

# České vysoké učení technické v Praze

**Fakulta strojní**

**Ústav materiálového inženýrství**



**Materiálové charakteristiky hliníkových odlitků v tlaku**

**Material characteristics of aluminium castings in pressure**

Bakalářská práce

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Studijní obor: bez oboru

Vedoucí práce: Ing. Jakub Horník, Ph.D.

**Michaela Krátká**

**Praha 2017**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Krátká** Jméno: **Michaela** Osobní číslo: **438594**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Materiálové charakteristiky hliníkových odlitků v tlaku**

Název bakalářské práce anglicky:

**Material characteristics of aluminium castings in pressure**

Pokyny pro vypracování:

1. Teoretická příprava a studium odborné literatury.
  2. Vlastnosti a mikrostruktura Al slitin se zaměřením na automobilový průmysl a problematiku tlakového lití.
  3. Návrh a provedení experimentu - zjištění mechanických vlastností a metalografická analýza dodaných vzorků.
  4. Vyhodnocení experimentu, diskuse, závěry.
- Rozsah průvodní zprávy: 30 až 40 stran  
Rozsah grafických prací a příloh: dle potřeby

Seznam doporučené literatury:

- [1] ASM Speciality Handbook: Aluminium and Aluminium Alloys, Editor: Joseph R. Davis, ISBN 978-0-87170-496-2
- [2] Michna, Š, et. al. Encyklopedie hliníku. Prešov: Adin, 2005. ISBN 80-89401-88-4
- [3] Sedláček, V.: Neželezné kovy a slitiny. 1. vyd., Praha, SNTL, 1979

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

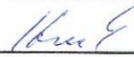
**Ing. Jakub Horník Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS**


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **24.04.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

  
Podpis vedoucí(ho) práce

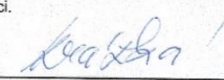
  
Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.  
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

26.4.2017  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studentky

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a uvedla jsem všechny použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne:

Michaela Krátká

### Poděkování

Děkuji tímto vedoucímu své bakalářské práce Ing. Jakubu Horníkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, a především za jeho vstřícnost a čas. Dále děkuji firmě MANN+HUMMEL Service s.r.o a jejím zaměstnancům Ivo Řehákovi za poskytnutí vzorků, jeho čas a pomoc při konzultování a Hynku Trnkovi za výrobu použitých vzorků.

## **Anotace**

Tato bakalářská práce se zabývá hodnocením mechanických vlastností hliníkových odlitků. Hlavním cílem této práce je určení vlastností slitiny AlSi9Cu3(Fe) v tlaku. Dále se práce zabývá vlastnostmi v tahu a strukturou odlitku. Teoretická část popisuje hliník a jeho slitiny, jejich výrobu, zpracování a využití, možnosti mechanického a mikroskopické zkoušení materiálu. V experimentální části jsou zapsány výsledky testování vyrobených vzorků. Na základě získaných vzorků byla provedena simulace MKP pro reálný odlitek.

## **Anotation**

This bachelor thesis describes evaluation of mechanical properties of aluminium castings. The main goal of this work is to determine properties of AlSi9Cu3(Fe) alloy in pressure. This thesis also deals with characteristics in tension and with microstructure of casting. Teoretical part describes aluminium and its alloys, their production, processing and use, possibilities of mechanical and microscopical testing of material. In experimental part results of testing of produced samples are recorded. On the base of this results FEA for real casting were made.

## **Klíčová slova**

AlSi9Cu3(Fe), tlakový odlitek, zkoušení materiálu, tahová zkouška, tlaková zkouška, metalografie

## **Key words**

AlSi9Cu3(Fe), pressure casting, testing of material, tension test, pressure test, metalography

KRÁTKÁ, Michaela. 2017. *Materiálové charakteristiky hliníkových odlitků v tlaku*. Praha. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Jakub Horník, Ph.D.

# Obsah

1	Úvod.....	7
2	Seznam zkratk a symbolů.....	8
3	Teoretická část.....	11
3.1	Hliník a jeho slitiny .....	11
3.1.1	Základní informace .....	11
3.1.2	Zpracování.....	14
3.1.3	Použití.....	16
3.1.4	AlSi9Cu3(Fe) .....	17
3.2	Zkoušení materiálu .....	18
3.2.1	Rozdělení.....	18
3.2.2	Zkouška pevnosti v tahu.....	20
3.2.3	Zkouška pevnosti v tlaku.....	25
3.2.4	Metalografická analýza .....	29
4	Experimentální část.....	34
4.1	Tahová zkouška .....	34
4.2	Tlaková zkouška.....	36
4.3	Metalografická analýza.....	40
5	Výsledky a jejich diskuse .....	43
5.1	Tahová zkouška .....	43
5.2	Tlaková zkouška .....	47
5.3	Metalografická analýza.....	51
5.4	Aplikace výsledků do modelu MKP .....	52
6	Závěr.....	53
7	Literatura .....	54
8	Seznam obrázků .....	56

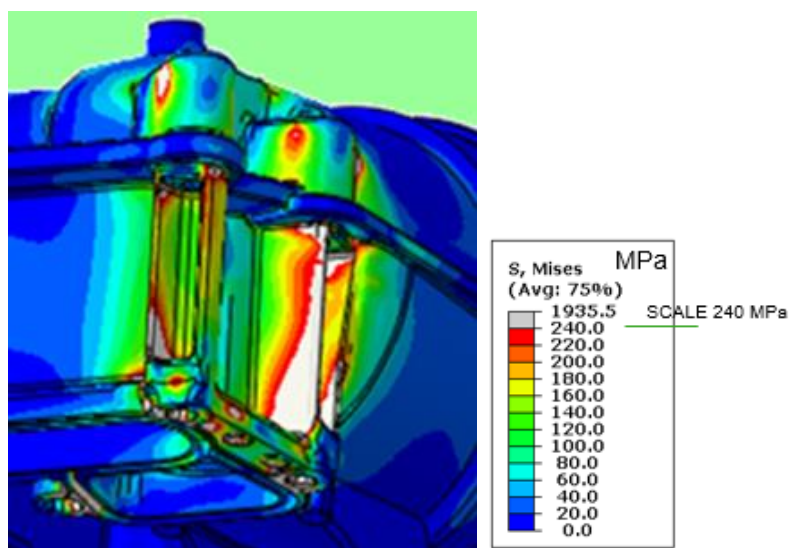
# 1 Úvod

Při navrhování konstrukcí je potřeba brát v úvahu materiálové charakteristiky dané slitiny, ze které se bude vyrábět. A proto je velice důležité znát přesnou hodnotu například meze pevnosti, aby se už při navrhování výrobku vzalo v potaz, zda daný materiál vydrží zatížení, které na něj bude v provozu vyvíjeno.

Počítačové simulace mohou být jednou z operací prováděných při návrhu výrobku. Pro tyto simulace se používají charakteristiky daného materiálu pro porovnání s napětím, které v odlitku vzniká.

Firma MANN+HUMMEL Service s.r.o. chtěla provést simulace účinků tlaku na jeden z jejich výrobků. Materiálové listy ovšem tlakové charakteristiky materiálu  $AlSi9Cu3(Fe)$  neuvádí, a proto nemohlo být provedeno porovnání napětí na odlitku s hodnotou napětí na mezi kluzu v tlaku.

Simulace tedy byla porovnána s tahovými hodnotami. Na simulaci napjatosti v odlitku se vyskytlo několik problematických míst (obrázek 1). Jedná se o místa, kde se modul uchycuje pomocí šroubů ke konstrukci vozidla. Odlitky ovšem byly již v provozu vyzkoušeny a nedošlo k jejich poškození.



Obrázek 1 – Kritická místa odlitku

Aby bylo možné toto srovnání provést přesněji, bylo nutné tlakové hodnoty slitiny zjistit, což je tedy cílem této práce. Tahová zkouška se provede pro porovnání s hodnotou uvedenou v normě. Další prováděnou zkouškou je mikroskopická analýza pro posouzení přítomnosti porezity a vad materiálu.



## 2 Seznam zkratek a symbolů

Zkratka/symbol	význam	jednotka
$\Delta L$	prodloužení	[mm]
$\Delta S$	změna plochy průřezu	[mm <sup>2</sup> ]
$\varepsilon$	smluvní deformace v tahu	[-]
$\varepsilon_t$	smluvní deformace v tlaku	[-]
$\sigma$	skutečné napětí v tahu	[MPa]
$\sigma_t$	skutečné napětí v tlaku	[MPa]
$\varphi$	skutečná deformace v tahu	[-]
A	tažnost	[%]
$A_t$	mezní poměrné stlačení	[%]
Al	hliník	
$Al_2O_3$	oxid hlinitý	
Cr	chrom	
Cu	měď	
$d_0$	počáteční průměr	[mm]
E	modul pružnosti v tahu	[MPa]
$E_c$	modul pružnosti v tlaku	[MPa]
F	síla	[N]
$F_e$	síla na mezi kluzu v tahu	[N]
$F_{et}$	síla na mezi kluzu v tlaku	[N]
$F_m$	síla na mezi pevnosti v tahu	[N]
$F_{mt}$	síla na mezi pevnosti v tlaku	[N]
$F_{p0,2}$	síla na smluvní mezi kluzu v tahu	[N]

<b>Zkratka/symbol</b>	<b>význam</b>	<b>jednotka</b>
$F_{pt0,2}$	síla na smluvní mezi kluzu v tlaku	[N]
Fe	železo	
h	okamžitá výška	[mm]
$h_0$	počáteční výška	[mm]
HB	tvrdost podle Brinella	
HBS	tvrdost podle Brinella při použití kuličky z kalené oceli	
H <sub>2</sub> O	voda	
L	okamžitá délka	[mm]
$L_0$	počáteční délka	[mm]
$L_u$	konečná délka	[mm]
Mg	hořčík	
MKP	metoda konečných prvků	
Mn	mangan	
Ni	nikl	
Pb	olovo	
R	smluvní napětí	[MPa]
$R_e$	smluvní napětí na mezi kluzu v tahu	[MPa]
$R_{et}$	smluvní napětí na mezi kluzu v tlaku	[MPa]
$R_m$	smluvní napětí na mezi pevnosti v tahu	[MPa]
$R_{mt}$	smluvní napětí na mezi pevnosti v tlaku	[MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní napětí na smluvní mezi kluzu v tahu	[MPa]
$R_{pt0,2}$	smluvní napětí na smluvní mezi kluzu v tlaku	[MPa]
S	největší plocha průřezu	[mm <sup>2</sup> ]

<b>Zkratka/symbol</b>	<b>význam</b>	<b>jednotka</b>
S <sub>0</sub>	počáteční plocha průřezu	[mm <sup>2</sup> ]
S <sub>u</sub>	nejmenší plocha průřezu	[mm <sup>2</sup> ]
Si	křemík	
Sn	cín	
Ti	titan	
Z	kontrakce	[%]
Z <sub>t</sub>	mezní poměrné rozšíření	[%]
Zn	zinek	

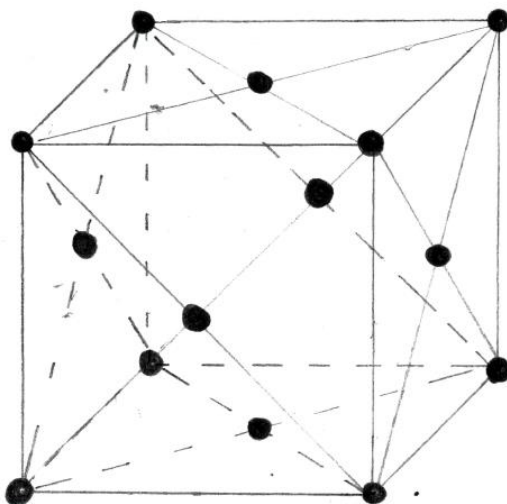
## 3 Teoretická část

### 3.1 Hliník a jeho slitiny

#### 3.1.1 Základní informace

Hliník je stříbrnobílý lesklý kov. V přírodě je prakticky nemožné se s ryzím hliníkem setkat. Jedná se totiž o prvek s vysokou reaktivitou, a proto se zde vyskytuje výhradně ve sloučeninách. Zemská kůra obsahuje 7,47 % hliníku, čímž se dostává na 3. místo v zastoupení prvků v povrchu Země. [2]

Řadíme ho mezi lehké kovy, protože je to neželezný kov o hustotě  $2699 \text{ kg/m}^3$ . Krystalické uspořádání mřížky hliníku je kubické plošně středěné, což znamená, že atomy tohoto kovu se uskupují tak, aby vytvářeli soustavu ve tvaru krychle, která má v každém rohu jeden atom a další atomy se nacházejí na průsečících uhlopříček jednotlivých stěn (obrázek 2). [3]

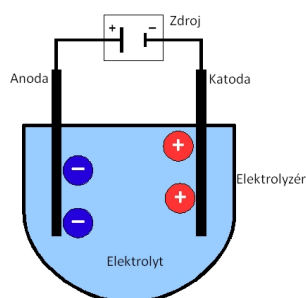


Obrázek 2 – Kubická plošně středěná mřížka

Velmi čistý hliník taje při teplotě  $660 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pevnost v tahu technicky čistého hliníku se pohybuje mezi 40-70 MPa, tažnost může být až 30 %. Vše záleží na čistotě daného kusu. Tvrdost podle Brinella leží v rozmezí 15-23 HB. Tvářením tohoto kovu za studena lze dosáhnout pevnosti až 200 MPa, jeho tažnost poté klesne na 1-2 % a naopak tvrdost se zvedne na 35-40 HB. [1]

Nejčastější surovinou pro jeho výrobu je bauxit ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  + oxidy Fe). Čistý hliník se získá elektrolýzou, což je fyzikálně-chemický jev, při kterém dochází k pohybu iontů v roztoku nebo tavenině k anodě a katodě, jak je vidět na obrázku 3. Záporné ionty, tzv. anionty, jsou

přitahovány k anodě a kladné ionty, tzv. kationty, se pohybují směrem ke katodě. Vše může probíhat pouze tehdy, protéká-li elektrolytem stejnosměrný proud. [1]

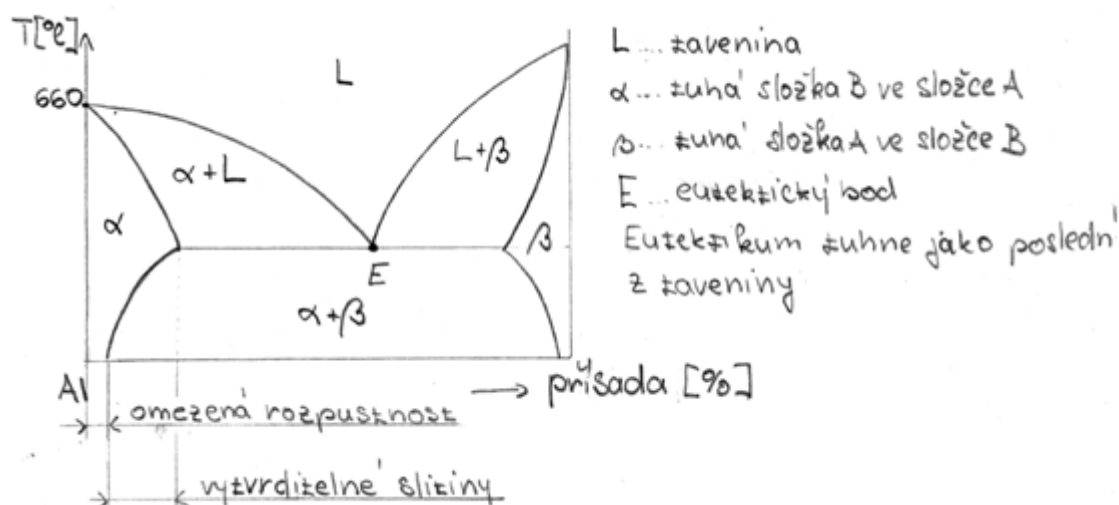


Obrázek 3 – Elektrolýza [18]

Existují dva typy čistého hliníku, a to čistý hliník prvního tavení a čistý hliník druhého tavení. Hliník prvního tavení je takový hliník, který se vyrábí přímo ze surovin, nebo jej můžeme získat z odpadu vzniklého při zpracování polotovarů z čistého hliníku. Přetavením hliníkových odpadů vzniká čistý hliník druhého tavení. [1]

Binární rovnovážný diagram hliníku a některé z příměsí, z něhož můžeme vyčíst fázové a strukturní složky a stav slitiny při dané teplotě, je pro většinu příměsí diagram s omezenou klesající rozpustností v tuhém stavu. To znamená, že po ukončení krystalizace se spolu se snižující teplotou snižuje i rozpustnost jednoho prvku v prvku druhém. Základní tvar tohoto diagramu znázorňuje obrázek 4. Tavenina se při ochlazování mění na tuhý kov. Teplota, kdy k přeměně začne docházet, je závislá na složení taveniny. Pro čisté kovy je typická krystalizace při konstantní teplotě. Při určitém poměru dvou prvků taveniny dochází k přímé

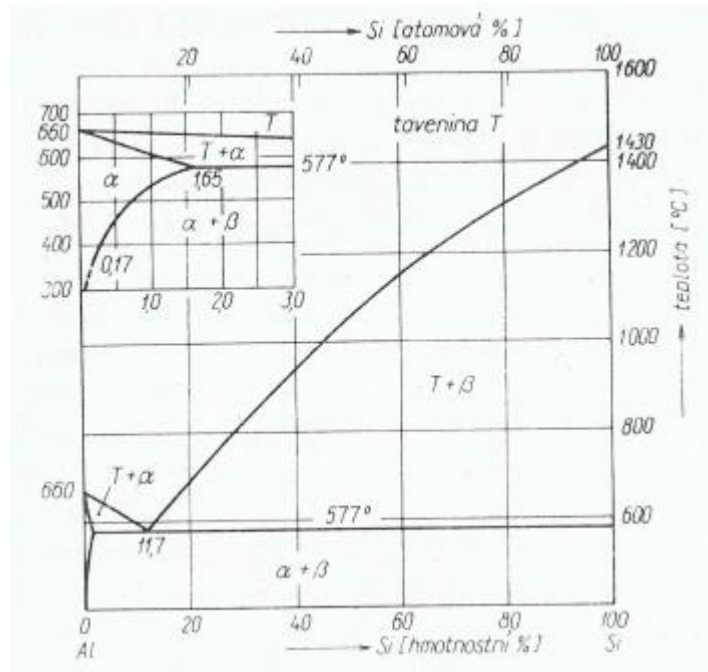
proměně taveniny na směs dvou tuhých složek. Tato přeměna se nazývá eutektická a dochází k ní při jedné konstantní teplotě, jako je tomu u čistých kovů. [3]



Obrázek 4 – Binární rovnovážný diagram se změnou rozpustnosti v tuhém stavu

Některé slitiny, tuhnoucí podle tohoto typu diagramu, lze vytvrdit. Vytvrzování probíhá ve čtyřech fázích. Nejprve se materiál ohřeje do oblasti stabilního tuhého roztoku, následuje rychlé ochlazení přes čáru klesající rozpustnosti a další fází je vznik termodynamicky nestabilního přesyceného tuhého roztoku. Poslední fáze se nazývá stárnutí. Díky času a teplotě se bude přesycený tuhý roztok difuzně rozpadat a vzniknou částice, které se nazývají precipitát. Dislokace, což jsou čárové mřížkové poruchy, se při pohybu setkávají s precipitáty, které jim v jejich posunu zabraňují, a tak se zvyšuje vnitřní napjatost. To vede ke zpevnění slitiny. K vytvrzování jsou vhodné slitiny s obsahem Cu a Mg, zvláště pak se jedná o slitiny k tváření. U slitin na odlitky nedojde k tak výraznému zlepšení vlastností. Slitiny lité tlakem se nevytvrzují vůbec. [1] [3]

Pro různé přísady se rovnovážný diagram mění. Například na obrázku 5 je vyobrazen tento diagram pro slitinu Al-Si.



Obrázek 5 – Rovnovážný diagram soustavy Al-Si [1]

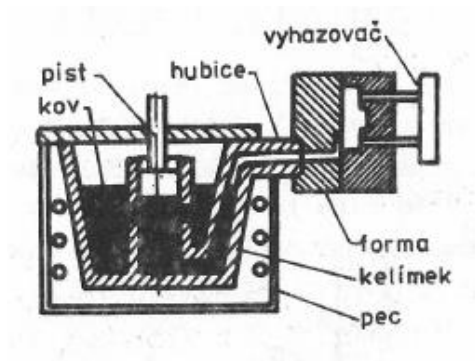
Hliník má dobrou odolnost proti korozi, je totiž chráněn před další oxidací tenkou vrstvičkou odolného nevodivého  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , který se na něm vytváří. Jediná kyselina solná výrazněji narušuje jeho strukturu. Naopak velice výrazně koroduje hliník alkáliemi. Pro zlepšení jeho odolnosti se provádí umělé oksylichování, čímž se zvětší vrstvička  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . [1]

### 3.1.2 Zpracování

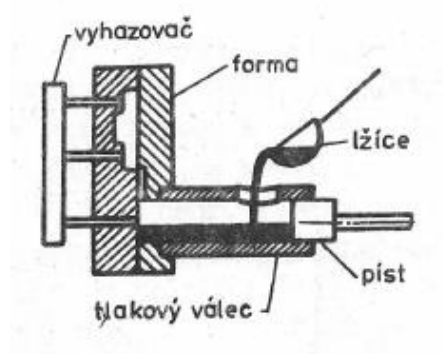
Hliníkové slitiny dělíme na slitiny vhodné k tváření a na slitiny vhodné na odlitky podle prvků, které slitinu tvoří, a jejich koncentrací. Slitiny na odlitky se odlévají třemi způsoby. [1]

Prvním způsobem je lití do kokil, což jsou kovové přípravky, jejichž vnitřní tvar odpovídá požadovanému tvaru odlitku. Při druhém způsobu se odlévá do pískové formy. Poslední způsob se nazývá tlakové lití. [1]

Tlakové lití je způsob odlévání, při kterém je tavenina vtlačována do formy vysokým tlakem. Ten může být až 100 MPa. Je to způsob, jak lze odlévat tvarově složité tenkostěnné odlitky a potřeba následného obrábění kusu je minimální. Takové odlitky se dají vyrábět na dvou typech strojů, jsou to stroje s teplou komorou (obrázek 6) a se studenou komorou (obrázek 7). Pokud se využije stroje s teplou komorou, pak se kov nataví v kelímku, který je součástí stroje. Dále je již tekutý kov dopraven do formy za pomoci pístu. Vstřikovací mechanismus tohoto stroje je silně namáhán teplem, a proto se stroj s teplou komorou používá pouze pro kovy s nízkou teplotou tavení. Do druhého typu stroje se vlévá už roztavený kov. [8]



Obrázek 6 – Stroj s teplou komorou [8]



Obrázek 7 – Stroj se studenou komorou [8]

Tváření hliníku za tepla probíhá při teplotách 450-500 °C. Po tomto procesu má hliník jemnozrnnou strukturu. Nejčastějším tepelným zpracováním technicky čistého hliníku je rekrystalizační žíhání, které se děje při teplotách v rozmezí 290-380 °C. Žíháním se snažíme o dosažení struktury tvořené rovnovážnými fázemi a je pro něj charakteristická malá ochlazovací rychlost. Doba žíhání se pohybuje mezi 2-4 hodinami. Jelikož pomalý ohřev a následné pomalé ochlazování by mohlo způsobit zhrubnutí zrna, umístí se při tomto tepelném zpracování hliník do solné lázně, nebo do elektrické pece s nuceným oběhem vzduchu, která je již předehřátá na žíhací teplotu. Pro snížení vnitřního pnutí se žíhá hliník pod rekrystalizační teplotou, tedy asi při 220-240 °C. Lze jej velmi dobře tvářet i za studena. [1]

Hliník je velmi dobře svařitelný kov. Tavná svařitelnost se dělí do čtyř skupin:

- a) Velmi dobrá: při vhodné svařovací metodě a správně provedeném postupu lze použít na součásti složité tvarové konstrukce nebo na součásti tlustostěnné
- b) Velmi dobrá – podmíněná: té se dosahuje po splnění daných podmínek
- c) Dobrá: na navrhování svarových konstrukcí musí být kladena větší pozornost a musí se počítat s omezeními jak ve složitosti konstrukcí, tak i v tloušťce svařovaného materiálu



- d) Obtížná: svařování se nedoporučuje, nebo se jedná o velmi jednoduché konstrukce a tenké součásti.

Mezi obtížně svařitelné slitiny hliníku řadíme zejména ty s větším obsahem Mg. Měrné teplo a teplotní vodivost hliníku je mnohem větší než u oceli, a proto je na roztavení zapotřebí stejné množství přivedeného tepla, i když jeho teplota tání je nižší. Díky vysoké afinitě hliníku ke kyslíku je nutné při svařování použít ochrannou atmosféru inertního plynu argonu, nebo speciální tavidla z chloridů a fluoridů alkalických prvků. [1]

Hliník vytváří dlouhé, měkké třísky a maže se, proto není vhodný pro obrábění. Pokud by přece jen bylo potřeba hliníkový kus obrobit, je nutné upravit obráběcí nástroje a zvolit velkou řeznou rychlost. [1]

### 3.1.3 Použití

Hliník je dobrý elektrovodič, proto se využívá ve spoustě elektrotechnických aplikací. Používá se při výrobě elektrických vedení vysokého napětí. Ta se skládají z hliníkoocelových elektrovodných lan. Sdružené troleje pro městskou hromadnou dopravu se také vyrábí ze slitiny hliníku stejně tak, jako silnoproudé pevně uložené kabely, kde se ve většině případů setkáme s hliníkovými jádry. Nahrazením Cu za Al v elektrických rozvodech a zařízeních se sníží hmotnost skoro na polovinu, ale průměr vodiče naroste 1,6x, aby se dosáhlo stejného množství proudu, který vodičem protekl. [1] [3]

Vzhledem k nízké hustotě se Al používá pro mnoho součástí leteckého a automobilového průmyslu. Duraly, slitiny Al-Cu-Mg, jsou vhodné pro letecký průmysl, neboť mají vysoké specifické pevnostní charakteristiky, což je poměr  $R_m (R_{p0,2})$ /měrná hmotnost. Většinou slouží k výrobě součástí, které pracují za běžných teplot. Dolegováním slitiny pomocí Ni se ale zvýší teplotní odolnost, a proto se mohou použít ve spalovacích motorech jako písty nebo hlavy válců. Další využití nachází při stavbě vagónů a korb nákladních automobilů, jejichž profily jsou vylisovány z AlZn4Mg1. Dále se s hliníkem setkáme ve stavebnictví a bytové architektuře, v potravinářském a chemickém průmyslu. V potravinářském průmyslu se používá hliník nejvyšší čistoty (Al 99,85 a Al 99,7) na obalové folie a plechovky. Na jeho slitiny v tomto průmyslovém odvětví narazíme v podobě nádob a krytů. [3]

### 3.1.4 AlSi9Cu3(Fe)

Jedná se o jednu z nejčastěji používaných hliníkových slitin, která vznikla přetavením hliníkového odpadu. Tato slévárenská slitina se používá na výrobu složitých a tenkostěnných odlitků díky své vysoké dynamické pevnosti, jak je například vidět na obrázku 8. V automobilovém průmyslu nachází využití pro středně namáhané součásti vozidel, jako jsou například skříně spalovacích motorů, písty, hlavy válců nebo převodovky. V elektrotechnice je pak tato slitina používána pro součásti, které mají i složitější tvar. Díly se odlévají do písku, kokil nebo tlakovým litím, které je používáno nejčastěji. Způsob provedení tlakového lité ovlivňuje strukturu materiálu a tím i jeho mechanické vlastnosti. Největší vliv na výsledek má použitý tlak. Se zvyšujícím se použitým tlakem se zhoršuje pevnost i tažnost materiálu. [1] [4] [9]



Obrázek 8 – Tlakově litý tenkostěnný odlitek [19]

V následující tabulce je uvedeno chemické složení materiálu.

Tab. I – Chemické složení slitiny AlSi9Cu3(Fe) [15]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	ostatní	Al
8,0	1,3	2,0	0,55	0,05	0,15	0,55	1,2	0,35	0,25	0,25	0,25	zbytek
–		–		–								
11,0		4,0		0,55								

Za účelem zlepšení vlastností daného materiálu se přidávají do slitiny různé prvky. Například železo se přidává pro snížení pórovitosti struktury. Křemík zlepšuje slévárenské vlastnosti. Odlitky lité do kovových forem se samovolně vytvrzují a přidáním Mg do slitiny se tento děj zintenzivní. Hořčík snižuje porezitu materiálu, který je obohacený o měď a je zároveň modifikován pomocí stroncia. [1] [4] [15] [17]

Mechanické vlastnosti pro tlakově lité odlitky jsou uvedeny v *Tab. II*.

*Tab. II – Mechanické vlastnosti slitiny AlSi9Cu3(Fe) [15]*

Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	140
Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	240
Tažnost $A_{50}$ [%]	<1
Tvrdost HBS	80

Slitina má výbornou pevnost při zvýšené teplotě do 200 °C. Dalšími vhodnými vlastnostmi je zabíhavost, odolnost proti trhlinám za tepla, nepropustnost a obrobiteľnosť. Svařování není vhodným zpracováním této slitiny a pájení se dle normy nedoporučuje vůbec. [15]

## 3.2 Zkoušení materiálu

### 3.2.1 Rozdělení

Zkoušky se dají rozdělit do několika skupin podle toho, jaká vlastnost materiálu se zjišťuje. Rozlišují se zkoušky mechanické, makroskopické a mikroskopické a zkoušky bez porušení materiálu. [1]

#### A) Mechanické zkoušky

Vnější mechanické síly vyvolávají v materiálu, na který působí, reakce. Podle těchto reakcí lze vyhodnotit mechanické vlastnosti daného materiálu. Zjišťuje se pružnost, pevnost, plasticita a houževnatost.

Pružnost se definuje jako schopnost materiálu vykazovat pružnou deformaci před porušením struktury. Pevnost udává velikost odporu, který materiál vyvine proti deformaci a porušení vnějšími silami. Plasticita je mechanická vlastnost vypovídající o schopnosti materiálu zachovat trvalé deformace způsobené externími silami. Houževnatostí se rozumí atribut materiálu odolat bez porušení velkým napětím. [3]

Aby bylo možné tyto vlastnosti vyhodnotit, je zapotřebí testovat jednotlivé materiály za stejných podmínek. Ty se proto přesně definují a převážná většina je zapsána v normách. [3]

Mezi tyto zkoušky patří například zkouška tahem, tlakem, ohybem, zkoušky tvrdosti atd. Podskupinou mechanického zkoušení je testování technologických vlastností. Například u svarů se zkouší odolnost proti vzniku trhlin, kdy se vzorky svařenců zkouší tahem nebo

ohybem za použití různých rychlostí deformace. Při tomto procesu se zavádí teplota těsně pod teplotou tuhnutí zkoušeného materiálu. [3]

#### B) Makroskopické a mikroskopické zkoušky

Při makroskopických zkouškách se testované součásti pozorují pouhým lidským okem, popřípadě za použití lupy. Jedná se tedy o malé nebo žádné zvětšení. Tímto způsobem se kontrolují plochy materiálu po rozříznutí nebo po odstranění nerovností. Takto vzniklé plochy se často brousí smirkovým ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  nebo  $\text{SiC}$ ) papírem nebo někdy dokonce leští. Následuje naleptání. Používá se několik různých leptadel, každé z nich má jiný účel a jiný způsob nanesení. Finální kus se nazývá makroskopický výbrus. [1]

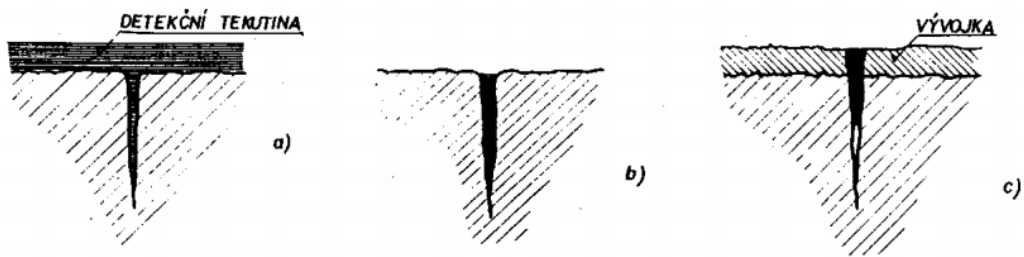
Aby bylo možné studovat strukturu materiálu, zavádí se tzv. mikroskopické zkoušky. Ty se provádí za pomoci mikroskopu a za použití velkého zvětšení. Mikroskopický výbrus musí mít jen takovou velikost, aby se vešel na stolek mikroskopu. Existují různé druhy mikroskopů, ale mezi nejpoužívanější patří světelný mikroskop. Volba mikroskopu závisí na požadovaném zvětšení a důvodu, proč se výbrus testuje. [1]

Posledním typem zkoušky, která se do této skupiny řadí je fraktografie, což je nauka o lomech. Pokud se pozoruje čerstvý lom, lze z něj zjistit jeho možnou příčinu a souvislosti s výsledky jiných zkoušek. [1]

#### C) Zkoušky bez porušení materiálu

V praxi je možné se setkat se dvěma označeními těchto typů zkoušek, buď se mluví o zkouškách bez porušení materiálu, nebo o tzv. defektoskopii. Jedná se tedy o testy, při kterých nedojde k narušení celistvosti dílu. Patří sem vizuální kontrola kusu, kapilární zkouška, magnetická prášková zkouška, ultrazvuková zkouška a další. [1] [3]

Kapilární zkouška funguje tak, že se kapalina s vhodnými vlastnostmi nastříká na povrch dílce a ta pronikne do trhlin v povrchu. Poté se přebytek kapaliny z testované plochy odstraní. Kapalina zateklá v trhlínách ovšem zůstane na svém místě, čímž tyto trhliny zviditelní. Existuje několik modifikací kapilární zkoušky, ale v principu zkouška probíhá tak, jak je zobrazeno na obrázku 9. [1] [3]



Kapilární zkoušky  
 (a) nanesení detekční kapaliny, (b) odstranění detekční kapaliny  
 s povrchu, (c) nanesení vývojky a vyvolání indikace

Obrázek 9 – Princip kapilární zkoušky [8]

### 3.2.2 Zkouška pevnosti v tahu

Velmi často používaná mechanická zkouška se nazývá zkouška tahem. Jedná se o test, při kterém se zkušební tyč předepsaných normovaných rozměrů (obrázek 10) upne do přístroje a působením tahové síly jsou od sebe konce tělesa oddalovány, dokud nedojde k přetržení tyče. Tyče mohou mít různé tvary podle druhu materiálu, který se zkouší. [3] [5]

Obrázek 10 ukazuje dlouhou poměrnou tyč, kde se měřená délka určuje vztahem:

$$L_0 = 11,3 \sqrt{S_0} \text{ [mm]} \quad (1)$$

kde  $L_0$  [mm] je měřená délka tyče a  $S_0$  [mm<sup>2</sup>] je plocha průřezu měřené části tyče.

V praxi se může pro kruhové tyče užít zjednodušeného vzorce:

$$L_0 = 10 \cdot d_0 \text{ [mm]} \quad (2)$$

kde  $d_0$  [mm] je průměr měřené části tyče, který bývá nejčastěji 10 mm.

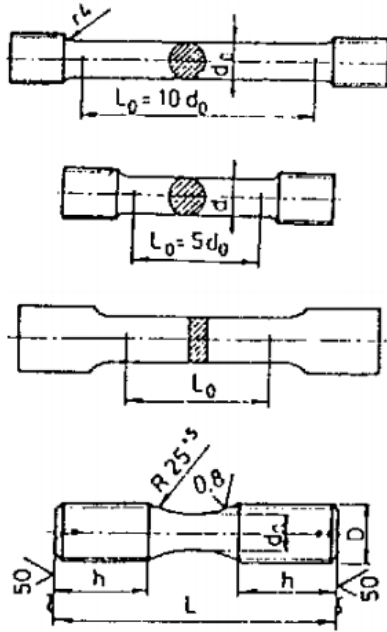
Krátká tyč, která je zobrazena pod tyčí dlouhou, je používána nejčastěji a má délku danou vztahem:

$$L_0 = 5,65 \sqrt{S_0} \text{ [mm]} \quad (3)$$

tu lze pro kruhovou tyč spočítat i zjednodušeně jako:

$$L_0 = 5 \cdot d_0 \text{ [mm]} \quad (4)$$

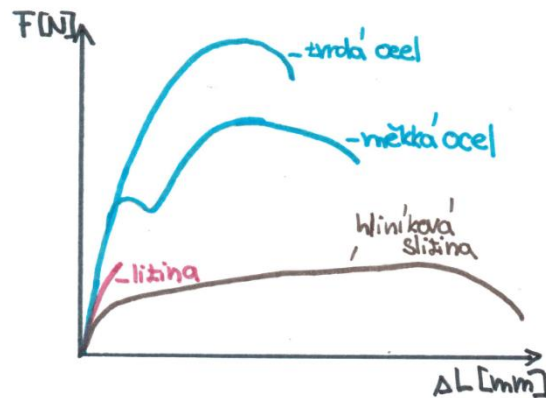
Další tělíčko má obdélníkový průřez. Používá se při testování například plastových dílů. Posledním vzorkem je tyč typická pro zkoušení litiny s lupínkovým grafitem. [3] [5]



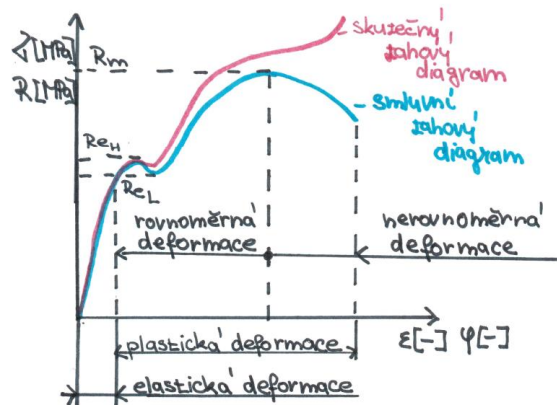
Obrázek 10 – Tvary vzorků pro tahovou zkoušku [3]

Délka  $L_0$  se před zkouškou s výhodou rozděluje na dílky pro usnadnění následného vyhodnocení tažnosti tyče v případě, že se nepoužívá průtahoměr.

Výsledkem zkoušky je pracovní diagram (obrázek 11) a smluvní nebo skutečný tahový diagram (obrázek 12). [3] [5]



Obrázek 11 – Pracovní diagram



Obrázek 12 – Smluvní a reálný tahový diagram

V pracovním diagramu je zatěžující síla zobrazena v závislosti na prodloužení tyče, kde  $\Delta L$  náleží vztahu:

$$\Delta L = L - L_0 \text{ [mm]} \quad (5)$$

kde  $\Delta L$  je prodloužení tyče,  $L$  [mm] je délka tyče při daném zatížení a  $L_0$  [mm] je počáteční délka zkušební tyče. [3] [5]

Ve smluvním diagramu se zobrazuje smluvní napětí  $R$  v závislosti na smluvní deformaci  $\epsilon$ . O tomto diagramu se mluví jako o smluvním, protože se napětí vyhodnocuje k počáteční ploše průřezu  $S_0$ . Potom se tedy napětí v daném místě vypočítá z rovnice:

$$R = \frac{F}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (6)$$

kde  $R$  je napětí,  $F$  [N] je zatěžující síla a  $S_0$  [mm<sup>2</sup>] je počáteční plocha průřezu.

A smluvní deformace  $\epsilon$  se stanoví ze vztahu:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \text{ [-]} \quad (7)$$

Při zkoušce tahem se zjišťují tyto hodnoty:

- Mez pevnosti:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (8)$$

kde  $F_m$  [N] je maximální síla, kterou se zkušební tyč zatěžuje.

- Mez kluzu:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (9)$$

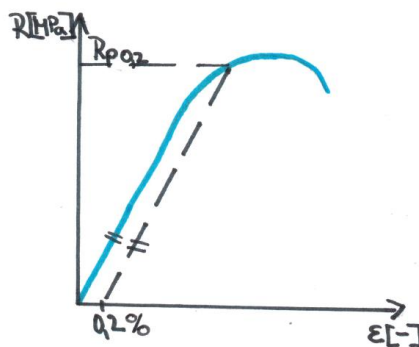
kde  $F_e$  [N] je síla na mezi kluzu.

Pokud nemá materiál výraznou mez kluzu, což je napětí, při kterém dochází k první výraznější deformaci, pak se určuje tzv. smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$ . Ta je dána vztahem:

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (10)$$

kde  $F_{p0,2}$  [N] je síla na smluvní mezi kluzu.

Určení této hodnoty je zobrazeno na obrázku 13. Bodem  $\epsilon = 0,002$  vedeme rovnoběžku s lineární částí diagramu. V místě, kde tato rovnoběžka diagram protne se nachází smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$ . [3] [5]



Obrázek 13 – Určení smluvní meze kluzu

- Tažnost:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (11)$$

kde  $L_u$  [mm] je délka tyče po uvolnění zatěžování.

Tažnost je trvalé prodloužení, které zůstane po odeznění zátěžné síly. Pokud by byla při zkoušení použita dlouhou zkušební tyč, pak by označení nebylo A, jako je tomu u krátké tyče, ale  $A_{11,3}$ .

- Kontrakce:

$$Z = \frac{\Delta S}{S_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (12)$$

kde  $\Delta S$  [mm<sup>2</sup>] je změna plochy průřezu zkušební části tyče a je dána vztahem:



$$\Delta S = S_0 - S_u \text{ [mm}^2\text{]} \quad (13)$$

kde  $S_u \text{ [mm}^2\text{]}$  je nejmenší plocha průřezu po přetržení tyče.

Skutečné hodnoty určíme ze skutečného tahového diagramu. Zde musíme uvažovat okamžitou plochu průřezu zkušební tyče. Vztah pro určení napětí potom vypadá takto:

$$\sigma = \frac{F}{S} \text{ [MPa]} \quad (14)$$

kde  $\sigma$  je skutečné napětí,  $F \text{ [N]}$  je síla v určitém momentu a  $S \text{ [mm}^2\text{]}$  je okamžitá plocha průřezu tyče v tomtéž momentu. [3] [5]

Pro zjištění skutečné deformace  $\varphi$  se využije vztah:

$$\varphi = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) [-] \quad (15)$$

Oba dva tahové diagramy jsou totožné v oblasti elastické deformace, kde platí Hookův zákon:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \text{ [MPa]} \quad (16)$$

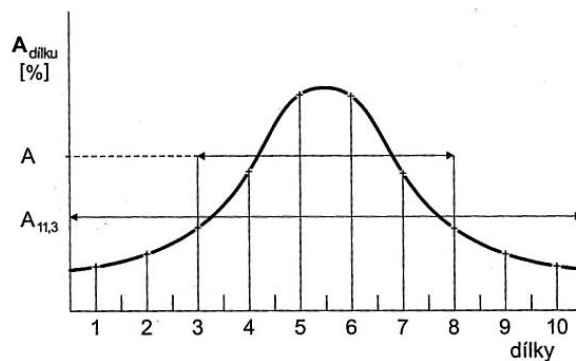
kde  $\sigma$  je napětí,  $E \text{ [MPa]}$  je modul pružnosti v tahu a  $\varepsilon [-]$  je deformace.

Modul pružnosti v tahu je různý pro jednotlivé druhy materiálů. Pro ocel je to 220 GPa, pro hliník se  $E=70 \text{ GPa}$ . Z grafu se  $E$  určí ze vztahu:

$$E = \tan \alpha \text{ [MPa]} \quad (17)$$

kde  $\alpha [^\circ]$  je úhel, pod kterým protíná lineární část grafu vodorovnou osu  $\varepsilon [-]$ .

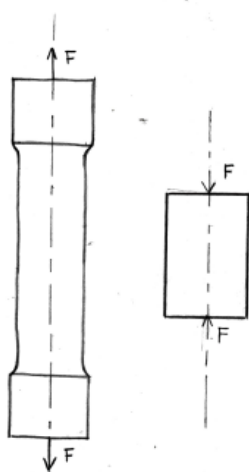
Rozložení deformace po původní délce tyče  $L_0 \text{ [mm]}$  pak vypadá následovně (Obrázek 14) [3] [5]:



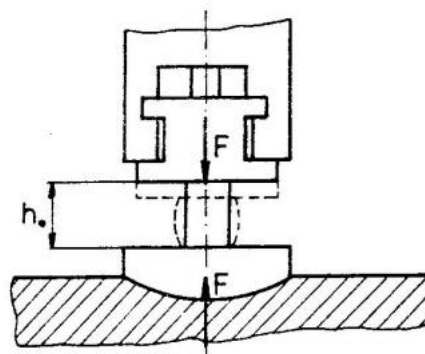
Obrázek 14 – Rozložení deformace po délce zkušební tyče [3]

### 3.2.3 Zkouška pevnosti v tlaku

Tato zkouška není v praxi využívána tolik jako zkouška tahová. Pro své malé využití není v současné době v České republice normalizována. Ve většině případů se používá pro křehké materiály, které jsou zatěžovány tlakem. Testuje se například litina, ložiskové kovy a keramika. Zátěžná síla zde působí v opačném směru, než je tomu při tahové zkoušce (obrázek 15). Obrázek 16 ukazuje schéma zatěžování při zkoušce. [5] [6]

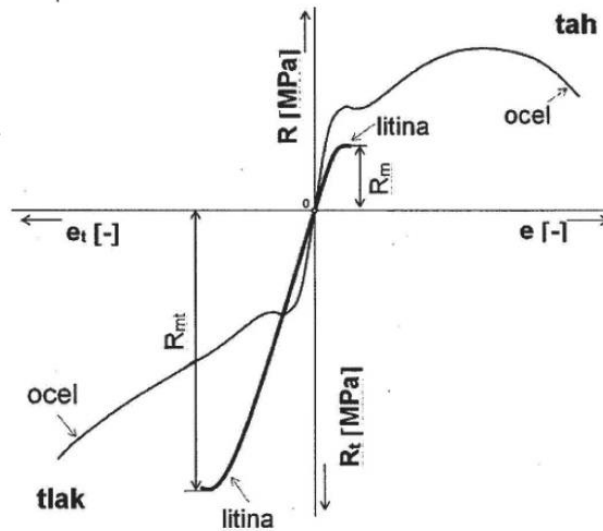


Obrázek 15 – Silové působení na vzorky v tahu a v tlaku



Obrázek 16 – Schéma zatěžování při tlakové zkoušce [6]

Smluvní diagram získaný touto zkouškou se podobá tahovému digramu, jedinou změnou je opačný směr zátěžné síly (obrázek 17). Pro měkké a houževnaté materiály je tvar obou diagramů velice obdobný, pouze s tím rozdílem, že při tlakovém namáhání nedochází ke konci zkoušky k poklesu napětí. Jak je patrné z obrázku 17, měkká ocel má průběh napětí v obou případech téměř totožný a maximální napětí v tahu je téměř takové, jako je tomu při zatížení tlakem. Naopak litina je křehký materiál a mezi maximálním tahovým a tlakovým napětím je znatelný rozdíl. [7]



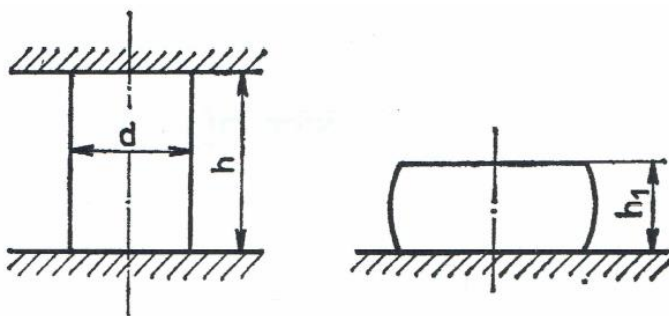
Obrázek 17 – Smluvní tahový a tlakový diagram [5]

Jako zkušební tělíska se obvykle používají válečky s průměrem od 5 mm do 30 mm. Pro hrubé měření se používá výška válečku, která je rovna jeho průměru. Pro přesné měření se zavádí výška válečku:

$$h_0 = (2,5 \div 3) \cdot d_0 \text{ [mm]} \quad (18)$$

kde  $d_0$  [mm] je průměr zkušebního válečku. [5]

Vzhled zkušební vzorku před stlačením a po stlačení je vidět na obrázku 18. U křehkých materiálů dochází k prasknutí materiálu při určitém zatížení, kdežto materiály tvárné zůstanou bez trhlin. Jak vypadá skutečný vzorek před a po zatížení je dokumentováno na obrázku 19.



Obrázek 18 – Zkušební vzorek před a po zatížení [14]



Obrázek 19 – Reálná podoba vzorků před a po zatížení [20]

Při této zkoušce se zjišťuje:

- Mez pevnosti v tlaku:

$$R_{mt} = \frac{F_{mt}}{S_0} [MPa] \quad (19)$$

kde  $F_{mt}$  [N] je maximální zátěžná síla v tlaku a  $S_0$  [mm<sup>2</sup>] je původní plocha průřezu tělesa.

- Mez kluzu v tlaku:

$$R_{et} = \frac{F_{et}}{S_0} [MPa] \quad (20)$$

kde  $F_{et}$  [N] je síla na mezi kluzu v tlaku.

Pokud nemá materiál výraznou mez kluzu, určuje se smluvní mez kluzu stejným způsobem jako při zkoušce tahové.

$$R_{pt0,2} = \frac{F_{pt0,2}}{S_0} [MPa] \quad (21)$$

kde  $F_{pt0,2}$  [N] je síla na smluvní mezi kluzu.

- Smluvní deformace:

$$\varepsilon_t = \frac{h_0 - h}{h_0} [-] \quad (22)$$

kde  $h_0$  [mm] je počáteční výška válečku a  $h$  [mm] je okamžitá výška válečku.

- Mezní poměrné stlačení:

$$A_t = \frac{h_0 - h}{h_0} \cdot 100 [\%] \quad (23)$$

- Mezní poměrné rozšíření:

$$Z_t = \frac{S - S_0}{S} \cdot 100 [\%] \quad (24)$$

kde  $S$  [mm<sup>2</sup>] je největší plocha průřezu po zatížení.

V lineární části diagramu opět platí Hookův zákon ve tvaru:

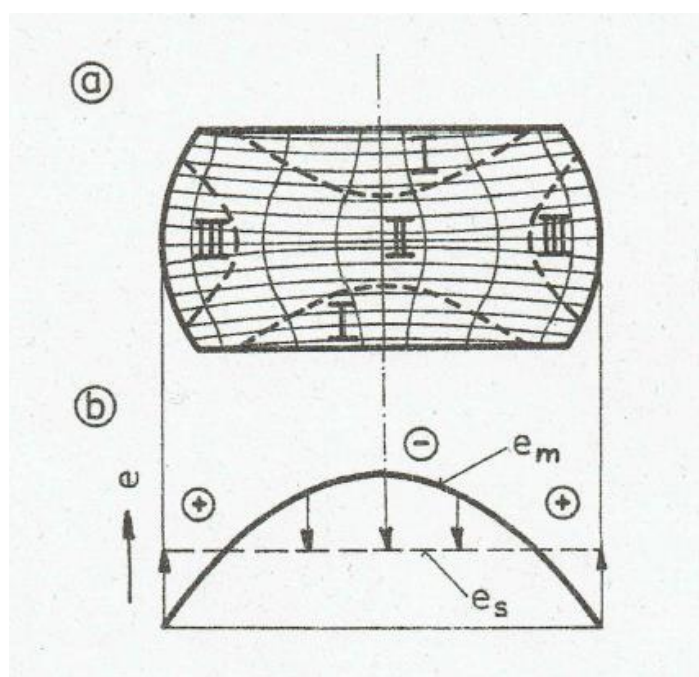
$$\sigma_t = E_c \cdot \varepsilon_t [MPa] \quad (25)$$

kde  $\sigma_t$  je napětí v tlaku,  $E_c$  [MPa] je modul pružnosti v tlaku a  $\varepsilon_t$  [-] je smluvní deformace.

Modul pružnosti v tlaku lze odečíst z grafu jako směrnici lineární části křivky. [5]

Pro tvárné materiály je normovaná pěchovací zkouška ČSN 42 0426, která pracuje na stejném principu jako tlaková zkouška. Těleso se pěchuje, dokud nedosáhne předepsaného stupně

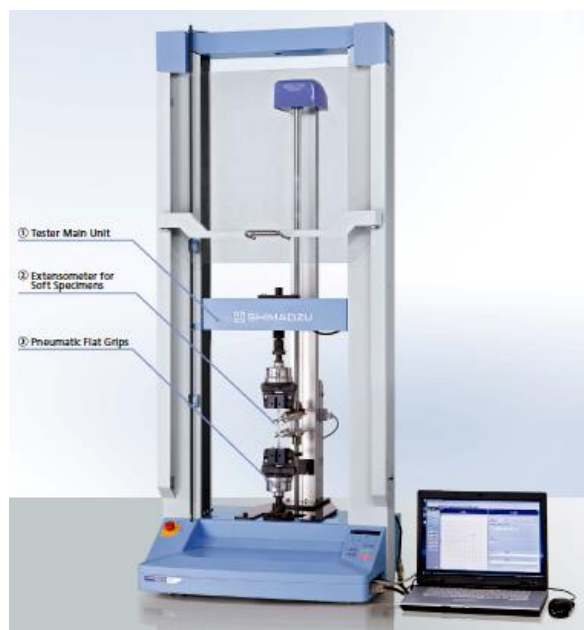
deformace. Deformace vzorku není rovnoměrná, jak je vidět na obrázku 20. V oblasti I dochází k přilnutí k nástroji a deformace je zde nepatrná. Oblastí II se šíří intenzivní přetvoření. Jedná se o největší oblast, která se ve vzorku nachází, a dostává se až na okraj vzorku, kde je příčinou skluzu materiálu. Z toho důvodu se tato oblast nazývá pásmem skluzu. Oblast III je charakteristická mnohem menší intenzitou deformace, která se zde šíří pouze jedním směrem, a to v radiálním směru. Graf pod obrázkem s nerovnoměrnou deformací udává průběh přídavných napětí v příčném průřezu, který je veden polovinou výšky. [10] [13] [14]



Obrázek 20 – Rozložení napětí v tlakově zatěženém vzorku [10]

Při tlakové i pýchovací zkoušce je nutné minimalizovat vznikající tření mezi vzorkem a testovacím strojem. Minimalizace lze dosáhnout úpravou čelních ploch vzorku nebo použitím vhodného maziva. Mazivo se volí podle materiálu vzorku a teploty, při které se zkouška provádí. Například na hliník a jeho slitiny se nanáší suspenze 10-15 % koloidního grafitu v lehkém nebo těžkém minerálním oleji. Pokud se zkouška provádí za vyšších teplot může se jako mazivo vzít palmový olej nebo třeba roztavené sklo. [13]

Zkoušku lze provést na lisu, bucharu s opěrnými deskami nebo existují univerzální zkušební stroje (obrázek 21). Na těchto strojích lze provést jak tahovou, tak tlakovou zkoušku. [14]



Obrázek 21 – Univerzální zkušební stroj [21]

### 3.2.4 Metalografická analýza

Metalografie je nauka o struktuře kovových materiálů. S její pomocí se určuje základní typ struktury materiálu. Metalograficky se stanoví druh, množství, rozměry, tvar a způsob uspořádání jednotlivých fází, což jsou základní stavební jednotky dané struktury. Aby bylo možné plně popsat danou strukturu, musí být analyzovány všechny fáze, které se v testovaném kusu nachází. Na základě metalografického hodnocení je možné posoudit například jakost vyrobeného kusu, vhodnost materiálů pro různá použití nebo je možné provést kontrolu svarových spojů. K prozkoumání se používají mikroskopy, které je potřeba volit podle jejich rozlišovacích schopností. Přehled mikroskopů a jejich rozlišovacích schopností je uveden v Tab. III. [12]

Tab. III – Rozlišovací schopnosti mikroskopů [12]

Druh mikroskopu		Rozlišovací schopnost (nm)
Světelný mikroskop		300
Odrasový elektronový mikroskop		8 až 20
Emisní elektronový mikroskop		5 až 20
Řádkovací elektronový mikroskop		5
Transmisní elektronový mikroskop	řádkovací při použití fólie	3
	konvekční při použití otisků	1
	konvekční při použití fólie	0,3
Autoemisní elektronový mikroskop		2
Iontový mikroskop		0,2

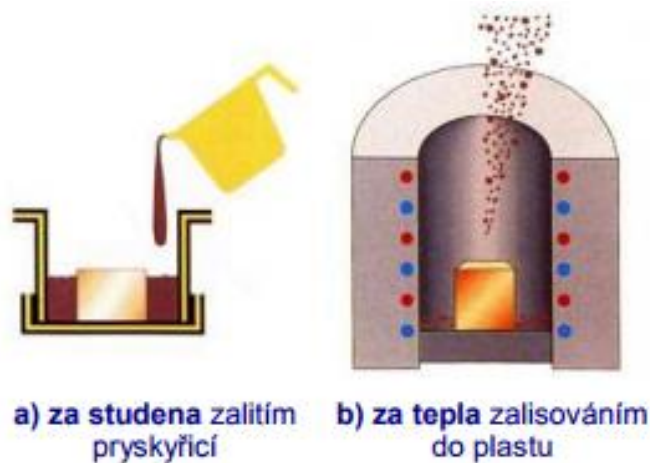
Vzorky je třeba před zkoušením připravit, aby bylo vůbec možné pod mikroskopem něco spatřit. Příprava vzorků se dělí na 6 fází:

- Odběr
- Označení
- Upevnění (neprovádí se u všech vzorků)
- Broušení
- Leštění
- Leptání

Nejprve se musí vzorek odebrat, při tomto procesu je nutné dbát na to, aby výsledný produkt nebyl tepelně ovlivněn nebo nedošlo k jeho deformaci. Při odběru je nutnou podmínkou vybrat místo odběru, které bude celkově vypovídat o analyzovaném materiálu. Není-li možné pokrýt všechny charakteristiky materiálu jedním vzorkem, je zapotřebí odebrat tolik vzorků, kolik bude nutné ke kompletnímu charakterizování. K oddělení vzorku od původního materiálu se musí zvolit vhodná metoda podle tvrdosti a obrobitelnosti kovu. Je potřeba zvážit, co se bude pod mikroskopem pozorovat, a podle toho zvolit směr řezu materiálem. Povrchové vady se dají zkoumat na řezu příčném, kdežto na podélném řezu je možné vidět například stupeň plastické deformace. [5] [11]

Po odebrání je zapotřebí jednotlivé kusy označit. Pro eliminaci chyb se musí odebrat více vzorků z jednoho či více dílů, proto je jejich označení nutností. Tím se jasně stanoví, z kterého původního kusu je testovaný kus odebrán. [5] [11]

Následuje upevnění vzorků nejčastěji do pryskyřice. Existují dva způsoby fixace vzorku do pryskyřice, a to za tepla a za studena. Za studena se provede zalití vzorku, kdežto za tepla se vzorek do pryskyřice zalisuje. Na obrázku 22 je upevnění znázorněno. [5] [11]



Obrázek 22 – Způsoby upevnění vzorků [11]

Tato fáze není nutná pro každý kus. Upevnění se provádí u vzorků s vrstvami nebo povlaky a u velmi malých vzorků, zlepšuje se tím manipulace při následujících operacích. [5] [11]

Vzorky se zbrousí, aby se dosáhlo rovnoměrné drsnosti a minimálních nerovností povrchu. K tomuto účelu slouží brusný metalografický papír, který se vyrábí s různou hrubostí. Povrch se několikrát přebrousí vždy jinak hrubým papírem. Postupuje se od nejhrubšího k nejjemnějšímu a vždy se zachovává směr tahu papírem, dokud nedojde k jeho výměně za jemnější, poté se vzorek otočí o 90°. Výměna papíru se provádí, jakmile zmizí stopy po broušení předchozím. [5] [11]

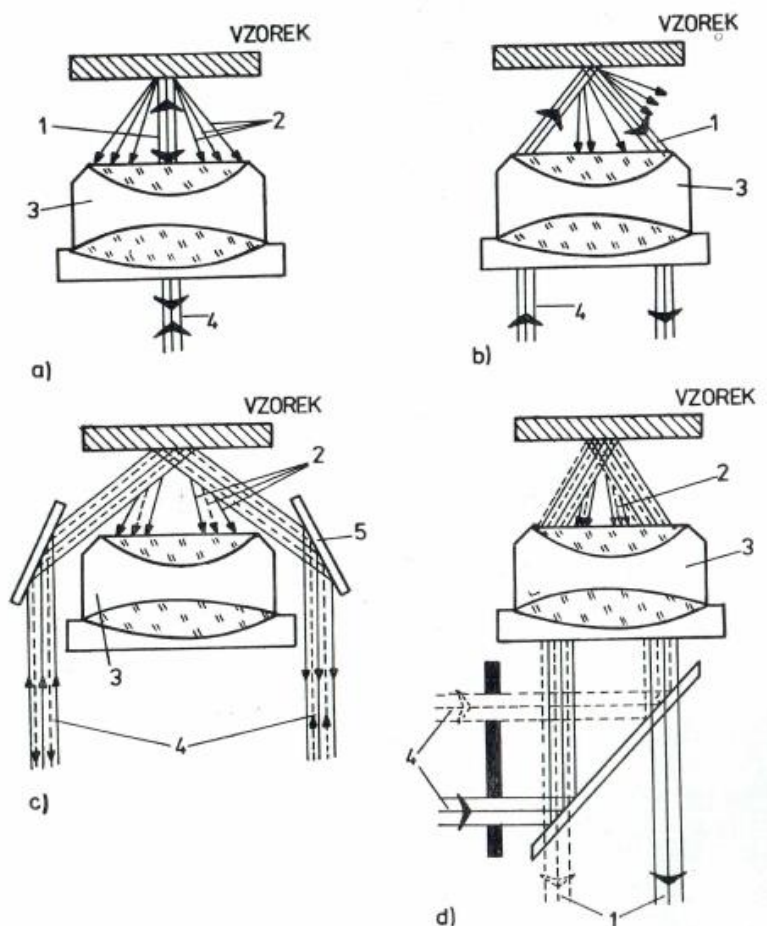
Následující operací je leštění, kterým se zajistí zrcadlový povrch vzorku a také dojde k odstranění známek po posledním broušení. Tento proces vyžaduje otáčení vzorku, neboť by jinak mohlo dojít k natváření vrchní vrstvy výbrusu v jednom směru. Dále se vzorek vloží pod tekoucí vodu, očistí lihem a nechá uschnout. [5] [11]

Poslední dílčí operací přípravy vzorků je leptání. Při této činnosti je nutné dávat pozor, jelikož v případě přepleptání bude nutné provést opět broušení a operace, jež po něm následují. Leptáním se vyvolá struktura materiálu, tedy se vytvoří povrchový reliéf, protože každá složka struktury se leptá jinak intenzivně. Existují tři typy leptání. Jedná se o chemické, elektrolytické a tepelné leptání. Nakonec se vzorek umyje destilovanou vodou, lihem, osuší a je připraven ke zkoušce. [5] [11]

Speciálně připravené vzorky se vloží pod mikroskop. Například při světelné mikroskopii se na testovaný kus posvítí světlem a pozoruje se paprsek odraženého světla od rovinného řezu kovem. Na světelném mikroskopu je možné nastavit zvětšení 100 až 1000x. Způsoby osvětlení vzorků při světelné mikroskopii je vidět na obrázku 23. Na obrázku 23a) je způsob



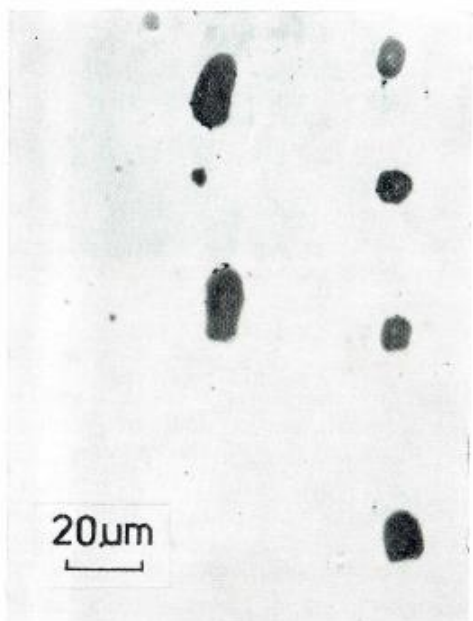
osvětlení světlym polem, 23b) šikmým osvětlením, 23c) temným polem a 23d) všestranným šikmým osvětlením. Číslice 1 na obrázku zastupuje odražený paprsek, 2 rozptýlený svazek, 3 objektiv, 4 ukazuje na osvětlovací paprsek a číslice 5 je zrcadlo. [12]



Obrázek 23 – Způsoby osvětlení vzorku [12]

Na obrazu z mikroskopu pozorujeme hlavně různé struktury, které se v materiálu vyskytují. Jednotlivé struktury totiž ovlivňují výsledné vlastnosti kovů a jejich slitin. Rozhodující je jejich počet i druh. Při pozorování hraje roli i způsob, jakým byl díl vyroben. U odlitků je třeba možné pozorovat strukturní nestejnoroost, která je zapříčiněna rozdílnou rychlostí ochlazování povrchu a jádra odlitku. [11]

Pokud se pro pozorování používá světlé pole, potom budou rovné plochy, od kterých se paprsky odrážejí, světlé. Veškeré nerovnosti se projeví tmavou barvou. Při pozorování v tmavém poli je tomu naopak. Toho se docílí zasunutím clony do průchodu paprsků, a tím se změní jejich směr. Na obrázku 24 je vidět výbrus ve světlém poli. Obrázek 25 zobrazuje pozorování výbrusu v tmavém poli. Na obou fotografiích je tentýž vzorek pouze se změnou světelného pole. [11]



Obrázek 24 – Pozorování ve světlém poli [12]



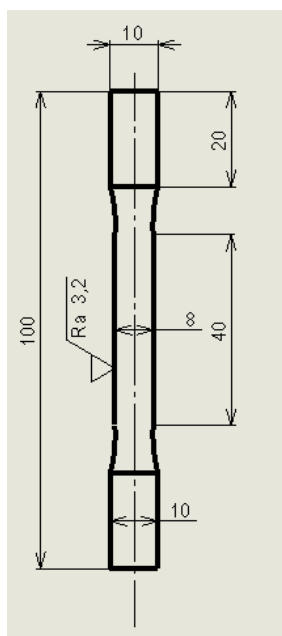
Obrázek 25 – Pozorování v tmavém poli [12]

## 4 Experimentální část

Na základě potřeby zadavatele byly provedeny analýzy na náhodně vybraných kusech ze slitiny  $AlSi9Cu3(Fe)$ . V návaznosti na požadavek ověřit mechanické vlastnosti byly provedeny zkoušky tlakem a tahem na vzorcích odebraných z hotových odlitků. Navíc byly odebrány vzorky pro metalografickou analýzu za účelem posoudit přítomnost vad a nehomogenit.

### 4.1 Tahová zkouška

Na 16 vzorcích, které byly odebrány ze 4 náhodně vybraných odlitků, byla provedena tahová zkouška. Rozměry použitých vzorků jsou uvedeny na obrázku 26. Reálná podoba zkušebních těles je patrná na obrázku 27.



Obrázek 26 - Rozměry zkušebních tyčí



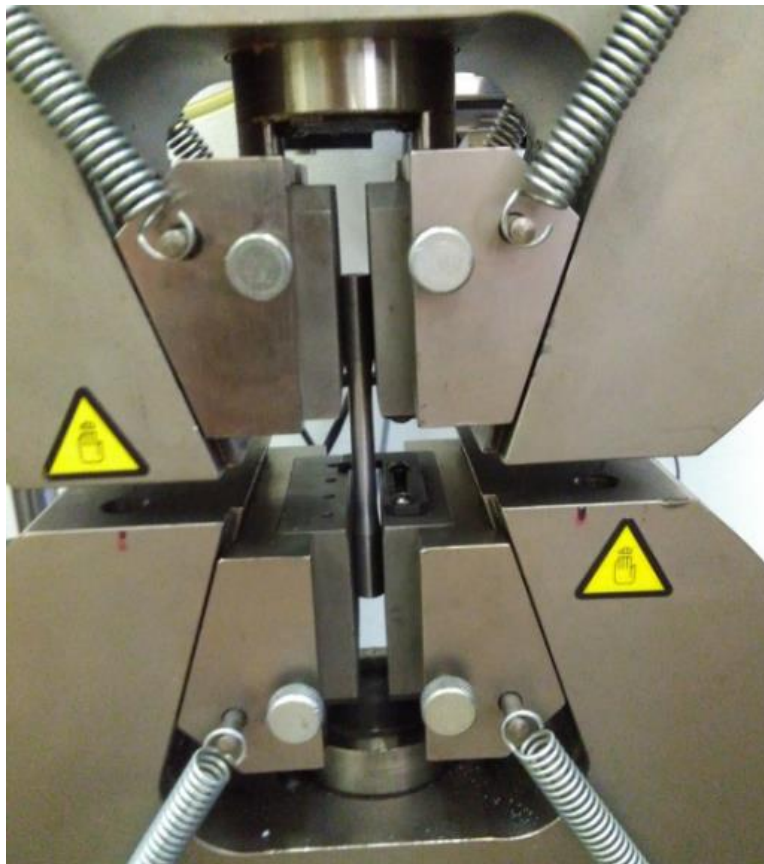
Obrázek 27 - Reálná podoba použitých zkušebních tyčí

Zkouška byla provedena na univerzálním trhacím stroji INSTRON 5582 (obrázek 28). Tento stroj má maximální sílu zatěžování 100 kN a vzorky byly zatěžovány rychlostí 2 mm/min.



Obrázek 28 – INSTRON 5582 [22]

Zkušební tělesa se umístí do pracovního prostoru stroje (obrázek 29) a postupným zatěžováním dojde k jejich přetržení (obrázek 30). Slitina AlSi9Cu3(Fe) není tažný materiál, proto po přetržení není na vzorku patrné příliš velké prodloužení a ani se zde nevytvořil výrazný krček v místě lomu.

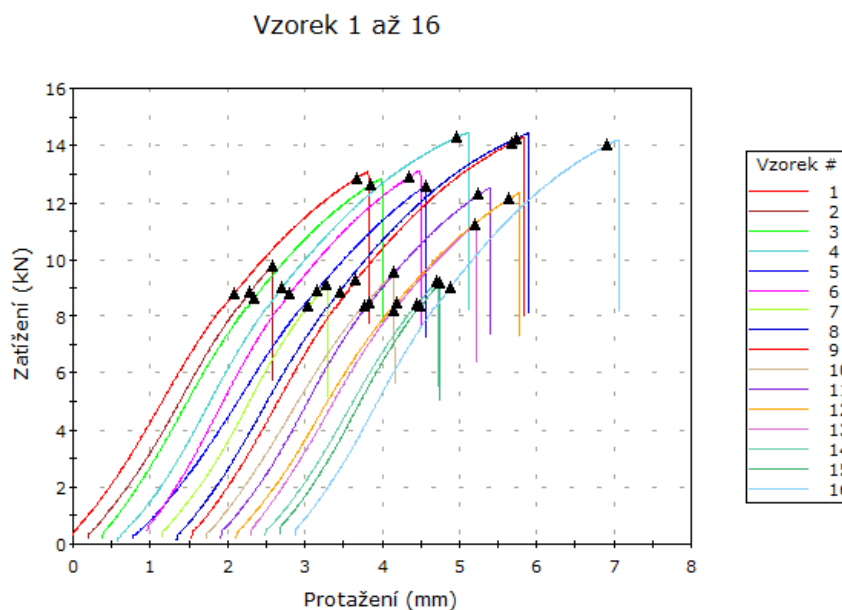


Obrázek 29 – Upevnění zkušební tyče



Obrázek 30 – Zkušební tyče po přetržení

Výsledkem této zkoušky je 16 pracovních diagramů (obrázek 31). První bod v každém průběhu zatěžování je síla na smluvní mezi kluzu a druhým bodem je síla na mezi pevnosti daného materiálu. Napětí se vypočítá jako síla, která působí na plochu kolmou ke směru zatěžování. Poměrná deformace materiálu je dána podílem prodloužení ku počáteční délce tyče.



Obrázek 31 – Pracovní diagramy pro jednotlivé zkušební tyče

## 4.2 Tlaková zkouška

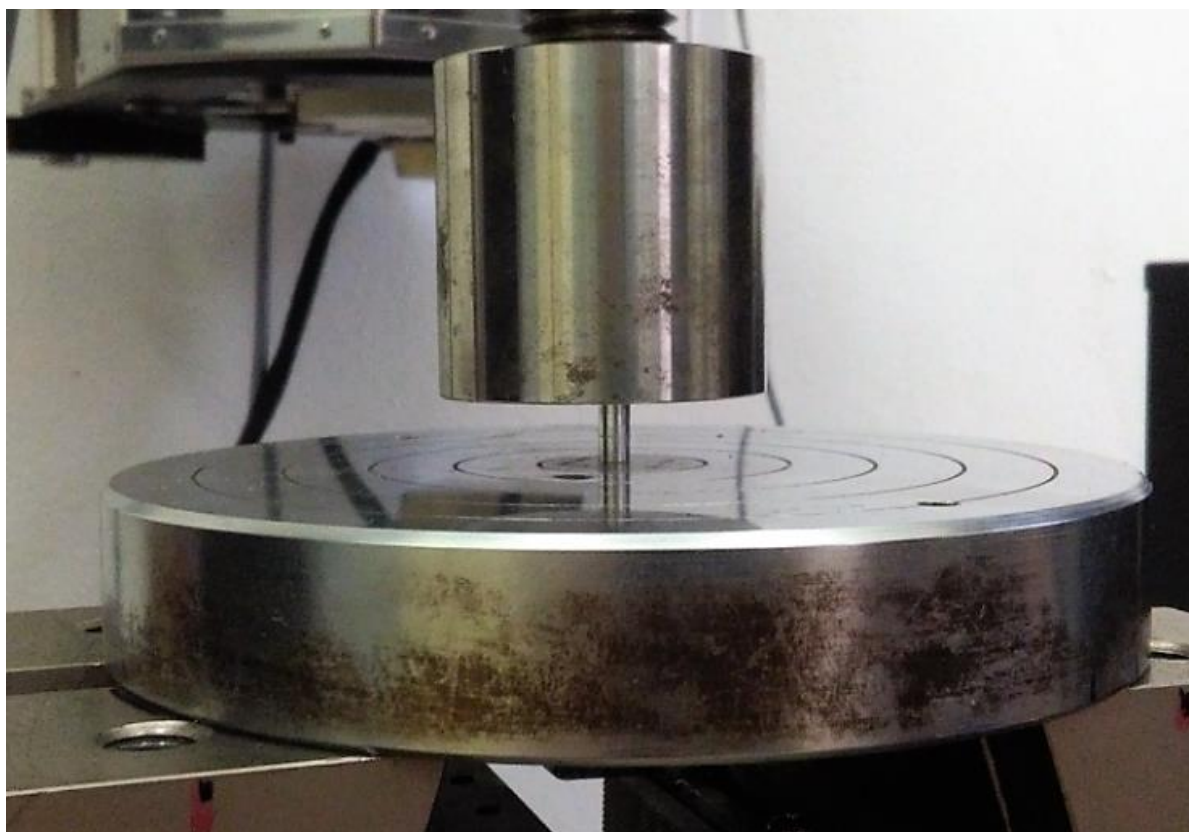
Tlaková zkouška byla provedena na 13 vzorcích, které měli průměr 5 mm. Tyto vzorky byly odebrány ze stejných 4 odlitků, jako vzorky na tahovou zkoušku. Vzorky byly odebrány z místa, které simulace MKP vyhodnotila jako kritické. Výška válečků byla u pěti vzorků 10 mm (obrázek 32), zbylé válečky měly výšku poloviční.



*Obrázek 32 – Reálná podoba zkušební vzorku*

Ke zkoušce byl opět použit univerzální zkušební stroj INSTRON 5582 (obrázek 28).

Válečky se umístili do pracovního prostoru stroje (obrázek 33) a provedlo se tlakové zatěžování.

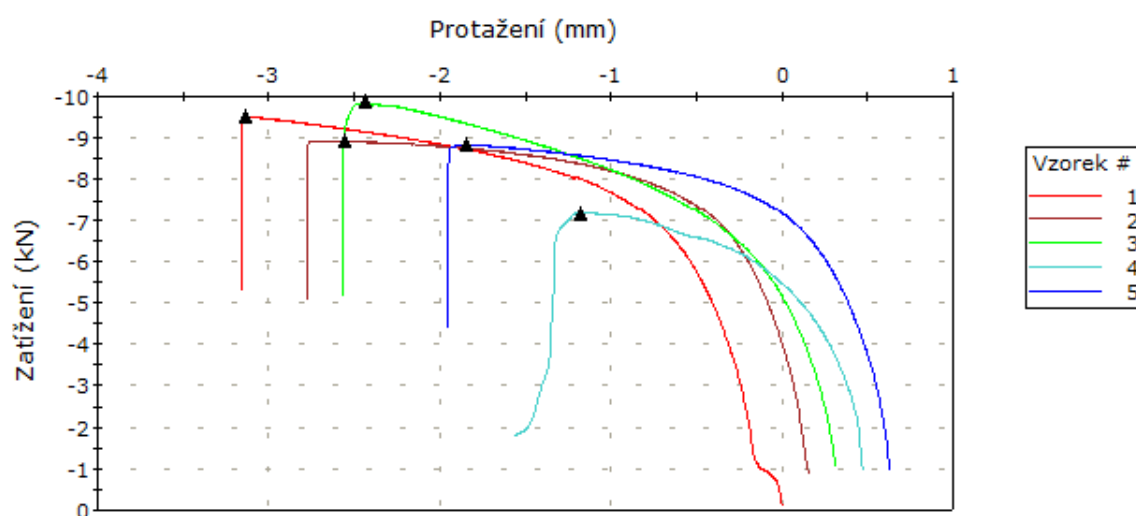


*Obrázek 33 – Umístění vzorku do pracovního prostoru stroje*

Zatěžování probíhalo, dokud nedošlo k porušení materiálu. U menších vzorků nebylo porušení materiálu provázeno výraznějším poklesem zátěžné síly, takže nedošlo k zastavení zkušebního stroje. To, že došlo k porušení celistvosti vzorku, bylo patrné pouze na pracovním diagramu, kde došlo ke zvlnění průběhu zatěžování. Obrázek 34 dokumentuje pracovní

diagramy pro delší zkušební tělesa, kde pokaždé došlo k jednoznačnému porušení materiálu. Pracovní digramy osmi menších vzorků jsou patrné na obrázku 35. Zde došlo k výraznějšímu poklesu síly pouze u tří zkušebních vzorků. Jen u jednoho z nich bylo toto porušení tak výrazné, že stroj vyhodnotil tuto situaci jako konečnou a nepokračoval v dalším zatěžování.

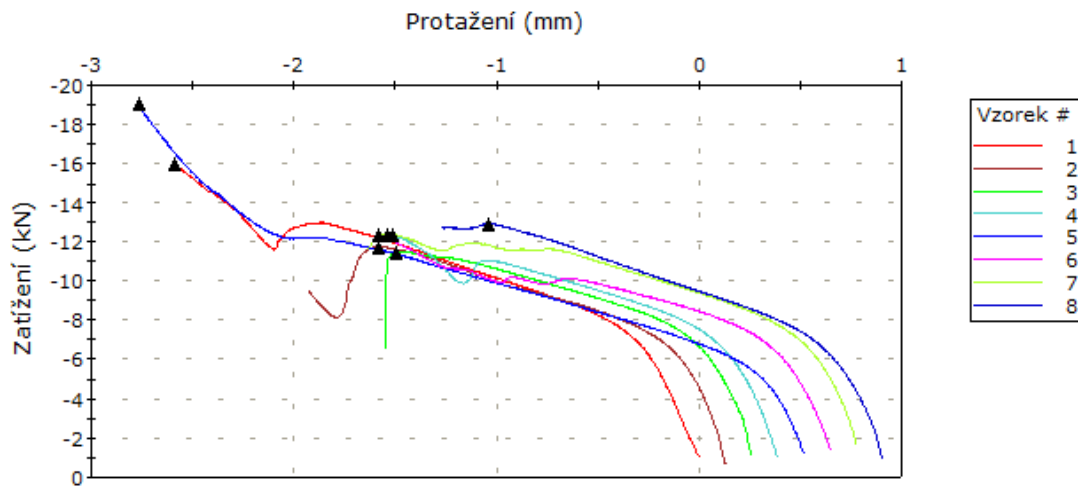
Výsledné síly a zkrácení materiálu jsou v *Tab. IV* a *Tab. V*. V obou tabulkách jsou zaznamenány maximální síly, které byly na vzorek vyvinuty. Pouze u delších vzorků se jedná o síly na mezi pevnosti. U těles s menší výškou pokračoval stroj v zatěžování i po prasknutí a síly na mezi pevnosti jsou tedy menší, než udává tabulka.



Obrázek 34 – Pracovní digramy dlouhých vzorků

Tab. IV – Maximální síly a stlačení pro jednotlivé dlouhé vzorky (výstup ze systému)

	Jmenovka vzorku	Zatížení (kN)	Maximální Tlakové protažení (mm)
1	Vzorek č.3-1	-9,52193	3,15970
2	Vzorek č.4-1	-8,92001	2,93495
3	Vzorek č.2-1	-9,84490	2,88419
4	Vzorek č.4-2	-7,17746	2,04911
5	Vzorek č.3-2	-8,83604	2,59038



Obrázek 35 – Pracovní diagramy krátkých vzorků

Tab. V – Maximální síly a stlačení pro jednotlivé krátké tyče (výstup ze systému)

	Jmenovka vzorku	Zatížení (kN)	Maximální Tlakové protažení (mm)
1	Vzorek č.1-3	-15,94817	2,58470
2	Vzorek č.1-4	-11,74164	2,05957
3	Vzorek č.2-3	-11,48590	1,80355
4	Vzorek č.2-4	-12,33933	1,89772
5	Vzorek č.3-3	-18,97047	3,28460
6	Vzorek č.3-4	-12,31536	2,23152
7	Vzorek č.4-3	-12,34566	2,41902
8	Vzorek č.4-4	-12,88771	2,17873

Výsledná podoba většího vzorku je na obrázku 36. Menší vzorek po zkoušce je na vedlejším obrázku 37.





Obrázek 36 – Dlouhý vzorek po zkoušce



Obrázek 37 – Krátký vzorek po zkoušce

### 4.3 Metalografická analýza

Z každého odlitku byly odebrány dva kousky materiálu, aby bylo možné provést analýzu struktury. Výřez byl opět odebrán z místa, které počítačová simulace vyhodnotila jako kritické.

Nejprve se výřezy zalisovaly za tepla do plastu (obrázek 38). Dva vzorky z jednoho odlitku byly zalisovány do společného plastového základu.



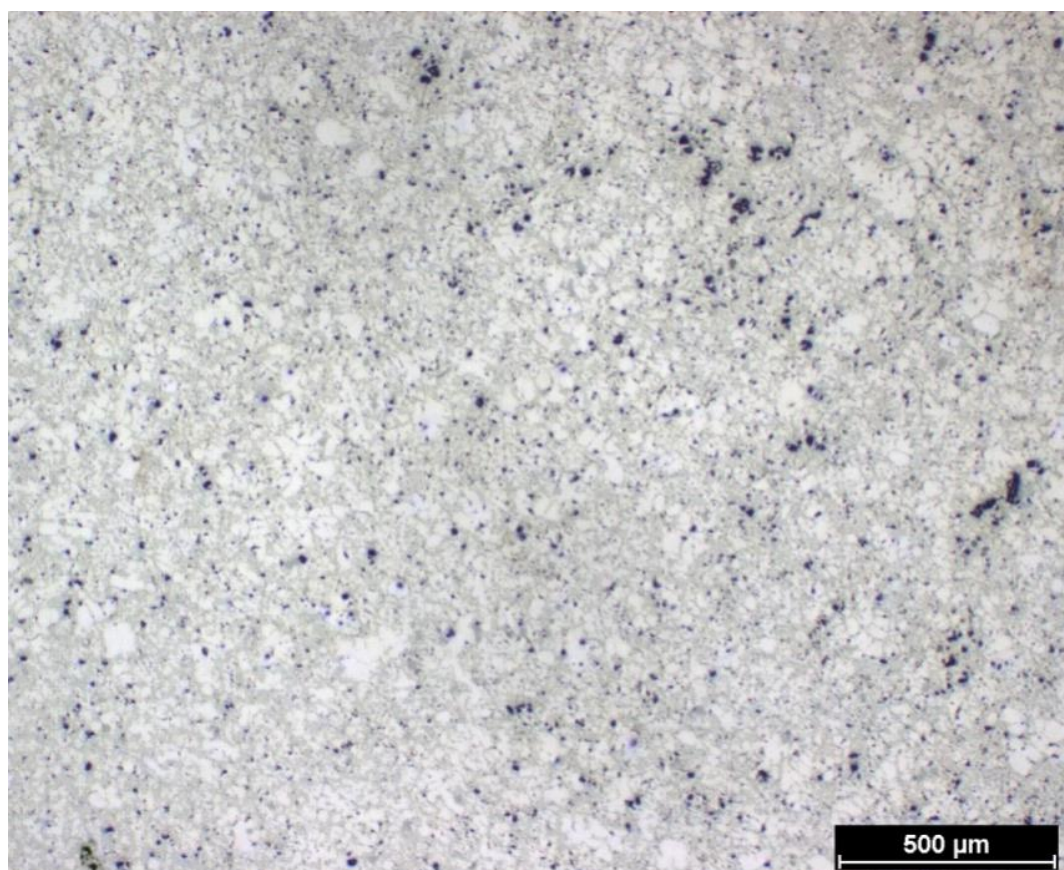
Obrázek 38 – Zalisované výřezy

Po zalisování bylo provedeno broušení vzorku, aby se odstranily výrazné rýhy, které vznikly při oddělení vzorků od odlitku. Byly použity tři různé drsnosti brousícího papíru. Následně bylo provedeno leštění materiálu (obrázek 39)

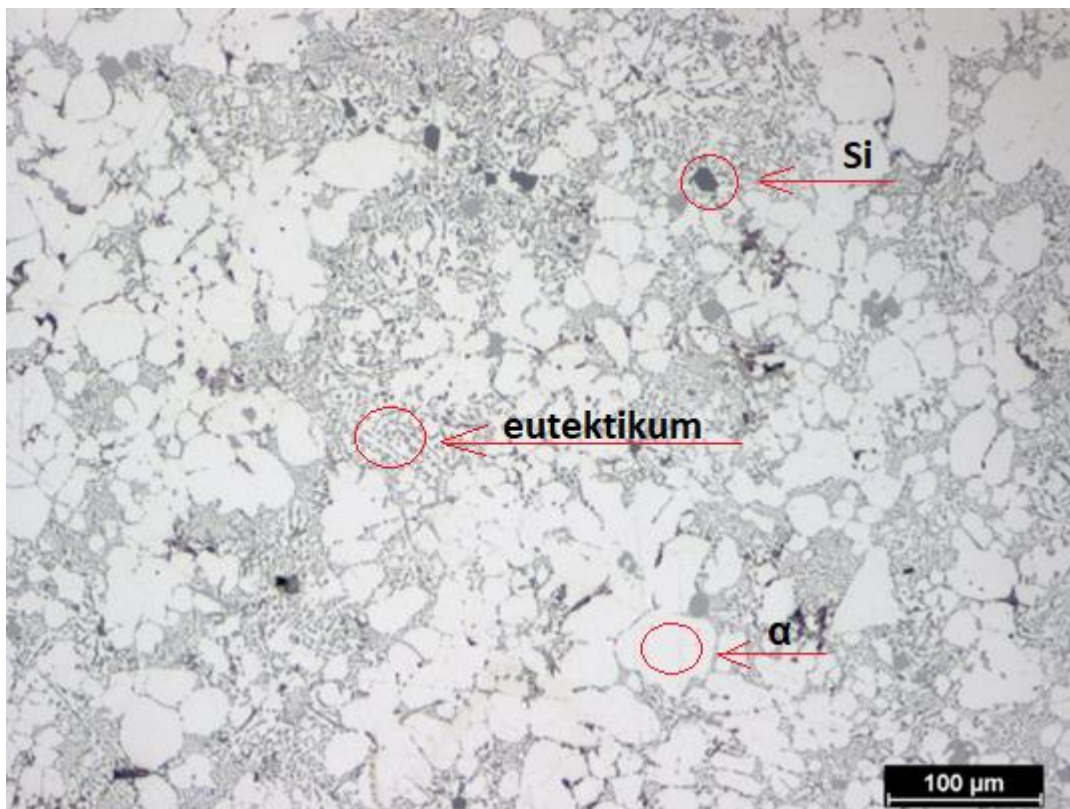


*Obrázek 39 – Vyleštěný vzorek*

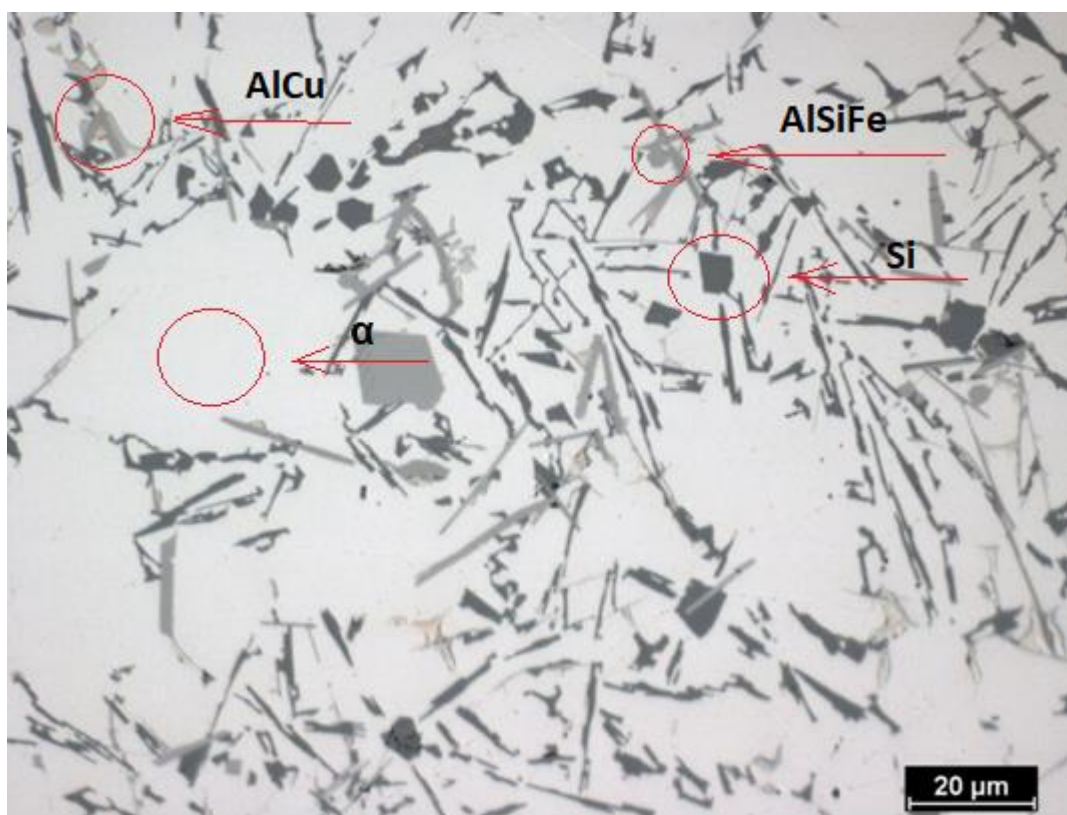
Po vyleštění byl každý vzorek vložen pod mikroskop. Fotografie z mikroskopu jsou na obrázcích 40, 41 a 42. Vzorky byly pozorovány při třech různých zvětšeních.



*Obrázek 40 -Struktura při zvětšení (25x)*



Obrázek 41 – Struktura při zvětšení (100x)



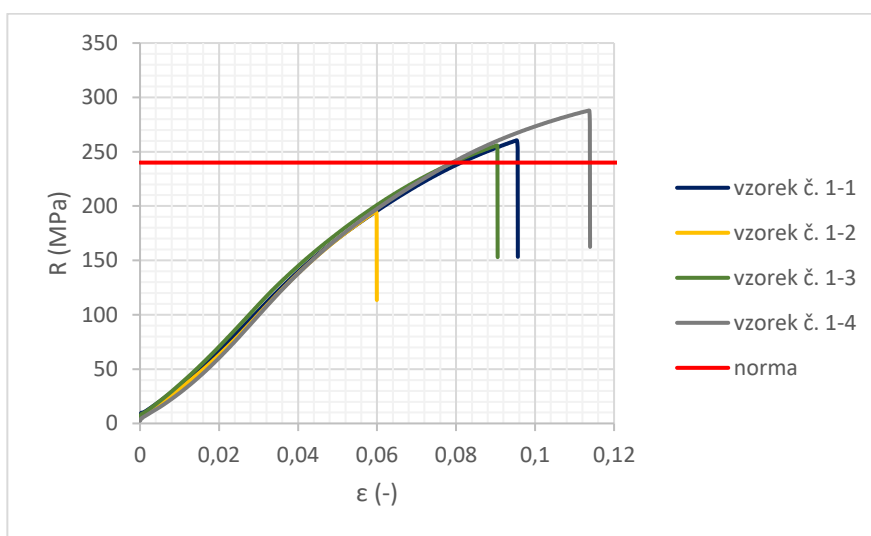
Obrázek 42 – Struktura při zvětšení (400x)

Leptání materiálu nebylo provedeno, neboť struktura je jasně patrná i bez naleptání materiálu.

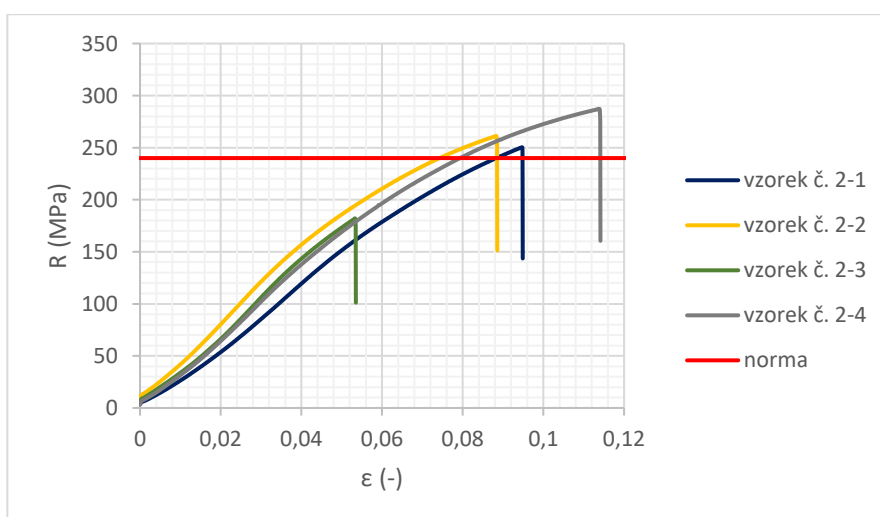
## 5 Výsledky a jejich diskuse

### 5.1 Tahová zkouška

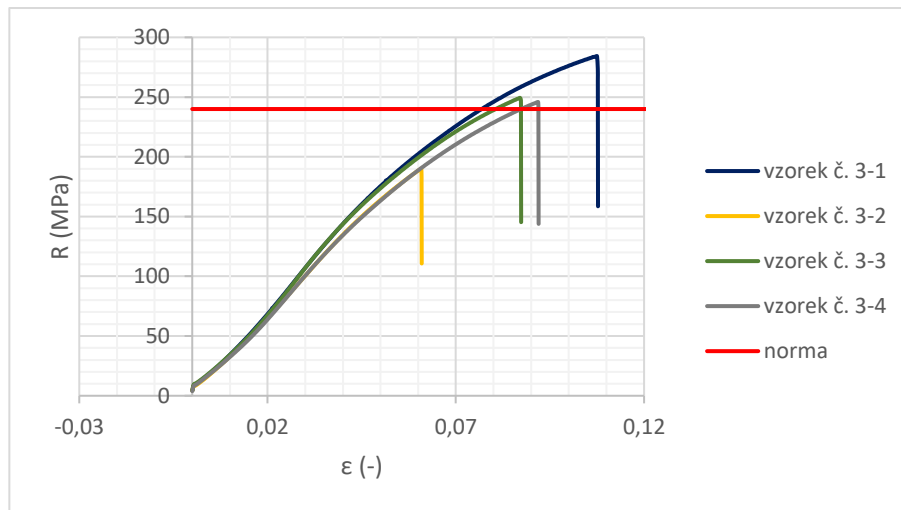
Výsledné hodnoty napětí na mezi kluzu a mezi pevnosti jsou patrné z následujících grafů (obrázek 43-46). Červená čára v každém grafu naznačuje hodnotu meze pevnosti, jak je stanovena v normě ČSN EN 1706. Z odlitku č. 1 byly obrány 4 vzorky a u třech z nich došlo k přetržení až po překročení hodnoty stanovené normou. Stejně tak tomu bylo u odlitků č. 2 a 3. U čtvrtého odlitku překročila toto napětí pouze jedna zkušební tyč.



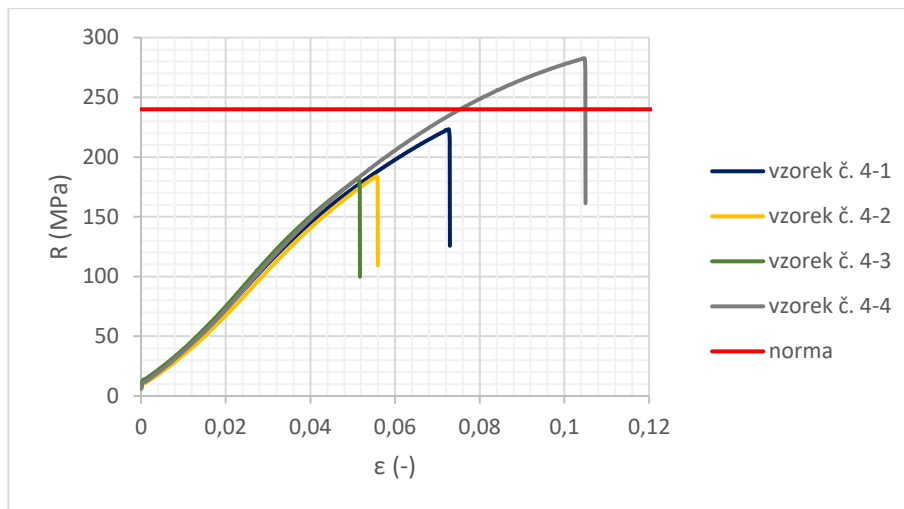
Obrázek 43 - Smluvní tahový diagram, odlitek č. 1



Obrázek 44 – Smluvní tahový diagram, odlitek č. 2



Obrázek 45 - Smluvní tahový digram, odlitek č. 3

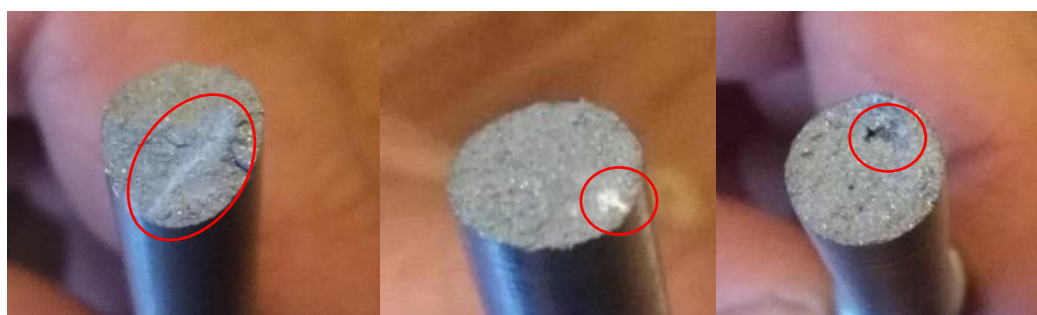


Obrázek 46 - Smluvní tahový digram, odlitek č. 4

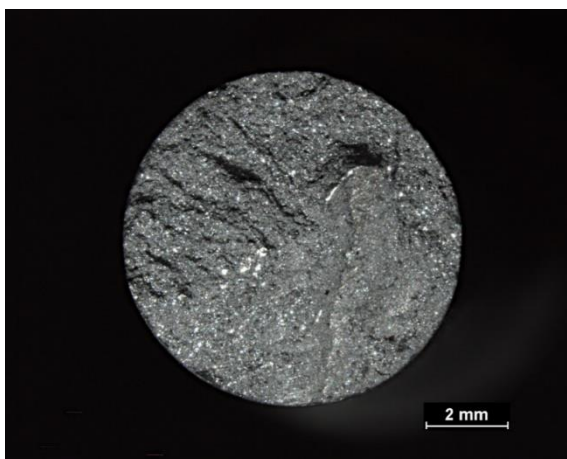
Číselné hodnoty meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti jednotlivých kusů udává *Tab. VI*. Mez kluzu je tedy  $176 \pm 6$  MPa. Norma tuto hodnotu udává jako 140 MPa. Každý ze vzorků měl napětí na mezi kluzu minimálně o 20 MPa vyšší než normované napětí. Mez pevnosti je  $236 \pm 38$  MPa. U pěti z šesti nevyhovujících kusů se pevnost pohybuje pod 200 MPa, u posledního je hodnota 223 MPa. U tří z těchto kusů jsou vady struktury viditelné pouhým okem (obrázek 47). Vady struktury jsou zapříčiněny způsobem výroby tedy odléváním. Detailní zdokumentování vad je uvedeno na obrázcích 48-53. Z obrázků je zřejmé, že se jedná zejména o řediny. Tažnost daného materiálu je  $4,64 \pm 0,92$  %, i když norma říká, že tažnost tohoto materiálu je menší než 1 %. Dané odlitky jsou tedy lépe tažné, než norma předpokládá. Po změření průměru v nejužším místě přetrženého tělesa je zřejmé, že kontrakce daného materiálu je skoro nulová, neboť nejmenší průměr měřený pomocí posuvného měřítka byl 8 mm, což odpovídá počátečnímu průměru tyče. (obrázek 54).

Tab. VI – Výsledné hodnoty napětí a tažností

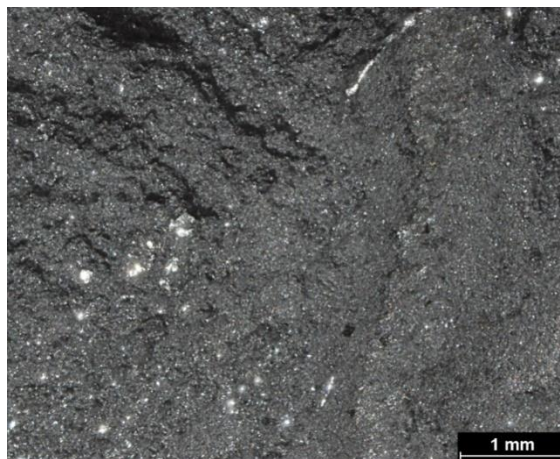
	$R_e$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	A (%)
Norma	140	240	<1
Vzorek č. 1-1	175	256	5,75
Vzorek č. 1-2	176	195	4,48
Vzorek č. 1-3	172	251	4,5
Vzorek č. 1-4	180	284	5,25
Vzorek č. 2-1	178	250	5,25
Vzorek č. 2-2	175	256	5,25
Vzorek č. 2-3	166	182	3,5
Vzorek č. 2-4	177	283	5,3
Vzorek č. 3-1	185	280	5
Vzorek č. 3-2	167	190	3
Vzorek č. 3-3	169	244	4,75
Vzorek č. 3-4	169	241	5,5
Vzorek č. 4-1	163	223	4,95
Vzorek č. 4-2	168	184	2,48
Vzorek č. 4-3	166	182	4,25
Vzorek č. 4-4	180	279	5
průměr	173	236	4,64
Směrodatná odchylka	$\pm 6$	$\pm 38$	$\pm 0,92$



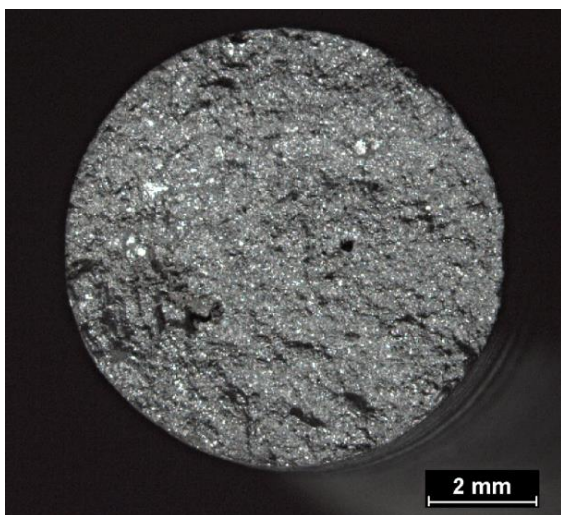
Obrázek 47 – Vady vzorků



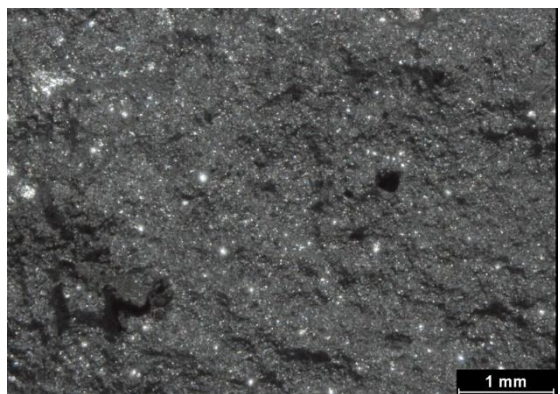
Obrázek 48 – Vada vzorku č. 2-3



Obrázek 49 – Detail vady



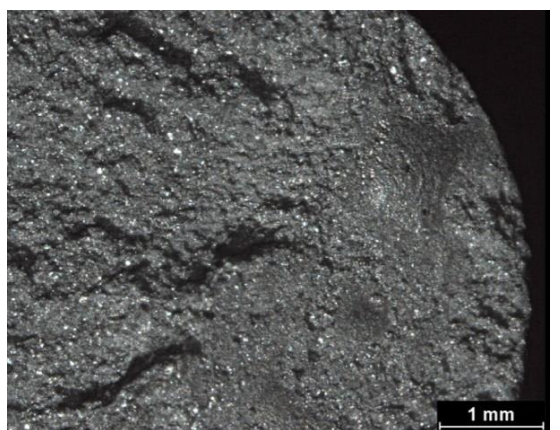
Obrázek 50 – Vada vzorku č. 3-2



Obrázek 51 – Detail vady



Obrázek 52 – Vada odlitku č. 4-3



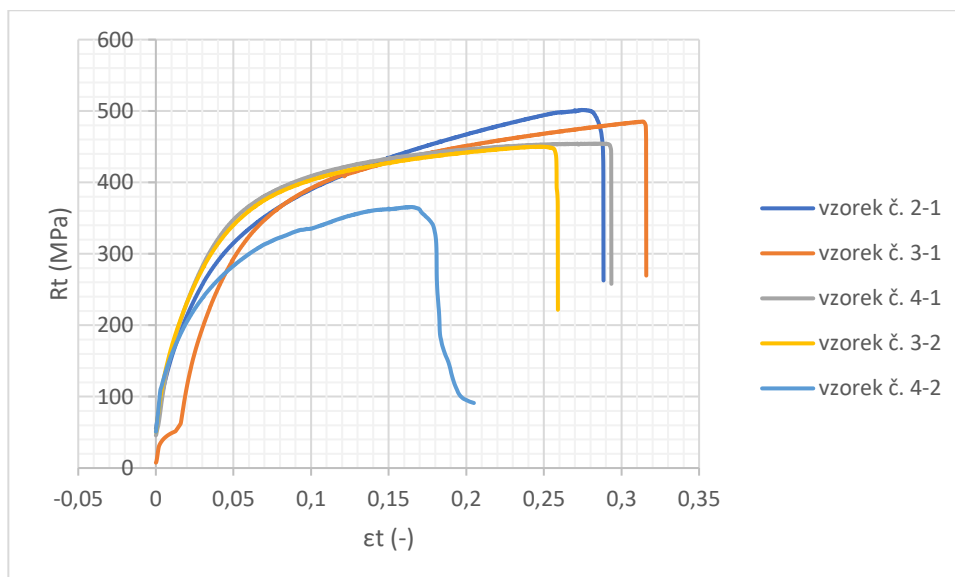
Obrázek 53 – Detail vady



Obrázek 54 – Průměr tyče po přetržení

## 5.2 Tlaková zkouška

U vzorků o výšce 10 mm vypadá výsledný smluvní tlakový digram obdobně jako diagram tahový, jediným rozdílem jsou hodnoty na osách grafu (obrázek 55). Mez pevnosti v tahu je poloviční oproti mezi pevnosti v tlaku. V *Tab. VII* jsou číselné hodnoty smluvní meze kluzu, meze pevnosti a mezního poměrného stlačení.



Obrázek 55 – Smluvní tlakový diagramy dlouhých vzorků



Tab. VII – Výsledné hodnoty napětí a mezních poměrných stlačení pro dlouhé vzorky

	$R_{pt0,2}$ (MPa)	$R_{mt}$ (MPa)	$A_t$ (%)
vzorek č. 2-1	320	502	27,8
vzorek č. 3-1	375	485	29
vzorek č. 4-1	370	455	28,6
vzorek č. 3-2	370	450	25
vzorek č. 4-2	270	365	20
Průměr	341	451	26,08
Směrodatná odchylka	$\pm 46$	$\pm 53$	$\pm 3,74$
průměr bez posledního vzorku	359	473	27,6
směrodatná odchylka bez posledního vzorku	$\pm 26$	$\pm 25$	$\pm 1,8$

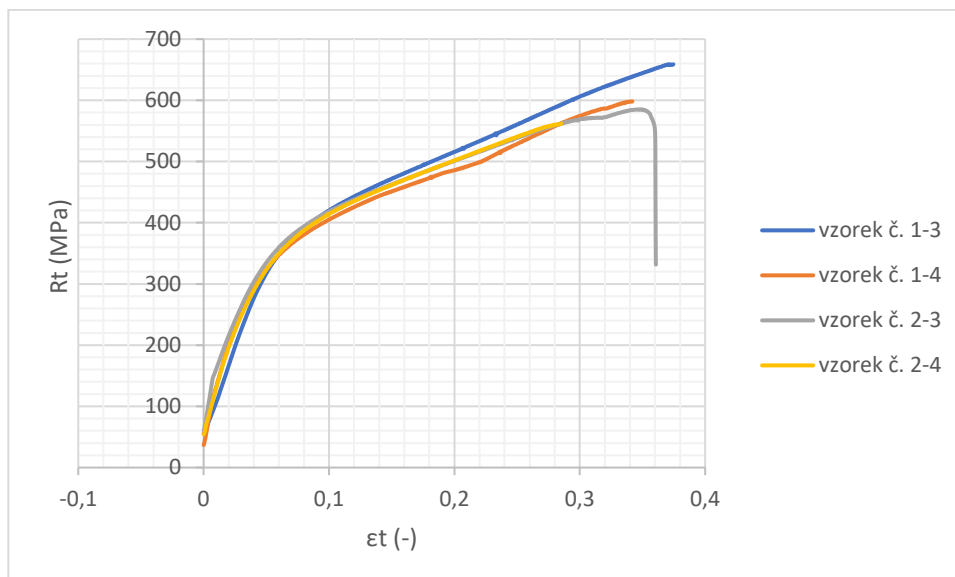
Na vzorku č. 4-2 je viditelné rozdílné porušení než na ostatních vzorcích (obrázek 56). Zatímco první 4 vzorky praskly příčně téměř rovným smykovým lomem, u tohoto vzorku došlo k rozdělení lomu do několika ploch. Je tedy velmi pravděpodobné, že uvnitř vzorku byla vada struktury, a proto došlo k prasknutí mnohem dříve než u předešlých měření. Celková mez kluzu v tlaku je tedy  $341 \pm 46$  MPa, ale pokud vyloučíme poslední vzorek, který jeví jasné známky vady, dostaneme hodnotu  $359 \pm 26$  MPa. V obou případech je hodnota zhruba dvojnásobkem hodnoty meze kluzu v tahu.



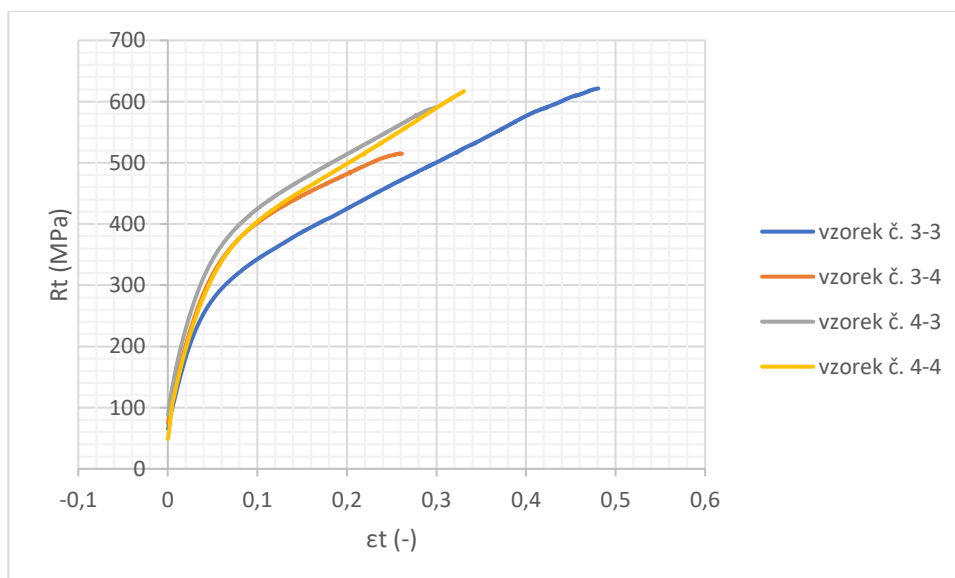
Obrázek 56 – Prasknutí vzorků bez vady a s vadou

Mez pevnosti v tlaku je  $451 \pm 53$  MPa, při započítání i poslední zkoušky. Bez započítání poslední zkoušky je to dokonce  $473 \pm 25$  MPa. Což je opět téměř dvojnásobné napětí, než je tomu u meze pevnosti v tahu. Při zkoušce došlo ke stlačení materiálu o 26 %.

Pro menší vzorky je výsledný diagram na obrázcích 57 a 58. A *Tab. VIII* udává číselné hodnoty smluvní meze kluzu v tlaku, meze pevnosti v tlaku a mezního poměrného stlačení.



Obrázek 57 – Smluvní tlakový diagram krátkých vzorků, odlitek č. 1 a č. 2



Obrázek 58 – Smluvní tlakový diagram krátkých vzorků, odlitek č. 3 a č. 4

Tab. VIII – Výsledné hodnoty napětí a mezních poměrných stlačení pro krátké vzorky

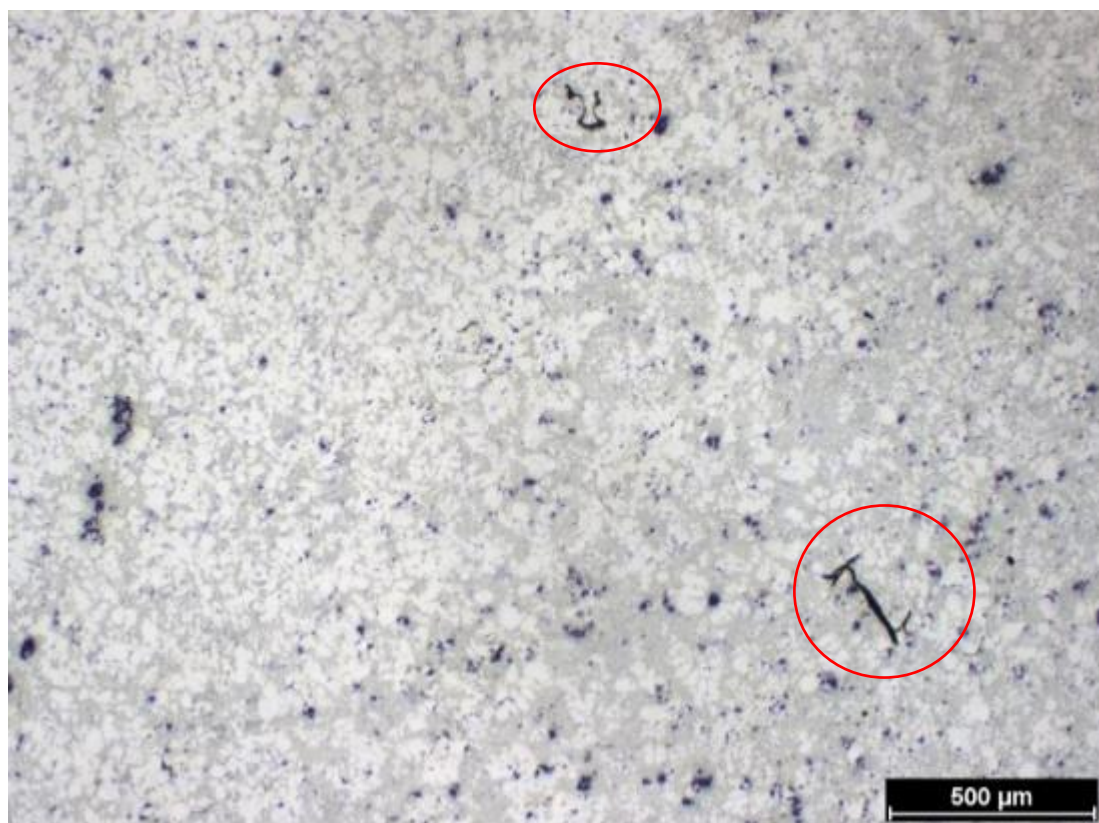
	$R_{pt0,2}$ (Mpa)	$R_{mt}$ (Mpa)	$A_t$ (%)
vzorek č. 1-3	400	670	50
vzorek č. 1-4	380	600	40
vzorek č. 2-3	390	580	30
vzorek č. 2-4	390	560	26
vzorek č. 3-3	320	620	54
vzorek č. 3-4	380	515	22
vzorek č. 4-3	390	590	38
vzorek č. 4-4	380	620	42
průměr	379	594	37,75
Směrodatná odchylka	$\pm 25$	$\pm 46$	$\pm 11,24$

Pro menší výšku válečku byla zjištěná smluvní mez kluzu přibližně totožná se smluvní mezí kluzu pro vyšší vzorky. Mez pevnosti je ovšem o 120 MPa vyšší. Dochází zde tedy k intenzivnějšímu zpevnění materiálu. Nižší vzorky mají menší oblast homogenní deformace (oblast II - obrázek 20). Přetvoření je méně intenzivní než u vyšších vzorků, kde je větší velikost oblasti II příčinou dřívějšího skluzu v materiálu. Výška válečku rovna průměru válečku se používá pro hrubé měření. Pro zpřesnění měření se volí výška válečku 2,5 až 3násobek průměru. Pokud se vyjde z toho předpokladu, mělo by být měření provedené na vyšších vzorcích přesnější, a proto by se konečná mez pevnosti měla stanovit na 473 MPa. I v rámci bezpečnosti konstrukce je lepší použít z těchto dvou hodnot tu nižší.

Mezní poměrné stlačení bylo stanoveno na 37,75 %. Tuto hodnotu však nelze považovat za správnou, neboť po porušení materiálu nedošlo k samovolnému zastavení zkoušky. Docházelo tedy k další deformaci a dalšímu stlačení. Proto i zde bude přesnější hodnota, která byla naměřena na delších vzorcích.

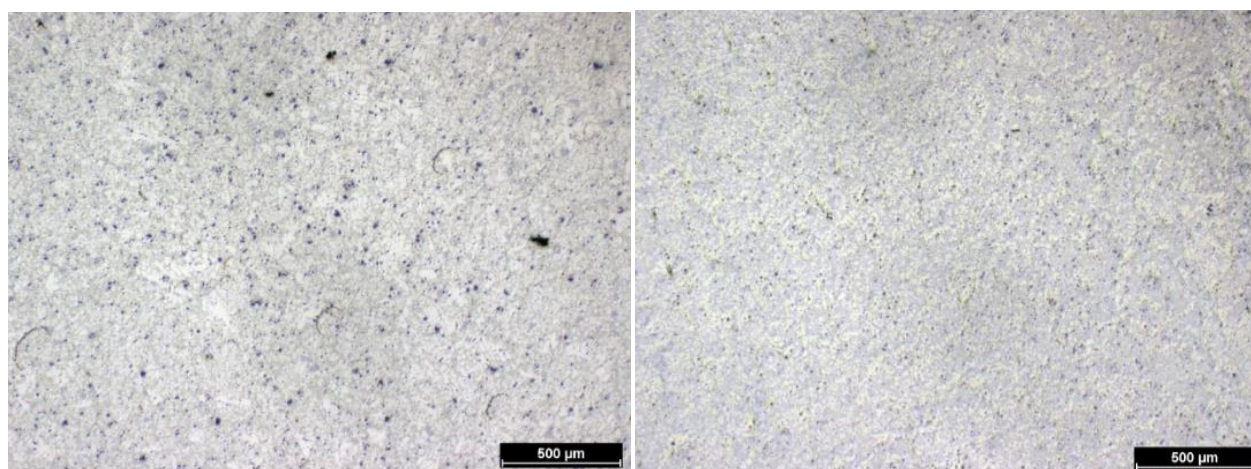
### 5.3 Metalografická analýza

Na snímcích z mikroskopu jsou patrné drobné póry ve struktuře, které jsou typické pro tlakově odlévané výrobky. Pouze na vzorku, který byl odebrán z odlitku č. 4, je patrný i vyšší podíl mikrostaženin (obrázek 59).



Obrázek 59 – Vzorek č. 4 při zvětšení (25x)

Na ostatních snímcích se stejným použitým zvětšením nebyly tyto vady typu staženin pozorovány (obrázky 40 a 60).

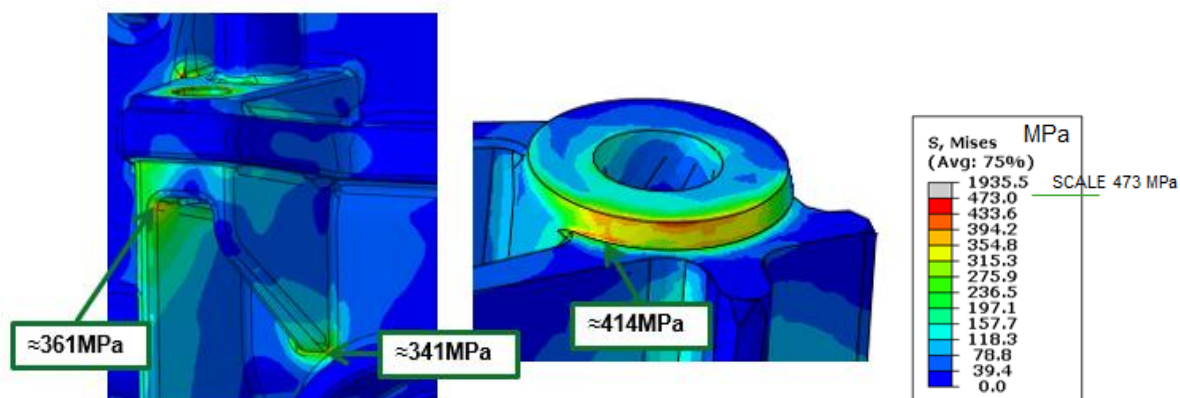


Obrázek 60 - Vzorek č. 1 a č. 3 zvětšení (25x)

## 5.4 Aplikace výsledků do modelu MKP

Na základě provedených mechanických zkoušek byla aktualizována databáze mechanických vlastností slitiny AlSi9Cu3(Fe) softwaru ABAQUS pro MKP analýzu.

Z nových výsledků simulací je patrné, že při porovnání napjatosti s nově stanovenou mezí kluzu v tlaku nedochází ke vzniku kritických oblastí (obrázek 61).



Obrázek 61 - Tlakové napětí na odlitku

Většina míst na odlitku je zatěžována tlakovým napětím, které je menší než nově stanovená mez kluzu v tlaku. Objevují se zde ale i místa, kde je napětí vyšší, než je mez kluzu v tlaku. Mez pevnosti v tlaku není překročena v žádném místě odlitku.

Z pohledu výsledků simulace je nyní odlitek vyhovující, tak jak bylo dokázáno při uvedení tohoto odlitku do praxe.

## 6 Závěr

Na čtyřech náhodně vybraných odlitcích byly provedeny následující zkoušky: zkouška tahem, zkouška tlakem a hodnocení mikrostruktury s přítomností defektů.

Z obecného pohledu je ověřování mechanických vlastností na hotovém kusu nejpřísnější variantou pro hodnocení kvality odlitku. Z výsledků mechanických vlastností bylo prokázáno, že materiál AlSi9Cu3(Fe) splňuje požadavky materiálového listu.

Ve všech případech bylo dosaženo požadované meze kluzu. V případě meze pevnosti byly v každé sérii naměřeny hodnoty nižší alespoň u jednoho vzorku. Všechny neshodné vzorky vykazovali přítomnost nehomogenity na lomové ploše.

Zkoušením bylo zjištěno, že odlitek č. 4 byl vyroben v horší kvalitě než ostatní tři odlitky. Při všech zkouškách se právě na vzorcích odebraných ze čtvrtého odlitku nejvíce projevil vady struktury. Tyto vady pak ovlivnily všechny vyhodnocované parametry.

Tlaková zkouška prokázala, že napětí na mezi kluzu a mezi pevnosti v tlaku jsou přibližně dvojnásobná, než je tomu u tahové zkoušky. Tlaková zkouška byla provedena na vzorcích v poměru 1:1 a 1:2. Hodnoty, které byly zjištěny zkouškou tlakem jsou:  $R_{et} = 359$  MPa a  $R_{mt} = 473$  MPa. Tyto parametry byly použity pro opakovanou simulaci MKP analyzovaného odlitku.

Původní simulace MKP napjatosti v odlitku naznačovala riziko vzniku prasklin na několika místech v odlitku. Na základě výsledků tlakových zkoušek byla provedena nová simulace. Výsledky opakované simulace ukázaly snížení napjatosti v rizikových místech odlitku, což je ve shodě s praxí, kdy nebyl zjištěn vznik prasklin u žádného z již vyrobených kusů.

Bylo prokázáno, že kvalita odlitků je velmi dobrá. A dále, že pro simulace MKP je nutné pracovat s reálnými hodnotami mechanických vlastností zjištěnými zkouškami přímo na materiálu, který je pro daný výrobek používán.

## 7 Literatura

- [1] BENEŠ, Antonín a kolektiv. *Kovové materiály: vlastnosti a použití*. Spálená 51, Praha 1: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1968. ISBN L14-E1-IV-41/4643.
- [2] Periodická tabulka: Hliník. *Periodická tabulka: Chemické prvky* [online]. 2009 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: [www.prvky.com](http://www.prvky.com)
- [3] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Nauka o materiálu*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-010-1507-6.
- [4] HAVLÍČKOVÁ, J. *Využití simulace pro predikci vad a hodnocení vlastností u tlakově litých odlitků z Al slitin*. Diplomová práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2011. 94 s.
- [5] ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [6] Statické zkoušky. *Domovské stránky uživatelů* [online]. Plzeň, 2017 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~dyxon/DATA/Nauka%20o%20M/Zkouska.pdf>
- [7] Mechanické vlastnosti. *Oddělení povrchového inženýrství* [online]. Plzeň, 2005 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: [https://www.opi.zcu.cz/mechanicke\\_vlastnosti.pdf](https://www.opi.zcu.cz/mechanicke_vlastnosti.pdf)
- [8] PROCHÁZKA, Jiří, Miroslav ZAHRADNÍK, Milan NĚMEC a Jiljí NOVOTNÝ. *Technologie slévání, tváření a svařování*. Praha 1, Husova 5: České vysoké učení technické v Praze, Editační středisko ČVUT, 1982.
- [9] HAVLÍČKOVÁ, J. *Využití simulace pro predikci vad a hodnocení vlastností u tlakově litých odlitků z Al slitin*. Diplomová práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2011. 94 s
- [10] SOMMER, Boris. *Technologie tváření kovů*. 2. vyd. Ostrava, 2003. ISBN 80-248-0263-5
- [11] *Metalografie I* [online]. Praha [cit. 2017-05-28]. Dostupné z: <http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Metalografie%20I.pdf?redirected>. Laboratorní práce. VŠCHT.
- [12] JANDOŠ, František, Ríša ŘÍMAN a Antonín GEMPERLE. *Využití moderních laboratorních metod v metalografii*. Spálená 51, 113 02 Praha 1: SNTL - Nakladatelství technické literatury, n. p., 1985. ISBN L14-B2-IV-31/41745.
- [13] ELFMARK, Jiří. *Tváření kovů*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1992. Technický průvodce. ISBN 80-030-0651-1.
- [14] ČSN 42 0426. *Zkouška pýchováním*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1984.
- [15] ČSN EN 1706. *EN AC-ALSi9Cu3(Fe)*. Panenské Břežany: Český normalizační institut, 1999.
- [16] BIN, Shi-bo, Shu-ming XING, long-mei TIAN, Ning ZHAO a Lan LI. Influence of technical parameters on strength and ductility of AlSi9Cu3 alloys in squeeze casting. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* [online]. 2013, **23**(4), 977-982 [cit. 2017-06-26]. DOI: 10.1016/S1003-6326(13)62555-8. ISSN

10036326. Dostupné z:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1003632613625558>
- [17] FABRIZI, Alberto, Stefano FERRARO a Giulio TIMELLI. The influence of Sr, Mg and Cu addition on the microstructural properties of a secondary AlSi9Cu3(Fe) die casting alloy. *Materials Characterization* [online]. 2013, **85**, 13-25 [cit. 2017-06-26]. DOI: 10.1016/j.matchar.2013.08.012. ISSN 10445803. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1044580313002489>
- [18] Elektrolýza. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-06-22]. Dostupné z: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3b/Elektrol%C3%BDza.jpg>
- [19] Fotografie provozu firmy. *S-MODEL: slévárna hliníku* [online]. 2015 [cit. 2017-06-22]. Dostupné z: [http://www.s-model.cz/galerie/odlitek\\_01\\_v.jpg](http://www.s-model.cz/galerie/odlitek_01_v.jpg)
- [20] ZÁŠKODA, D. *Zjišťování mechanických vlastností tvářených materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 28s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Kamil Podaný.
- [21] *JD Dvořák: dodávky zkušební techniky* [online]. [cit. 2017-06-22]. Dostupné z: [http://www.testsysteme.cz/obrazky/katalog\\_pro/000008/000061\\_AGS-X\\_obr\\_1.jpg](http://www.testsysteme.cz/obrazky/katalog_pro/000008/000061_AGS-X_obr_1.jpg)
- [22] INSTRON 5582. *INSTRON: Leading the way in materials testing* [online]. Norwood, MA: Illinois Tool Works [cit. 2017-07-02]. Dostupné z: <http://www.instron.us/~media/images/instron/catalog/products/testing-systems/universal-testing-systems/5900-universal/5980-floor-model/detail2---5985-floor-model.jpg>



## 8 Seznam obrázků

OBRÁZEK 1 – KRITICKÁ MÍSTA ODLITKU.....	7
OBRÁZEK 2 – KUBICKÁ PLOŠNĚ STŘEDĚNÁ MŘÍŽKA .....	11
OBRÁZEK 3 – ELEKTROLÝZA [18] .....	12
OBRÁZEK 4 – BINÁRNÍ ROVNOVÁŽNÝ DIAGRAM SE ZMĚNOU ROZPUSTNOSTI V TUHÉM STAVU.....	13
OBRÁZEK 5 – ROVNOVÁŽNÝ DIAGRAM SOUSTAVY AL-SI [1] .....	14
OBRÁZEK 6 – STROJ S TEPLOU KOMOROU [8] .....	15
OBRÁZEK 7 – STROJ SE STUDENOU KOMOROU [8].....	15
OBRÁZEK 8 – TLAKOVĚ LITÝ TENKOSTĚNNÝ ODLITEK [19].....	17
OBRÁZEK 9 – PRINCIP KAPILÁRNÍ ZKOUŠKY [8].....	20
OBRÁZEK 10 – TVARY VZORKŮ PRO TAHOVOU ZKOUŠKU [3].....	21
OBRÁZEK 11 – PRACOVNÍ DIAGRAM.....	21
OBRÁZEK 12 – SMLUVNÍ A REÁLNÝ TAHOVÝ DIAGRAM.....	22
OBRÁZEK 13 – URČENÍ SMLUVNÍ MEZE KLUZU.....	23
OBRÁZEK 14 – ROZLOŽENÍ DEFORMACE PO DÉLCE ZKUŠEBNÍ TYČE [3] .....	24
OBRÁZEK 15 – SILOVÉ PŮSOBENÍ NA VZORKY V TAHU A V TLAKU .....	25
OBRÁZEK 16 – SCHÉMA ZATĚŽOVÁNÍ PŘI TLAKOVÉ ZKOUŠCE [6] .....	25
OBRÁZEK 17 – SMLUVNÍ TAHOVÝ A TLAKOVÝ DIAGRAM [5] .....	26
OBRÁZEK 18 – ZKUŠEBNÍ VZOREK PŘED A PO ZATÍŽENÍ [14] .....	26
OBRÁZEK 19 – REÁLNÁ PODOBA VZORKŮ PŘED A PO ZATÍŽENÍ [20] .....	26
OBRÁZEK 20 – ROZLOŽENÍ NAPĚTÍ V TLAKOVĚ ZATĚŽOVANÉM VZORKU [10] .....	28
OBRÁZEK 21 – UNIVERZÁLNÍ ZKUŠEBNÍ STROJ [21] .....	29
OBRÁZEK 22 – ZPŮSOBY UPEVNĚNÍ VZORKŮ [11] .....	31
OBRÁZEK 23 – ZPŮSOBY OSVĚTLENÍ VZORKU [12] .....	32
OBRÁZEK 24 – POZOROVÁNÍ VE SVĚTLÉM POLI [12] .....	33
OBRÁZEK 25 – POZOROVÁNÍ V TMAVÉM POLI [12] .....	33
OBRÁZEK 26 - ROZMĚRY ZKUŠEBNÍCH TYČÍ .....	34
OBRÁZEK 27 - REÁLNÁ PODOBA POUŽÍYCH ZKUŠEBNÍCH TYČÍ.....	34
OBRÁZEK 28 – INSTRON 5582 [22].....	35
OBRÁZEK 29 – UPEVNĚNÍ ZKUŠEBNÍ TYČE .....	35
OBRÁZEK 30 – ZKUŠEBNÍ TYČE PO PŘETRŽENÍ.....	36
OBRÁZEK 31 – PRACOVNÍ DIAGRAMY PRO JEDNOTLIVÉ ZKUŠEBNÍ TYČE.....	36
OBRÁZEK 32 – REÁLNÁ PODOBA ZKUŠEBNÍHO VZORKU .....	37
OBRÁZEK 33 – UMÍSTĚNÍ VZORKU DO PRACOVNÍHO PROSTORU STROJE.....	37
OBRÁZEK 34 – PRACOVNÍ DIGRAMY DLOUHÝCH VZORKŮ.....	38
OBRÁZEK 35 – PRACOVNÍ DIAGRAMY KRÁTKÝCH VZORKŮ .....	39
OBRÁZEK 36 – DLOUHÝ VZOREK PO ZKOUŠCE.....	40

OBRÁZEK 37 – KRÁTKÝ VZOREK PO ZKOUŠCE .....	40
OBRÁZEK 38 – ZALISOVANÉ VÝŘEZY.....	40
OBRÁZEK 39 – VYLEŠTĚNÝ VZOREK .....	41
OBRÁZEK 40 -STRUKTURA PŘI ZVĚTŠENÍ (25X) .....	41
OBRÁZEK 41 – STRUKTURA PŘI ZVĚTŠENÍ (100X).....	42
OBRÁZEK 42 – STRUKTURA PŘI ZVĚTŠENÍ (400X).....	42
OBRÁZEK 43 - SMLUVNÍ TAHOVÝ DIGRAM, ODLITEK Č. 1.....	43
OBRÁZEK 44 – SMLUVNÍ TAHOVÝ DIAGRAM, ODLITEK Č. 2.....	43
OBRÁZEK 45 - SMLUVNÍ TAHOVÝ DIGRAM, ODLITEK Č. 3.....	44
OBRÁZEK 46 - SMLUVNÍ TAHOVÝ DIGRAM, ODLITEK Č. 4.....	44
OBRÁZEK 47 – VADY VZORKŮ .....	45
OBRÁZEK 48 – VADA VZORKU Č. 2–3 .....	46
OBRÁZEK 49 – DETAIL VADY.....	46
OBRÁZEK 50 – VADA VZORKU Č. 3–2 .....	46
OBRÁZEK 51 – DETAIL VADY.....	46
OBRÁZEK 52 – VADA ODLITKU Č. 4-3 .....	46
OBRÁZEK 53 – DETAIL VADY.....	46
OBRÁZEK 54 – PRŮMĚR TYČE PO PŘETRŽENÍ.....	47
OBRÁZEK 55 – SMLUVNÍ TLAKOVÝ DIAGRAMY DLOUCHÝCH VZORKŮ .....	47
OBRÁZEK 56 – PRASKNUTÍ VZORKŮ BEZ VADY A S VADOU .....	48
OBRÁZEK 57 – SMLUVNÍ TLAKOVÝ DIAGRAM KRÁTÝCH VZORKŮ, ODLITEK Č. 1 A Č. 2 .....	49
OBRÁZEK 58 – SMLUVNÍ TLAKOVÝ DIAGRAM KRÁTKÝCH VZORKŮ, ODLITEK Č. 3 A Č. 4.....	49
OBRÁZEK 59 – VZOREK Č. 4 PŘI ZVĚTŠENÍ (25X) .....	51
OBRÁZEK 60 - VZOREK Č. 1 A Č. 3 ZVĚTŠENÍ (25X) .....	51
OBRÁZEK 61 - TLAKOVÉ NAPĚTÍ NA ODLITKU .....	52