



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

PEVNOSTNÍ A MATERIÁLOVÁ ANALÝZA HOROLEZECKÝCH KARABIN ZE SLITIN HLINÍKU

STRENGTH AND MATERIALS ANALYSIS OF MOUNTAIN-CLIMBING CARBINE FROM
ALUMINUM ALLOYS.

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JIŘÍ HANDRK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JOSEF ZAPLETAL

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství
Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jiří Handrk

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Materiálové inženýrství (3911R011)**

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 bakalářské práce:

Pevnostní a materiálová analýza horolezeckých karabin ze slitin hliníku

v anglickém jazyce:

Strenght and materials analysis of mountain-climbing carbine from aluminum alloys.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je zjištění pevnostních charakteristik horolezeckých karabin jako celku, dále stanovení základních mechanických charakteristik použitého materiálu, metalografická analýza materiálu a povrchové antikoroziční vrstvy (elox).

Cíle bakalářské práce:

Ověření mezního stavu karabin. Na základě zjištění chemického složení a mechanických charakteristik typové zařazení materiálu. Na základě metalografických analýz vyhodnotit jakost základního materiálu a ochranné povrchové vrstvy.

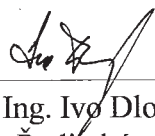
Seznam odborné literatury:

- [1] PTÁČEK, L. a kolektiv: Nauka o materiálu I., Akademické nakladatelství CERM, Brno, 2001.
- [2] MICHNA, Š. a kolektiv: Encyklopedie hliníku, Adín, Prešov 2005.
- [3] SEDLÁČEK, V.: Únava hliníkových a titanových slitin. Praha, SNTL, 1989
- [4] LUKÁČ, I.: Štruktúra a vlastnosti neželezných kovov, Alfa, Bratislava, 1986


Vedoucí bakalářské práce: Ing. Josef Zapletal

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 4.2.2011



prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá pevnostními charakteristikami horolezeckých karabin, a to jak celku tak i zkušebních vzorků. Dále vyhodnocuje typ povrchové vrstvy. Pomocí získaných mechanických vlastností a zjištěného chemického složení typově zařazuje materiál, z kterého byly karabiny vyrobeny.

KLÍČOVÁ SLOVA

statická zkouška tahem, karabina D s drátěným zámkem, anodická oxidace Elox, chemické složení, EN AW 7075, precipitační vytvrzování

ABSTRACT

This paper focuses on structural strength characteristics of climbing carabiners, in whole carabiner and in testing samples. Furthermore evaluates the type of surface layer. With gained data about mechanical properties and chemical composition this paper sorts type of material, from which the carabines were made.

KEYWORDS

static tensile test, D carabiner wire lock Elox anodic oxidation, chemical composition, EN AW 7075, precipitation hardening

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HANDRK, J. *Pevnostní a materiálová analýza horolezeckých karabin ze slitin hliníku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Josef Zapletal.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 26. května 2011

.....

Jméno a přímení

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkovat svému školiteli Ing. Josefu Zapletovali za vypsání této práce a za jeho vedení při jejím vypracování. Dále bych rád poděkoval Ing. Pavlu Doležalovi PhD za jeho cenné. Děkuji také všem pracovníkům Ústavu materiálových věd a inženýrství za jejich odbornou pomoc.

OBSAH

1	Úvod	1
2	Výroba a zpracování hliníku	2
2.1	Zásaditá metoda	2
2.1.1	Bayerova metoda	2
2.1.2	Spékací metoda.....	4
2.1.3	Destilační metoda	5
2.2	Kyselé metody	5
2.3	Výroba hliníku elektrolýzou	5
2.4	Kombinované metody	7
3	Označování hliníku a slitin hliníku pro tváření podle ČSN EN 573	8
4	Tepelné zpracování slitin hliníku	12
4.1	Značení tepelného zpracování.....	14
4.2	Doporučené tepelné zpracování slitin série 7000	15
4.3	Způsoby tepelného zpracování slitin 7075	15
4.4	Vytvrzování	15
4.4.1	Rozpouštěcí žíhání.....	16
4.4.2	Ochlazování z homogenizační teploty.....	16
4.4.3	Precipitační vytvrzování	17
4.4.4	Precipitační vytvrzování série 7000	18
4.4.5	Vytvrzování za tepla.....	18
4.4.6	Vytvrzování za studena	19
5	Povrchové úpravy hliníkových slitin.....	20
5.1	Teorie vytváření vrstvy	21
5.1.1	Tloušťka vrstvy.....	22
5.1.2	Vlastnosti vrstev vytvořené anodickou oxidací.....	23
5.1.3	Různé metody anodické oxidace	24
5.1.4	Technologie anodické oxidace	25
6	Cíle práce.....	31
7	Experimentální materiál	32
8	Experimentální metodika.....	34
8.1	Zkouška tahem	34
8.2	Zkouška tvrdosti	34
8.3	Chemická analýza	34
8.4	Výroba a příprava pro metalografickou analýzu	34
9	Výsledky a hodnocení experimentů	35

9.1	Statická zkouška tahem.....	35
9.1.1	Statická zkouška tahem celých karabin.....	35
9.1.2	Statická zkouška tahem zkušebních těles.....	37
9.2	Měření tvrdosti.....	39
9.3	Analýza chemického složení.....	39
9.4	Mikrostruktura CZ karabiny.....	40
9.5	Mikrostruktura US karabiny.....	41
9.6	Povrchová analýza.....	43
10	Závěr.....	45
11	Seznam použitých zdrojů.....	46
12	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	47
13	Seznam příloh.....	49

1 Úvod

V počátcích volného lezení byly karabiny vyráběny z oceli. Byly velice těžké, ale měli dobré mechanické vlastnosti. Moderní lezení však je pod heslem rychleji a výš. Což zapříčinilo používání materiálů dříve určených na zcela jiné odvětví. Snaha je o co nejlehčí materiál s pokud možno co nejlepšími mechanickými a fyzikálními vlastnostmi. Ovšem se snadnou výrobou a cenovou dostupností. Jako kompromis mezi těmito nároky jsou používány hliníkové slitiny.

I když má hliník největší procento zastoupeny v zemské kůře, jeho průmyslová výroba začala na konci 19 století. Jeho výroba byla dokonce tak drahá že kilo hliníku stálo více než kilo zlata. I to zapříčinilo, že hliník byl použit na výrobu části královské koruny pro světovou výstavu v Paříži v roce 1855. S principem výroby hliníku pomocí elektrolýzy byla objevena ruda bauxit což je dnes nejméně používaná ruda pro výrobu hliníku. Jeho velkovýroba začala až po druhé světové válce.

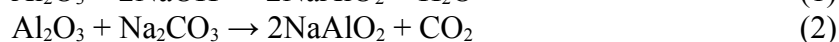
Dnes je hliník velmi využívaným kovem. Jeho produkce rok od roku stoupá a to nejen výrobou primární, ale i jeho recyklací. V dnešní době je velice dbáno na ekologii, proto se snaží podíl mezi vyrobeným a recyklovaným hliníkem co nejvíce zvýšit. Procento hliníku v automobilovém a leteckém průmyslu rovněž vzrůstá i díky snaze snížit hmotnost a tím snížit vyprodukované emise. Energetická náročnost výroby je značná a proto se vývoj snaží tyto nároky snížit, aby výroba byla levnější a tím menší dopad na životní prostředí.

2 VÝROBA A ZPRACOVÁNÍ HLINÍKU

Hliník má z kovů největší zastoupení v zemské kůře a nachází se přibližně v 250 různých minerálech. Mezi nejdůležitější z těchto minerálů patří korund, diaspor, boehmit, spinel, gibbsit, kyanit, andaluzit, silimanit, kaolinit, alunit a nefelin. Na výrobu hliníku se především používá ruda jménem bauxit, ta se v zemské kůře nachází v značně rozdílné bohatosti na hliník. Mezi nejproduktivnější země na těžbu bauxitu patří Austrálie, Guinea, Jamajka, Brazílie a Čína. Z vytěženého bauxitu se nejčastěji vyrábí Al_2O_3 [1].

2.1 Zásaditá metoda

Jelikož je oxid hlinitý amorfní, je možno z rud jej získávat jak kyselými metodami, tak metodami zásaditými. V současnosti se oxid hlinitý vyrábí téměř výlučně zásaditými metodami. Těmito metodami se působením alkálií (NaOH , resp. Na_2CO_3) na rudu bauxitu váže oxid hlinitý na hlinitan sodný podle rovnic (1) a (2), který je rozpustný ve vodě:



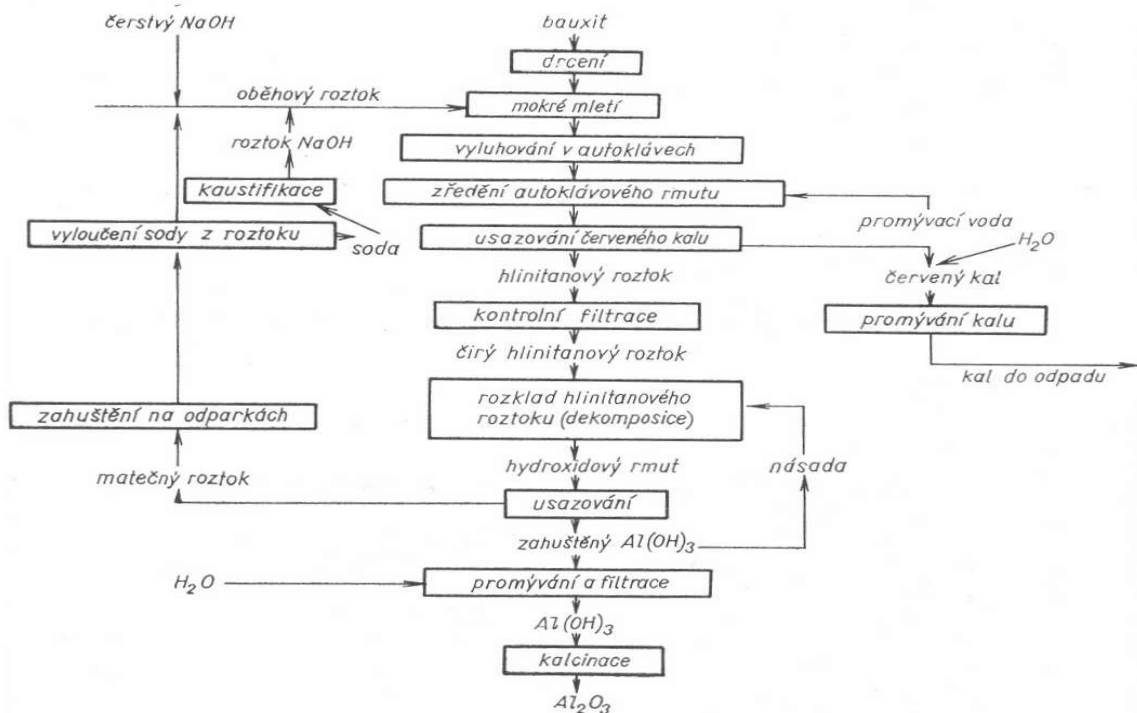
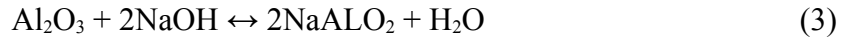
Nerozpustné části z bauxitu se usazují po tomto ději na dně ve formě červeného kalu. Ten je složen hlavně z oxidů a hydroxidů křemíku železa a titanu. Následným rozložením roztoku se získává čistý hydroxid sodný, který je dále kalcinován pro odstranění vody. Takto získaný α - Al_2O_3 je vhodný k výrobě kovového hliníku. Způsoby jak přechází oxid hlinitý obsažený v rudě na hlinitan sodný se rozdělují do několika skupin podle použitého způsobu:

- Spékací metody (suchá cesta): v této metodě se ruda nejprve spéká s karbonáty jako např. Na_2CO_3 s přítomností CaCO_3 v pecích rozdílných konstrukcí. Pece mohou být elektrické (Kuzněcov-Žrukovského způsob), rotační (Müller-Jarkovinuův způsob), případně šachtové.
- Mokrý metoda: při této metodě se ruda zpracovává roztokem hydroxidu draselného, např. Bayerova metoda
- Kombinovaný způsob: je využití obou cest jak suché tak mokré. Zástupcem tohoto způsobu je destilační metoda.

Parametrem pro zvolení metody je obvykle měřítko čistoty a kvality výchozí suroviny. Zásadité metody se volí pro snadnost čištění oxidu hlinitého od příměsí v podobě železa a titanu. O podstatně složitější je odstraňování oxidu křemičitého. Přesně naopak je tomu u kyselých metod [1,2].

2.1.1 Bayerova metoda

Tato metoda je nejrozšířenější po celém světě a většina hliníku, která se vyprodukuje, je vyrobena hydrometalurgickou zásaditou metodou neboli Bayerovou metodou. Výchozí surovinou je zde kvalitní bauxit s nízkým obsahem oxidu křemičitého přibližně v rozmezích 2-5 %. Bayerova metoda je pro zpracování takovýchto rud ekonomicky hospodárná. Samotná podstata této metody spočívá v přímém loužení oxidu hlinitého loužicemi roztoky, z čehož je získáván hlinitanový roztok, který se následně sám rozkládá za vylučování hydroxidu hlinitého [1]. Tyto reakce jsou vratné (3)

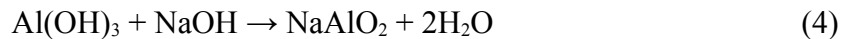


Obr. 1: Schéma výroby Al₂O₃ Bayerovým způsobem[1]

Technologie Bayerovy metody

Jedná se o cyklus, který je uzavřený. Loužení různých druhů bauxitu probíhá v hydroxidu sodném., z čehož se následně vysrážejí sloučeniny hliníku. Různé typy bauxitu mají různé reakce a probíhají za různých podmínek.

-gibbistické bauxity (4) se louží za teplot vyšších než je 100 °C a srážení probíhá pod touto teplotou:



-boehmitické bauxity (5) se louží při teplotách vyšších než 200 °C :



-diasporické bauxity (6) se louží při nejvyšší teplotě a to nad 240 °C:



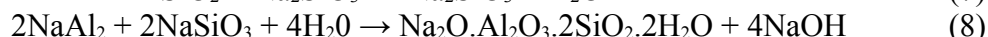
Průmyslově vzniklé roztoky hlinitanů se rozdělují podle rozdílné koncentrace oxidu hlinitého a zásady Na₂O. Tato koncentrace se udává v gramech na litr. Zásadité roztoky mohou být dva typy louhové a karbonátové. Louhové roztoky tvoří hlinitanu a označují se Na₂O kaustický. Druhý druh zásad je zásada karbonátová, která se vyskytuje v roztoku jako Na₂CO₃ a označují se jako Na₂O karbonátový. Jejich součet, tedy součet zásad louhových a karbonátových, je označován jako Na₂O celkový.

Hlavní operační kroky Bayerovy metody

- rozklad: zde se vytváří hlinitanový roztok loužením bauxitu
- oddělování červeného kalu
- srážení hydroxidu hlinitého z hlinitanového roztoku
- odstranění $\text{Al}(\text{OH})_3$
- odpařování matečního roztoku [1,2]

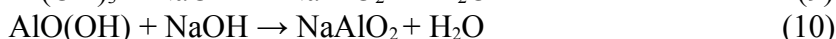
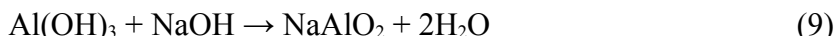
Destilace

Je to ohřev suspenze bauxitu na rozkladnou teplotu. Při tomto procesu se reaktivní křemičité složky rozpustí a následně vysráží z kaustického roztoku ve formě sodnohlinitých hydrosilikátů (7,8).



Loužení bauxitu a jeho rozklad

Loužení probíhá tím, že se nechá působit roztok hydroxidu sodného na rozemletou rudu. Oxid hliníku vázaný na oxid křemíku je nerozpustný, tvoří červený kal. Tato etapa obvykle probíhá za zvýšeného tlaku [1,2].



Princip tohoto procesu spočívá v závislosti rozpustnosti Al_2O_3 na teplotě kaustického roztoku. Vliv má i tlak při, kterém loužení probíhá, a koncentrace roztoku. K zajištění vyšších tlaků slouží autoklávy. Ty mají dvojí druh konstrukce, buďto rourové pro tlak až 15 MPa, nebo válcové pro tlaky okolo 1 MPa. Autoklávy musí být odolné vůči korozi a abrazi způsobené bauxitovou suspenzí [1,2].

Odstraňování červeného kalu z hlinitanového roztoku

Jelikož se bauxit nikdy zcela nerozpustí v roztoku hydroxidu sodném, je potřeba odstranit tyto nerozpustitelné složky, které se nazývají červený kal. Proces odstraňování má několik fází. První fází je oddělování kapalné fáze od tuhé. Zde se odděluje roztok bohatý na hliník od červeného kalu. Druhou fází je promývání červeného kalu a poslední fází je filtrování a řízená filtrace hlinitanového roztoku [1,2].

2.1.2 Spékací metoda

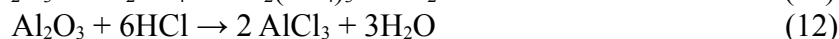
Pokud je obsah SiO_2 vysoký, kolem 8 %, stává se Bayerova metoda finančně nevýhodná a proto se volí metoda spékací. Ta patří mezi metody suché termicky zásadité. Metoda spočívá ve spékání bauxitu s přídavkem sody za vysoké teploty. Výsledkem spékání je ve vodě dobře rozpustný spečenec. SiO_2 při tomto procesu je převáděn do hnědého kalu ve formě dikalcia silikátu díky reakci s vápencem. Tento kal je jiný jak svým chemickým složením tak svým mineralogickým zařazením od kalu červeného. Tento kal se rovněž jako červený kal odděluje. Při karbonizaci hlinitanového roztoku působením CO_2 vzniká hydroxid hlinitý a mateční roztok. Výsledný hlinitan sodný se musí spékat. Nižších ekonomických nákladů lze dosáhnout použitím CO_2 z pecí, kde se předem bauxit spékal a mateční roztok se dá použít k mletí v mokré větvi [1,2].

2.1.3 Destilační metoda

Tato metoda se skládá z kalcinace jílu při 1000 °C, který se následně drtí a mele za mokra s regenerovaným roztokem NaOH při teplotě 90 °C. Takto připravený jíl se destiluje asi půl hodiny, během této doby se vyloučí asi 83 % přítomného SiO₂. Jíl se následně promývá a odfiltrovává, další zpracování probíhá v Bayerově větvi. Zde se získaný kal spéká a louží. Z ekonomických důvodů se destilační louh obsahující SiO₂ regeneruje v míchačkách přidáním CaO. Výsledná směs v podobě louhu se zahušťuje na odparkách. Tato metoda patří mezi kombinované metody.[1,2]

2.2 Kyselé metody

Ruda se při těchto metodách louží v anorganických kyselinách jako jsou HCl, HNO₃, H₂SO₄ a H₂SO₃. Při tomto postupu se mění oxid hlinitý na příslušnou sůl Al₂(SO₄)₃, AlCl₃ atd. podle rovnic (11,12):



Získaná sůl se rozkládá, přičemž se uvolňuje Al(OH)₃, tento hydroxid je následně kalcinován. Odstranění oxidu křemičitého z roztoku je snadné, neboť během loužení téměř nereaguje. Opakem toho je odstraňování železa a titanu, které je velice nákladné a složité, protože jejich soli se chovají dosti podobně jako soli hliníku. Další důvod, proč se kyselé metody neupřednostňují je, že jsou používány agresivní chemikálie a vznik mnohých meziproduktů. Rudy s nízkým obsahem železa a titanu a tedy vhodné pro kyselé metody jsou bílý bauxit a kaolin [1,2].

2.3 Výroba hliníku elektrolýzou

Elektrolyt v této metodě je složen z taveniny soustavy Al₂O₃ – kryolitu(nerost, Na₃AlF₆). Výsledný hliník získaný touto metodou je 99,5 až 99,7 % čistý a obvykle se ještě kalcinuje, aby čistota ještě vzrostla až na 99,98 %. Což celou metodu ještě prodražuje. Při samotné výrobě je velká spotřeba elektrické energie v podobě střídavého proudu. Proto se provádí výzkumy jak snížit bod tání taveniny a jak zvýšit vodivost elektrolytu. Již samotný kryolit snižuje teplotu tání Al₂O₃ z 2050 °C na 950 °C. Tato teplota je docílena poměrem soustavy Al₂O₃ – kryolit přibližně 15 % Al₂O₃. V praxi se obsah pohybuje maximálně kolem 10%. Teplota je snižována i proto, že teplota 2050°C by znamenala vylučování hliníku v plynném stavu.

Elektrolýzu hliníku je možno provést díky rozpustnosti Al₂O₃ v kryolitu. Katoda je vyrobena z grafitu a může jí být i dno elektrolyzéry. Později tuto úlohu katody přebírá kapalný hliník, který se u ní vylučuje díky rozkladu kyslíčnicku hlinitého, ten je z elektrolyzéry pravidelně odčerpáván.

Při ochlazování je uhlíková katoda chráněna před agresivními solemi takzvanou granisází, což je tuhá vrstva, která vzniká na stěnách a částečně na povrchu elektrolyzéry.

Základy elektrolýzy

Vyloučit kov z vodných roztoků s negativním potenciálem (Al -1,66 V) je obtížné. Možnosti, které tento proces, pomoci změn koncentrace a vodíkového přepětí, umožňují jsou

omezené. Někdy nemožný je u kovů s velmi negativním potenciálem, v takovém případě se používá elektrolyza z roztavených solí.

Při elektrolyze z tavenin je lázeň složena pouze tavidlem a směsí sloučenin. Není zde žádný vodík, proto je potřeba hlídat, aby rozkladná sloučenina měla menší rozkladné napětí než tavidlo. Kryolitový poměr (KP) je molární poměr mezi NaF-AlF₃ v elektrolytu. Nejrozšířenější průmyslové lázně mají takzvané kyselé elektrolyty s KP=2,9 až 2,6. Pokud by byly, ale příliš kyselé stávaly by se těkavými a hůře by rozpouštěly Al₂O₃. Hodnoty rozkladného napětí složek charakterizují elektrické vlastnosti elektrolytu. Nejvyšší rozkladné napětí má NaF (4,6 V), naopak nejnižší dosahuje Al₂O₃ (1,7 V). Elektrolyza lázně, složené převážně ze solí má svoje zvláštnosti oproti vodným roztokům. Předpokládá se totiž disociace kryolitu na ionty, podle rovnice (13):



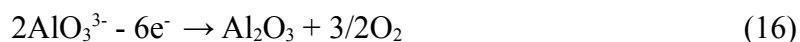
Kyslíčnick hlinitý rozpuštěný v tavidle z kryolitu nejspíše disociuje na ionty (14):



Ionty Na⁺ a Al³⁺ jsou přenášeny na anodu pomocí střídavého proudu. Ionty hliníku Al (-1,66) se vybíjejí dříve než sodíku Na (-2,71) a to proto, že mají větší vylučující potenciál. Při tomto vylučování se na katodě vyloučí kov. Katodová reakce (15):



Podle fyzikálních zákonů jsou anionty přitahovány k anodě, zde se ale vybíjejí pouze negativnější ionty AlO₃³⁻ (16):



Na katodě se vylučuje velice čistý hliník a na anodě která se při provozu odpaluje kontaktem grafitu s kyslíkem se tvoří směs plynů CO a CO₂.

Anodový efekt

Efekt je založen na smáčivosti elektrolytu. Ta je závislá na obsahu Al₂O₃. Pokud jeho obsah klesne přibližně na 1 %, elektrolyt se stává nesmáčivým a odhaluje anodu. To doprovází jiskrový výboj, který se periodicky opakuje. Efekt je doprovázen typickým praskáním. Napětí na anodě (vaně) stoupne z 4,5 na 30 až 40 V. To je ekonomicky nevýhodné a proto je tento efekt omezen na 0,3 až 0,6 efektů na elektrolyzátor za den. Pomocí tohoto efektu se dá bez přístrojů odhadnout jaké je zbylé množství Al₂O₃ v elektrolytu.

Pochody na katodě

Primární elektrochemický proces na katodě je vybíjení iontů Al³⁺. Probíhají zde ale i jiné děje, které mají vliv na práci elektrolyzátoru. Jsou to tvorba karbidu hliníku, vylučování sodíku, selektivní absorpce elektrolytu katodou a rozpouštění hliníku v elektrolytu.

Pochody na anodě

Stejně jako u pochodů na katodě i zde probíhají vedle nejdůležitější reakce, vybíjení iontů AlO₃³⁻ s následnou oxidací uhlíku na CO a CO₂, další reakce. Těmito reakcemi jsou rozpouštění kovu s anodovými plyny a anodový efekt [1,2].

2.4 Kombinované metody

Touto metodou se zpracovávají suroviny, které se ekonomicky neoplatí zpracovávat Bayerovou metodou nebo pouze spékací metodou. Metoda spočívá v propojení spékací metody s Bayerovým postupem. V Bayerově metodě se zpracovává kvalitnější bauxit a ve spékací větvi se zpracovává bauxit nižší kvality (s vyšším obsahem SiO_2). Množství vyrobeného Al_2O_3 získaného spékací metodou by měl být nižší a to kolem 13% z celkové kapacity výroby.

Bauxit nižší kvality se louží v Bayerově větvi, vzniklý červený kal se následně spéká s vápencem. Hlinitanový roztok se pak opět vrací do Bayerovy cesty, kde se míchá a sráží. Využitím kombinované metody je dosaženo většího množství vyrobeného Al_2O_3 z bauxitu. Jeho kvalita je vyšší než při výrobě spékací metodou a je také spotřebováno méně hydroxidu sodného než při Bayerově metodě. Rovněž množství použité energie je nižší. Omezení pro použití této metody je v objemu a složení červeného kalu získaného z Bayerovy větve [1,2,4].

3 Označování hliníku a slitin hliníku pro tváření podle ČSN EN 573

Normou ČSN EN 573-1 jsou označovány tvářené výrobky a ingoty určené ke tváření. Označování se skládá z písmem EN AW a čtyř čísel. Doplnkem klasického číselného označení je udání složení chemického, např. EN AW-5052 (AlMg2.5) :[1].

Jednotlivé části označení následují v pořadí:

- předpona EN následována mezerou,
- písmeno A určuje hliník,
- písmeno W určuje tváření výrobky,
- spojovací čárka,
- čtyři číslice označují chemické složení.

První číslo z posledních čtyř číslic udává skupinu slitin podle případových prvků

Tab. 1: rozdělení slitin Al podle přísadových prvků [1].

Série 1000 - Al minimálně 99.00 % a více	Série 2000 - slitina AlCu
Série 3000 - slitina AlMn	Série 4000 - slitina AlSi
Série 5000 - slitina AlMg	Série 6000 - slitina AlMgSi
Série 7000 - slitina AlZn	Série 8000 - slitina Al s různými prvky

Prvky přidané do slitin hliníku mají velký vliv na výsledné mechanické, fyzikální i chemické vlastnosti. Tyto prvky také ovlivňují faktory jako jsou technologické parametry tváření a tepelné zpracování. Protože tyto slitiny hliníku jsou určeny k tváření, jejich primárním požadavkem je dobrá tvařitelnost jak za tepla tak za studena. Moderní technika zapříčinila rozrůstání této skupiny o slitiny, které před tím byly pouze k odlévání. Takovými slitinami byli třeba slitiny s vysokým obsahem Si, dnes jsou aplikovány jako náhrady za automatové slitiny [1].

Série 1000 označuje hliník o čistotě 99.00 % a vyšší. Řada 1000 se vyznačuje vysokou elektrickou a tepelnou vodivostí rovněž tak vysokou odolností vůči korozi. Většina těchto slitin nachází uplatnění v architektuře, chemickém průmyslu a také jako vodiče a obalový materiál .

Série 2000 (Duraly) hlavním legujícím prvkem je Cu, sekundárním je Mg. Tyto slitiny jsou nejvíce ze všech slitin hliníku tepelně zpracovávány (vytvrzování), v tomto stavu dosahují maximálních pevnostních vlastností. Mají špatnou odolnost vůči korozi a dochází u nich k interkrystalické korozi. Tato jejich negativní vlastnost je omezována povrchovými úpravami (plátování fóliemi buď z Al vysoké čistoty, nebo některou ze slitin 6000). Tím dochází ke zvýšení jejich korozi odolnost. Použití těchto materiálu nachází v oblasti sportovního náčiní jako jsou rámy kol a luky. [1,2].

Série 3000 nepatří mezi slitiny tepelně zpracovatelné. Jejich hlavním legujícím prvkem je Mn. Ten zvyšuje pevnost již při svém malém obsahu. Slitiny 3000 se používají na výrobu nápojových plechovek, v oblasti výměníků tepla a v architektuře [1,6].

Série 4000 jejich přísadový prvek je Si, jeho obsah se pohybuje do 12%. Rovněž nejsou tepelně zpracovatelné. Používají se především jako přídavný materiál při svařování [1].

Série 5000 jejich přísadový prvek je Mg. Mg má z hlediska substitučního zpevnění α matrice větší efektivnost než Mn. Stejného zpevnění lze totiž dosáhnout s cca 0,8 % Mg v porovnání s cca 1,25 % Mn. Tyto materiály se používají jako materiál pro dopravní značky, nábytek a potrubní vedení [1,7].

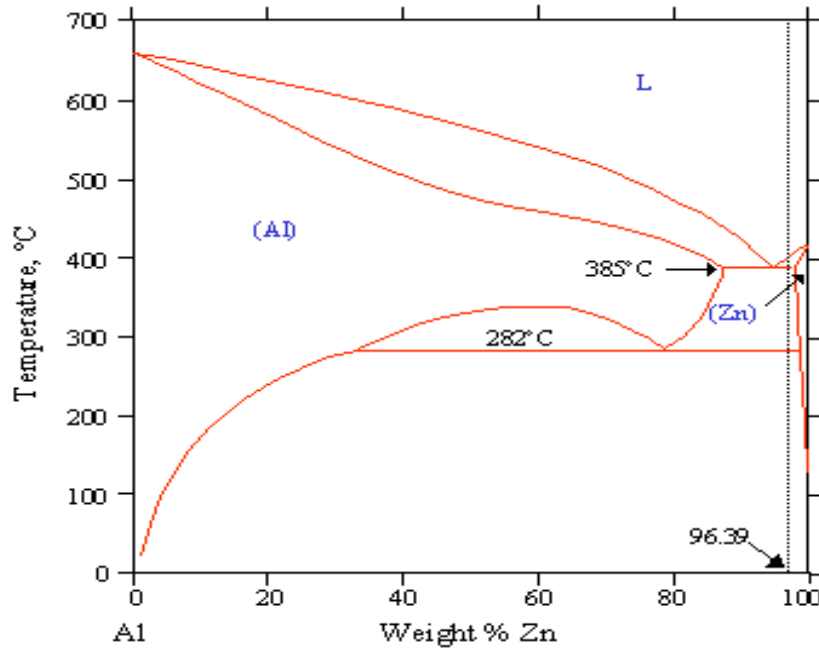
V tabulce č.2 je uveden vliv legujících prvků na substituční zpevnění Al vysoké čistoty. Aplikovány jsou v potravinářském průmyslu, lodní dopravě architektuře, zařízeních pro kryogeniku a v komponentech pro dopravu [1].

Tab 2: Vliv prvků na substituční zpevnění Al vysoké čistoty [1].

Prvek	Rozdíl x-Al [%]	Rp _{0,2} [MPa/hmot. %]	Rm [MPa/hmot. %]
Si	-3,8	9,2	39,6
Zn	-6,0	2,9	15,2
Cu	-10,7	13,8	43,1
Mn	-11,3	30,3	53,8
Mg	11,8	18,6	50,3

Série 6000 při nízkém obsahu legujících prvků se pevnost pohybuje okolo Re=100-200 MPa, Rm=280-330 MPa. Hlavními legujícími prvky jsou Si a Mg. Jejich intermetalické fáze Mg₂Si výrazně ovlivňují pevnost. Díky této fázi jsou tyto slitiny tepelně zpracovatelné. Rychlost ochlazování z vyšších teplot musí být pomalá neboť hrozí precipitace legujících prvků. Jsou velice dobře tvářitelné a to jak za tepla tak za studena. Jejich svařitelnost je vysoká stejně tak jejich odolnost vůči korozi. Jsou dobře obrobitelné. Tyto slitiny jsou používány v architektuře a v oblasti sportovních náčiních [1,2,7].

Série 7000 je legována především zinkem, jehož množství se pohybuje od 1 do 8 %. Jako sekundární legující prvek je přidáván Mg, jehož obsah bývá omezen do 3 %. Poměr mezi Zn:Mg je vždy větší než 1. Z Obr. 2 je patrné, že rozpustnost Zn v hliníku je velká a s klesající teplotou se značně snižuje. Díky tomu je možno tyto slitiny precipitačně vytvrzovat. Dalším přísadovým prvkem může být Cu ta ovlivňuje především svařitelnost. Slitiny s Cu jsou nesvařitelné, ale jsou pevnější. Čím vyšší pevnostní vlastnosti tím mají nižší korozní odolnost. Kompromis mezi vysokou pevností a odolností vůči korozi je tepelné zpracování s následným stárnutím (stav T7). Dalšími přísadovými prvky této série jsou Cu a Cr. Tyto slitiny se používají v letectví a automobilovém průmyslu [1,14].



Obr. 2: Diagram Al-Zn[15]

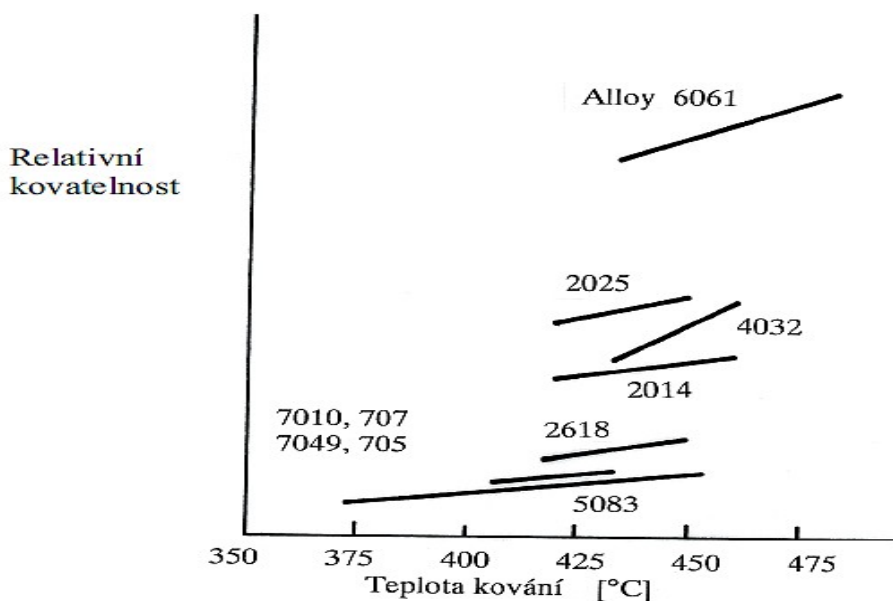
3.1 Hodnota lisovatelnosti a kovací teploty

Schopnost materiálu být tvářen je ovlivněna jeho chemickým složením. Obecně platí, že pokud má polotovar větší procento legujících prvků tím má vyšší pevnostní vlastnosti a tím se nesnadněji lisuje. Toto značení zavedla americká metalurgická firma (ASM) a pro hodnotu 100 % lisovatelnost zvolili slitinu EN AW 6063. V dnešní době existují ale i lépe lisovatelné slitiny a proto jsou v tabulce i hodnoty přes 100 % [1].

Tab. 3: Hodnoty lisovatelnosti [1]

Slitina	Hodnocení lisovatelnosti [%]
EN AW 1350	160
EN AW 1060	135
EN AW 1100	135
EN AW 3003	120
EN AW 6063	100
EN AW 6061	60
EN AW 2011	35
EN AW 5086	25
EN AW 2014	20
EN AW 5083	20
EN AW 2024	15
EN AW 7075	9

Kovatelnost je rovněž závislá na obsahu legujících prvků v polotovaru. Hliníkové slitiny mají obecně lepší kovatelnost než nikel/kobaltové nebo titanové slitiny [1].



Obr. 3: Závislost mezi relativní kovatelností a kovací teplotou [1].

V Tab 4. jsou vybráni zástupci jednotlivých tříd a jejich doporučené kovací teploty. Uvedených 15 slitin v této tabulce je v praxi nejčastěji aplikovaných pro výkovky [1].

Tab 4: Intervaly kovacích teplot [1]

Slitina	Doporučený interval kování [°C]
EN AW 1100	315 – 405
EN AW 2014	420 – 460
EN AW 2045	420 – 450
EN AW 2219	425 – 470
EN AW 2618	410 – 455
EN AW 3003	315 – 405
EN AW 4032	415 – 460
EN AW 6061	430 – 480
EN AW 7010	370 – 440
EN AW 7039	380 – 440
EN AW 7049	360 – 440
EN AW 7050	360 – 440
EN AW 7075	380 – 440
EN AW 7079	405 – 455

4 Tepelné zpracování slitin hliníku

Jelikož není rozdíl, až na výjimky, mezi tepelným zpracováním slitin hliníku určeným pro tváření a odlévání. Je jejich zpracování rozděleno do dvou skupin.

- žihání
- vytvrzování

Žihání rekrytalizační

Toto tepelné zpracování je používáno u slitin hliníku, které byly tvářené za studena jako mezikrok a také může být použito jako konečná operace pokud je požadována dobrá tvářitelnost a vysoká pevnost. Při žihání dochází k rekrytalizaci původní deformované mřížky na mřížku novou. Teplota, při které je materiál žihán, se volí dle čistoty materiálu a na velikosti předchozí deformace. V praxi se volí teploty v rozmezí 250-500 °C [1].

Tab 5: začátky rekrytalizačních procesů u hliníku různé čistoty[1]

Čistota Al [hmot. %]	Teplota začátku rekrytalizačních procesů [°C]
99.998	20 – 120
99.995	70 – 150
99.990	180 - 240
99.900	230 – 300

Rychlost ochlazování z některých těchto teplot je zohledňována dle jednotlivých vlastností slitin. Slitiny, které nejsou schopny se vytvrdit se mohou ochlazovat na vzduchu. Slitiny, které se dají vytvrzovat, se musí ochlazovat pomalu neboť by mohlo dojít k vytvrzení. Velikost zrna se dá odvodit z experimentálně získaných grafů, kde se dává do poměru původní velikost zrna, teplota rekrytalizace a velikost deformace.

Termodynamické procesy při rekrytalizačním žihání.

Hustota dislokací u výrobků tvářených za studena je vyšší než za tepla, přibližně $10^{11} - 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Tento stav je termomechanicky nestabilní a materiál se sám snaží změnit na stav s nižší, volnou energií. Velikost energetické bariéry, která brání tomuto pochodu, se snižuje s rostoucí teplotou. Vyšší teplota totiž vyvolává teplotně aktivované děje jako je difúze, příčný skluz a šplhání. Rychlost jež materiál dosáhne rovnovážného stavu popisuje Arrheniova rovnice:

$$v=A\exp(-Q/k\cdot T) \quad (1)$$

v – rychlost

Q – aktivační energie závislá na obsahu příměsí/legujícího prvku, velikosti deformace atd.

k – Boltzmannova konstanta

T – teplota

A – konstanta [1,3]

Stabilizační žihání

Toto žihání je používáno, pokud má být materiál využit při zvýšených provozních teplotách. Při žihání se totiž stabilizují mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti a rovněž se zlepšují i strukturní homogenita. Výška teploty žihání se volí vyšší než je předpokládaná pracovní teplota a to v rozmezí 240-350°C [1].

Žihání ke snížení vnitřního pnutí

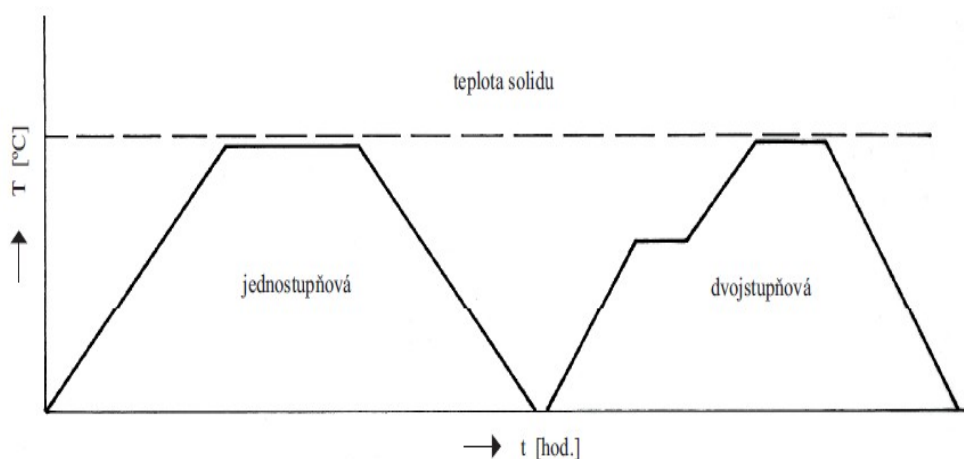
Volí se pro tvarově složité součásti tvářených za tepla, po svařování a také pro odlitky, které byly odlévány do kovových forem. Toto žihání se skládá z ohřevu, výdrže na teplotě, která se pohybuje v rozmezí 300-400 °C což je pod rekrystalizační teplotou a řízeného ochlazování alespoň do teploty 200 °C [1,3].

Žihání s částečnou rekrystalizací

Toto žihání je technologicky velice podobné s žiháním rekrystalizačním. Také se volí po tváření za studena. Hlavní rozdíl spočívá v délce výdrže na teplotě. Při žihání s částečnou rekrystalizací je kratší výdrž, což má za následek, že ve výsledné struktuře jsou zrna rekrystalizovaná vedle deformované struktury [1].

Homogenizace

Se volí před tvářením a to z důvodu odstranění dendritického odmíšení v litém materiálu. Protože tyto pochody jsou difúzní, potřebují na svou realizaci velkou energii. Z toho důvodu je teplota homogenizace značně vysoká a to až k teplotě solidu. Homogenizace se dělí do dvou skupin a to na jednostupňovou a dvoustupňovou. Dvoustupňová spočívá ve výdrži na dvou různě vysokých teplotách. Nejprve na nižší a následně na vyšší [1].



Obr. 4: Schéma dvoustupňové a jednostupňové homogenizace [1]

Doba žihání se volí podle chemické nehomogenity struktury. Obvykle homogenizace je nejdélsím tepelným zpracováním v celém procesu výroby. Během homogenizace jsou nejdůležitější difúzní procesy. Jejich rychlost ovlivňuje mnoho faktorů a jeden z nich je difúzní dráha. Čím difúze probíhá na kratší vzdálenost (krátká difúzní dráha) tím spíše se proces zrealizuje při konstantních faktorech jako je například teplota. Pro realizaci homogenizace je důležitá velikost dendritických buněk. Vztah mezi ochlazovací rychlostí a velikostí dendritické buňky je dán rovnicí č.2:

$$D=k \cdot 2,925 \cdot t_1 \quad (2)$$

D-velikost dendritických buněk [μm]
 k-rozměrový koeficient roven 1 [$\mu\text{m} \cdot \text{sec.}$]
 t_1 -krystalizační čas [sec.]

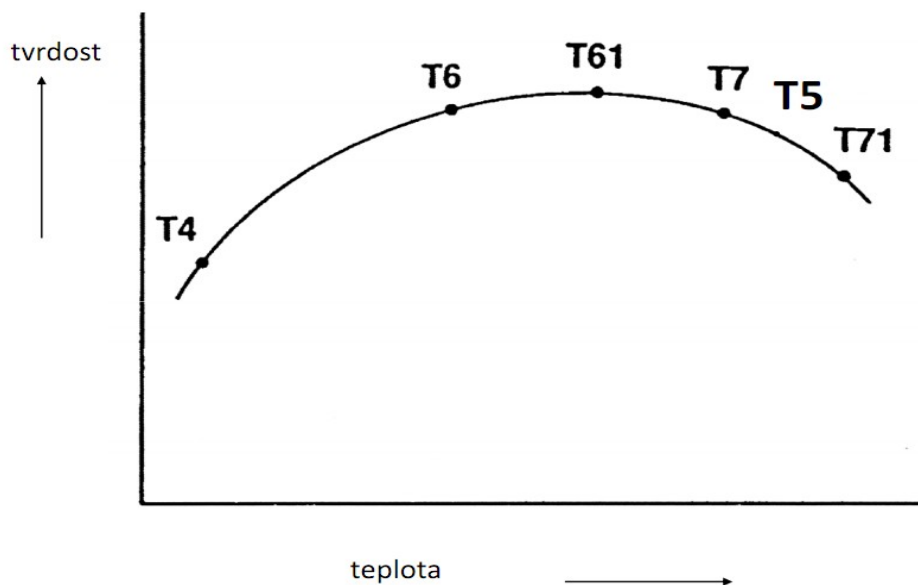
Procesy které nastávají v materiálu během homogenizace a následném ochlazování.

- rozpouštění nerovnovážných eutektik v α matrici
- rozpouštění nerovnovážných intermediálních fází v α matrici
- koagulace rovnovážných intermediálních fází
- precipitace nerovnovážných intermediálních fází při ochlazování z α matrice a získání částečně přesyceného tuhého roztoku α [1].

Jelikož homogenizace probíhá především difuzními pochody, je nutno zmínit i prvky, které tyto pochody omezují. Jsou to především prvky, které mají nízkou rozpustnost jak v α matrici tak v tuhém roztoku. Příkladem je takové železo, které má rozpustnost při teplotě 655 °C asi 0.052 hmot.%, při teplotě 500 °C jeho rozpustnost klesá na 0.006 hmot. % a při teplotě 400 °C klesá skoro na nulu [1,3].

Žihání vytvrzených slitin

Je voleno tehdy pokud je požadavkem materiál po zpevnění ještě tvářet. Nastává odpevnění materiálu. Žihací teplota je 350 °C [3].



Obr. 5: Závislost tvrdosti na teplotě žihání při zpracování dle T4-T7[9]

4.1 Značení tepelného zpracování

Tab 6: značení tepelného zpracování [1,3].

F	Litý stav
0	Žihání na odstranění vnitřního pnutí nebo stabilizační žihání

T1	Po ochlazení ze zvýšené teploty tváření a přirozeném stárnutí
T2	Po ochlazení ze zvýšené teploty tváření a přirozeném stárnutí
T3	Po rozpouštěcím žihání, tváření za studena přirozeném stárnutí
T4	Rozpouštěcí žihání s následným vytvrzením za studena
T5	Umělé stárnutí při nízkých teplotách bez předešlého homogenizačního žihání
T6	Vytvrzování za tepla
T7	Vytvrzování za tepla s přestárnutím
T8	Po rozpouštěcím žihání, tváření za studena a umělém stárnutí.
T9	Po rozpouštěcím žihání, umělém stárnutí a tváření za studena.

4.2 Doporučené tepelné zpracování slitin série 7000

Žihání: 320-400 °C

Doba žihání: do 16 hod

Rozpouštěcí žihání: 440-500 °C

Vytvrzování: 110-135 °C

Umělé stárnutí: 155-160 °C (4-6 hod) nebo 170 °C (8-10 hod) [16]

4.3 Způsoby tepelného zpracování slitiny 7075

T6 - 4 až 6 hodin při 160 až 180 °C

T73 - 6 až 8 hodin při 100 až 115 °C

T735 - jako T73 + 6 až 8 hodin při 170 až 180 °C

T76 - 3 až 5 hodin při 115 až 125 °C

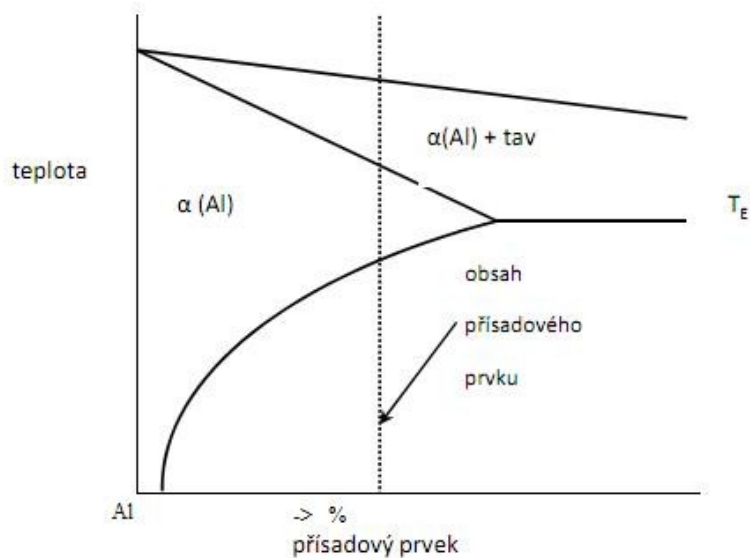
T765 - jako T76 + 13 až 30 hodin při 155 až 165 °C [14]

4.4 Vytvrzování

Vytvrzování je jedním z hlavních tepelných zpracování hliníkových slitin. Cílem je rozpuštění intermediálních fází v matici. Po vyloučení těchto fází ve tvarech koherentních a semikoherentních je dosaženo lepší tvrdosti, meze pevnosti R_m a smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$. Tím se ovšem snižují plastické vlastnosti materiálu. Vytvrzování se používá jak u tvářených materiálů tak u materiálů litých do pískových forem, nebo odstředivým způsobem. U tlakově litých odlitků se vytvrzování používá méně často [8].

Princip vytvrzování

Důvodem proč je materiál schopen precipitačně vytvrzovat je přítomnost přísadových prvků v matici. Tyto přísadové prvky musí mít omezenou rozpustnost v tuhém roztoku $\alpha(Al)$. Tyto předpoklady splňují Cu, Mg. Dalšími prvky jsou Zn a Ni, ale u těchto slitin obsahující tyto prvky se vytvrzování provádí méně často než u předešlých dvou. Obsah těchto prvků ve slitině musí být vyšší, než je jejich rozpustnost při normální teplotě ale nižší, než je maximální rozpustnost v $\alpha(Al)$ při eutektické teplotě [8].



Obr. 6: Diagram rozpustnosti přísadového prvku v Al

Nevytvrzují se pouze slitiny binární jako je např. Al-Cu, ale také slitiny vícesložkové jako jsou Al-Si-Mg anebo Al-Si-Cu. Křemík, ale nemá na vytvrzování vliv neboť netvoří s hliníkem vytvrzující fázi.

Samotné vytvrzování se rozděluje na následující kroky:

- rozpouštěcí žíhání: v tomto kroku je cílem dosáhnout homogenního tuhého roztoku
- rychlé ochlazení: dosahuje se přesyceného tuhého roztoku
- precipitační vytvrzení: vytváří se precipitáty a nastává vytvrzení

4.4.1 Rozpouštěcí žíhání

Teploty pro toto žíhání se volí nad teplotou změny rozpustnosti aby bylo dosaženo rozpuštění intermediálních fází v tuhém roztoku. Slitiny, které mají velmi vysoký obsah přísadových prvků se teplota volí co nejvyšší. Pokud by však teplota byla příliš vysoká, došlo by k natavení na hranicích zrn a k zhrubnutí zrna. Pokud by byla naopak nízká, obsah rozpuštěných intermediálních fází by byl nižší a nedošlo by tak k výrazným změnám vlastností. „V praxi se volí teploty žíhání 10-15 °C pod eutektickou teplotu. Žíhací teplotu je nutno dodržovat s přesností 3 až 5 °C. Doba výdrže na teplotě je volena podle disperzity výchozího materiálu. Měla by, ale být dostatečně dlouhá na rozpuštění všech segregujících fází, a dostatečně krátká aby nedocházelo k zhrubnutí zrna [8].

4.4.2 Ochlazování z homogenizační teploty

Ochlazování musí být dostatečně rychlé aby se zabránilo vysegregování intermediální fáze z přesyceného tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$. Těto operaci se často nesprávně říká kalení. Největší důraz na rychlost ochlazení je kladen dokud teplota vytvrzovaného materiálu neklesne na teploty kolem 150-200 °C. Rovněž doba mezi vyjmutím z pece a začátkem ochlazení by neměla být zbytečně dlouhá, obvykle se doporučuje do 20 s. Například u tenkostěnných

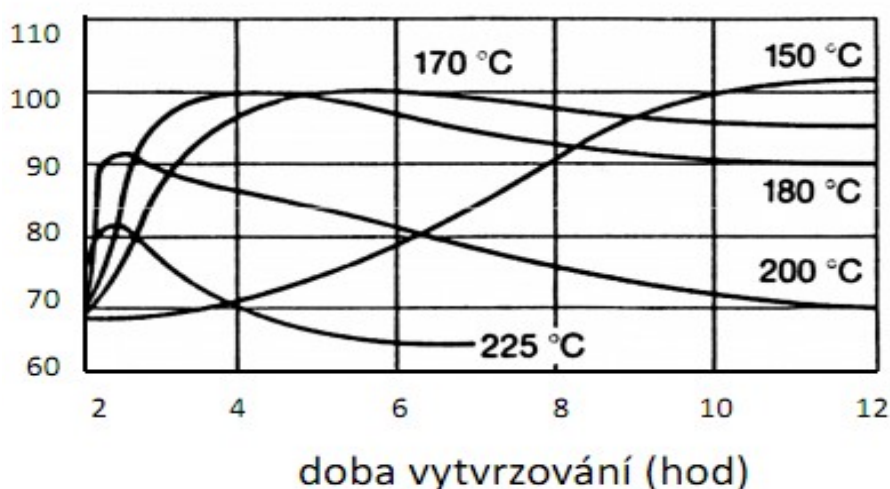
Precipitace vytvrzujících atomů může docházet již za normálních teplot. Proto se rozděluje vytvrzování za tepla (za zvýšené teploty) a za studena (za teploty okolí) [8].

4.4.4 Precipitační vytvrzování série 7000

Nižší obsah legujících prvků zpomaluje precipitaci. Urychlení precipitace může naopak příznivě ovlivnit přidaná plastická deformace vložená mezi rozpouštěcí žíhání a stárnutí. Tento krok, ale usměrňuje tvorbu precipitátů ve skluzových rovinách a tím je dosaženo nižšího zpevnění. S tuhým roztokem mohou být v rovnováze fáze jako např. Mg_3Al_3 , $Mg_3Zn_3Al_2$, $MgZn_2$ popřípadě Mg_5Zn_{11} a $ZnAl$ při vysokém obsahu obou prvků. Jako nejlepším příkladem precipitující fáze je sloučenina $MgZn_2$ a při vyšších teplotách $Mg_3Zn_3Al_2$. Při precipitaci první fáze jsou GP zóny kulovité s rozměrem $20-30 \cdot 10^{-10}$ m o hustotě 10^{12} mm^3 při $20 \text{ }^\circ\text{C}$. V těchto materiálech jsou obvyklé zóny bez precipitátů, které uvízly v takzvaných norách jako jsou hranice zrn, dislokace a vměstky. Tyto prázdné zóny se obvykle vyskytují na hranici GP zón a jejich šířka je ovlivněna především chemickým složením slitiny, teplotou rozpouštěcího žíhání, rychlostí ochlazování, teplotou stárnutí případně plastickou deformací. Zóny kde precipitáty nejsou jsou měkčí než okolí a mají příznivý vliv na plastickou deformaci, naopak nepříznivý vliv mají na korozní praskání [14].

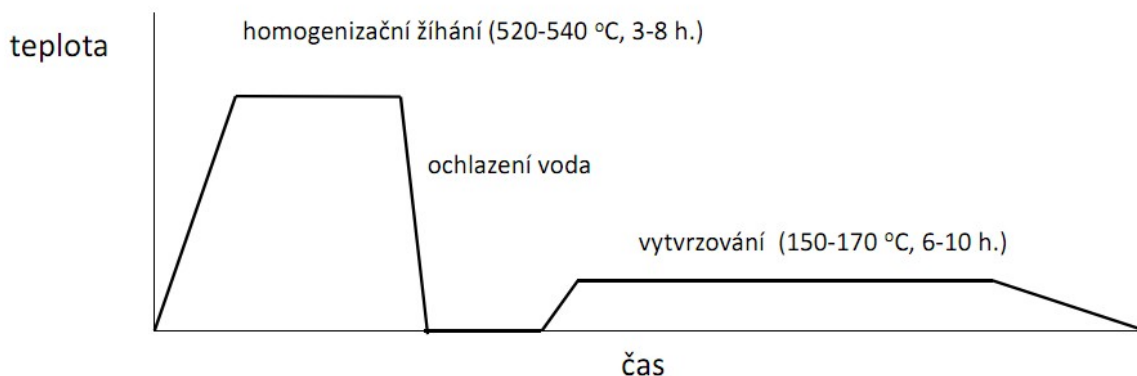
4.4.5 Vytvrzování za tepla

Typickým příkladem slitin, které se vytvrzují za tepla jsou slitiny Al-Si-Mg a Al-Mg. Teploty vytvrzování se pohybují v rozmezí $140-180 \text{ }^\circ\text{C}$, vliv na teplotu mají přísadové prvky. U některých slitin se volí teplota vytvrzování přes $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Například slitiny série 7000 jsou velice citlivé na rozpouštění fází v matici za zvýšených teplot stárnutí. Doba výdrže na teplotě je v rozmezí 3 až 8 hodin. Obecně platí čím vyšší teplota tím kratší doba vytvrzování. S vysokou teplotou však leckdy není možno dosáhnout požadovaných mechanických vlastností. Příklad je Obr. 7, který platí pro slitinu AlSi10Mg, na kterém je dobře vidět závislost vytvrzovací teploty na tvrdosti [8].



Obr. 8: Závislost tvrdosti slitiny AlSi10Mg na teplotě a době vytvrzování[9]

Obsah vytvrzujících prvků má rovněž velký vliv na výsledné vlastnosti slitiny. Obsah Mg u běžných vytvrzitelných slitin Al-Si-Mg bývá v rozmezích 0,3 až 0,45 % Mg, ve vysokopevnostních slitinách až kolem 0,7 %. Se zvyšujícím se obsahem Mg roste pevnost a tvrdost a klesá tažnost [8].



Obr. 9: Diagram tepelného zpracování při vytvrzování za tepla (orientační hodnoty)[9]

Proces vytvrzování se zakládá z návazných kroků, každý krok má vliv na výsledné vlastnosti materiálu. Již samotná teplota homogenizačního žihání je velice důležitá, obecně platí čím vyšší tím lepší výsledné mechanické vlastnosti [8].

4.4.6 Vytvrzování za studena

Některé slitiny jsou schopny dosáhnout přesyceného tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$ již po rozpouštěcím žiháním nebo po odlití do kovové formy. Samovolný rozpad tohoto přesyceného roztoku způsobuje zpevnění. Příkladem těchto slitin jsou slitiny typu AlZnMg, AlCu₄ a také slitiny typu AlSiCu s vysokým obsahem Cu. Tento proces je daleko pomalejší než vytvrzování za tepla. Konečné vlastnosti materiál dosáhne až po 100-150 hodin. Z tohoto důvodu je normou předepsané, že měření mechanických vlastností a případné obrábění se má provádět až za 8 dní po odlití nebo žihání [8].

5 POVRCHOVÉ ÚPRAVY HLINIKOVÝCH SLITIN

Hliník sám o sobě nemá moc dobrou odolnost vůči korozi, jeho potenciál se pohybuje okolo hodnoty $-1,69$ V, což hliník řadí mezi velmi neušlechtilé materiály. Jeho potenciál však vzrůstá o řád výše díky oxidické vrstvě, která vzniká na jeho povrchu. Tloušťka přirozené oxidické vrstvy záleží na době, jakou je hliník ponechán na oxidačním prostředí. Na chemicky očištěném povrchu však vrstva vzniká okamžitě a to v tloušťce přibližně $0,001$ μm , po uplynutí jednoho dne vrstva zesílí na tloušťku okolo $0,004$ μm , po několika měsících dosahuje $0,1$ až $0,5$ μm . Tyto vrstvy však nejsou nikterak dekorativní, rovněž nedosahují veliké tvrdosti a tím pádem jsou velice náchylné na mechanické poškození. Za přítomnosti vlhkosti dojde ve vnější části oxidické vrstvy k hydratizaci a oxid se zformuje na hydroxid $\text{Al}(\text{OH})_3$ – barid [1].

Z těchto důvodů je třeba hliník chránit proti korozi jiným způsobem než samovolnou pasivací. Možnost jak povrchu dodat kvalitnější vlastnosti je elektrická oxidace hliníku - ELOX. Během tohoto procesu na povrchu vznikne zoxidovaná vrstva, která má daleko lepší ochranné vlastnosti než vrstva přirozeně zoxidovaná. Má vyšší tvrdost čímž zvyšuje mechanické odolnosti hliníku a má taktéž vyšší odolnost vůči korozi, je celistvá. Vzhled a vlastnosti vrstvy jsou ovlivněné přípravou hliníku a samotnými podmínkami anodické oxidace. Různými postupy je možno docílit mnoho odstínů barev. Anodická oxidace se dá zařadit do výrobního procesu, neboť vrstva je dobře zpracovatelná a vysoká pevnost materiálu dovoluje rozmanité tvarování. Vzniklá eloxovaná vrstva dosahuje $250 - 450$ HV, je nevodivá a dobře se barví. Pokud vrstva vznikla po oxidaci Al_2O_3 , pak dosahuje velmi tenkých tloušťek, je keramická a je propojena s hliníkovým materiálem. Tato vrstva se dá po opakovaném zpracování velice snadno odstranit. Protože existuje mnoho postupů anodické oxidace, tak výsledné vrstvy pro každý tento postup dosahují rozdílných vlastností např.:

- rozdíly v tloušťce vrstvy od $0,3$ do cca. 200 μm ,
- čiré, průhledné vrstvy,
- barevné vrstvy vytvořené vlastním zabarvením oxidické vrstvy
- barevné vrstvy vytvořené barvením oxidické vrstvy prostřednictvím organických barviv,
- elektrolyticky barvené oxidické vrstvy,
- oxidické vrstvy se zapaštěnými částicemi (např. PTFE) [1,13].

Pro značení postupu výroby slouží písmena. Písmeno G pochází z německého Gleichstrom a je vyjádřením pro použitý stejnosměrný proud. Množství použitelných elektrolytů je mnoho. Nejčastěji se však používají roztoky H_2SO_4 (označení „S“) dále pak $(\text{COOH})_2$ (označení „X“), H_3PO_4 , H_2CrO_4 nebo různé kombinace těchto kyselin (např. $\text{H}_2\text{SO}_4 + (\text{COOH})_2$, označení „SX“).

Postupy se dělí do následujících skupin:

Tab. 7: Varianty postupů anodické oxidace [1]

Postup	Tloušťka vrstvy [μm]	Barva oxidické vrstvy	Oblasti použití
Standardní postup GS+GSX	5-10	bezbarvá	Stavebnictví, domácí spotřebiče, nábytek
Standardní postup GS+GSX -elorganicky barveno	5-10	barvená	Stavebnictví, domácí spotřebiče, nábytek, bytová architektura

Standardní postup GS+GSX -elektrolyticky barveno v elektrolytu cínu (dvoustupňová metoda)	5-10	Světle bronzová až černá	Stavební, domácí spotřebiče, nábytek, bytová architektura
Standardní postup+zvláštní stupeň, např. Spektro-color-metoda elektrolyticky barveno v elektrolytu cínu (dvojstupňový postup)	5-10	Světle bronzová až černá+zelené, modré, šedivé, žluté a červené odstíny	Stavební, domácí spotřebiče, nábytek, bytová architektura
Tvrdá anodizace	25-200	Bezbarvá až šedá	Strojírenství, automobilový a letecký průmysl
Pásová anodizace	0,2-25	Bezbarvá	Bytová architektura, elektroprůmysl

5.1 Teorie vytváření vrstvy

Vzniklý povrch se skládá ze dvou vrstev (duplexní vrstva). Ta první je prakticky bezpórovitá dielektrická izolační vrstva. Ta druhá vrstva je vnější krycí, jemně pórovitá. Nejprve na materiálu při procesu přeměny z hliníku na oxid hlinitý vzniká izolační vrstva. Při zpětném rozpouštění izolační vrstvy v elektrolytu vzniká vrstva krycí. Růst obou vrstev je v závislosti na sobě konstantní. Vnější strana vrstvy se však rozpouští v elektrolytu, díky tomu není možné vytvářet silné anodicko oxidické vrstvy.

Vliv na proces vzniku a zpětného rozpouštění vrstvy má typ použitého elektrolytu, teplota lázně, doba anodizace a proudová hustota. Zvýšením koncentrace elektrolytu za účelem zvýšení vodivosti lázně, se zvětší i rozpouštění vrstvy. Rozpouštění vrstvy je rovněž docíleno zvětšením proudové hustoty. Chemické reakce probíhající na povrchu materiálu probíhají podle Faradayova zákona [1,11].

$$m=(M/n \cdot F) \cdot i \cdot t \quad (3)$$

m - množství vyloučené látky na 1 m² [g]

M - molární hmotnost kovu [g·mol⁻¹]

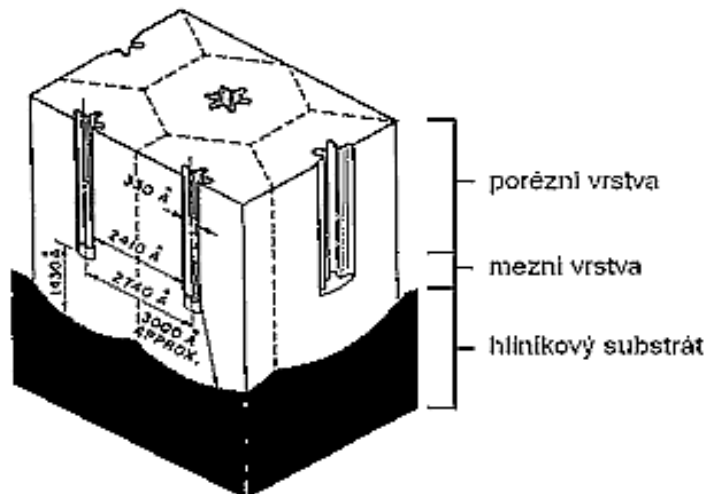
n - mocenství kovového kationtu v lázni

F - Faradayova konst. [96500 C·mol⁻¹]

i - proud [A]

t - čas [hod]

Krycí vrstvy jsou složeny ze svazečků, ty jsou orientovány svisle k základnímu materiálu. Vnější vrstva vláken se skládá z oxidu hlinitého, který zvolna sublimuje do vnitřní části. Nejvíce používaný model pro vytváření vrstev je model podle Keller-Hunter [1].



Obr. 10: Model vrstvy podle Keller-Hunter [11]

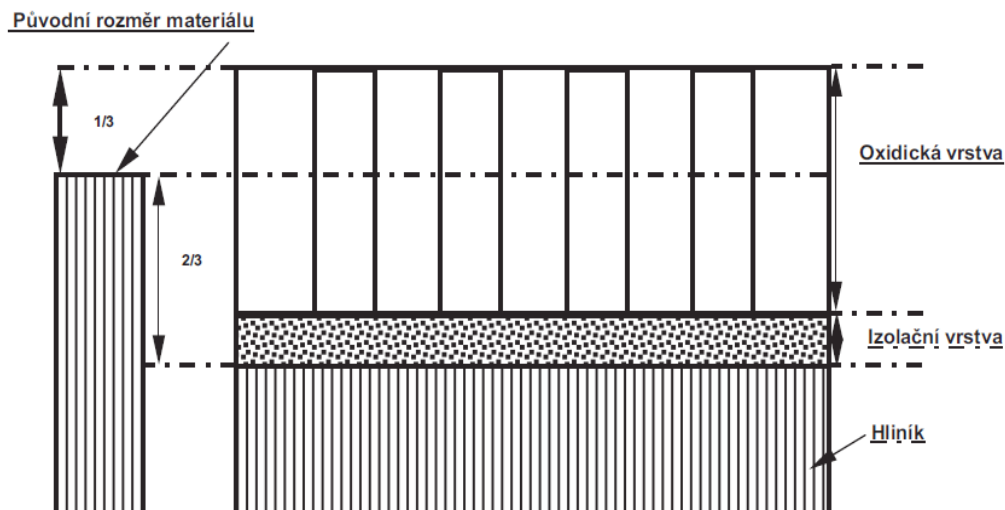
Proud v elektrolytu je póry veden ke dnu pórů, dnem pórů je dále veden přes pevný oxid. Následkem vysokého elektrického odporu oxidické vrstvy dojde k silnému zahřátí, a tím k urychlení procesu rozpouštění hliníku a oxidů hliníku, které jsou přítomny na dně pórů. Pór dále roste směrem k povrchu hliníku. Velikost a také geometrie póru je závislá na druhu použitého elektrolytu, avšak nezávislá na realizovaném pracovním napětí. Tloušťka stěn póru a základní vrstvy je závislá na pracovním napětí [1].

5.1.1 Tloušťka vrstvy

Při zvyšování odolnosti materiálu vůči korozi je důležitým kritériem tloušťka vrstvy. Tu ovlivňuje především použitý elektrolyt. Při běžném technologickém postupu jsou tloušťky vrstev následující:

- Roztok kyseliny chromové 3-6 μm
- Roztok kyseliny sírové (stejnoseměrný proud) 5-30 μm
- Roztok kyseliny šťavelové 10-60 μm
- Tvrdá anodická oxidace 40-300 μm

Tloušťka vrstvy ovlivní velikost materiálu.. Vrstva totiž vzroste cca. o 1/3 nad původní povrch [1].



Obr. 11: Tloušťka vrstvy[1]

5.1.2 Vlastnosti vrstev vytvořené anodickou oxidací

Tab. 8: Vlastnosti vrstev vytvořené anodickou oxidací [1]

Fyzikální vlastnosti	
Hustota	4 g/cm ³
Sypná hustota	2,8 - 3,2 dle pórovitosti
Pórovitost	Pórovitost je velmi závislá na pracovních podmínkách anodické oxidace a pohybuje se v rozmezí od 20 – 30 %, s přibývajícím napětím ubývá pórovitosti. Dle metody GS vytvořené vrstvy vykazují optimální parametry pórovitosti.
Tažnost	Přiměřená tažnost až do objevení prvních jemných prasklin (mikrotrhlin) kolísá podle slitiny, anodizačních podmínek a metody utěsnění. Činí v průměru od 0.3 do 0.4 %.
Tvrдость	Vrstvy vytvořené anodickou oxidací vykazují tvrdost podobnou korundu. Podle slitiny a anodizačních podmínek je tvrdost uskutečnitelná od 7 – 8 podle Mohse, popř. 500 – 900 podle Brinella, popř. HV 250 – 350 u dekorativních eloxových vrstev a HV 300 – 600 u tvrdých eloxových vrstev.
Modul pružnosti	5 GPa
Tepelné vlastnosti	

Bod tání	2000 °C (hliník 660 °C). Monohydroxid ztrácí vodu potřebnou pro krystalizaci při cca 350 °C.
Lineární koeficient roztažnosti α	$5 \cdot 10^{-6}$ při 0 °C (hliník $23 \cdot 10^{-6}$)
Tepelná vodivost	0.05 – 0.15 cal./sek·cm· °C při teplotě 0 – 60 °C
Sálavost	1.8 – 4 cal/m ² ·h· °K – podle tloušťky vrstvy
Elektrické vlastnosti	
Dielektrická konstanta	8
Specifický elektrický odpor	4·10 ¹⁵ Ohm · cm při 20 °C 8·10 ¹⁵ Ohm · cm při 100 °C
Průrazné napětí	20 - 40 V podle metody anodizace a anodizačních podmínek

5.1.3 Různé metody anodické oxidace hliníku

Je velice mnoho elektrolytů, v kterých se dá provádět anodická oxidace hliníku. Největší pokrok a největší počet nově zaregistrovaných elektrolytů byl zaznamenán v posledních dvou desetiletích. Ovšem pouze několik těchto lázní se používá v praxi běžně.

- Stejnoseměrný proud metoda kyseliny sírové (GS metoda)

Tato metoda je nejvíce rozšířená a její technologie se obvykle označuje za Standardní postup. Elektrolyt je složen z kyseliny sírové o koncentraci 180-200 g/l. Výhodami této metody v porovnání s metodami GS a GSX je nízká spotřeba energie, nízké pracovní napětí, cenově nenáročné pořizovací ceny chemikálií a vysoká provozní spolehlivost. Vrstvy vzniklé touto metodou jsou odolné vůči opotřebení, jsou velice stále a při dobrém utěsnění jsou odolné vůči klimatickým vlivům. Tato metoda je hojně používána v architektuře. V Tab. 9 jsou uvedeny parametry výroby touto metodou [1].

Tab. 9: Parametry metod GS a GSX [1].

Metoda	Zkratka	Druh	Napětí [V]	Proudová hustota [A/dm ²]	Teplota [°C]	Vlastní barva vrstvy
Kyselina sírová	GS	Stejnoseměrný proud	13-20	1,2-2,0	18-21	žádná
Kyselina sírová - šťavelová	GSX	Stejnoseměrný proud	20-25	1,2-2,0	20-25	žádná

Kyselina šťavelová se do kyseliny sírové přidává za účelem větší celistvosti vrstvy a větší tvrdosti.

- Metoda kyseliny šťavelové

Je hojně používána, pokud je hlavní podmínkou tvrdá anodická oxidická vrstva. Zvýšená tvrdost této vrstvy zapříčiňuje větší mechanickou odolnost a díky poměrně velkému množství porů je snadno barvitelná. Její použití je ale úzké. Pracovní napětí lázně se pohybuje od 50 V, což metodu prodražuje [1].

- Metoda kyseliny chromové

Této metody je nejvíce využíváno na součástky v leteckém průmyslu. Dosahuje se při ní velice dobrých protikorozních vlastností a velice dobré přilnavosti jako podklad pro pozdější lakování. Vrstvy vzniklé touto metodou zabraňují „Filigránské korozi“. V leteckém průmyslu se nejvíce oplatila metoda s názvem Bengoug Stuart [1].

Tab. 10: Parametry metody kyseliny chromové, metody Bengoug Stuart [1]

Označení	Elektrolyt	[g/l]	Proudová hustota [A/dm ²]	Napětí [V]	Teplota [°C]	Expoziční doba[min]	Tloušťka vrstvy [μm]	Barva
metoda Bengoug-Stuart	CrO ₃	20-30	0.1-0.2	Do 50	40	10-20	3-8	šedá

- Metoda smaltu

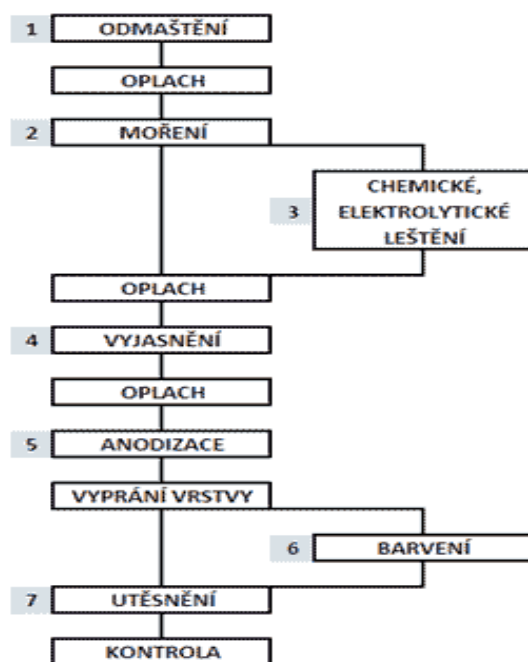
V této metodě je použit elektrolyt, který je tvořen směsí šřavelanu draselného-titaničitého, kyseliny borité a kyseliny šřavelové. Tato metoda se nazývá metodou smaltu proto, že vrstva vzniklá touto metodou se dá barvit organickými barvivy a má vzhled smaltu. Vzniklá vrstva má dobré kluzné vlastnosti [1].

Tab. 11: Pracovní parametry metody smaltu [1]

Označení	Elektrolyt	Proudová hustota [A/dm ²]	Napětí [V]	Teplota [°C]	Expoziční doba[min]	tloušťka vrstvy [μm]	Barva
Metoda smaltu	draselného-titaničitého, kyseliny borité a kyseliny šřavelové	2-3	80-120	40-60	10-40	10-20	šedobílá

5.1.4 Technologie anodické oxidace hliníku

Samotné technologie od přípravy povrchu až po barvení a utěsnění mají vliv na výslednou kvalitu výrobku. Existuje mnoho metod anodické oxidace. Dále jsou pouze zmíněny některé z předních, dnes používaných metod [1,11].



Obr. 12: Technologie výroby anodoxidické vrstvy na hliníku [11]

Příprava povrchu

V prvním kroku technologie výroby je odmaštění. Tento krok však obvykle předchází povrchová úprava. Ta je velice důležitá především pro dekorativní účely, neboť na dokonale lesklém povrchu je každá nerovnost povrchu velice zřetelná. Druhy příprav se značí podle normy ČSN EN ISO 7599. A tato norma značí rozdílné kroky předúpravy značením E0-E8 [1,11,12].

Odmaštění

Tento krok má za účel odstranit z povrchu materiálu oleje, tuky, vosky a předešlé značkovací nátěry (obecně mastnoty). Odstraňují se při něm také zbytky po mechanickém čištění, jako jsou hobliny apod. Nedochozí při něm k změně struktury a probíhá na principu fyzikálně-chemickém procesu. Jako čisticích prostředků jsou v praxi používány přípravky obsahující tenzidy a organické nebo anorganické soli. Tenzidy jsou organické látky, které mají za následek smáčení povrchu čištěného materiálu. Větší smáčivost znamená snadnější odstranění nečistot z povrchu, které obstarávají soli. Soli jsou obvykle sloučeniny na bázi fosfátů, křemičitanů, boratů a karbonátů [1,11].

Tab. 12: Přehled možných způsobů odmašťování, hlavních složek a účinností přípravků [11]

Způsob čištění	Základ složení	Odstranění
Alkalické	fosfáty, křemičitan, boraty a karbonáty	mastnoty
Kyselé	H ₃ PO ₄	pigmenty, leštící pasty
Organické	Chlorethyleny, chlorethany	mastnoty
Elektrolytické	fosfáty, křemičitan, boraty, karbonáty a H ₃ PO ₄	mastnoty

Moření

Moření je chemický proces, při kterém dochází ke změně struktury povrchu. V praxi se označuje E6. Mořením lze odstranit korozní produkty, atypické struktury, které vzniknou například po odlévání či válcování nebo lze odstranit přírodní oxidické vrstvy. Povrchové vady jakou jsou například škrábance se sice odstranit nedají, ale nejsou již tolik nápadné díky matně bílému respektive saténovému vzhledu povrchu. A to především při použití alkalického mořicího média. Aby byl účinek moření na celém povrchu stejnoměrný, musí být předcházející operace v technologii udělány řádně. Neboť pokud povrch materiál nebude dostatečně odmaštěn účinek moření nebude na čistém a mastném povrchu stejnoměrný. Účinek mořicího média je především závislý na chemickém složení mořeného materiálu, druhu a složení mořicího prostředku. Mezi technologické postupy, které ovlivňují moření patří doba expozice a teplota [1,11].

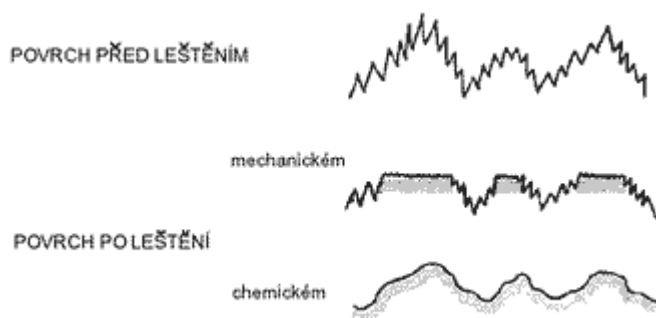
Tab. 13: Možné způsoby moření povrchu [11]

Způsob moření	Základ	Teplota [°C]	Odstranění mastnot
Alkalické	NaOH, Na ₂ CO ₃ , NaCl	50-80	Ano
Kyselé	H ₂ SO ₄ , HNO ₃ , HF	Převážně do 25	Ano

Nejpoužívanější mořicím prostředím z alkalické skupiny mořidel je NaOH. Jeho účinek je velice náchylný na překročení pracovní teploty. Při jejím překročení nastává větší naleptání a tím znehodnocení povrchu materiálů. Po dokončení moření se materiál oplachuje vodou, aby nedošlo k znečištění dalších lázní [11].

Chemické a elektrolytické leštění

Tento krok je zařazen do technologického postupu, pokud je požadována vysoká kvalita vzhledu povrchu finálního výrobku. Princip leštění spočívá v rozpouštění výčnělků na povrchu, tím se povrch materiálu vyrovná [1,11].



Obr. 13: Porovnání principu mechanického a chemického leštění povrchu [11].

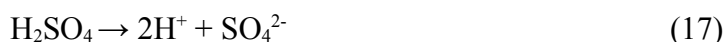
Výsledný lesk povrchu hliníku je závislý na chemické čistotě materiálu. Leštění se rozděluje podle použitých technologií na:

- Chemické leštění: Tato metoda je velice závislá na chemické čistotě hliníku, je náchylná na legující prvky Fe, Si a Mn. Používá se především pro malé součásti, u kterých by bylo elektrolytické leštění komplikované. Nevýhodou této metody je velká spotřeba chemikálií v porovnání s elektrolytickým leštěním. Použité lázně v této metodě jsou velice agresivní, jejich základními chemikáliemi jsou H_3PO_4 a HNO_3 . V lázni jsou v menší míře zastoupeny také H_2SO_4 a soli CuSO_4 a $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$. Doba, po kterou se leští je obvykle v rozmezí 0,5 až 3 min při teplotě 90-110 °C [11].

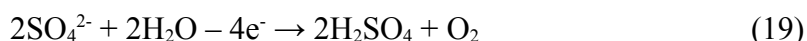
- Elektrolytické leštění: je založeno na stejném principu jako je anodické leštění, tzn. výrobek je zapojen jako anoda. Těto metody je využito především při velkém počtu leštěných výrobků. Její výhodou je, že se při ní dosahuje velmi lesklého povrchu. Nevýhodou je nutnost velké proudové hustoty v elektrolytu, která dosahuje až 100 A/dm². Po leštění zůstává na vzorku tenká pasivační vrstva, která se nejčastěji odstraňuje v NO_3 . Elektrolytické leštění probíhá v lázních na bázi H_2SO_4 a H_3PO_4 . Teplota těchto lázní se pohybuje v rozmezí 70-80 °C, při proudových hodnotách 10-20 A/dm². Doba leštění nepřesahuje 2 minuty. V praxi se ještě užívají lázně z H_3PO_4 s přídavkem CrO_3 . Pracovní teploty těchto lázní se pohybují v rozmezí 80-100 °C a proudové hustoty dosahují až 100 A/dm² [11].

Anodizace

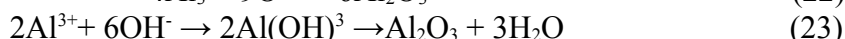
Při anodizaci se výrobek zapojí jako anoda. Katody pro oxidickou anodizaci hliníku bývají vyrobené z hliníku nebo olova. Poměr ploch katody a anody bývá v rozmezí 1: 1,5 až 1: 1,2. Dále je rozebrán postup procesu pro metodu GS. Vlivem průchodu elektrického proudu dochází k disociaci H_2O a H_2SO_4 (17, 18).



Ionty jsou přitahovány anodou nebo katodou podle toho jak jsou nabyty, tam odevzdají svůj náboj a vyloučí se zpět na molekuly (19,20,21).



Materiál zapojený na anodě začne oxidovat, což má za následek vznik oxidu hlinitého. Tato vrstva vzniká buď přímou oxidací, nebo přes reakci s hydroxylovými anionty. Vytvořený hydroxid hlinitý má nezanedbatelný elektrický odpor, což zapříčiňuje při průchodu proudu zahřátí vrstvy a dehydrataci. Tímto vzniká Al_2O_3 (22,23).



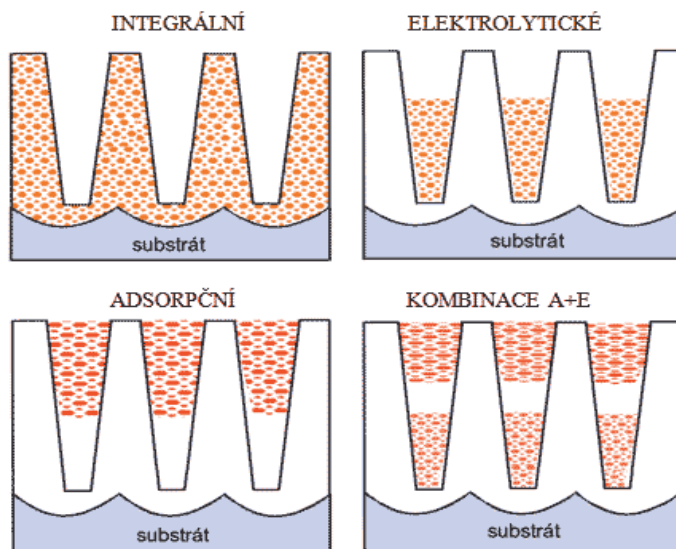
Jako poslední krok anodizace je vypírání vrstvy. Musí se zcela odstranit zbytky kyseliny z materiálu, které by mohly být příčinou kontaminace případných dalších lázní, nebo by mohly způsobit skvrny na povrchu po vysušení.

Barvení anodické vrstvy

Velkou výhodou anodooxidických vrstev je možnost zabarvení do mnoha barev. Tyto odstíny jsou světlostálé a atmosférickým vlivům odolné. Možnost, že jsou snadno

barvitelné, spočívá v pórovité vrstvě, která je výsledkem procesu anodické oxidace. Závisí na množství pórů a na jejich objemu. Barvení oxidické vrstvy se dělí na:

- absorpční anorganické chemické barvení
- absorpční organické barvení
- integrální barvení
- elektrolytické barvení
- kombinované barvení (elektrolytické předběžné barvení s následným přebarvením roztoku organických barviv)
- interferenční barvení



Obr. 14: Princip základních druhů barvení anodických vrstev [11]

Integrální barvení

Řadí se mezi jednostupňové postupy barvení. První metoda spočívá v přímém barvení a probíhá ve speciálních elektrolytech. Tyto elektrolyty zbarvují vrstvu již při jejím vzniku. Druhá metoda je nepřímá, ta probíhá v elektrolytech s legujícími prvky, jejichž usazení v ochranné vrstvě ve formě oxidů, způsobuje zbarvení. Tímto barvením se dosahují odstíny světle šedé [1,11].

Elektrolytické barvení

Hotový výrobek s oxidickou vrstvou se umístí do lázně soli kovů. Do těchto lázní je přiveden střídavý proud, který způsobuje rozklad soli na ionty. Tyto ionty se vylučují v pórech. Takto zbarvené vrstvy jsou stálé na světle, odolávají vysokým teplotám a jsou odolné vůči povětrnostním podmínkám. Nejčastěji se používají soli Zn a Sn [1,11].

Tab. 14: Přehled používaných solí[11]

Soli	Barvený odstín
Sn	Světle bronzový - černý

Ni	Světle bronzový – černý s nádechem do zelena
Co	Černý
Cu	Červený
Se	Červený

Absorpční

Provádí se v prostředí organických a anorganických roztoků. Při této metodě není použit elektrický proud. V praxi se používají především organické roztoky pro jejich snadnější přípravu. Světlejších odstínů lze dosáhnout v anorganických roztocích zvýšenou porézností a tloušťkou vrstvy. Rovněž zvětšení koncentrace pigmentů v roztoku a delší dobou expozice. Teplota lázně a její pH mají také podstatný vliv.

6 Cíle práce:

Cílem této práce je zjištění pevnostních charakteristik dvou horolezeckých karabin stejné velikostní řady od dvou výrobců. Únostnost byla hodnocena na celých karabinách. A tahových zkuškách těles vyrobených z karabin. Metalografická analýza materiálu a povrchové antikoroziční vrstvy (elox). Tyto cíle práce jdou zhrnout do těchto bodů:

- Ověření mezního stavu karabin při statické zkoušce tahem
- Zjištění základních mechanických charakteristik použitého materiálu
- Metalografická a chemická analýza studované slitiny s přiřazením značky materiálu
- Na základě metalografické analýzy popsat povrchovou antikoroziční vrstvu (elox)

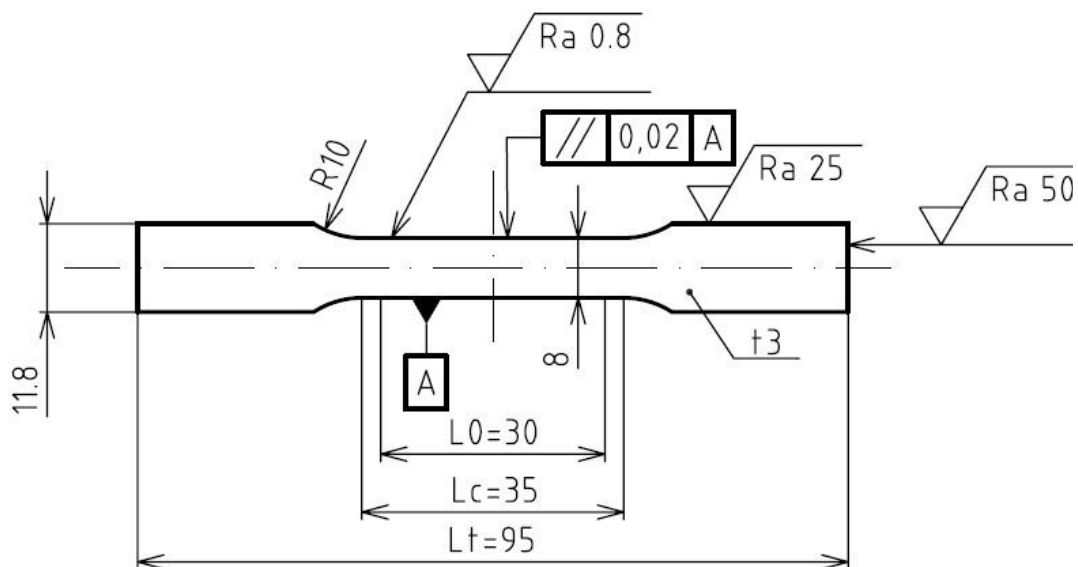
7 Experimentální materiál

Jako experimentální materiál byly použity horolezecké karabiny s drátovým zámkem od dvou různých výrobců Singing rock, žlutá dále jen CZ a Black Diamond, hnědá dále jen US. Karabiny byly vyrobeny z tyčoviny a tvarovány za tepla.

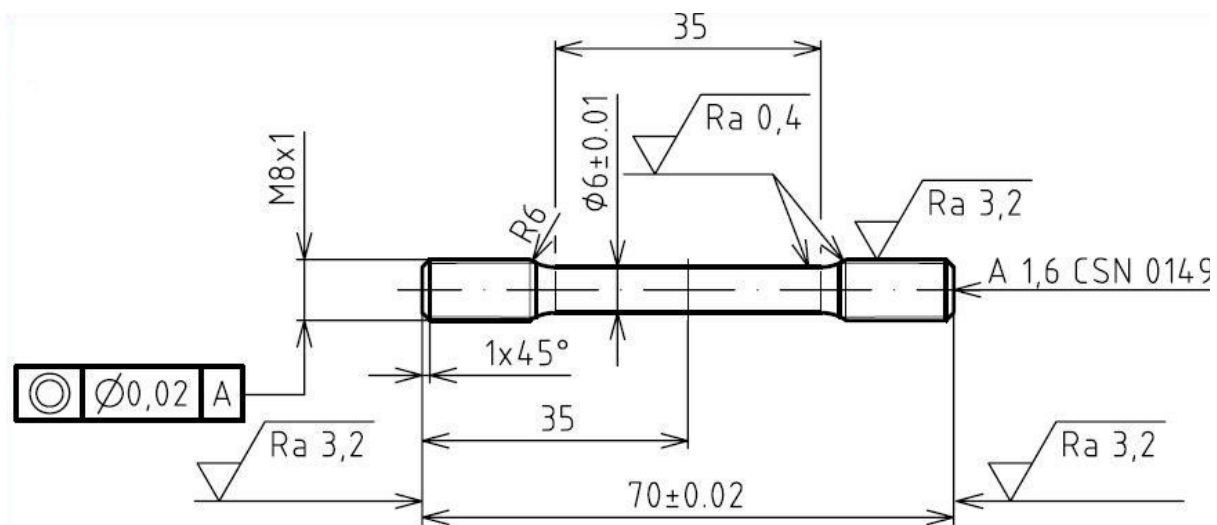


Obr. 15: Karabiny a zkušební tělesa pro zkoušku tahem

Zkušební tělesa pro zkoušku tahem byla přizpůsobena velikosti karabin. Z CZ karabiny, značky Singingrock byla vyrobena poměrná zkušební tyč plochá o délce $L_0=30\text{mm}$, tloušťce $a=3\text{mm}$ a šířce $b=8$ viz. Obr.16. Z US karabiny, značky Black Diamond bylo vyrobeno zkušební těleso válcové poměrně krátké se závitovou hlavou a průměru $d_0=6$ a délce $L_0=30$ viz Obr.17.



Obr. 16: Zkušební těleso poměrné ploché krátké CZ karabina



Obr. 17: Zkušební těleso poměrné válcové krátké US karabina

8 Experimentální metodika

8.1 Zkouška tahem

Zkouška tahem byla provedena dle normy [17, 18] na univerzálním zkušebním tahovém stroji Tiratest 2300 řízeným počítačem, vybaveným extenzometrem Mini MFA 2. Použitý softwar byl Labtest 3.0. Principem zkoušky je jednoosé zatěžování zkoušeného vzorku, kruhového nebo obdélníkového průřezu. Cílem zkoušky je smluvní tahový diagram kde je deformace (ϵ) na ose X v závislosti na napětí (σ) v ose Y. Z tohoto diagramu se odečítají základní mechanické charakteristiky jako je R_m a $R_{p0.2}$. Na přetržených zkušebních tyčích se určují v mechanické charakteristiky jako je A a Z.

8.2 Zkouška tvrdosti

Principem zkoušek tvrdosti je vtlačování cizího tělesa (indentoru) do povrchu zkoušeného vzorku. Zkouška tvrdosti byla provedena na tvrdoměru značky LECO HBE300. Jako metoda byla zvolena zkouška podle Brinella. Průměr kuličky byl 5 mm. Zatěžovací síla byla zvolena dle normy [18] $F=2450$ N, doba zatížení 10 s. Průměry vtisků byly vyhodnoceny na stereomikroskopu SZ61-TR a softwarem QuickPHOTO Industrial 2.3.

8.3 Chemická analýza

Jednou z metod jak zjistit chemické složení materiálu je metoda optické emisní spektrometrie. V tomto případě byl zvolen spektrometr s doutnavým výbojem Spectrumat GDS 750. Spektrometr využívá záření emitovaného atomy po excitaci doutnavým výbojem, který vzniká v Grimmově lampě. Princip Grimmovy lampy spočívá na principu odprašování vrstvy atomů materiálu pomocí ionizovaných atomů argonu. Získané záření je rozloženo pomocí polychromátoru a detekováno fotonásobičem. Pro každý měřený prvek je potřeba, aby byl přístroj vybaven patřičně umístěným fotonásobičem.

8.4 Výroba a příprava vzorků pro metalografickou analýzu

Vzorky pro metalografickou analýzu byly odebrány z karabina a to z horní rovné části viz. příloha 1. Odebrání proběhlo na metalografické řezačce Discutum značky Struers. Následně byly vzorky zality do zalévací hmoty Dentacryl a Clarofast v lisu Struers Laboproc-3 při 180 °C po dobu 10 min. Poté byly vzorky postupně broušeny a leštěny na brusných papírech se zvyšující se zrnitostí od 400, 1000. Následně byly vyštěny na Dap-7 s přítlačnou hlavou Pedemin-2 a naleptány leptadlem Fuss. Pozorování proběhlo na optickém metalografickém mikroskopu GR71 Olympus s digitální kamerou DP11 stejné značky, při zvětšení 100x, 200x a 500x.

9 Výsledky a hodnocení experimentů

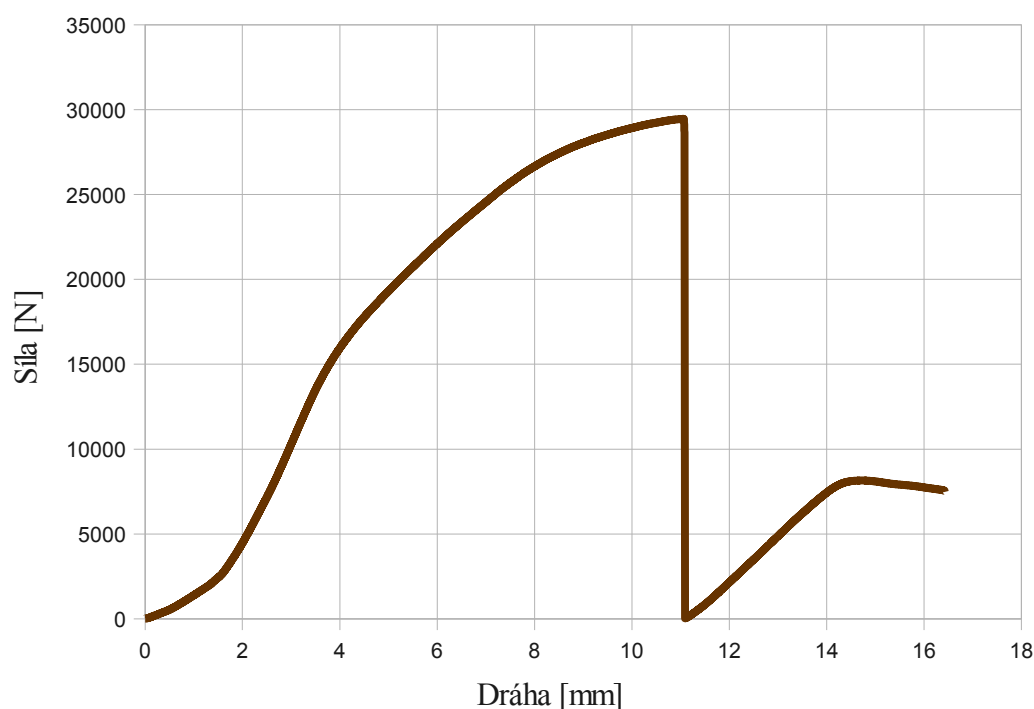
9.1 Statická zkouška tahem

9.1.1 Statická zkouška tahem celých karabin

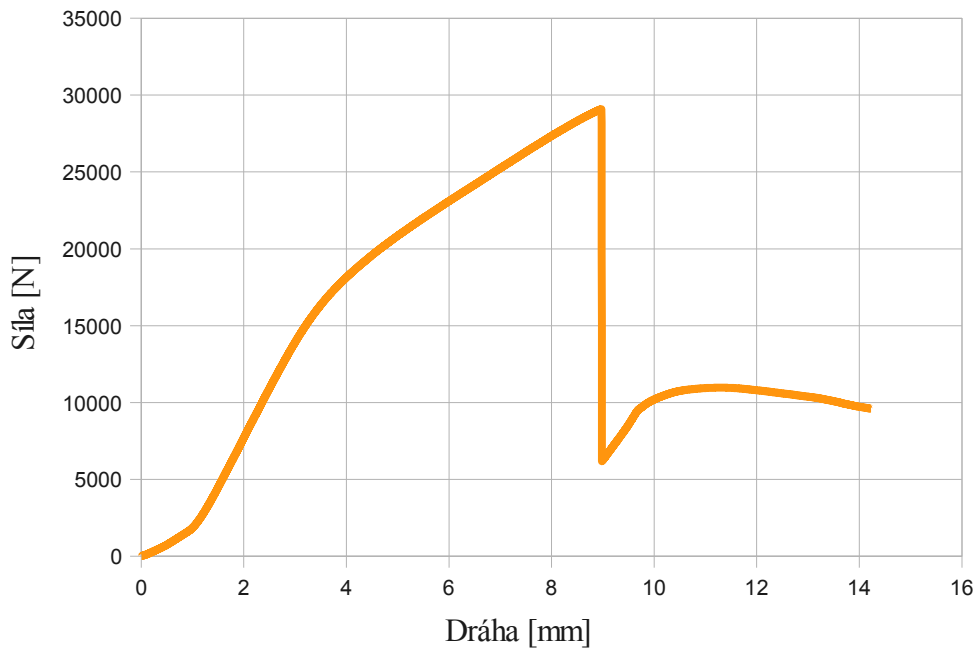
Výsledky tahových zkoušek celých karabin jsou uvedeny v Tab.15. Karabiny byly uchyceny na trhačí stroj pomocí tažných ok, viz. příloha 2. Karabiny byly trhány ve funkční poloze tzn. drátěný zámek byl zavřený a měl vliv na výslednou deformaci a maximální napětí, které karabiny snesly. Pokles síly byl zapříčiněn utržením drátěného zámku. Průběh zkoušek je zobrazen na Obr. 18 a 19.

Table 15: Hodnoty zkoušky tahem celých karabin

vzorek	F_{\max} [N]
US karabina	29458
CZ Karabina	29083



Obr. 18: Skutečný tahový diagram US karabiny plus dolom



Obr. 19: Skutečný tahový diagram CZ karabiny

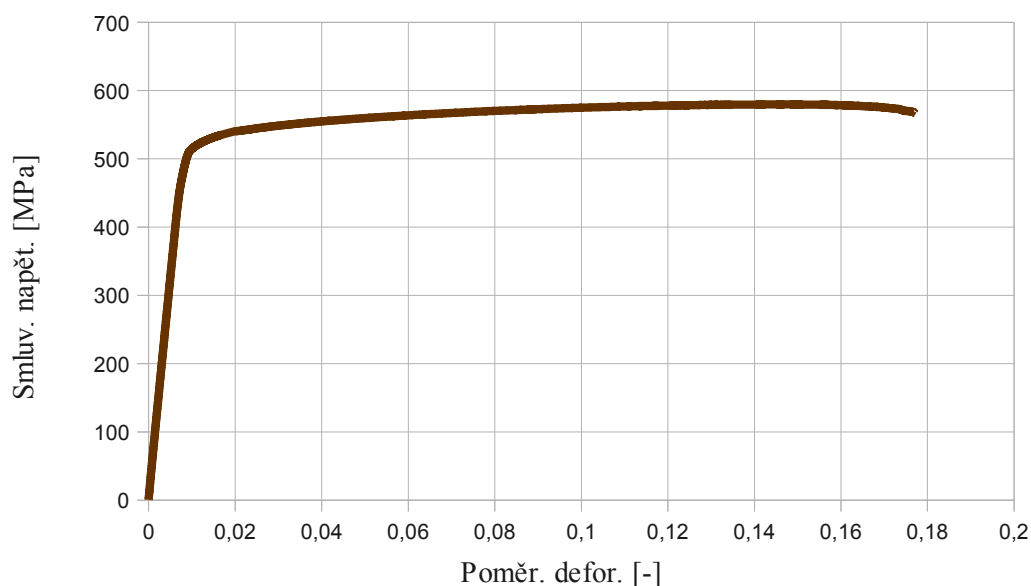
US karabina se poškodila při síle 29,5 kN což přesahuje hodnotu 25 kN udanou výrobcem o 13,5%. Poškození nastalo v uchycení zámku karabiny, který se utrhł. CZ karabina se poškodila při síle 29 kN což přesahuje hodnotu udanou 25 kN výrobcem o 13,8%. Poškození nastalo v zobáčku pro zámek, který se z karabiny vytrhl. Rozdílné síly pro poškození karabin byly nejspíše zapříčiněny jejich lehce rozdílnou konstrukcí viz Obr. 15 a místem poškození. Naměřené hodnoty jsou značně vysoké což naznačuje vysokopevnostní slitiny hliníku.

9.1.2 Statická zkouška tahem zkušebních těles

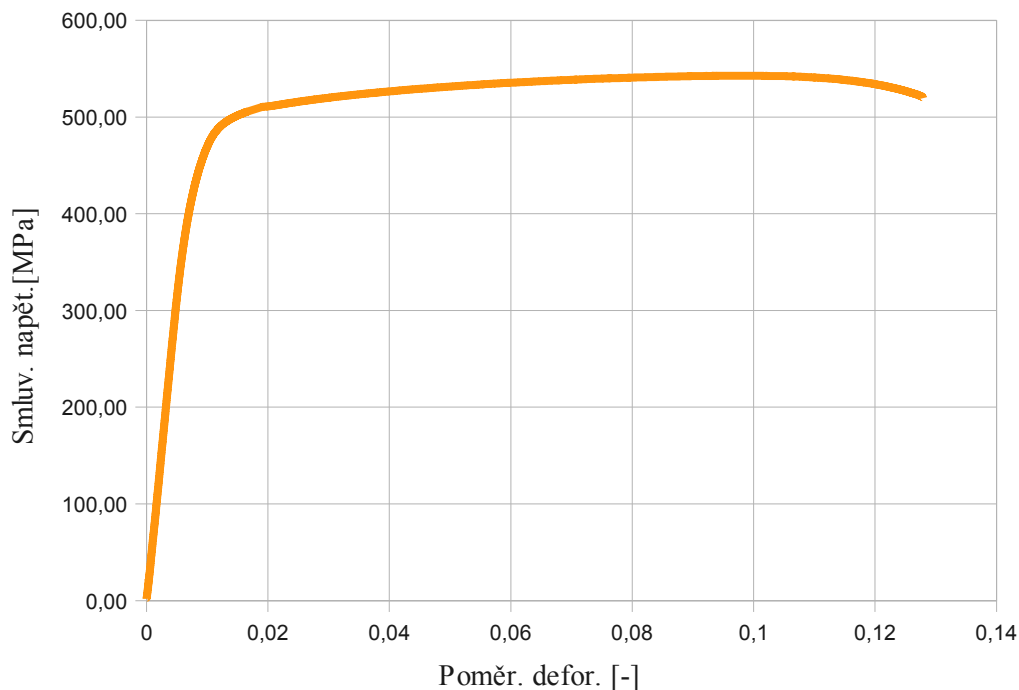
Výsledky tahových zkoušek na zkušebních vzorcích z karabin jsou uvedeny v Tab. 16. Smluvní diagram z těchto zkoušek je uveden na Obr. 20 a 21. Z průběhů obou tahových křivek je patrné, že po překročení hodnot smluvní meze kluzu nedochází v oblasti elastickoplastické k výraznému dalšímu zpevňování materiálu.

Tab. 16: Výsledky statické zkoušky tahem

Označení vzorku	E [GPa]	R _{p0,2} [MPa]	F _{max} [N]	R _m [MPa]	F _{lom} [N]	v [mm·min ⁻¹]	A ₅ [%]	Z [%]
US	64,9	514	16391	580	16050	1,8	14,3	16,6
CZ	64,4	456	13585	543	13002	1,5	11,5	-



Obr. 20: Smluvní tahový diagram zkuš. tělesa US karabina



Obr. 21: Smluvní tahový diagram zkuš. tělesa CZ karabina

Vysoká hodnota smluvní meze kluzu značí na použití vysokopevnostních slitin hliníku. Pro CZ karabinu udává norma předpokládaného materiálu karabin EN AW 7075 pro stav T6 hodnotu $R_{p0,2} = 480$ MPa a naměřená byla hodnota 456 MPa což je hodnota nižší než v normě. Pro $R_m = 540$ MPa a naměřené bylo 542 MPa což normu již splňuje. Tažnost v normě 7 % a naměřená byla 11,5 % což normativní minimum splňuje.

Na rozdíl CZ, pevnostní vlastnosti ($R_{p0,2}$ a R_m) Překračují hodnoty udavané normou pro přepolkadany materiál a tepelné zpracování. I plastické vlastnosti (A_5 , Z) naměřené na zkušebním tělesu normě vyhovují.

Polotovar	Rozměr D	Stav	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	HB	E [GPa]
Tyč	≤25	T6	min 480	min 540	min 5(7)	~161	inf.71

9.2 Měření tvrdostí

Výsledky z měření tvrdosti provedené na výbrusech jsou uvedeny v Tab. 17. Měření proběhlo dle normy [19].

Table 17: Výsledky měření tvrdosti dle Brinella

HBW 5/250	A	B	C	\bar{x}
CZ	171	170	171	170,6
US	169	171	168	169,3

Norma pro materiál EN AW 7075 udává hodnotu tvrdosti 161 HBW pro materiál tepelně pracovaný na stav T6. Průměrné naměřené hodnoty obou karabin tuto normu splňují.

9.3 Analýza chemického složení

Výsledky z měření chemického složení jsou uvedeny v Tab.18. Výsledky ukazují, že složení materiálu obou karabin odpovídá dle normy ČSN EN AW 573 řadě 7000, jejíž hlavními legurami jsou Zn, Mg, (Cu).

Tab 18: Výsledky chemického složení [hm %]

Vzorek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ni	Pb	Sn	Ca
CZ	0,19	0,18	1,5	0,04	3,3	0,26	4,6	0,09	0	0	0,03	0
US	0,22	0,31	1,4	0,03	3,3	0,16	5,1	0,05	0	0	0,05	0

Norma ČSN EN pro materiál EN AW 7075 udává chemické složení viz. Tab. 19. Po porovnání obou tabulek bylo zjištěno, že hodnota Mg v obou materiálech karabin přesahuje hodnotu udávanou normou. Naopak obsah Cr u karabiny US a obsah Zn u karabiny CZ byly nižší než udává norma.

Zařazení materiálu proběhlo pomocí softwaru Lexikon kovů 1.1 a Lexikon technických materiálů 2.7.

Tab. 19: Chemické složení udané normou [20] [hm %]

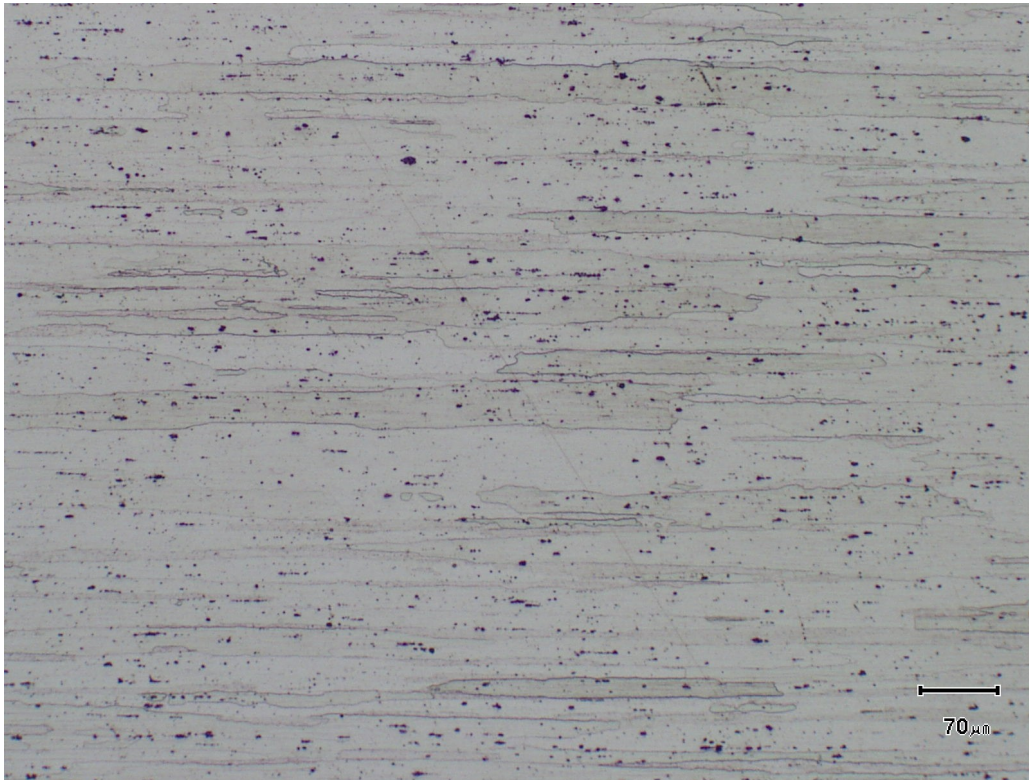
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti+Zr	Ti	Ostatní		Al
									Jednotl.	Celke.	
0,4	0,5	1,2-2,0	0,3	2,1-2,9	0,18-0,28	5,1-6,1	0,25	0,2	0,03	0	Zbytek

Na základě výše uvedeného je možné předpokládat, že tepelné zpracování zkoumaných karabin se stávalo s:

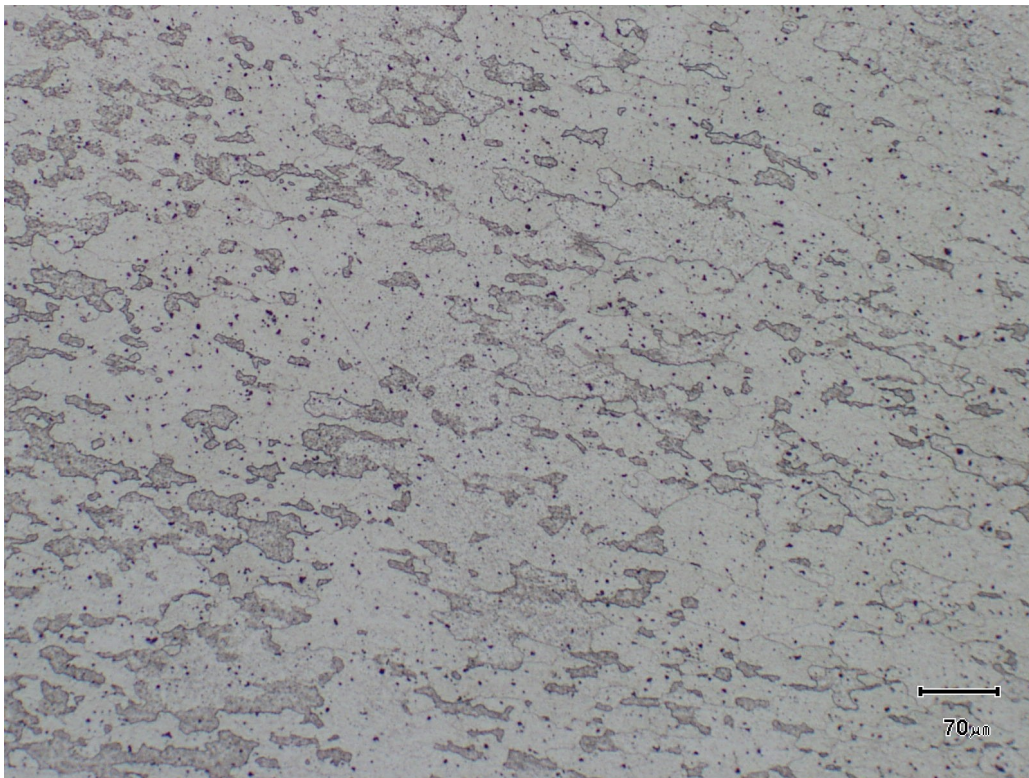
rozpouštěcí žihání: 160 až 180 °C s ochlazováním do vody.

umělé stárnutí: 4 až 6 hodin při teplotě: 160 až 180 °C

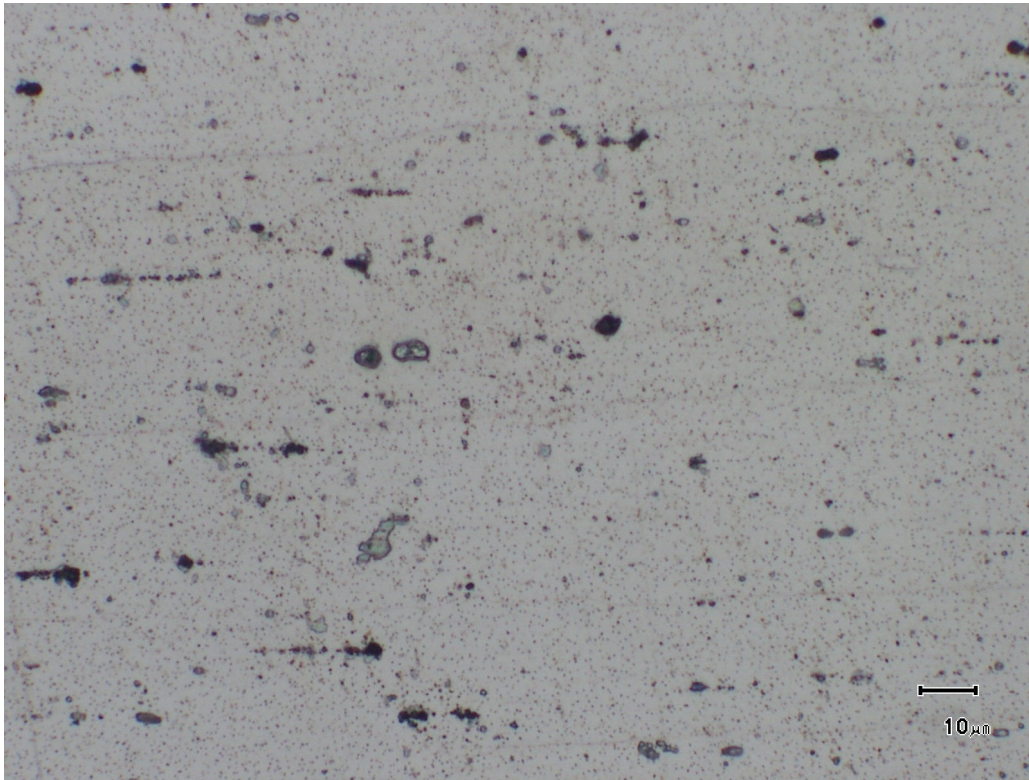
9.4 Mikrostruktura CZ karabiny



Obr. 22: mikrostruktura CZ karabiny, podelný řez, leptaný stav

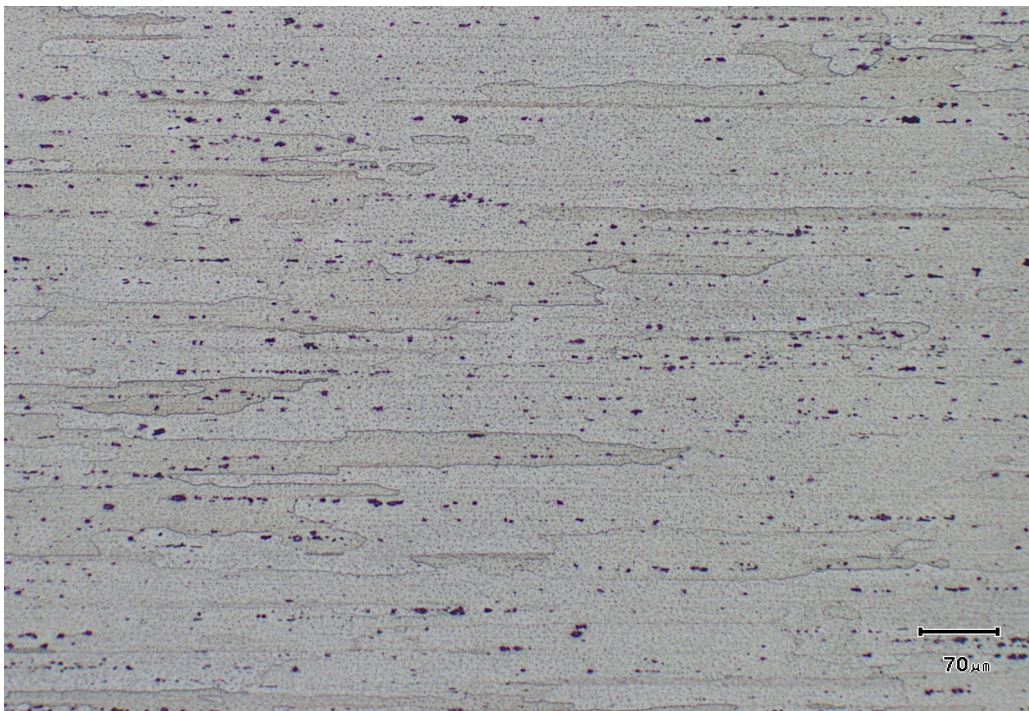


Obr. 23: mikrostruktura CZ karabiny, příčný řez, leptaný stav

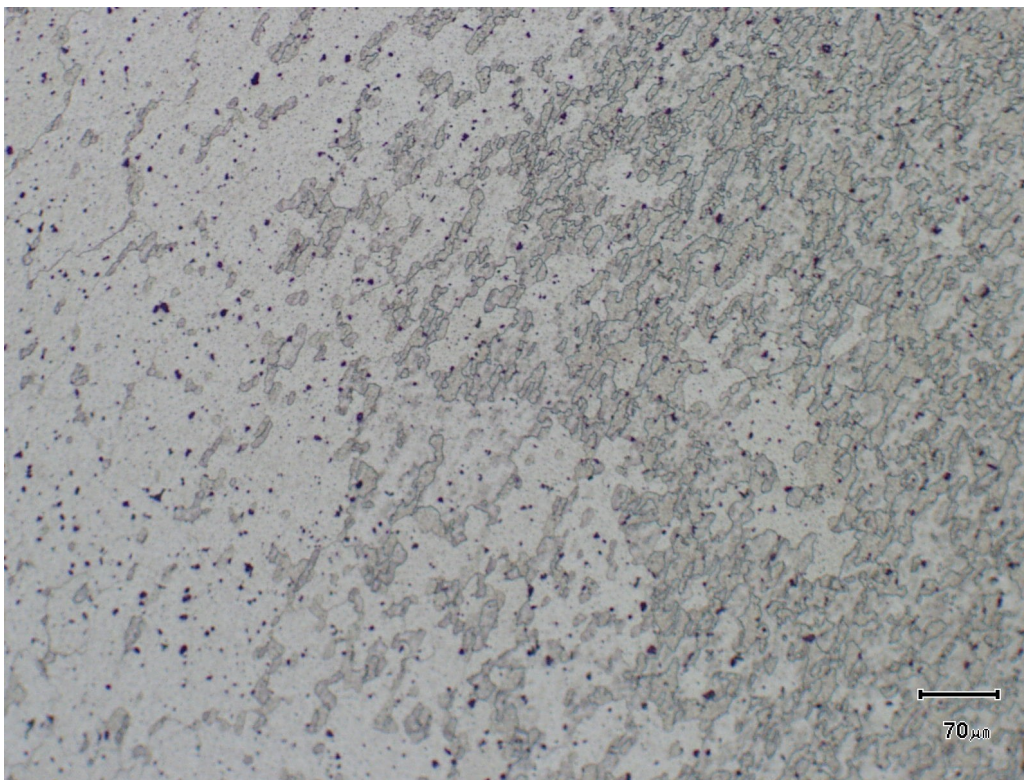


Obr. 24: mikrostruktura CZ karabiny, příčný řez, leptaný stav

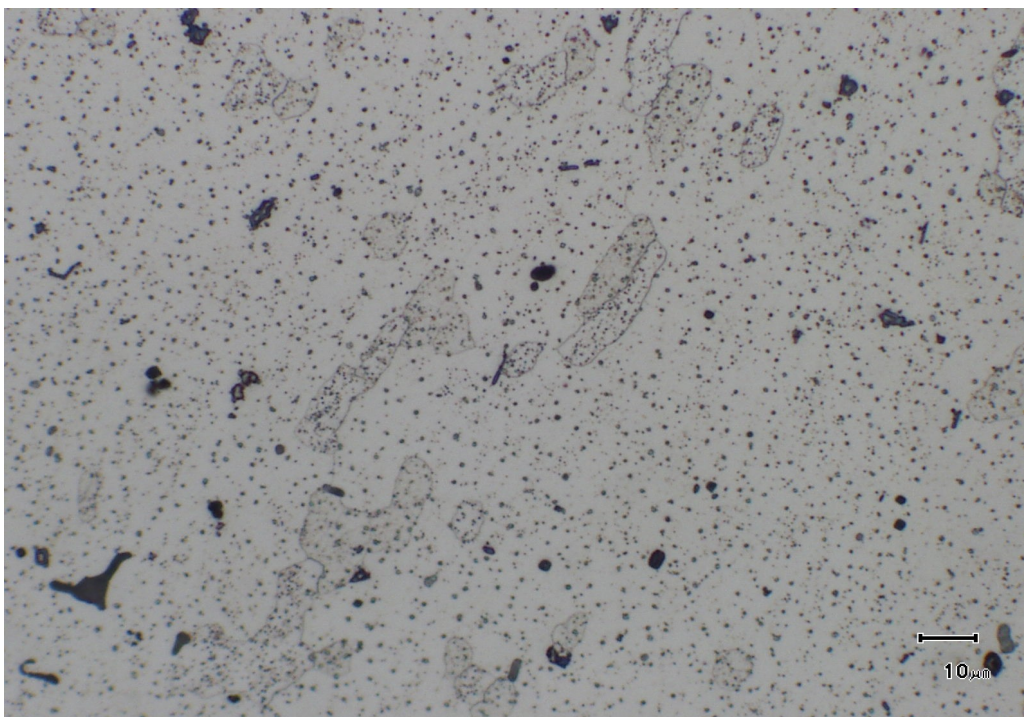
9.5 Mikrostruktura US karabiny



Obr. 25: Mikrostruktura US karabiny, podélný řez, leptaný stav



Obr. 26: Mikrostruktura US karabiny, příčný řez, leptaný stav



Obr. 27: Mikrostruktura US karabiny, příčný řez, leptaný stav

Struktura EN AW 7075 je dosti složitá. Matrice materiálu obsahuje malé precipitáty různého složení (sekundární fáze, intermetalika nebo intermediální fáze) jako jsou $MgZn_2$ nebo $Al_2Mg_3Zn_3$. Tuhý roztok je tvořen $\alpha(Al)$ což je substituční tuhý roztok Zn jako hlavní legury v Al. Základní kovová matrice je tvořena tímto tuhým roztokem vněmž jsou rozpuštěny legující prvky jako je např. Mg, Cu a také různé nečistoty. Tyto nečistoty tvoří Fe, Si, Mn a další prvky. Tyto precipitáty nečistot nepříznivě ovlivňují mechanické vlastnosti a to tím, že tvoří vměstky velkých rozměrů. Tyto precipitáty jsou umístěny na hranicích zrn a subzrn a také disperzují uvnitř zrna.

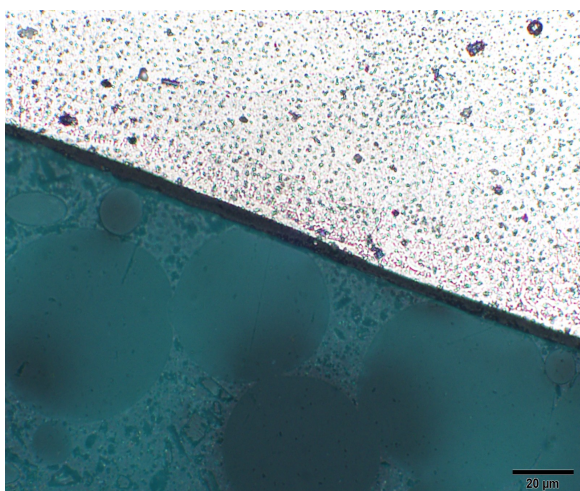
Protáhnuté tvary zrn vznikly po plastické deformace a jsou orientované ve směru tváření polotovaru karabin, tudíž lze předpokládat výraznější anizotropii mechanických vlastností

9.6 Povrchová vrstva

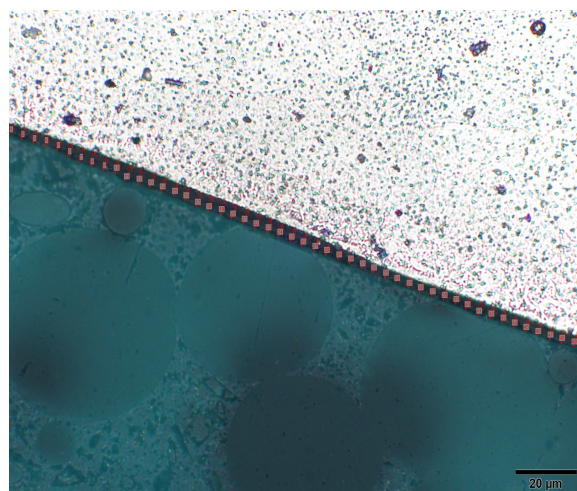
Z měření tloušťky povrchových vrstev provedené při $Z=500x$ viz. Obr. 29 a Obr. 31. Byly naměřeny hodnoty uvedené v Tab 20.

Tab 20: Naměřené hodnoty tlouštěk vrstev

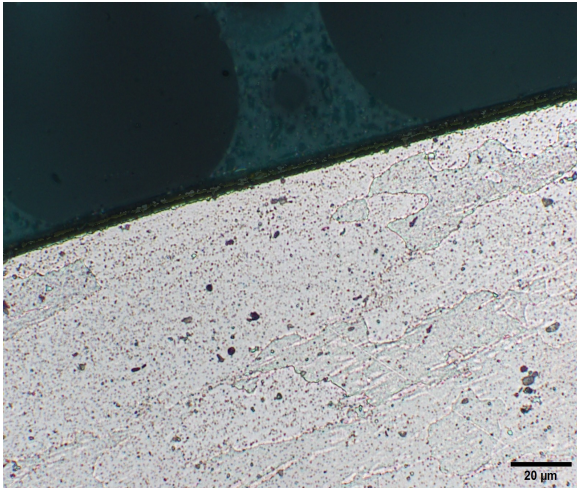
	CZ	US
Poč.měření	50	50
Přůmerná tloušťka [μm]	4,97	4,11
Min. tloušťka [μm]	4,08	3,4
Max. tloušťka [μm]	6,8	5,51
Standartní odchylka	0,5	0,59



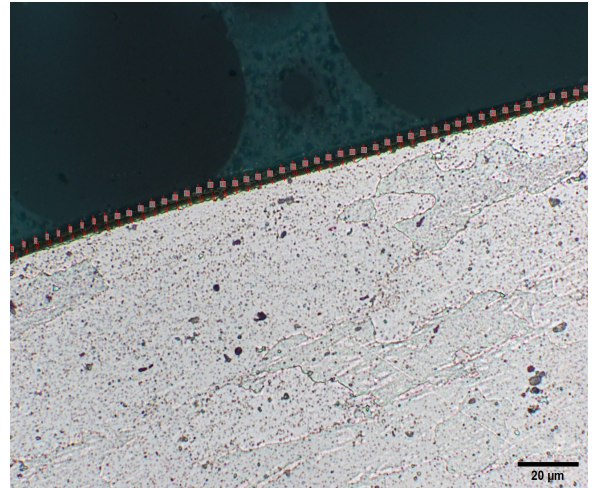
Obr. 28: Vrstva US karabiny $Z=500$



Obr. 29: Vrstva US karabiny $Z=500$



Obr. 30: Vrstva US karabiny Z=500



Obr. 31: Vrstva US karabiny Z=500

Naměřené tloušťky vrstev bohužel odpovídají většině způsobů vyvolání oxidické vrstvy. V dnešní době je možnost docílit hnědé a zlatého zbarvení vrstvy rovněž mnoha způsoby. Proto není možno jednoznačně určit jakou metodou byly eloxy vytvořeny. Pro přesnější analýzu typu vrstvy a probarvení by bylo vhodné použít rastrovací elektronovou mikroskopii.

10 Závěry

Na základě provedených experimentů a zpracované rešerži v této práci byly vyvozeny tyto závěry.

- Z tahových zkoušek celých 25 kN horolezeckých karabin byly tahové naměřeny diagramy do destrukce. Pro CZ karabinu to byla síla $F_{\max}=29$ kN a pro US 29,5 kN. Toto vypovídá vzhledem k velikosti karabin na použití vysokopevnostních slitin hliníku a obě karabiny splňují hodnotu udanou výrobcem.
- Hodnoty $R_m(579$ MPa) a $R_{p0,2}(513$ MPa) pro US karabinu jsou vyšší než udává norma ČSN EN 573. Pro karabinu CZ byla hodnota $R_{p0,2}(456$ MPa) nižší než udává norma, ale hodnota $R_m(542$ MPa) normu již splňuje. Tyto hodnoty pevnostních vlastností jsou poměrně vysoké a svědčí o tepelném zpracování zkoumaných karabin na maximální pevnost tzn. na stav T6.
- Naměřené hodnoty plastických deformací US karabiny, tažnost (14,3 %) a koncentrace (16,6 %) přesahují hodnoty udávané normou (min. 7 %). U karabiny CZ byla naměřená hodnota tažnosti(11,4 %) což předpis téže splňuje.
- Z naměřeného chemického složení byl určen jako pravděpodobný materiál EN AW 7075. Jeden z důležitých legujících prvků Mg je v materiálu obou karabin obsažen ve vyšší míře než udává předpis. Hlavní nečistoty v tomto typu slitin jako jsou Fe, Si, Mn mají nízký obsah což vypovídá o čistotě výrobního procesu polotovarů.
- Struktura materiálu karabin je tvořena tuhým roztokem α , který je tvořen substitučním tuhým roztokem Zn v Al. V tuhém roztoku jsou dispergované precipitáty na bázi $MgZn_2$ a $Al_2Mg_3Zn_3$, se vytvořily v průběhu umělého stárnutí. Dále struktura obsahuje větší množství vměstků na bázi Fe, Si, Mn, které jsou usměrněné tvářením.
- Povrchové ochranné vrstvy mají téměř totožnou tloušťku. CZ karabina 4,97 μm a US karabina 4,11 μm . Vzhledem k oboru použití, typem probarvení a tloušťkou lze předpokládat, že se jedná o vrstvu vytvořenou anodickou oxidací (eloxováním) komerčně běžným víceetapovým postupem.

11 Seznam použitých zdrojů

- [1] Michna, Š. a kol.: Encyklopedie hliníku, Děčín : Alcan Děčín Extrusions, 2005. 1 elektronický optický disk (CD-ROM). ISBN 80-89041-88-4
- [2] Kraus, tepelné zpracování neželezných kovů [online]. 2001 [cit. 2011-05-23] neželezné kovy. Dostupné z WWW: <<http://tzs.kmm.zcu.cz/nezelez2.pdf>>.
- [3] Luděk, P. a kol.: Nauka o materiálu. I. / Brno : CERM, 2003. 2. opr. a rozš. vyd. 516 s. ISBN 80-7204-283-1
- [4] Michna, Štěpán. Opory [online]. 2001 [cit. 2011-05-23] Dowland. Dostupné z WWW: <http://www.stefanmichna.com/download/opory/technicke_materialy.pdf>.
- [5] Stránky o materiálech part. I [online]. 2005 [cit. 2011-05-23]. Hliník (Aluminium). Dostupné z WWW: <<http://www.nom.wz.cz/KOVY/Hlinik1.htm>>.
- [6] MatNet [online]. 2006 [cit. 2011-05-23]. Hliníkové zliatiny pre tvárnenie (nevytvrditeľné). Dostupné z WWW: <<http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=137>>.
- [7] Aluminium matter [online]. 2001 [cit. 2011-05-23]. Aluselect. Dostupné z WWW: <<http://aluminium.matter.org.uk/aluselect/default.asp>>.
- [8] Roučka, J.: Metalurgie neželezných slitin / Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2004. 1. vyd. 148 s. ISBN 80-214-2790-6
- [9] Radka, Bičišťová. Tepelné zpracování Alslitin. [online]. 2001 [cit. 2011-05-23] Podklady. Dostupné z WWW: <<http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TMSL/Tepeln%C3%A9%20zpracov%C3%A1n%C3%AD%20slitin%20Al-Si.pdf>>
- [10] Eloxtech [online]. 2001 [cit. 2011-05-23]. Eloxování hliníku. Dostupné z WWW: <<http://www.eloxtech.cz/eloxovani.htm>>.
- [11] Lakovna [online]. 2009 [cit. 2011-05-23]. Anodická oxidace (Struktura a růst vrstvy). Dostupné z WWW: <<http://www.lakovna.cz/anodicka-oxidace-struktura-a-rust-vrstvy.html>>.
- [12] Technicke-normy-csn [online]. 2011 [cit. 2011-05-26]. Seznam náhradní normy. Dostupné z WWW: <[http://www.technicke-normy-csn.cz/technicke-normy/64483-nahrady-\(038650\)-CSN-EN-12373-1.html](http://www.technicke-normy-csn.cz/technicke-normy/64483-nahrady-(038650)-CSN-EN-12373-1.html)>.
- [13] Alex group [online]. 2011 [cit. 2011-05-23]. Anodická oxidace - Elox. Dostupné z WWW: <<http://www.axelgroup.cz/CZ/produkty/typy-povrchovych-uprav/anodicka-oxidace-elox.aspx>>.
- [14] Sedláček, V.: Únava hliníkových a titanových slitin. / Praha : SNTL, 1989. 351 s.
- [15] Internet Microscope for Schools [online]. 2010 [cit. 2011-05-26]. Components. Dostupné z WWW: <<http://pwtatlas.mt.umist.ac.uk/internetmicroscope/components/corkscrew/handle-body/phase.html>>.
- [16] FIALA, J., BEBR, A., MATOŠKA, Z. Strojnické tabulky 1. SNTL, 1990. 880 s.
- [17] ČSN EN ISO 6892-1: Kovové materiály – Zkouška tahem – Část 1: Zkušební metodaza pokojové metody, Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [18] DIN 50125. Testing of metallic materials – Tensile test pieces
- [19] ČSN EN 10003-1. Kovové materiály – Zkoušení tvrdosti podle Brinella – Část 1: Zkušební metoda, Český normalizační institut, 1997
- [20] ČSN EN 573. slitina EN AW 7075 : Slitina hliníku tvářená pro všechny účely. Praha : Český normalizační institut, 2001. 8s.
- [21] PTÁČEK, L. a kol.: Nauka o materiálu II. 2. upr. vyd. Brno : [s.n.], 2002. 395 s ISBN 80-7204-248-3.
- [22] ASM handbook volume 9 : metallography and microstructures / Materials Park, OH : ASM International, 2004. 1184 s. ISBN 0-87170-706-3

12 Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratky:

hm. %, hmot. %	Hmotnostní procenta
GS	Stejnoseměrný proud a roztok kyseliny H_2SO_4
GSX	Stejnoseměrný proud a roztok kyselin $H_2SO_4 + (COOH)_2$
ASM	American Society of Metallurgy
KP	Kryolitový poměr
GP	Guinier-Prestonovy zóny

Symboly:

A	Konstanta	
A_5	Prodloužení	[%]
A	Prodloužení	[%]
a	Tloušťka zkušební tyče	[mm]
b	Šířka zkušební tyče	[mm]
d_0	Průměr zkušební tyče	[mm]
D	Velikost dendritického zrna	[μm]
E	Modul pružnosti v tahu	[Gpa]
F_b	Lomová síla	[N]
F	Síla	[N]
F	Fradaiova konstanta	[96500 C·mol ⁻¹]
HBW	Tvrдость podle Brinella	
HV	Tvrдость podle Vickerse	
i	Proud	[A]
k	Rozměrový koeficient roven 1	[$\mu m \cdot sec$]
K	Boltzmannova konst.	[1,380 662 ⁻²³ J.K ⁻¹]
L_0	Délka zkušební tyče	[mm]
M	Molární hmotnost	[g·mol ⁻¹]
m	Množství vyloužené látky na 1m ²	[g]
n	Mocenství kovového kationtu v lázni	
Ph	je záporný dekadický logaritmus koncentrace vodíkových kationtů ve zředěném vodném roztoku.	
Q	Aktivační energie závislá na obsahu příměsí/legujícího prvku, velikosti deformace atd.	
R_e	Mez kluzu	[MPa]

R_m	Mez pevnosti	[Mpa]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	[Mpa]
T	Teplota	[K]
t	Čas	[hod]
t_1	Krystalizační čas	[sec]
v	Rychlost posuvu příčnicku	[mm·sec ⁻¹]
v	Rychlost arheniovy rovnice	
\bar{x}	Aritmetický průměr	
Z	Kontrakce	[%]
ε	Deformace	[-]
σ	Smluvní napětí	[MPa]

13 Seznam příloh

Příloha 1 – Označení místa odběru vzorku z karabiny pro metalografický výbrus.....	49
Příloha 2 – Způsob uchycení karabiny do trhačího stroje.....	50



