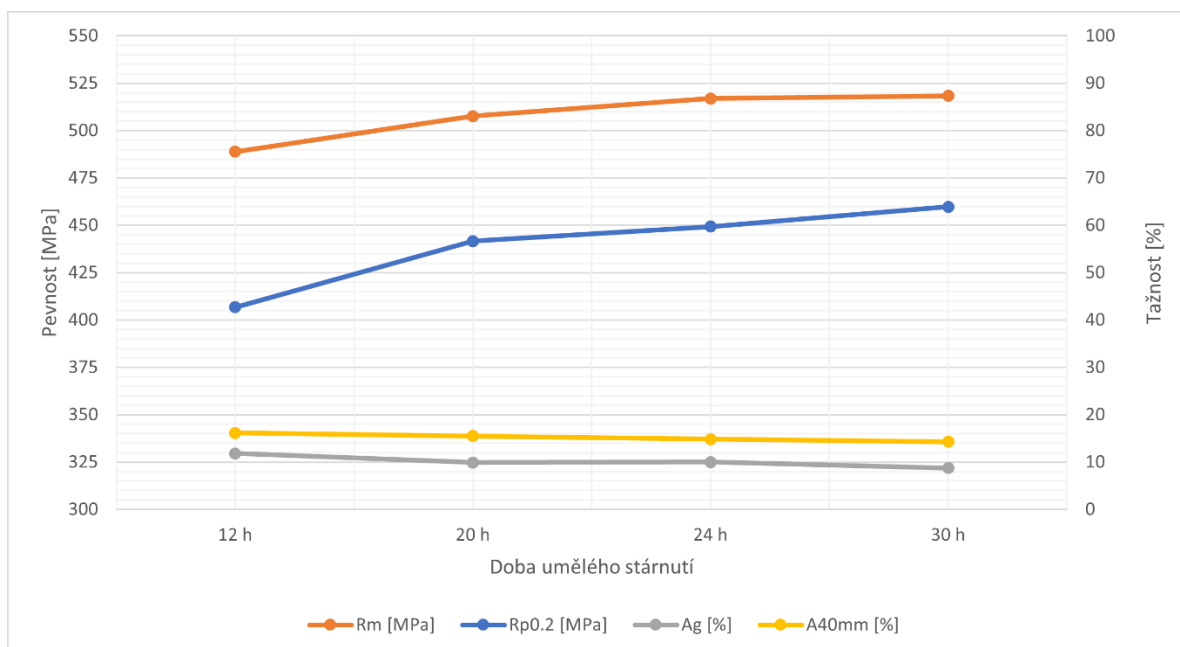


**Tab. 3.13** Mechanické vlastnosti - RŽ při 495 °C – 1 h a umělé stárnutí (120 °C – 24 h)

Zkouška	$R_{p0.2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_g$ [%]	$A_{40mm}$ [%]	$E$ [MPa]
1	449,6	517,4	9,92	14,88	70 986
2	448,9	516,4	10,05	14,80	70 719
<b>průměr</b>	449,3	516,9	9,99	14,84	70 853

**Tab. 3.14** Mechanické vlastnosti - RŽ při 495 °C – 1 h a umělé stárnutí (120 °C – 30 h)

Zkouška	$R_{p0.2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_g$ [%]	$A_{40mm}$ [%]	$E$ [MPa]
1	458,5	517,4	8,89	14,23	67 705
2	461,2	519,2	8,66	14,34	69 851
<b>průměr</b>	459,8	518,3	8,78	14,29	68 778

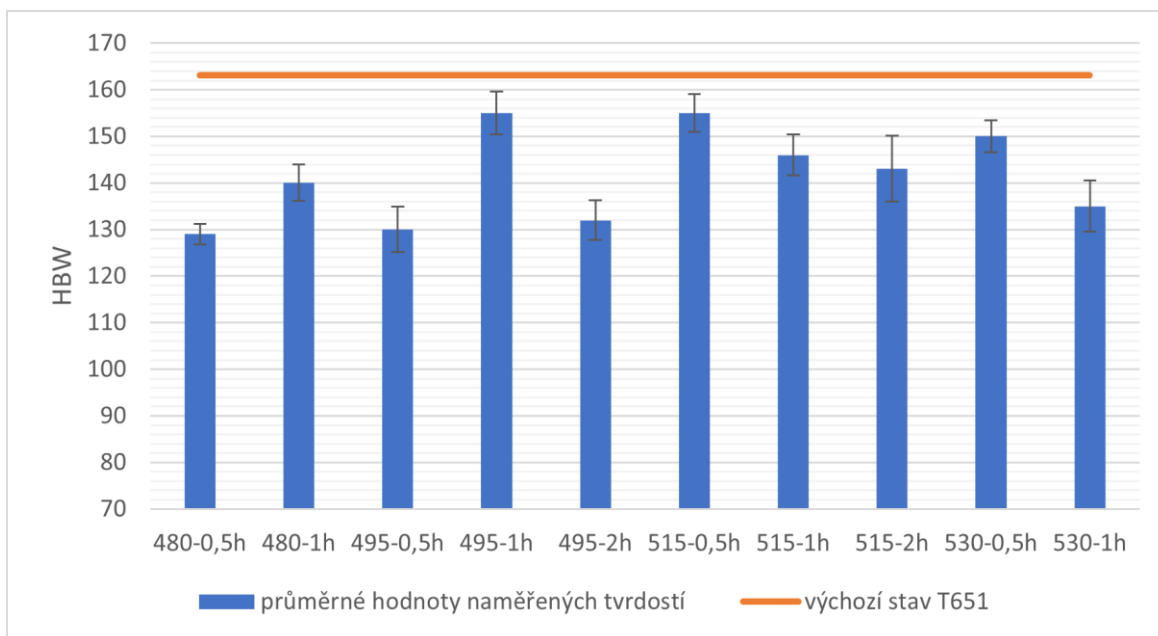


**Obr. 3.14** Grafické zpracování naměřených hodnot tvrdosti - RŽ při 495 °C – 1 h a umělé stárnutí 120 °C

## 4. Diskuze výsledků

Tato bakalářská práce se zabývá stanovením vhodných parametrů tepelného zpracování hliníkové slitiny EN AW-7022. Tato hliníková slitina patří do kategorie slitin vytvrzitelných a vhodných ke svařování. Jak již bylo uvedeno výše, používají se jako konstrukční materiály v automobilovém a kosmickém průmyslu. Slitina AW 7022 je ve většině případů dodávána ve vytvrzeném stavu. V případě jejího vystavení teplotním cyklům, např. při svařování, pak dochází k poklesu jejich mechanických vlastností. Cílem této práce tedy bylo nalézt parametry tepelného zpracování, které povedou k obnově, popř. k co největšímu zvýšení mechanických vlastností. K posuzování vlivu provedeného tepelného zpracování (tj. teploty rozpouštěcího žíhání a doby výdrže na této teplotě, přirozeného a umělého stárnutí) na mechanické vlastnosti byla použita metoda měření tvrdosti podle Brinella a statická zkouška tahem.

Po zjištění struktury a mechanických vlastností dodaného materiálu (vytvrzený stav T651), byl nejprve sledován vliv rozpouštěcího žíhání, resp. teploty a doby výdrže rozpouštěcího žíhání (po zachlazení bylo vždy provedeno umělé stárnutí při teplotě 120 °C po dobu 24 hodin) na tvrdost slitiny. Použité parametry rozpouštěcího žíhání a umělého stárnutí byly zvoleny na základě doporučení literatury, a to v rozmezí teplot 480 – 530 °C a doby výdrže 0,5 – 2 hodiny [1]. Naměřené průměrné hodnoty tvrdosti se pohybovaly v rozsahu 129 až 155 HBW a jsou uvedeny na obr. 4.1.

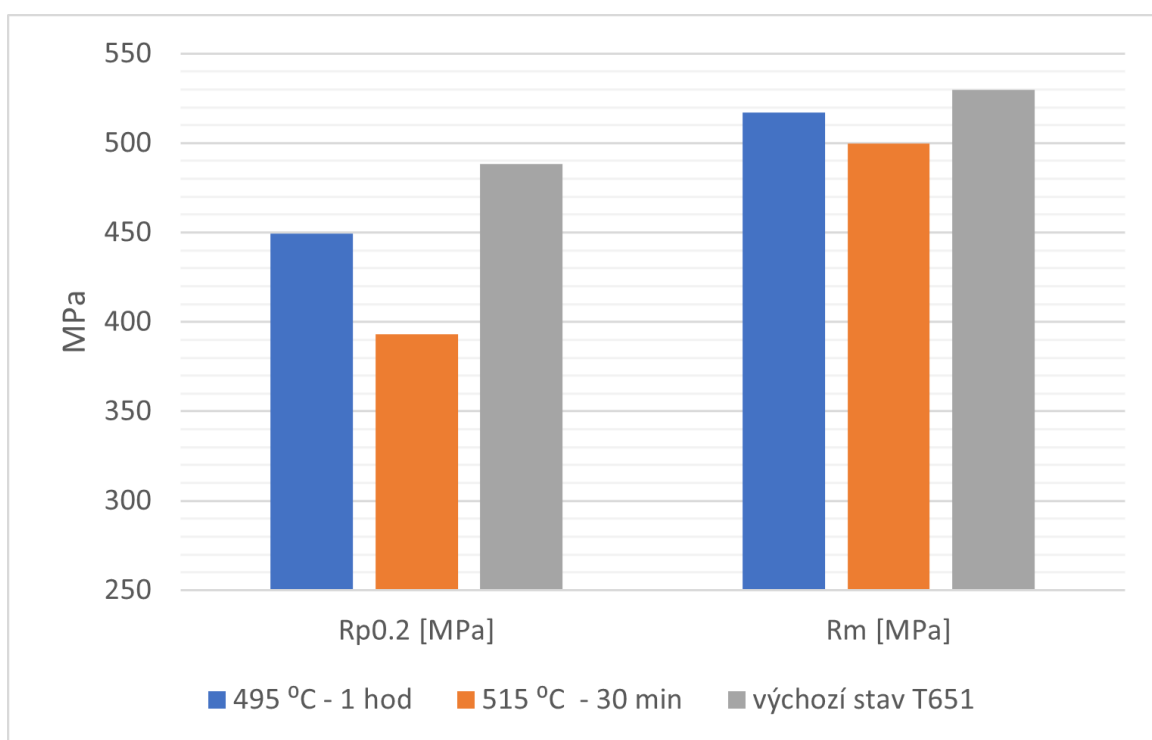


**Obr. 4.1** Průměrné hodnoty tvrdosti – různé parametry rozpouštěcího žíhání

Na základě naměřených tvrdostí lze konstatovat, že vyšších hodnot tvrdosti je dosaženo při rozpouštěcím žíhání při teplotách 490 – 520 °C. Další proměnou byla doba setrvání na této teplotě. Tam lze obecně říci, že pro teploty nižší než 500 °C vede delší

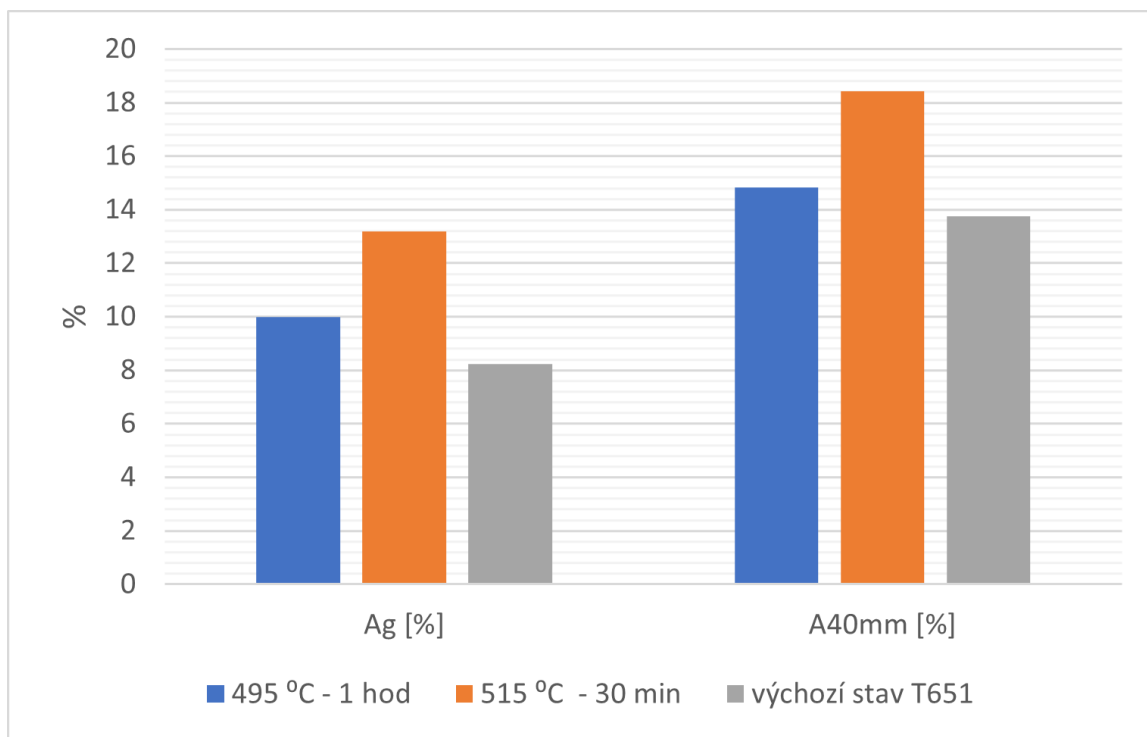
doba výdrže ke zvýšení tvrdosti. Naopak u teplot vyšších než 500 °C vede delší doba výdrže ke snížení tvrdosti.

Pro přípravu vzorků ke stanovení dalších mechanických vlastností byly vybrány dva typy rozpouštěcího žíhání, a to rozpouštěcí žíhání při 495 °C po dobu 1 h a 515 °C s výdrží 0,5 h. Výsledky provedených statických zkoušek v tahu ukázaly, že aplikací rozpouštěcího žíhání při nižší teplotě s delší výdrží na teplotě lze dosáhnout mírně vyšší meze pevnosti v tahu  $R_m$  (cca 517 MPa proti 500 MPa) i smluvní meze kluzu  $R_{p0,2}$  (cca 449 MPa proti 393 MPa). Porovnání mechanických vlastností v závislosti na parametrech rozpouštěcího žíhání je uvedeno na obr. 4.2.



**Obr. 4.2** Grafické porovnání průměrných hodnot  $R_{p0,2}$  a  $R_m$  po RŽ a umělém stárnutí 120 °C – 24 h

Naopak vyšší hodnoty homogenní tažnosti  $A_g$  a celkové tažnosti  $A_{40mm}$  byly naměřeny u vzorků, na které bylo aplikováno rozpouštěcí žíhání o teplotě 515 °C po dobu jedné hodiny. Homogenní tažnost dosáhla průměrné hodnoty 13,20 % (495 °C – 1 h) proti 9,99 % (515 °C – 0,5 h) a průměrná celková tažnost je 18,44 % (495 °C – 1 h) proti 14,84 % (515 °C – 0,5 h). Porovnání průměrných hodnot homogenní a celkové tažnosti v závislosti na parametrech rozpouštěcího žíhání je na obr. 4.3.

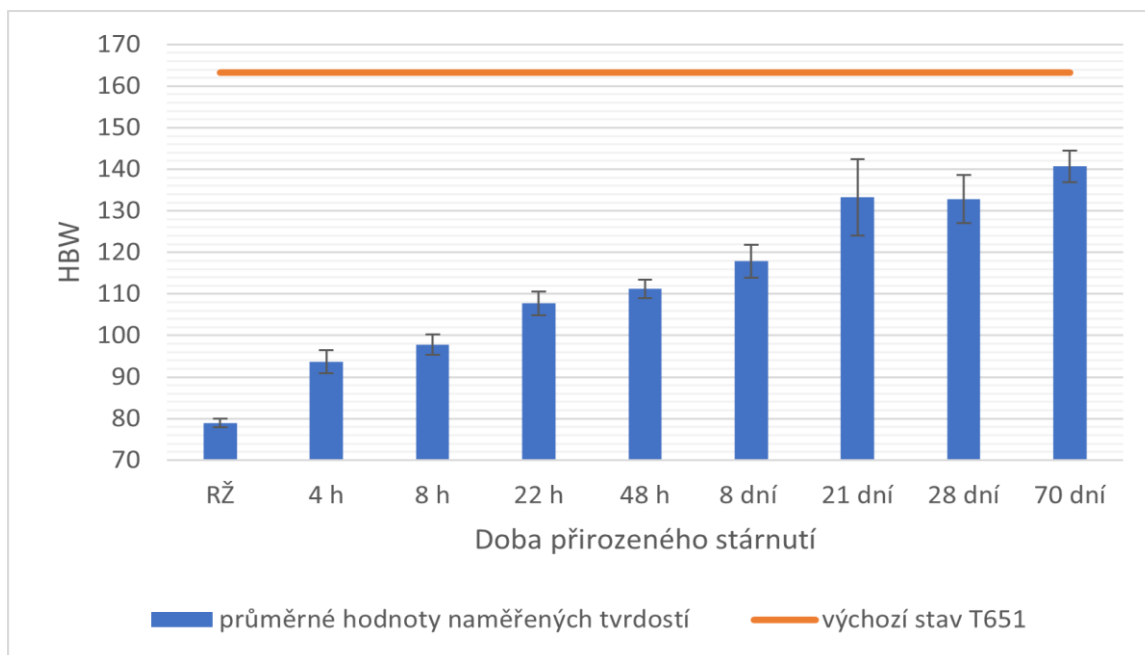


**Obr. 4.3** Grafické porovnání průměrných hodnot  $A_g$  a  $A_{40mm}$  po RŽ a umělém stárnutí 120 °C – 24 h

Na základě těchto výsledků bylo rozhodnuto, že optimálními parametry rozpouštěcího žíhání je teplota 495 °C s dobou výdrže jedné hodiny a tyto parametry byly použity pro experimenty sledující vliv přirozeného a umělého stárnutí.

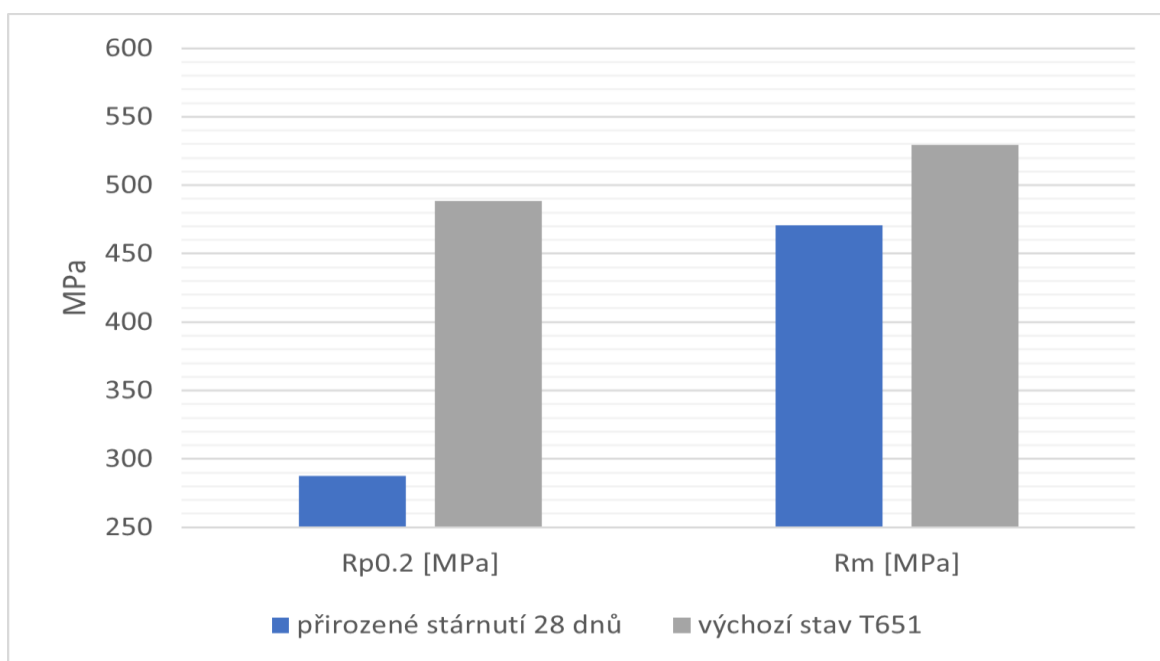
V druhé části experimentu byl sledován vliv přirozeného i umělého vytvrzení na mechanické vlastnosti. V případě přirozeného stárnutí bylo provedeno rozpouštěcí žíhání a zchlazení. Následně byly vzorky zanechány při pokojové teplotě po různé doby (4 h, 8 h, 22 h, 48 h, 8 dní, 21 dní, 28 dní a 70 dní).

K výraznému zvýšení hodnot tvrdosti došlo po 21 dnech, kdy tvrdost v průměru dosáhla 133 HBW (tj. asi 82 % výchozího stavu materiálu T651). Na základě výsledků tvrdosti lze říci, že v průběhu času dochází ke zvyšování hodnot mechanických vlastností. Po 28 dnech zůstala tvrdost na hodnotě 133 HBW a po sedmdesáti dnech průměrná hodnota tvrdosti dosáhla 141 HBW, tj. cca 86 % hodnoty výchozího stavu materiálu (T651). Vzhledem k výše uvedeným výsledkům lze konstatovat, že ani po sedmdesáti dnech přirozeného stárnutí materiál nedosáhne hodnot tvrdosti výchozího materiálu ve stavu T651.



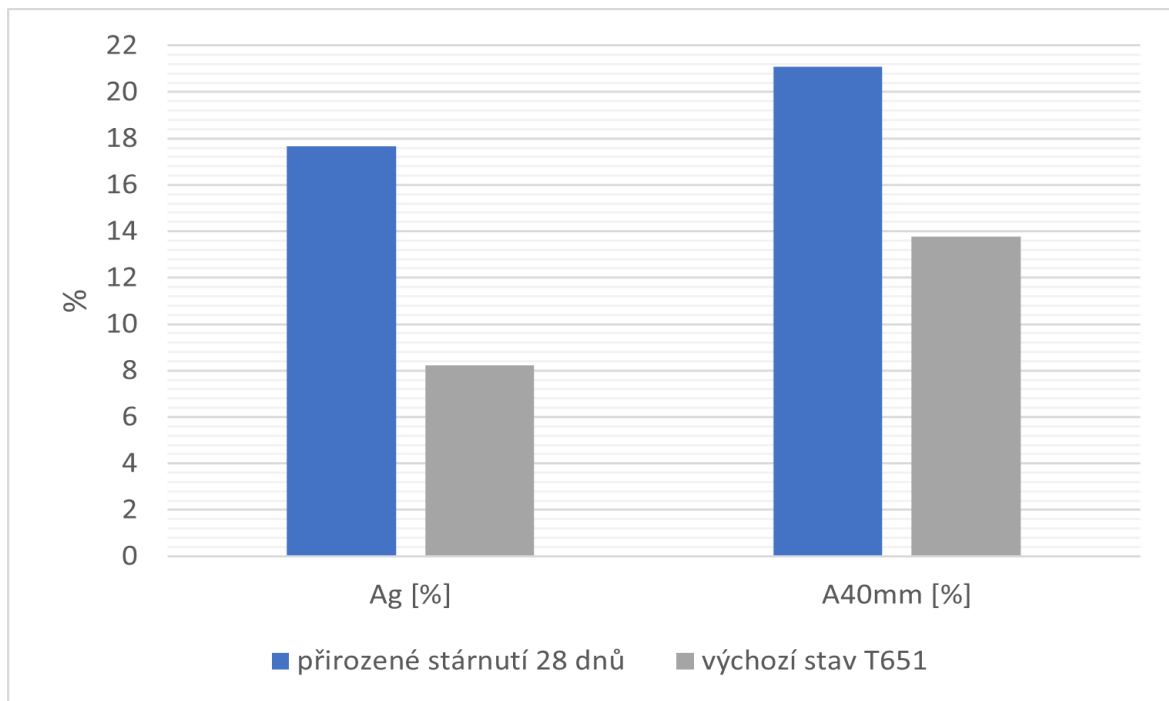
**Obr. 4.4** Porovnání průměrných hodnot tvrdosti materiálu po RŽ při 495 °C – 1 h a přirozeném stárnutí

Po naměření zcela stejné průměrné hodnoty tvrdosti materiálu po osmadvaceti dnech přirozeného stárnutí bylo usouzeno, že k dalšímu výraznému zvýšení pevnosti už nedojde. Z těchto důvodů byly tyto parametry aplikovány na vzorky pro statickou tahovou zkoušku. Průměrná hodnota smluvní meze kluzu  $R_{p0,2}$  dosáhla cca 288 MPa, tj. cca 59 % hodnoty výchozího stavu a mez pevnosti v tahu  $R_m$  dosáhla cca 471 MPa, tj. cca 89 % výchozího stavu T651. Jejich porovnání s hodnotami výchozího materiálu je na obr. 4.5.



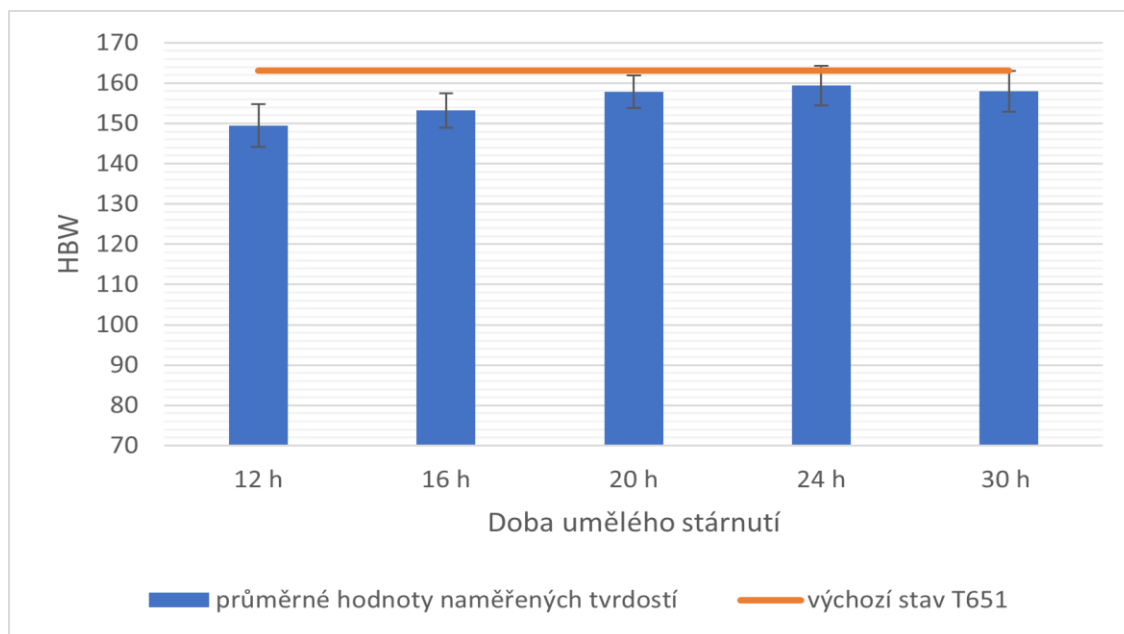
**Obr. 4.5** Grafické porovnání průměrných hodnot  $R_{p0,2}$  a  $R_m$  po RŽ při 495 °C – 1 h a přirozeném stárnutí 28 dní

Průměrná hodnota homogenní tažnosti  $A_g$  (17,67 %) dosáhla cca 215 % hodnoty výchozího stavu T651. Celková tažnosti  $A_{40mm}$  (21,08 %) dosáhla cca 153 % hodnoty výchozího stavu T651. Porovnání průměrných hodnot homogenní a celkové tažnosti s hodnotami výchozího materiálu je zobrazeno na obr. 4.6.



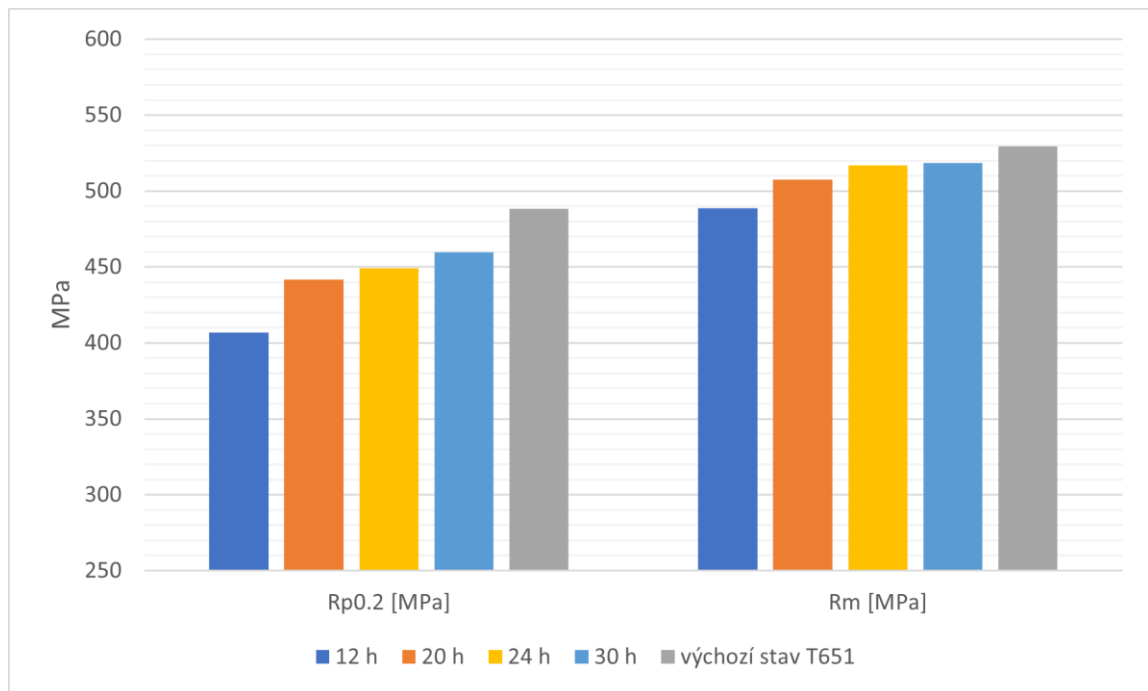
**Obr. 4.6** Grafické porovnání průměrných hodnot  $A_g$  a  $A_{40mm}$  po RŽ při 495 °C – 1 h a přirozeném stárnutí 28 dní

Při sledování vlivu umělého stárnutí byly nejdříve zjištěny hodnoty tvrdostí. Teplota 120 °C byla aplikována po různé doby výdrže (12 h, 16 h, 20 h, 24 h a 30 h). Nejvyšší průměrné hodnoty tvrdosti byly naměřeny u umělého stárnutí po dobu 24 h (159 HBW, tj. cca 97 % tvrdosti výchozího materiálu). Doby umělého stárnutí 20 h a 30 h ale měly shodné průměrné hodnoty tvrdosti 158 HBW (tj. cca 97 % tvrdosti výchozího materiálu) a vzhledem ke směrodatným odchylkám (4,1 u 20 h; 4,9 u 24 h a 5,1 u 30 h) lze říci, že u těchto tří dob výdrže na teplotě umělého stárnutí se dosáhne téměř stejných hodnot tvrdosti. Porovnání průměrných hodnot tvrdosti dle Brinella je v obr. 4.7.



**Obr. 4.7** Porovnání průměrných hodnot tvrdosti materiálu po umělém stárnutí 120 °C (RŽ při 495 °C – 1 h)

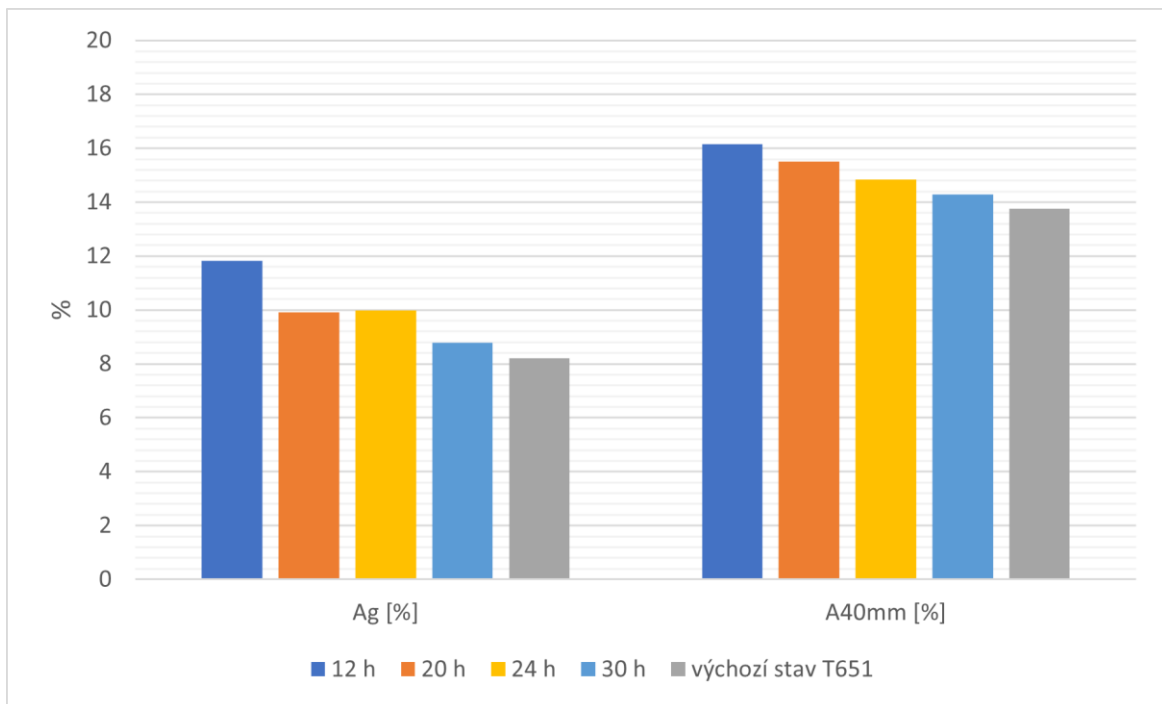
Statické tahové zkoušky byly provedeny pro umělé stárnutí s výdrží 12 h, 20 h, 24 h a 30 h. Na základě výsledků lze říci, že delší doba umělého stárnutí při 120 °C vede ke zvýšení hodnoty smluvní meze kluzu  $R_{p0,2}$  i meze pevnosti v tahu  $R_m$ . Nejvyšší hodnota smluvní meze kluzu byla naměřena u třicetihodinového umělého stárnutí, kdy průměrná hodnota (459,8 MPa) dosáhla cca 94 % výchozího stavu materiálu T651. Stejně tomu bylo i u meze pevnosti v tahu, kde průměrná hodnota (518,3 MPa) dosáhla cca 98 % výchozího stavu T651. Mírně nižších hodnot dosáhlo dvacetihodinové a čtyřicetihodinové umělé stárnutí. V případě dvacetihodinového umělého stárnutí dosáhla hodnota  $R_{p0,2}$  asi 90 % a  $R_m$  cca 96 % výchozího stavu materiálu. U čtyřicetihodinového umělého stárnutí dosáhly hodnoty  $R_{p0,2}$  asi 92 % a  $R_m$  téměř 98 % výchozího stavu materiálu. Srovnání smluvní meze kluzu a meze pevnosti výchozího materiálu a materiálu po umělém stárnutí s výše uvedenými parametry je uvedeno na obr. 4.8.



**Obr. 4.8** Porovnání průměrných hodnot  $R_{p0,2}$  a  $R_m$  materiálu po umělém stárnutí 120 °C (RŽ při 495 °C – 1 h)

Plastické vlastnosti, vyjádřeny hodnotami homogenní a celkové tažnosti, vykazují opačný trend, kdy s delší dobou výdrže umělého stárnutí při 120 °C dochází k poklesu hodnot těchto vlastností. Nejvyšší průměrné hodnoty homogenní tažnosti  $A_g$  (11,83 %) a celkové tažnosti  $A_{40mm}$  (16,15 %) byly naměřeny u dvanáctihodinového umělého stárnutí. Homogenní tažnost  $A_g$  v tomto případě dosáhla cca 144 % výchozího stavu a celková tažnost  $A_{40mm}$  dosáhla cca 117 % výchozího stavu T651. V případě homogenní tažnosti byly hodnoty u materiálu po všech provedených variantách umělého stárnutí vyšší než hodnoty materiálu ve výchozím stavu. Stejně tak hodnoty celkových tažností materiálu po umělém stárnutí postupně klesají, ale ve všech případech zůstaly vyšší než hodnoty naměřené na materiálu ve výchozím stavu T651. Nejnížší hodnoty byly naměřeny u třicetihodinového umělého stárnutí. Homogenní tažnost  $A_g$ , v tomto případě dosáhla cca 107 % výchozího stavu a celková tažnost  $A_{40mm}$  cca 104 % výchozích hodnot. Srovnání průměrných hodnot homogenní a celkové tažnosti je zobrazeno na obr. 4.9.





**Obr. 4.9** Porovnání průměrných hodnot  $A_g$  a  $A_{40mm}$  materiálu po umělém stárnutí 120 °C (RŽ při 495 °C – 1 h)

Z hlediska konstrukčních požadavků jsou důležitější hodnoty smluvní meze kluzu  $R_{p0,2}$  a meze pevnosti v tahu  $R_m$ . U umělého stárnutí nejvyšších hodnot dosáhla doba výdrže 30 h, ale při porovnání s výsledky umělého stárnutí s dobou výdrže 24 h dosahují rozdíly v hodnotách v případě  $R_{p0,2}$  pouze cca 2 % ve prospěch doby výdrže po dobu 30 h. U  $R_m$  je rozdíl zcela zanedbatelný, protože nedosáhl ani půl procentního bodu. Při porovnání dalších naměřených výsledků, tedy hodnot tvrdostí, kde nepatrně vyšší tvrdosti dosáhla doba výdrže 24 h. Je tak otázkou, zda z ekonomického hlediska stojí mírně vyšší hodnoty pevnosti u třicetihodinové výdrže za vyšší nákladovost.

Obecně lze říci, že v případě použití slitiny **EN AW-7022** ve svařovaných konstrukcích, kdy při svařování základního materiálu ve vytvrzeném stavu vždy dochází k poklesu hodnot mechanických vlastností v tepelně ovlivněné oblasti, lze následným tepelným zpracováním dosáhnout jejich obnovení. V případě použití rozpouštěcího žíhání a následného přirozeného stárnutí lze po 28 dnech dosáhnout minimálně cca 80 % původních mechanických vlastností. V případě použití rozpouštěcího žíhání při 495 °C po dobu 1 h a umělého stárnutí při 120 °C po dobu 24 h lze dosáhnout přes 92 % hodnot výchozího stavu materiálu (T651).

Ve svařovaných konstrukcích se také velmi často používají slitiny hliníku skupiny 6000, které jsou také dodávány ve vytvrzeném stavu T651. Obecně lze říci, že při tepelném zpracování hliníkových slitin řady 6000 se používají vyšší teploty rozpouštěcího žíhání i umělého stárnutí. U rozpouštěcího žíhání jsou doby výdrže na teplotě podobné

jako u řady 7000, ale doby výdrže u umělého stárnutí jsou kratší. Hliníkové slitiny řady 6000 mají ve srovnání se slitinou AW 7022 také nižší hodnoty mechanických vlastností. Především hodnoty tvrdostí, meze pevnosti v tahu a smluvní meze kluzu [16,17].

Vlivu technologických parametrů tepelného zpracování na vlastnosti slitin této skupiny se ve své práci věnovali např. autoři [16], kteří sledovali vliv parametrů rozpouštěcího žíhání a stárnutí na mechanické vlastnosti AW 6061. U slitiny AW 6005 se této problematice věnoval VOJTÍŠEK [17].

Pro obnovu mechanických vlastností slitiny AW 6061 autoři [16] doporučují jako optimální parametry rozpouštěcí žíhání 530 °C po dobu 1 h, zchlazení do vody 25 °C a umělé stárnutí 160 °C po dobu 12 h. Při těchto parametrech tepelného zpracování bylo u materiálu dosaženo hodnoty tvrdosti cca 95 HBW, tj. cca 90 % tvrdosti výchozího materiálu (T651). Smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$  činila cca 267 MPa (tj. cca 95 % výchozího materiálu) a mez pevnosti v tahu  $R_m$  cca 305 MPa (tj. cca 99 % výchozího materiálu).

Na rozdíl od slitiny AW 7022 bylo u slitiny AW 6061 po rozpouštěcím žíhání a přirozeném stárnutí po dobu pěti dní (dále tvrdost nestoupala) dosaženo pouze cca 60 % výchozí tvrdosti. V případě smluvní meze kluzu  $R_{p0,2}$  to bylo cca 41 % výchozího stavu a u meze pevnosti v tahu  $R_m$  cca 72 % výchozího materiálu ve stavu T651 [16].

V případě slitiny AW 6005 byla po aplikaci přirozeného stárnutí provedena pouze zkouška tvrdosti dle Brinella. Nejvyšší hodnoty tvrdosti materiálu byly naměřeny po třech dnech, kdy tvrdost dosáhla cca 57 % výchozího stavu T651 [17].

Ve srovnání se slitinami AW 7022 nelze u hliníkových slitin řady 6000 dosáhnout přirozeným stárnutím výrazného zvýšení mechanických vlastností.

## 5. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo posouzení vlivu podmínek tepelného zpracování (rozpuštěcího žíhání a vytvrzování) na mechanické vlastnosti slitiny EN AW-7022. Ve většině případů je tato slitina pro konstrukční účely dodávána ve vytvrzeném stavu. Pokud jsou během dalšího technologického zpracování na vytvrzené hliníkové slitiny aplikovány teplotní cykly, dojde k poklesu jejich mechanických vlastností. Z tohoto důvodu je třeba nalézt vhodné parametry následného tepelného zpracování pro obnovení původních, popř. dosažení co možná nejvyšších hodnot mechanických vlastností.

Práce je rozdělena na dvě části: teoretickou a experimentální. V teoretické části jsou popsány hliníkové slitiny pro tváření, možná tepelná zpracování hliníkových slitin a doporučené technologické parametry tepelného zpracování pro slitinu EN AW-7022.

Experiment byl rozdělen na několik částí. Nejdříve bylo změřeno chemické složení, a sledována struktura a mechanické vlastnosti dodaného materiálu ve výchozím stavu T651. Dále byl sledován vliv parametrů rozpuštěcího žíhání (teplota, doba výdrže) na tvrdost materiálu. Pro vybrané parametry rozpuštěcího žíhání byla provedena statická zkouška tahem (smluvní mez kluzu, mez pevnosti v tahu, tažnost). Na základě výsledků z této zkoušky byly vybrány jako nejvhodnější parametry rozpuštěcího žíhání teplota 495 °C s výdrží po dobu 1 hodiny.

Tyto parametry rozpuštěcího žíhání byly použity při dalších experimentech, u kterých byl sledován vliv přirozeného a umělého vytvrzování na mechanické vlastnosti. Na základě výsledků experimentů lze říci, že při přirozeném stárnutí s časem vzrůstají hodnoty tvrdosti, ale ani po 70 dnech nebylo dosaženo hodnot tvrdosti materiálu ve výchozím stavu. Po přirozeném stárnutí 28 dnů činila tvrdost 82 % výchozí tvrdosti, smluvní mez kluzu dosahovala cca 59 % a mez pevnosti v tahu dosahovala cca 89 % hodnoty materiálu ve výchozím stavu.

Jako optimální parametry umělého vytvrzování lze s ohledem na dosažené mechanické vlastnosti doporučit teplotu 120 °C a dobu výdrže 24 h. Při aplikaci těchto parametrů bylo dosaženo u sledovaných mechanických vlastností (HBW,  $R_{p0,2}$ ,  $R_m$ ) cca 92 % hodnot materiálu ve výchozím stavu.

U slitiny AW 7022 lze umělým stárnutím proces vytvrzování, tedy zvýšení hodnot mechanických vlastností, významně urychlit.

## Použitá literatura

- [1] MICHNA, Š. *Encyklopedie hliníku*. [Prešov: Adin], 2006. ISBN 80-89041-88-4.
- [2] ROUČKA, J. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
- [3] KOVANDA, K., L. KOLAŘÍK a J. SUCHÁNEK. *Změna mechanických vlastností hliníkových slitin typu Al-Zn-Mg-Cu po svařování*. [Praha: ČVUT], 2013.
- [4] *Tepelné zpracování* [online]. ALUNET ©2015 [cit. 23.11.2021]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/tepelne-zpracovani>
- [5] *Rozpouštěcí žihání a stárnutí hliníkových slitin* [online]. Bodycote Plc. Home ©2014 [cit. 3.2.2022]. Dostupné z: <https://www.bodycote.com/cs/sluzby/tepelne-zpracovani/rozpousteci-zihani-starnuti/rozpousteci-zihani-a-starnuti-hlinikovych-slitin/>
- [6] CHEMINGUI, M., M. KHITOUNI, K. JOZWIAK, G. MESMACQUE a A. KOLSI, 2009. Characterization of the mechanical properties changes in an Al–Zn–Mg alloy after a two-step ageing treatment at 70 °C and 135 °C. *Materials and Design*. 23 prosinec 2009. pp. 3134–3139.
- [7] ČSN EN 485-2. *Hliník a slitiny hliníku – Plechy, pásy a desky – Část 2: Mechanické vlastnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019, 84 s. Třídící znak 42 4081.
- [8] ČSN EN 515. *Hliník a slitiny hliníku – Výrobky tvářené – Označování stavů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017, 24 s. Třídící znak 42 0053.
- [9] NEACȘU, M.I., E.R. CHIRIAC, A. CHIRIAC, O. PANDIA a I. SĂRĂCIN. Technological parameters optimization of the AlZn5Mg3Cu alloy thermomechanical treatment process. *Anali Zavoda za Povijesne Znanosti Hrvatske Akademije Znanosti i Umjetnosti u Dubrovniku*. 2017, 56, 185–187.
- [10] *Všeobecný popis různých skupin hliníku* [online]. ALUNET ©2015 [cit. 27.3. 2022]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/vseobecny-popis-ruznych-skupin>
- [11] ČSN EN 573-1. *Hliník a slitiny hliníku – Chemické složení a druhy tvářených výrobků – Část 1: Číselné označování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005, 12 s. Třídící znak 42 1401.
- [12] ČSN EN 573-2. *Hliník a slitiny hliníku – Chemické složení a druhy tvářených výrobků – Část 2: Označování chemickými značkami*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1996, 11 s. Třídící znak 42 1401.

- [13] ČSN EN 573-3. *Hliník a slitiny hliníku – Chemické složení a druhy tvářených výrobků – Část 3: Chemické složení a druhy výrobků*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 39 s. Třídící znak 42 1401.
- [14] 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, 2021, 76 s. Třídící znak 42 0310.
- [15] ČSN EN ISO 6506-1. *Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Brinella – Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015, 20 s. Třídící znak 42 0359.
- [16] NOVÁKOVÁ, I., J. MORAVEC, J. NOVÁK a P. SOLFRONK. Influence of preheating temperature on changes in properties in the haz during multipass mig welding of alloy aw 6061 and possibilities of their restoration. *Metals 2021*. MDPI AG, 2021, 11(12), 1902. ISSN 20754701. DOI: 10.3390/met11121902
- [17] VOJTÍŠEK, Daniel. *Posouzení vlivu přirozeného a umělého stárnutí na mechanické vlastnosti vytvrditelné slitiny AW 6005*. Liberec, 2019. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Fakulta strojní. Katedra strojírenské technologie.