

Optimalizace procesu zpracování profilů ze slitin hliníku

Petr Šedivý

Bakalářská práce
2011

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Petr ŠEDIVÝ

Osobní číslo: T08227

Studijní program: B 3909 Procesní inženýrství

Studijní obor: Technologické zařízení

Téma práce: OPTIMALIZACE PROCESU ZPRACOVÁNÍ PROFILŮ ZE
SLITIN HLINÍKU

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární rešerše z oblasti teorie tváření a ohýbání
2. Popis hliníku a jeho slitin
3. Popis výroby profilů ze slitin hliníku
4. Optimalizace procesu zpracování profilů ze slitin hliníku
5. Ekonomické zhodnocení

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tiskárenská/elektronická**

Seznam odborné literatury:

DLE DOPORUČENÍ VEDOUCÍHO PRÁCE

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Luboš Rokyta

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

14. února 2011

Termín odevzdání bakalářské práce:

3. června 2011

Ve Zlíně dne 6. ledna 2011



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: Šedivý Petr

Obor: Technologická zařízení

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčnímu účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást prací rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 17.5.2011

..... Šedivý Petr

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně pasivků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví mítní předpis vysoké školy.

(2) *Diplomová, diplomová, bakalářská a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být těž nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlázení veřejnosti v místě určeném vaňním předpísem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracovníě vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.*

(3) *Plát, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.*

³ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) *Do práva autorského také nerasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, udělo-il nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).*

⁴ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(2) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.*

(2) *Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo udělit poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.*

(3) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jim dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložil, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlíží k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.*

ABSTRAKT

V mé bakalářské práci bylo úkolem zpracovat studii na téma Optimalizace procesu zpracování profilů ze slitin hliníku. V praktické části pak navrhnout technologii zpracování hliníkových profilů. Nejdříve byly z daného profilu vyčleněny oblasti, které nepříznivě ovlivňují ohýbání hliníkového profilu. Dalším úkolem bylo tyto oblasti oddělit od profilu metodou řezání vodním paprskem. Poté byly tyto vzorky tepelně zpracovány a dále podrobeny mechanickým zkouškám. K provedení praktické části bakalářské práce bylo využito těchto technologických zařízení: Stroj od společnosti Flow na řezání vodním paprskem, elektrická odporová komorová pec, univerzální testovací stroj pro statické a dynamické (nizkokyckové) zkoušky: tah, ohyb, tlak. U vzorků byly naměřené hodnoty porovnány s předchozím stavem materiálu před jakoukoliv tepelnou úpravou. Za účelem zefektivnění výroby hledám optimální řešení pro úpravu technologického procesu a následně i časovou úsporu.

Klíčová slova: proces tepelného zpracování, mez pevnosti, mez kluzu, tahové zkoušky

ABSTRACT

The task of my bachelor thesis was to process the study entitled “Optimization of processing of aluminum profiles”. At the practical part have been designed the technology processing of aluminum profiles. First, was excluded the areas of profiles, which adversely affect the bending of aluminum profile. The next task was to separate these areas from the profile by method of water jet cutting. These samples were then heat-treated and subjected to mechanical tests. To carry out the practical part of this thesis was used the following technological equipments: Machine waterjet cutting from Company Flow, electric resistance chamber furnace, universal testing machine for static and dynamic (low-cycle) tests: tension, bending, compression. The measured values of samples were compared with the previous state of the material before any heat treatment. In my thesis I am looking for an optimal solution to greater efficiency of production and also saving the time.

Key words: heat treatment process, yield strength, yield strength, tensile test

PODĚKOVÁNÍ:

Děkuji Ing. Luboši Rokytovi jako vedoucímu bakalářské práce za pomoc při zpracování této bakalářské práce, cenné připomínky a rady, za podklady a čas strávený nad touto prací. Dále děkuji pracovníkům firmy: IFE CR, a.s., za rady a poskytnutý prostor při získávání praktických informací k výrobě a procesu zpracování profilů ze slitin hliníku.

Nic, co by stálo za to, jsem neudělal náhodou. Vždy za tím byla poctivá práce.

Thomas Alva Edison

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| ÚVOD | 10 |
| I TEORETICKÁ ČÁST | 11 |
| 1 VLASTNOSTI HLINÍKU A JEHO SLITIN | 12 |
| 1.1 CHARAKTERISTIKA HLINÍKU | 12 |
| 1.2 DĚLENÍ SLITIN HLINÍKU | 12 |
| 1.2.1 Slévárenské slitiny hliníku | 12 |
| 1.2.2 Slitiny určené ke tváření..... | 12 |
| 1.2.3 Rozdělení podle označení, přísad a tepelného zpracování | 13 |
| 1.3 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN..... | 14 |
| 1.3.1 Postup tepelného zpracování..... | 16 |
| 1.4 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ SLITIN AL-MG-SI | 17 |
| 1.4.1 Důvody Tepelného zpracování u slitin Al | 18 |
| 1.4.2 Stavy tepelného zpracování slitin Al-Mg-Si..... | 18 |
| 1.4.3 Přehled specifických vlastností jednotlivých značení hliníkových slitin..... | 19 |
| 1.4.4 Vytvrzování..... | 19 |
| 1.4.5 Využití slitin hliníku v praxi | 22 |
| 1.5 OHYBOVÁ TUHOST V LINEÁRNÍ ELASTICKÉ OBLASTI..... | 22 |
| 1.5.1 Zkouška ohybem | 22 |
| 1.5.2 Modul pružnosti | 23 |
| 1.5.3 Hookův zákon | 24 |
| Význam: | 26 |
| 2 TEORIE TVÁŘENÍ | 28 |
| 2.1 HISTORIE TVÁŘENÍ | 28 |
| 2.1.1 Rozdělení tváření | 28 |
| 2.2 TEORIE TAŽENÍ..... | 29 |
| 2.2.1 Tažení drátů a profilů | 29 |
| 2.2.2 Proces tažení a silové poměry | 30 |
| 2.2.3 Stroje pro tažení | 31 |
| 2.2.4 Nástroje pro tažení | 32 |
| II PRAKTICKÁ ČÁST | 33 |
| 3 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE | 34 |
| 3.1 PROBLEMATIKA OHÝBÁNÍ HLINÍKOVÝCH PROFILŮ | 34 |
| 3.1.1 Současný způsob výroby..... | 34 |
| 3.1.2 Návrh řešení daného problému | 36 |
| 3.2 POPIS POUŽÍVANÝCH STAVŮ ZPRACOVÁVANÉHO PROFILU..... | 36 |
| 3.3 OBRÁBĚNÝ PROFIL | 38 |
| 4 PŘÍPRAVA ZKOUMANÉHO PROFILU | 39 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.1 | PŘÍPRAVA K TEPELNÉ ÚPRAVĚ | 39 |
| 4.2 | TECHNOLOGIE DYNAMIC WATERJET RXD | 39 |
| 4.3 | TEPELNÁ ÚPRAVA | 40 |
| 4.4 | ZKOUŠKA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ | 42 |
| 4.5 | CHARAKTERISTIKA ČINNOSTI ZKOUŠKY TAHEM | 42 |
| 4.6 | UNIVERZÁLNÍ TESTOVACÍ STROJ ZWICK 1456..... | 43 |
| 4.7 | ZKOUŠKA PEVNOSTI V TAHU | 45 |
| 5 | NAMĚŘENÁ DATA PŘI TAHOVÉ ZKOUŠCE | 47 |
| 5.1 | HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ..... | 52 |
| | ZÁVĚR | 54 |
| | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY..... | 56 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK..... | 57 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ | 58 |
| | SEZNAM TABULEK..... | 60 |

ÚVOD

K výrobě jakéhokoli výrobku je nezbytný postup výroby – technologický postup.

Technologický postup je základem pro výrobu samotného finálního výrobku pro zákazníkem jednoznačně definované technologické vlastnosti, jako jsou: pevnost, tuhost materiálu a tím také finálního výrobku.

Ten nám také udává, jednak z jakých profilů budou výrobky vyráběny, tak i jaké budou mít dodávané profily vlastnosti, zejména pevnostní jako je tuhost.

Proto se jeví jako velmi dobrý materiál v dopravním průmyslu hliník ovšem ne jako čistý hliník. Nejdůležitější je uplatnění hliníku ve formě slitin, z nichž bezesporu nejznámější je slitina s hořčíkem mědí a manganem, známá jako dural. Ovšem pro potřeby v automobilovém i železničním průmyslu se převážně využívá slitin hliníku s hořčíkem a křemíkem, zvláště díky jeho mechanickým vlastnostem.

Hliník je třetím nejvíce se vyskytujícím prvkem v zemské kůře. V přírodě se vyskytuje přibližně ve 250 různých minerálech. Nejvýznamnější ekonomicky využitelnou rudou pro výrobu hliníku je bauxit.

Hliník a jeho slitiny jsou v poslední době považovány za nejpoužívanější a za nejvíce se rozšiřující prvek řazený do oblasti neželezných kovů. Setkáváme se s ním takřka v každodenním životě a v některých odvětvích je naprosto nepostradatelný. Použití slitin hliníku má velké zastoupení v dopravě. Z pohledu obrábění je slitina hliníku nejvíce používána v automobilovém průmyslu, díky své nízké hmotnosti a mechanickým vlastnostem. Další oblastí je letecký průmysl, kde je kladen důraz na hmotnost a mechanické vlastnosti zejména pod bodem mrazu, kde je hliník materiálem číslo jedna.

A na základě zjištěných možností v oblasti materiálového tepelného zpracování z důvodu zákazníkem požadované finální tuhosti a pevnosti výrobku, budeme řešit technologický proces zpracování.

Odborné a praktické poznatky jsem čerpal ve firmě IFE CR, a.s., která je výrobcem dveřních systémů, používaných v železniční dopravě jak městské, tak i u rychlostních vlakových souprav za použití již zmiňovaných a zkoumaných finálních profilů.

Teoretická část je zaměřena na proces technologického zpracování.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 VLASTNOSTI HLINÍKU A JEHO SLITIN

1.1 Charakteristika hliníku

Hliník je kov bílé barvy, vysoké elektrické a tepelné vodivosti s poměrně vysokou hodnotou měrného tepla tání. Hliník a jeho slitiny se vyznačují vysokým poměrem meze pevnosti v tahu a hustoty. Pevnostní charakteristiky je možné intenzivním tvářením zvýšit. Hliník má kubickou plošně centrovanou mřížku, teplotu tavení 660°C , hustotu 2699 kg/m^3 při čistotě 99,99 %. Významnou vlastností hliníku je jeho poměrná stálost na vzduchu. Ke zjemnění zrna se přidávají malá množství prvků, například Ti, Zr, Ta.

Hliník se ve své čisté podobě v praxi téměř nepoužívá. Tak jak ho známe v praxi, tak se používá spolu s dalšími prvky, které více či méně ovlivňují jeho charakteristické vlastnosti. V tomto spojení jde vlastně o slitiny hliníku, které jsou pro praktické využití použitelnější.

1.2 Dělení slitin hliníku

1.2.1 Slévárenské slitiny hliníku

Sem patří hlavně slitiny Al-Si (siluminy), jedná se o nejrozšířenější slévárenské slitiny. Al-Si slitiny můžeme rozdělit na :

- podeutektické 4,5 - 10 % Si
- eutektické 10 - 13 % Si
- nadeutektické nad 13 % Si

Dále se jedná o slévárenské slitiny typu Al-Mg-Si, Al-Si-Cu, Al-Si-Cu-Ni, Al-Cu, Al-Mg.

1.2.2 Slitiny určené ke tváření

Slitiny určené ke tváření se dělí podle toho, zda je možné jejich vlastnosti dále zvyšovat precipitačním vytvrzováním.

- slitiny vytvrditelné (slitiny typu Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si, Al-Zn-Mg, Al-Zn-Mg-Cu)

- slitiny nevytvrditelné (zejména slitiny Al-Mg, Al-Mn)

1.2.3 Rozdělení podle označení, přísad a tepelného zpracování

Slitiny hliníku lze rozdělit i podle označení, které se používá v praxi. Dle normy používané u nás se řadí do 8 řad, které určují dodatečný slitinový prvek a slouží k rychlé orientaci.

Podle označení:

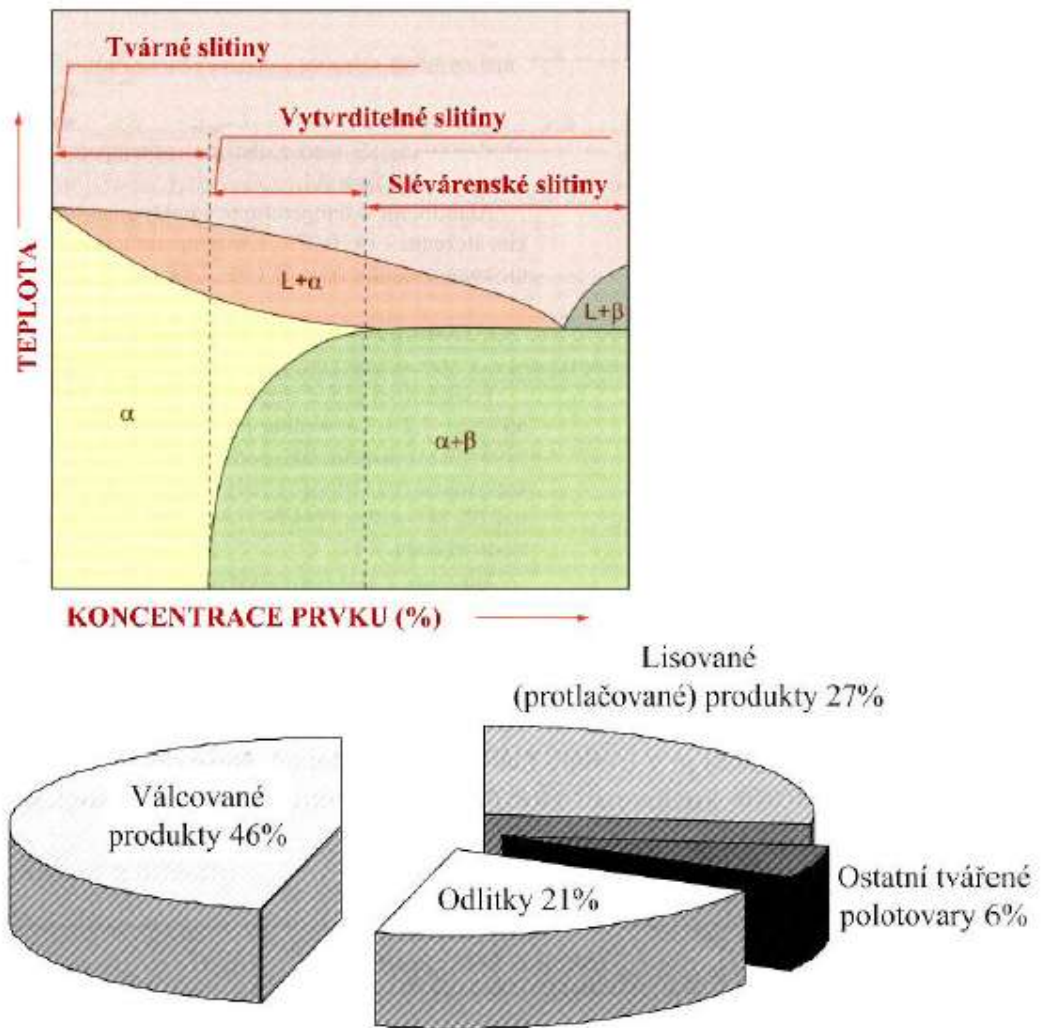
- řada 1000 - hliník minimálně 99.00% a více,
- řada 2000 - slitina Al-Cu (nejznámější AlCu4Mg1 dural),
- řada 3000 - slitina Al-Mn,
- řada 4000 - slitina Al-Si,
- řada 5000 - slitina Al-Mg,
- řada 6000 - slitina Al-Mg-Si,
- řada 7000 - slitina Al-Zn,
- řada 8000 - slitina Al s různými prvky.

Podle hlavních přísad:

- siluminy (Al-Si),
- duralaluminium (Al-Cu),
- hydronalium (Al-Mg).

Podle tepelného zpracování:

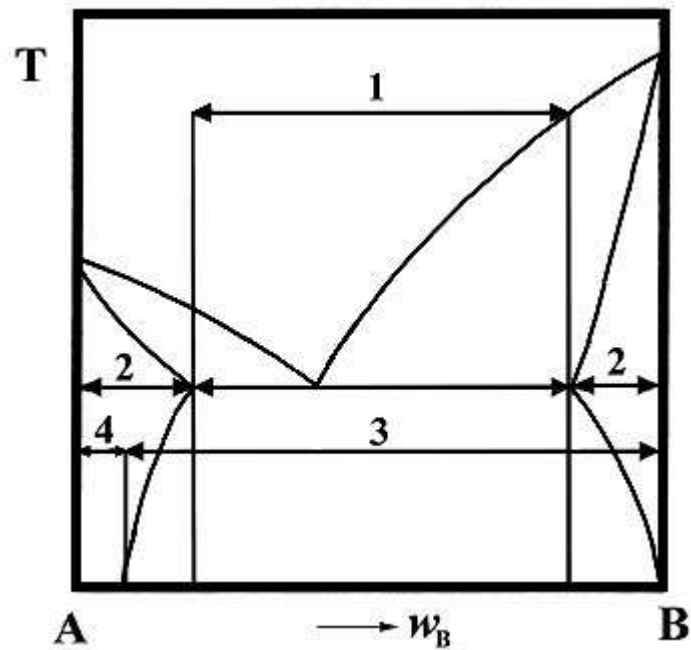
- vytvrditelné,
- nevytvrditelné.



Obr. 1. Podíl jednotlivých technologií na spotřebě hliníku v Evropě

1.3 Tepelné zpracování hliníkových slitin

Slitiny hliníku můžeme rozdělit podle fázového diagramu na slitiny slévárenské a na slitiny tvářené (obr. 2). U tvářených slitin převažuje ve struktuře primární tuhý roztok hliníku, u slévárenských slitin ve struktuře převažuje eutektikum.



Obr. 2. Rozdělení hliníkových slitin

- 1 slévárenské slitiny
- 2 slitiny určené k tváření
- 3 precipitačně vytvrditelné slitiny
- 4 precipitačně nevytvrditelné slitiny

Tvářené i slévárenské slitiny mohou být z hlediska dalšího tepelného zpracování vytvrditelné nebo nevytvrditelné. Podmínkami vytvrditelnosti slitin je dostatečná rozpustnost přísady v hliníku v tuhém stavu a klesající rozpustnost přísady v tuhém hliníku s klesající teplotou.[8]

Tvářené slitiny nevytvrditelné

- nelze vytvrzovat tepelným zpracováním
- jejich pevnost je způsobena substitučním zpevněním tuhého roztoku, dalšího zpevnění dosáhneme tvářením za studena
- nejvýznamnějšími zástupci jsou Al-Mn, Al-Mg

Tvářené slitiny vytvrditelné

- lze vytvrzovat tepelným zpracováním, což vede ke zvýšení pevnosti a tvrdosti
- nejvýznamnějšími zástupci jsou Al-Cu, Al-Cu-Mg, Al-Zn-Mg, Al-Li

1.3.1 Postup tepelného zpracování

Účelem tepelného zpracování je získat určitý nerovnovážený stav struktury, který zajišťuje požadované vlastnosti výrobku.

Skládá se z:

- a) rozpouštěcího žíhání
- b) rychlého ochlazení
- c) vytvrzování (stárnutí)

Rozpouštěcí žíhání

Tímto pojmem rozumíme ohřev a dostatečnou výdrž na takové teplotě, při které dojde k maximálnímu převedení přísady do tuhého roztoku hliníku. Při volbě teploty rozpouštěcího žíhání se vychází z fázového diagramu slitiny a z přesnosti regulace teploty v peci. Při homogenizačním ohřevu nesmí dojít k překročení teploty solidu, aby nedošlo k natavení hranic zrn slitiny. V takovém případě dochází k degradaci mechanických vlastností materiálu.

Rychlé ochlazení

Provádí se nejčastěji do vody. Cílem je vznik přesyceného tuhého roztoku při teplotě okolí, u kterého je obsah rozpuštěné příměsi vyšší než odpovídá její rovnovážné rozpustnosti při dané teplotě. Veškerá manipulace se slitinou se musí provádět co nejrychleji, aby nedocházelo k částečnému rozpadu tuhého roztoku hliníku. U masivnějších součástí, kde hrozí nebezpečí deformací, se používají jiná, méně razantnější ochlazovací média.

Vytvrzování (stárnutí)

Přesycený tuhý roztok je termodynamicky nestabilní, dochází k jeho rozpadu. U některých slitin dochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku již při teplotě okolí - pochod označujeme jako přirozené stárnutí. Při umělém stárnutí se proces urychlí ohřevem. Obecně je rozpad přesyceného tuhého roztoku difúzní proces, který začíná nukleací a vznikem koherentních precipitátů tzv. Guinierových-Prestonových zón. Výsledkem je pnutí v mřížce hliníku v okolí zón, které je překážkou pro pohyb dislokací, s čímž je spojený vytvrzovací efekt. Tyto zóny postupně rostou a ztrácejí koherenci. Proces končí vznikem nekoherentního rovnovážného precipitátu. Vznik rovnovážného precipitátu je spojen s poklesem tvrdosti. Při delší výdrži na teplotě stárnutí dochází k nežádoucímu hrubnutí rovnovážného precipitátu, klesá tvrdost. Toto stádium označujeme jako přestárnutí.[8]

1.4 Tepelné zpracování slitin Al-Mg-Si

Tepelné zpracování u slitin Al

- Většina odlitků slitin Al se tepelně nezpracovává
- Nejčastěji u pískových a kokilových odlitků
- Tlakové odlitky v litém stavu

1.4.1 Důvody Tepelného zpracování u slitin Al

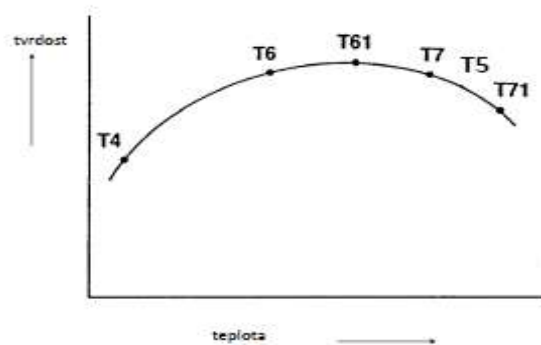
- Zvýšení hodnot mechanických vlastností
- Snížení vnitřních pnutí
- Stabilizace rozměrů
- Ovlivnění způsobu rozložení prvků ve struktuře
- Zlepšení obrobiteľnosti
- Změna jiných technologických vlastností či odolnosti proti korozi

1.4.2 Stavy tepelného zpracování slitin Al-Mg-Si

- F** litý stav
- 0** žihání na odstranění vnitřního pnutí nebo stabilizační žihání
- T4** rozpouštěcí žihání + vytvrzení za studena
- T5** umělé stárnutí bez homogenizačního žihání, stabilizace tvaru a rozměrů (zlepšení obrobiteľnosti, odstranění vnitřního pnutí) 205°C – 260°C / 7 – 10 hod.
- T6** komplexní tepelné zpracování, rozpouštěcí žihání (520°C – 540°C / 3 – 6 hod), rychlé ochlazení, precipitační vytvrzování za tepla (145°C – 160°C / 3 – 5 hod)
- T7** s přestárnutím
- T61** na maximální pevnost a tvrdost
- T64** na maximální houževnatost
- T66** na specifickou pevnost, tvrdost a houževnatost
- T71** Přestárnutí do stabilizovaného stavu [3]

1.4.3 Přehled specifických vlastností jednotlivých značení hliníkových slitin

| | Mez pevnosti Rm [MPa] | Mez kluzu Rp [Mpa] |
|------------|-----------------------|--------------------|
| T4 | min 120 | min 60 |
| T64 | min 180 | min 120 |
| T66 | min 215 | min 160 |

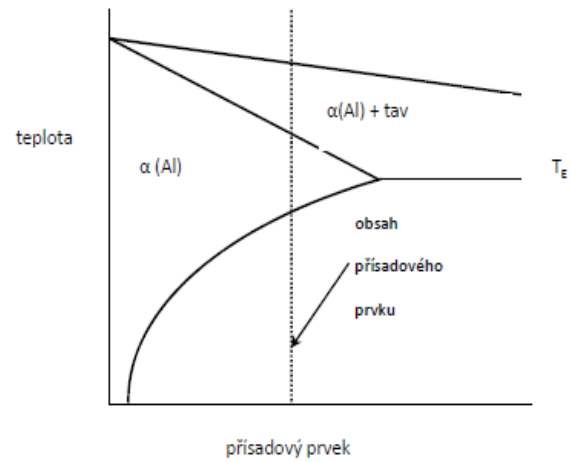


Obr. 3. Graf závislosti tvrdosti jednotlivých materiálů na teplotě

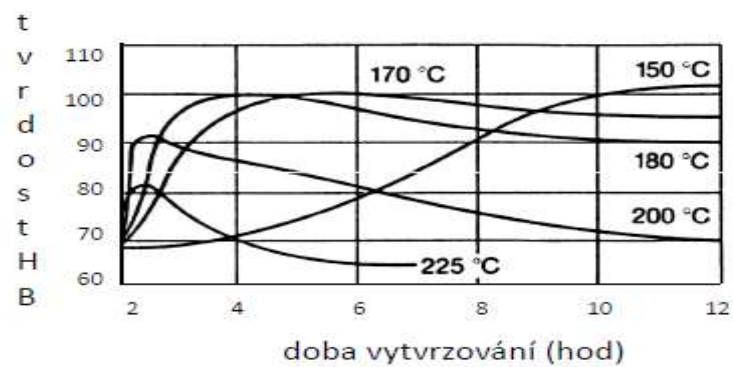
1.4.4 Vytvrzování

Podmínky vytvrzování

- Přítomnost přísady (Cu, Mg, Ni, Zn)
→ fáze CuAl_2 , Mg_2Si , Ni_3Al , MgZn_2
- Obsah přísady (dle křivky solvu)
- Rozpustnost přísady



Obr. 4. Podmínky vytvrzování

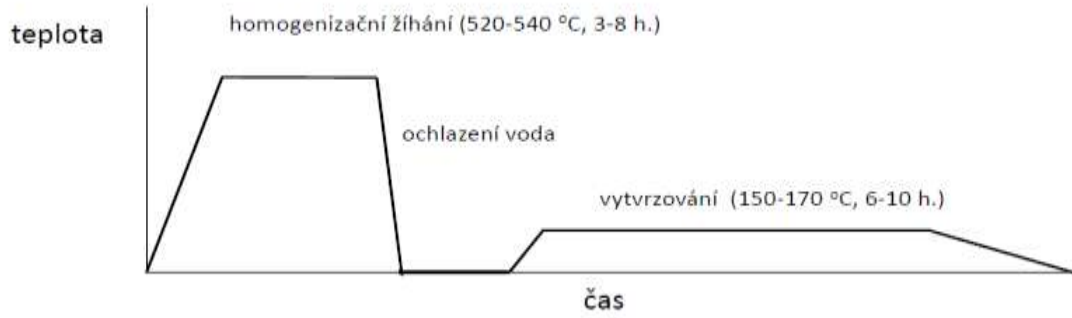


Obr. 5. Vytvrzování

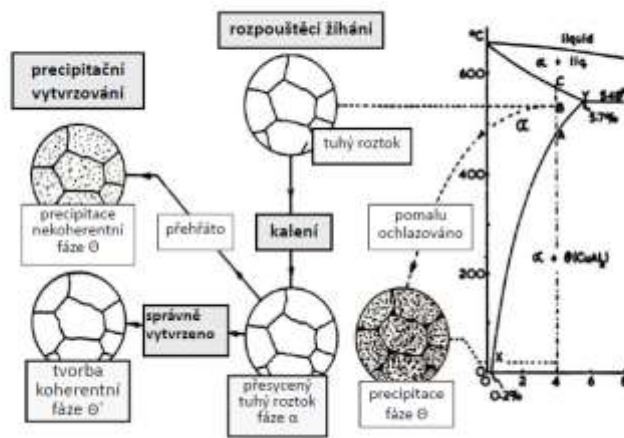
Účel vytvrzování

- **Zvýšení**
 - Tvrdosti
 - Meze kluzu
 - Meze pevnosti
- **Snížení**
 - Tažnosti

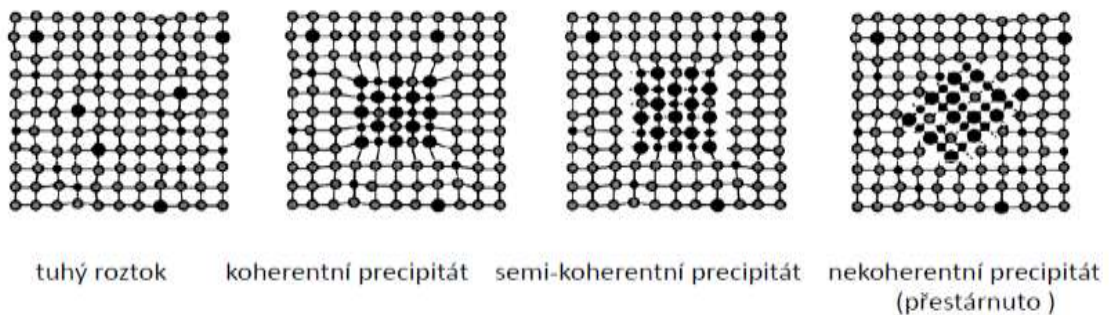
Průběh vytvrzování (T6) – příklad



Obr. 6. Průběh vytvrzování



Obr. 7. Struktura materiálu v určitých fázích tepelného zušlechťování



Obr. 8. Vyloučení precipitačních fází [3]

1.4.5 Využití slitin hliníku v praxi

- strojírenství (odlitky, konstrukční součástky, různé profily, atd.)
- automobilový průmysl (části motorů, profily pro výplně dveří, pouzdra tlumičů, atd.)
- letecký průmysl (používají se slitiny na bázi Al-Li)
- potravinářský průmysl (obalová technika - alobal)
- elektrotechnika (kabely, dráty)
- stavebnictví (fasádní profily, profily pro výrobu dveří a oken, atd.)

1.5 Ohybová tuhost v lineární elastické oblasti

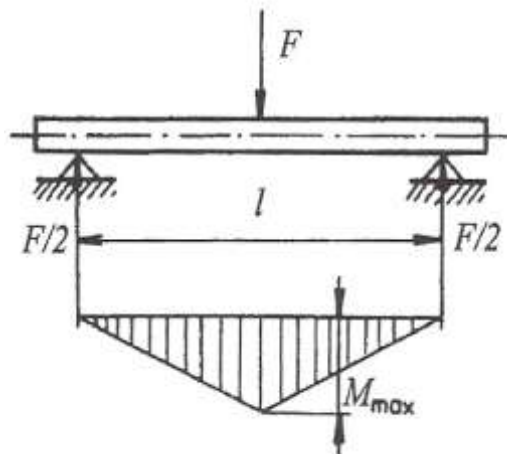
Ohybová tuhost materiálu je matematicky definována jako součin EJ , kde E je modul pružnosti a J je kvadratický moment plochy průřezu k neutrální ose průřezu. Tato ohybová tuhost může být ovlivněna materiálem výrobku, tj. E a průřezovou geometrií součásti tj. J

[6]

1.5.1 Zkouška ohybem

Při zkoušce se zkušební tyč obdélníkového nebo kruhového průřezu položí na dvě opory (zpravidla válečky). Zkušební stroj pracuje v režimu tlakového zatěžování. Horní část přípravku pro ohybovou zkoušku tvoří jeden trn, který působí silou uprostřed zkušební tyče (zkouška tříbodovým ohybem) nebo dva trny umístěné symetricky vzhledem ke středu tyče

(zkouška čtyřbodovým ohybem). Účelem zkoušky je získat závislost síla – průhyb tyče. Průhyb se měří snímačem přemístění středu tyče vzhledem k nejbližším oporám. Při průhybu není napětí v průřezu zkušební tyče konstantní, ale mění se. Na povrchu vzorku proti zatěžovacímu trnu působí maximální tahové napětí. Směrem ke středu tyče napětí klesá na nulovou hodnotu a dále nabývá záporných hodnot.



Obr. 9. Schéma zkoušky třibodovým ohybem

kde $M_{O_{MAX}}$ je maximální ohybový moment:

- v případě třibodového ohybu

$$M_{O_{MAX}} = F \cdot \frac{l}{4} \text{ N} \cdot \text{mm}$$

1.5.2 Modul pružnosti

K nejčastěji používanému parametru popisujícímu mechanické chování těles patří modul pružnosti. Zjišťuje se na základě statických testů, jako poměr mezi mechanickým napětím a poměrnou (relativní) deformací. Nebo na základě měření oscilací těles.

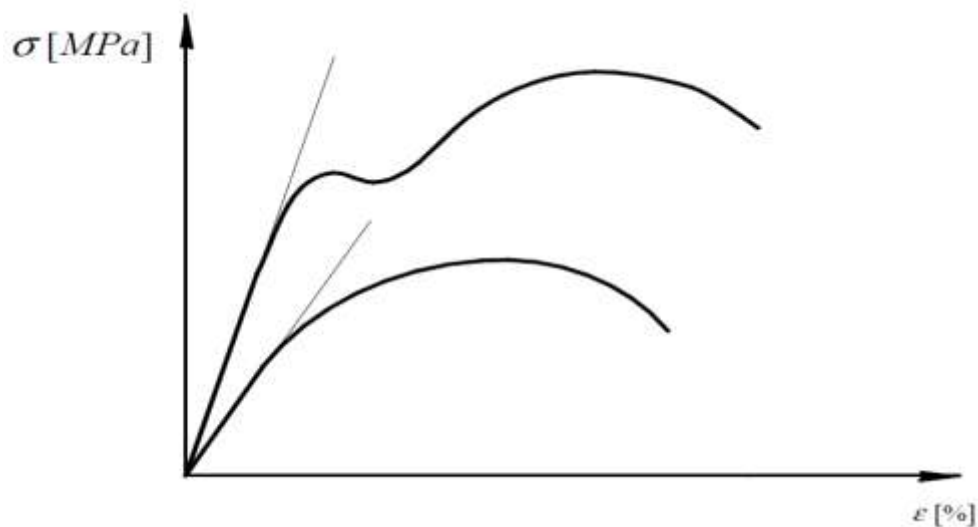
Modul pružnosti je dán jako poměr působícího namáhání σ k poměrné deformaci ε , které toto namáhání vyvolává tj. $E = \sigma / \varepsilon$. Modul pružnosti popisuje tuhost materiálu. A to tak, že čím větší je modul pružnosti, tím tužší je materiál. Youngův modul pružnosti v tahu E je definován jako směrnice tečny záznamu jednoosé tahové, resp. ohybové zkoušky v počátku souřadnicového systému a v praxi se hodnota modulu pružnosti E právě stanovuje jako hodnota směrnice tečny (1).[1]

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad \text{a} \quad \sigma = k \cdot \varepsilon \Rightarrow k = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad \text{pak} \quad \sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (1)$$



Obr. 10. Prostý (čistý) tah

Tah označuje v mechanice napětí, které způsobuje deformaci tělesa (opak tlaku). Tahová síla způsobuje roztahování tělesa, zatímco tlaková síla způsobuje jeho stlačování. Prostý (čistý) tah vzniká působením normálové síly působící na povrch tělesa.



Obr. 11. Obecný tvar závislosti funkce $\sigma(\varepsilon)$

1.5.3 Hookův zákon

Jde o zákon, kdy deformace tělesa je úměrná jeho namáhání. Velikost namáhání je v oblasti malých deformací tělesa a platí jen pro takové namáhání (deformace), kdy po skončení namáhání dojde k vrácení tělesa do původního stavu (rozměru). Jde o tzv. pružnou deformaci. Linearita je typická pro krystalické látky, pokud namáhání nepřekročí mez, kdy do-

jde k posunu mezi krystalickými rovinami nebo k posunu mezi oblastmi ve struktuře látky. Hookeův zákon platí v jistém rozmezí namáhání i pro amorfni látky a tělesa viskoelastická. [2]

Pro malé síly působící na těleso byl experimentálně určen vztah mezi deformací a působící silou. Tento vztah se nazývá Hookův zákon a říká, že deformace je úměrná napětí materiálu. Formální přepis do matematické podoby má tvar (2)

$$\Delta l = konst \cdot F \quad (2)$$

kde F je vnější síla která působí na těleso, Δl je prodloužení (zkrácení) tělesa. Konstanta úměrnosti je závislá nejen na vlastnostech materiálu, ale také na tvaru tělesa.

Podobně lze dojít k závěru, že působením síly F na dvě tyče vedle sebe (tzn. Výsledná plocha, kterou síla F působí je součtem ploch obou tyčí S) je prodloužení Δl pouze poloviční. Konstanta úměrnosti je tedy nepřímo úměrná ploše, na kterou síla působí. [14]

Předchozí vztah lze tedy přepsat do tvaru (3)

$$\Delta l = k \cdot \frac{l}{S} F, \quad (3)$$

kde k je nová konstanta, která závisí pouze na vlastnostech materiálu tělesa.

Dělením prodloužení Δl původní délkou l získáme informaci o deformaci, která není závislá na délce tyče (obr. 11). Toto bezrozměrné číslo se označuje ε a nazývá se **poměrné (relativní) prodloužení:** (4)

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (4)$$

Podíl působící síly F a průřezu tyče S představuje napětí . (5)

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (5)$$

V případě tahového a tlakového působení je síla kolmá na průřez, takové napětí se nazývá normálové napětí.[14]

Z předchozích vztahů lze získat Hookův zákon pro tah (6)

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad (6)$$

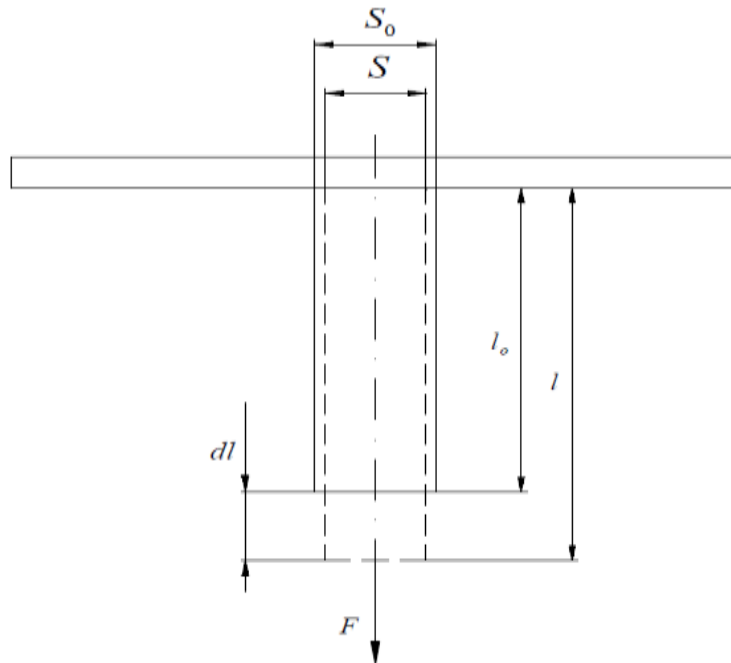
kde E je **modul pružnosti v tahu** neboli **Youngův modul**. Modul pružnosti závisí již pouze na vlastnostech materiálu tělesa, a nikoli na jeho rozměrech. Modul pružnosti je závislý na teplotě - s rostoucí teplotou klesá.

Hookův zákon pro tah bývá obvykle vyjadřován slovně jako ve tvaru

Napětí je úměrné poměrnému prodloužení.

Význam:

Hookův zákon má velký význam v technice, neboť se podle něj (při malém zatížení) řídí většina důležitých materiálů (např. ocel). Některé materiály (např. beton, litina) však vykazují určité odchylky od linearity. Tyto materiály se také mohou chovat jinak při namáhání tahem a tlakem.[14]



Obr. 12. Namáhání tělesa tahem

l_0 – původní délka, l – délka po prodloužení, dl – prodloužení, S_0 – původní průřez, S – průřez po zatížení, F – zatěžující síla

- Pro poměrné prodloužení platí:

$$\varepsilon = \frac{dl}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} [\text{mm}]$$

- příčné poměrné zúžení Z platí:

$$Z = \frac{\Delta S}{S} \cdot 100 = \frac{S - S_0}{S_0} \cdot 100, [\%]$$

- Tažnost material A je dána vztahem:

$$A = \frac{l_u - l_0}{l_0} \cdot 100, [\%] \quad [6]$$

2 TEORIE TVÁŘENÍ

Tváření je technologický proces, při kterém se mění tvar výchozího materiálu působením síly bez odběru třísek.

Nauka o tváření kovu analyzuje a rozpracovává všeobecné zásady teorie a technologie tváření kovu, pomocí které se nevyrábí jen polovýrobky, ale i hotové součástky s přesností, která se mnohdy vyrovná přesnosti dosažené jiným procesem strojírenské technologie. Při výrobě součástek tvářením přitom nastávají kvalitativní změny v kovech.

2.1 Historie tváření

Nejstarším způsobem mechanického zpracování kovů, používaným od doby bronzové v celém dalším období vývoje společnosti je tváření, využívající až do nedávna výhradně účinku rázu na ohřátý materiál. Využití rázu umožnilo vyrábět z kovů složité předměty těmi nejjednoduššími prostředky, pouze s využitím lidské síly, ohně a jednoduchých nástrojů. Kovářství bylo na vysoké úrovni již v dobách, kdy ještě nebyly známy ani nejjednodušší zákony dynamiky tuhého tělesa, tím méně pak dynamika těles neformovatelných.

Teorie tváření popisuje matematický průběh tvářecího procesu. Vychází tedy z obecných zákonů teorie plasticity, které aplikuje na konkrétní tvářecí procesy.

2.1.1 Rozdělení tváření

- a) Tváření za studena – při tváření za studena nedochází k uzdravení vznikajících poruch krystalické mřížky
- b) Tváření za tepla – při tváření za tepla je uzdravení vznikajících poruch krystalické mřížky úplné

Tváření za tepla – při tváření za tepla je uzdravení vznikajících poruch krystalické mřížky úplné

- a) Tváření plošné – zde řadíme tváření plechů a trubek
- b) Tváření objemové – zde řadíme tváření polotovarů větší tloušťky

Tváření objemové rozdělujeme dle charakteru působení nástrojů na:

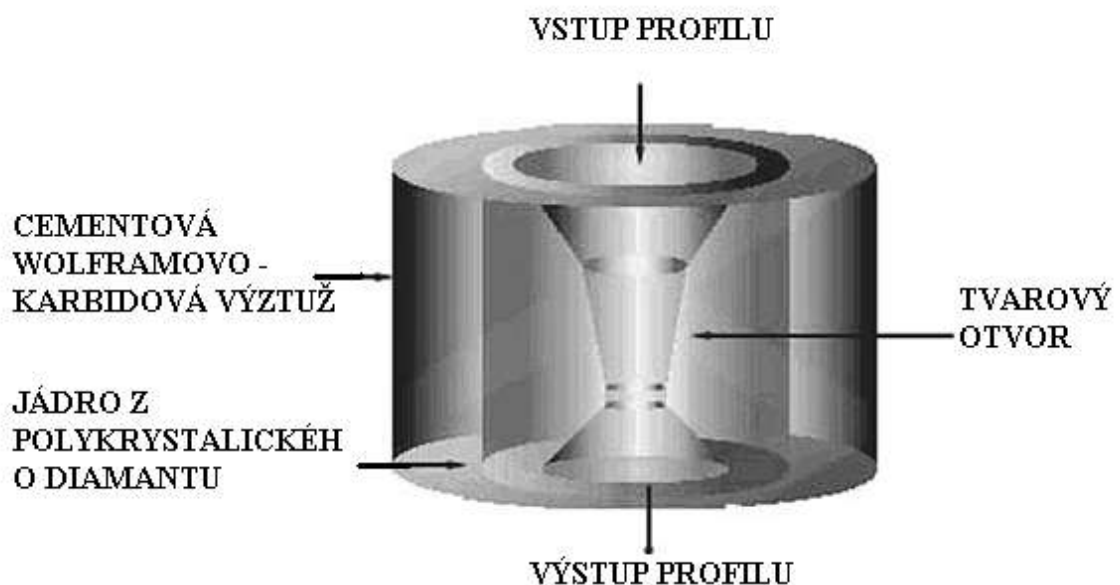
- a) Kování
- b) Protlačování
- c) Válcování
- d) Tažení
- e) Ražení
- f) Kalibrování

2.2 Teorie tažení

Tažení je protahování polotovaru otvorem průvlaku, při kterém se zmenšuje příčný průřez a zvětšuje délka. Dosahuje se přesných rozměrů a tvarů, zlepšuje se jakost povrchu a mechanické vlastnosti. Nástroj je nepohyblivý. Pokud je vyčerpána plasticita, musí se provést mezioperační žíhání.

2.2.1 Tažení drátů a profilů

Nejdůležitější podmínkou pro tažení drátu, trubek a profilu je snížení vnitřního pnutí pomocí mazání. Mazivo musí snižovat součinitel tření, oddělovat polotovar a průvlak, odvádět teplo a zajišťovat hladký povrch. Jako výchozí polotovar se používají např. tyče válcované za tepla. Následně se očistí od okují, na jednom konci zašpičatí a za takto upravený konec se chytne polotovar kleštěmi a následuje proces tažení.

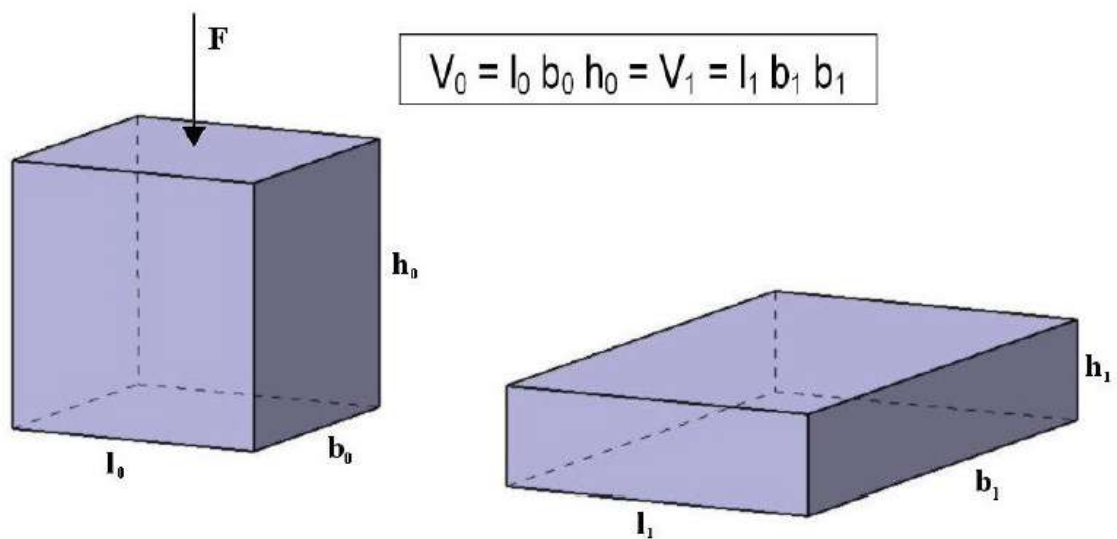


Obr. 13. Schéma průvlaku

Tažení se používá pro výrobu drátu, tyčí a nepravidelných tvarů a průřezu. Táhnout se dají plná i dutá tělesa. Dráty mohou být taženy za sucha nebo za mokra s povrchovou (pozinkování, pocínování, atd.) nebo bez povrchové úpravy.

2.2.2 Proces tažení a silové poměry

Tvářecí proces tažení drátů a profilů se provádí za studena a to ve více stupních. Možné přetvoření je omezeno pevností daného materiálu. Sám název výstižně upozorňuje na to, že při této operaci se materiál prodlouží ve směru tažení a tedy - má-li být zachován jeho objem - zmenší se průřez (obr. 13). Redukci průřezu napomáhá radiální tlak vznikající v kuželové části průvlaku. Tahové a tlakové síly vykonávají potřebnou deformační práci (tj. mění rozměry), třecí síly působí proti směru tažení a ohřívají materiál.



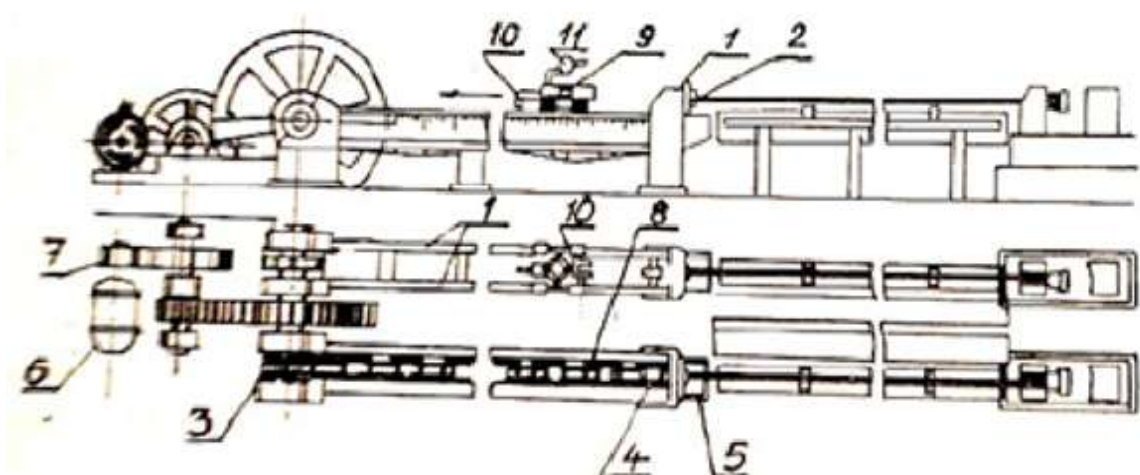
Obr. 14. Zákon zachování objemu

Z hlediska stavu napjatosti vzniká v pásmu deformace při tažení drátu kruhového průřezu stav prostorové napjatosti tah, tlak, tlak. Deformací je zde vlastně změna z původního průřezu na vstupu S_0 na průřez na výstupu S_1 a platí, že $e = \log(S_0/S_1)$. Přetvoření drátu není v celém průřezu homogenní - prodloužení je v ose větší, než u okrajů. Správně zvolená tažná síla umožňuje optimální využití tažných stolic vyloučením nebezpečnosti porušení vstupního materiálu. Na tažnou sílu mají vliv tyto činitelé:

- Mechanické vlastnosti taženého materiálu (chemické složení, struktura, atd.),
- úběr (tažná síla roste se zvětšujícím se úběrem),
- tvar výrobku (se zvětšujícím se obvodem se zvětšuje tažná síla),
- tvar průvlaku (malý tažný úhel zvětšuje třecí síly, ale zlepšuje mazání),
- tváření mazání (čím je tvrdší materiál průvlaku, tím menší je součinitel tření),
- rychlost tažení (malá rychlost tažení, zvýšení teploty, zvýšení tažné síly).

2.2.3 Stroje pro tažení

Stroje k tažení jsou tažné stolice, které se používají k tažení drátů, profilů a tyčí. Dělí se na stolice s přímočarým pohybem (řetězové nebo hřebenové), kde je rám, po němž se pohybuje tažný vozík s klešťovým zařízením a tažnými čelistmi a unašečem. (obr. 14.) Tažná rychlost je od 30 do 150 m/min a délka kolem max. 60 m. Jsou vybaveny mazacím tlakovým zařízením, které provádí mazání během tažení. Druhé stolice jsou stolice s navíjením taženého materiálu (jednoprůchodové nebo víceprůchodové) a podle výrobního způsobu se dělí na bezskluzové a skluzové. U bezskluzového způsobu je na tažném bubnu několik závitů drátu, což znemožňuje prokluzování. U skluzové stolice je nutné odvádět vzniklé teplo.



Popis: 1-upínací hlava průvlaku, 2-nosník tvořící stolici, 3-převodové soukolí, 4-tažný řetěz, 5-tažný vozík, 6-převodové soukolí, 7-řetězovka (rozeta), 8-upínací (svěrací) kleště, 9-tažný zapínací hák

Obr. 15. Tažná stolice

2.2.4 Nástroje pro tažení

Nástrojem u tažení jsou *průvlaky*, kalibry, které se nepohybují a jsou značně namáhané na otěr. Průvlaky z ocelí mají životnost zhruba 2000 kg drátu, z tvrdokovu zhruba 200krát větší, diamantové tažnice jsou téměř nezničitelné. Jakost průvlaku má vliv na jakost povrchu konečného produktu. Tvar průvlaku je ukázán na obrázku (*obr. 12.*). Průvlak sestává z většího počtu kuželů o různých vrcholových úhlech. Jejich funkce - (shora) - je následující: *vstupní kužel* (zaváděcí) – úhel otevření 45 až 60°, *mazací* – úhel stejný, *tažný* – tažný kužel s úhlem 10 až 12°, *kalibrační* a *výstupní*. Funkce jednotlivých částí průvlaku je dána jejich názvem. Mazací část umožňuje pravidelné rozestření maziva okolo polotovaru. Kalibrační část bývá válcová a zajišťuje hladký povrch. Výstupní část umožňuje odpružení deformovaného průřezu a výstup bez pasivních odporů, brání poškození průvlaku. Průvlaky se vyrábějí buď jednodílné, nebo skládané. Jako mazivo se používá emulzí, fosfátu, boraxu, mýdlového prášku, apod.[7]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

V teoretické části byla vypracována studie tepelného zpracování slitin hliníku. Obecněji jsou zde popsány důvody tepelného zpracování, a co toto tepelné zpracování přináší za užitky. Dále je zde popsáno, jak je toto tepelné zpracování prospěšné pro technologický proces výroby.

V praktické části byly řešeny tyto problémy:

- 1) Příprava hliníkového profilu (řezání na zkušební vzorky)
- 2) Tepelná úprava čtyř kombinací vzorků
- 3) Zkoušky tahem a vyhodnocení

Cílem této bakalářské práce bylo určit vhodnost změny technologického procesu při ohýbání hliníkových profilů.

3.1 Problematika ohýbání hliníkových profilů

Zkoumaný hliníkový profil vykazuje při současném způsobu výroby nedostatky. Ty se týkají deformací po ohybu do konečného stavu. Následující podkapitola popisuje současný postup výroby a následně návrh změny, která by měla deformacím zabránit.

3.1.1 Současný způsob výroby

- 1) Výroba profilu pro zhotovení dveřních systémů vytlačováním do stavu „F“
- 2) Tepelné zpracování daného profilu do stavu T64
- 3) Ohyb do konečného stavu a z toho pramenící deformace a tolerance této deformace (obr. 16.)
- 4) Následné srovnání vzniklých deformací dle požadovaných tolerancí.

Tepelné zpracování, respektive pořadí provedení tepelného zpracování je důvod tvorby této bakalářské práce. Nyní se profil Al MgSi vyrábí tak, že se vytlačí ve stavu „F“, což je stav, kdy se meze mechanických vlastností nespécifikují. Dále se takto vytlačený profil tepelně zpracovává, aby se dostal do stavu, který vyžaduje zákazník. V našem případě je to stav T64 (tab. 1). Odborně se tomuto tepelnému zpracování říká umělé stárnutí. Každý profil, který se takto z výroby dostane k zákazníkovi, má za sebou tuto tzv. historii stárnutí.

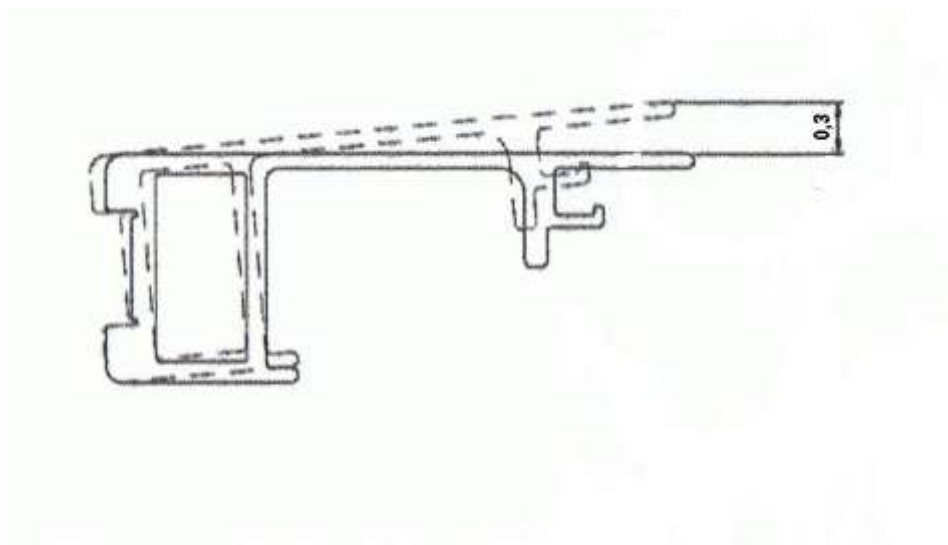
Což je přesně definovaný proces, kdy se materiál za předem jasně nastavených podmínek tepelných i časových nechá odležet.

Stárnutí se rozděluje na

- a) Umělé – v peci
- b) Přírozené – na vzduchu

Tímto je vytlačený profil ve stavu „F“. Nyní se profil tepelně zpracuje na stav „T64“, tím se získají mechanické vlastnosti potřebné pro výrobce vlakových souprav. V tomto stavu musí výrobce dveřních systémů tyto profily odevzdat jako hotové výrobky. Jenže ve stavu „T64“ jsou profily tvrdé. Tyto profily se ohýbají přesně do takového tvaru, aby odpovídaly profilu dveří. Při ohýbání se tudíž deformují. Proto navrhované řešení spočívá v tom, že se profil od výrobce odebere ve stavu „T4“, (tab. 1). V tomto stavu se profil ohne do požadovaného tvaru a následně se tepelně zpracuje na stav „T64“ (tab. 1). Nyní se zpracuje do dveřního systému a odevzdá zákazníkovi jako celek s požadovanými mechanickými vlastnostmi.

Mechanické vlastnosti se také liší podle přísad a chemického složení daných profilů Al MgSi (tab. 3), a to dle zákazníka, pro kterého se daný profil vyrábí. Dle EN AW-6060 pro evropský trh a dle EN AW-6061 pro ostatní světový trh.



Obr. 16. Profil – tolerance deformace po ohnutí

3.1.2 Návrh řešení daného problému

- 1) Výroba profilu pro zhotovení dveřních systémů vytlačováním do stavu „F“
- 2) Tepelné zpracování daného profilu do stavu „T4“ (tab. 1)
- 3) Ohnutí materiálu dle požadovaného tvaru
- 4) Tepelné zpracování ohnutého profilu do stavu „T64“, jímž by se dosáhlo požadovaných mechanických vlastností profilu. Toto tepelné zpracování probíhá ve dvou krocích. (tab. 4).
 - a. Homogenizační žíhání
 - b. Umělé stárnutí

3.2 Popis používaných stavů zpracovávaného profilu

Popis stavu profilů hliníkových slitin dle EN 515

Tab. 1 Popis stavů hliníkových slitin

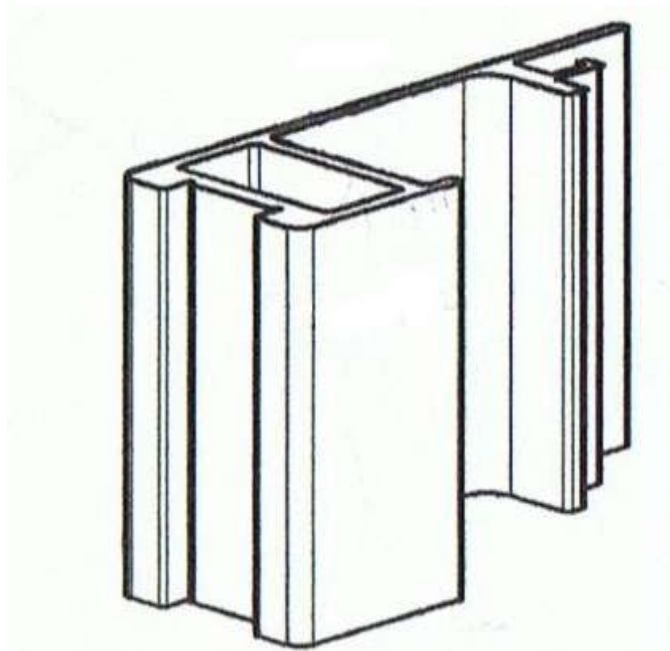
| Stav | Definice stavu |
|------|---|
| F | Stav z výroby (meze mechanických vlastností se nespecifikují). |
| T4 | Stav po rozpouštěcím žíhání a přirozeném stárnutí |
| T64 | Stav po rozpouštěcím žíhání a umělém stárnutí za podmínek nedostárnutí (mezi T6 a T61) k zlepšení tvárnosti |

Tab. 2 Rozdělení materiálů dle mechanických vlastností

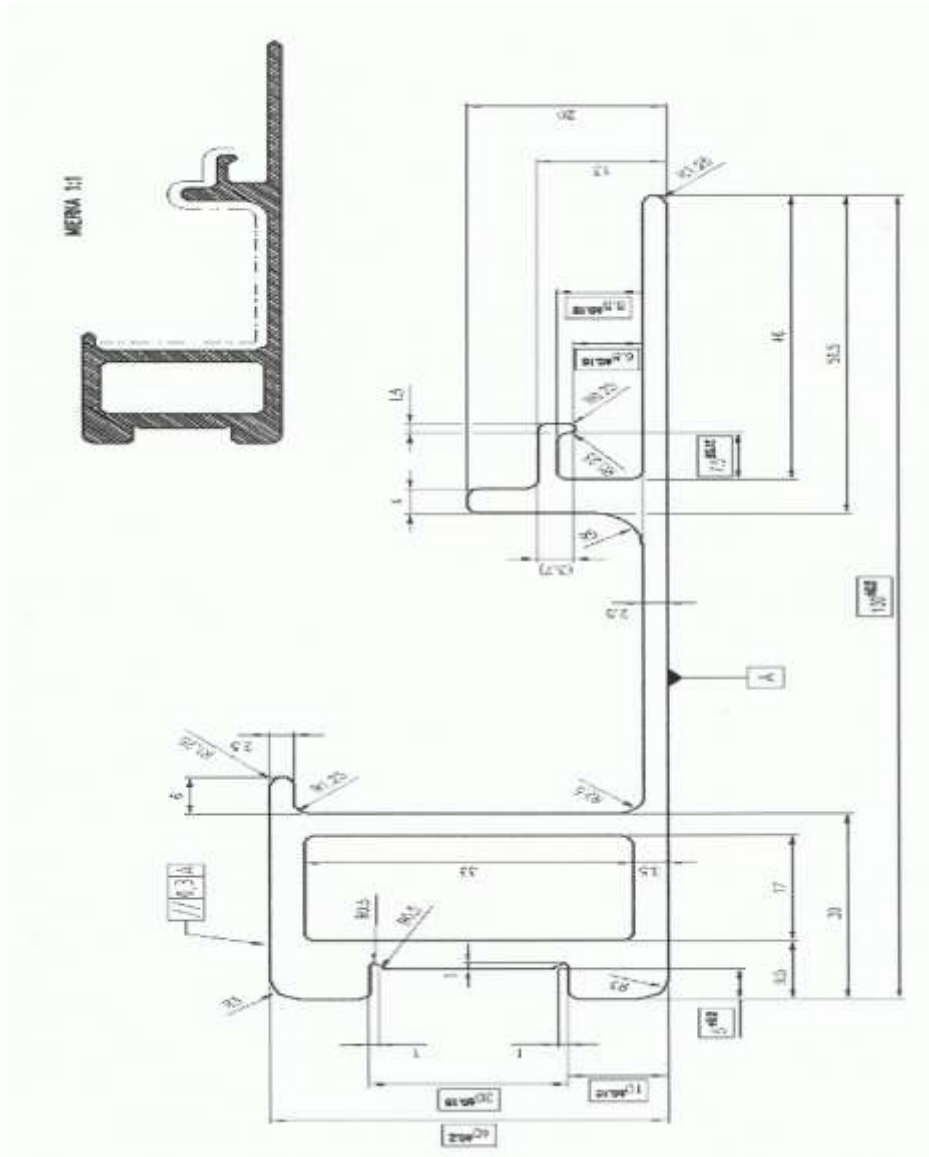
| Materiál EN AW - 6060 [Al MgSi] | | |
|---------------------------------|-----------------------|--------------------|
| Vytlačovaný profil | | |
| Stav materiálu | Mez pevnosti Rm [MPa] | Mez kluzu Rp [MPa] |
| T4 | min 120 | min 60 |
| T5 | min 160 | min 120 |
| T6 | min 190 | min 150 |
| T64 | min 180 | min 120 |

Tab. 3. Chemické značení slitin

| Označení dle slitin | Číselně | EN AW-6060(Evropa) | EN AW-6061(Svět) |
|---------------------|------------------|--------------------|------------------|
| | Chemické symboly | EN AW-Al MgSi | EN AW-Al Mg1SiCu |
| | Si | 0,30 - 0,60 | 0,40 - 0,80 |
| | Fe | 0,10 - 0,30 | 0,70 |
| | Cu | 0,10 | 0,15 - 0,40 |
| | Mn | 0,10 | 0,15 |
| | Mg | 0,35 – 0,60 | 0,80 – 1,20 |
| | Cr | 0,05 | 0,04 – 0,35 |
| | Ni | - | - |
| | Zn | 0,15 | 0,25 |
| | Ti | 0,10 | 0,15 |



Obr. 17. Model zkoumaného profilu



Obr. 18. Zkoumaný profil

3.3 Obráběný profil

Hliníkový profil, ze kterého se vyrábí rám dveřních systémů pro rychlovlaky (obr. 16 a obr. 17.) je vyráběn pod označením EN AW-6060 (tab. 3.) Jedná se tedy o hliníkový profil, který je dodáván pro evropský trh. Tento profil je chemického složení popsaného v tab. 3. Jedná se o profil, ze kterého byly vybrány problematická místa, jako jsou podélné plochy mezi příčnými žebry a tyto následně vyřezány pro účely zkoumání v této práci. Vyřezány byly vodním paprskem na stroji Mach 4 od společnosti Flow (obr. 18.)

4 PŘÍPRAVA ZKOUMANÉHO PROFILU

4.1 Příprava k tepelné úpravě

Profil, který byl použit k této práci, se nachází na obr. 16. a 17. Nejprve byly vybrány ve zkoumaném profilu oblasti, jež jsou při tvarování a ohýbání nejvíce namáhány na tah v podélném i příčném směru. Byly to plochy po celé délce profilu.

Tyto plochy bylo potřeba nejprve oddělit od profilu a to tak, aby nebyly tepelně ovlivněny. Proto nepřicházelo v úvahu např. řezání plazmou nebo řezným kotoučem. Jediné co opravdu přicházelo v úvahu, byla technologie „Řezání vodním paprskem“ na stroji Mach 4 od společnosti Flow. Obr. 18.



Obr. 19. Stroj na řezání vodním paprskem

4.2 Technologie Dynamic Waterjet RXD

Systémy pro řezání vodním paprskem série Mach 4 jsou vybaveny nejnovější technologií FlowDynamic Waterjet s větším úhlem řezu a možností 3D řezání. Revoluční technologie DynamicWaterjet XD umožňuje pohyb řezací hlavy (obr. 19.) v rozpětí až 60 stupňů pro řezání zkosených hran a trojrozměrných dílů. Tato nová technologie odstraňuje úkos a vyráběné díly mají minimální tolerance, dokonce při vyšších rychlostech, a to nejen u 2D, ale i u 3D dílů.



Obr. 20. Řezací hlava

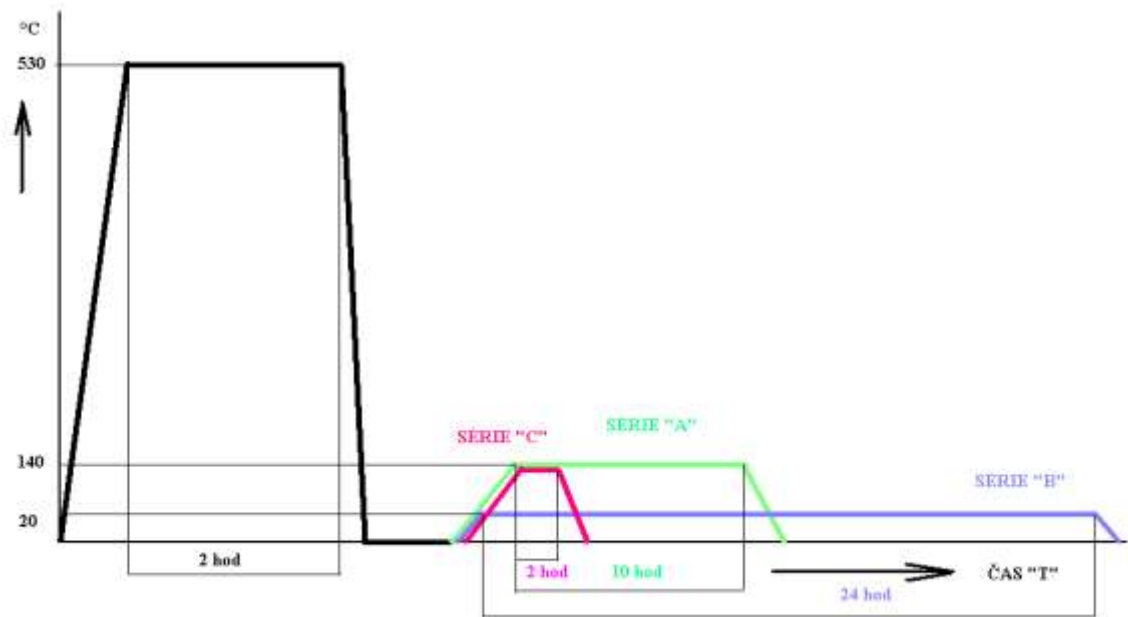
Takto oddělené oblasti – pásky, byly přichystány všechny na délku 150 mm dle přesně definovaných norem ČSN EN 10002-1 pro zkoušky tahem na zkušebním stroji ZWICK 1456 (obr. 22.). Šířka zkušebních vzorků byla 15 mm a tloušťka 2,5 mm. Oba tyto rozměry byly u každého zkušebního vzorku pečlivě změřeny a zaznamenány při trhací zkoušce do protokolu, ze kterého byly vyhodnoceny všechny výsledky.

4.3 Tepelná úprava

Pro dané téma, které bylo zaměřené na optimalizaci technologického procesu tepelného zpracování hliníkových profilů, byly zvoleny čtyři typy tepelného zpracování daného materiálu.

Tab. 4. Tepelné úpravy zkušebních vzorků

| | Žíhací teplota (°C) | Doba žihání (hod) | Zchlazení | Stárnutí- typ | Teplota stárnutí (°C) | Doba stárnutí (hod) |
|--------------|---|-------------------------|-----------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| SÉRIE „A“ | 530 | 2 | Do vody | Umělé – v peci | 140 | 10 |
| SÉRIE „B“ | 530 | 2 | Do vody | Přirozené – vzduch | 20 | 24 |
| SÉRIE „C“ | 530 | 2 | Do vody | Umělé – v peci | 140 | 2 |
| SÉRIE „D“ | Materiál bez tepelné úpravy – dodaný a použitý z výroby | | | | | |



Obr. 21. Graf tepelné úpravy zkušebních vzorků



Obr. 22. Žhací pec MIWY calor K

Tab. 5. Elektrická pec – technické údaje

| ELEKTRICKÁ ODPOROVÁ KOMOROVÁ PEC - MIWY calor K, model V 30 | |
|---|----------------|
| TECHNICKÉ ÚDAJE | |
| Maximální teplota | 1260 °C |
| Vnitřní výška/šířka/hloubka | 300x300x300 mm |
| Počet vytápěných stěn | 2 |
| Typ termočlánku | PtRh-Pt |

Takto tepelně zpracovaný materiál byl následně rozdělen na dvě skupiny (tah, ohyb). Každá z těchto dvou skupin byla zkoumána ve čtyřech sériích dle tepelné úpravy.

4.4 Zkouška mechanických vlastností

Při mechanických zkouškách daných vzorků, se zkoumalo chování materiálu při jeho zatížení vnějšími silami. Posuzovanými vlastnostmi, jež byly směrodatné pro tento typ prováděné práce:

- a) Mez pevnosti R_m [MPa]
- b) Mez kluzu R_p [MPa]

Z tahové zkoušky na univerzálním testovacím stroji Zwick 1456 bylo potřeba naměřit výše zmíněné meze pevnosti a kluzu pro potřebu porovnání s mechanickými vlastnostmi materiálu, který je používán nyní ve výrobě.

4.5 Charakteristika činnosti zkoušky tahem

Zkouška tahem (trhací) byla prováděna dle ČSN 42 0310. Trhací zkouškou byla zjištěna pevnost v tahu, poměrné prodloužení, tažnost a zúžení (kontrakce) zkoušeného materiálu.

4.6 Univerzální testovací stroj ZWICK 1456

Univerzální testovací stroj určený pro statické a dynamické (nizkokycklové) zkoušky: tah, tlak, ohyb, smyk.

Testují se: polymery (plasty a pryže), kompozitní mat., kovy a jejich slitiny.

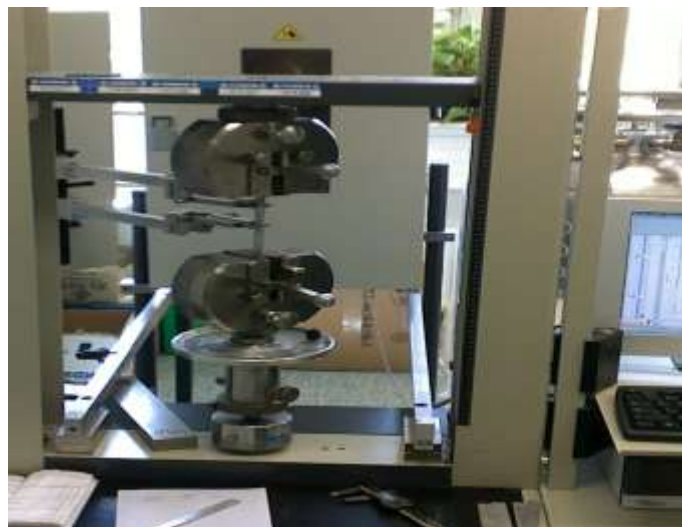
Teplotní rozsah zkoušek: -70°C až $+290^{\circ}\text{C}$

Snímače síly: 25 kN, 2.5 kN



Obr. 23. Testovací zkušební stroj

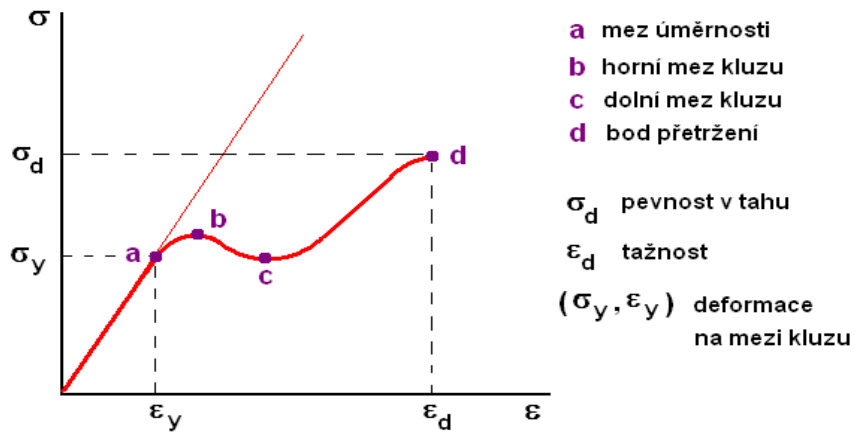
V průběhu zkoušky byla vykreslována křivka trhacího diagramu udávající závislost poměrného prodloužení ϵ na napětí σ (nebo změny délky l na zatěžující síle F).



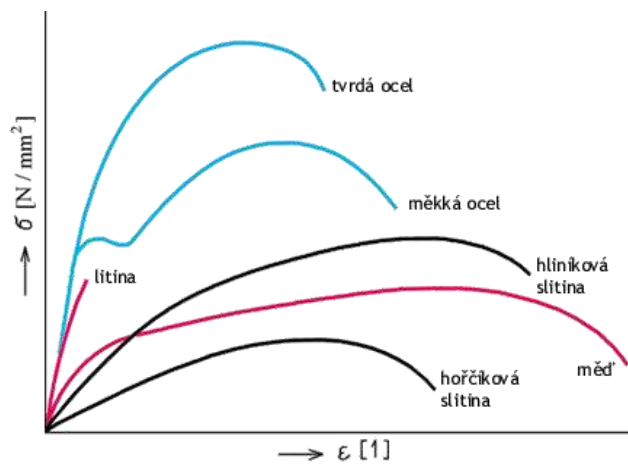
Obr. 24. Upnutí zkušební vzorky v čelistech



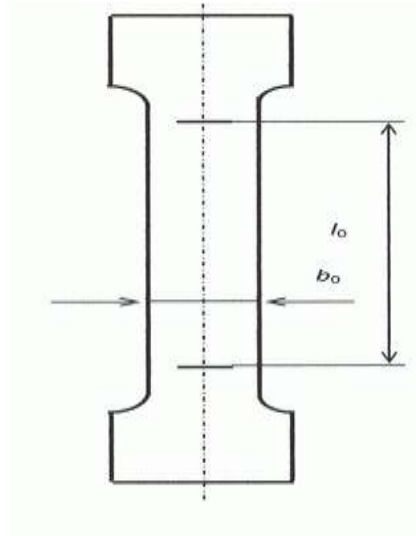
Obr. 25. Tahové zatížení tělesa



Obr. 26. Grafický diagram trhací zkoušky



Obr. 27. Grafy trhacích zkoušek dle materiálu

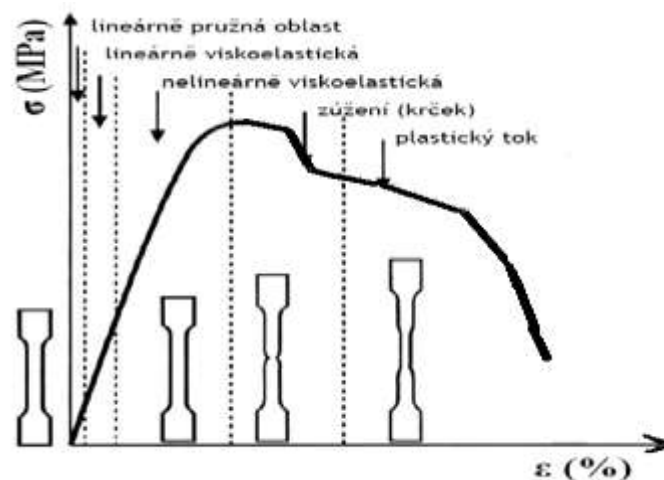


Obr. 28. Zkušební vzorek - plochá tyč

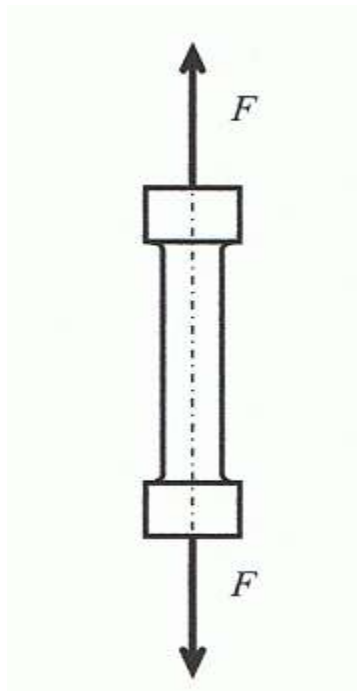
4.7 Zkouška pevnosti v tahu

Zkušebním vzorkem byla plochá tyč, jejíž rozměry byly voleny dle normy ČSN EN 10002-1 pro zkoušky tahem za okolní teploty.

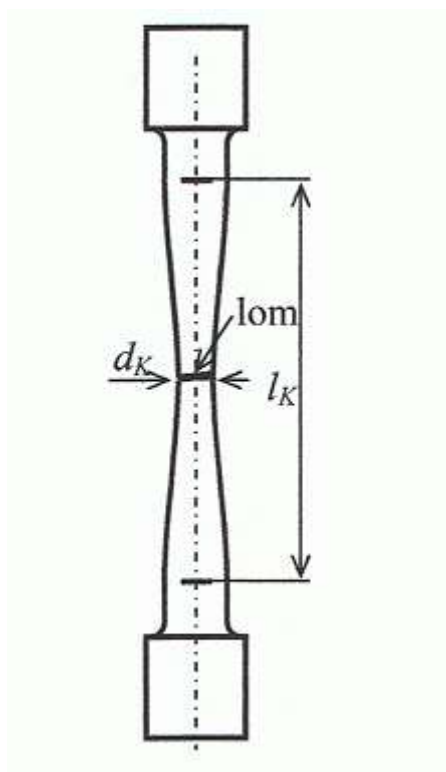
Tyče se upnuly mezi čelisti zkušebního, trhacího stroje. Zkušební vzorky byly zatíženy dvěma stejně velkými silami „ F “ (obr. 29.), působícími tahem v podélné ose vzorku. Zatěžující síla byla vyvozena mechanicky (pomocí šroubových tyčí a matic). Stroj byl vybaven ukazatelem zatěžující síly a zařízením pro grafický záznam síly a deformace. Tyto údaje byly zaznamenávány počítačově. Záznamové zařízení trhacího stroje vytvořilo diagram závislosti prostého prodloužení Δl zkušební tyče, vyjádřené vztahem $\sigma = \frac{F}{b_0 l_0} \cdot \epsilon$, kde l je délka měřené části tyče v daném okamžiku zkoušky, na zatěžující síle F .



Obr. 29. Deformační křivka



Obr. 30. Zkušební tyč – zatěžující síly



Obr. 31. Zkušební tyč – vytvoření krčku při trhací zkoušce

5 NAMĚŘENÁ DATA PŘI TAHOVÉ ZKOUŠCE

Výsledky měření Tahové zkoušky na univerzálním zkušebním stroji ZWICK 1456

Tab. 6. Výsledky tahových zkoušek série „A“

| Série | R _m | R _p | ε R _m | F |
|-------|-------------------|-------------------|------------------|------|
| „A“ | N/mm ² | N/mm ² | % | N |
| 1 | 171 | 124 | 9,94 | 6343 |
| 2 | 148 | 105 | 10,7 | 5463 |
| 3 | 151 | 86 | 15,9 | 5988 |
| 4 | 152 | 96 | 12,9 | 6280 |
| 5 | 153 | 115 | 12,3 | 6064 |
| 6 | 161 | 100 | 18,2 | 5876 |
| 7 | 155 | 104 | 17,1 | 5718 |
| 8 | 153 | 109 | 17,7 | 5841 |
| 9 | 146 | 110 | 14,9 | 5782 |
| 10 | 157 | 107 | 16,3 | 6196 |
| 11 | 157 | 108 | 17,2 | 5755 |
| 12 | 161 | 123 | 13,5 | 6209 |
| 13 | 157 | 104 | 15,5 | 6202 |

| Série | R _m | R _p | ε R _m | F |
|-------|-------------------|-------------------|------------------|------|
| „A“ | N/mm ² | N/mm ² | % | N |
| n=13 | | | | |
| x | 156 | 107 | 14,8 | 5978 |
| s | 6,43 | 10 | 2,69 | 263 |

Důležitá a směrodatná vlastnost, která byla zkoumána u tohoto materiálu byla Mez pevnosti R_m [MPa]

Byla vypočítána směrodatná odchylka výběru z měření série „A“ dle vzorce:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (10)$$

Kde s - odhad směrodatné odchylky

\bar{x} – odhad aritmetického průměru

n – počet měření

Směrodatná odchylka je míra rozptýlení hodnot od průměrné (střední) hodnoty.

Dle měření byl vypočítán aritmetický průměr pro sérii měření „A“

$$\bar{x} = 156,14$$

vycházející z naměřených hodnot meze pevnosti.

Pro danou sérii „A“ byla směrodatná odchylka $s = 6,43 \text{ [N/mm}^2\text{]}$

Tab. 7. Výsledky tahových zkoušek série „B“

| Série | Rm | Rp | ϵ Rm | F |
|-------|-------------------|-------------------|---------------|------|
| „B“ | N/mm ² | N/mm ² | % | N |
| 1 | 143 | 106 | 20,5 | 5275 |
| 2 | 144 | 104 | 20,2 | 5119 |
| 3 | 134 | 93 | 15 | 4888 |
| 4 | 131 | 91 | 18,5 | 5239 |
| 5 | 144 | 100 | 15,8 | 5000 |
| 6 | 141 | 97 | 17,2 | 5308 |
| 7 | 135 | 89 | 22,6 | 5028 |
| 8 | 132 | 93 | 12,8 | 5175 |
| 9 | 142 | 95 | 20,7 | 5048 |
| 10 | 139 | 107 | 25,8 | 5049 |
| 11 | 137 | 95 | 20,1 | 4928 |
| 12 | 142 | 92 | 15,7 | 5210 |
| 13 | 139 | 98 | 24,5 | 5112 |
| 14 | 142 | 95 | 20,1 | 5038 |
| 15 | 145 | 102 | 15,8 | 4956 |

| Série „B“ | Rm | Rp | ϵ Rm | F |
|-----------|-------------------|-------------------|---------------|------|
| n=15 | N/mm ² | N/mm ² | % | N |
| \bar{x} | 139 | 97 | 19 | 5092 |
| s | 4,53 | 5 | 3,67 | 128 |

Dle měření byl vypočítán aritmetický průměr pro sérii měření „B“

$$\bar{x} = 139,77$$

vycházející z naměřených hodnot meze pevnosti.

Pro danou sérii „B“ byla směrodatná odchylka $s = 4,53$ [N/mm²]

Tab. 8. Výsledky tahových zkoušek série „C“

| Série | Rm | Rp | ϵ Rm | F |
|-------|-------------------|-------------------|---------------|------|
| „C“ | N/mm ² | N/mm ² | % | N |
| 1 | 143 | 100 | 15,8 | 4963 |
| 2 | 134 | 94 | 16,6 | 5426 |
| 3 | 137 | 95 | 19,7 | 5018 |
| 4 | 137 | 90 | 17,9 | 4755 |
| 5 | 138 | 79 | 18,9 | 5109 |
| 6 | 136 | 76 | 13,7 | 4844 |
| 7 | 129 | 92 | 18,3 | 4947 |
| 8 | 132 | 90 | 21,2 | 4921 |
| 9 | 132 | 90 | 16,4 | 4739 |
| 10 | 130 | 82 | 17,6 | 4561 |
| 11 | 129 | 88 | 22,2 | 4979 |
| 12 | 120 | 73 | 19,8 | 4489 |
| 13 | 133 | 92 | 18,8 | 5082 |
| 14 | 132 | 86 | 18,8 | 5329 |

| Série „C“ | Rm | Rp | ϵ Rm | F |
|-----------|-------------------|-------------------|---------------|------|
| n=14 | N/mm ² | N/mm ² | % | N |
| \bar{x} | 133 | 88 | 18,3 | 4940 |
| s | 5,31 | 7 | 2,2 | 259 |

Dle měření byl vypočítán aritmetický průměr pro sérii měření „C“

$$\bar{x} = 133,56$$

vycházející z naměřených hodnot meze pevnosti.

Pro danou sérii „C“ byla směrodatná odchylka $s = 5,31$ [N/mm²]

Tab. 9. Výsledky tahových zkoušek série „D“

| Série | Rm | Rp | ϵ Rm | F |
|-------|-------------------|-------------------|---------------|------|
| „D“ | N/mm ² | N/mm ² | % | N |
| 1 | 119 | 70 | 16,1 | 4457 |
| 2 | 116 | 71 | 13,1 | 4509 |
| 3 | 117 | 68 | 13,4 | 4342 |
| 4 | 117 | 76 | 16,4 | 4298 |
| 5 | 117 | 71 | 16,5 | 4749 |
| 6 | 116 | 78 | 15,2 | 4281 |
| 7 | 121 | 53 | 16,9 | 4665 |
| 8 | 118 | 72 | 16,6 | 4593 |
| 9 | 126 | 82 | 14 | 4879 |
| 10 | 133 | 84 | 16,1 | 5081 |
| 11 | 117 | 78 | 15,4 | 4613 |

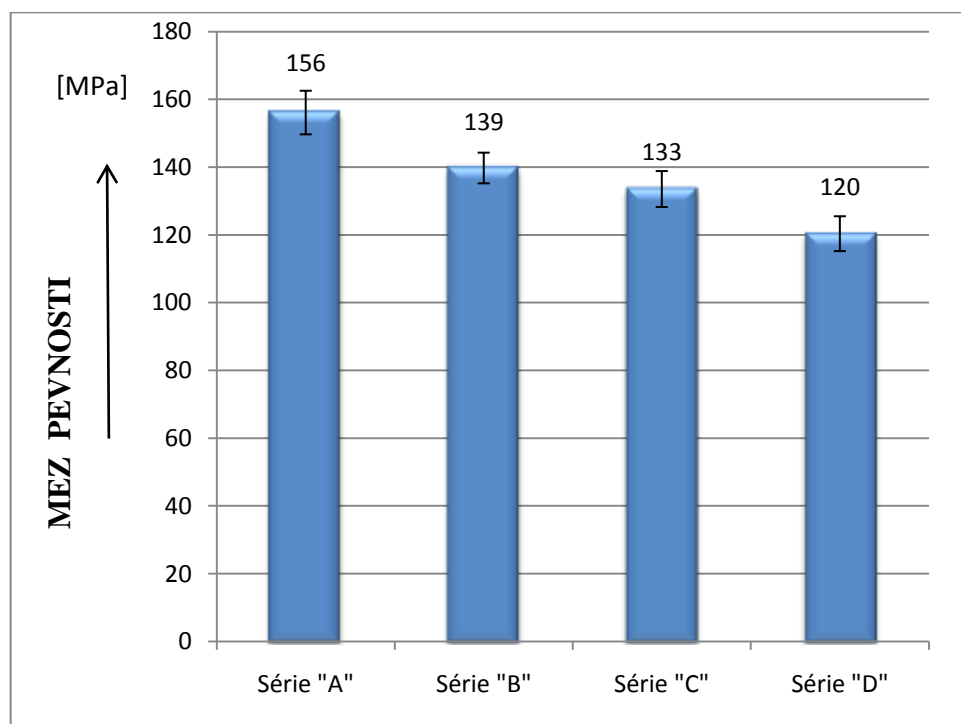
| Série „D“ | Rm | Rp | ε Rm | F |
|-----------|-------------------|-------------------|------------------|------|
| n=11 | N/mm ² | N/mm ² | % | N |
| \bar{x} | 120 | 73 | 15,4 | 4588 |
| s | 5,14 | 8 | 1,35 | 249 |

Dle měření byl vypočítán aritmetický průměr pro sérii měření „D“

$$\bar{x} = 120,38$$

vycházející z naměřených hodnot meze pevnosti.

Pro danou sérii „D“ byla směrodatná odchylka $s = 5,14$ [N/mm²]



Obr. 32. Hodnoty meze pevnosti dle teplotního zpracování

5.1 Hodnocení výsledků

Z Obr. 32. vyplývá, že největších hodnot meze pevnosti dosahoval materiál ze SÉRIE „A“, jež byl tepelně upraven dle podmínek navrhovaných normou a doporučených odbornými pracovníky firmy IFE CR, a.s.. IFE CR, a.s. tyto profily s různými mechanickými vlastnostmi zpracovává a má s nimi velké zkušenosti.

Z hodnocení výsledků mezi pevnosti vyplývá, že je více důvodů, proč se nepodařilo docílit očekávaného tepelného zpracování. Jedním z hlavních důvodů je fakt, že technologický postup firmy SAPA, a.s, která je výrobcem hliníkových profilů a která je dodavatelem těchto profilů do firmy IFE CR, a.s. je jiný a tento postup si firma chrání jako své know how. V této práci jsem se tohoto snažil docílit, ale dostatečných mechanických vlastností nebylo dosaženo. Postup, kterým firma SAPA těchto mechanických vlastností dosahuje, spočívá v naprosto přesně definovaných a dodržovaných tepelných, časových i skladovacích technologických postupech. A to je historie stárnutí, jak umělého, tak přirozeného. To, že dosažené výsledky nebyly naprosto shodné s výsledky očekávanými, je možno přisuzovat také možnosti jiného způsobu tepelného zpracování výrobní firmou SAPA, a.s. Ve způsobu tepelného zpracování byl dle očekávaných výsledků určitý tepelný rozsah zpracování a také způsob chlazení mohl být jiný, než se použilo v této práci. To znamená místo zchlazení do vody, se mohlo jednat o zchlazení např. vzduchem.

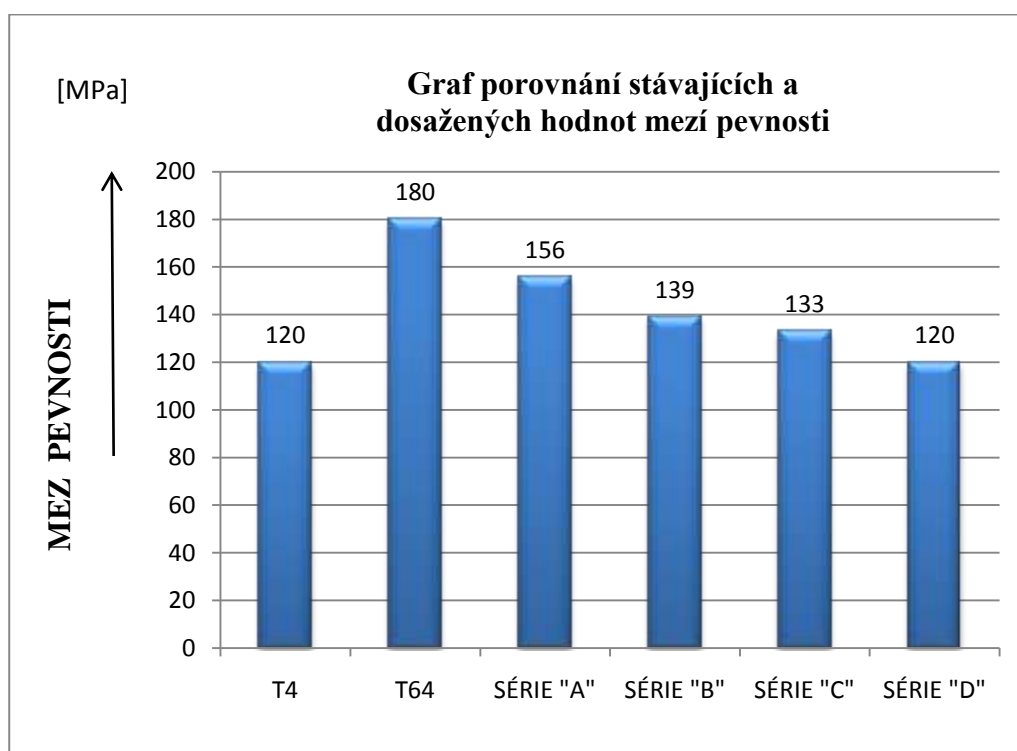
Toto zjištění může být námět pro další potenciální zkoumání.

Nejnižších vlastností meze pevnosti i meze kluzu vykazoval při zkouškách materiál ze SÉRIE „D“. Tento materiál nebyl tepelně upraven jako vzorky ze série „A“ a „C“. Vzorky ze SÉRIÍ „A“ a „C“ byly vytvrzovány UMĚLE a vzorky ze SÉRIE „B“ byly vytvrzovány PŘIROZENĚ za podmínek popsanych v tab. 4. a za teplot opět definovaných v tab. 4.

Tab. 10. Porovnání očekávaných a dosažených hodnot mechanických vlastností

| Stav materiálu Po tepelných úpravách | R _m [MPa] Minimálně | R _p [MPa] Minimálně |
|---|-----------------------------------|-----------------------------------|
| T4 | 120 | 60 |
| T64 | 180 | 120 |

| | | |
|------------------|-----|-----|
| SÉRIE "A" | 156 | 107 |
| SÉRIE "B" | 139 | 97 |
| SÉRIE "C" | 133 | 88 |
| SÉRIE "D" | 120 | 73 |



Obr. 33. Výsledky měření meze pevnosti

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo vypracování optimalizace procesu zpracování profilů ze slitin hliníku tak, aby se profily, jež se používají pro výrobu dveřních systémů vysokorychlostních vlakových souprav při mechanickém tvarování nedeformovaly.

V teoretické části je popsáno jak rozdělení hliníku a jeho slitin, tak i jeho následné tepelné zpracování. Tepelné zpracování hliníkových slitin je jeden z nejdůležitějších aspektů pro zvládnutí co nejvýhodnější obrobitelnosti a tvarovatelnosti hliníkových profilů.

V tomto případě se jedná především o zjednodušení technologického postupu při ohýbání hliníkových profilů a to z toho důvodu, aby po ohnutí do potřebného tvaru nemuselo následovat pracné dorovnávání nedokonalosti v tomto ohnutí.

Řešení jak tohoto docílit by spočívalo v tom, kdy výrobce by hliníkové profily ohýbal z materiálu, který by vykazoval menší mechanické vlastnosti, zejména tvrdost. Ale protože zákazník odběratel vyžaduje větší tvrdost a lepší mechanické vlastnosti, tyto profily, které by byly již ohnuty, by se následně teprve tepelně zpracovaly.

V praktické části je popsáno jakým způsobem by se tohoto dalo docílit. Dále jsou zde provedeny testy a zkoušky materiálu, ze kterého by se tyto profily vytlačovaly. Zkoušky byly provedeny ve čtyřech variantách tepelného zpracování a hledalo se řešení, které by vyhovovalo výrobnímu procesu.

Výsledek těchto testů je ten, že nejlépe z těchto čtyř variant dopadl materiál, který byl vyžhán v žíhací peci na 530°C po dobu 2 hodin. Následně byl prudce ochlazen do vody a dále uměle vytvrzen v žíhací peci na teplotě 140°C po dobu 10-ti hodin.

Tomuto procesu vytvrzení se také říká umělé stárnutí.

Opakem byla série vzorků, která se vůbec tepelně neupravovala a i přesto, že tento materiál byl nejlépe mechanicky obrobitelný a ohýbal by se nejsnáze, nesplňoval podmínky mechanických vlastností, které zákazník vyžadoval.

Při následném porovnávání vlastností, kterých by měl dle normy takto tepelně zpracovaný hliníkový profil vykazovat se zjistilo, že série „A“ se těmito vlastnostem hodně přibližuje, nicméně nedosahuje požadovaných minimálních hodnot meze pevnosti a meze kluzu. Tyto mechanické vlastnosti jsou ovšem bezpodmínečně vyžadovány zákazníkem. Tyto výsledky, jež se lišily od očekávaných výsledků, byly zřejmě ovlivněny prostředím, ve kterém se

materiál tepelně zpracovával. Druhá možnost, proč se tyto výsledky lišily, bylo zřejmě nedokonalé vytvrzení neboli vystárnutí zkoušeného materiálu.

Ze závěru této práce vyplývá, že firma IFE CR, a.s. tedy zůstane asi i nadále u současného technologického postupu tepelného zpracování, protože nebyla zjištěna optimálnější možnost tepelného zpracování hliníkových profilů, jež by vedla ke zlepšení technologického postupu výroby hliníkových profilů pro výrobu dveřních systémů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Šuba, O.: Mechanické chování těles, UTB ve Zlíně, fakulta technologická Zlín, 2009. ISBN 978-80-7318-792-7
- [2] Šuba, O.: Dimenzování a navrhování výrobků z plastů, UTB ve Zlíně, fakulta technologická Zlín, 2005. ISBN 80-7318-287-4.
- [3] Dostupný z : [www.cvut.brno.cz/-prezentace tepelné-zpracování slitin Al-Si](http://www.cvut.brno.cz/-prezentace-tepelne-zpracovani-slitin-Al-Si)
- [4] Ptáček, L a kol.: Nauka o materiálu II.
- [5] Dostupný z : http://www.339.vsb.cz/mechanika-2/Prednes5_MechanikaII.pdf
- [6] Čerpáno z Bakalářské práce: Ohybová tuhost tenkostěnných tvarovaných plastových prvků / Tomáš Tydlačka 2007
- [7] Čerpáno z Bakalářské práce: Vývoj technologie výroby nádoby hlubokým Tažením / Zbyněk Velecký 2009
- [8] Čerpáno z: http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_tepelne_zprac_hlin_sl/index.htm
- [9] SBORNÍK KONFERENCE ALUMINIUM 2007, Transaction of the Universities of Košice.5.
- [10] MICHNA. Š. et all. Encyklopedie hliníku. 1.vyd. ADIN s.r.o. Prešov
- [11] BUMBALEK. L., BUMBALEK. B., LIŠKUTIN. P, MAZAL.P. Vlastnosti povrchové vrstvy slitiny AlCu4Mg1,
- [12] BUMBALEK, B., MAZAL. P., LIŠKUTIN, P. Vlastnosti povrchové vrstvy slitiny AlCu4Mg1a jejich vliv na únavu.
- [13] Čerpáno z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Hlin%C3%ADkov%C3%A9_slitiny
- [14] Čerpáno z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Tah_\(pru%C5%BEnost\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/Tah_(pru%C5%BEnost))

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | |
|----------------|--|
| E | Modul pružnosti v tahu [MPa] |
| J | Kvadratický moment plochy průřezu k neutrální ose průřezu [mm ²] |
| σ | Namáhání [MPa] |
| ε | Poměrná deformace |
| k | Konstanta, která závisí na vlastnostech materiálu tělesa |
| Δl | Prodloužení / zkrácení tělesa [m] |
| F | Zatěžující síla / vnější síla působící na těleso [N] |
| S | Průřez material – tyče [m ²] |
| l_0 | Původní délka [m] |
| l | Délka po prodloužení [m] |
| dl | Prodloužení [m] |
| S_0 | Původní průřez [m ²] |
| S | Průřez po zatížení [m ²] |
| Z | Příčné poměrné zúžení |
| ΔS | Rozdíl průřezů material před a po zatížení [m ²] |
| A | Tažnost material |
| R _m | Mez pevnosti [MPa] |
| R _p | Mez kluzu [MPa] |
| s | Směrodatná odchylka |
| \bar{x} | Medián |
| \bar{x} | Střední aritmetický průměr |
| x | Počet měření |
| n | Minimální hodnota |
| x_{\min} | Maximální hodnota |
| x_{\max} | |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|-----------|
| <i>Obr. 1. Podíl jednotlivých technologií na spotřebě hliníku v Evropě.....</i> | <i>14</i> |
| <i>Obr. 2. Rozdělení hliníkových slitin.....</i> | <i>15</i> |
| <i>Obr. 3. Graf závislosti tvrdosti jednotlivých materiálů na teplotě</i> | <i>19</i> |
| <i>Obr. 4. Podmínky vytvrzování.....</i> | <i>20</i> |
| <i>Obr. 5. Vytvrzování.....</i> | <i>20</i> |
| <i>Obr. 6. Průběh vytvrzování.....</i> | <i>21</i> |
| <i>Obr. 7. Struktura materiálu v určitých fázích tepelného zušlechťování</i> | <i>21</i> |
| <i>Obr. 8. Vyloučení precipitačních fází [3]</i> | <i>22</i> |
| <i>Obr. 9. Schéma zkoušky tříbodovým ohybem</i> | <i>23</i> |
| <i>Obr. 10. Prostý (čistý) tah</i> | <i>24</i> |
| <i>Obr. 11. Obecný tvar závislosti funkce $\sigma (\epsilon)$</i> | <i>24</i> |
| <i>Obr. 12. Namáhání tělesa tahem</i> | <i>27</i> |
| <i>Obr. 13. Schéma průvzlaku</i> | <i>29</i> |
| <i>Obr. 14. Zákon zachování objemu.....</i> | <i>30</i> |
| <i>Obr. 15. Tažná stolice.....</i> | <i>31</i> |
| <i>Obr. 16. Profil – tolerance deformace po ohnutí</i> | <i>35</i> |
| <i>Obr. 17. Model zkoumaného profilu.....</i> | <i>37</i> |
| <i>Obr. 18. Zkoumaný profil</i> | <i>38</i> |
| <i>Obr. 19. Stroj na řezání vodním paprskem.....</i> | <i>39</i> |
| <i>Obr. 20. Řezací hlava</i> | <i>39</i> |
| <i>Obr. 21. Graf tepelné úpravy zkušebních vzorků.....</i> | <i>41</i> |
| <i>Obr. 22. Žíhací pec MIWY calor K.....</i> | <i>41</i> |
| <i>Obr. 23. Testovací zkušební stroj.....</i> | <i>43</i> |
| <i>Obr. 24. Upnutí zkušebního vzorku v čelistech.....</i> | <i>43</i> |
| <i>Obr. 25. Tahové zatížení tělesa.....</i> | <i>44</i> |
| <i>Obr. 26. Grafický diagram trhací zkoušky</i> | <i>44</i> |
| <i>Obr. 27. Grafy trhacích zkoušek dle materiálu</i> | <i>44</i> |
| <i>Obr. 28. Zkušební vzorek - plochá tyč</i> | <i>45</i> |
| <i>Obr. 29. Deformační křivka.....</i> | <i>45</i> |
| <i>Obr. 30. Zkušební tyč – zatěžující síly</i> | <i>46</i> |
| <i>Obr. 31. Zkušební tyč – vytvoření krčku při trhací zkoušce</i> | <i>46</i> |

| | |
|--|-----------|
| <i>Obr. 32. Graf naměřených hodnot mezí pevnosti s chybovými úsečkami – Aritmetický průměr</i> | <i>51</i> |
| <i>Obr. 33. Výsledky měření meze pevnosti</i> | <i>53</i> |

SEZNAM TABULEK

| | |
|--|-----------|
| <i>Tab. 1. Popis stavů hliníkových slitin.....</i> | <i>36</i> |
| <i>Tab. 2. Rozdělení materiálů dle mechanických vlastností.....</i> | <i>36</i> |
| <i>Tab. 3. Chemické značení slitin.....</i> | <i>37</i> |
| <i>Tab. 4. Tepelné úpravy zkušebních vzorků.....</i> | <i>40</i> |
| <i>Tab. 5. Elektrická pec – technické údaje.....</i> | <i>42</i> |
| <i>Tab. 6. Výsledky tahových zkoušek série „A“.....</i> | <i>47</i> |
| <i>Tab. 7. Výsledky tahových zkoušek série „B“.....</i> | <i>48</i> |
| <i>Tab. 8. Výsledky tahových zkoušek série „C“.....</i> | <i>49</i> |
| <i>Tab. 9. Výsledky tahových zkoušek série „D“.....</i> | <i>50</i> |
| <i>Tab. 10. Porovnání očekávaných a dosažených hodnot mechanických vlastností.....</i> | <i>52</i> |