



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

ZÁVISLOST MEZI PEVNOSTÍ V TAHU A TVRDOSTÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN

RELATIONSHIP BETWEEN TENSILE STRENGTH AND HARDNESS OF ALUMINIUM ALLOYS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Růžička

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Klement, CSc.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav:	Letecký ústav
Student:	Bc. Martin Růžička
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Stavba letadel
Vedoucí práce:	doc. Ing. Josef Klement, CSc.
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Závislost mezi pevností v tahu a tvrdostí hliníkových slitin

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

U hliníkových slitin není závislost mezi tahovou pevností a tvrdostí tak jednoznačná jako u ocelí. Dosažitelná data se vyznačují velmi vysokým rozptylem hodnot, což neumožňuje použít jednoduchou zkoušku tvrdosti pro posouzení tahové pevnosti materiálu použitého na letecké konstrukci. Hodnoty tvrdosti uváděné v příslušných materiálových normách jsou pouze orientační.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je experimentálně ověřit funkční závislosti pevnosti a tvrdosti vybraných konstrukčních hliníkových slitin, které se používají v konstrukci letadel. Potřebný rozsah vlastností se získá jejich určováním v různých fázích precipitačního vytvrzování.

Seznam doporučené literatury:

HUSSEY, B., WILSON, J.: Light Alloys. Directory and Databook. Chapman & Hall. 1998. ISBN 0-41-80410-7.

ASM Handbook, vol. 04. Heat Treating. ASM International. Material Park, Ohio, 1991. ISBN 0-8717-379-3.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce pojednává o závislosti mezi pevností v tahu a tvrdostí hliníkových slitin. V úvodu je zpracován přehled hliníkových slitin a jejich charakteristiky. Následuje rozbor zpracování slitin hliníku, kde je velká část věnována průběhu precipitačního vytvrzování. V druhé části práce je obsažena praktická část, která popisuje metodiku měření tvrdosti a pevnosti v tahu s popisem procesu měření. Na konci jsou naměřena data zpracována do grafu a výsledky vyhodnoceny.

KLÍČOVÁ SLOVA

Hliníkové slitiny 2017, 2024, 7075, tvrdost, pevnost v tahu, precipitační vytvrzování.

ABSTRACT

This thesis deals with relationship between tensile strength and hardness of aluminium alloys. The introduction provides an overview of aluminum alloys and their properties. In the following section there is an analysis of the processing of aluminum alloys. A large part is devoted to the course of precipitation hardening. The second part of the thesis contains a practical part, which describes the methodology of measuring hardness and tensile strength. The measurement process is described below. At the end, the measured data are processed into various graphs and their results are evaluated.

KEYWORDS

Aluminum alloys 2017, 2024, 7075, hardness, tensile strength, precipitation heat treatment.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RŮŽIČKA, Martin. *Závislost mezi pevností v tahu a tvrdostí hliníkových slitin*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/121702>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Josef Klement.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Josefa Klementa, CSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. června 2020

.....

Martin Růžička

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu panu doc. Ing. Josefu Klementovi, CSc. za rady, připomínky a trpělivost při tvorbě mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat rodičům, přátelům a přítelkyni za podporu během studia.

OBSAH

Úvod.....	12
1 Hliníkové slitiny.....	13
1.1 Obecné vlastnosti hliníkových slitin	13
1.2 Rozdělení hliníkových slitin.....	13
2 Tepelné zpracování hliníkových slitin	16
2.1 Žihání slitin hliníku	17
2.2 Precipitační vytvrzování.....	19
2.2.1 Podstata precipitačního vytvrzování slitin	19
2.2.2 Rozpouštěcí ohřev	20
2.2.3 Ochlazení	21
2.2.4 Stárnutí hliníkový slitin.....	22
2.3 Označování tepelného zpracování.....	28
3 Příprava experimentu	29
3.1 Charakteristika zkoušených materiálů.....	29
3.2 Vzorky	30
3.3 Ohřev a kalení	31
3.4 Měření tvrdosti	32
3.5 Statická zkouška tahem	34
3.6 Průběhy tvrdosti	34
3.6.1 Parametry tepelného zpracování slitin	34
3.6.2 Postup experimentu pro slitiny 2017 a 2024.....	35
3.6.3 Postup experimentu pro slitinu 7075	35
3.6.4 Výsledky prvního měření tvrdosti slitiny 2017.....	36
3.6.5 Výsledky prvního měření tvrdosti slitiny 2024.....	37
3.6.6 Výsledky prvního měření tvrdosti slitiny 7075.....	38
3.6.7 Srovnání výsledků prvního měření tvrdosti slitin	39
4 Měření meze pevnosti v tahu a tvrdosti	40
4.1 Výsledky experimentu slitiny 2017.....	40
4.2 Výsledky experimentu slitiny 2024.....	42
4.3 Výsledky experimentu slitiny 7075.....	44
4.4 Výsledky tažnosti u měřených slitin	46
4.5 Srovnání závislosti pevnosti a tvrdosti u měřených slitin	47
4.5.1 Výsledky srovnání závislosti tvrdosti a pevnosti měřených slitin	49
5 Srovnání vytvrzeného stavu s žíhaným.....	53
Závěr	55

OBSAH

Seznam použité literatury	56
Seznam příloh	57

ÚVOD

Objevením hliníku a zvládnutí jeho přípravy se otevřely nové možnosti aplikace materiálu s nízkou měrnou hmotností. Avšak vyrobené slitiny hliníku nedosahují takových mechanických vlastností, aby mohly konkurovat jiným materiálům v konstrukčních oblastech. To se mění při využití precipitačního vytvrzování, které zásadně ovlivňuje mechanické i fyzikální vlastnosti. Vytvrzené slitiny dokáží konkurovat ocelím a našly velké uplatnění především v automobilovém, leteckém a kosmickém průmyslu, kde využívají své vysoké pevnosti v kombinaci s nízkou měrnou hmotností.

V rešeršní části práce jsou popsány třídy běžně používaných tvářených slitin a jejich možné tepelné zpracování. Protože experiment probíhal během precipitačního vytvrzování, je této kapitole tepelného zpracování věnována rozsáhlá část práce. V experimentální části je popsána příprava vzorků pro měření, způsob měření tvrdosti a postup vyhodnocení tahové zkoušky. Dále jsou uvedeny podmínky, za kterých probíhalo tepelné zpracování. Z naměřených dat jsou sestaveny jednotlivé průběhy tvrdosti a pevnosti během precipitace a jejich vzájemné závislosti. Následuje porovnání experimentálně získaného vztahu pevnosti a tvrdosti s volně dostupnými průběhy a s vlastní statistikou běžných vytvrzených hliníkových slitin. V závěru byla práce rozšířena o srovnání s materiálem ve vyžíhaném stavu.

Obecně je vzájemná závislost tvrdosti a pevnosti využívána ke zjištění pevnosti pomocí naměřené tvrdosti. Měření tvrdosti je oproti měření pevnosti méně náročné, není třeba vyrábět speciální vzorky a lze ji změřit i nedestruktivně na vyrobených dílech. Určování pevnosti z naměřené tvrdosti je velmi přesně popsáno např. u ocelí. Pro slitiny hliníku není tento převod tak jednoznačný, protože pro danou tvrdost existuje poměrně široký interval možných hodnot pevnosti.

Cílem práce je ověření vztahu mezi tvrdostí a pevností hliníkových slitin, jeho srovnání nebo případné zpřesnění dostupných závislostí v materiálových příručkách. Vzájemná vazba byla měřena během různých fází precipitačního vytvrzování. Protože není možné v této práci zpracovat velký soubor různých slitin hliníku k určení komplexní výsledků, byly zvoleny nejběžněji užívané slitiny hliníku v leteckém průmyslu.

1 HLINÍKOVÉ SLITINY

1.1 OBECNÉ VLASTNOSTI HLINÍKOVÝCH SLITIN

Hliníkové slitiny jsou jedny z nejpoužívanějších kovových konstrukčních materiálů v průmyslu a násobně více toto platí v oboru letecké výroby. Mezi výhody hliníku patří nízká měrná hmotnost, pohybující se od $2,47 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ do $2,89 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, dobré specifické vlastnosti jako poměr pevnosti k měrné hmotnosti a poměr Youngova modulu k měrné hmotnosti. Obecně lze říci, že hliníkové slitiny mají dobrou svařitelnost, obrobitelnost a tvárnost. Výroba samotného hliníku je energeticky náročná a z tohoto důvodu i drahá. Díky moderním postupům a masové výrobě je cena hliníkových slitin v přijatelných mezích i pro běžné aplikace. V neposlední řadě lze zmínit mezi výhody i dlouholeté zkušenosti s tímto materiálem. Naopak nedostatky jsou např. nízká tvrdost, náchylnost k povrchovému poškození a nutná korozní ochrana (zvláště u slitin s obsahem mědi). Antikorozní povlaky chrání povrch slitiny, ale znemožňují svařování a komplikují tepelné zpracování slitin. K dalšímu problému patří náchylnost k elektrochemické korozi.

1.2 ROZDĚLENÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN

Pro potřebu letectví jsou hliníkové slitiny rozděleny dle EN 2031-1 na tvářené a lité. Tvářené slitiny se označují AL-Pxxxx, lité AL-Cxxxx. První číslice x označuje třídu slitiny, druhé číslo x označuje množství legujících prvků. Zbylé číslice označují konkrétní slitiny. Dále lze slitiny hliníku rozdělit na tepelně nezpracovatelné a vytvrditelné.

Níže jsou podrobněji popsány běžně používané hliníkové slitiny. V leteckém průmyslu tvoří největší část aplikací tvářené slitiny. Naopak výrobky z litých hliníkových slitin jsou zastoupeny méně. Jejich použití se omezuje především na nenosné prvky, proto dále nejsou podrobněji rozebrány.

Třídy tvářených hliníkových slitin:

Třída 1xxx

Jedná se o technicky čistý hliník o čistotě 99,0 % a více. Vyznačuje se nízkými mechanickými vlastnostmi, skvělou odolností vůči korozi a výbornou tepelnou i elektrickou vodivostí. V leteckém průmyslu se uplatňuje jako ochranný povlak nebo pro výrobu voštinový jader.[1]

Třída 2xxx

Druhá třída zahrnuje slitiny Al-Cu a Al-Cu-Mg. Jedná se o nejvíce používanou třídu hliníkových slitin. Dosahuje vysokých hodnot pevnosti, tvrdosti a lomové houževnatosti (lze zlepšit snížením obsahu železa a křemíku, které patří k tzv. nežádoucím prvkům ve slitině). Slitiny s obsahem manganu mají vyšší pevnost. Měď obsažená ve slitině negativně ovlivňuje korozivzdornost, tu lze zlepšit plátováním z vysoce čistého hliníku. Přítomnost mědi také

zhoršuje svařitelnost. Je možné dosáhnou širokého rozsahu hodnot mechanických vlastností díky možnosti tepelného zpracování. Slitiny třídy 2xxx díky dobrému poměru pevnosti a měrné hmotnosti nachází velmi široké uplatnění např. ve výrobě draků letadel, koster automobilů, disků kol, zavěšení kol, žeber, výztuží, vnější plášťů či nýtů.[1]

Třída 3xxx

Do této kategorie spadají slitiny Al-Mn a Al-Mn-Mg. Jsou to velmi tvárné a korozivzdorné materiály s dobrou svařitelností. Nelze je tepelně zpracovat, ale je možné je deformačně zpevnit. Rozpustnost manganu v hliníku je velmi nízká (do 1,5 %), proto existuje jen několik běžně používaných slitin. Uplatňují se především pro výrobu částí, které nejsou namáhané. V leteckém průmyslu slouží hlavně pro výrobu nádrží a potrubí.[1]

Třída 4xxx

Slitiny této třídy tvoří soustavu Al-Si. Rozpustnost křemíku v tuhém roztoku s hliníkem dosahuje 12 %, taktó vysoký obsah ztlačně snižuje teplotu tání slitiny. Této vlastnosti se využívá při výrobě svařovacích drátů a pájky. Třída 4xxx se také používá pro výrobu pístů spalovacích motorů pro její nízkou teplotní roztažnost a odolnost vůči opotřebení. Slitina je tepelně nezpracovatelná. [1]

Třída 5xxx

Třída 5xxx obsahuje slitiny na bázi Al-Mg a Al-Mg-Mn, které jsou charakteristické dobrou pevností, svařitelností, korozní odolností (zejména ve sláném prostředí) a schopností tlumit vibrace. Za vyšších teplot je náchylná ke koroznímu praskání pod napětím. Pro lepší mechanické vlastnosti lze slitiny deformačně zpevnit. To platí pouze pro slitiny s obsahem magnesia mezi 5 % a 6 %. Slitiny Al-Mg jsou používané pro výrobu méně namáhaných dílů např. kryty motorů, nádrže a jiných vibrujících částí.[1]

Třída 6xxx

Hlavními legujícími prvky třídy 6xxx jsou křemík a hořčík. Při vhodném poměru obsahu těchto prvků je slitina tepelně vytvrditelná, ale zvýšení pevnosti není tak výrazné jako u slitin třídy 2xxx a 7xxx. Slitiny na bázi AL-Si-Mg se obecně vyznačují dobrou svařitelností, obrobiteľností a odolností proti korozi. Slitina nachází uplatnění při výrobě méně namáhaných svařovaných konstrukcí.[1]

Třída 7xxx

Třída 7xxx pojímá slitiny hliníku s obsahem zinku (1 % - 8 %). Ke zlepšení pevnostních vlastností jsou slitiny legovány hořčíkem. K dalším přísadám patří měď a chrom. Tyto slitiny obecně dosahují nejvyšších pevností při pokojové teplotě. Lze je tepelně zpracovat vytvrzováním. Vyznačuje se podobnými vlastnostmi jako slitiny Al-Cu-Mg, ale oproti nim mají vyšší pevnost a lepší odolnost proti korozi pod napětím. Negativní vlastností je vyšší pokles

pevnosti s rostoucí teplotou. Používají se pro výrobu plášťů, draků, žeber, výztuhy nebo přepážek letadel.[1]

Třída 8xxx

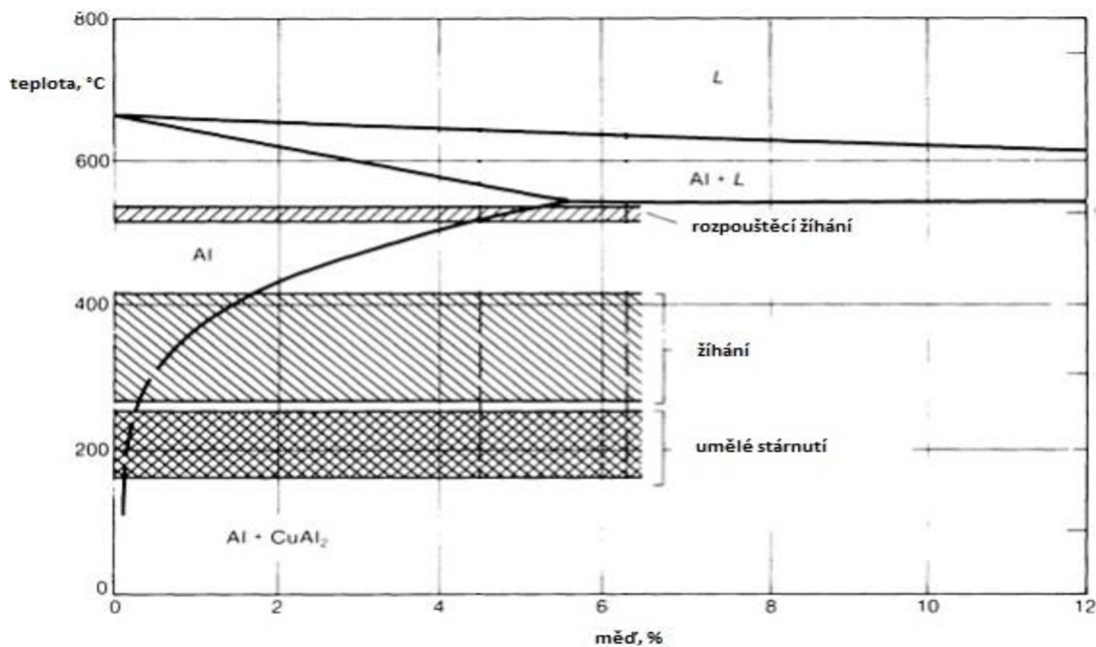
Jedná se o slitiny s přídavkem lithia Al-Li, Al-Li-Cu a Al-Cu-Li. Tyto slitiny byly vyvinuty speciálně pro letecký, kosmický a vojenský průmysl. Přítomnost 1% lithia snižuje měrnou hmotnost o 3 % a zvyšuje Youngův modul až o 6 %. Dalšími výhodami jsou vysoká pevnost, dobrá lomová houževnatost při nízkých teplotách a vyšší únavová odolnost. Nevýhodou je náchylnost ke koroznímu praskání pod napětím, a především vysoká cena.[1]

Slitiny s přídavkem skandia

Slitiny s obsahem skandia tvoří vlastní třídu. Do zavedených slitin se přidává malé množství pro zlepšení mechanických a technologických vlastností. Slitiny jsou vytvrditelné precipitátem Al_3Sc , jeho přítomnost zvyšuje pevnost, odolnost proti praskání za zvýšených teplot a zlepšuje svařitelnost. Výhodou je snadnější dostupnost např. oproti slitinám na bázi lithia.

2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN

Čistý hliník se v letecké výrobě příliš nevyužívá, aplikuje se především jako ochranné plátování proti korozi nebo jako materiál voštinových jader. Pro využití v konstrukčních aplikacích se využívá slitin hliníku. Výsledné vlastnosti hliníkových slitin závisí velkou měrou na jejich chemickém složení a technologickém zpracování, které ovlivňuje konečné mechanické a fyzikální vlastnosti. Technologické zpracování hliníku lze rozdělit na slitiny zpracovávané za tepla a za studena. Tepelné zpracování zahrnuje žhání a precipitační vytvrzování, ty se procesně liší především dosaženou teplotou (obr.1) a výdrží. Mezi vytvrditelné slitiny řadíme třídy 2xxx, 6xxx, 7xxx a 8xxx. V případě nevytvrditelných slitin je možné dále jejich mechanické vlastnosti zlepšit deformačním zpevněním nebo vhodnou kombinací ohřevu a chlazení. Deformace v jednotkách procent celkové tloušťky a je realizována válcováním nebo vypínáním. Výsledkem je mírné zlepšení tvrdosti a pevnosti.

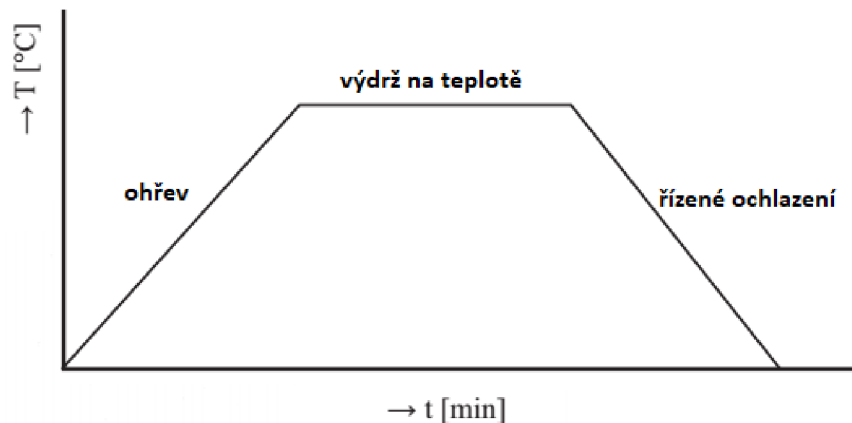


Obrázek 1: Část binárního diagramu Al-Cu s vyznačenými rozsahy teplot tepelného zpracování. [2]

Během tepelného zpracování je obecně kladen důraz na přesné dodržování předepsaných teplot, doby výdrže na teplotě a rovnoměrnosti ohřevu zpracovávaného materiálu. Dále nesmí v žádném případě dojít k překročení teploty solidu. Byť jen chvilkové přehřátí způsobí natavení hranic zrn materiálu a tím dojde k jeho nevratnému znehodnocení. V případě nedostatečné teploty lze pomocí žhání vrátit strukturu materiálu do původního stavu a následně tepelné zpracování opakovat. Předepsané postupy pro tepelné zpracování jsou převážně určeny empiricky. Obecně platí, že jen velmi málo slitin je v průmyslu používáno bez tepelného zpracování. V praxi jsou nejčastěji používány vytvrditelné hliníkové slitiny řady 2xxx.

2.1 ŽIHÁNÍ SLITIN HLINÍKU

Žihání je tepelný technologický postup, při kterém je slitina zahřata pod teplotu solidu s časovou výdrží a následným řízeným ochlazením (obr.2). Po žihání se struktura materiálu vyznačuje nízkou pevností a vysokou tvárností. Žihání je možné aplikovat pro vytvrditelné i nevytvrditelné slitiny.



Obrázek 2: Obecné schéma žihacího cyklu [12]

Rekrystalizační žihání

Tepelné zpracování slitin, které následuje po tváření za studena. Cílem je navrátit materiálu ztracenou houževnatost a tažnost na úkor pevnosti a tvrdosti zvýšených po tváření. Konečný stav je v ideálním případě shodný s rovnovážným stavem slitiny. Postup žihání je volen, tak aby nedošlo k velkému nebo nerovnoměrnému zhrubnutí zrna. Podmínkou správného výsledku žihání je vyšší hodnota deformace před samotným procesem. Minimální hodnota deformace je 20 %, optimální 50 %. Interval deformace od 5 % do 15 % [14] je nazýván kritický. Chceme-li dosáhnout dobrého výsledku je nutné se této oblasti vyhnout. Důležitý je také rychlý a zároveň rovnoměrný ohřev na rekrystalizační teplotu a co možná nejkratší prodleva na teplotě. Nevytvrditelné slitiny mohou být jednoduše ochlazovány na vzduchu. To však neplatí pro všechny vytvrditelné slitiny, u některých může při volném ochlazování docházet k přesycení tuhého roztoku, po kterém samovolně dochází k přirozenému stárnutí a tím i ke změně vlastností materiálu. Přesycení lze předcházet pomalejším ochlazováním např. v peci. [12]

Žihání ke snížení (odstranění) vnitřního pnutí

Nežádoucí vnitřní pnutí v běžných součástech vzniklé během výrobního procesu lze snížit žiháním při teplotě od 200 do 250 °C. Na této teplotě setrvá součást v peci od 1 do 4 hodin v závislosti na tvaru a tloušťce. Následuje volné ochlazení na vzduchu nebo řízené v peci. Pokud technologie výroby vyžaduje úplné odstranění pnutí, lze toho dosáhnout žiháním při teplotě od 250 do 350 °C, a to na úkor mírného snížení některých mechanických vlastností. U odlévaných dílů je nutné dobu výdrže na teplotě prodloužit, v krajních případech až na 8 hodin. V případě svařovaných dílů může horní teplota žihání dosahovat až 400 °C. Není vhodné překračovat teplotu 410 °C, při které hrozí zhrubnutí zrna a oxidace povrchu. Toto tepelné

zpracování je možné provádět u nevytvrditelných slitin nebo před samotným precipitačním vytvrzováním.[14]

Stabilizační žihání

Stabilizační žihání je užíváno u součástí pracujících za proměnlivých nebo zvýšených teplot. Cílem je snížit vnitřní pnutí, stabilizovat strukturu materiálu a jeho rozměry. Mezi praktické výhody stabilizačního žihání patří zvýšení meze únavy a korozní odolnosti. Žihací teplota je volena tak aby ležela nad horní hranicí intervalu předpokládaných pracovních teplot dílu. Běžně se tato hodnota nachází v rozmezí od 240 °C do 350 °C. Pakliže je dílec precipitačně vytvrzený, nesmí teplota stabilizačního žihání překročit horní teplotu vytvrzování. Toto omezení lze kompenzovat opakováním žihacího cyklu.[12]

Žihání na měkko

Toto tepelné zpracování slouží k vytvoření rovnovážné struktury (s co největším počtem vyloučených koagulovaných precipitátů) bez vnitřního pnutí s nejnižší hodnotou pevnosti. Žihací teplota se nachází v intervalu od 350 do 450 °C s výdrží od 1 do 6 hodin. Ochlazení probíhá na vzduchu pro nevytvrditelné slitiny, pro vytvrditelné je nutné kontrolované chladnutí až po kritickou teplotu. Slitina musí chladnou pozvolna, aby přísadové prvky měly čas difundovat z tuhého roztoku a vyloučily se samostatné fáze.[14]

Homogenizační žihání

Žihání je určeno ke sjednocení chemického složení dílů s velkou chemickou heterogenitou (např. po primární krystalizaci z nerovnovážného stavu). Teplota žihání musí ležet nad teplotou změny rozpustnosti, ta se pohybuje blízko solidu. Doba výdrže se řídí stejnorodostí materiálu. Tvářené slitiny se žihají od 20 min do 1 hodiny. Materiály s horším rozložením chemického složení (odlitky) se žihají zásadně déle a to od 3 do 16 hodin. Značná doba výdrže je nutná, aby měly všechny prvky čas se rovnoměrně difuzně rozmístit v objemu. Z této podstaty bývá homogenizační žihání někdy též nazýváno difuzní. Dlouhá doba žihání zvyšuje míru hruboznosti. Platí, že čím hrubější zrno, tím horší mechanické vlastnosti. Proto je dobré volit kratší možnou dobu žihání. Ochlazování je volné na vzduchu. Operaci lze zařadit do rozpouštěcího ohřevu při precipitačním vytvrzování. [14]

Žihání na rovnovážný stav

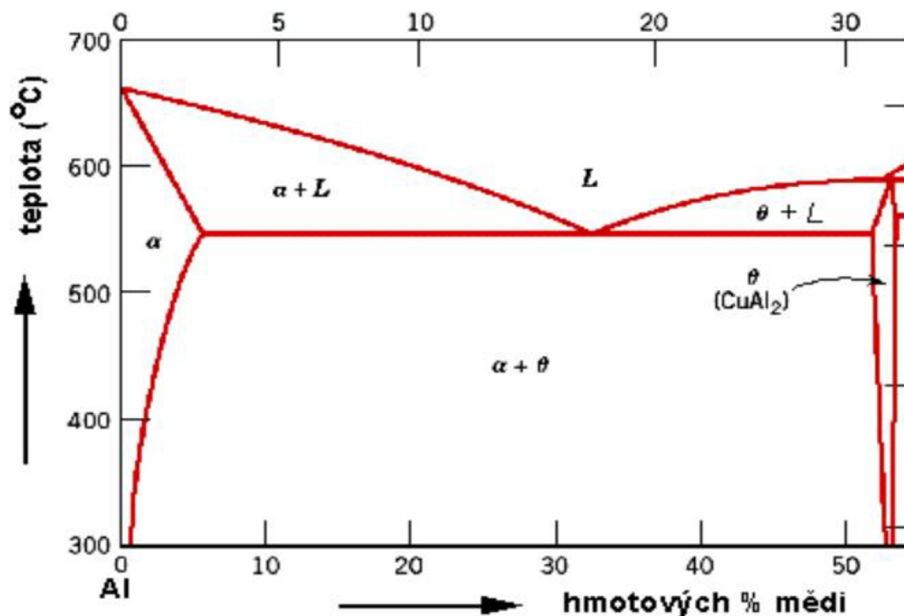
Využívá se k dosažení rovnovážného stavu vytvrzených tvářených i odlévaných slitin. Žihací teplota se nachází v rozmezí od 300 do 400 °C. Po výdrží na teplotě je slitina pomalu ochlazena v peci na 200 °C. Poté je materiál dochlazen volně na vzduchu.[12]

2.2 PRECIPITAČNÍ VYTVRZOVÁNÍ

Precipitační vytvrzování je teplený technologický postup, kterým je možné do určité míry ovlivnit mechanické a fyzikální vlastnosti slitin s vhodným chemickým složením.

2.2.1 PODSTATA PRECIPITAČNÍHO VYTVRZOVÁNÍ SLITIN HLINÍKU

Během působení napětí dochází v materiálu k přesunu dislokací přítomných ve struktuře. Dislokace v hliníkových slitinách se lehce přesouvají a materiál se tak snadno deformuje. Aby byl materiál více odolný vůči deformacím, je nezbytné zabránit pohybu dislokací. Toho lze docílit vytvořením překážek v jejich pohybu v podobě malých částic ve struktuře. Obecně platí, že čím více je drobných částic rovnoměrně rozprostřených o objemu, tím hůře se v materiálu pohybují dislokace. Vnější projev omezení pohybu dislokací je vyšší pevnost, tvrdost a nižší tažnost. Pro vytvoření takových částic je nutné zvolit vhodnou slitinu, která je za určitých teplot jednofázová a po její ochlazení dojde ke tvorbě nové fáze z přesyceného tuhého roztoku. Pro nejběžnější slitiny hliníku vytvrzované mědí, musí být její obsah do 5,7 % (obr.2). Dále je třeba technologicky zajistit rovnoměrnou distribuci, množství a velikost nových částic. Proces tvorby nové fáze v struktuře se nazývá precipitační vytvrzování.

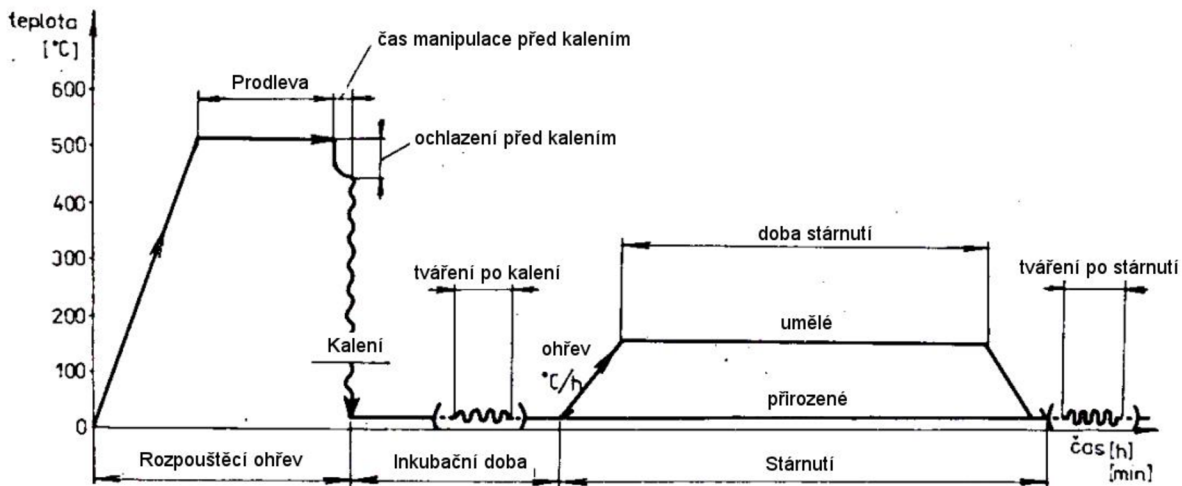


Obrázek 3: Diagram binární soustavy Al-Cu s výraznou změnou rozpustnosti [12]

Precipitační vytvrzování hliníkových slitin označuje soubor technologických operací skládající se ze tří základních procesů (obr.3):

- rozpouštěcí ohřev,
- kalení,
- stárnutí.

Tyto základní operace lze doplnit o tváření (rovnání, tvarování, vypínání nebo válcování) po kalení nebo po stárnutí. Tímto postupem je možné dále ovlivnit mechanické či fyzikální vlastnosti materiálu, tak aby odpovídaly požadavkům.



Obrázek 4: Schéma průběhu precipitačního vytvrzování [12]

Základní podmínkou precipitačního vytvrzování je schopnost slitiny měnit rozpustnost přísad se změnou teploty. Tuto vlastnost má v určitém rozsahu většina hliníkových slitin. Hliníkové slitiny lze z hlediska tepelného zpracování rozdělit na nevytvrditelné a vytvrditelné. Za vytvrditelné považujeme ty, které mají dostatečně výrazné pásmo změny rozpustnosti. Soustavy, u kterých lze vytvrzování provádět jsou:

- Al-Cu (slitiny třídy 2xxx) vytvrzujícím precipitátem je CuAl_2 ,
- Al-Cu-Mg (slitiny třídy 2xxx) vytvrzujícím precipitátem je CuAl_2
- Al-Mg-Si (slitiny třídy 6xxx) vytvrzujícím precipitátem je Mg_2Si ,
- Al-Zn-Mg (slitiny třídy 7xxx) vytvrzujícím precipitátem je MgZn_2 ,
- Al-Zn-Mg-Cu (slitiny třídy 7xxx),
- Al-Li (slitiny třídy 8xxx) vytvrzujícím precipitátem je Al_2Li ,

U tvářených slitin hliníku tvoří podstatné prvky měď a hořčík, které jsou vylučovány v podobě precipitátů. U litych materiálu je přítomen navíc křemík, který zlepšuje slévárenské vlastnosti. Doplnkovými prvky jsou magnésium a zinek. Malé množství magnésia či zinku ve slitině má kladný vliv na precipitační vytvrzování a urychluje jej [1].

2.2.2 ROZPOUŠTĚCÍ OHŘEV

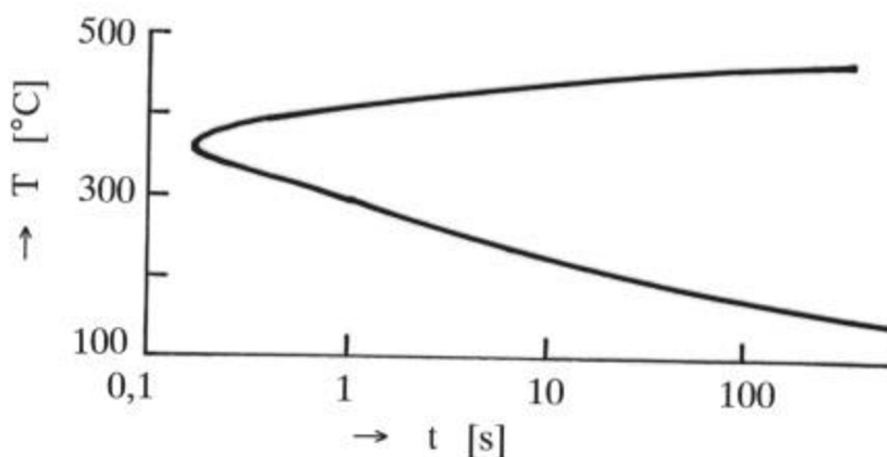
Při tomto tepelném procesu je materiál přiveden na požadovanou rozpouštěcí teplotu s danou výdrží. Dochází k rozpuštění intermetalických fází segregovaných na hranicích zrn a tím k vytvoření homogenního tuhého roztoku α . Teplota se pohybuje těsně pod křivkou solidu. Teplotu je nutné udržovat v toleranci $\pm 5^\circ\text{C}$ [13]. V případě překročení hraniční teploty dochází k natavení hranic zrn a tím k celkovému znehodnocení materiálu. Pokud má materiál

nedostatečnou teplotu nedojde k úplnému rozpuštění segregátů. Doba výdrže závisí především na tloušťce a složitosti zpracovávaného materiálu, čím větší a složitější díl, tím delší je doba výdrže. Dalším aspektem je vnitřní struktura. Jemnozrnné tvářené slitiny potřebují k rozpuštění podstatně kratší dobu než litá struktura s velkými segregáty. Výdrž je volena dle zkušenosti. Příliš dlouhá výdrž na rozpouštěcí teplotě má negativní vliv na hrubnutí zrna, proto je nutné tuto dobu zkrátit na nezbytné minimum. U povrchů s ochranou vrstvou jiného kovu hrozí při zvýšené teplotě difuze prvků z ochranné vrstvy do základního materiálu.

2.2.3 OCHLAZENÍ

Dostatečně rychlým ochlazením dosáhneme setrvání slitiny v homogenním stavu i za normální teploty. Rychlost ochlazování závisí na typu slitiny a rozměrech kalené součásti. Nejjednodušším případem jsou slitiny s vysokou stabilitou přesyceného tuhého roztoku, které lze ochlazovat na vzduchu (tzv. samokalitelné). Běžné slitiny s jednouchým tvarem kalíme do vody o teplotě 20 °C. Složitější výrobky, kde hrozí deformace, použijeme vodu o teplotě 50 °C, výjimečně až 80°C. Díly pro náročné aplikace je možné kalit ve vodní mlze. Nesprávným ochlazením dojde k částečné segregaci na hranici zrna. K tomuto jevu může taky dojít při příliš dlouhé manipulaci mezi vyjmutím z pece a ponořením do kalící lázně. Snahou je, aby byla doba manipulace co nejkratší, obecně je maximální doba 5 s [13].

Ochlazování musí probíhat kritickou nebo nadkritickou rychlostí. Kritická rychlost je definována jako nejmenší rychlost ochlazování z rozpouštěcí teploty, při které nenastává rozpad přesyceného tuhého roztoku. Pro určení kritické rychlosti ochlazování existují tzv. C křivky. Každá slitina má vlastní C křivky (obr.5). Povedeme-li z žíhací teploty tečnu k C křivce materiálu, v průsečíku vodorovné osy získáme čas nutný k ochlazení materiálů na danou teplotu. Teplota a doba ochlazení dohromady udávají kritickou rychlost ochlazování, při které ještě dojde ke vzniku přesyceného tuhého roztoku za normální teploty.



Obrázek 5: C křivka slitiny 2024 [12]

Výsledná pevnost slitiny při různé rychlosti ochlazování není stejná. Některé hliníkové slitiny jsou velmi citlivé na rychlost ochlazování, např. slitin typu Al-Zn-Mg. Pro volbu vhodného kalícího prostředí slouží Grossmannův faktor H [14]:

$$H = \frac{q}{A \cdot (T_1 - T_2)} \cdot \frac{1}{2 \cdot k}$$

kde q [W] je tepelný tok, A [m²] plocha kaleného materiálu, T_1 [K] teplota povrchu kaleného materiálu a T_2 [K] teplota kalícího média. Vzorec vyjadřuje poměr mezi koeficientem povrchové vodivosti (jmenovatel) a dvojnásobkem tepelné vodivosti kaleného materiálu k [W m⁻² K⁻¹].

Významným činitelem, který není zahrnut v Grossmannovu vzorci, je proudění chladícího média (případně kalené součásti). Proudění významně zvyšuje intenzitu chlazení. Pokud je kalícím médiem voda, je proudění kapaliny nutné, protože na horkém povrchu kaleného materiálu dochází k tvorbě bublin při odpařování. Pokud nejsou bubliny rozháněny, dochází ke snížení chladícího účinku. Dalším aspektem ovlivňujícím volenou rychlost ochlazování je zbytkové vnitřní pnutí. Rychlost ochlazování má také vliv na výsledné korozní vlastnosti [12]. Příkladem opatření proti negativním vlivům vyvolaných volbou rychlostí ochlazování jsou technologické operace jako převálcování, napínání nebo kalení v lisu.

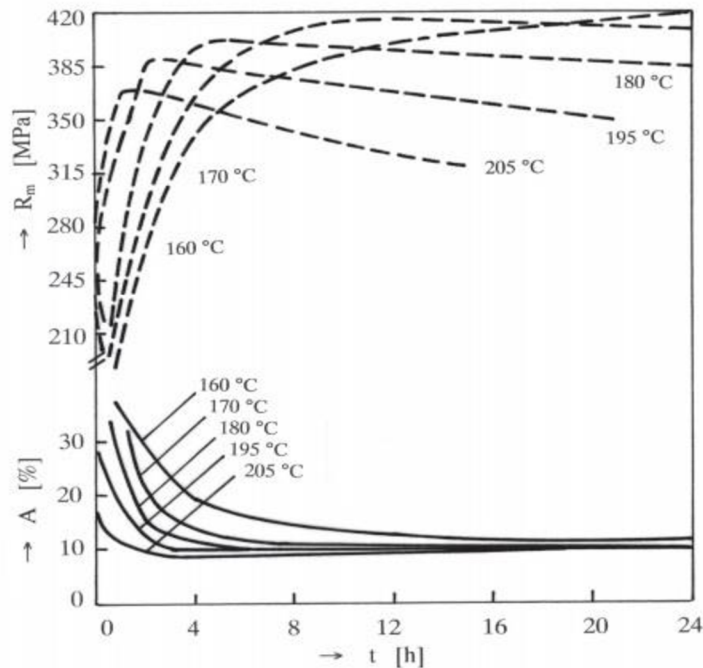
2.2.4 STÁRNUTÍ HLINÍKOVÝ SLITIN

Jako stárnutí označujeme rozpad přesyceného tuhého roztoku, ze kterého se za působení dané teploty a času vylučují precipitáty. Děj rozdělujeme podle teploty na přirozené stárnutí probíhající od -20 °C do 60 °C [2] a na umělé, probíhající za zvýšených teplot od 115 °C až do 190 °C [2]. Přirozené stárnutí začíná téměř okamžitě po dokončení kalení. Doba, za kterou je proces ukončen závisí na typu slitiny. Některé slitiny mohou být považovány za precipitačně vytvrzené po několika dnech. U jiných slitin je proces stárnutí považován za ukončený po několika měsících. Takový dlouhý čas je pro logistiku a ekonomiku ve výrobě nepřijatelný a tyto slitiny jsou před použitím vytvrzovány uměle. Poslední skupinou jsou slitiny, které je možné vytvrzovat přirozeně (v akceptovatelné době) i uměle. Volba typu vytvrzování záleží na požadovaných výsledných vlastnostech. Je-li nutné dosáhnout vyšších mechanických vlastností, volí se stárnutí umělé. Pokud postačují pro aplikaci nižší pevnostní hodnoty, provádí se přirozené stárnutí.

U některých slitin je možné precipitační proces zastavit nebo velmi výrazně zpomalit uložením zakalené slitiny do mrazícího boxu. Mrazení probíhá za teploty pod -18 °C [14]. Této vlastnosti se využívá pro vložení mezioperace válcování u plechů nebo vypínání u profilů, které zvyšují výsledné mechanické vlastnosti. Tento složitý postup se v praxi provádí, protože hliníkové slitiny jsou po zakalení měkké a tvárné, a to právě díky absenci precipitátů bránícím deformaci. Je důležité udržovat materiál podchlazený pod -18 °C v celém objemu. Zvýšení teploty části materiálu (např. při vyjímání jiných dílů) může vést k částečnému lokálnímu vytvrzení a tím ke znehodnocení celého materiálu.

2.2.4.1 ROZPAD PŘESYCENÉHO ROZTOKU

Soubor fyzikálních, mechanických, technologických změn probíhajících během stárnutí nazýváme kinetikou rozpadu přesyceného tuhého roztoku. Nejvyšší dosažitelné hodnoty ovlivňují chemické složení, teplota a čas. Aby bylo dosaženo maximálních hodnot nebo určité kombinace vlastností, je nutná znalost křivek kinetiky rozpadu slitiny (obr.6). Tyto křivky jsou pro každou slitinu specifické. Z těchto grafů lze určit správný technologický postup vytvrzování.[14]



Obrázek 6: Křivky kinetiky rozpadu přesyceného roztoku Al-Cu-Mg pro různé teploty stárnutí.[12]

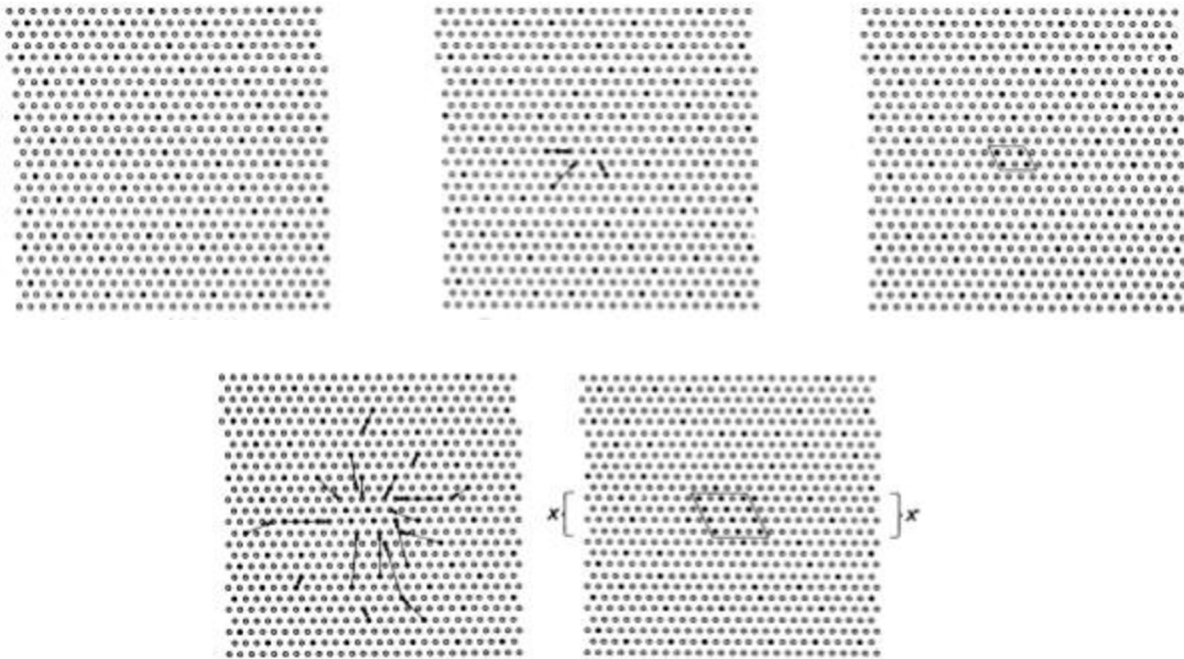
Precipitáty vznikající při vyšší teplotě s delší časovou výdrží na teplotě, jsou velké s nižší distribucí ve struktuře. Naopak při nižší teplotě vytvrzování vznikají menší precipitáty s hustějším zastoupením. Různé kombinace rozložení a velikostí precipitátů mají vliv na konečné mechanické vlastnosti. Obecně platí, že při snaze zvýšit jeden konkrétní atribut jsou jiné degradovány. Při snaze dosáhnout maximální pevnosti klesá mez kluzu, snižuje se tažnost a také snižuje se korozní odolnost. Ze znalosti o těchto faktech vyplývá kombinace teploty a výdrže při vytvrzování pro optimální vlastnosti.

2.2.4.2 VZNIK PRECIPITÁTŮ

Proces stárnutí slitiny provází složité strukturální změny. Precipitace probíhá pod křivkou změny rozpustnosti. Během precipitace v přesyceném tuhém roztoku postupně vznikají, zanikají nebo koexistují různé typy precipitátů, které mají koherentní, částečně koherentní či nekoherentní charakter. Z časového hlediska je kompletní proces následující [1]:

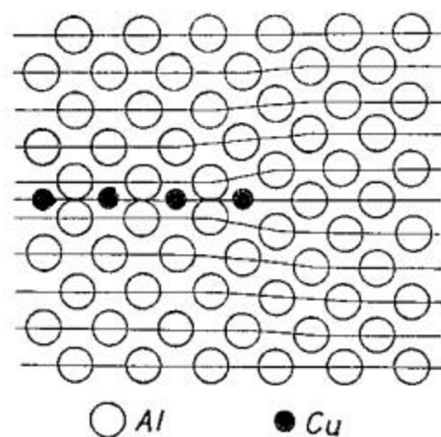


Krátce po ukončení kalení dochází v přesyceném tuhém roztoku k difuznímu pohybu atomů přísady. Tyto atomy se shlukují, což má za následek vznik zón s vyšší koncentrací této příměsi (obr.7). Během této fáze současně dochází k pohybu vakancí v určitých krystalografických směrech, tím vytváří charakteristické spirálové dislokace.[2] V místě přechodu mezi vyšší a nižší koncentrací přísady vznikají zárodky nové fáze bohaté na přísadu. Jako první probíhá nukleace principátů nazvaných Guinier-Prestonova pásy (zkráceně GP). Pásy GPI se rozrůstají v rovinách rovnoběžných se stěnami krystalové mřížky a vytváří koherentní pole.[2]



Obrázek 7: Schéma shlukování atomů přísady po zakalení [2]

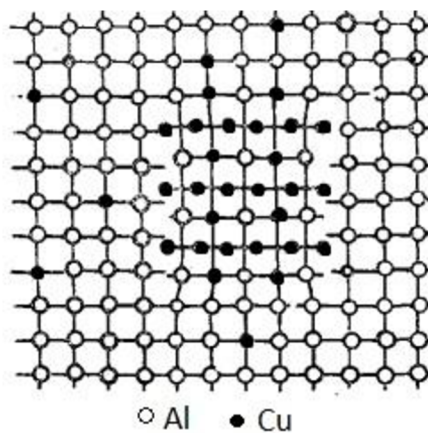
V tomto okamžiku je krystalová struktura shluku atomů a základního materiálu stejná. V místě koncentrace atomů přísady dochází ke vzniku napětí v důsledku rozdílných velikostí atomů hliníku a přísady (obr 8).



Obrázek 8: Uspořádání atomů příměsi (Cu) v GPI pásu [14]

Při další stadium precipitace dochází k nukleaci nové fáze podobné Guinier-Prestonovým pásům, proto jsou nazývány Guinier-Prestonovy pásy II. Nová fáze je charakteristická tvorbou destičkových útvarů v pravidelně se střídajících vrstvách. Stejně jako GPI má koherentní charakter. Fáze roste v rovinách rovnoběžných se stěnami základní krystalové mřížky. Vznik GPII není závislý ani podmíněný předchozím vznikem GPI fáze a mohou existovat v určitém teplotním intervalu současně. Vznikem GPII končí přirozené vytvrzování.[14]

V případě slitiny vytvrzované uměle je počáteční tvorba GP pásů identická. V dalším stádiu dochází od určité teploty a za určitý čas ke vzniku částečně koherentní fáze θ' (obr.7). Vzniklý precipitát má tetragonální mřížku, jeho základ je obsazen 4 atomy mědi a 8 atomů hliníku (obr. 9).

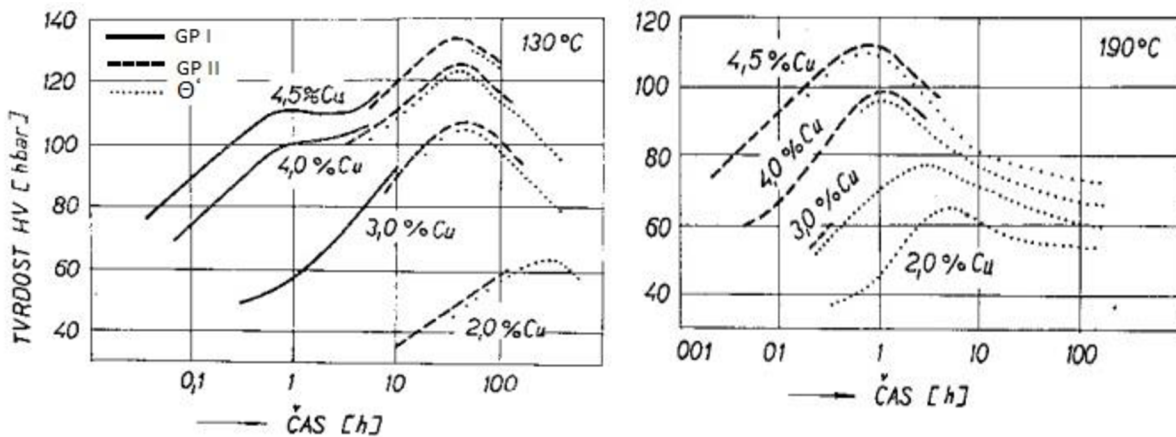


Obrázek 9: Uspořádání atomů příměsi (Cu) v částečně koherentní fázi [14]

Poslední stádium precipitace nastává za určité teploty a po dostatečně dlouhé době stárnutí. Za těchto podmínek se částečně koherentní fáze θ' mění na zcela nekoherentní strukturu θ . V případě slitiny Al-Cu má tato fáze chemické složení Al_2Cu . Zároveň vytvoření těchto nekoherentních struktur má za následek snížení pevnosti a tvrdosti a zvýšení houževnatosti a tažnosti.

2.2.4.3 ZÁKONITOSTI TVORBY RŮZNÝCH PRECIPITÁTŮ A JEJICH VLIV NA VLASTNOSTI

Tvorba typu precipitátů je závislá na teplotě vytvrzování, výdrži na teplotě i obsahu příměsi. Na obr. 10 je graficky znázorněn výsledek experimentu se slitinami Al-Cu s různým obsahem mědi, který zachycuje průběh existence různých precipitátů. Srovnávací veličinou je tvrdost, která reprezentuje míru vytvrzení.

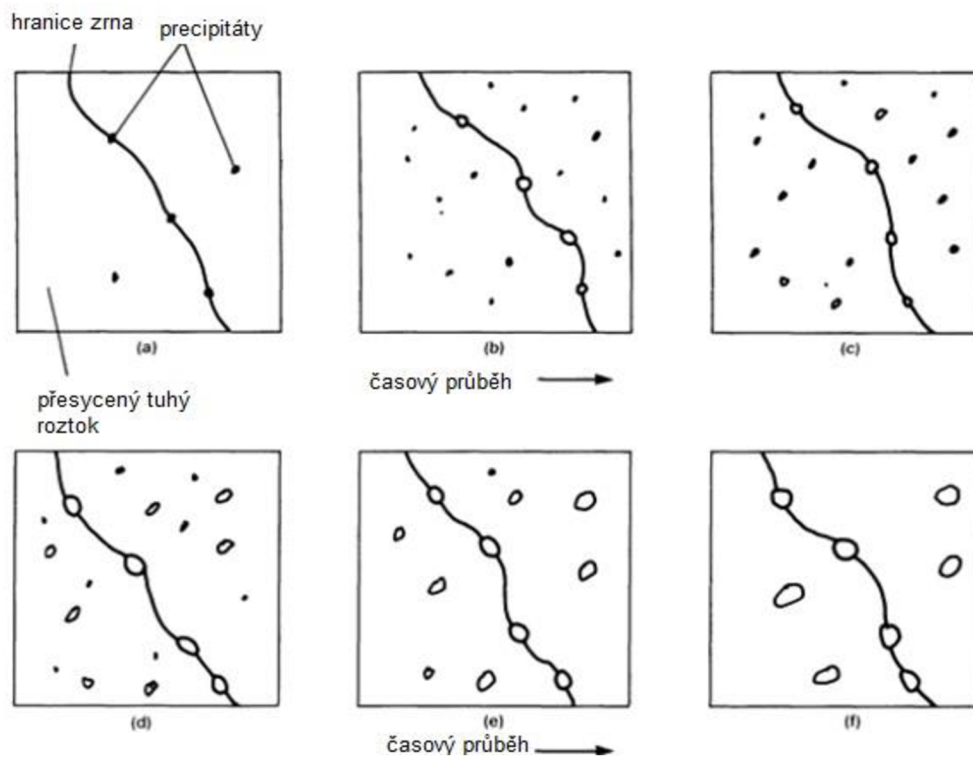


Obrázek 10: Průběh tvrdosti v závislosti na době precipitace za teploty 130 °C a 190 °C.[14]

Z obr.10 vyplývá, že při nižších teplotách vytvrzování u slitin bohatých na měď dochází nejprve ke vzniku GPI, s narůstajícím časem roste velikost a počet těchto zón a tím dochází ke zvyšování tvrdosti (obr 11a,b,c). Po uplynutí určité doby se zóny GPI rozpouštějí a současně začínají vnikat precipitáty GPII. V krátkém intervalu jsou ve struktuře přítomny oba typy precipitátů. Po přibližně 50 hodinách dochází k tvorbě precipitátů θ' . Vznik fáze θ' je zpočátku doprovázen dalším zvyšování tvrdosti (vytvrzení). Od určitého množství precipitátů θ' ve struktuře dochází ke zhoršení jeho rozložení v objemu a tím ke snížení tvrdosti. Tento stav je nazýván přestárnutí.

U slitin s nižším obsahem mědi vzniká menší počet precipitátů a tím pádem nedochází k tak velkému zvýšení tvrdosti. Zároveň dochází k tvorbě GP pásů později a jejich existence ve struktuře je omezená. U slitin s velmi nízkým množstvím mědi nedochází ke vzniku GPI zón, přímo vznikají GPII a následně θ' .

Zvýšení teploty při vytvrzování u stejných slitin dochází ke vzniku prvních precipitátů mnohem dříve. Z obr. 10 je patrné, že při teplotě 190 °C již nedochází k tvorbě GPI ani u slitin bohatých na měď. Pro slitiny s obsahem mědi pod 3 % již téměř nevznikají žádné koherentní precipitáty a slitiny jsou vytvrzovány pouze precipitátem θ' . K přestárnutí slitiny dochází po výrazně kratším čase (obr 11e, f).



Obrázek 11: Vývoj a velikosti precipitátů v čase [2]

2.3 OZNAČOVÁNÍ TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ

Značení stavů tepelného zpracování se řídí normou ČSN EN 515. Tato norma byla převzata od americké organizace ASM (American Society for Metals). Kompletní norma zahrnuje značení deformačně zpevněných stavů, žíhané stavy, stárnutí a jejich kombinace. Kódované značení se skládá z prvního písmene označující technologické zpracování (F – nespecifikováno, O – různé, H – deformační zpevnění, W – rozpouštěcí žíhání, T – vytvrzování) a čísla. První číslo je základní postup zpracování, případná další čísla rozšiřují základní postup (obr.12).

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 trvalé 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 trvalé deformace (0.5 – 3 % pro plechy, 1.5 – 3 % pro desky, 1 – 3 % pro tyče, 1 – 5 % pro výkovky a válcovaný kruh) a umělém stárnutí. Po vypnutí se tyto výrobky dále nevyrovnávají.
T6510	Po rozpouštěcím žíhání, uvolnění vnitřního pnutí vypnutím řízenou velikostí trvalé deformace (1 – 3 % pro tyče, profily a trubky, 0.5 – 3 % pro tažené trubky) a umělém stárnutí. Po vypnutí se tyto výrobky dále nevyrovnávají.
T6511	Stejný jako T6510, ale s tím rozdílem, že po vypnutí se připouští mírné vyrovnání za účelem vyhovění normalizovaným mezním úchylkám.
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).

Obrázek 12: Ukázka možných variant tepelného zpracování T6.[4]

3 PŘÍPRAVA EXPERIMENTU

Podstatou experimentu bylo opakování precipitačního vytvrzení u tří vybraných již tepelně zpracovaných hliníkových slitin. Během stárnutí byla sesbírána data o průběhu tvrdosti a pevnosti. Ze získaných dat byly sestaveny digramy tvrdost-pevnost. Pro rozšíření charakteristiky bylo zařazeno i žihání na měkko u všech tří slitin. Z materiálových norem byly určeny podmínky pro tepelné zpracování jednotlivých slitin. Pro určení vztahu mezi tvrdostí a pevností byly zvoleny slitiny, které jsou velmi často využívány v leteckém průmyslu. Jako nejvhodnější byly vybrány dvě přirozeně vytvrzené slitiny druhé třídy 2017, 2024. Jako zástupce uměle stárnutých slitin byla zvolena slitina 7075.

3.1 CHARAKTERISTIKA ZKOUŠENÝCH MATERIÁLŮ

Hliníková slitina 2017 T4

Označení slitiny dle ČSN EN 573-3: EN AW-2017A T4, starší označení dle ČSN: 42 4201, chemické označení: AlCu4MgSi(A). Mezi negativní vlastnosti patří horší svařitelnost a snížená korozní odolnost. Dosahuje dobrých mechanických vlastností, které jsou nižší než u slitiny 2024. Využívá se pro výrobu spojovacích komponent, panelů, nebo žeber. Přířez z hliníkové slitiny o tloušťce 2 mm, tepelně zpracovaný na stav T4, který označuje kombinaci rozpouštěcího žihání a přirozeného stárnutí.[4] Rozpouštěcí žihání probíhá od 490 °C do 500 °C. Přirozené stárnutí trvá 5 dní [1].

Tabulka 1: Chemické složení 2017 T4 dle výrobce:

Prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
Množství [%]	0,64	0,4	4,3	0,7	0,74	0,05	0,2	0,04

Tabulka 2: Mechanické vlastnosti 2017 T4 dle výrobce:

Mez pevnost v tahu	Mez kluzu	Tažnost
MPa	MPa	%
441 - 444	304 - 309	18

Hliníková slitina 2024 T351

Označení slitiny dle ČSN EN 573-3: EN AW-2024 T351, starší označení dle ČSN: 42 4203.61, chemické označení: AlCu4Mg1. Jedná se o jednu z nejběžněji používaných slitin v leteckém průmyslu, slouží pro výrobu šroubů, matic, nýtů, těl ventilů, šnekových kol, panelů, rámu, žeber, výztuh, přepážek nebo pouzder [6] [16]. Vyznačuje se horší korozní odolností, kterou lze zlepšit plátováním. Další nevýhodou je horší svařitelnost plamenem. Přířez o tloušťce 2 mm, tepelně zpracovaný na stav T351, který označuje kombinaci rozpouštěcího žihání, řízené deformace (0,5 % - 3 %) a přirozeného stárnutí [4]. Rozpouštěcí žihání může probíhat v rozmezí teplot od 490 až 500 °C. Přirozené stárnutí je ukončeno za 5 dní [7].

Tabulka 3: Typické chemické složení 2024 [1]:

Prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
Množství [%]	0,5	0,5	3,8-4,9	0,3-0,9	1,2-1,8	0,1	0,15	0,05

Tabulka 4: Typické mechanické vlastnosti 2024 T351 [1]:

Mez pevnost v tahu	Mez kluzu	Tažnost	Tvrдость
MPa	MPa	%	HRB
470	325	20	66,7

Hliníková slitina 7075 T651

Pás plechu s tloušťkou 2,5 mm. Označení slitiny dle ČSN EN 573-3: EN AW-7075 T651, starší označení dle ČSN: 42 4222.61, chemické označení: AlZn5,5MgCu. Vykazuje nejlepší poměr pevnosti a měrné hmotnosti. Slitina je typicky používána v automobilovém, leteckém nebo vojenském průmyslu. V těchto odvětvích nachází využití při výrobě velmi namáhaných součástí, např.: ozubená kola, hřídele, části ventilů, vnější panely, žebra, přepážky nebo výztuže [6]. Slitina 7075 Tepelné zpracování T651, což odpovídá procesu: rozpouštěcí žihání, uvolnění vnitřního napětí řízenou deformací (0,5 % až 3 %), kalení a umělé stárnutí [4]. Teplota žihání musí být volena v rozsahu od 460 °C do 485 °C. Umělé stárnutí probíhá za teploty od 115 °C do 125 °C, čas vytvrzování je volen v rozmezí od 20 do 30 hodin [1].

Tabulka 5: Chemické složení 7075 T651 dle výrobce:

Prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
Množství [%]	0,11	0,24	1,55	0,14	2,31	0,2	5,16	0,04

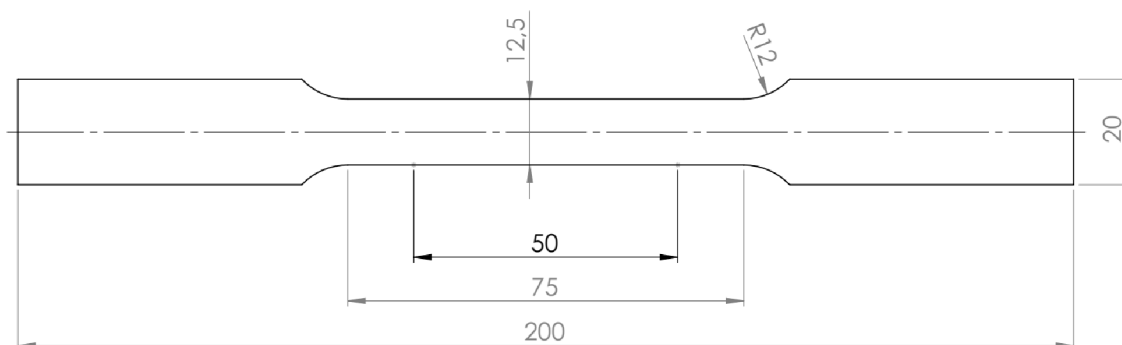
Tabulka 6: Mechanické vlastnosti 7075 T651 dle výrobce:

Pevnost v tahu	Mez kluzu	Tažnost
MPa	MPa	%
540	470	7

3.2 VZORKY

První sada vzorků sloužila pouze pro měření tvrdosti, proto se jedná o jednoduché obdélníkového přístřihy bez předem definovaných rozměrů s tloušťkou polotovaru. Druhá sada vzorků byla určena jak k měření tvrdosti, tak i pro tahovou zkoušku. Z plechového polotovaru bylo vyrobeno 10 kusů vzorků pro tahovou zkoušku z každé zkoušené slitiny. Dle normy pro zkušební tělesa [3] byla zvolena krátká nepoměrná zkušební tyč (obr.13). Celková délka tyče je 200 mm, zúžená zkušební část má délku 75 mm o šířce 12,5mm. Počáteční délka mezi

ryskami pro měření protažení měří 50 mm. Část pro uchycení vzorku má šířku 20 mm. V místě přechodu na užší rozměr je vyroben velký rádius, který snižuje vrubové účinky. Plocha vzorků je neopracovaná s tloušťkou 2 mm pro slitiny 2017 a 2024. Slitina 7075 má tloušťku 2,5 mm.



Obrázek 13: Nepoměrná zkušební tyč pro tahovou zkoušku

Po tahové zkoušce byly vzorky značeny dvojcíselným kódem. První číslice označuje slitinu. Číslo 1 pro slitinu 2017, 2 pro slitinu 2024 a 3 pro slitinu 7075. Druhá číslice označuje pořadí měření. Číslice 0 označuje výchozí nejměkčí stav těsně po zakalení, číslice 1 a dál označují časové pořadí měření.

3.3 OHŘEV A KALENÍ

První pokus probíhal v malé peci bez vnitřní cirkulace vzduchu, kde byl vzorek podroben rozpouštěcímu žihání a následně ochlazen ve vodě. Již při prvotním ohledání byla jedna část hliníkového pásku pokryta sazemi, což naznačovalo nerovnoměrný ohřev nebo dokonce přehřátí této části. Při následném měření pevnosti dosahovaly hodnoty napříč vzorku odlišné hodnoty tvrdosti. Pokus byl označen za neprůkazný. Po této zkušenosti bylo další tepelné zpracování prováděno ve větší peci s vnitřní cirkulací vzduchu (obr.14). Vzorky byly z pece vyjímány kovovými kleštěmi. Ihned po vytažení z pece byl materiál ponořen do plastového sudu s vodou o pokojové teplotě. Po ponoření vzorku do vody bylo s ním pohybováno tak, aby bubliny odpařující se vody na povrchu negativně neovlivňovaly rychlost chlazení.



Obrázek 14: Laboratorní elektrická pec užitá pro tepelné zpracování.

3.4 MĚŘENÍ TVRDOSTI

Tvrдость byla měřena v daném čase vždy před zkouškou pevnosti v tahu. Jako nejvhodnější místo pro měření byla zvolena část pro uchycení těsně před zúžením na obou koncích. V tomto místě měření neovlivní výsledky tahové zkoušky. Měření bylo v každém místě opakováno třikrát a výsledek byl určen aritmetickým průměrem. Cílem je vyloučení chyb měření a tím zpřesnění výsledku. Na obr. 15 jsou viditelné tři vrypy od kuličkového indentoru tvrdoměru. Drobné vrypy po celé ploše upínací části vzorku jsou způsobeny čelistmi trhačího stoje. Tyto vrypy vznikly až po měření tvrdosti, a tudíž nemohly ovlivnit samotné měření.



Obrázek 15: Detail umístění vrypů po měření pevnosti.

Měření tvrdosti probíhalo na digitálním stolním tvrdoměru s automatickým měřením (obr.16). Metoda měření přístroje je dle Rockwella s kuličkovým indentorem (HRB). Před samotným měřením byl přístroj zkalibrován pomocí etalonu. Výsledná tvrdost byla zobrazena na displeji přístroje.



Obrázek 16: Statický digitální tvrdoměr.

3.5 STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

Zkouška probíhala na univerzální trhacím stroji. Zkušební vzorky byly upnuty do čelistí stroje, a to tak, aby síla vyvolaná strojem působila kolmo na průřez. Po správném upnutí následovalo plynulé zatěžování. Během první fáze zatěžování docházelo k protažení, které bylo výraznější u vzorků v měkké stavu. Po překročení meze kluzu se změna délky zpomaluje, protože materiál klade odpor vůči deformaci. Před konečným lomem dochází k pokluzům ve skluzových rovinách svírajících úhel 45° se zatěžující silou. Pokluzu jsou během zkoušky měkkých vzorků (krátce vytvrzených) provázeny charakteristickým zvukovým projevem a jsou pod určitým úhlem okem viditelné na povrchu materiálu.

Standardně je výstupem tahové zkoušky tahový diagram s různými hodnotami. Pro tento experiment je podstatná konečná síla při lomu F_m vzorku a konečná délka vzorku l_0 . Z této síly a výchozího průřezu S_0 změřeného před zkouškou je vypočtena mez pevnosti R_m pro dané stádium precipitačního vytvrzování:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} [MPa]$$

Ze znalosti výchozí a konečné délky je vypočtena tažnost A :

$$A = \frac{l_0 - l_i}{l_0} \cdot 100 [\%]$$

3.6 PRŮBĚHY TVRDOSTI

V první fázi experimentu byly určeny průběhy nárůstu tvrdosti během precipitačního vytvrzování. Tento pokus byl nutný ke stanovení přibližného rozmístění časových bodů měření a k ověření metodiky měření. Pro přirozeně vytvrzené slitiny bylo vybráno 20 rovnoměrně rozložených bodů měření v průběhu celého vytvrzování. U slitiny 7075 vytvrzované uměle bylo stanoveno pouze 8 bodů měření. Důvodem je, že očekávaný nárůst tvrdosti je při umělé precipitaci je mnohem rychlejší.

3.6.1 PARAMETRY TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ SLITIN

Polotovar slitin 2017 byl tepelně zpracován na stav T4. Z rozsahu teplot a výdrže uvedeného v literatuře pro jednotlivé slitiny byly vybrány střední hodnoty z rozsahu. Doba výdrže na teplotě při rozpouštěcím ohřevu byla volena pomocí empirického diagramu, který zohledňuje tloušťku kaleného materiálu. Obdobně bylo určeno kalící prostředí.

Polotovar ze slitiny 2024 byl výrobcem během vytvrzování řízeně deformován, což bylo v daných laboratorních podmínkách nerealizovatelné. Z tohoto důvodu byla slitina rovněž zpracována na stav T4. Tato shoda umožnila zkrátit čas pokusu, protože bylo možné obě slitiny tepelně zpracované současně. Volené hodnoty tepelného zpracování na stav T4 [2]:

- Rozpouštěcí ohřev při teplotě 495 °C po dobu 40 min.
- Kalení do vody o teplotě 20 °C.
- Přirozené stárnutí po dobu 5 dní při pokojové teplotě.

Slitina 7075 byla od výrobce vytvrzena na stav T651, který zahrnuje i deformaci v průběhu zpracování. Vzhledem k omezeným možnostem a jednoduchosti byla slitina při experimentu zpracována pouze na stav T6, tedy bez vložené deformace po zakalení. Vypuštěním 0,5 %-3 % deformace jsou očekávané výsledné mechanické vlastnosti po vytvrzení nižší. Stejně jako v případě vytvrzování na stav T4 jsou hodnoty tepelného zpracování voleny uprostřed rozsahu. Postup tepelného zpracování T6 pro slitinu 7075 [2]:

- Rozpouštěcí ohřev při teplotě 475 °C po dobu 40 min.
- Kalení do vody o teplotě 40 °C.
- Umělé stárnutí za teploty 120 °C po dobu 25 hodin.

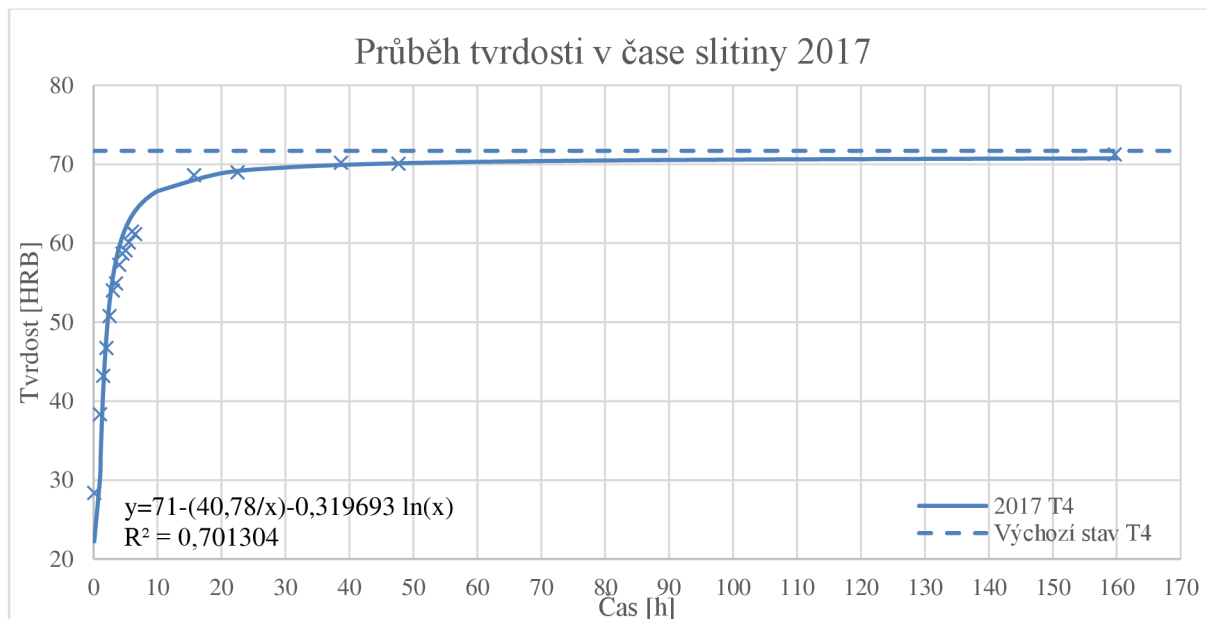
3.6.2 POSTUP EXPERIMENTU PRO SLITINY 2017 A 2024

Nařezané jednoduché vzorky ze slitin 2017 a 2024 byly vloženy do prostoru elektrické pece s vnitřní teplotou 495°C. Teplota v peci byla udržována automaticky pomocí tepelných čidel. Rovnoměrné teplené pole v celém pecním prostoru bylo zajištěno cirkulací vzduchu. Vzorky byly uloženy na izolační podložku, aby nedošlo k ovlivnění teploty v určité části. Vzhledem k rozdílné teplotě vzorků a pecního prostoru bylo k době rozpouštěcího žíhání připočteno 10 minut. Po uplynutí 50 minut byly vzorky v co nejkratším možném čase vyjmuty kleštěmi a ponořeny do předem připraveného barelu s vodou o pokojové teplotě. Při ponoření vzorku do vody začaly okamžitě vznikat bubliny odpařující se vody, ty byly eliminovány pohybem vzorku ve vodě. Míchání je důležité, protože vzniklý plyn má nižší rychlost odhazování. Tento fakt by mohl ovlivnit výsledek kalení. K ochlazení vzorku je potřeba relativně velký objem vody, aby její teplota během kalení nebyla příliš zvýšena. Po zakalení byly vzorky vysušeny hadříkem, aby bylo zamezeno vzniku případné povrchové korozi, která by ovlivnila pozdější měření. Následoval rychlý přesun k tvrdoměru, kde byla změřena tvrdost po zakalení. Další měření tvrdosti následovalo v půl hodinových intervalech po dobu 8 hodin. Dle očekávání by tato část měla pokrýt nejprudší nárůst tvrdosti. Zbývá doba vytvrzování byla pokryta několika body. Zde je už předpoklad nárůstu tvrdosti mírnější. Poslední tvrdost byla měřena po 160 hodinách.

3.6.3 POSTUP EXPERIMENTU PRO SLITINU 7075

Vzhledem k povaze umělého stárnutí bylo potřeba nařezat 8 přířezů, které byly podrobeny rozpouštěcímu žíhání a umělému stárnutí. Postup je obdobný jako v případě přirozeně vytvrzovaných slitin s rozdílnou teplotou a výdrží. Kalení proběhlo rovněž identicky. Další postup již byl rozdílný. U prvního vzorku byla změřena výchozí hodnota tvrdosti. Ostatní vzorky byly vsazeny do pece vyhřáté na teplotu 120 °C. Vzorky byly po 50minutových intervalech vyjímány a byla u nich měřena tvrdost. Poslední vzorek vyjmut po 6 hodinách. Nakonec byla nashromážděná data tvrdosti jednotlivých slitin graficky zpracována a vhodně proložena křivkami.

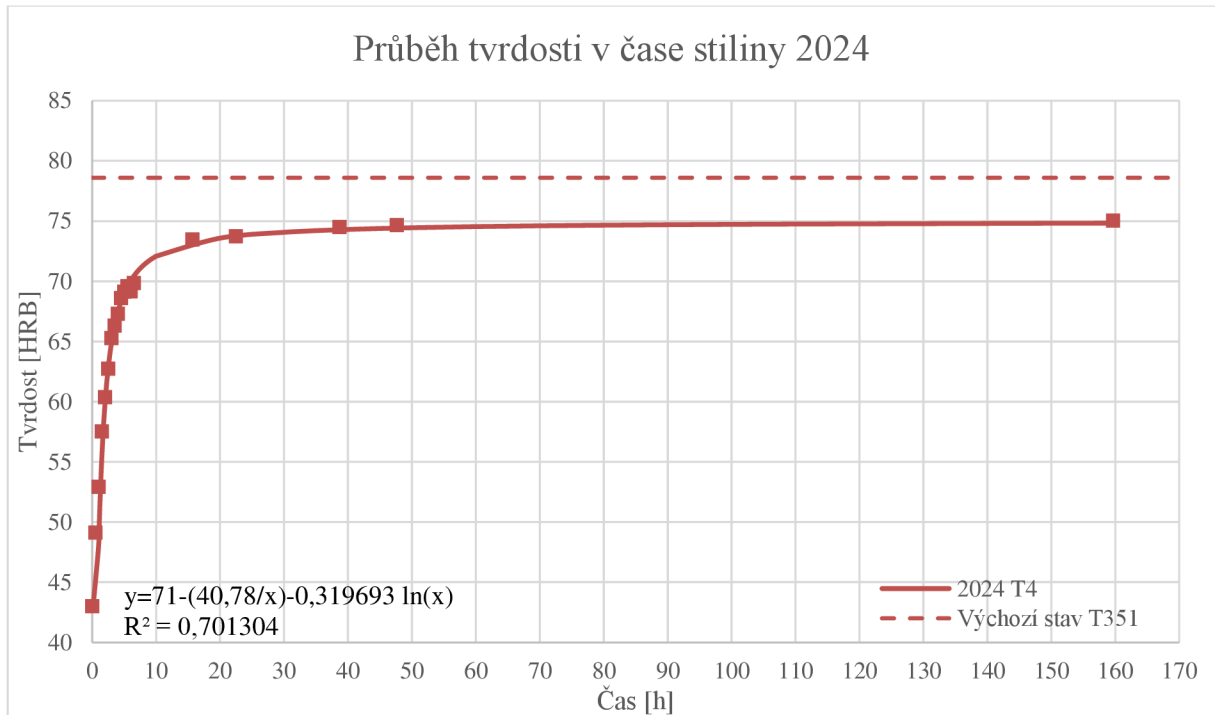
3.6.4 VÝSLEDKY PRVNÍHO MĚŘENÍ TVRDOSTI SLITINY 2017



Graf 1: Průběh tvrdosti během přirozeného vytvrzování slitiny 2017.

Ze zpracovaného průběhu tvrdosti slitiny 2017 (graf 1) je patrný průběh rychlého nárůstu tvrdosti v prvních hodinách a jeho následné ustávání. Počáteční tvrdost 28,4 HRB vzrostla na 59 HRB během 4 hodin vytvrzování. Tento průběh má přibližně lineární charakter. Vytvrzování v následujících hodinách výrazně zpomaluje. Po 24 hodinách precipitace je přírůstek naměřené tvrdosti minimální. Konečná hodnota tvrdosti po 160 hodinách je 71,2 HBR. Tvrdost polotovaru od výrobce byla 71,7 HRB. Po provedeném experimentu je tvrdost o 0,5 HRB menší. Tímto lze považovat reprodukci tepelného zpracování za úspěšnou. Pro další měření byl redukován počet bodů měření v lineární části a byly přidány body do zakřivení průběhu.

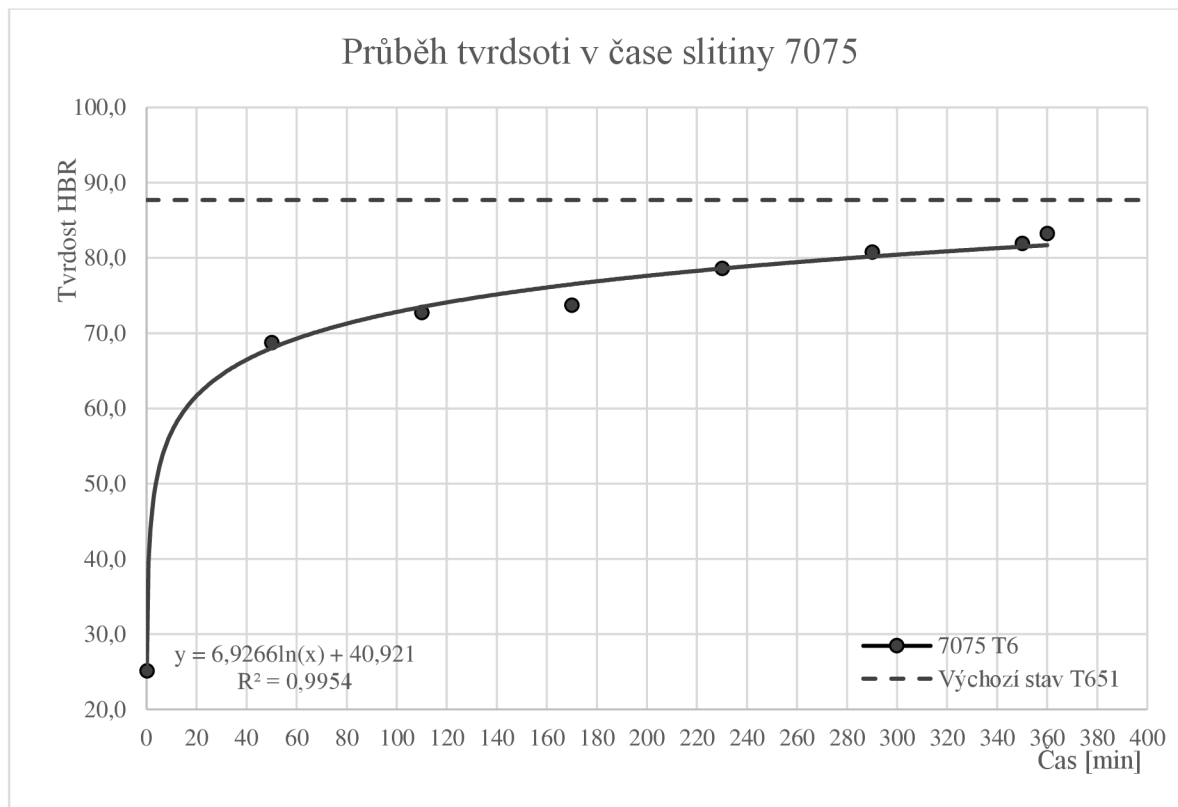
3.6.5 VÝSLEDKY PRVNÍHO MĚŘENÍ TVRDOSTI SLITINY 2024



Graf 2: Průběh tvrdosti během přirozeného vytvrzování slitiny 2024.

Průběh bodů měření slitiny 2024 (graf 2) má téměř identický tvar průběhu jako u slitiny 2017. Také vykazuje počáteční lineární růst a postupný pokles po 3,5 hodinách vytvrzování. Po uplynutí 24 hodin dochází k minimální změně tvrdosti. Rozdíl mezi slitinami 2017 a 2024 je v počáteční tvrdosti po zakalení a tvrdosti po skončení vytvrzování. Slitina 2017 měla počáteční tvrdost po zakalení 28,4 HRB, u 2024 byla naměřena hodnota 43 HRB. Konečná hodnota tvrdosti 2024 je 75 HBR po 160 hodinách. Slitina 2024 dosáhla dle očekávání vyšší tvrdosti, což je způsobeno vyšším obsahem hořčíku a chromu. Výsledná tvrdost po experimentu je nižší než původní, protože před stárnutím nedošlo k deformačnímu zpevnění. Pro další měření byly časové body optimalizovány, aby lépe vystihly tvar křivky.

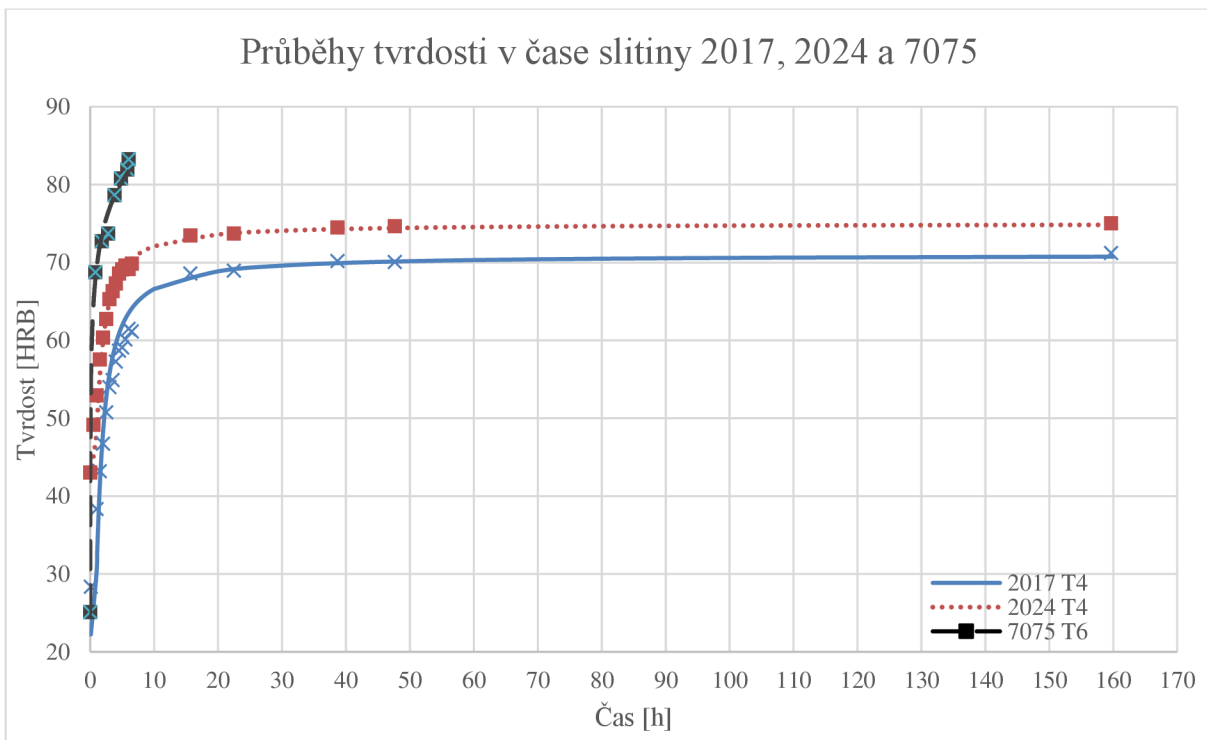
3.6.6 VÝSLEDKY PRVNÍHO MĚŘENÍ TVRDOSTI SLITINY 7075



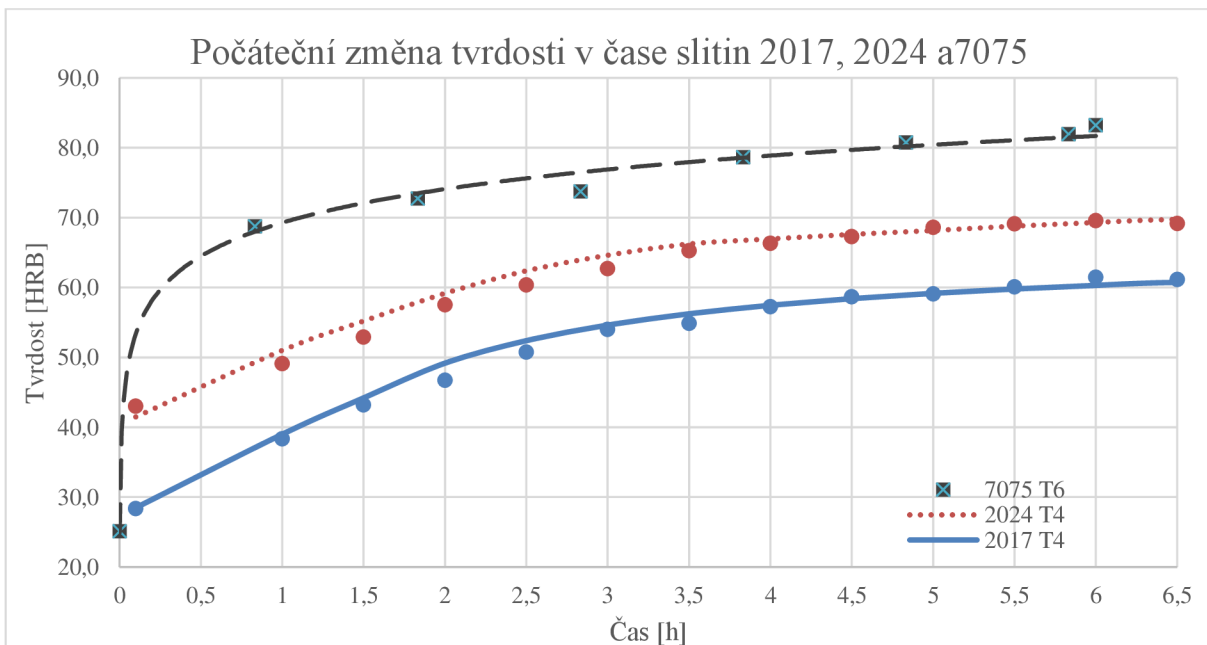
Graf 3: Průběh tvrdosti během umělého vytvrzování slitiny 7075.

Dle grafu 3 uměle vytvrzovaná slitina 7075 vykazuje velmi rychlý nárůst tvrdosti. Již během 50 minut je naměřená tvrdost více jak dvojnásobná. Grafický průběh příliš nevystihuje změnu tvrdosti v první hodině stárnutí, naopak v dalším průběhu je bodů nadbytek. Pro další měření budou časy měření upraveny. Poslední hodnota tvrdosti (83,2 HBR) je naměřena po 6 hodinách stárnutí, což není dle postupu konečný stav vytvrzování. Nicméně již po 6 hodinách je naměřená tvrdost velmi blízká tvrdosti od výrobce (87,6 HRB). Zde je rozdíl mezi tvrdostí původního zpracování a experimentu roven 3,6 HBR.

3.6.7 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ PRVNÍHO MĚŘENÍ TVRDOSTI SLITIN



Graf 4: Porovnání průběhů tvrdosti slitin 2017, 2024 a 7075 během precipitace.



Graf 5: Srovnání změny tvrdosti hliníkových slitin v prvních hodinách precipitace.

Celkové srovnání (graf 4, graf 5) ukazuje diametrální rozdíl v nárůstu tvrdosti u uměle a přirozeně vytvrzovaných hliníkových slitin. Také je patrný znatelný rozdíl v časové náročnosti obou způsobů vytvrzování.

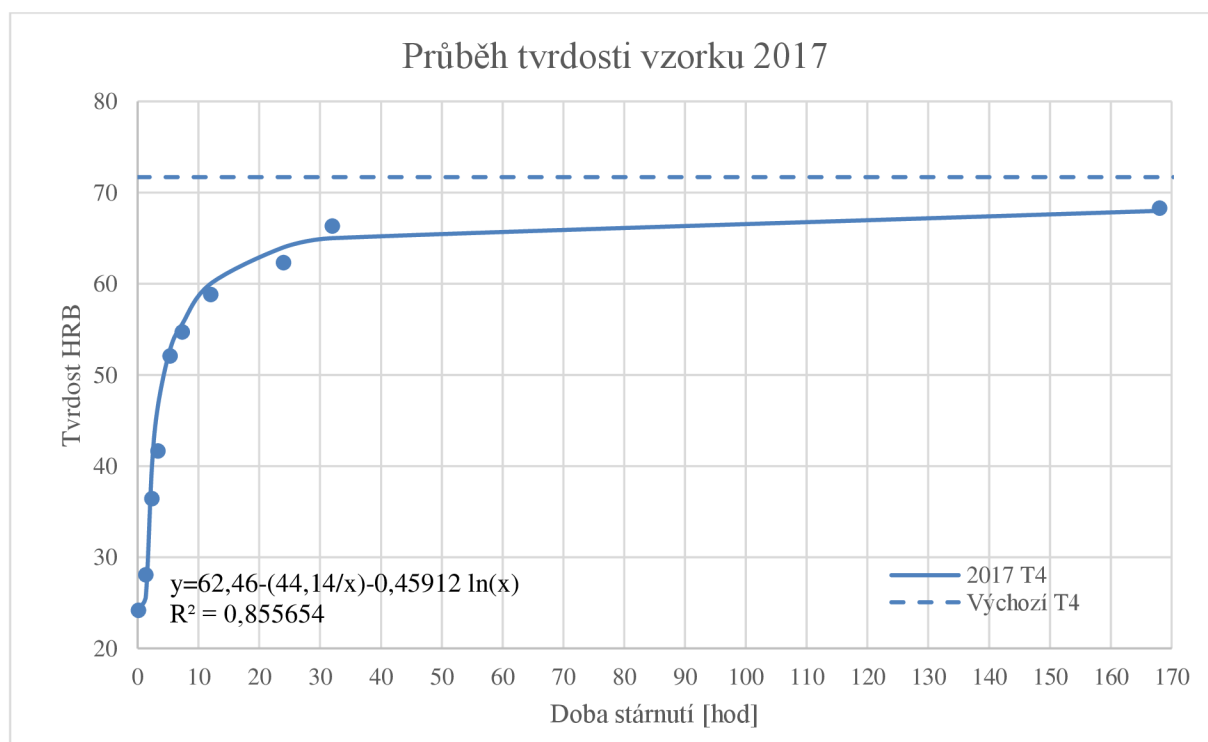
4 MĚŘENÍ MEZE PEVNOSTI V TAHU A TVRDOSTI

Dalším krokem bylo zopakovat celé měření tvrdosti v daných bodech a k nim určit odpovídající pevnost v tahu. Z prvních průběhů tvrdosti byly optimalizovány časové body pro další měření a současně byla ověřena správnost postupu. Samotná metodika měření tvrdosti zůstala stejná. Rozdílné byly vzorky a uložení v peci. Jednalo se o 10 kusů frézovaných vzorků (pro každou měřenou slitinu) určených k tahové zkoušce. Vzorky byly v peci uloženy do speciálně vyrobeného hřebene. Toto uložení bránilo vzájemnému dotyku vzorků a zamezovalo případné deformaci. Další výhodou takového uložení je možnost vyjmout všechny zpracovávané vzorky a zakalit je ve stejnou chvíli. Při umělém stárnutí vzorků ze slitiny 7075 bylo nutné velmi rychlé vyjmutí, aby nedošlo k poklesu teploty v peci.

Po změření tvrdosti na tvrdoměru byl vzorek přesunut do haly s trhacím strojem. Přesun trval asi 2 minuty a můžeme jej považovat za zanedbatelný. Před samotným měřením byla u každého vzorku změřena posuvným měřidlem přesná šířka a tloušťka zúžené části vzorku. Z naměřených rozměrů byl určen průřez zkušebního tělesa. Po správném upnutí v byl vzorek zatěžován až do lomu. Z maximální síly při zkoušce a vypočteného průměru bylo určeno napětí při lomu R_m .

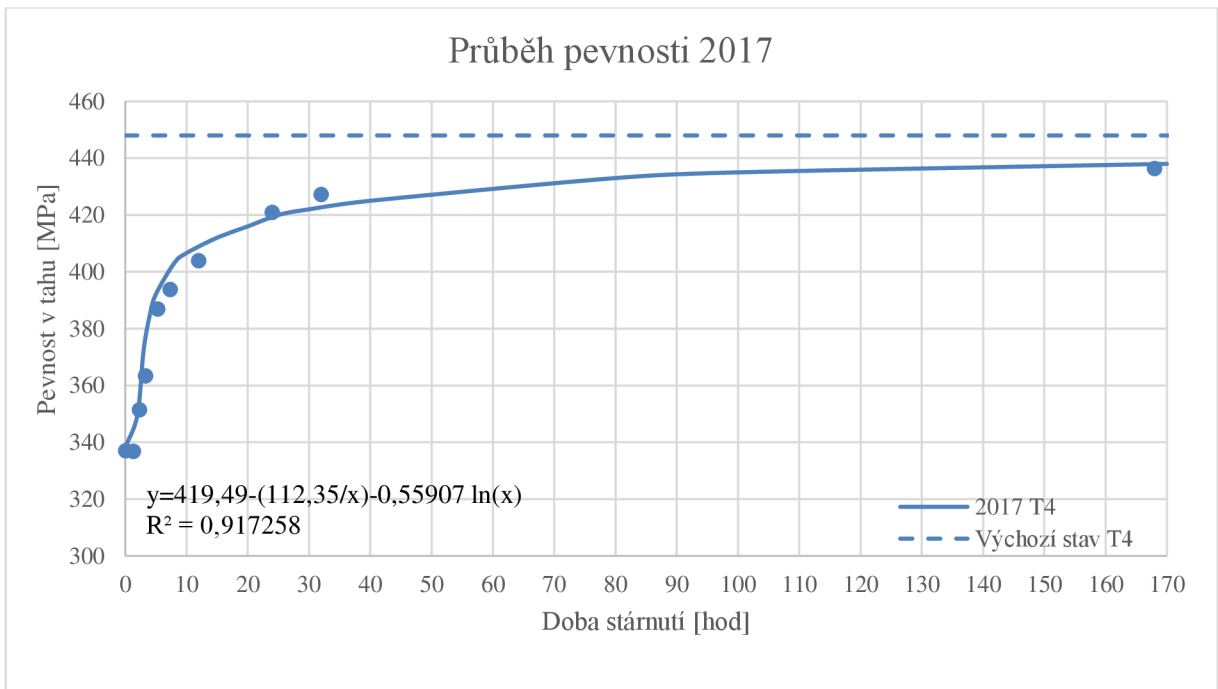
V případě slitiny 7075 byl poslední vzorek ponechán v peci delší dobu, aby došlo k tzv. přestárnutí slitiny. Při přestárnutí dochází k poklesu tvrdosti a pevnosti vlivem vzniku velkých nehomogenních precipitátů.

4.1 VÝSLEDKY EXPERIMENTU SLITINY 2017



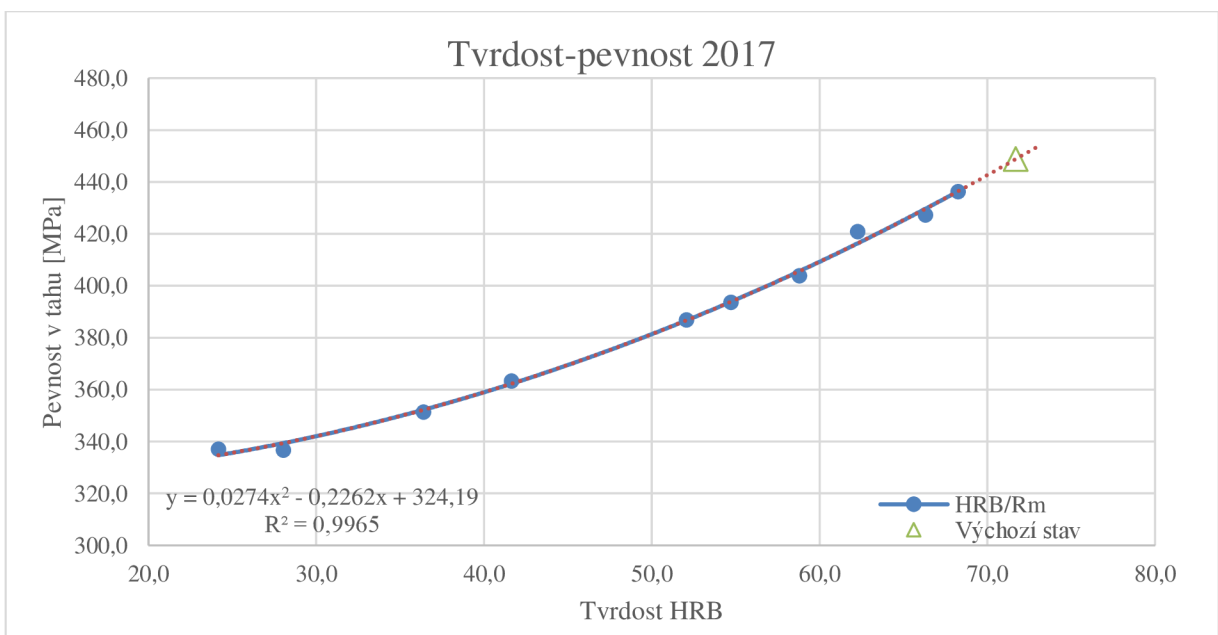
Graf 6: Průběh tvrdosti vzorků během přirozeného vytvrzování slitiny 2017

Výsledná závislost tvrdosti a pevnosti vzorku slitiny 2017 (graf 6) má podobný průběh jako při prvním měření (graf 1). Jmenovitě je to rychlý nárůst tvrdosti během prvních 5 hodin vytvrzování a poté zpomalení růstu. Konečná hodnota tvrdosti dosáhla hodnoty 68,3 HRB.



Graf 7: Průběh pevnosti vzorků během přirozeného vytvrzování slitiny 2017

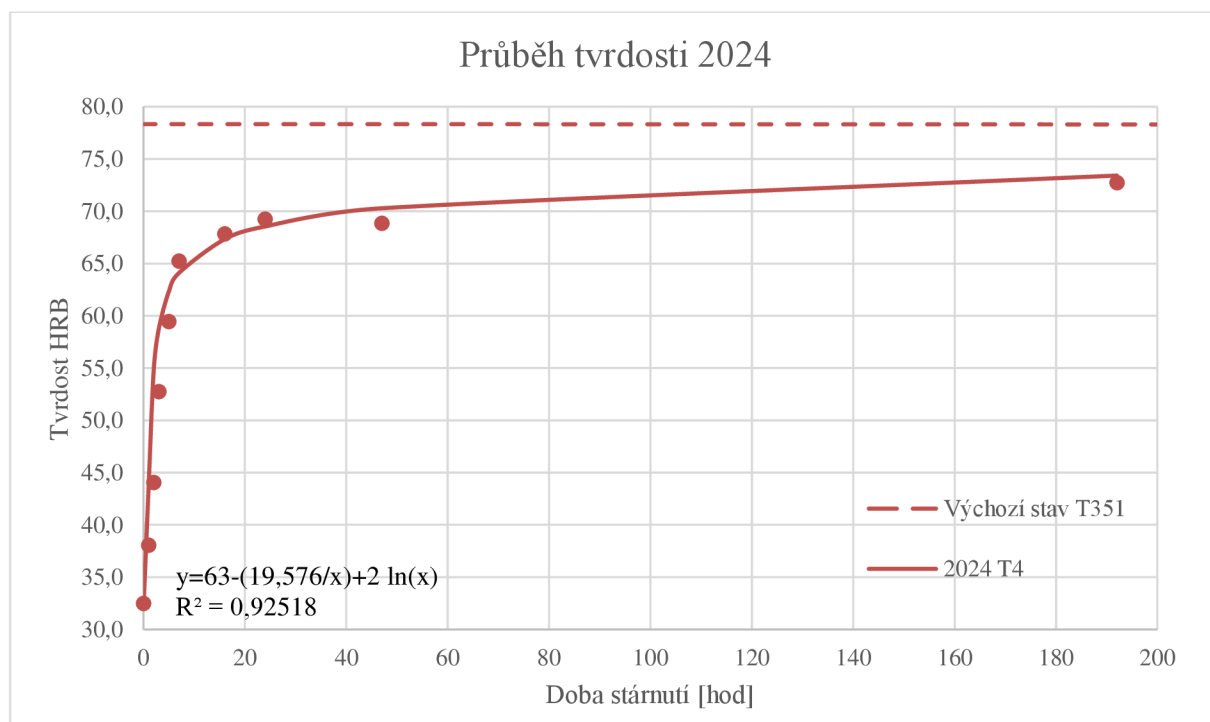
Průběh pevnosti vzorků ze slitiny 2017 během vytvrzování (graf 7) je velmi podobný nárůstu tvrdosti. Po 5 hodinách stárnutí je přírůstek pevnosti mírnější. Hodnota tvrdosti po ukončení stárnutí dosáhla 436 MPa. Původní hodnota byla 448 MPa.



Graf 8: Závislost změny tvrdosti na pevnosti v tahu slitiny 2017

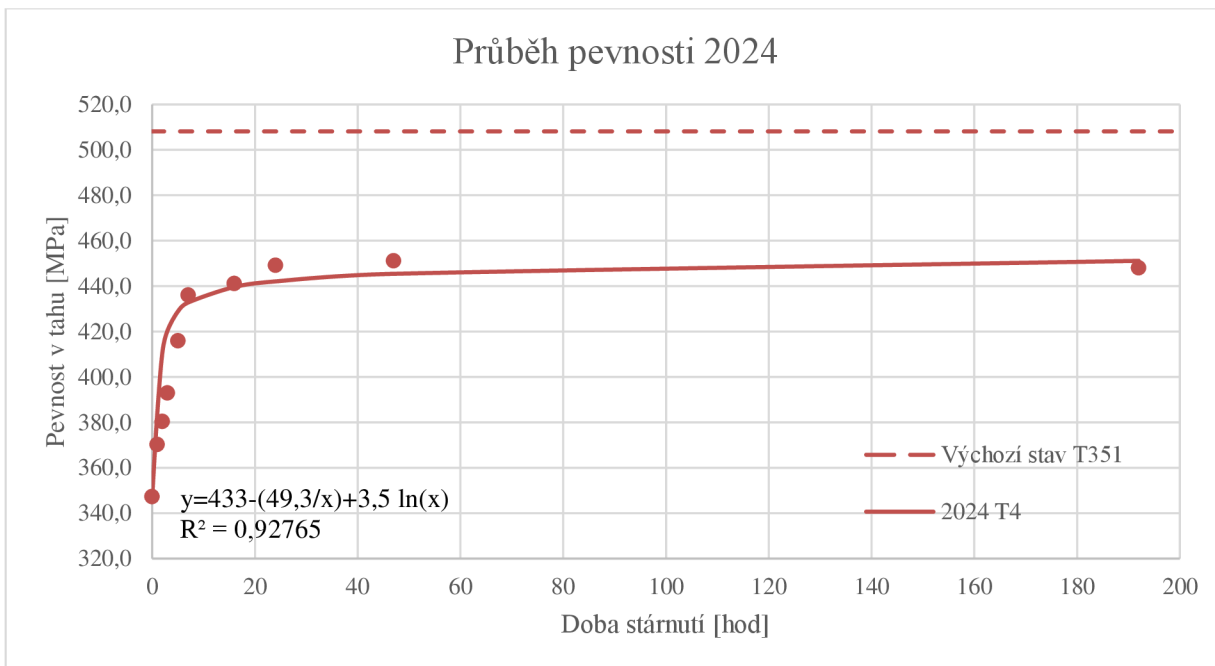
Všechny měřené body tvrdosti a pevnosti slitiny 2017 (graf 8) vykazují velmi těsný průběh okolo křivky. Původních výrobních hodnot tvrdosti ani pevnosti nebylo dosaženo. Při porovnání závislosti tvrdosti a pevnosti, je patrné, že výchozí hodnoty leží na pomyslné prodloužené křivce.

4.2 VÝSLEDKY EXPERIMENTU SLITINY 2024



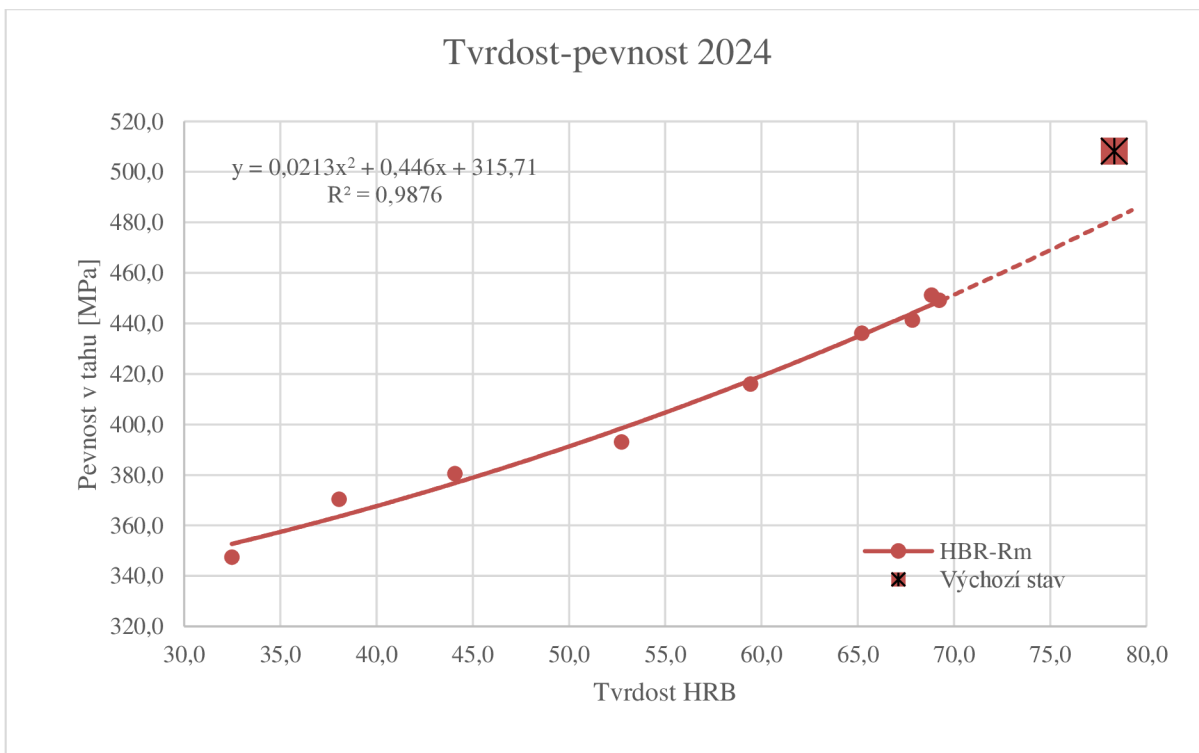
Graf 9: Průběh tvrdosti vzorků během přirozeného vytvrzování slitiny 2024

Naměřený průběh tvrdosti vzorku slitiny 2024 (graf 9) je blízký přechozímu měření (graf 2). Původní materiál dosahoval tvrdosti 78,3 HRB ve stavu T351. Po provedení experimentu byla konečná tvrdost 72,7 HBR ve stavu T4. Stav T351 obsahuje navíc proces deformačního zpevnění po zakalení. Rozdíl mezi původní a experimentálně získanou tvrdostí by měl odpovídat právě tvrdosti získané deformačním zpevněním.



Graf 10: Průběh pevnosti v tahu vzorků během přirozeného vytvrzování slitiny 2024

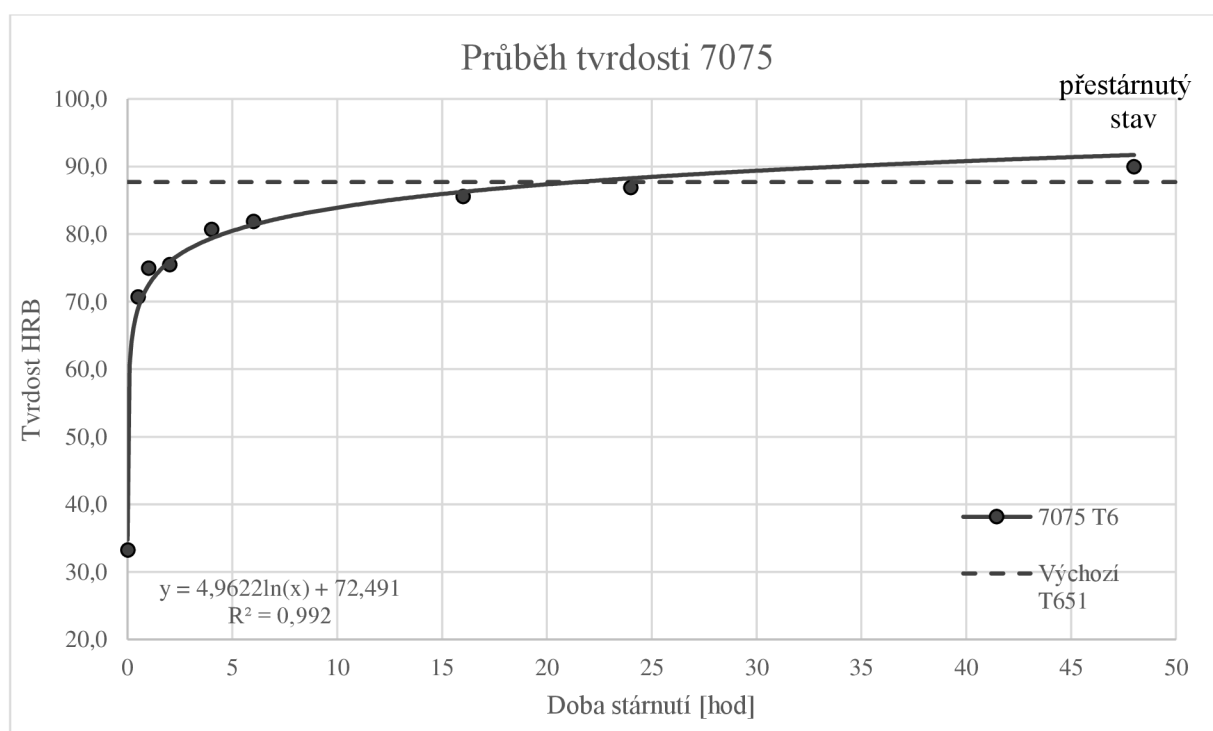
Průběh tvrdosti slitiny 2024 (graf 10) se vyznačuje velkým nárůstem pevnosti během prvních hodin. Po přibližně 20 hodinách precipitace je změna pevnosti téměř nezatelná. Maximální hodnota pevnosti při experimentu dosáhla 448 MPa. Materiál od výrobce měl hodnotu pevnosti na 508 MPa. Velký rozdíl je způsoben absencí deformačního zpevnění, stejně jako je tomu v případě tvrdosti.



Graf 11: Závislost změny tvrdosti na pevnosti v tahu slitiny 2024

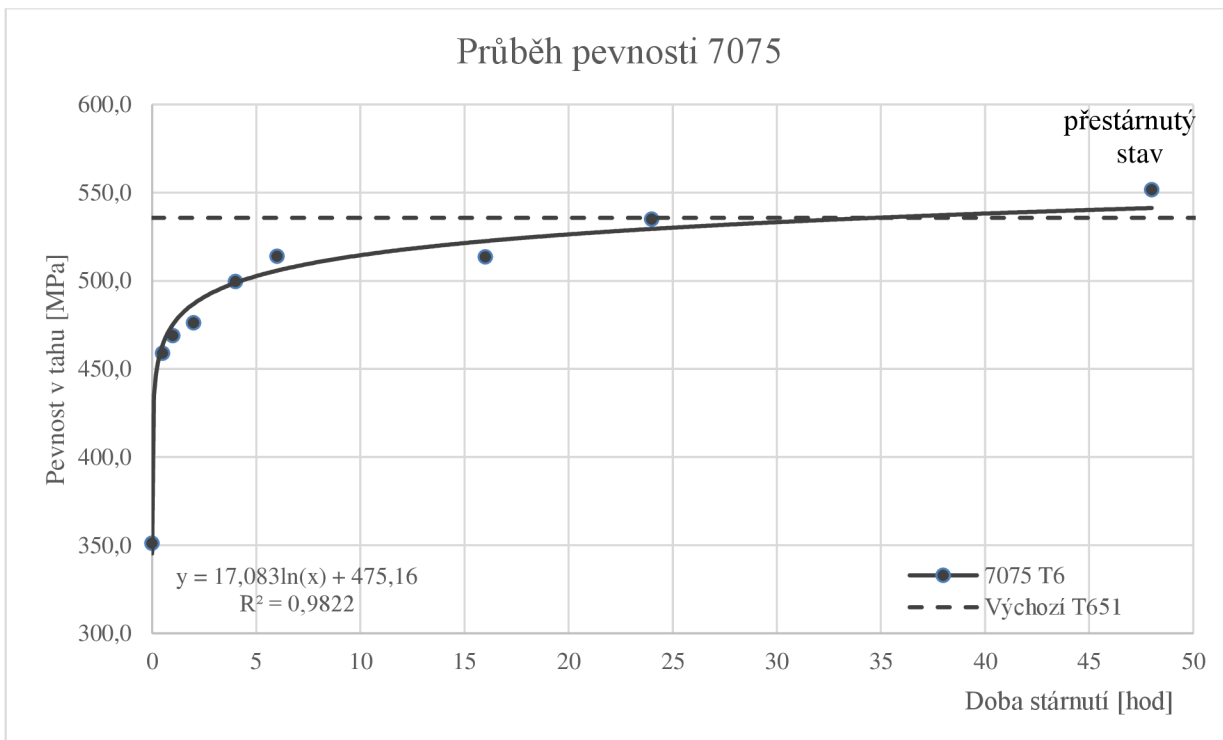
Všechny naměřené body (vyjma původního stavu) velmi dobře odpovídají trendu křivky (graf 11). Největší roztptyl se nachází u materiálu v měkkém stádiu vytvrzování. S rostoucí tvrdostí a pevností jsou body téměř totožné s křivkou. Konečná tvrdost a pevnost nedosáhla původních hodnot. Souřadnice bodu výchozích hodnot neodpovídají ani prodloužené křivce experimentálních hodnot. Výsledné nižší zpevnění je nejspíše způsobeno změnou původního postupu tepelného zpracování, při kterém bylo po kalení provedeno vypínání. Takto vytvořená deformace vyvolala mírné zpevnění materiálu, o které se zvýšila konečná hodnota pevnosti.

4.3 VÝSLEDKY EXPERIMENTU SLITINY 7075



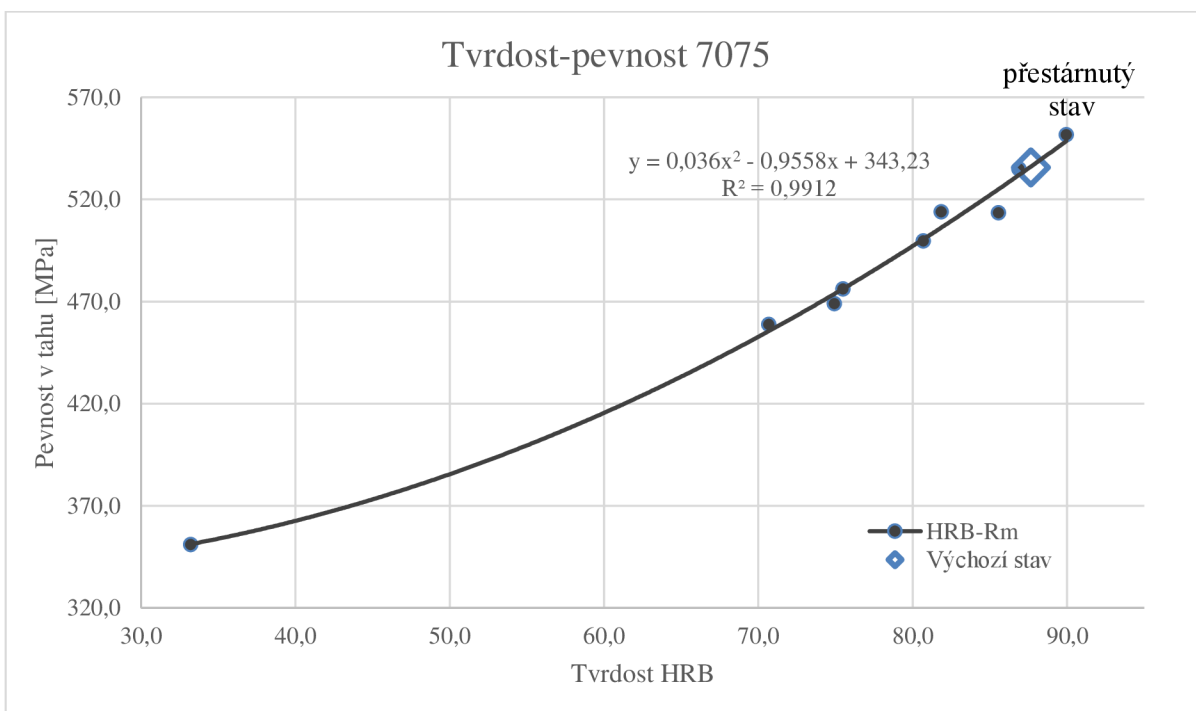
Graf 12: Průběh tvrdosti vzorků během přirozeného vytvrzování slitiny 7075

Průběh tvrdosti při umělém stárnutí slitiny 7075 (graf 12) je velmi strmý. Za 30 minut došlo ke dvojnásobení hodnoty tvrdosti. Následuje pozvolné snižování růstu. Po 25 hodinách materiál dosahuje tvrdost stejné hodnoty jako přířez od výrobce, tj 86,9 HRB. Po 25 hodinách tvrdost dále narůstala až na 90 HRB.



Graf 13: Průběh tvrdosti vzorků během přirozeného vytvrzování slitiny 7075

Průběh pevnosti slitiny 7075 (graf 13) je obdobný jako v případě tvrdosti (graf 12). Došlo k rychlému nárůstu pevnosti a následnému zpomalení. Konečná tvrdost dosáhla 551 MPa, původní hodnota byla 536 MPa.



Graf 14: Závislost změny tvrdosti na pevnosti v tahu slitiny 7075

Všechny naměřené body závislosti mezi tvrdostí a pevností sledují průběh křivky (graf14). Při experimentu byl vzorek zpracován na stav T6, kdežto materiál od výrobce byl navíc deformačně zpevněn (stav T651). I přes odlišný stav, bylo dosaženo po ukončení stárnutí výchozích hodnot tvrdosti a pevnosti. Po uplynutí předepsané doby stárnutí (25 h) měl nastat stav přestárnutí, který se projevuje poklesem tvrdosti a pevnosti. To se nestalo, naopak tvrdost i pevnost v tahu dále rostly. Pokud by bylo stárnutí ukončeno dle předepsaného postupu, pak by hodnoty tvrdosti a pevnosti dosáhly téměř shodných hodnot jako od výrobce.

4.4 VÝSLEDKY TAŽNOSTI U MĚŘENÝCH SLITIN

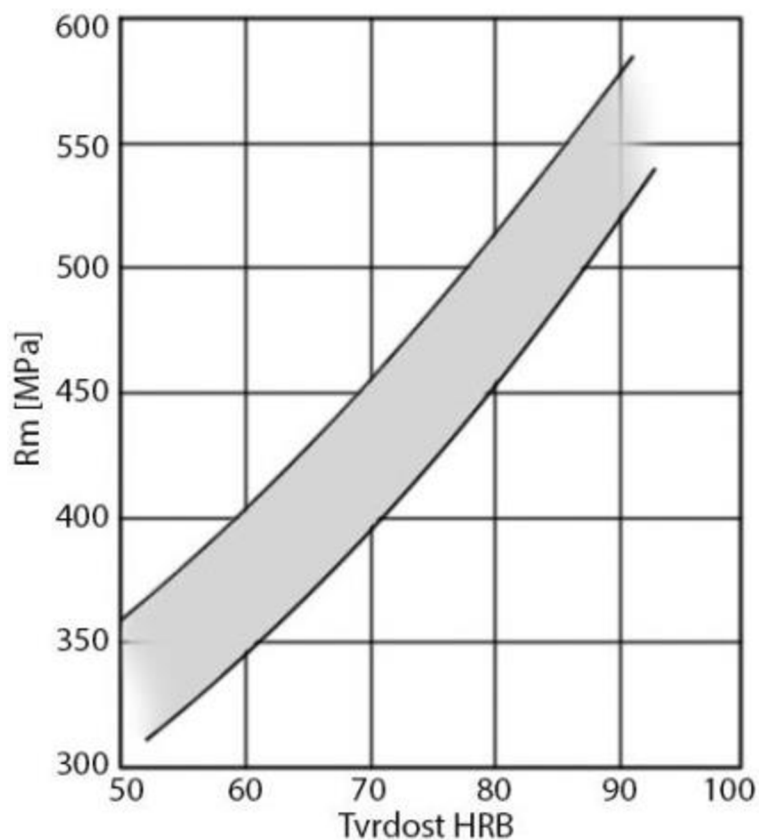
Po provedení tahové zkoušky byla měřena také změna délky vzorku. Dle očekávání u vzorku v nejméně vytvrzeném stavu bylo naměřeno největší protažení. Změna délky se s narůstajícím časem vytvrzení snižovala. Při výpočtu tažnosti z tahové zkoušky musí dojít k lomu v měřené části. V tomto případě 25 mm na každou stranu od příčné osy. U většiny vzorků došlo k lomu v místě počátku zaoblění (viz obr.17), proto výsledky tažnosti nejsou v této práci obsaženy.



Obrázek 17: Sada vzorků slitiny 7075 po provedení tahové zkoušky. Čas vytvrzování roste zprava doleva

4.5 SROVNÁNÍ ZÁVISLOSTI PEVNOSTI A TVRDOSTI U MĚŘENÝCH SLITIN

Digramy tvrdost-pevnost obecně slouží pro zjišťování jedné veličiny ze znalosti druhé. Nejčastěji je známou veličinou tvrdost, protože zkouška tvrdosti je rychlá a jednoduchá. S moderními tvrdoměry je možné velmi přesně měřit téměř jakýkoliv povrch v několika sekundách. Naopak pro měření pevnosti je potřeba vyrobit zkušební vzorky a použít trhací stoj, což je složitější, dražší a v případě kontroly již vyrobených součástí nemožné. Existující diagramy pro převod tvrdost-pevnost pro hliníkové slitiny mají velmi široký rozptyl (obr.18). Pro známou hodnotu tvrdosti po převodu dostáváme široký interval možných hodnot pevnosti, například tvrdosti 60 HRB odpovídá rozsah pevnosti od 340 do 405 MPa. V kontrastu lze uvést ocelové materiály, u kterých je závislost tvrdosti na pevnosti velmi přesně popsána.

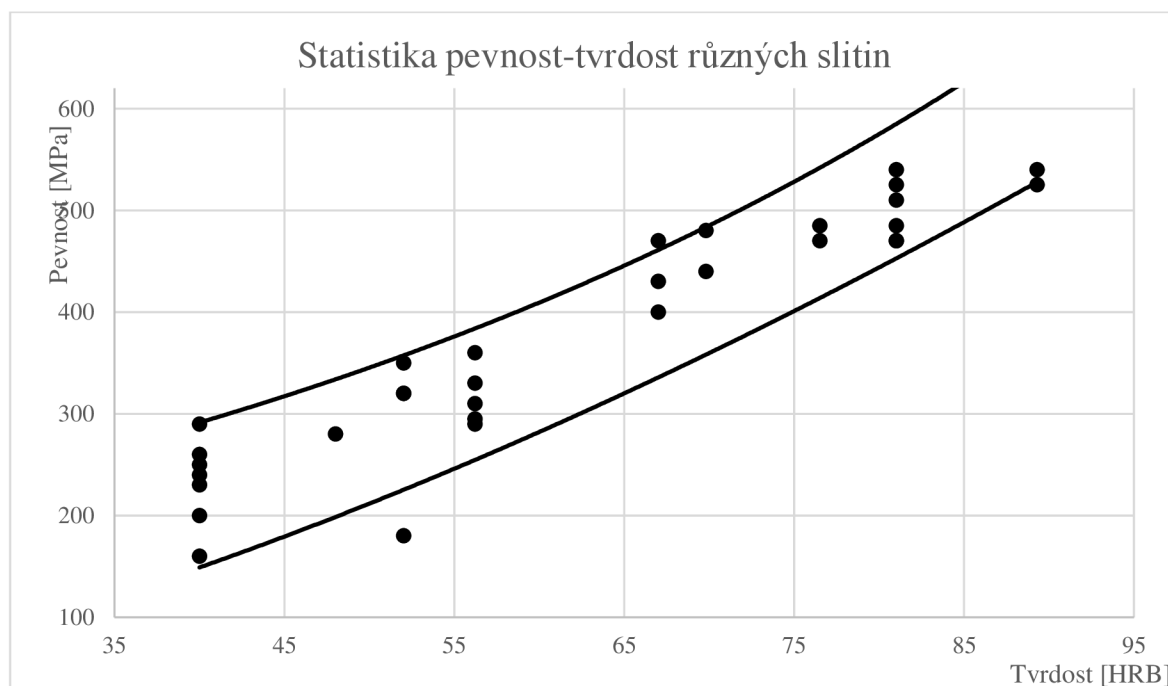


Obrázek 18: Obecný diagram pro převod tvrdost-pevnost pro hliníkové slitiny.[2]

Pro rozšíření statických dat a pohledu na rozptyl hodnot závislosti tvrdost-pevnost byla zpracována vlastní statistika obsahující 16 tepelně zpracovaných hliníkových slitin. Tabulkové hodnoty tvrdosti a pevnosti slitin byly získány z literatury a norem. Získané hodnoty byly vyneseny do souřadnicového systému. Horní a dolní hranice byla proložena křivkami určujícími pás možných hodnot (graf 15).

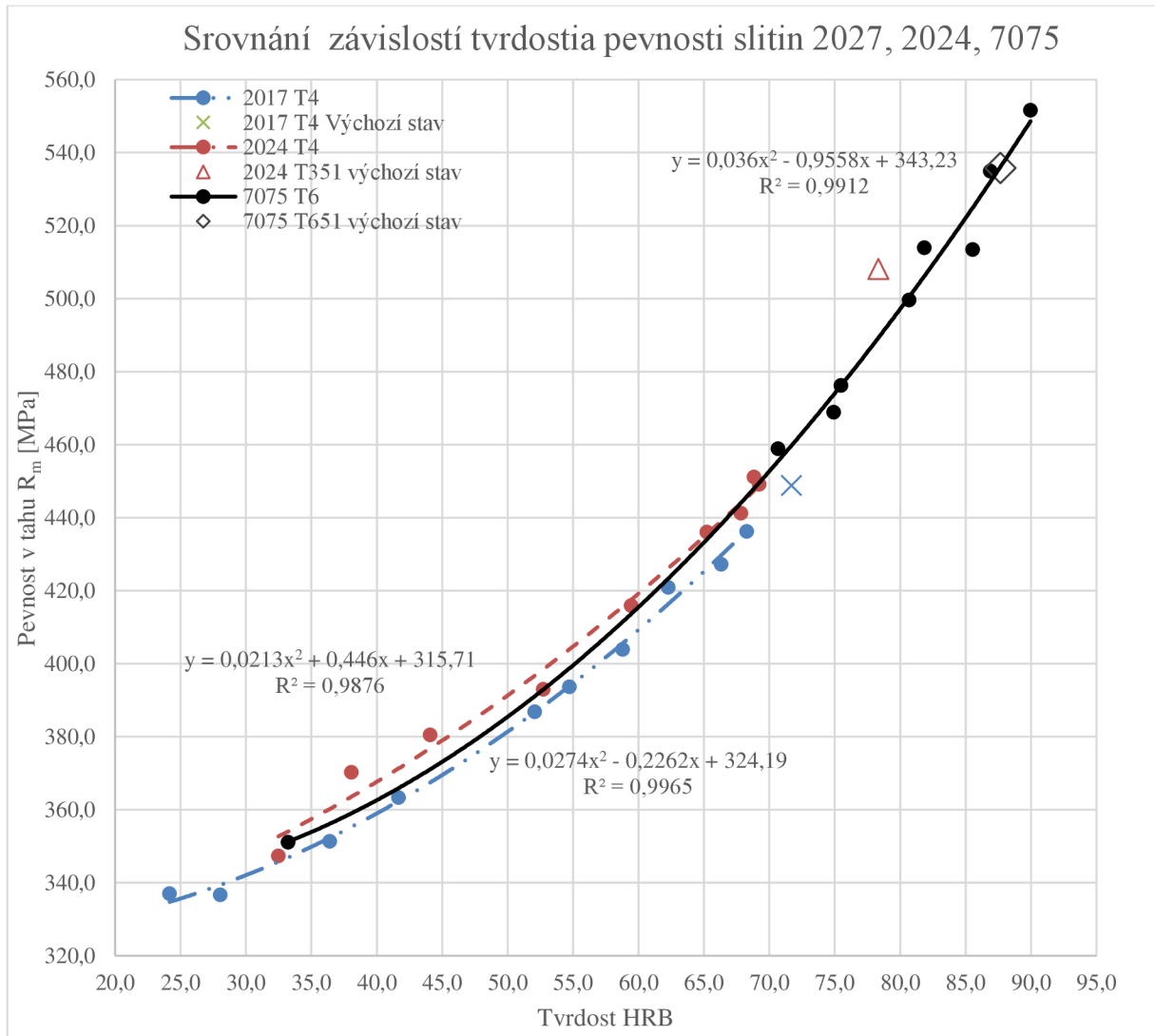
Tabulka 3: Hodnoty tvrdosti a pevnosti pro různé slitiny

Slitina	Tepelné zpracování	R _m [MPa]		Tvrdost [HRB]		
		od	do	od	do	
AL-P2014A	T4 (42)	400		67		[7]
AL-P6061	T6 (T62)	290		56,2		[14]
AL-P6081	T6	280		48		[8]
AL-P7075	T6 (T62)	525	540	89,3		[9]
AL-P2024	T3511	440	480	69,8		[8]
AL-P6081	T6	295	310	56,2		[10]
AL-P7009	T74511	470	510	81		[11]
AL-P7075	73511	470	485	81		[12]
AlMgSi 1	vytvz. za studena	200	240	40		[13]
ČSN 42 4201	vytvz. za tepla	280	320	52		[13]
AlMgSi 1,5	vytvz. za studena	260	290	40		[13]
AlMgSi 1,5	vytvz. za tepla	320	350	52		[13]
AlCuMg 1 (ČSN 42 4201)	měkké	230	250	40		[13]
AlCuMg 1 (ČSN 42 4201)	vytvz. za tepla	430	470	67		[13]
AlZnMgTi (ČSN 42 4222)	vytvz. za tepla	330	360	56,2		[13]
AlSiMg (ČSN 42 4331)	zušlechtěné	160	260	40	56,2	[13]



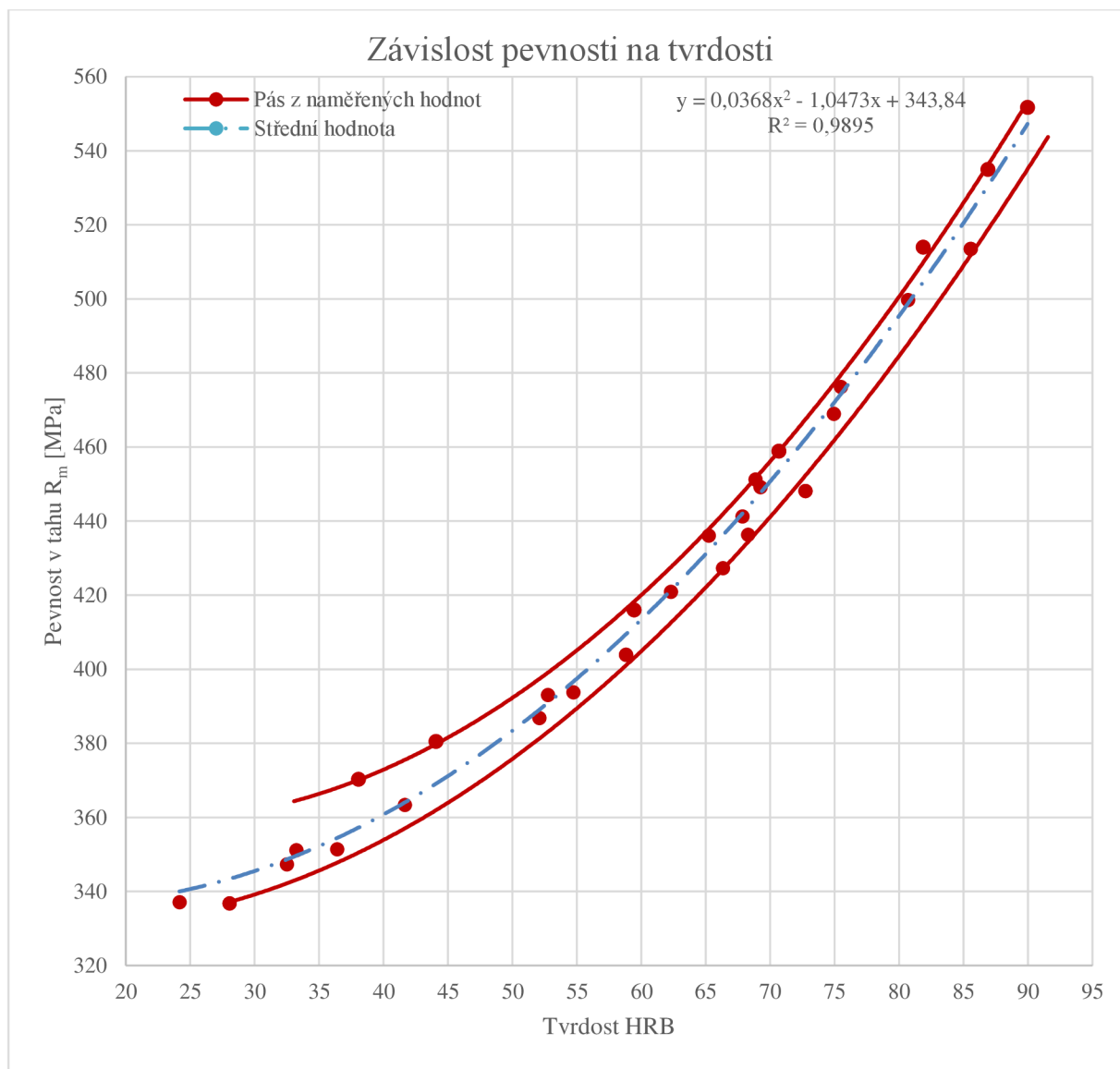
Graf 15: Pás hodnot tvrdost-pevnost pro různé slitiny

4.5.1 VÝSLEDKY SROVNÁNÍ ZÁVISLOSTI TVRĐOSTI A PEVNOSTI MĚŘENÝCH SLITIN



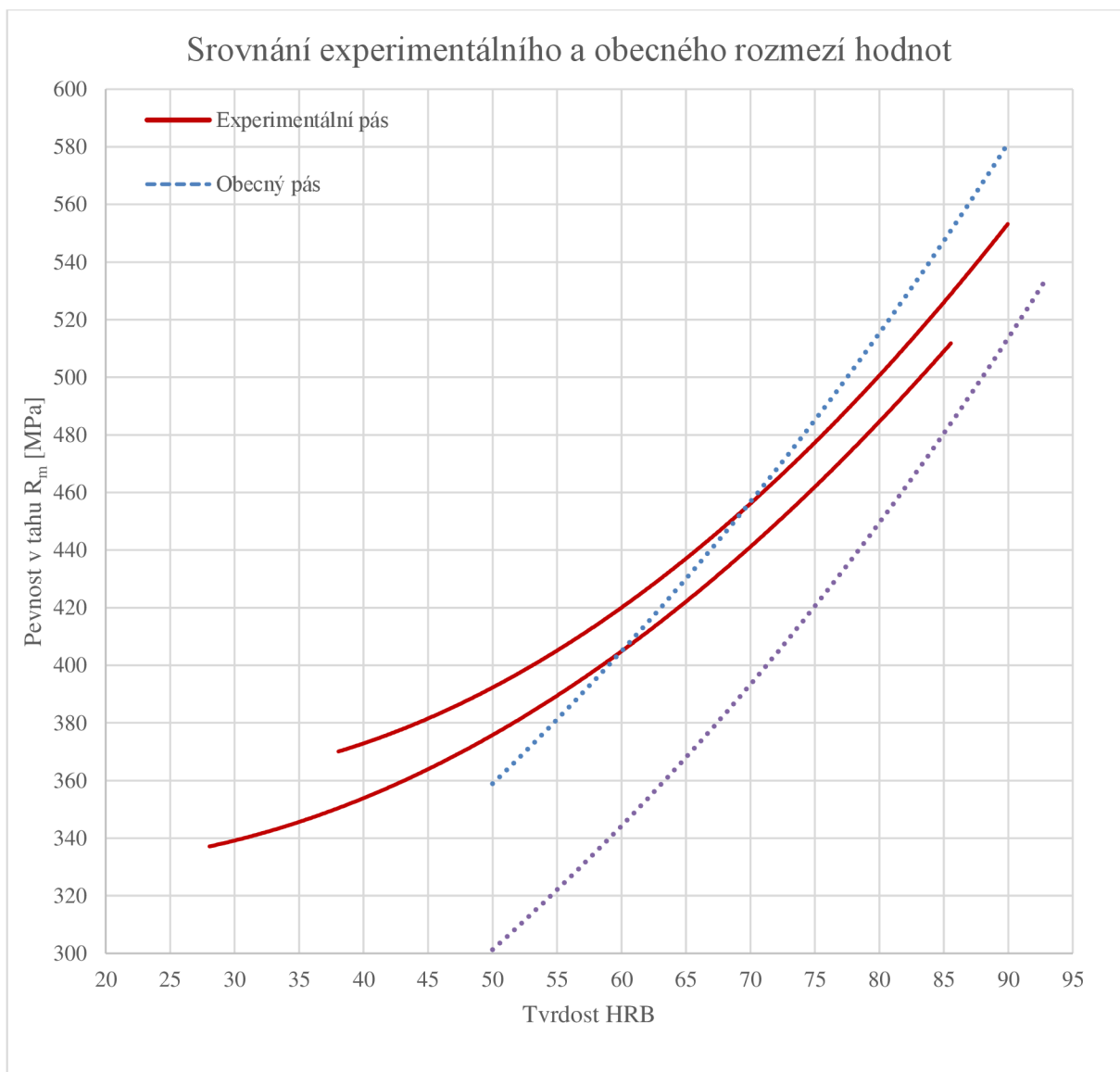
Graf 16: Porovnání průběhů křivek tvrdost-pevnost u slitin 2017, 2024 a 7075

Grafické srovnání průběhu tvrdosti a pevnosti u všech slitin (graf 16) ukazuje, že přirozeně vytvrzované slitiny 2017 a 2024 s blízkým chemickým složením dosahují velmi podobné závislosti jako uměle vytvrzená slitina 7075 s odlišným chemickým složením. Chemické složení tedy nemá vliv na vzájemnou funkční závislost tvrdosti a pevnosti. Pakliže bude slitina obsahovat např. méně mědi (jakožto hlavní vytvrzující prvek) než je předepsané, výsledná pevnost se sníží, ale současně poklesne i tvrdost. Vytvrzující prvky a jejich obsah spolu se způsobem vytvrzování slitin 2017, 2024 a 7075 má vliv pouze na dosaženou hodnotu pevnosti.



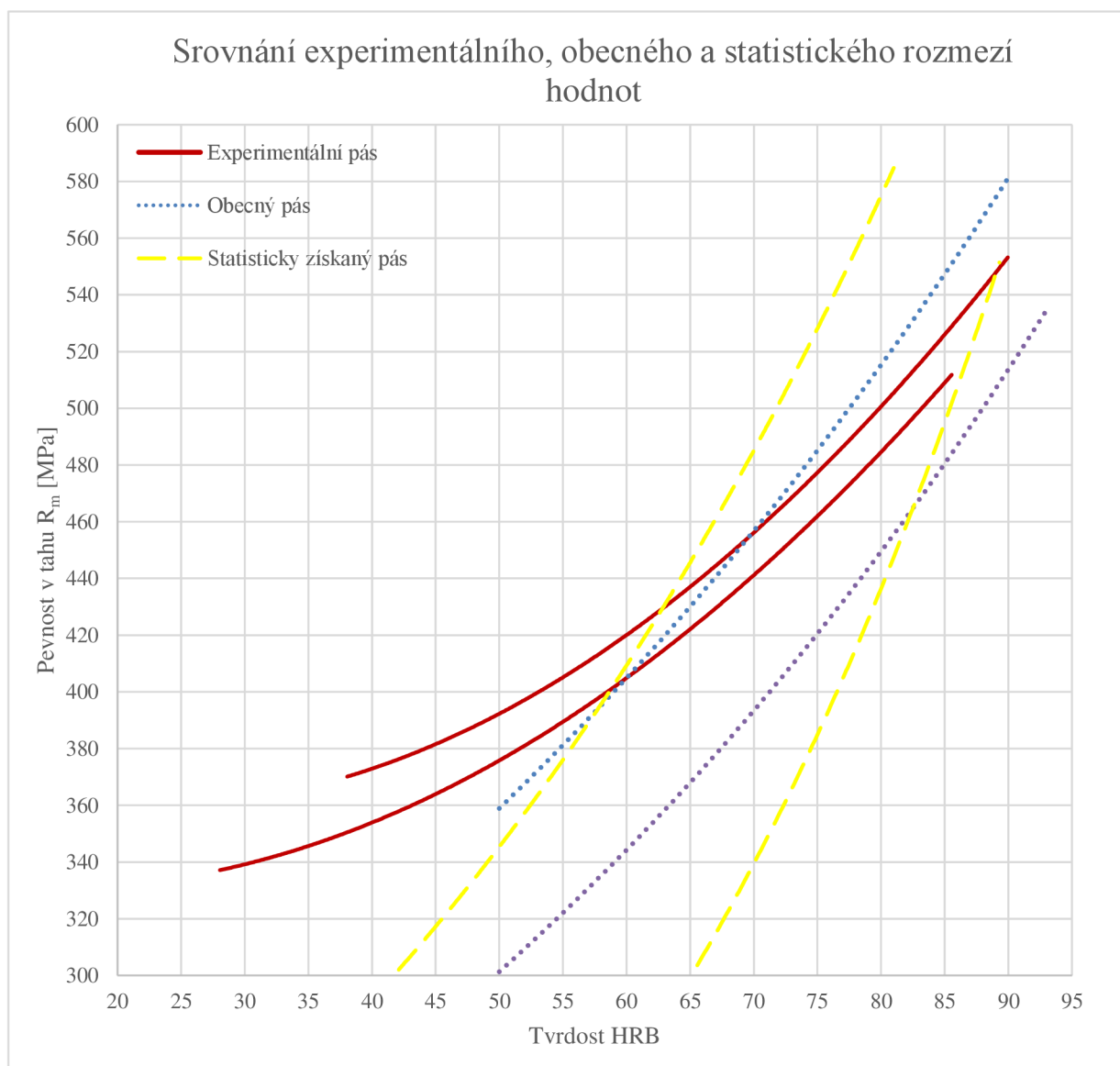
Graf 17: Pás hodnot pevnost-tvrdost.

Proložením všech naměřených bodů vhodnou křivkou dostaneme střední hodnotu závislosti tvrdost-pevnost. Vytvořením obálky z hraničních bodů vznikne pás, ve kterém lze očekávat další body při jiných měřeních (graf 17). Z výsledků je patrné, že s rostoucími hodnotami tvrdosti a pevnosti se zužuje jejich rozptyl.



Graf 18: Srovnání experimentálního pásu hodnot s obecným

V grafu 18 je vykresleno srovnání experimentálně získaného pásu (graf 17) s obecným pásem možných hodnot uváděného v odborné literatuře (obr.18). Je zřejmé, že experimentální část je výrazně užší a nárůst hodnot není tak strmý. Experimentální pás se překrývá s obecným pásem až v posledních fázích precipitace. To ukazuje, že obecný pás byl sestaven pouze z hodnot měřených na zcela vytvrzených slitinách. V tomto případě došlo ke zúžení pásu možných hodnot pouze v oblasti téměř vytvrzených vzorků.



Graf 19: Srovnání experimentálního, obecného, statistického pásu hodnot tvrdosti a pevnosti.

V kapitole 4.1 byla vytvořena jednoduchá statistika z hodnot tvrdosti pevnosti několika různých hliníkových slitin (graf 15). Rozsah pásu sestaveného ze statistických dat je při porovnání širší než uváděný v literatuře (i přes nízký počet zpracovaných slitin) a má prudší nárůst. U všech tří zón platí, že čím vyšší hodnoty tím je užší pás. Při vyšších hodnotách nastává největší překrytí všech oblastí. Z toho plyne, že pro vyšší tvrdosti dosáhneme přesnějšího odečtu pevnosti.

5 SROVNÁNÍ ZAKALENÉ STRUKTURY S ŽÍHANOU

Jeden vzorek z každé zkoumané slitiny byl tepelně zpracován na stav po žíhání na měkko. U takto zpracovaných slitin bylo provedeno měření tvrdosti a tahová zkouška. Výsledky slouží pro porovnání vlastností materiálů ve vytvrzeném a vyžíhaném stavu.

Rozdíly ve struktuře

Žíhání je tepelné zpracování za vysoké teploty s dlouhou výdrží. Při dlouhé výdrži na teplotě dochází k difuznímu pohybu atomů mědi uvnitř zrna. Tyto atomy se přesouvají k hranici zrn, kde se shlukují a vytvářejí velké útvary označované jako koagulované precipitáty. Jejich vliv na zpevnění je malý, protože existují jen v malém množství a jejich vzájemné vzdálenosti jsou velké. Protože je téměř celé zrno slitiny tvořeno hliníkem, jsou i výsledné vlastnosti blízké hliníku. Materiál je tedy měkký a tvárný.

S podobnými vlastnostmi se setkáváme po zakalení slitiny, kdy je přesycený tuhý roztok zpevněn pouze atomy mědi. Přítomnost větších atomů mědi v krystalové mřížce základního materiálu způsobuje vznik napětového pole, které brání pohybu dislokací. Tak materiál získává pouze nízkou pevnost.

Postup žíhání naměkko

Technologický postup žíhání na měkko je pro slitiny 2017, 2024 stejný:

- ohřev materiálu na teplotu 415 °C,
- výdrž na teplotě po dobu 2-3 hodin,
- pomalé ochlazení 30 °C/h do teploty 260 °C a volné dochlazení na vzduchu [1].

Technologický postup žíhání na měkko je pro slitinu 7075:

- žíhání při teplotě 415 °C s výdrží 3 hod,
- volné ochlazování teplotu 205 °C,
- opětovný ohřev na teplotu 345 °C s výdrží po dobu 4 hodin,
- volné chladnutí [1].

Výsledky měření:

Průběh měření tvrdosti i pevnosti byl identicky jako v případě precipitačně vytvrzovaných vzorků.

Tabulka 4: Výsledky měření žíhaných vzorků.

Slitina	po žíhání		po zakalení	
	tvrdost	R _m	tvrdost	R _m
	HRB	MPa	HRB	MPa
2017	57,6	199	24,2	337
2024	61,6	220	32,5	347
7075	65,7	219	33,2	351

Z výsledných hodnot je patrné, že žíhaná struktura dosahuje výrazně nižší pevnosti při vyšší tvrdosti oproti zakalené struktuře. Je tedy zřejmé, že vlastnosti struktur po žíhání a kalení je odlišná. Naměřené hodnoty tedy nelze zařadit do statistiky při ověřování průběhu tvrdosti a pevnosti.

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala experimentálním ověřením funkční závislosti pevnosti a tvrdosti. Měřené hodnoty byly získány v průběhu precipitačního vytvrzování slitin. Pokusy byly provedeny na slitinách 2017, 2024 a 7075, které jsou běžně používané v leteckém průmyslu. Pro určení vlivu typu stárnutí byly slitiny 2017 a 2024 vytvrzovány přirozeně a 7075 uměle.

V první fázi experimentu byly pouze určeny průběhy tvrdosti u jednotlivých slitin. Závislosti měly charakter rychlého nárůstu na začátku vytvrzování s pozvolným ustalování ke konečné hodnotě. Poslední naměřená tvrdost u slitin 2017 byla téměř identická s původní. Slitina 2024 dosáhla nižší hodnoty, což odpovídá zanedbání operace tváření po kalené během tepelného zpracování. Podle průběhů tvrdostí byly upraveny body měření, tak aby co nejlépe pokryly celou křivku. Současně byla ověřena správnost postupu měření.

V druhé fázi došlo k tepelnému zpracování vzorků pro měření pevnosti v tahu. U každého vzorku byla po uplynutí určité doby naměřena tvrdost a hned poté pevnost v tahu. Sestavné grafy závislosti pevnosti na době stárnutí jsou svým tvarem velmi blízké průběhům tvrdosti, což dokazuje závislost těchto dvou veličin. Ze získaných dat byly sestaveny diagramy tvrdost-pevnost pro všechny slitiny. Z porovnání vyplynulo, že průběhy tvrdost-pevnost všech tří slitin sledují velmi podobný trend. Tímto srovnáním byla ověřena užší funkční závislost pevnosti a tvrdosti hliníkových slitin 2017, 2024 a 7075. Dále lze vyvodit, že na závislost tvrdosti a pevnosti nemá vliv chemické složení slitin ani způsob stárnutí při vytvrzování.

Experimentálně určený pás závislosti mezi tvrdostí a pevností byl graficky porovnán se závislostmi uváděnými v literatuře a s vlastním statisticky získaným průběhem. Závislost sestavená z naměřených dat vykazovala výrazně užší rozptyl hodnot. Všechny vynesené rozsahy možných hodnot se překrývaly až v oblasti vyšších tvrdostí, z toho lze odvodit, že závislosti běžně udávané v literatuře jsou zhotoveny z dat po skončení tepelného zpracování.

Experimentálně vytvořená závislost nabízí možnost přesnějšího ověření správného vytvrzení hliníkových slitin, identifikaci slitiny při záměně nebo jako data pro určování křivek rozpadu přesyceného tuhého roztoku.

Pro rozšíření byly dodatečně zhotoveny vzorky, které byly žíhány na měkko. Při porovnání výsledků měření žíhané struktury s materiálem těsně po zakalení vyplynulo, že žíhaná struktura má výrazně nižší pevnost při vyšší tvrdosti. Struktura po vyžihání je svým charakterem odlišná od zakalené, a proto nezapadá do funkční závislosti tvrdost-pevnost.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ASM Handbook, Vol. 2, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose*. ASM International. Material Park, Ohio, 1991. ISBN 0-87170-378-5 (v.2).
- [2] ASM Handbook, Vol. 4, *Heat Treating*. ASM International. Material Park, Ohio, 1991. ISBN 0-87170-379-3.
- [3] ČSN EN 1002-1. *Zkušební tělesa: Příloha A: Druhy tyčí používané pro tenké výrobky: plechy, pásy a ploché výrobky o tloušťce od 0,1 mm do méně než 3 mm*. Praha: Český normalizační institut, 1996.
- [4] ČSN EN 2395. *Letectví a kosmonautika: Slitina hliníku AL-2014A-T4 nebo T42- plechy pásy*. Praha: Český normalizační institut, 1996. Třídící znak 31 2408.
- [5] ČSN EN 2630. *Letectví a kosmonautika: Slitina hliníku AL-P7009-T74511-tyče a profily lisované a nebo $D \leq 125$ mm s kontrolou hrubého zrna na obvodu*. Praha: Český normalizační institut, 1996. Třídící znak 31 2452.
- [6] ČSN EN 2632. *Letectví a kosmonautika: Slitina hliníku AL-P7075-T73511-tyče a profily lisované a nebo $D \leq 100$ mm s kontrolou hrubého zrna na obvodu*. Praha: Český normalizační institut, 1996. Třídící znak 31 2461.
- [7] ČSN EN 2633. *Letectví a kosmonautika: Slitina hliníku AL-2024-T3511 – Tyče a profily lisované do $1,2$ mm $\leq a$ nebo $D \leq 150$ mm a kontrolou hrubého zrna na obvodu*. Praha: Český normalizační institut, 1996. Třídící znak 31 2415.
- [8] ČSN EN 2694. *Letectví a kosmonautika: Slitina hliníku AL-P6061-T6 nebo T62-plechy a pásy $0,4$ mm $\leq a \leq 6$ mm*. Praha: Český normalizační institut, 1996. Třídící znak 31 2445.
- [9] ČSN EN 2695. *Letectví a kosmonautika: Slitina hliníku AL-P6081-T6-plechy a pásy $0,3$ mm $\leq a \leq 6$ mm*. Praha: Český normalizační institut, 1996. Třídící znak 31 2447.
- [10] ČSN EN 2696. *Letectví a kosmonautika: Slitina hliníku AL-P7075-T6 nebo T62-plechy pásy*. Praha: Český normalizační institut, 1996. Třídící znak 31 2461.
- [11] Kolektiv československých a zahraničních autorů. *Příručka o hliníku*. SNTL Praha, M.K. Budapest, V.T. Berlin, WNT Warsaw, 1969. ISBN 04-237-69.
- [12] MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
- [13] PÍŠEK, František, Ladislav JENÍČEK a Přemysl RYŠ, CENEK, Mojmír a Antonín HRBEK, ed. *Nauka o materiálu*. 1. [díl], Nauka o kovech. 2. zcela přeprac. a rozš. vyd. Praha: Academia, 1973, 1. [díl].
- [14] ŽÁK, Jan. *Speciální letecké technologie I*. 1. Vyd. Praha: Mezinárodní organizace novinářů, 1990. 220 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0128-1

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1: Tabulka naměřených hodnot tvrdosti slitin 2017 a 2024
- Příloha 2: Tabulka naměřených hodnot tvrdosti slitiny 7075
- Příloha 3: Tabulka naměřených hodnot průběhu tvrdost-pevnost slitiny 2017
- Příloha 4: Tabulka naměřených hodnot průběhu tvrdost-pevnost slitiny 2024
- Příloha 5: Tabulka naměřených hodnot průběhu tvrdost-pevnost slitiny 7075
- Příloha 6: Tabulka naměřených hodnot při žihání
- Příloha 7: Certifikát slitiny 2017
- Příloha 8: Certifikát slitiny 7075

První měření tvrdosti slitin 2017 a 2024

č. měření	doba vytvzování [h]	2017 (42 4201)		2024 (42 4203.61)		č. měření	doba vytvzování [h]	2017 (42 4201)		2024 (42 4203.61)	
		tvrdost	průměr	tvrdost	průměr			tvrdost	průměr	tvrdost	průměr
		HRB	HRB	HRB	HRB			HRB	HRB	HRB	HRB
1	0	29,1	28,4	44,6	43,0	11	5	57,3	59,1	69,5	69,1
		28,5		43,2				61,3		69,3	
		27,5		41,3				58,7		68,6	
2	0,5	-	-	49,6	49,1	12	5,5	60,8	60,1	68,8	69,6
		-		50,9				60,6		70,4	
		-		46,9				58,9		69,6	
3	1	38,1	38,3	51,5	52,9	13	6	61,7	61,5	68,9	69,2
		38,4		53,1				63		69	
		38,5		54,2				59,7		69,6	
4	1,5	43,4	43,2	57,7	57,5	14	6,5	63,2	61,2	70,1	69,9
		43,5		57,7				61,6		69,6	
		42,7		57,2				58,7		69,9	
5	2	46,6	46,7	59,8	60,4	15	15,7	68,3	68,6	73,3	73,5
		48,5		60,4				68,4		73,7	
		45,1		60,9				69,1		73,4	
6	2,5	51,3	50,8	61,5	62,7	16	22,5	70,2	69,0	73,3	73,7
		50,3		63,7				68,8		74,2	
		50,7		63				67,9		73,7	
7	3	53,7	54,0	65,9	65,3	17	38,7	70	70,2	73,4	74,5
		54,7		65,3				70,9		74,7	
		53,6		64,7				69,7		75,4	
8	3,5	56,5	54,9	67,3	66,3	18	47,7	69,5	70,1	73,9	74,7
		55,8		65,8				70,1		75,4	
		52,4		65,9				70,6		74,7	
9	4	55,8	57,3	66,2	67,3	19	160	71,5	71,2	74,9	75,0
		57,7		68,4				71,2		74,7	
		58,3		67,3				71		75,5	
10	4,5	59	58,7	68,4	68,6						
		59,4		68,9							
		57,6		68,5							

První měření tvrdosti slitiny 7075			
č. měření	doba vytvřz.	7075 (42 4222)	
		tvrdost	průměr
	[min]	HRB	HRB
1	0	21,1	25,1
		24,1	
		30,2	
2	50	65,7	68,8
		70,2	
		70,4	
3	110	71,6	72,7
		72,5	
		74,1	
4	170	74,3	73,7
		72,8	
		74,1	
5	230	80	78,6
		78,8	
		77,1	
6	290	80,1	80,8
		81,4	
		80,8	
7	350	81,8	81,9
		82,3	
		81,7	
8	360	81,8	83,2
		83,9	
		84	

Tabulka naměřených hodnot průběhu tvrdost-pevnost slitiny 2017

č. vzorku	čas [hod]	[HRB]						[mm]		tloušťka t [mm]	plocha S [mm ²]	F _{rem} [kN]	R _m [MPa]
		tvrdost pravá str.	tvrdost pravá průměr	tvrdost leva str.	tvrdost leva průměr	tvrdost průměr	Šířka b	Šířka průměr					
1.1	0	23,8	25,7	24,9	24,2	24,2	12,50	12,40	2,01	24,92	8,4	337,0	
		26,4		23,5		24,1	12,50						
		27		24,1		12,40							
1.2	1,33	28,8	27,7	28,8	28,4	28,1	12,45	12,46	25,05	8,44	336,9		
		27,2		29,6		26,7	12,45						
		27,2		26,7		12,49							
1.3	2,33	35,2	36,4	37,9	36,4	36,4	12,45	12,46	25,04	8,8	351,4		
		36,5		36,4		12,46							
		37,6		34,9		12,48							
1.4	3,33	41,7	40,8	42,3	42,5	41,7	12,50	12,46	25,04	9,1	363,4		
		40		42,9		12,46							
		40,6		42,4		12,46							
1.5	5,33	52,5	51,2	51,4	52,1	52,1	15,54	12,45	2,01	25,02	9,68	386,8	
		51		52,3		12,47							
		50,2		52,5		12,45							
1.6	7,33	55,2	54,7	54,1	54,8	54,7	12,46	12,46	25,04	9,86	393,7		
		54,2		54,9		12,46							
		54,6		55,3		12,50							
1.7	12	58,2	58,5	58,8	59,1	58,8	12,49	12,49	25,10	10,14	403,9		
		58,5		59		12,49							
		58,8		59,5		12,49							
1.8	24	61,6	61,9	61,6	62,7	62,3	12,57	12,47	25,06	10,55	420,9		
		61,6		62,7		12,56							
		62,4		63,8		12,47							
1.9	32	66,4	66,4	66,7	66,2	66,3	12,46	12,46	25,04	10,7	427,2		
		66,1		66,5		12,46							
		66,8		65,4		12,46							
1.10	168	67,8	68,6	68,6	68,0	68,3	12,50	12,43	24,98	10,9	436,3		
		68		68,4		12,45							
		69,9		66,9		12,43							

Tabulka naměřených hodnot průběhu tvrdost-pevnost slitiny 2024													
č. vzorku	čas [hod]	[HRB]					[mm]		[mm]	[mm ²]	[kN]	[MPa]	
		tvrdost pravá str.	tvrdost pravá průměr	tvrdost leva str.	tvrdost leva průměr	tvrdost průměr	Šířka b	Šířka průměr	tloušťka t	plocha S	F _{Rm}	R _m	
2.1	0	33,8	32,4	30,7	32,6	32,5	12,51	12,50		25,63	8,9	347,3	
		33,4		33,9			12,51						
		30		33,1			12,50						
2.2	1	38,5	38,3	37,4	37,8	38,1	12,48	12,45	2,05	25,52	9,45	370,3	
		38,4		37,3			12,46						
		38		38,7			12,45						
2.3	2	42,5	43,7	39,5	44,4	44,1	12,29	12,27	2,02	24,79	9,43	380,5	
		46,7		47,2			12,29						
		41,9		46,6			12,27						
2.4	3	51,4	52,8	52,5	52,7	52,7	12,36	12,33	2,01	24,78	9,74	393,0	
		53		52,6			12,38						
		54		52,9			12,33						
2.5	5	58,8	59,8	57,8	59,1	59,4	12,49	12,49	2,05	25,60	10,65	415,9	
		60,6		60,1			12,51						
		60		59,3			12,50						
2.6	7	65,6	65,5	65,7	64,9	65,2	12,51	12,48	1,99	24,84	10,83	436,1	
		65,3		64,9			12,48						
		65,6		64,2			12,49						
2.7	16	66,3	67,0	67,4	68,6	67,8	12,49	12,46	2,01	25,04	11,05	441,2	
		67,4		69,5			12,46						
		67,4		69			12,48						
2.8	24	68	68,2	68,8	69,2	69,2	12,53	12,51	2,02	25,27	11,35	449,1	
		68		69,4			12,51						
		68,6		69,5			12,52						
2.9	47	68,6	68,3	68,8	68,8	68,8	12,44	12,44	2,04	25,38	11,45	451,2	
		68,3		68,9			12,44						
		68		68,8			12,44						
2.10	192	71,6	72,1	72,9	73,3	72,7	12,44	12,44	1,98	25,38	11,28	444,5	
		72		73,4			12,44						
		72,7		73,7			12,44						

Tabulka naměřených hodnot průběhu tvrdost-pevnost slitiny 7075

č. vzorku	čas [hod]	[HRB]					[mm]		tloušťka t [mm]	plocha S [mm ²]	F _{rm} [kN]	R _m [MPa]
		tvrdost pravá str.	tvrdost pravá průměr	tvrdost leva str.	tvrdost leva průměr	tvrdost průměr	Šířka b	Šířka průměr				
3.1	0	33,8	33,8	33,2	32,6	33,2	12,44	12,44	2,45	30,48	10,7	351,1
		33,7		32		12,45						
		33,9		32,7		12,44						
3.2	0,5	70,4	70,7	70,4	70,7	70,7	12,48	12,48	2,45	30,58	14,03	458,9
		71,2		70,6		12,53						
		70,4		71		12,48						
		73,7		74,5		12,56						
3.3	1	75,4	74,9	75,2	74,9	74,9	12,56	12,56	2,45	30,77	14,43	468,9
		75,7		75		12,58						
		75,7		75,8		12,5						
		75		75,5		12,48						
3.4	2	75,7	75,5	75,2	75,5	75,5	12,5	12,48	2,45	30,58	14,56	476,2
		80,3		80,7		12,55						
		80,9		80,7		12,54						
		80,6		80,9		12,57						
3.5	4	81,7	81,8	81,7	81,9	81,9	12,44	12,44	2,44	30,72	15,35	499,6
		81,9		82,1		12,49						
		81,8		81,9		12,45						
		85,4		86,1		12,49						
3.6	6	85,7	85,5	85	85,6	85,6	12,47	12,47	2,48	30,93	15,88	513,5
		85,5		85,6		12,48						
		86,1		86,7		12,46						
		87,3		87,2		12,49						
3.7	16	87	86,8	87	87,0	86,9	12,48	12,46	2,45	30,53	16,33	534,9
		89,8		90,2		12,57						
		89,9		90,5		12,55						
3.8	24	89,9	89,9	90,1	90,0	12,56	12,55	2,47	31,00	17,1	551,6	
		90,7		89,5		12,56						
		90,7		89,5		12,56						

Tabulka naměřených hodnot žíhaného materiálu							
slitina	tvrdost průměr	Šířka b	Šířka průměr	tloušťka t	plocha S	F _{Rm}	Rm
	HRB	[mm]	[mm]	[mm ²]	mm ²	[kN]	[MPa]
2017	57,6	12,49	12,49	1,99	24,84	4,93	198
		12,50					
		12,47					
2024	61,55	12,46	12,44	2,05	25,52	5,6	219
		12,42					
		12,46					
7075	64,7	12,46	12,45	2,44	30,39	6,6	219
		12,44					
		12,47					

Inspection certificate No. 172960AT

EN 10204/3.1

Dodavatel (Supplier): Alcom Alval s.r.o. Křemenáčová 174/2 104 00 Praha-Pitkovice Česká republika IČ: 25352822 DIČ: CZ25352822 Tel: 554 773 052-5 Fax: 554 773 050 E-mail: hlinik@hlinik.cz	Odběratel (Consignee): Vysoké učení technické v Brně Fakulta strojního inženýrství Technická 2896/2 616 69 Brno Česká republika IČ: 00216305 DIČ: CZ00216305 Tel: 00420 Fax: E-mail:
Materiál (Material): BPP002002017AT4 tl. 2,00 mm; PŘÍŘEZ; EN AW-2017A T4; EN 573-3, EN 485-1,-2; AlCu4MgSi(A); kalený	
Rozměr (Dimension) [mm] 200x1000 mm	
Množství (Quantity): 5,00 ks	

Kupní smlouva (Contract): KS 1717028
 Objednávka (Purchase order): www091017
 Dodací list (Shipping document): DLV 1710186
 Originální atest (OIC No.): 89059793 01/1
 Ze dne (Date): 7.8.2017
 Původ zboží (Origin): AT

Mechanické vlastnosti (Mechanical properties)

Číslo šarže (Lot number)	Číslo tavby (Cast number)	Pevnost v tahu (Tensile strength) [Mpa]	Mez kluzu (Yield strength) [Mpa]	Tažnost (Elongation) [%]	Tvrdość HB (Hardness)
33715/01	01/0083667/7	441-444	304-309	A50=18	-

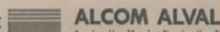
Chemické složení (Chemical composition)[%]

Prvek (Element)	Silicon Si	Iron Fe	Copper Cu	Manganese Mn	Magnesium Mg	Chromium Cr	Zinc Zn	Titanium Ti	Aluminium Al
Hodnota (Content)	0,64	0,4	4,3	0,7	0,74	0,05	0,2	0,04	-

Poznámka (Note):-

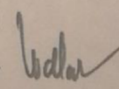
Za správnost údajů odpovídá: Ivan Vodák

Podpis:

Razítko: 

Ivan Vodák
 IČ: 25352822
 DIČ: CZ25352822

Alcom Alval s.r.o.
 Krnovská 1397/47
 792 01 Bruntál



Inspection certificate No. **065705/3RU**
EN 10204/3.1

Dodavatel (Supplier): Alcom Alval s.r.o. Křemenáčová 174/2 104 00 Praha-Pitkovice Česká republika IČ: 25352822 DIČ: CZ25352822 Tel: 554 773 052-5 Fax: 554 773 050 E-mail: hlinik@hlinik.cz	Odběratel (Consignee): Vysoké učení technické v Brně Fakulta strojního inženýrství Technická 2896/2 616 69 Brno Česká republika IČ: 00216305 DIČ: CZ00216305 Tel: 00420 Fax: E-mail:
Materiál (Material): BPP002507075T651 tl. 2,50 mm; PŘÍŘEZ; EN AW-7075 T651; EN 573-3, EN 485-1,-2; AlZn5,5MgCu; kalený	
Rozměr (Dimension) [mm] 200x1250 mm	
Množství (Quantity): 4,00 ks	

Kupní smlouva (Contract): KS 1717028
 Objednávka (Purchase order): www091017
 Dodací list (Shipping document): DLV 1710186
 Originální atest (OIC No.): 02-00152
 Ze dne (Date): 14.1.2009
 Původ zboží (Origin): RU

Mechanické vlastnosti (Mechanical properties)

Číslo šarže (Lot number)	Číslo tavby (Cast number)	Pevnost v tahu (Tensile strength) [Mpa]	Mez kluzu (Yield strength) [Mpa]	Tažnost (Elongation) [%]	Tvrdost HB (Hardness)
89783	11-2068	540	470	A50-7	-

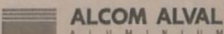
Chemické složení (Chemical composition)[%]

Prvek (Element)	Silicon Si	Iron Fe	Copper Cu	Manganese Mn	Magnesium Mg	Chromium Cr	Zinc Zn	Titanium Ti	Aluminium Al
Hodnota (Content)	0,11	0,24	1,55	0,14	2,31	0,2	5,16	0,04	-

Poznámka (Note):-

Za správnost údajů odpovídá: Ivan Vodák

Podpis:

Razítko:  **ALCOM ALVAL**
ALUMINIUM

Ivan Vodák
 IČ: 25352822
 DIČ: CZ25352822

Alcom Alval s.r.o.
 Krnovská 1397/47
 792 01 Bruntál

