

# VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra materiálu

Školní rok: 1991/1992

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro

Martin K N O T E K

obor 39-42-2

Materiálové inženýrství ve strojírenství

Vedoucí katedry Vám ve smyslu zákona č. 172/1990 Sb. o vysokých školách určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: Sledování vlastností tvářených polotovarů  
ze slitiny AlCuRbBi

### Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou zpracování polotovarů ze slitiny AlCuPbBi v podniku Aluminium Děčín
2. Prověřte vliv tepelného zpracování na vlastnosti polotovarů (zejména s ohledem na dobu prodlevy mezi ochlazením a vytvrzováním).
3. Navrhněte optimální způsob tepelného zpracování
4. Zhodnoťte dosažené výsledky.

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ  
Ostřední knihovna  
STUDENTSKÁ 5  
260 17 LIBEREC

KMT/MI

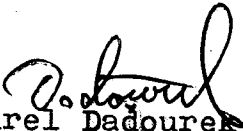
V 224/92S


Rozsah grafických prací:  
Rozsah průvodní zprávy: 40 - 50 stran  
Seznam odborné literatury:  
Podle pokynů vedoucího DP

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Karel Dačourek, CSc  
Konzultant: Ing. Miloslav Šoltys /Aluminium  
Děčín/  
Ing. Daniela Odehnalová

Zadání diplomové práce: 1.10.1991  
Termín odevzdání diplomové práce: 29.5.1992



  
Doc. Ing. Karel Dačourek, CSc  
Vedoucí katedry

  
Prof. Ing. Jaroslav Exner, CSc  
Děkan

V Liberci

dne 6.11. 1991

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ LIBEREC

FAKULTA STROJNÍ

OBOR 39 - 42 - 2

MATERIÁLOVÉ INŽENÝRSTVÍ

KATEDRA MATERIÁLU

**SLEDOVÁNÍ VLASTNOSTÍ TVÁŘENÝCH POLOTOVARŮ  
ZE SLITINY AlCuPbBi**

KMT - 2

MARTIN KNOTEK

VEDOUCÍ PRÁCE: DOC. ING. KAREL DAĐOUREK, CSc

KONZULTANTI: ING. DANIELA ODEHNALOVÁ

ING. MILOSLAV ŠOLTYS,

ALUMINIUM DĚČÍN

ROZSAH PRÁCE:

POČET STRAN: 45

POČET OBRÁZKŮ: 5

POČET TABULEK: 4

POČET GRAFŮ: 9

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA  
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146076951

29. KVĚTNA 1992

Na tomto místě bych chtěl poděkovat konzultantům  
Ing. Daniele Odehnalové a Ing. Miloslavu Šoltysovi za  
odborné vedení a poskytnuté rady. Současně i kolektivu  
pracovníků mechanické zkušebny podniku ALUMINIUM DĚČÍN za  
výbornou spolupráci.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci  
vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

Martin Knotek

*Martin Knotek*

## OBSAH

1. ÚVOD
2. REŠERŠNÍ ČÁST
  - 2.1. TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ SLITIN
    - 2.1.1. VYTVRZOVÁNÍ
    - 2.1.2. ROZPOUŠTĚCÍ ŽIHÁNÍ
    - 2.1.3. OCHLAZENÍ
    - 2.1.4. STÁRNUTÍ
    - 2.1.5. VLIV SLOŽENÍ SLITINY NA PRŮBĚH STÁRNUTÍ
    - 2.1.6. ZPEVNĚNÍ MATERIÁLU KOMBINACÍ TVÁŘENÍ ZA STUDENA A VYTVRZOVÁNÍ
  - 2.2. TVÁŘENÉ SLITINY HLINÍKU
    - 2.2.1. NEVYTVRZOVANÉ SLITINY HLINÍKU
    - 2.2.2. PŘECHODOVÉ SLITINY HLINÍKU
    - 2.2.3. VYTVRZOVANÉ SLITINY HLINÍKU
    - 2.2.4. NEJDŮLEŽITĚJŠÍ VLASTNOSTI TVÁŘENÝCH SLITIN HLINÍKU
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST
  - 3.1. SLITINA  $AlCuPbBi$
  - 3.2. PŘÍPRAVA VZORKŮ
  - 3.3. ZKOUŠKA TAHEM
  - 3.4. VYTVRZOVÁNÍ TRUBEK SLITINY  $AlCuPbBi$  BEZ PŘEDCHOZÍHO MECHANICKÉHO ZPRACOVÁNÍ
  - 3.5. VLIV PRODLEVY MEZI KALENÍM A VYTVRZENÍM
  - 3.6. VLIV TVÁŘENÍ ZA STUDENA MEZI KALENÍM A VYTVRZOVÁNÍM
4. DISKUSE VÝSLEDKŮ
5. ZÁVĚR
6. PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY

## 1. ÚVOD

Technologie výroby a zpracování polotovarů z neželezných kovů a jejich slitin se opírá o dlouholeté zkušenosti a tradice. Mnoho postupů je již velice dobře prozkoumáno a vyzkoušeno, ale to neznamena, že je vývoj v této oblasti zcela ukončen.

Tyto stále se vyvíjející materiály s lepšími fyzikálními a mechanickými vlastnostmi si vyžadují nové postupy výroby a tepelného zpracování, které lze získat kombinací již známých a ověřených technologických postupů s novými, modernějšími. Jich lze potom využít nejen pro zlepšení vlastností nových materiálů, ale také pro zlepšení vlastností materiálů, které se ve výrobním procesu již dlouhou dobu používají.

Naše ekonomika je ve stavu, kdy je nutno snižovat energetickou a surovinovou náročnost při současném zvyšování kvality a efektivnosti výroby. Proto je nutné získávat všechny dostupné informace, které nám pomůžou přiblížit se tomuto trendu.

To je také úkolem této práce, jejíž cílem je navrhnout optimální způsob tepelného zpracování polotovarů ze slitiny AlCuPbBi s ohledem na výrobní podmínky a možnosti podniku ALUMINIUM DĚČÍN.

## 2. REŠERŠNÍ ČÁST

### 2.1. TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ SLITIN Al

Tepelným zpracováním hliníkových slitin rozumíme několik způsobů zpracování, které se provádějí buď pro zvýšení mechanických vlastností (vytvrzováním), ale také pro dosažení měkkého stavu nebo některých jiných vlastností.

Mezi tepelným zpracováním slitin pro tváření a slitin pro odlévání není zásadního rozdílu. Na jednotlivé odchylky mezi těmito způsoby bude upozorněno na konkrétních příkladech.

Základní rozdělení tepelného zpracování /1/:

1. Žihání
2. vytvrzování

Protože v experimentální části není použito žihání, je zde uvedeno jen základní rozdělení žihání /1/:

- žihání na odstranění pnutí
- žihání na zotavení
- žihání stabilizační
- žihání rekrytalizační
- žihání na rovnovážný stav
- žihání homogenizační

Podrobněji bude uvedeno vytvrzování, které je důležité pro experimentální část.

#### 2.1.1. VYTVRZOVÁNÍ

Vytvrzováním se zvětšuje pevnost a tvrdost hliníkových slitin, ovšem jen takových, které jsou vhodné k vytvrzování. Aby slitina byla schopna vytvrzování, musí obsahovat legující prvky, které tvoří s hliníkem při vyšších teplotách tuhý roztok s omezenou rozpustností, ale vylučují se z něho při nižších teplotách, kdy se jejich rozpustnost snižuje. Druhou podmínkou je, aby prudkým ochlazením vznikl přesycený tuhý roztok.



Přísadové prvky, které dávají hliníkovým slitinám schopnost vytvrzování, jsou hlavně Cu, Ni, Mg, Zn a Si a to obvykle v různé zájemné kombinaci např. Al-Cu-Mg, Al-Zn-Mg-Cu a pod./2/.

Vytvrzování se skládá z několika technologických úkonů, které na sebe navazují a vzájemně souvisí do té míry, že jejich dílčí provedení ovlivňuje často rozhodujícím způsobem konečný výsledek.

Vytvrzování dělíme na tři části /1/:

- a/ rozpouštěcí žíhání
- b/ ochlazení ve vodě
- c/ stárnutí

### 2.1.2. ROZPOUŠTĚCÍ ŽÍHÁNÍ

Je prováděno jako přípravná operace před následujícím ochlazením. Při rozpouštěcím žíháním v oblasti homogenního tuhého roztoku se dokonale rozpouští ty fáze, které jsou za dané teploty v tuhém roztoku rozpustné. Heterogenní slitina (za normální teploty) se stává během rozpouštěcího žíhání homogenní. Rozpouštěcímu ohřevu je nutno věnovat značnou pozornost. Nejvyšší teplota ohřevu nesmí překročit teplotu, při které se slitina začíná tavit, nesmí být vyšší než teplota daná v rovnovážném diagramu čarou solidu. Překročením této teploty materiál znehodnotíme a to trvale. Nejdříve se roztaví eutektikum (nejnižší bod tavení), které bývá nejčastěji uloženo mezi krystaly základního kovu, tím se změní mikrostruktura materiálu a také jeho mechanické vlastnosti. Pevnost, mez kluzu i tažnost se zmenšují a materiál se stává křehkým. Překročili-li se při ohřevu značně teplota solidu slitiny, projeví se to i na povrchu polotovaru vznikáním bublin a uvnitř materiálu trhlinami.

Povrchové bubliny od přehřátí však nesmíme u plátovaných polotovarů zaměňovat s bublinami od naplynění nebo s bublinami, které vznikly chybami při plátování. Zásadním požadavkem je, aby teplota pece nebo lázně pro rozpouštěcí žíhání byla přesně dodržena v rozmezí 5 stupňů C. Při nižší teplotě lázně nebo pece není rozpouštění segregátů dokonalé a očekávané zlepšení mechanických vlastností se nedostaví.

Délka doby, po kterou je slitina udržována na teplotě, záleží na různých okolnostech, a to především na tloušťce zpracovávaných kusů a druhu a velikosti fází, které nutno v tuhém roztoku rozpustit. Jemně vyloučené fáze ve tvářených slitinách se rozpouštějí podstatně rychleji než tyté fáze vyloučené v hrubých útvarech v odlitcích. Obvykle je snahou zkrátit dobu rozpouštěcího žíhání na nejmenší možnou míru, protože zbytečným prodlužováním této doby zhrubne krystalická struktura a zhorší se mechanické vlastnosti /1/.

Převedením legujících prvků do tuhého roztoku končí rozpouštěcí ohřev a prodlužování doby na teplotě nepřináší žádný zisk. Minimální doba na teplotě, potřebná k dosažení optimálních vlastností se obvykle zjišťuje zkouškou /2/.

### 2.1.3. OCHLAZENÍ

Následuje po rozpouštěcím ohřevu, provádí se u slitin hliníku obvykle do vody 20 stupňů C teplé. Komplikované výrobky u nichž je nebezpečí vzniku deformací vlivem tepelného pnutí po rychlém ochlazení, se zamáčí do horké vody (40 až 50 stupňů C někdy i 80 stupňů C) u tlustostěnných

přesycený tuhý roztok za normální  
segregaci fází, které tuhý roztok přesycují. Při ochlazování slitiny menší rychlostí nebo není-li slitina ochlazena ihned po vyjmutí z pece, může dojít částečně k segregaci na hranicích zrn. Segregované fáze vyvolávají chemickou heterogenitu a slitina má menší odolnost proti korozi, nižší pevnost i tažnost. Proto je nutné rychle ochlazovat, přibližně do 5s od vyndání z pece. Rychle ochlazená slitina je

záleží samozřejmě na složení a druhu slitiny. Na vzduchu se ochlazují slitiny s vysokou stabilitou přesyceného tuhého roztoku.

Cílem ochlazování na vzduchu nebo do vody je získat přesycený tuhý roztok za normální teploty, tedy zabránit segregaci fází, které tuhý roztok přesycují. Při ochlazování slitiny menší rychlostí nebo není-li slitina ochlazena ihned po vyjmutí z pece, může dojít částečně k segregaci na hranicích zrn. Segregované fáze vyvolávají chemickou heterogenitu a slitina má menší odolnost proti korozi, nižší pevnost i tažnost. Proto je nutné rychle ochlazovat, přibližně do 5s od vyndání z pece. Rychle ochlazená slitina je ve stavu nerovnovážném a je tvořena přesyceným tuhým roztokem. Na rozdíl od heterogenního stavu vyznačuje se homogenní stav za normální teploty nižšími pevnostními vlastnostmi, vyšší tažností a houževnatostí /1/.

#### 2.1.4. STÁRNUTÍ

Přesycený tuhý roztok, vzniklý zakalením, má snahu vrátit se do rovnovážného stavu, který odpovídá rovnovážnému diagramu slitiny při normální teplotě. Tento rozpad začíná obvykle samovolně již za normální teploty, a to ihned po zakalení /2/.

V místech koncentračních rozdílů probíhá nukleace nové fáze, která je bohatší na přísadu než základní tuhý roztok. Růstem těchto zárodků vznikají koherentní precipitáty označovány jako Guinier - Prestonova pásma. Při

zvýšení teploty se tyto precipitáty dále zvětšují a jejich počet se zmenšuje. Dalším zvyšováním teploty se tyto precipitáty dále zvětšují a jejich počet se zmenšuje. Dalším zvyšováním teploty vznikají částečně koherentní precipitáty jsou tvořeny přechodovou fází. Rovnovážná fáze, jako konečný produkt rozpadu přesyceného tuhého roztoku, která se předchozím rozpouštěcím ohřevem v tuhém roztoku rozpustila, tvoří nekoherentní precipitáty popř. segregáty. Rozpad přesyceného tuhého roztoku označujeme souborně jako stárnutí, jehož dílčím pochodem je precipitace. Stárnutí při normální teplotě je označováno jako přirozené, při zvýšené teplotě se označuje jako umělé. Při umělém stárnutí probíhá precipitace podstatně rychleji než při stárnutí přirozeném.

Rozpad přesyceného tuhého roztoku je složitý děj, jehož průběh závisí především na teplotě, v podstatě však je mechanismus vytvrzování u všech slitin obdobný /1/.

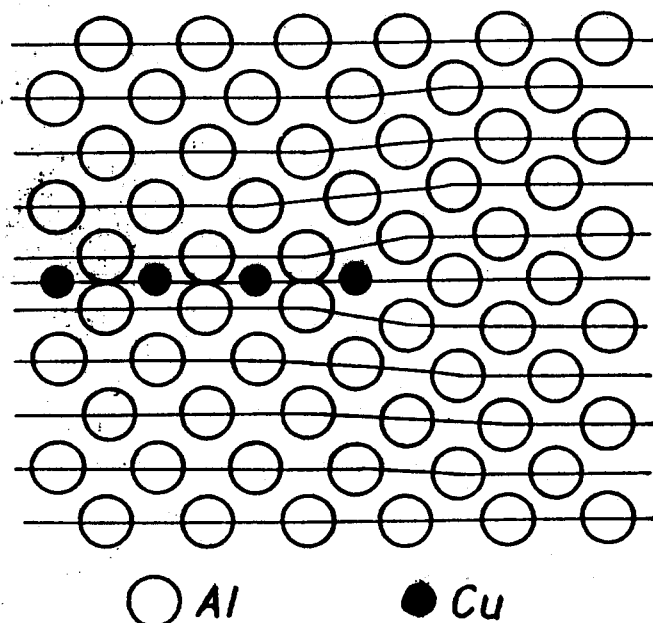
Pro příklad bude zjednodušeně naznačen průběh stárnutí na jednoduché slitině AL - Cu se 4% Cu.

Po rozpouštěcím ohřevu při teplotě 500 stupňů C je slitina rychle ochlazená a ponechána na teplotě okolí (tj. cca 20 stupňů C).

V první fázi stárnutí dochází v přesyceném tuhém roztoku k rozsáhlému difúznímu pohybu atomu Cu, čímž vznikají oblasti s vyšší koncentrací mědi. Při tomto pohybu atomu dochází i k pohybu vakancí a jejich soustředění v určitých směrech a rovinách, vzniká zvláštní typ dislokací značený jako spirálové dislokace, a to kombinací šrubových dislokací s va-

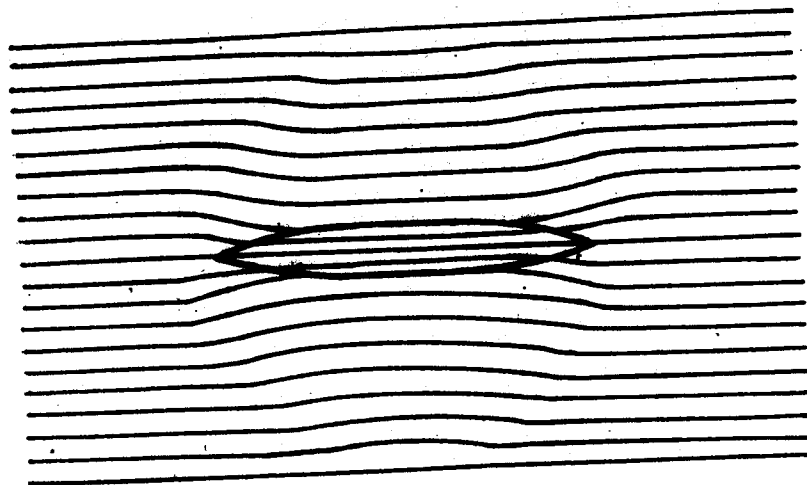
kancemi.

V oblastech s vyšší koncentrací mědi dochází již v krátkém časovém údobí po ochlazení do vody ke koherentní precipitaci monoatomárních vrstev mědi. Tato pásma jsou označována jako Guinier - Prestonova pásma I. (GP I. - prvního druhu). Tyto pásma jsou znázorněna na obrázku č. 1.



Obr. č.1 Pásma GP I. slitiny Al - Cu /1/

V další fázi stárnutí vznikají vícevrstvé destičkové útvary tvořené několika monoatomovými pravidelnými vrstvami mědi značené jako Guinier - Prestonova pásma II. (GP II. - druhého druhu) znázorněna na obrázku č.2. Vznikem koherentních zón GP I. a GP II. je přirozené stárnutí slitiny Al - Cu zkončeno. Důsledkem stárnutí je podstatná změna mechanických i fyzikálních vlastností /1/.



Obr. č.2 Pásma GP II. slitiny Al - Cu./1/

Stárnutí za vyšších teplot vyžaduje ohřev polotovaru na 100 - 200 stupňů C dle druhu slitiny a určitou výdrž na této teplotě, při které dosahují hodnoty  $R_m$  a  $R_p$  nejvyšších hodnot. Při vyšší teplotě stárnutí stačí setrvat kratší dobu na teplotě, překročením určité teploty se však pevnost materiálu snižuje, obdobně působí i déle trvající ohřev při nižší teplotě. Po dosažení optimálního režimu je nutné provést dané zkoušky zvlášť pro každou slitinu./2/

### 2.1.5. VLIV SLOŽENÍ SLITINY NA PRŮBĚH STÁRNUTÍ

Průběh stárnutí a s tím související mechanické vlastnosti materiálu jsou ovlivňovány nejen přísadami, ale i přimíšeninami.

Se zvyšující se přísadou mědi vzrůstá celková tvrdost po stárnutí a současně se tím urychluje celý proces stárnutí. Proto se snažíme zvýšit koncentraci přísady na takovou hodnotu, která by byla ještě únosná z hlediska technických podmínek prováděného rozpouštěcího ohřevu. Rozsah vzájemné rozpustnosti hliníku a přísady můžeme však ještě zvýšit dalšími přísadami. To je jeden z důvodů, proč vytvrditelné slitiny hliníku jsou většinou slitiny s více komponentami.

Důležitý na průběh stárnutí je vliv přimíšenin, se kterými se ve všech slitinách hliníku setkáváme. Již malá přísada železa 0,03% Fe výrazně zpomaluje průběh přirozeného stárnutí slitiny Al - Cu, stejně působí i nikl nebo molybden. Nepříznivý vliv železa může odstranit přísada hořčíku /1/.

### 2.1.6. ZPEVNĚNÍ MATERIÁLU KOMBINACÍ TVÁŘENÍ ZA STUDENA A VYTVRZOVÁNÍ

Kombinací obou způsobů tj. tváření za studena a vytvrzování lze dosáhnout značně vyšší pevnosti než pouhým vytvrzováním, avšak na úkor tažnosti, která se zmenšuje. Obvykle se postupuje tak, že se provede rozpouštěcí žihání, následuje rychlé ochlazení a brzy po zakalení, kdy je materiál ještě tvárný, tváří se polotovar za studena např. válcováním, tažením, napínáním apod. Jsou však možné i jiné

kombinace.

Téměř všechny plechy menších tloušťek se po zakalení převálcují za studena malou redukcí, aby se vyrovnaly deformace vzniklé při kalení. Takto zpracované plechy z vytvrzovatelných slitin hliníku mají poněkud vyšší pevnost než plechy pouze vytvrzované. Proto také ČSN respektují rozdíly v mechanických vlastnostech plechu ve stavu dodaném a po novém vytvrzení u spotřebitele. Tyto rozdíly jsou méně patrné u plechů vytvrzovaných za vyšších teplot. Stejně poměry jako plechů mohou nastat i u tažených nebo lisovaných polotovarů. /2/

## 2.2. TVÁŘENÉ SLITINY HLINÍKU

Slitiny hliníku jsou běžným konstrukčním materiálem. Je známo více než 2000 různých typů hliníkových slitin dělených dle normovaných nebo obchodních názvů. Základní typy tvoří 30 až 50 jednoduchých i složitějších slitin, jejichž pevnost v různém stavu zpracování pokrývá celý rozsah pevností od 60 do 600 MPa. Z těchto základních slitin se odvozují další varianty změnou obsahu legovacích prvků nebo přidáním či omezením dalších kovů v malých množstvích, někdy považovaných jen za nečistoty. Důležité je také tepelné zpracování, kterým lze dosáhnout určitých specifických vlastností vhodných pro dané použití.

Hliníkové slitiny jsou poměrně málo legovány, obsah jednotlivých legur nepřesahuje 5 až 7% a součet obou obsahů všech legovacích prvků je zpravidla menší než 10%. Při vět-



ším obsahu legovacích prvků může dojít např. k vzájemné vazbě mezi hliníkem a legujícími prvky a vzniku mezikovových (intermetalických) fází, tvořených sloučeninami hliníku. Tyto fáze se vylučují nejčastěji mezikrystalicky a jsou většinou křehké a tvrdé. Jsou-li vyloučeny v krystalech, omezují také možnost skluzů a snižují tím tažnost. Tyto vlastnosti jsou v některých případech nežádoucí. /2/

Tvářené slitiny dělíme na slitiny zpracovávané tvářením za studena (nevytvrzované) a na zpevňované vytvrzováním (vytvrzované). Toto dělení je významné pro provozní rozhodnutí o možnostech použití, ale také pro způsoby zpracování hutních polotovarů. U slitin zpevňovaných tvářením za studena jsou omezeny i rozměry výrobků, u nichž jsou mechanické vlastnosti zaručeny. /5/

Tabulka č.1 udává přehled mechanických vlastností slitin hliníku se zaručenými pevnostmi.

### 2.2.1. NEVYTVRZOVANÉ SLITINY HLINÍKU

Nejjednodušším typem slitin zpevňovaných tvářením za studena jsou slitiny Al - Mn s obsahem manganu 1%. Při větším obsahu než 1,5% Mn se překročí hranice rozpustnosti tuhého roztoku a vzniká nebezpečí vylučování křehkých fází  $Al_6Mn$  popř.  $Al_6/FeMn/$ . Pevnost v měkkém stavu se u této slitiny příliš nezvětší (vůči čistému hliníku), ale v tvrdém stavu tvářeném za studena lze pevnost zvětšit asi dvojnásobně. Ze slitiny se vyrábějí všechny druhy hutních výrobků, které se pak používají hlavně v chemickém průmyslu, potravi-

nářství a pro méně namáhané součásti v letectví.

Další významná slitina je slitina hliníku s hořčíkem. Obsah hořčíku je od 1 do 7%, výjimečně i 9%. Čím větší obsah hořčíku, tím se zvyšuje koeficient zpevnění při tváření za studena, ale omezuje se celkový stupeň plastické deformace za studena. Slitiny s největším obsahem hořčíku se dodávají jen jako slitiny lisované na tyče nebo profily. Kombinací legování a tváření lze zabezpečit pevnosti od 150 do 400 MPa. S klesající teplotou se rozpustnost hořčíku snižuje až pod 2%, což by umožňovalo zvýšit pevnost vytvrzováním. V praxi se toho nikdy nevyužívá, protože při ochlazování dochází k precipitaci fáze  $Al_3Mg_2$ , která zhoršuje korozní odolnost.

Přísadou malého množství manganu nebo některých jiných prvků, např. chromu, se zlepšuje rozložení precipitačních fází, velikost zrna i chemické vlastnosti. Pro velmi dobré mechanické vlastnosti, dobrou korozní odolnost a svařitelnost se tyto slitiny používají v chemickém průmyslu, dopravě a strojírenství. Používají se také pro stavbu lodí a výrobu součástí, které přicházejí do styku s mořskou vodou. Nejdůležitější slitinou je  $AlMg_4,5Mn$ . /5/

Tabulka 1. Přehled mechanických vlastností hliníku a tvářených slitin hliníku

Slitina	Stav	$\sigma_{Pt}$ (MPa)	$\sigma_{0,2}$ (MPa)	$\delta$ (%)	HB	Poznámka
Al99,85		50 ÷ 100		25	16 ÷ 22	
Al99,5		60 ÷ 110		30	17 ÷ 23	
Al99,5	$\frac{1}{2}$ T	100	70	6	25 ÷ 35	
Al99,5	T	130	110	3	35 ÷ 40	
AlMn1		110 ÷ 150		20	20 ÷ 30	
AlMn1	$\frac{1}{2}$ T	150 ÷ 170	100 ÷ 130	6 ÷ 10	35 ÷ 40	
AlMgSiFe		120			25 ÷ 40	tyče
AlMg1Si1		100 ÷ 150		16	30 ÷ 40	
AlMgSiFe	PS	140	70	11	45 ÷ 60	trubky
AlMg2		150 ÷ 190	60 ÷ 110	16	35 ÷ 50	
AlMg2Mn		170 ÷ 200		15	45 ÷ 60	
AlMgSi	T + TZ	180	150	4	50 ÷ 60	
AlMn1	T	190 ÷ 220	130 ÷ 180	3 ÷ 5	40 ÷ 55	
AlMg0,7SiFe	US	200	150	10	60 ÷ 80	trubky
AlCu4Mg	M	180 ÷ 240		10 ÷ 12	60 ÷ 75	
AlMg2	$\frac{1}{2}$ T	190 ÷ 240	110	8	45 ÷ 60	
AlMg3		180 ÷ 230	85 ÷ 140	12 ÷ 16	43 ÷ 60	
AlZn6Mg2Cu		180 ÷ 330		9	50 ÷ 70	tyče lisované
AlMg1Si1	US	210	120	13	50 ÷ 70	rovnané po US
AlMgSi	US	210	110	7	70 ÷ 90	tyče tvářené po tepelném zpracování
AlMg2,5	$\frac{1}{2}$ T	220 ÷ 240	130 ÷ 200	3 ÷ 4	55 ÷ 65	
AlMg3	$\frac{1}{2}$ T	230	140	8	55 ÷ 70	
AlMg5		250 ÷ 280		16	55 ÷ 65	
AlMg0,7Si	US	260	200	3	75 ÷ 95	tvářené po tepelném zpracování
AlMg3	T	260	180	3	70 ÷ 85	
AlMg1Si	US	280	220	10	70 ÷ 95	
AlMg0,7Si0,5	US	290	250	6	85 ÷ 105	tvářené po tepelném zpracování
AlMg5	$\frac{1}{2}$ T	290	200	8	70 ÷ 90	
AlZn4Mg1	PS	300	150	10	85	tyče
AlCu4Mg1		300		10		tyče tvářené bez tep. zprac.
AlMg7		300 ÷ 340		14	70 ÷ 85	
AlSi12Cu1MgNi	US	330	270	2	100	tyče
AlZn7Mg1	US	330	280	8	100	tyče
AlMg5	T	340	300	3	90 ÷ 115	
AlMg7	$\frac{1}{2}$ T	350	200	10	90 ÷ 95	
AlCu4BiPb	PS	350	210	8	90	tyče
AlCu4Mg	PS	370		12	85 ÷ 120	plechy
AlCu4Mg1	PS	380	250	15	100 ÷ 125	plechy
AlCu2Mg	US	380	280	10	95 ÷ 120	tyče
AlCu2Mg2Ni	US	390 ÷ 420	260 ÷ 350	5	95 ÷ 15	tyče
AlMg7	T	400	320	4	100 ÷ 130	
AlCu4Mg1,5	PS	430	280 ÷ 340	10	90 ÷ 125	
AlCu4Si1Mg	US	480	380	10	135	
AlZn6Mg2Cu	US	540	440	5	130 ÷ 150	tyče

$\frac{1}{2}$ T – stav půltvrký; T – stav tvrdý; TZ – tepelně zpracovaný; US – uměle stárnutý; PS – přirozeně stárnutý.

### 2.2.2. PŘECHODOVÉ SLITINY HLINÍKU

Přechodovou skupinou jsou slitiny Al - Mg - Si. Mají nízký obsah Mg i Si /do 1% / a mohou se jak zpevňovat tvářením za studena tak vytvrzovat. Jejich mechanické vlastnosti závisí na obsahu hlavních legovacích prvků a zejména na jejich poměru.

V soustavě Al - Mg - Si vzniká intermetalická sloučenina  $Mg_2Si$  a podle celkového složení se vyznačuje značnou stabilitou tuhého roztoku, takže po rozpouštěcím žihání je 500 až 540 stupňů C. Vytvrzování lze kombinovat s tvářením za studena, a tak zvýšit pevnost přes 300 MPa, po případě zlepšit elektrickou vodivost. Výhodou těchto slitin je dobrá zpracovatelnost za studena i za tepla. Použití mají i ve stavebnictví (složité profily výtlačně lisované) i v elektronice. Využívá se dobré svažitelnosti slitiny, odolnosti proti korozi i schopnosti povrchových úprav./5/

### 2.2.3. VYTVRZOVANÉ SLITINY HLINÍKU

Mezi tyto patří slitina Al - Cu - Mg s obsahem mědi do 4,8%, mechanické vlastnosti však značně závisí na obsahu hořčíku (od 0,4 do 1,8%) a manganu (do 1%), důležitý je také obsah křemíku, který je u některých slitin záměrně legován. U klasické slitiny probíhá přirozené stárnutí poměrně rychle po rozpouštěcím žihání (490 - 520 stupňů C). Překročení optimální teploty rozpouštěcího žihání může způsobit výrazný pokles mechnických vlastností. U některých složení je výhodné zařadit umělé stárnutí, aby se zvýšila zejména mez Rp. Ze

slitin se vyrábí plechy, tyče, profily a trubky. Hlavně plechy se jednostranně nebo oboustranně plátují čistým hliníkem pro zvýšení korozní odolnosti. Pevnost slitin Al - Cu - Mg je 400 až 450 MPa, použití mají v letectví a strojírenství. Jejich nevýhodou je omezená svažitelnost, omezená tvářitelnost za studena i horší třísková obrobitelnost (zlepší se přidáním Pb nebo Bi).

Tyto slitiny jsou postupně nahrazovány slitinami Al-Mg-Mn a zejména Al-Zn-Mg.

Přidáním niklu se zvyšuje pevnost těchto slitin za tepla, takže se používají především na výkovky pracující za vyšších teplot např. písty spalovacích motorů. Titan se přidává pro zjemnění zrna. Stejně použití mají také slitiny Al - Cu - Mn.

Další slitina patřící mezi vytvrzované je slitina Al - Zn - Mg. Patří mezi slitiny, u nichž se dosahuje optimálních vlastností nejen složením (obsah a poměr Zn a Mg), ale i zvláštním umělým stárnutím. Slitiny tohoto typu se dělí na dvě skupiny, které se liší obsahem mědi. Slitiny bez mědi jsou svažitelné, přičemž pevnost svaru dosahuje až 90% pevnosti základního materiálu a to bez rozpouštěcího žíhání. Složení, ale i obsah nečistot a tepelné zpracování určují plastické vlastnosti a náchylnost ke koroznímu praskání, kterou lze ovlivnit přidávkou dalších prvků př. Mn, Cr, Ag apod.

Strukturně jsou tyto slitiny značně složité, citlivé a náročné na tváření i tepelné zpracování. Rozpouštěcí žíhání

ní bývá při 460 až 480 stupních C, umělé stárnutí probíhá při 130 až 140 stupních C delší dobu. U některých slitin se používá dvoustupňového umělého stárnutí, a to nejprve při teplotě 100 stupňů C, pak 140 stupních C.

Slitiny Al - Zn - Mg mají nejlepší mechanické vlastnosti mezi hliníkovými slitinami a tvoří přechod ke skupině slitin s vyšší pevností. Při větších obsazích zinku a hořčíku se zvyšuje pevnost, ale roste náročnost na tváření i tepelné zpracování. V praxi se uplatňují především slitiny s obsahem zinku 4 až 5% a hořčíku 1 až 1,5%. Tyto mají střední pevnost kolem 400 MPa a začaly vytlačovat v použití slitiny Al - Cu - Mg. Slitiny Al - Zn - Mg se používají na výrobu profilů, tyčí, plechů a trubek v letectví a ostatní dopravě a mají uplatnění i v oborech strojírenství. /5/

#### 2.2.4. NEJDŮLEŽITĚJŠÍ VLASTNOSTI TVÁŘENÝCH SLITIN HLINÍKU

Malá měrná hmotnost hliníkových slitin, asi 34% měrné hmotnosti oceli, umožňuje provedení lehkých konstrukcí. Při dostatečné pevnosti v tahu nemusí být průřezy o mnoho větší než u konstrukcí z oceli normálních jakostí.

Hliníkové slitiny mají velmi dobrou svařitelnost (při použití vhodných svařovacích pochodů v ochranné atmosféře v kombinaci s legovacími přísadami), které se využívá při výrobě svařovaných konstrukcí.

Pro snadnou zpracovatelnost (potřeba relativně malé síly při tvarování a větší řezné rychlosti při obrábění) jsou hliníkové slitiny velmi často používané ve

strojírenství.

Vzhledem k všeobecně dobrým antikoročním vlastnostem, ať proti atmosféře venkovní, průmyslové, mořské vodě, nevyžadují slitiny hliníku obvykle žádné zvláštní povrchové ochrany, která je nutná u oceli. Tím se dociluje značných provozních úspor.

Uvedené vlastnosti tvoří z hliníkových slitin přitažlivý konstrukční materiál. Úspory na hmotnosti proti ocelovým konstrukcím jsou asi 45 až 67%. Je nutné brát v úvahu jejich větší pořizovací cenu (vzhledem k ocelím) a vhodnou volbou hliníkových slitin plně využívat jejich přednosti. /3/

### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část se zabývá tepelným zpracováním (vytvrzováním) trubek z hliníkové slitiny AlCuPbBi. Při výrobě této slitiny v podniku ALUMINIUM DĚČÍN se nedociluje požadovaných minimálních mechanických vlastností daných normou DIN 1725. Proto bylo nutné zjistit vlivy, které tyto vlastnosti ovlivňují a nalézt optimální podmínky tepelného zpracování pro dosažení požadovaných mechanických hodnot.

Po tepelném zpracování a přípravě vzorků byla na těchto vzorcích prováděna statická zkouška tahem, při které byly zjištěny požadované mechanické hodnoty ( $R_m$ ,  $R_p$ ,  $A$ ) pro vyhodnocení celého experimentu.

#### 3.1. SLITINA AlCuPbBi

Slitina je vyráběna v tavírně přímo v podniku ALUMINIUM DĚČÍN. Je to automatová slitina vhodná pro třískové obrábění, což způsobuje především přítomnost olova.

Z diagramu rozpustnosti hliník - olovo (obr.3) vyplývá, že hliník a olovo jsou rozpustné v tekutém stavu jen při určitých koncentracích.

V tuhém stavu je olovo v hliníku nerozpustné a tvoří v něm samostatné fáze (částice olova). Pro výrobu slitiny je důležitá levá část diagramu, kde je přípustný obsah olova přibližně do 1,7%.

Slitina AlCuPbBi není v ČSN normovaná, proto se pro její posuzování (např. chemické složení, mechanické hodnoty)

sahuje teplota přibližující se k teplotě tání olova (658 stupňů C), tříska v těchto místech měkne a drobí se. Nedocilují se tím dlouhé třísky nevhodné pro automatové obráběcí stroje. To je jeden z důvodů přidávání olova do hliníkových slitin. Podobně působí i přídavek vismutu, kadmia nebo antimonu.

Dle normy DIN 1725 předepsané chemické složení a



používá norma DIN 1725, která udává přípustný obsah olova 0,2 - 0,6%.

Při třískovém obrábění se mezi nástrojem a třískou dosahuje teplota přibližující se k teplotě tání olova (658 stupňů C), tříska v těchto místech měkne a drobí se. Nedocílují se tím dlouhé třísky nevhodné pro automatové obráběcí stroje. To je jeden z důvodů přidávání olova do hliníkových slitin. Podobně působí i přídavek vismutu, kadmia nebo antimonu.

Dle normy DIN 1725 předepsané chemické složení a mechanické hodnoty slitiny AlCuPbBi:

Normované složení:

Cu	5 - 6%
Bi	0,2 - 0,6%
Pb	0,2 - 0,6%

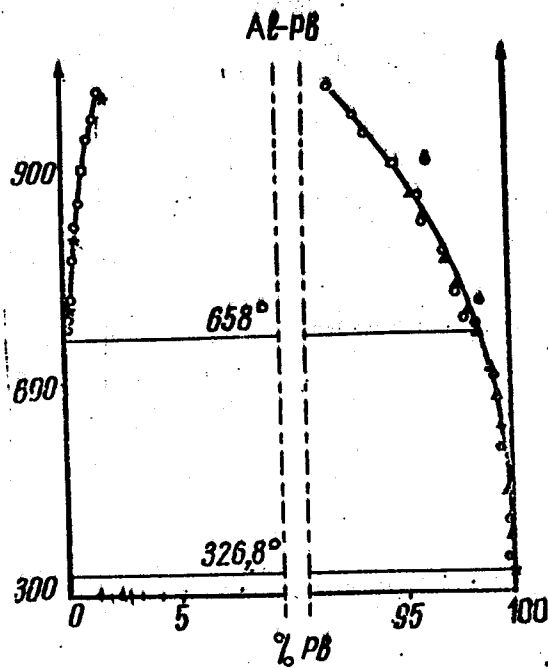
Nečistoty:

Si	do 0,4%	Mn	do 0,05%
Fe	do 0,7%	Zn	do 0,3%
Mg	do 0,05%	ostatní do 0,05%	

Chemické složení slitiny AlCuPbBi zjištěné přímo ze vzorku zkoušeného materiálu:

Cu = 5,17%	Si = 0,13%	Zn = 0,04%
Bi = 0,457%	Fe = 0,17%	Ni = 0,01%
Pb = 0,45%	Mg = 0,02%	Cr = 0,004%
	Mn = 0,01%	Ti = 0,004%

Jak je patrné, chemické složení testované slitiny odpovídá normě DIN 1725.



Obr.3. Diagram rozpustnosti slitiny Al - Pb /6/

Minimální mechanické hodnoty pro trubky za tepla vytvrzené:

$$R_m = 350 \text{ MPa}$$

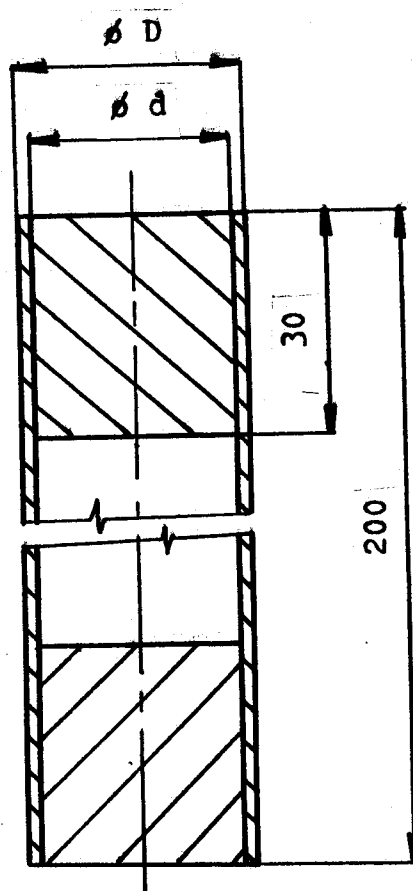
$$R_{P0,2} = 270 \text{ MPa}$$

$$A_{10} = 6\%$$

Z podniku ALUMINIUM DĚČÍN vychází tato slitina jako polotovar ve formě tyčí a trubek. Ve finální výrobě se např. používá v optice a jemné mechanice.

### 3.2. PŘÍPRAVA VZORKŮ

Z připravených trubek slitiny AlCuPbBi o délce 4m byly nařezány vzorky na délku 200mmna kotoučové pile. Po tepelném zpracování těchto vzorků bylo nutné natlouci do obou konců vzorku hliníkové válečky viz obr.č.4. Tyto válečky zabraňují deformaci konců vzorku v čelistech trhacího stroje při uchycení.



Obr.č.4. Příprava vzorku před trhací zkouškou.

### 3.3. ZKOUŠKA TAHEM

Při této zkoušce bylo postupováno dle normy ČSN 420310 ST SEV 471 - 77. Zde byly získány potřebné informace k této zkoušce.

Zkušební těleso (nejčastěji tyč kruhového nebo čtyřhranného průřezu) se ve zkušebním stroji natahuje předepsanou rychlostí ( $2,5 \times 10$  až  $25 \times 10$  s). zpravidla až do porušení. Přitom se zaznamenává závislost osové tahové síly  $F$  na prodloužení tyče  $\Delta L$ , které se sleduje na její vymezené části, označené jako měřená délka.

Prodloužení tyče:

$$\Delta L = L - L_0 \quad /mm/ \quad /1/$$

Poměrné prodloužení:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad / \% / \quad /2/$$

$L$ ..... měřená délka tyče v daném okamžiku zatěžování

$L_0$ .... výchozí délka

Vztažením síly  $F$  na výchozí průřez  $S_0$  nezatížené tyče získáváme smluvní jmenovité napětí  $R$ :

$$R = \frac{F}{S_0} \quad /MPa/ \quad /3/$$

$R_p$  .. smluvní mez skluzu, která udává napětí k dosažení určité trvalé deformace např.  $R_{p0,2}$ . Tato hodnota se odečítá buď z diagramu (měřítko nejméně 10 : 1) nebo pomocí průtahoměru.

Výpočet pevnosti v tahu  $R_m$ :

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \quad / \text{MPa} / \quad / 4 /$$

$S_0$ ... počáteční průřez zkoušené tyče.

Dále se při zkoušce tahem vyhodnocuje tažnost a kontrakce.

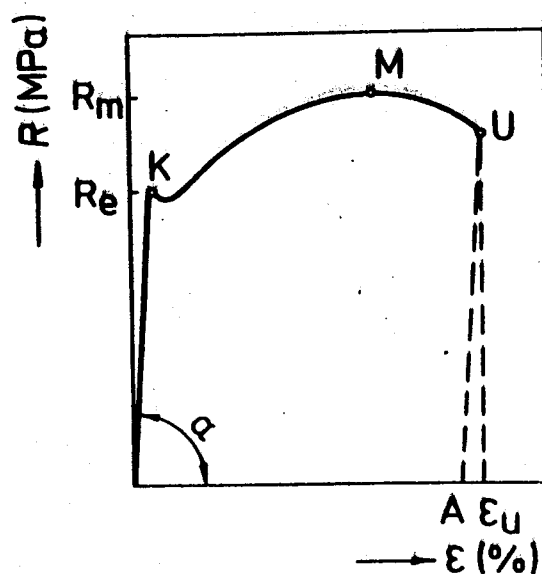
Tažnost = poměr prodloužení měřené délky tyče po přetržení k počáteční měřené délce vyjádřený v %.

$$\lambda = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad / \% / \quad / 5 /$$

Kontrakce = poměr rozdílu počátečního a nejmenšího průřezu zkušební tyče po přetržení k počátečnímu průřezu vyjádřený v %.

$$\xi = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \quad / \% / \quad / 6 /$$

Vzorce /4/ a /5/ byly použity k výpočtům daných mechanických hodnot zkoušených vzorků.



Obr.5 Pracovní diagram zkoušky tahem měkké uhlíkové oceli /4/

### 3.4. VYTVRZOVÁNÍ TRUBEK SLITINY AlCuPbBi BEZ PŘEDCHOZÍHO MECHANICKÉHO ZPRACOVÁNÍ

V této části experimentu bylo zapotřebí zjistit optimální vytrvzovací teplotu a dobu výdrže na této teplotě na zakalených vzorcích, které však nabyly před vytvrzením (po zakalení) nijak mechanicky zpracovány. Také zde nebyl brán ohled na časovou prodlevu mezi kalením a vytvrzováním, tato prodleva byla u všech vzorků konstantní.

Postupovalo se následovně: lisováním a tažením za studena byly připraveny zkušební trubky délky 4m o vnějším průměru 18mm a tloušťce stěny 2mm. Z těchto trubek byly nařezány vzorky o délce 200mm, na kterých se provedl rozpouštěcí ohřev při teplotě 530 stupňů C v solné lázni a dobou výdrže 1 hodina na této teplotě.

Ihned po tomto ohřevu následovalo ochlazení do vody.

Po 10 dnech prodlevy za teploty okolí bylo provedeno vytvrzení vzorků (pec CHIRANA STE/1) při teplotách 140, 150, 160 a 170 stupňů C po dobu 4, 6, 8 a 10 hodin. Pro zaručení větší spolehlivosti experimentu byly připraveny pro každou teplotu a dobu ohřevu 3 vzorky.

Po vytvrzení byly do obou konců vzorků natlučeny hliníkové válečky (viz kap.3.2) a následovaly zkoušky tahem.

Vždy první dva vzorky byly taženy na stroji VEB THURUNGER INDUSTRIWERK RAUENSTEIN 11/2612 a třetí vzorek byl trhán na přesnějším stroji anglické výroby INSTRON model 1186. Na obou strojích byla rychlost zatěžování 20mm/min při zatěžovací síle do 100 kN.

Výsledky těchto zkoušek byly zpracovány do tab.č.2 a grafů č.1, 2, 3 a dle vzorců /4/ /5/.

Hodnoty uvedené v tabulce a grafech byly vypočteny průměrem ze všech tří měření pro každou teplotu a dobu ohřevu.

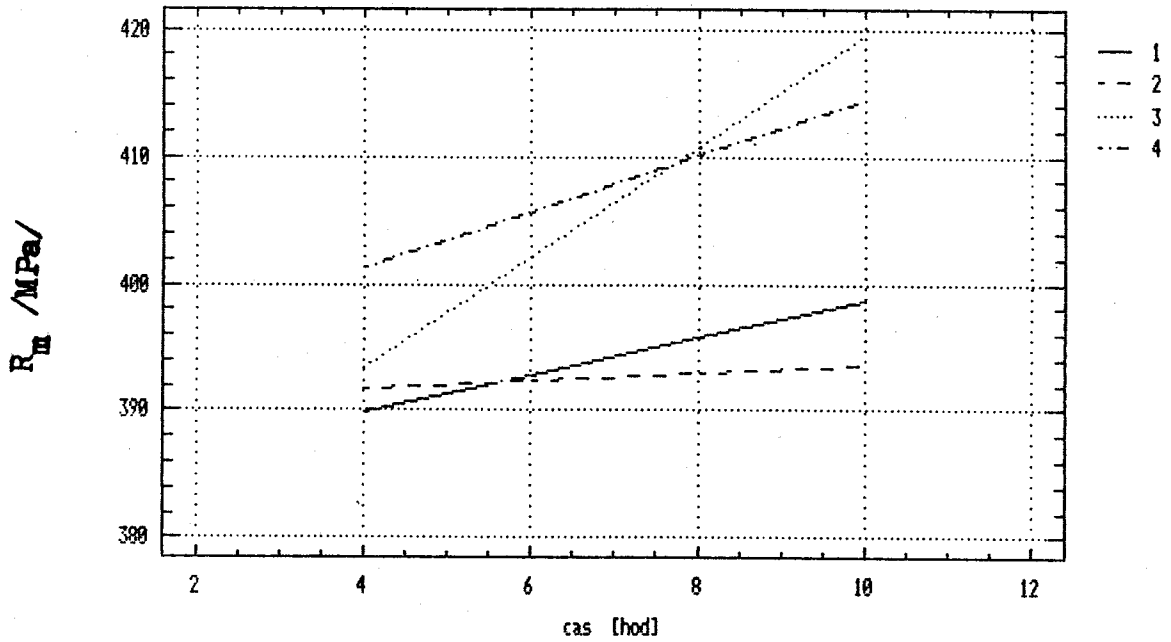
Tab.2 Hodnoty zkoušek tahem na vzorcích bez předchozího mechanického zpracování s konstantní prodlevou mezi kalením a vytvrzením.

Rozměry vzorků $\phi$ 18x t1.2mm: $S_0 = 100,5 \text{ mm}^2$ : $L_0 = 110\text{mm}$			
Označení vzorku	Rm/MPa/	Rp <sub>02</sub> /MPa/	A /%/
A - I.	389,6	220,6	24,5
A - II.	394,0	220,3	24,2
A - III.	394,3	228,0	26,6
A - IV.	399,3	225,6	25,8
B - I.	392,3	261,0	20,6
B - II.	396,0	263,3	21,1
B - III.	384,0	265,5	22,7
B - IV.	398,3	265,0	23,3
C - I.	395,3	213,6	23,9
C - II.	398,6	234,6	23,6
C - III.	412,3	240,3	23,6
C - IV.	419,6	259,3	20,6
D - I.	401,3	266,6	22,1
D - II.	406,6	270,0	18,5
D - III.	408,6	271,0	16,7
D - IV.	415,0	274,6	16,7

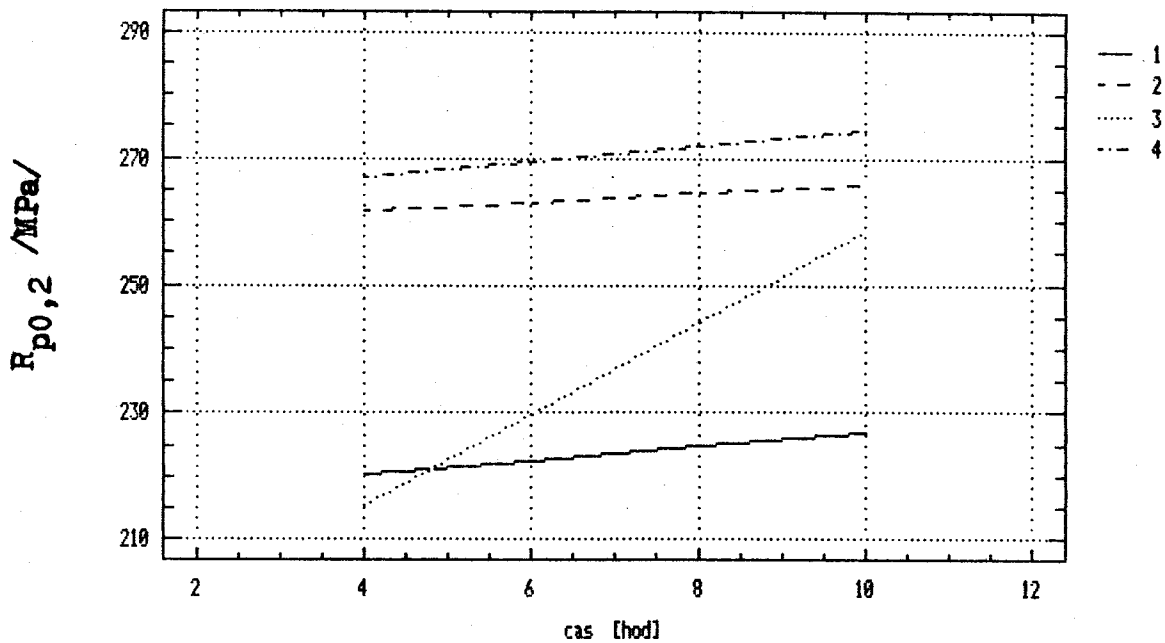
Klíč k určení teploty vytvrzování a doby výdrže vzorků:

A = 140 stupňů C	I. = 4 hodiny
B = 150 stupňů C	II. = 6 hodin
C = 160 stupňů C	III. = 8 hodin
D = 170 stupňů C	IV. = 10 hodin

Teploty křivek : 1=140°C, 2=150°C, 3=160°C, 4=170°C

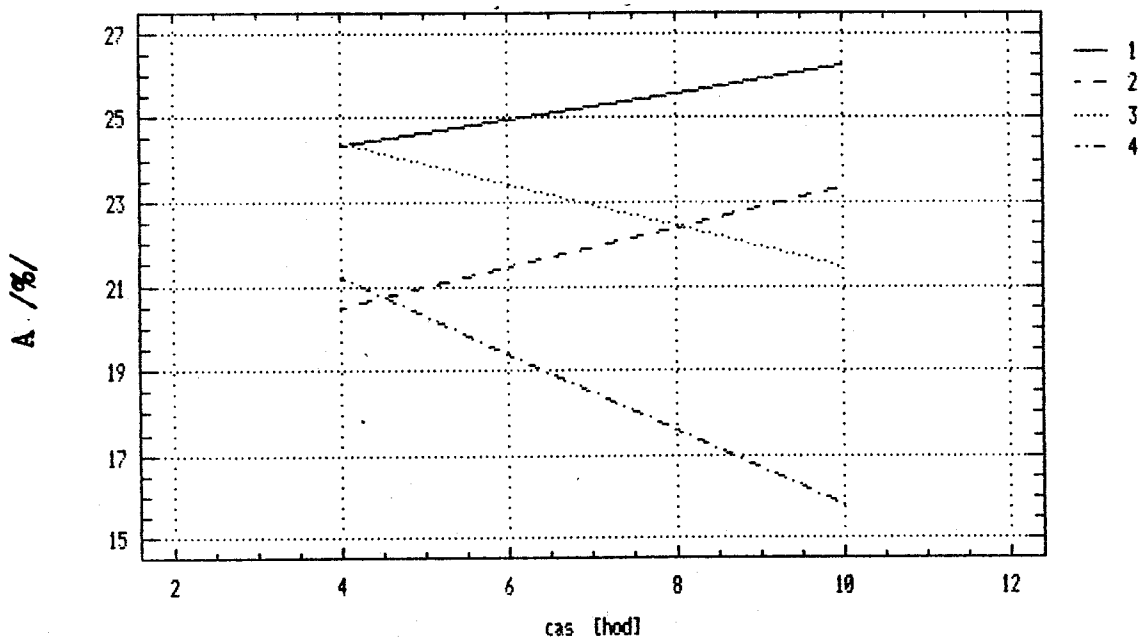


Graf č.1. Závislost  $R_m$  na teplotě vytvrzování a době výdrže bez deformačního zpevnění vzorků



Graf č.2. Závislost  $R_{p0,2}$  na teplotě vytvrzování a době výdrže bez deformačního zpevnění vzorků





Graf č.3. Závislost tažnosti na teplotě vytvrzování a době výdrže bez deformačního zpevnění

Graf č.1. znázorňuje závislost  $R_m$  na teplotě vytvrzování a době výdrže u vzorků bez deformačního zpevnění před tepelným zpracováním. Nejvyšších hodnot  $R_m$  bylo docíleno při teplotě 160 stupňů C s dobou výdrže 8 - 10 hodin. Tato teplota byla však už méně vhodná pro hodnotu  $R_p$  (viz graf 2) pro kterou byla nejvýhodnější teplota 170 stupňů C.

Hodnoty  $R_p$  při nižších teplotách neodpovídají normě DIN 1725. Nejvyšší hodnoty tažnosti byly zjištěny při teplotě 140 stupňů C v celém rozmezí doby výdrže (4 - 10 hod) dle grafu č.3. Vzhledem k tomu, že minimální hodnota tažnosti je dle DIN 1725 6%, vyhovovaly všechny vytvrzovací teploty tomuto požadavku.

Pro další část experimentu byla zvolena optimální teplota vytvrzování 160 stupňů C s dobou výdrže 7 hodin pro nejstálější sledované mechanické hodnoty.

### 3.5. VLIV PRODLEVY MEZI KALENÍM A VYTVRZENÍM

Tato kapitola měla za úkol zjistit vliv prodlevy mezi kalením a vytvrzováním (opět bez mechanického zpracování po zakalení) na mechanické vlastnosti zkoušených vzorků.

Vzorky byly připraveny stejným způsobem jako v kapitole 3.4. o stejných rozměrech  $\varnothing$  18mm x tl.2mm. Rozpouštěcí ohřev s následným ochlazením do vody byl proveden za stejných podmínek jako v kapitole 3.4.

Po této přípravě vzorků byly tyto podrobeny různé časové prodlevě za teploty okolí mezi kalením a vytvrzováním - 1 hod, 4 hod., 10 hodin, 1 den, 2 dny, 3 dny, 7 dnů a 10 dnů. Po časových prodlevách proběhlo na vzorcích vytvrzení (pec CHIRANA STE/1) při teplotě pece 160 stupňů C po dobu 7 hodin. Jako v předchozím případě byly připraveny 3 vzorky pro každou časovou prodlevu. Pro kontrolu byly připraveny dva vzorky jen zakalené s časovou prodlevou za teploty okolí tři dny bez vytvrzení.

Příprava vzorků před zkouškou tahem proběhla dle kap.3.2. Trhací zkoušky byly prováděny na strojích VEB THURINNGER INDUSTRIEWERK RAUENSTEIN 11/2612 (dva první vzorky) a INSTRON model 1186 (třetí vzorek), zatěžovací rychlosti 20mm/min při zatěžovací síle do 100kN.

Výsledky byly zpracovány v tabulce č.3 a grafech č.4 5 6 ze zprůměrovaných výsledků tří měření pro danou časovou prodlevu dle vzorců /4/ a /5/.

Tab.3. Hodnoty zkoušek tahem na vzorcích s proměnnou časovou prodlevou mezi kalením a vytvrzením.

Rozměry vzorků $\varnothing 18 \times t1.2\text{mm}$ , $S_0 = 100,5\text{mm}^2$ $L_0 = 110\text{mm}$			
Číslo vzorku	$R_m/\text{MPa}/$	$R_{p0,2} / \text{MPa}/$	A/%/
1	364,6	200,0	18,5
2	356,6	200,3	13,4
3	365,3	197,6	18,7
4	371,6	200,3	21,2
5	374,0	204,3	16,0
6	373,3	205,6	20,3
7	365,6	214,0	13,7
8	374,6	201,6	17,6
9	313,5	170,5	17,3

Klíč k určení časové prodlevy vzorků:

Vzorek č.1 = 1 hod.

č.2 = 4 hod.

č.3 = 10 hod.

č.4 = 24 hod.

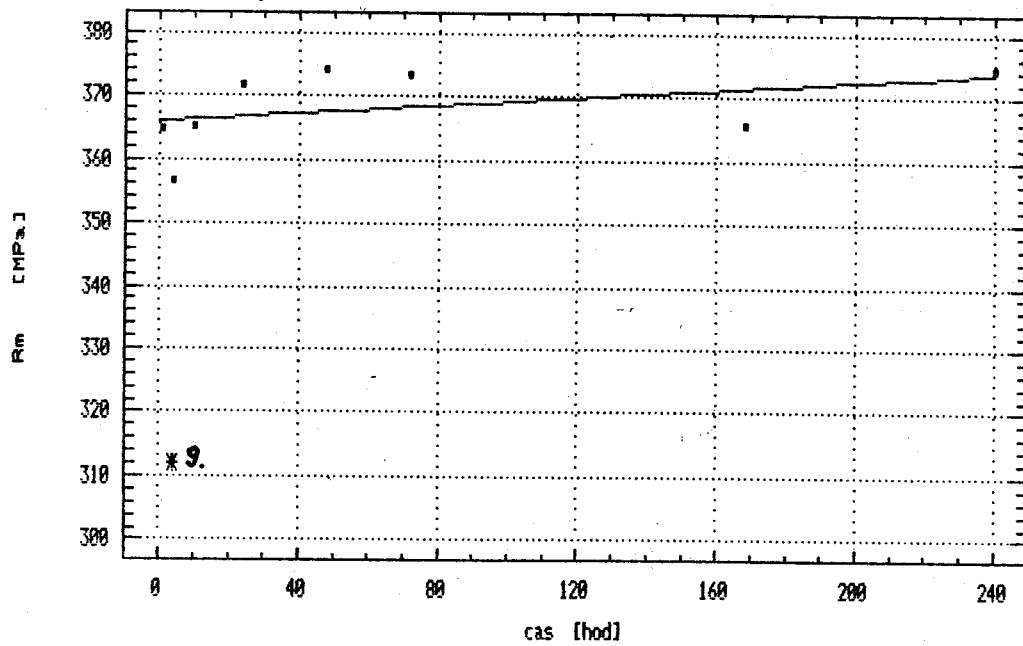
č.5 = 48 hod.

č.6 = 72 hod.

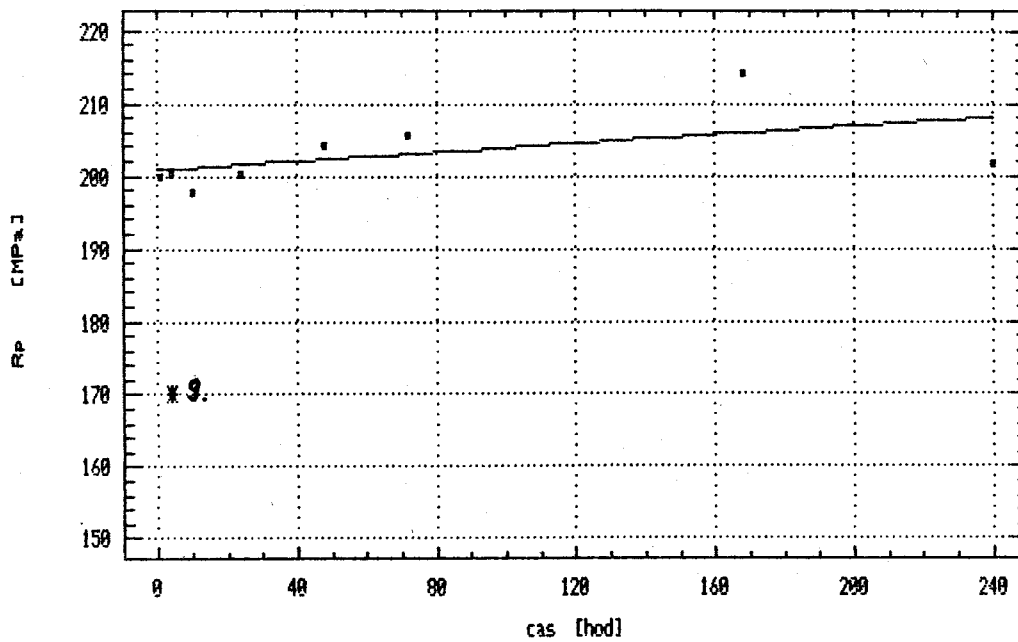
č.7 = 168 hod.

č.8 = 240 hod.

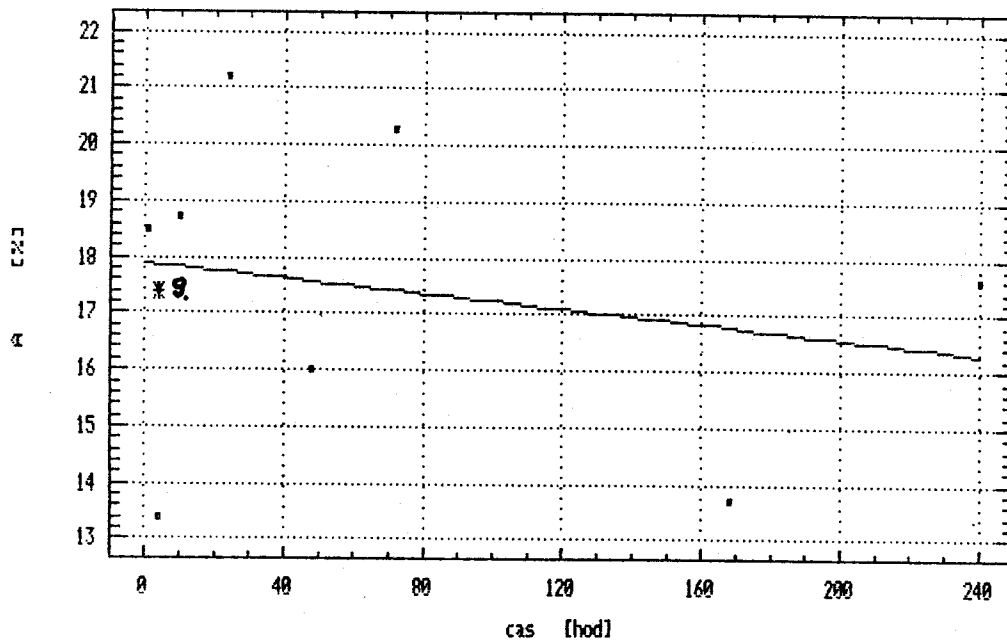
č.9 = 72 hod. bez vytvrzení



Graf č. 4 Závislost  $R_m$  na časové prodlevě mezi kalením a vytvrzováním



Graf č. 5 Závislost  $R_{p0.2}$  na časové prodlevě mezi kalením a vytvrzováním



Graf č.6 Závislost tažnosti na časové prodlevě mezi kalením a vytvrzováním

Grafy č.4 a 5 popisují závislosti zjištěných mechanických hodnot  $R_m$ ,  $R_p$  a  $A$  na časové prodlevě mezi kalením a vytvrzováním vzorků, které opět nebyly deformačně zpevněny v této časové prodlevě.

Z těchto průběhů bylo zřejmé, že časová prodleva mezi kalením a vytvrzováním nemá praktický význam, protože naměřené hodnoty nedosahovaly podstatných rozdílů.

Bod č.9 označuje hodnoty naměřené na vzorcích jen zakalených a nevytvrzených s časovou prodlevou 72 hodin. Tyto hodnoty byly podstatně nižší než hodnoty vzorků vytvrzených a z nich je zřejmý důvod použití vytvrzování.

### 3.6. VLIV TVÁŘENÍ ZA STUDENA MEZI KALENÍM A VYTVRZOVÁNÍM

V závěrečné části experimentu byl zkoumán vliv deformace tvářením za studena mezi kalením a vytvrzováním na mechanické hodnoty zkoušených vzorků.

Příprava trubek a zakalení proběhlo jako u předchozích dvou kapitolách (3.4. a 3.5.) jen s tím rozdílem, že vnější průměr trubek byl 24,25mm a tloušťka stěny 2mm. Ihned po vychladnutí trubek po zakalení byla provedena 20% redukce rozměru trubek z  $\varnothing$  24,25mm na  $\varnothing$  19,4mm při zachování tloušťky stěny 2mm a to protažením na protahovačce z Přerovských strojírny typ TS 03/0331.12.

Z takto zpracovaných trubek byly nařezány vzorky o délce 20cm. Po dvou dnech prodlevy za teploty okolí bylo provedeno vytvrzení vzorků (pec CHIRANA STE/1) při teplotách 130, 140, 150, 160 stupňů C po dobu 2,4 a 6 hodin. Poslední 3 vzorky byly vytvrzeny při teplotě 170 stupňů C po dobu 8 hodin.

Příprava vzorků na trhací zkoušku (kap.3.2.) a samotné trhací zkoušky proběhly stejným způsobem jako v kapitolách 3.4. a 3.5. na stejných strojích za stejných podmínek.

Výsledky trhacích zkoušek byly zpracovány v tabulce č. 4 a grafech č.7, 8, 9, opět ze zprůměrovaných výsledků tří měření pro příslušnou teplotu vytvrzení a dobu výdrže dle vzorců /4/ a /5/.

Tab.4. Hodnoty zkoušek tahem na vzorcích tvářených za studena mezi kalením a vytvrzováním.

Rozměry vzorků  $\varnothing$  19,4 x tl. 2mm :  $S_0 = 107,4\text{mm}^2$  :  $L_0 = 120\text{mm}$

Označení vzorku	$R_m$ /MPa/	$R_{P_{0,2}}$ /MPa/	A/%/
A - I.	382,3	332,3	11,6
A - II.	402,0	360,5	13,3
A - III.	417,0	345,0	13,0
B - I.	398,5	344,0	13,7
B - II.	417,3	350,6	12,5
B - III.	423,0	348,0	13,6
C - I.	408,0	339,3	13,8
C - II.	422,3	350,0	13,6
C - III.	423,3	350,3	13,7
D - I.	417,3	344,0	12,9
D - II.	423,5	356,5	11,9
D - III.	442,5	419,0	9,2
E - IV.	411,0	343,5	8,3

Klíč k určení teploty vytvrzování a doby výdrže vzorků:

A = 130 stupňů C

I. = 2 hodiny

B = 140 stupňů C

II. = 4 hodiny

C = 150 stupňů C

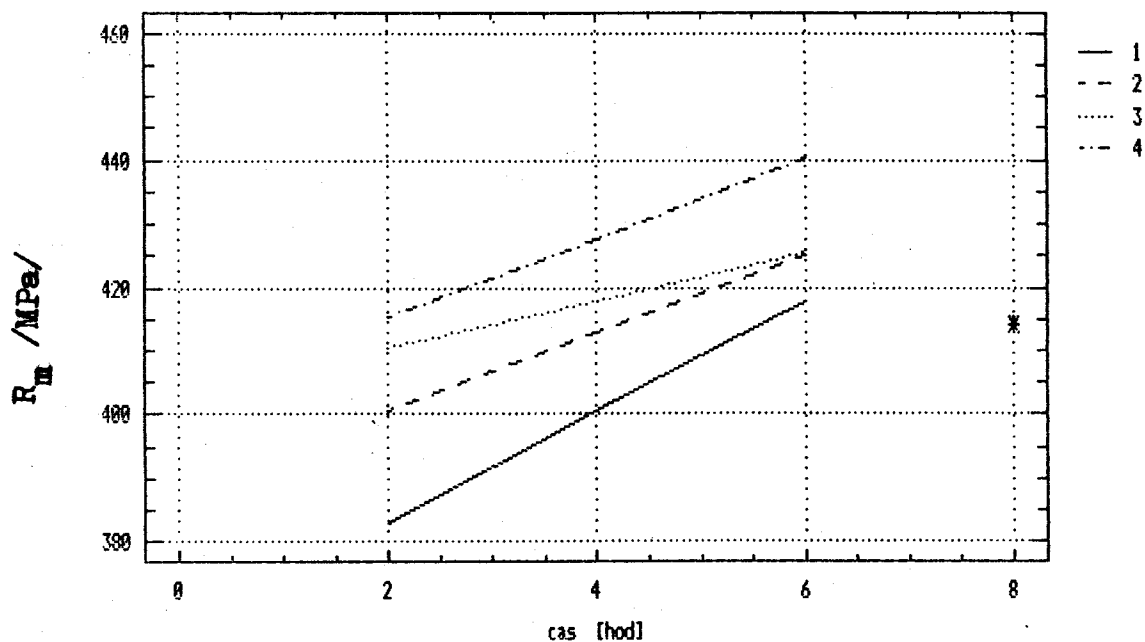
III. = 6 hodin

D = 160 stupňů C

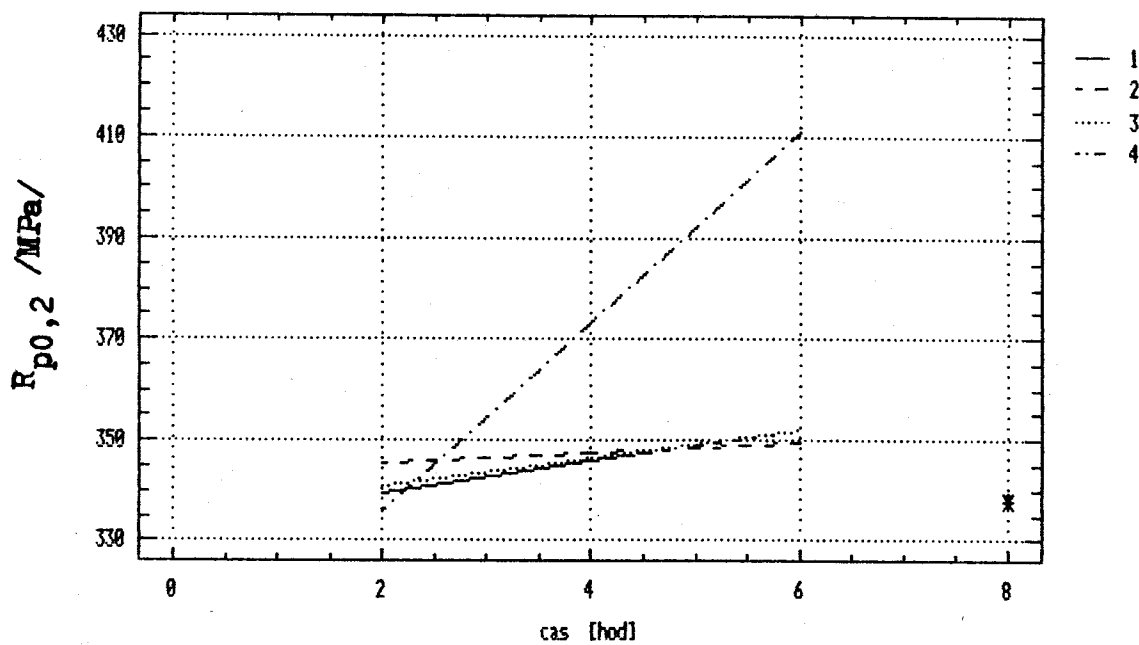
IV. = 8 hodin

E = 170 stupňů C

Teploty křivek : 1=130°C, 2=140°C, 3=150°C, 4=160°C

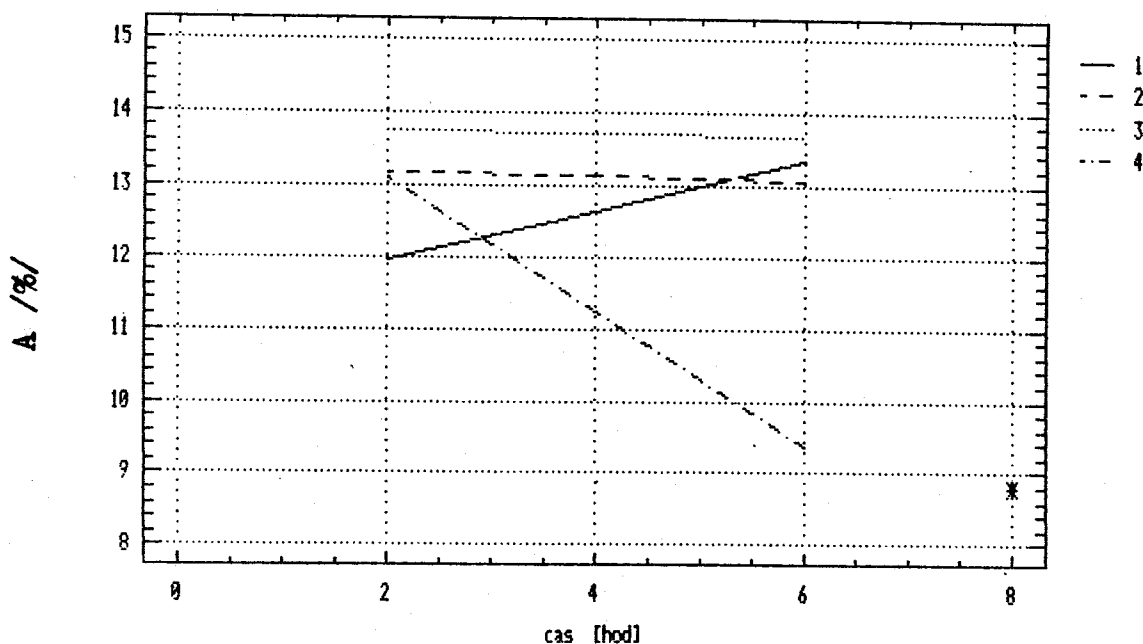


Graf č.7. Závislost R<sub>m</sub> na teplotě vytvrzení a době výdrže s deformačním zpevněním vzorků



Graf č.8. Závislost R<sub>p0,2</sub> na teplotě vytvrzení a době výdrže s deformačním zpevněním vzorků





Graf č.9. Závislost tažnosti na vytvrzovací teplotě a době výdrže s deformačním zpevněním vzorků

Z grafů č.7 a 8 je patrný vliv deformačního zpevnění (20% redukce průměru) mezi kalením a vytvrzováním vzorků a to podstatným zvýšením naměřených hodnot  $R_m$  a  $R_{p0,2}$ . Nejvyšších hodnot bylo dosaženo při vytvrzovací teplotě 160 stupňů C s dobou výdrže 6 hodin.

Tažnost se oproti vzorkům bez deformačního zpevnění snížila (viz graf č.9), ale opět všechny naměřené hodnoty tažnosti byly větší než předepsaných 6%.

Bod odpovídá naměřeným hodnotám pro vzorek deformačně zpevněný s vytvrzovací teplotou 170 stupňů C a dobou výdrže 8 hodin.

Výsledky ukázaly, že zvýšením teploty vytvrzení a doby výdrže se nedosáhlo zvýšení zkoumaných mechanických vlastností.

#### 4. DISKUSE VÝSLEDKŮ

Vyhodnocování výsledků měření probíhalo průběžně po každé části experimentu z důvodu návaznosti jednotlivých kapitol. Při průběžném hodnocení byly grafy vytvořeny přímkovým pospojováním naměřených hodnot. Tyto grafy byly velmi zkreslené, proto pro závěrečné vyhodnocení grafů byl použit program STATGRAPHIC verze 4.0 s lineární interpolací. Pro výpočet koeficientů byla užita metoda nejmenších čtverců. Zde došlo k menšímu rozdílu při průběžném vyhodnocování výsledků a konečném zpracování výsledků měření na počítači.

Při průběžném vyhodnocení výsledků v kap.3.4. bylo zřejmé, že se vzrůstající teplotou vytvrzení a se vzrůstající dobou výdrže rostou hodnoty  $R_m$  a  $R_{p0,2}$ , ale klesá tažnost. Při nižších teplotách vytvrzení nebyly docíleny požadované mechanické vlastnosti. Pro další část experimentu (kap.3.5.) byla z těchto hodnot zvolena teplota vytvrzení 160 stupňů C s časovou výdrží 7 hodin na této teplotě. Při průběžném hodnocení vykazovaly naměřené hodnoty za těchto podmínek nejstálejší průběh. Avšak po konečném zhodnocení této kapitoly bych doporučoval pro vytvrzování trubek bez deformačního zpevnění teplotu vytvrzování 170 stupňů C s dobou výdrže 8-10 hodin.

S ohledem na provozní podmínky v závodě bych doporučil dobu výdrže na teplotě 170 stupňů C 8 hodin, aby toto tepelné zpracování mohlo být provedeno v jedné směně.

Výsledky naměřené v kap.3.5. naznačily mírný vzestup hodnot  $R_m$  a  $R_{p0,2}$  a mírný pokles tažnosti v závislosti na stoupající časové prodlevě mezi kalením a vytvrzováním vzorků bez deformačního zpevnění. Rozdíly v naměřených hodnotách však nejsou tak markantní, což pro praxi znamená, že na časové prodlevě mezi kalením a vytvrzením příliš nezáleží. Přesto bych doporučil používat tuto časovou prodlevu 2 až 3 dny.

Zde se ukázalo jako nevhodné použití teploty vytvrzení

160 stupňů C s dobou výdrže 7 hodin, protože dosahované mechanické hodnoty nedosahovaly minimálních hodnot předepsaných pro slitinu AlCuPbBi normou DIN 1725, kromě tažnosti, která tuto normu splňuje.

Doporučoval bych provedení dalších zkoušek se stejnou časovou prodlevou, ale s teplotou vytvrzování 170 stupňů C a dobou výdrže 10 hodin.

Důležitým faktem bylo zjištění mechanických hodnot na vzorcích jen zakalených a nevytvrzovaných. Bez vytvrzení vzorků byly hodnoty  $R_m$  a  $R_{p0,2}$  podstatně nižší než u vzorků vytvrzených. Z těchto měření vyplynul další zajímavý fakt, a to že vytvrzení vzorků nemá podstatný vliv na hodnoty tažnosti, které zůstávají přibližně ve stejném rozmezí, ale je důležité pro zvýšení hodnot  $R_m$  a  $R_{p0,2}$ .

V kap. 3.6. byl splněn předpoklad, že deformační zpevnění vzorků by mělo přispět ke zvýšení hodnot  $R_m$  a  $R_{p0,2}$ . Naměřené hodnoty  $R_m$  a  $R_{p0,2}$  tento předpoklad splnily. Tažnost se sice deformačním zpevněním snížila více než v kap. 3.4 a 3.5., ale všechny hodnoty tažnosti odpovídaly předepsané normě DIN 1725.

Z výsledků vzorku E - IV. lze usoudit, že zvyšování teplot vytvrzení nad 160 stupňů C a doby výdrže při vyšších teplotách větších než 6 hodin není nutné, protože se již mechanické vlastnosti nezlepšují, ba právě naopak snižují. Ze zjištěných poznatků kap. 3.6. bych doporučovat teplotu vytvrzení a deformačně zpevněných vzorků 160 stupňů C s dobou výdrže 6 hodin.

Pro další výzkum by bylo vhodné provést další zkoušky při stejných vytvrzovacích teplotách (do 160 stupňů C), ale s delší dobou výdrže např. 8, 10, 12 hod., protože z provedených zkoušek není patrné, zda jsou naměřené hodnoty maximální nebo jestli by následoval ještě další vzestup (resp. pokles) těchto hodnot.

Výsledky všech měření byly prováděny v laboratorních podmínkách, což je důležité. V hromadné výrobě je nutné brát v úvahu citlivost regulace pece, jestli je zaručeno

rovnorné prohřátí celého objemu zpracovávaného materiálu a zejména u velkých kusů, které mohou způsobit krátkodobé snížení teploty vytvrzování v peci nebo lázni, a tím snížení doby výdrže na požadované teplotě. Proto bych doporučoval při vytvrzování větších objemů materiálu v hromadné výrobě prodloužit všechny doporučené doby výdrže na daných teplotách o 1 hodinu pro přesnější dodržení podmínek vytvrzování.

## 5. ZÁVĚR

Tempo vývoje hliníkových slitin a jejich tepelné zpracování se stále zrychluje, protože je nutné více využívat stávajících surovinových zdrojů a z tohoto důvodu zefektivnit využití těchto materiálů s ohledem na jejich přednosti.

Seznámením s problematikou tepelného zpracování hliníkové slitiny AlCuPbBi se zabývala tato diplomová práce, která prověřila vliv vytvrzovací teploty s dobou výdrže na této teplotě, vliv prodlevy mezi kalením a vytvrzováním a vliv deformačního zpevnění na mechanické hodnoty zkoušených trubek z této slitiny.

Ze získaných výsledků měření byly navrženy optimální způsoby vytvrzování a optimální časová prodleva mezi kalením a vytvrzováním (viz kap.3.5.).

Pro další výzkum v této oblasti bych doporučil ještě podrobnější zkoušky navržených optimálních řešení, a to např. použití většího počtu dob výdrže na vytvrzovací teplotě (2, 3, 4, 5.....10, 11, 12 hod.) pro přesnější vyhodnocení a zjištění průběhů sledovaných mechanických vlastností.

Správnost výsledků zjištěných a doporučených v této diplomové práci by mělo ukázat praktické využití těchto závěrů v provozu hromadné výroby.

## 6. PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY

1. CENEK, M. - JENÍČEK, L. : NAUKA O MATERIÁLU I. NEŽELEZNÉ KOVY. PRAHA, ACADEMIA 1973
2. CHVOJKA, J. - BRZOBOHATÝ, M. : ZPRACOVÁNÍ A POUŽITÍ HLINÍKU A JEHO SLITIN. PRAHA, SNTL 1961
3. KOLEKTIV ČESKOSLOVENSÝCH, MAĎARSKÝCH, NĚMECKÝCH A POLSKÝCH AUTORŮ: PŘÍRUČKA O HLINÍKU. PRAHA, SNTL 1969
4. PLUHAŘ, J. A KELEKTIV: NAUKA O MATERIÁLECH. PRAHA, SNTL 1989
5. SEDLÁČEK, V. : NEŽELEZNÉ KOVY A SLITINY. PRAHA, SNTL 1979
6. AGEEV, H. B. : DIAGRAMMY SOSTOJANINJA METALLIČESKICH SISTEM. MOSKVA, VYDAVATELSTVÍ ZAHRANIČNÍ LITERATURY 1970
7. PLUHAŘ, J. - PUŠKÁR, A. - KOUTSKÝ, J. - MACEK, K. - BENEŠ, V. : FYZIKÁLNÍ METALURGIE A MEZNÍ STAVY MATERIÁLU. PRAHA, SNTL 1987
8. ŠPERLINK, K. : VÝZKUM Vlivu PLASTICKÉ DEFORMACE NA KINETIKU STÁRNUTÍ A VÝSLEDNÉ VLASTNOSTI VÝLISKŮ Z Al SLITIN (VÚK-31/73). PANENSKÉ BŘEŽANY 1973
9. NEŽELEZNÉ KOVY. TECHNICKO EKONOMICKÝ ZPRAVODAJ. PANENSKÉ BŘEŽANY, VÚK 1990