

**Měření mechanických vlastností litiny  
nedestruktivní metodou**

Zdeněk Janošík

---

Bakalářská práce  
2015

 **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně**  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2014/2015

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Zdeněk Janošík**  
Osobní číslo: **T12061**  
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**  
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Měření mechanických vlastností litiny nedestruktivní metodou**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární studie na dané téma.
2. Příprava zkušebních vzorků pro experiment.
3. Provedení experimentu.
4. Vyhodnocení naměřených výsledků.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího BP.**

Vedoucí bakalářské práce:

**doc. Ing. David Mañas, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

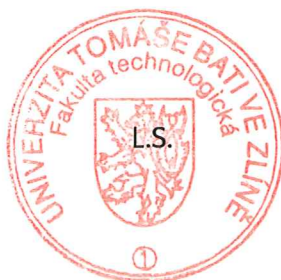
**30. ledna 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**22. května 2015**

Ve Zlíně dne 9. února 2015

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*



  
prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

Příjmení a jméno: .....

Obor: .....

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně .....

.....

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

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

(2) *Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.*

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

<sup>2)</sup> *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:*

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

<sup>3)</sup> *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:*

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

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

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

## **ABSTRAKT**

Bakalářské práce řeší problém využití nedestruktivních zkoušek (ultrazvuková zkouška) pro měření mechanických vlastností odlitků. Byly vyrobeny tři typy zkušebních těles, na kterých byly změřeny mechanické vlastnosti (zkouška tahem, zkouška tvrdosti dle Brinella a Instrumentovaná zkouška mikrotvrdosti), které byly porovnány s mechanickými vlastnosti měřenými nedestruktivní zkouškou (ultrazvuková zkouška).

Klíčová slova: nedestruktivní, pevnost, litina, ultrazvuk, akustické měření.

## **ABSTRACT**

Bachelor work solves the problem of the use of non-destructive testing ( ultrasonic test) to measure the mechanical properties of the castings. They were made of three kinds of test specimens , which were measured for mechanical properties ( tensile test , hardness test and the Brinell Instrumented microhardness test ) were compared with the mechanical properties measured NDE ( ultrasonic examination).

Keywords: Keywords : non-destructive strength , cast iron , ultrasound, acoustic measurements

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Davidu Maňasovi Ph.D., za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce.

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

## OBSAH

<b>ÚVOD.....</b>	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>10</b>
<b>1 SLÉVÁRENSTVÍ.....</b>	<b>11</b>
1.1 MATERIÁL ODLITKŮ .....	11
1.2 ODLÉVÁNÍ DO NETRVALÝCH FOREM.....	11
1.3 ZVLÁŠTNÍ ZPŮSOBY LITÍ A LITÍ DO TRVALÝCH FOREM .....	13
1.4 ČIŠTĚNÍ A OPRAVA ODLITKŮ .....	14
<b>2 LITINA.....</b>	<b>15</b>
2.1.1 Bílé litiny.....	22
2.1.2 Grafitické litiny .....	23
2.1.3 Struktura litiny s lupínkovým grafitem [7] .....	26
2.1.4 Vliv dalších prvků v litině.....	27
2.1.5 Litina s kuličkovým grafitem .....	27
2.1.6 Litina s červíkovitým grafitem – vermikulární .....	28
2.1.7 Tepelné zpracování litin .....	28
2.1.8 Šedá litina.....	31
2.1.9 Tvárná litina .....	31
<b>3 AKUSTICKÉ VLASTNOSTI LITIN, DEFECTOSKOPIE, STRUKTUROSKOPIE.....</b>	<b>32</b>
3.1 PRINCIP MĚŘENÍ POMOCÍ ULTRAZVUKU .....	32
3.2 AKUSTICKÉ VLASTNOSTI LITIN .....	32
3.3 ULTRAZVUKOVÁ METODA.....	33
3.4 MECHANICKÉ ZKOUŠKY MATERIÁLU (DESTRUKTIVNÍ) .....	35
3.4.1 Tahová zkouška.....	35
3.4.2 Zkoušení tvrdosti materiálu.....	37
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>42</b>
<b>CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....</b>	<b>43</b>
<b>3. PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ PRO EXPERIMENT .....</b>	<b>44</b>
3.5 MĚŘENÍ PEVNOSTI ŠEDÉ LITINY NEDESTRUKTIVNÍ METODOU .....	44
3.6 PŘÍČINA MĚŘENÍ.....	44
3.7 LEŠTĚNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES .....	44
<b>4 MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI .....</b>	<b>46</b>
4.1 TVRDOMĚR MICRO-COMBI TESTER.....	46
<b>5 STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....</b>	<b>48</b>
5.1 MĚŘENÉ MATERIÁLOVÉ PARAMETRY .....	48
5.2 STATISTICKÉ VZTAHY .....	48
5.3 PROVEDENÍ EXPERIMENTU .....	49
<b>6 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>50</b>
<b>7 DISKUSE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>57</b>
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>63</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>65</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>66</b>



<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>67</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>69</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>70</b>

## ÚVOD

Cílem této bakalářské práce je provedení nedestruktivního měření akustických vlastností šedé litiny, za účelem odvození mechanických vlastností materiálu. Dané mechanické vlastnosti, které slévárna deklaruje, jsou hodnoty naměřené na zkušební tyči předepsané atestem. Odběratele odlitku však může zajímat mimo jiné informace, jaké jsou materiálové vlastnosti přímo na daném výrobku, například na stěnách, žebrech či jiných částech odlitků. A právě tyto parametry se mohou výrazně lišit od hodnot daných atestem. Rovněž otázku případných reklamací by bylo možno zodpovědět přímo na místě a potvrdit tak shodu s výsledky danými destruktivní zkouškou. Odpověď na tyto otázky se pokusím naléznout právě v akustickém šíření zvuku litinovou maticí, která by podle předpokladu měla mít spojitost s mechanickými vlastnostmi materiálu. Aby bylo vysvětleno vše od začátku, prvotní kroky povedou k prostudování slévárenství, materiálů vyrobených z litiny a principům odlévání. S tím spojenými fyzikálními a chemickými přeměnami materiálu v průběhu tavení, odlévání, ochlazování a výroby, určení složek ovlivňujících pevnost a tvrdost litin a popis destruktivních mechanických zkoušek předepsaných atestem a normami. Ve druhé části bude provedeno samotné měření akustických vln a jejich rychlosti šíření v litinové maticí, statistické uspořádání souboru a porovnání s výsledky destruktivního měření. Výsledkem by měla být soustava vzorců, které by na základě podélných ultrazvukových vln určily výsledek odpovídající pevnosti a tvrdosti měřeného materiálu.

## I. TEORETICKÁ ČÁST

## 1 SLÉVÁRENSTVÍ

Odlitky tvoří převážnou část většiny věcí okolo nás. Můžeme je vidět u kovových strojů, nástrojů nebo součástí různých výrobků a svým charakterem výroby i mechanickými, technickými a chemickými vlastnostmi nám dávají jedinečný způsob výroby kovových součástí velmi složitého tvaru, kterého bychom jinak jen těžko dosáhli. Je to především díky způsob a postup výroby, kdy se roztavený kov vlije do formy a po jeho ztuhnutí získáváme hotový výrobek nebo polotovár, který můžeme dále opracovávat.

Odléváním vyrábíme stojany obráběcích strojů, stojany, v automobilovém průmyslu jsou to především, bloky motorů, písty, karburátory a jiné.

### 1.1 Materiál odlitků

Materiál odlitků můžeme rozdělit na slitiny železa a neželezné kovy

Slitiny železa jsou:

- šedá litina,
- tvárná litina,
- bílá litina,
- temperovaná litina,
- ocel na odlitky.

Slitiny neželezných kovů:

- slitiny těžkých kovů,
- slitiny lehkých kovů.

### 1.2 Odlévání do netrvalých forem

Takové formy se používají jen pro jedno lití.

K zhotovení formy potřebujeme:

- Model
  - Modelové zařízení slouží k vytvoření dutiny netrvalé pískové formy. Model je stejných tvarů, jako požadovaný výrobek a většinou se od něj neliší.

- Jaderník je zařízení, v jehož dutině se z formovacích směsí pěchují jádra
- Materiál, který se používá k výrobě modelů je buď dřevo, kov, sádra nebo keramika.
- Formovací materiál
  - Základní surovinou pro přípravu slévárenských písků jsou přírodní písky, šamot, tuha, hlíny, uhelný prach bentonit, organické látky jako oleje, louh, pryskyřice, škrob a podobně.
  - formovací směsi se pěchují buď ručně, nebo strojně.
  - Ruční pěchování využívá ruční nebo pneumatické pěchování
  - Strojní pěchování používá techniky lisování, střešování, metání.

**Lisování** – forma je nejvíce pěchována přímo pod lisovací hlavou a nejméně u modelu, což může být nevýhodou.

**Střešování** se provádí na střešacích strojích. Principem je zvednutí stolu spolu s rámem do určité výšky (30 – 80 mm). Poté stůl padá dolů a písek se zpevňuje nárazem na zarážky.

**Metání** zahrnuje cyklus metacího kola, které prudce metá lopatkami formovací směs do formovacího rámu a materiál zpevňuje.

- Formovací rám
  - Má obdélníkový tvar normalizovaných rozměrů a materiál se volí podle druhu odlévaného kovu. Jeho pevný plášť musí chránit formu při rozebírání a vyjímání modelu. Slouží rovněž k obracení, převážení a manipulaci.
- Jádro
  - Jsou tělesa, která vytvářejí v odlitku dutiny. Tato tělesa jsou obklopena kovem ze všech stran.
- Vtoková soustava
  - Vtoková soustava dopravuje roztavený kov do formy odlitku a má funkci nejen plnění, ale vyfukování plynů a par, které při lití utíkají z formy, a příznivě ovlivňuje smrštění kovů při tuhnutí.

Vtoková jamka – zachycuje první náraz kovu a strusku.

Vtokový kůl – spojuje vtokovou jamku s odlitkem.

Výfuk – umožňuje výfuk plynů.

- Strojní formování
  - Základem strojního formování je modelová deska a formovací stroj. Modelová deska se vyjímá ze zapěchovaného rámu celá. Vhodným zhutněním písku dosáhneme lisováním zdola, častější je však lisování shora. Oboustranné lisování se používá při formování jednoduchých odlitků.

### 1.3 Zvláštní způsoby lití a lití do trvalých forem

- Lití pod tlakem se používá v sériové a hromadné výrobě, nebo u tenkostěnných odlitků ze slitin neželezných kovů. Roztavený kov je vstřikován pod tlakem do kovové formy.
- Lití odstředivé je, když je roztavený kov vléván do rychle se otáčející formy. Vlivem odstředivé síly vznikne požadovaný rotační tvar součásti. Otáčky se mění v rozsahu 300 až 2000 otáček za minutu. Tento princip se používá na odlévání trubek, válců, kroužků. Podmínkou je však kulatá dutina odlitků.
- Lití sklopné je, když roztavený kov na pánvi po překlopení zaplní formu a tím vytvoří budoucí odlitek. Kov se taví ve sklopných pecích elektrickým obloukem mezi dvěma uhlíkovými elektrodami uprostřed tavícího prostoru.
- Přesné lití se používá pro složité součásti. Místo dřevěných modelů se používají vytavitelné modely, nejčastěji voskové směsi. Voskový model se namočí do obalovací hmoty a zasype křemičitým pískem. To se opakuje, až se vytvoří pevná skořepina. Po ztuhnutí se vosk vytaví a do vzniklé dutiny můžeme lít roztavený kov.
- Lití do skořepinových forem. Na kovový zahřátý model je nanášena pryskyřice s pískem, čímž vznikne tenká skořepina, která vytvoří tvar budoucího odlitku. Po vytvrzení se skořepina oddělí od modelové desky. Dvě poloviny skořepiny se slepí a vytvoří dutinu pro budoucí odlitek.

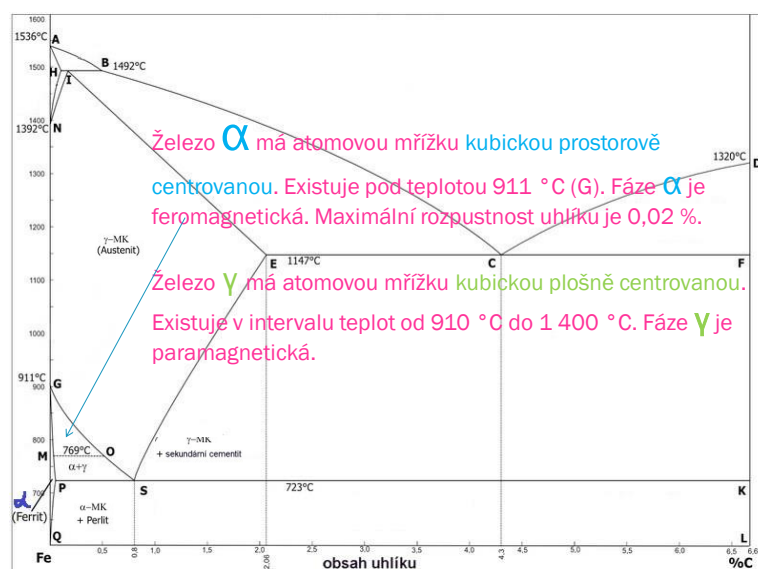
#### 1.4 Čištění a oprava odlitků

- Vytloukání odlitků z formy,
- Odstranění jader v odlitku,
- Odstraňování vtoků a nálitků,
- Čištění povrchu odlitků osekávání a broušení,
- Osekávání a broušení,
- Opravy vad.

## 2 LITINA

Litina je slitina železa s uhlíkem, kde je množství uhlíku více jak 2 hm%. Množství uhlíku je vyšší než jeho mezní hodnota rozpustnosti v austenitu (2,11 hm%), viz.: diagram Fe-Fe<sub>3</sub>C, resp. Fe-C. Litiny můžeme rozdělit na litiny bílé a grafitické, podle toho, jak probíhá jejich krystalizace. Bílé litiny krystalizují v soustavě nestabilní za vzniku cementitu ve výsledné struktuře. Grafitické litiny krystalizují v soustavě stabilní a struktura je vedle feritu tvořena grafitem.

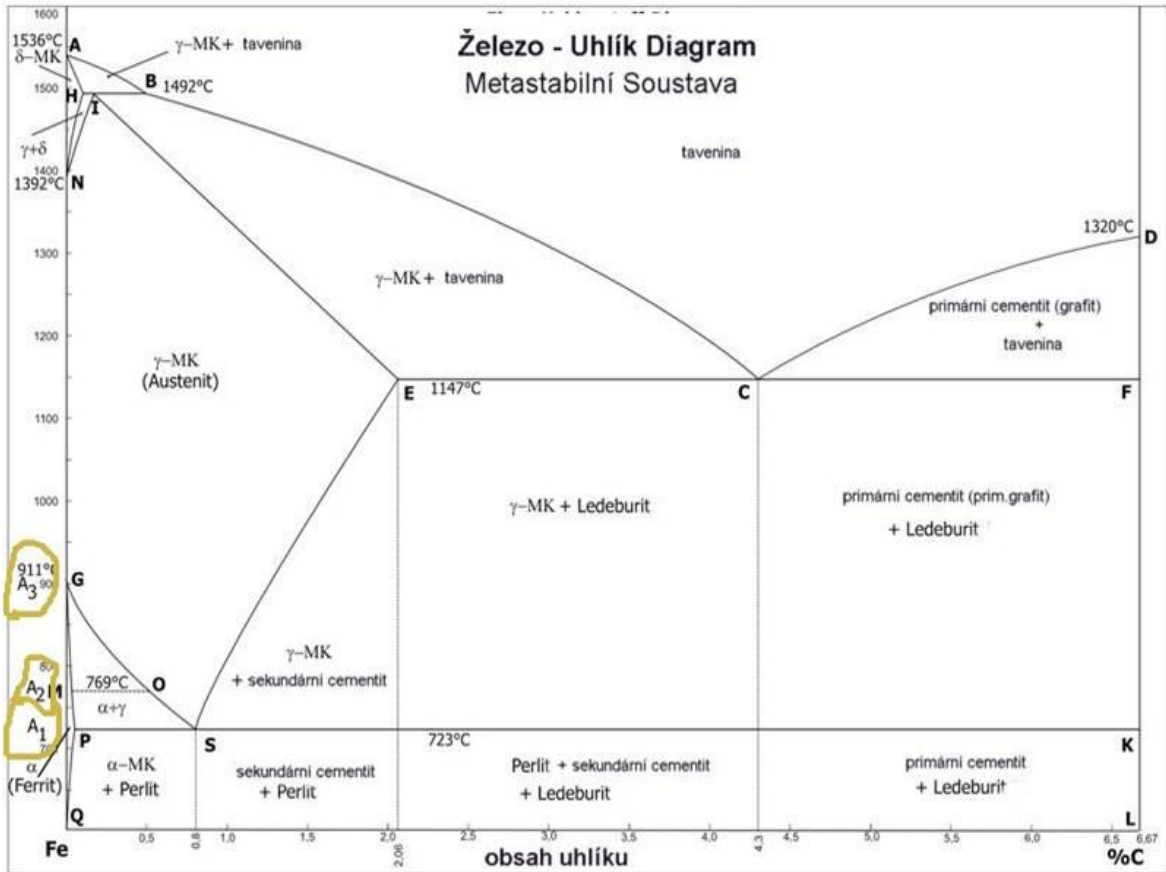
Velký vliv na výslednou podobu krystalizace má rychlost ochlazování pro udržení nebo neudržení stabilních či metastabilních podmínek krystalizace. Rovněž přítomnost prvků podporujících vznik karbidu železa Fe<sub>3</sub>C, (Mn a Cr) nebo přítomnost prvků podporujících grafitizaci (Si, Ni), či podpora grafitizace očkovaním nebo modifikováním. Při svařování bez předehřevu nebo při malém předehřevu jsou rychlosti ochlazování natolik vysoké, že téměř vždy podporují vznik cementitu. Dalším nepříznivým faktem litin je, že litina při tuhnutí zmenšuje svůj objem, což vede vždy ke vzniku pnutí či vadám makrostruktury (lunkry). Při tuhnutí litiny tedy vždy hrozí nebezpečí vzniku trhlin, například ve svarovém kovu, tak i v základním materiálu. K tomu přispívá i nízká tepelná vodivost litin, která způsobuje pomalý odvod tepla z místa svaru a tím ostré teplotní přechody. Litiny se při tavení chovají jinak než oceli, nepřecházejí tzv. těstovitým stavem, ale přecházejí náhle z pevného stavu do kapalného a naopak. Tato vlastnost předurčuje svařování litin převážně v poloze vodorovné shora (PA dle ČSN ISO 6947).



Obrázek 1: Diagram Fe<sub>3</sub>C (zdroje: [ 7])



Chování a křivky tuhnutí při odlévání popisují především diagramy  $\text{Fe}_3\text{C} - \text{Fe}-\text{C}$ . Na ose x rovnovážného diagramu jsou vyznačeny koncentrace uhlíku. Na ose y je teplota ve  $^{\circ}\text{C}$ . V diagramu je znázorněna pouze technicky relevantní část do obsahu uhlíku 6,67 %, což odpovídá 100 % obsahu cementitu  $\text{Fe}_3\text{C}$ .



Obrázek 2:  $\text{Fe}_3\text{C}-\text{C}$  diagram

- Sloučenina uhlíku s železem, tzv. karbid železa známý jako cementit -  $\text{Fe}_3\text{C}$ , není tuhý roztok ale tzv. intermediální fáze. Složení cementitu je vždy stejné, nemění se.
- Cementit se vyskytuje v železných slitinách ve třech různých formách:
- primární cementit - primární krystalizace z taveniny podle linie CD.
- sekundární cementit – vyloučený z austenitu podle linie ES
- terciární cementit – vyloučený z feritu podle linie PQ

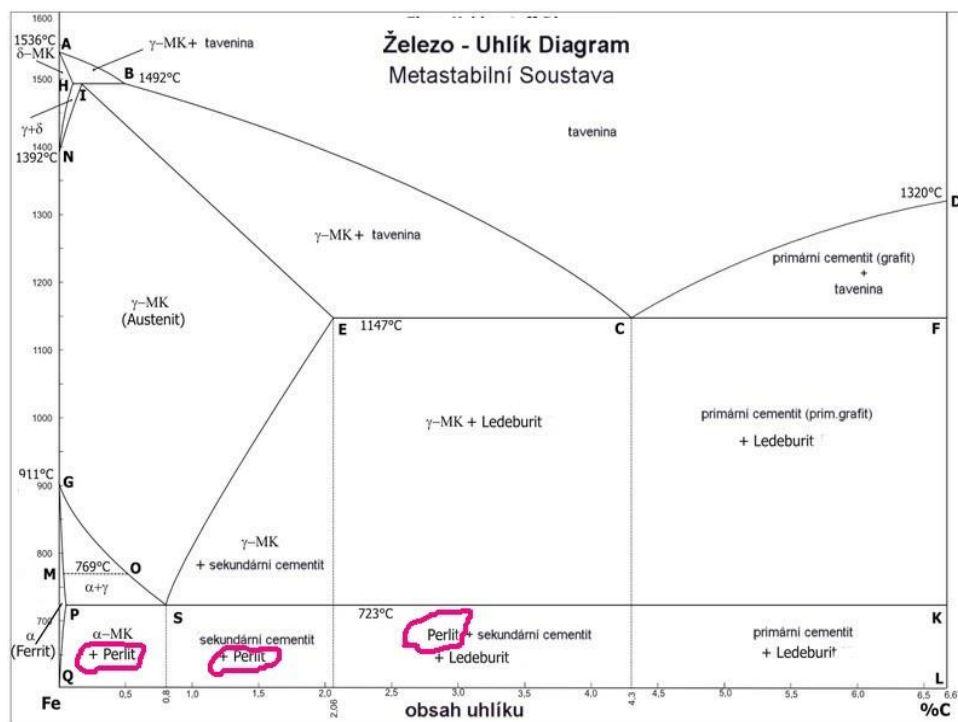
Vedle těchto fází existují ještě smíšené fáze:

Perlit (Fe) – sestává z 88 % feritu a 12 % cementitu. Existuje při teplotách pod 723 °C.

Ledeburit- sestává z 51,4 % austenitu/feritu a 48,6 % cementitu

- Izotermické reakce

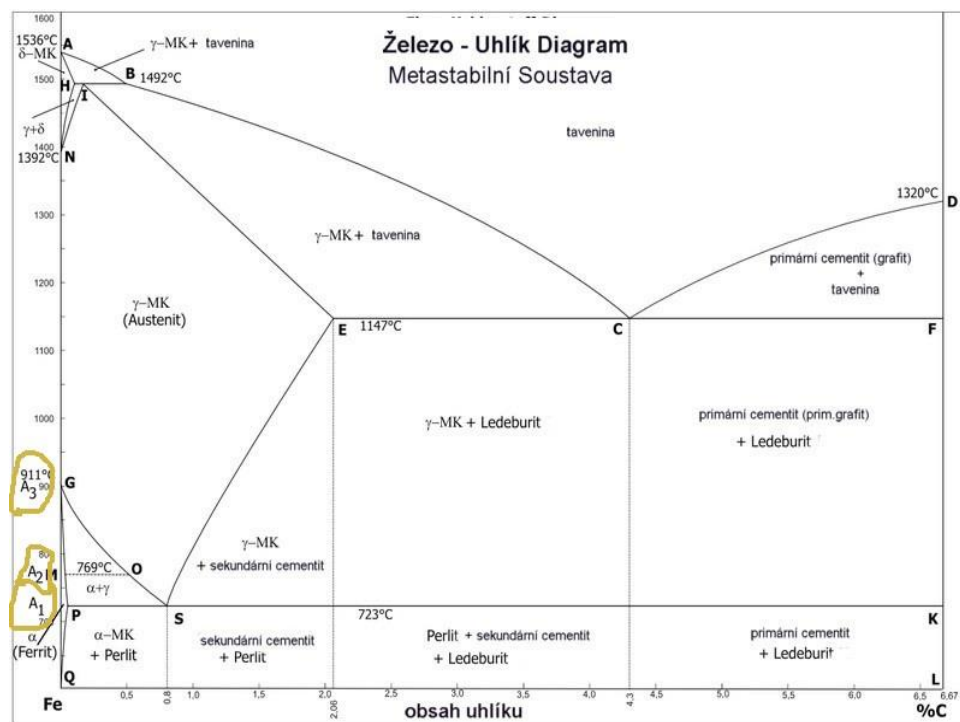
V rovnovážném diagramu Fe-FeC jsou tři izotermické reakce. Jedna peritektická reakce podle linie HIB, jedna eutektická reakce podle linie ECF a jedna eutektoidní reakce podle linie PSK. Při ohřevu nebo při ochlazování vzniknou na ochlazovací křivce tepelné prodlevy při dosažení těchto linií.



Obrázek 3: Diagram železo – uhlík

Ty nejdůležitější jsou:

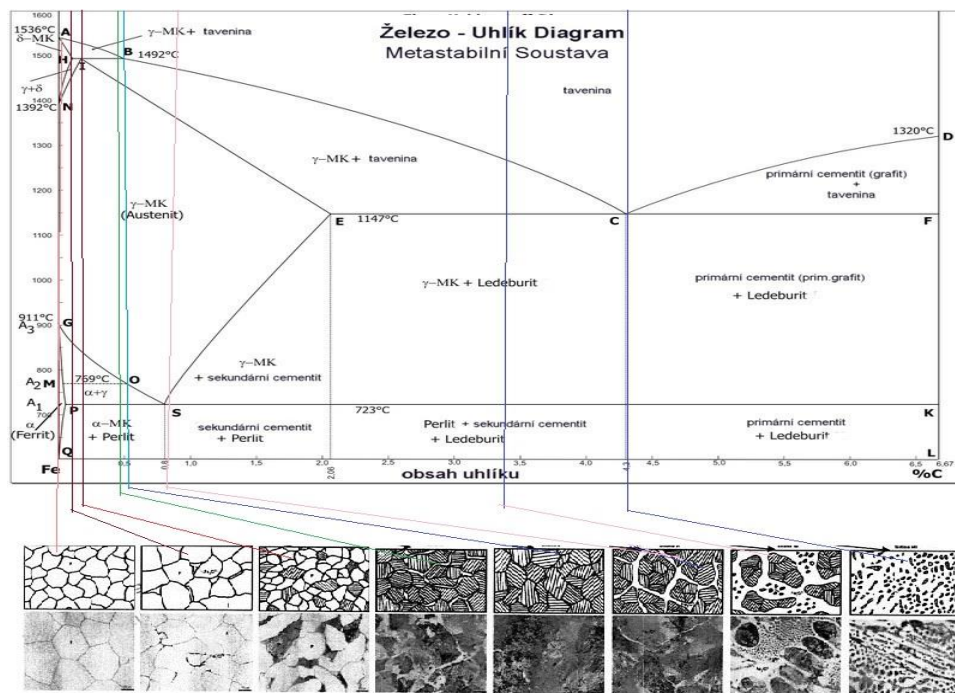
- A1 – Linie P-S-K při teplotě 723 °C – rozpad austenitu na perlit při obsahu uhlíku >0,01 %
- A2 – při ohřevu nad teplotu 768 °C ztrácí ferit své feromagnetické vlastnosti.
- A3 – linie G-O-S při ochlazování pod tuto linii tzv. eutektoidala, vylučuje se nízkouhlíkatá fáze (tuhý roztok)  $\alpha$  – ferit. Přebytkový C obohacuje austenit až do dosažení eutektoidní teploty 723 °C.
- Linie E-C-F je eutektická linie, také zvaná eutektikála. Když tavenina dosáhne eutektické koncentrace uhlíku 4,3 % C, mění se isothermicky při teplotě 1 147 °C (bod C) ve směs austenitu a cementitu tzv. ledeburit.
- Linie H-I-B je peritektická linie. Zde isothermicky reagují  $\delta$  tuhý roztok s 0,1 % C a tavenina s 0,51 % C při 1 493 °C a vzniká tuhý roztok  $\gamma$  s 0,16 % C (Bod I)



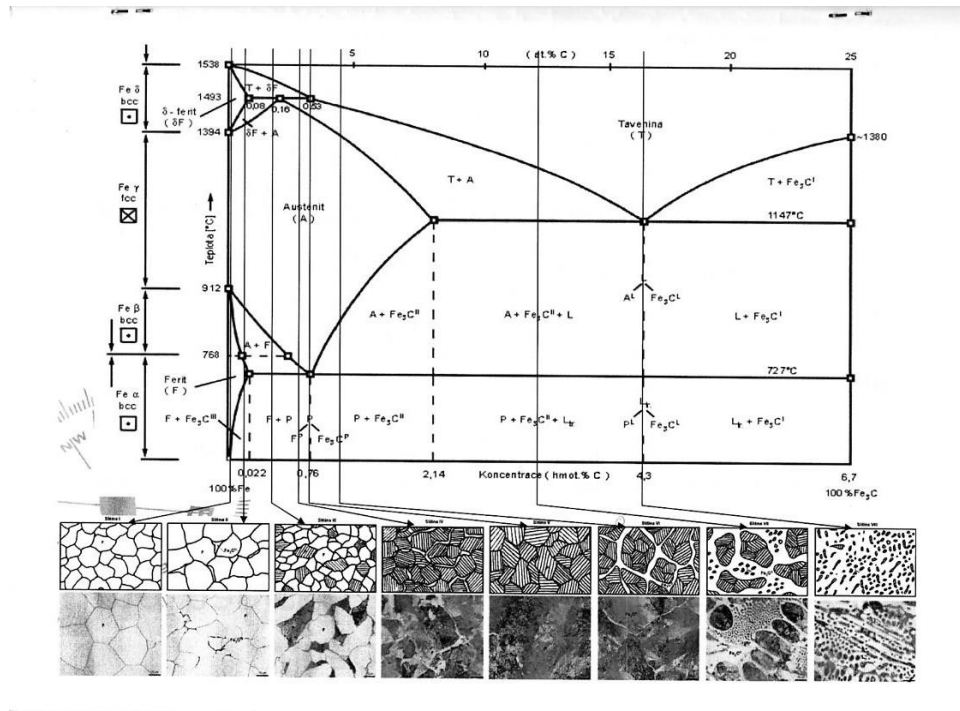
Obrázek 4: Diagram železo – uhlík A1 až A3

Praktický význam:

- Pomocí popsaného rovnovážného diagramu Fe-C lze kupříkladu vysvětlit otázky, týkající se rozdílných vlastností oceli – (obsah uhlíku  $<2,14\%$  C) - a litiny ( $\geq 2,14\%$  C).
- Ocel je možno tvářet (kovat, válcovat, lisovat atd.), protože zde existuje široká oblast dobře tvařitelného austenitu. U litiny, kde uhlík je převážně vyloučen jako grafit nebo ledeburit, je tvařitelnost velice nízká. Náhlý přechod z pevného stavu v taveninu je dalším důvodem.
- Tavicí teplota čistého železa je  $1536\text{ }^\circ\text{C}$ . Tuhnutí a začátek tavení oceli (linie A-H-J-E) a litiny (linie E-C-F) jsou značně rozdílné. Nízká teplota tavení litiny je jedna z příčin dobré slévateľnosti litiny.
- Rovnovážný diagram je relevantní pouze při velmi pomalém ochlazení. Při větších rychlostech ochlazení je potom nutné použít diagramy IRA (izotermický rozpad austenitu) nebo ARA (anizotermický rozpad austenitu).



Obrázek 5: Fe<sub>3</sub>-C diagram



Obrázek 6: Diagram Fe3-C

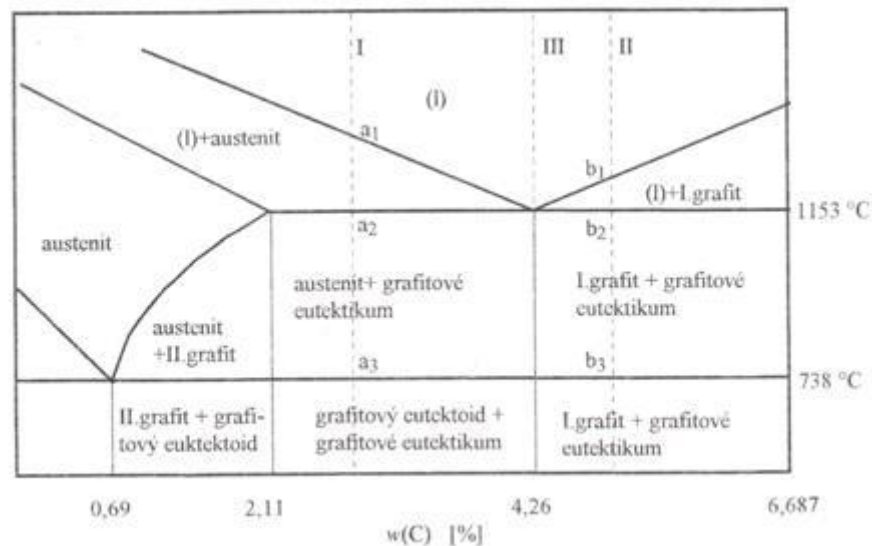
- Slitina I (3% C) – podeutektická bílá litina – začíná tuhnout při teplotě  $a_1$ , kdy z taveniny krystaluje austenit. Austenit tuhne ve formě dendritických krystalů. Při eutektické teplotě má austenit 2,11% uhlíku a je v rovnováze se zbylou taveninou s obsahem 4,3% uhlíku. Zbytek taveniny eutektického složení ztuhne jako metastabilní eutektikum podle diagramu. Z austenitu a eutektického cementitu vzniká ledeburit. V intervalech teplot  $a_2$  až  $a_3$  klesá rozpustnost uhlíku v austenitu a, který se vylučuje ve formě sekundárního cementitu. V této fázi je struktura složená z primárních dendritických zrn austenitu, z drobných krystalů austenitu eutektického a z krystalů cementitu, který nacházíme na hranicích zrn obou druhů krystalů austenitu. Z primárního austenitu vznikají rozsáhlé perlitické oblasti, kdežto z eutektického austenitu vznikají pouze drobné ostrůvky perlitu. Původní jednoduchá eutektická struktura skládající se z austenitu a eutektického cementitu je po ukončení přeměn složena z eutektického a sekundárního cementitu a perlitu. Uhlík z eutektického austenitu se ukládá k eutektickému cementitu. Při teplotě  $A_3$  se primární i eutektický austenit se rozpadne na perlit. Tato struktura se označuje jako transformovaný (rozpadlý) ledeburit. Kromě transformovaného ledeburitu obsahuje struk-

tura podeutektické bílé litiny ještě perlit a sekundární cementit, jako výsledek rozpadu primárních dendritických zrn austenitu. [6]

Slitina II (5% C) – nadeutektická bílá litina – začíná tuhnout při teplotě  $b_1$  vylučováním hrubých krystalů primárního cementitu. Krystalizace primárního cementitu končí při eutektické teplotě, kdy je v rovnováze tavenina eutektického složení a primární cementit. Tato tavenina při konstantní teplotě ztuhne jako ledeburit. Těsně po ztuhnutí je tedy struktura tvořena primárním cementitem a ledeburitem. Při dalším poklesu teploty se odehrávají podobné změny jako u slitiny I, takže struktura pod teplotou  $A_1$  se skládá z primárního cementitu a transformovaného ledeburitu. [6]

- Slitina III (4,3% C) je slitina právě eutektická. Krystaluje při nejnižší teplotě ze všech slitin systému Fe-Fe<sub>3</sub>C. Z veškeré taveniny vzniká ledeburit. V průběhu dalšího chladnutí probíhají přeměny, které byly popsány u slitiny II pro eutektický austenit. Výslednou strukturou tedy bude transformovaný ledeburit. [6]
- Krystalizace a překrystalizace šedé litiny  
Jak již bylo uvedeno výše, šedé litiny vznikají krystalizací podle stabilního diagramu Fe-C. Krystalizace podle stabilního diagramu (obrázek 6) probíhá pouze při velmi nízkých rychlostech ochlazování.[6]
- Krystalizace slitiny I (podeutektická litina) začíná na křivce likvidu, kdy se z taveniny vylučují první dendritické krystaly austenitu o složení daném bodem na křivce solidu. S klesající teplotou přibývá austenitu, koncentrace uhlíku v austenitu klesá a krystalizace končí při eutektické teplotě, kdy obsah uhlíku v austenitu dosáhne 2,11 % C a je v rovnováze s taveninou s obsahem 4,26 % C. Tavenina eutektického složení ztuhne při konstantní teplotě podle schématu, viz obrázek 7.
- Vznikající eutektikum se skládá z austenitu a lupínek grafitu, označuje se jako grafitické eutektikum a vyplňuje prostor mezi primárními dendrity austenitu. Při dalším poklesu teploty klesá rozpustnost uhlíku v austenitu podle čáry  $A_{cm}$  (obrázek 6). Primární i eutektický austenit se přesycuje uhlíkem, který se vylučuje jako sekundární grafit - ukládá se většinou k již existujícím krystalům grafitu. Při eutektoidní teplotě obsahuje austenit 0,69 % C a rozpadá se podle diagramu. [6]
- Z austenitu vzniká grafitický eutektoid. Stejně jako sekundární grafit, ukládá se také eutektoidní grafit na lupínky doposud vzniklého grafitu. [6]  
Strukturu podeutektické litiny při okolní teplotě tvoří ferit a lupínkový grafitem.

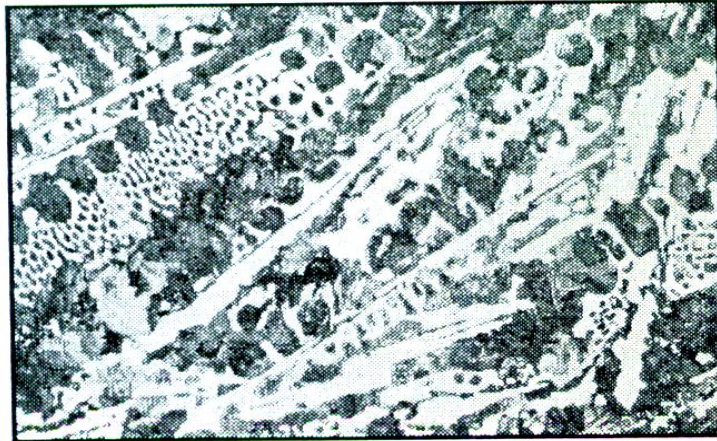
- Slitina II (nadeutektická litina) začíná tuhnout při dosažení teploty likvidu. Z taveniny krystalují hrubé krystaly primárního grafitu, který je téměř 3x lehčí než tavenina, takže vyplouvá na povrch. Tavenina se tak postupně ochuzuje uhlíkem až do eutektického obsahu. Další změny při ochlazování probíhají podle stejného schématu jako u slitiny I. Výsledná struktura slitiny II je tvořena feritickou základní hmotou, v níž jsou uloženy jak hrubé primární krystaly grafitu, tak i jemné eutektické krystaly grafitu. Obojí obsahují také sekundární a eutektoidní grafit. [6]
- Slitina III (eutektická litina) tuhne při eutektické teplotě 1153 °C. Veškerá tavenina se přemění na grafitické eutektikum. Austenit se při dalším ochlazování mění stejně jako v předchozích případech. Sekundární i eutektoidní grafit se ukládá k lupínkům eutektického grafitu. [6]



Obrázek 7: Stabilní diagram Fe-C

### 2.1.1 Bílé litiny

Bílé litiny krystalizují dle metastabilní soustavy, což vede ke vzniku cementitu ve výsledné struktuře. Cementit je velmi tvrdý a křehký. Bílá litina se používá hlavně jako výchozí materiál pro výrobu oceli či temperované litiny.[3]



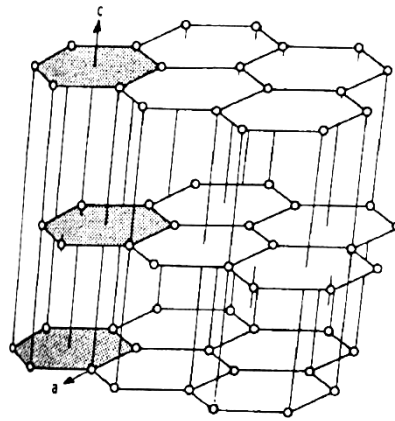
Obrázek 8: Struktura bíle nelegované litiny [7]

### 2.1.2 Grafitické litiny

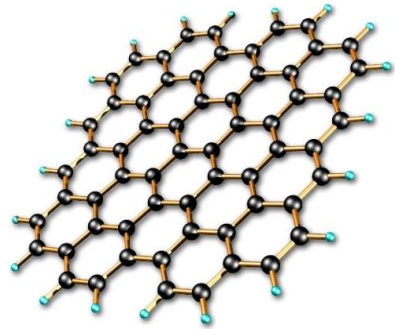
Grafitické litiny krystalizují dle stabilní soustavy za vzniku grafitu ve výsledné struktuře. Struktura grafitických litin je tvořena základní kovovou maticí, ve které je uložen grafit. Rozložení a tvar grafitu zásadním způsobem určuje vlastnosti grafitické litiny. Protože grafit v kovové matici způsobuje snížení nosného průřezu, je jasné, že největší vrubový účinek má tvar lupínkový, nejmenší naopak tvar zrnitý. [3]

- uhlík vyloučen jako grafit,
- dělení např. podle tvaru grafitu,
- s lupínkovým grafitem – šedá litina,
- s kuličkovým grafitem – tvárná litina,
- s červíkovým grafitem - vezikulární,
- s vločkovým grafitem – temperovaná.





Obrázek 9: Rozložení a tvar grafitu 1. [7]



Obrázek 10: Rozložení a tvar grafitu 2. [7]

Závislost pevnosti a tažnosti u grafitických litin viz.: obrázek níže.

1 – s lupínkovým G.

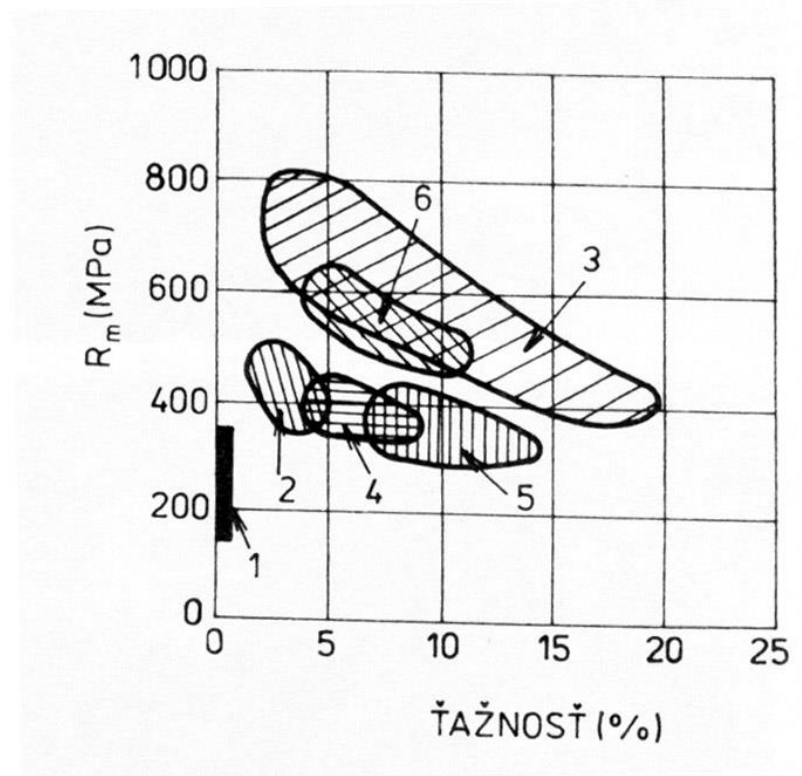
2 – s červíkovým G.

3 – se zrnitým G.

4 – temperovaná s bílým lomem.

5 – temperovaná s černým lomem.

6 – temperovaná politická.

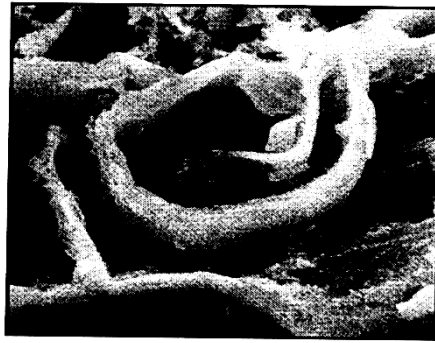


Obrázek 11: Tažnost litiny

Litina s lupínkovým grafitem

Základní složení:

- 2,8 – 3,6 % C,
- 1,7 – 2,4 % Si,
- 0,5 – 1,0 % Mn,
- 0,2 – 0,5 % P,
- Max. 0,15% S
- Možnost dalších přísad.

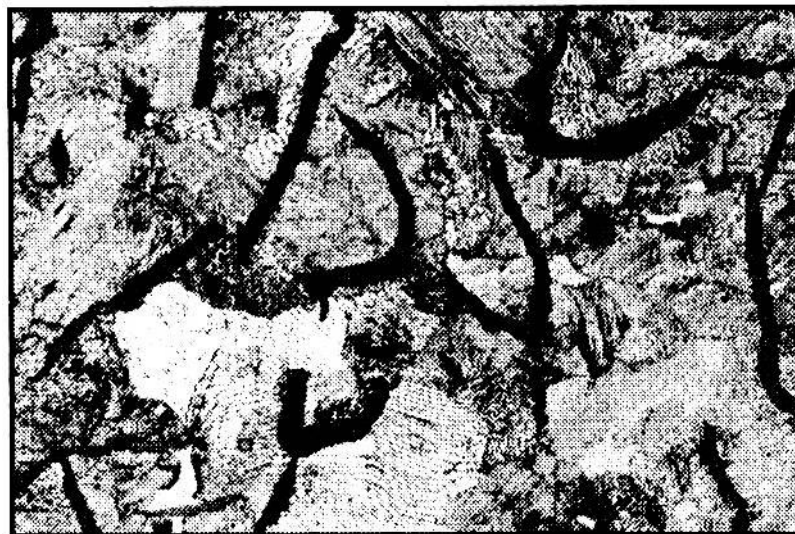


Obrázek 12: Lupínky grafitu [7]

### 2.1.3 Struktura litiny s lupínkovým grafitem [7]

Grafitové lupínky mohou být uloženy v matrici feritické, perlitické nebo feriticko-perlitické

Typ matrice se podílí na mechanických charakteristikách litiny



Obrázek 13: Perlitická litina s lupínkovým grafitem [7]

Tato litina je křehký materiál, který nemá skoro žádnou tažnost, pevnost v tlaku je asi 3 – 4x větší než v tahu, pevnost v ohybu je také asi 1,5x větší než v tahu.

Tvrdość litiny s feritickou matricí je asi 120 HB, s perlitickou matricí asi 220 HB

Má nízkou citlivost k účinkům vrubů, při dynamickém namáhání proto je srovnatelným materiálem s ocelí

Modul pružnosti se mění s napětím – neplatí Hookův zákon

#### 2.1.4 Vliv dalších prvků v litině

Křemík je nejdůležitější grafitotvorná přísada. Čím vyšší je jeho obsah, tím hrubší je grafit, roste podíl feritu a klesá podíl perlitu v matrici.

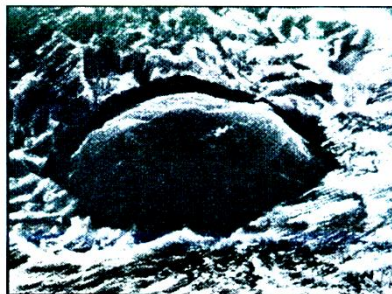
Při velké ochlazovací rychlosti (malé tloušťce stěny) je nutný vyšší obsah Si, protože se tím kompenzuje vliv karbidotvorných prvků (Mn, popř. S).

#### 2.1.5 Litina s kuličkovým grafitem

Základní složení:

- 3,2 – 4,0 % C,
- 1,8 – 3,0 % Si,
- 0,2 – 0,8 % Mn,
- Max. 0,1% P,
- Max. 0,05 % S,
- 0,04 – 0,08 % Mg.

Vyšší obsah C i Si ve srovnání s litinou s lupínkovým grafitem



Obrázek 14: Kuličkový grafit ve struktuře litiny [7]

Vyrábí se modifikací taveniny čistým Mg nebo jeho předslitinami v pánvi, nebo přímo ve formě. Je nutný velmi nízký obsah S.

Na průběh krystalizace má vliv rychlost ochlazování – při rychlém chladnutí jsou kuličky menší.

V závislosti na požadované struktuře matrice se mění množství Si a Mn.

U malé tloušťky stěny se někdy nedaří zajistit čistě feritickou strukturu, proto se volí feritizační žíhání.

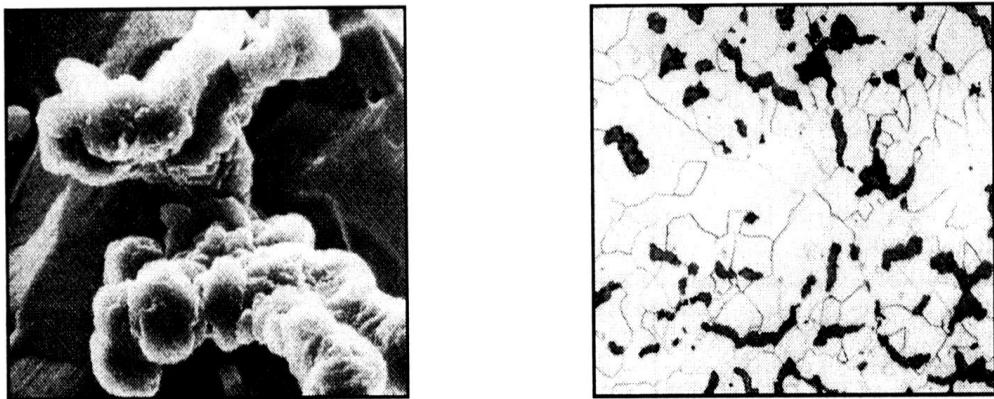
Obsah Mn vyšší než 0,4 % podporuje vznik perlitické matrice, která zajišťuje vyšší pevnost litiny, ale horší tažnost.

Litina s kuličkovým grafitem je vysoce jakostní materiál, který spojuje přednosti ocelí na odlitky a litiny s lupínkovým grafitem.

### 2.1.6 Litina s červíkovitým grafitem – vermikulární

Tvoří přechod mezi litinou s lupínkovým a kuličkovým grafitem.

Vzniká přísadou Mg jako kuličkový grafit, ale v množství, které není dostatečné pro vytvoření kuliček, nebo se přidávají prvky, které brání vzniku kuličkového grafitu, například Ti. Může se tavit z levné vsázky i s ocelovým odpadem a s vermikulárním grafitem má lepší pevnost.



Obrázek 15: Vermikulární tvar grafitu [7]

### 2.1.7 Tepelné zpracování litin

Tepelným zpracováním ovlivňujeme výhradně matici, nemá vliv na tvar, množství ani rozložení grafitu. Litiny lze žíhat i kalit stejně jako oceli.

### Žihání ke snížení vnitřního pnutí

Provádí se zejména u tvarově složitých odlitků z litiny s lupínkovým grafitem – úroveň pnutí se snižuje asi o 10 až 20%.

Rychlost ochlazování odlitků musí být až do teplot 150 až 100°C dostatečně pomalá (20 až 80 °C/hod.), aby nové pnutí nevznikalo.

### Žihání ke snížení tvrdosti

Používá se u litin s lupínkovým a kuličkovým grafitem, tehdy, když tvrdost odlitků zhoršuje jejich obrobiteľnost (pokud je ve struktuře velmi jemný perlit nebo ledeburitický cementit).

### Žihání feritizační

Pokud chceme lamelární perlit změnit na globulární (zrnitý), používáme sferoidizační žihání pod teplotou A1.

Při dalším prodlužování výdrže nastává grafitizace perlitického cementitu, takže výsledná struktura je feritická, feritizační žihání.

### Kalení litin

Cílem je dosažení martenzitické nebo bainitické matrice.

Výsledná tvrdost je u litin nižší než u ocelí, u litiny s lupínkovým grafitem asi 50 HRC, u litiny s kuličkovým grafitem asi 55 HRC.

Při kalení mají litiny sklon k praskání – vlivem přítomnosti grafitu, proto se mohou kalit termálně a popouštět ke snížení vnitřních pnutí na nízké teploty (do 200°C), litiny s kuličkovým grafitem i na vysoké teploty (550 až 650 °C) k dosažení sorbitické struktury pro dynamicky namáhané odlitky.

### Izotermické zušlechťování litin

Cílem je zvýšit pevnost, tvrdost a odolnost proti opotřebení. Proti martenzitickému kalení je výhodou nižší vnitřní pnutí – nižší deformace.

Provádí se zejména u litin s kuličkovým grafitem.

Vlastnosti rozdílné podle teploty izotermické přeměny.

Pevnost může dosáhnout hodnoty až 1000MPa při dobré houževnatosti.

### 2.1.8 Šedá litina

Její struktura je tvořena grafitem ve tvaru lupínků či růžic (lupínkový grafit). Má nízkou tažnost a houževnatost, nesnáší deformace a tepelná pnutí. Její pevnost v ohybu je zhruba dvojnásobná než pevnost v tahu. Nejlépe snáší namáhání tlakem, pevnost v tlaku je až čtyřikrát vyšší než pevnost v tahu. Charakteristická mez pevnosti v tahu šedých litin je v rozmezí 100-350 MPa.

Přesto, že šedá litina obsahuje stejné prvky jako ocel, jsou její vlastnosti a chování podstatně jiné. Je to způsobeno vyšším obsahem uhlíku, křemíku a dalších prvků (P, S).

Tabulka 1: Podíl jednotlivých chemických prvků v oceli a v litině

	Ocel	Šedá litina
C hm%	0,15	2,5-3,0
Mn hm%	0,7	0,5-1,0
Si hm%	0,2	1,7-2,5
P hm%	0,035	0,2-0,6
S hm%	0,04	max. 0,15
Fe hm%	Zbytek	zbytek

### 2.1.9 Tvárná litina

Struktura tvárné litiny perlitické obsahuje jemný ferit, cementit a nedokonale až dokonale zrnitý tvar grafitu, který získáváme modifikováním litiny Mg a Ce. Zrnitý tvar grafitu předurčuje příznivější mechanické vlastnosti tvárné litiny, která má mez pevnosti cca 350 MPa (feritická litina) resp. 900 MPa (perlitická litina) a tažnost od 17 do 20%. Tvárná litina feritická vznikne žiháním tvárné litiny perlitické, kdy dochází k rozpadu cementitu  $Fe_3C$  v zrnitý grafit v kovové feritické matici. Tvárná feritická litina je litina s maximální houževnatostí a tvárností.



### 3 AKUSTICKÉ VLASTNOSTI LITIN, DEFEKTOSKOPIE, STRUKTUROSKOPIE

Základní informace o ultrazvuku a šíření akustických vln litinovou maticí, vztahy nutné ke stanovení výpočtů.

#### 3.1 Princip měření pomocí ultrazvuku

Ultrazvuková sonda se přiloží na povrch odlitku a díky piezoelektrickému jevu vysílá do zkoušené části odlitku opakovací frekvence (impulzy) po několika ms až setinách sekundy. Tyto impulzy tvoří několik kmitů nosné frekvence jednotek MHz. Když sonda právě nevysílá, je přepnuta do příjmového režimu. Přes vazebné médium, kterým může být voda, olej nebo gel, pronikají akustické impulzy do odlitku. Přijímač čeká na odražený impulz od vnitřní vady nebo zadního povrchu stěny. Odrazy akustických vln se znázorní na displeji ultrazvukového přístroje vadovým nebo koncovým echem o výšce  $V_n$  a  $V_k$  s roztečemi od počátečního echa úměrnými hloubce vady či tloušťce stěny. [2]

#### 3.2 Akustické vlastnosti litin

Akustické vlastnosti materiálu popisují rychlosti šíření pružného příčného nebo podélného kmitání atomů (molekul) kolem rovnovážné polohy a jeho útlum. Rychlost šíření akustické vlny  $c$  zvuku je funkcí modulu pružnosti  $E$ , měrné hmotnosti  $\rho$ , Poissonova čísla  $\mu$ . [2]

Pro podélnou rychlost zvuku platí vztah:

(1)

$$C_L = \left\{ \frac{E \cdot (1 - \mu)}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2 \cdot \mu)} \right\}^{0,5} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad [2].$$

Sem zadejte rovnici.

Čím více útvary grafitu matrici oslabují (čím jsou štihlejší a delší), tím větší je hodnota

Čím více útvary grafitu matrici oslabují (čím jsou štihlejší a delší), tím větší je hodnota

akustické dráhy  $L_u$  ve srovnání s tloušťkou prozvučované stěny  $L$ . [2]

Rychlost zvuku  $CL$  tak klesá.

$CL = CLO$  rychlost zvuku ocelové matrice litiny.

Úpravou (1) lze získat zjednodušený výraz:

$$E = (K \times L/L_u) \text{ [MPa]} \quad (2)$$

Hodnotu  $K$  lze vypočítat z výsledků akustických měření na štíhlých tyčích. [2]

Hodnota  $K$  je pro oceli 5900 m/s, pro šedou litinu není etalon, který by ji předepisoval a je nutné ji vypočítat. V praktické části tento postup není, protože přístroj, kterým byla měřena rychlost šíření zvuku má funkci měření tloušťky stěn.

### 3.3 Ultrazvuková metoda

Ultrazvuk je mechanické kmitání částic hmotného prostředí (podobně jako zvuk), ale s frekvencí nad 20 kHz, takže je pro člověka neslyšitelný.

Při nedestruktivním zkoušení se ultrazvuková metoda používá právě proto, že se ultrazvuk dobře šíří pevnými látkami a umožňují zkoušet i kovové výrobky s velkou tloušťkou. Svou podstatou je předurčen pro zjišťování vnitřních vad v materiálech. [4]



Obrázek 16: Ultrazvuková sada

### Fyzikální základy – harmonické kmitání

V každém pružném prostředí (plyny, kapaliny a pevné látky) mohou mechanické kmity vznikat, nepřesahují však rámeček pružné deformace. [4-2-1]

Když nejsou body pružného prostředí navzájem izolované, ale nachází se mezi nimi mechanická vazba, nemůže žádný bod kmitat izolovaně. Kmity tohoto bodu se přenáší na sousední body prostředí, což znamená, že se v prostředí šíří mechanické vlnění. Šířící se ultrazvuková vlna přenáší mechanickou energii a její množství za jednotku času je výkon, který se udává ve wattech. Intenzita ultrazvuku při nedestruktivním zkoušení je velmi malá, nevznikají žádné trvalé deformace materiálu. [4-2-2]

### Frekvence a doba kmitu

Rychlost kmitání se vyjadřuje dvěma na sobě závislými veličinami. Doba kmitu neboli délka periody  $T$  je čas, který uplyne mezi dvěma sousedními průchody bodu rovnovážnou polohou při respektování totožnosti vektoru pohybu. Jedná se o dobu trvání celé sinusovky.

Frekvence je počet kmitů za sekundu  $f = \frac{1}{T}$  (3)

Jednotkou frekvence je 1 Herz [Hz] což je jeden kmit za sekundu.

### Délka vlny

Je definovaná jako vzdálenost dvou míst, ve kterých kmitají částice ve stejné fázi: (4)

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$\lambda = \text{délka vlny [mm]}$$

$$c = \text{rychlost šíření vlny [km/s]}$$

$$f = \text{frekvence [MHz]}$$

### Rychlost šíření

Rychlost šíření ultrazvukových vln závisí na jejich druhu, jsou-li podélné či příčné.

Podélné vlny jsou nejjednodušší a nejčastěji používané (longitudinální). Šíří se v prostředí tak, že částice kmitají ve směru šíření přímočaře. Tímto pohybem vzniká střídavé zhušťování a zředování částic prostředí a tím dochází ke střídavé změně jeho objemu. [4-2-2]

V ocelích je rychlost šíření podélných vln kolem 5900m/s.

Příčné vlny (transversální) mají charakter kmitajících částí ve směru kolmém ke směru šíření vln. Při šíření příčných vln se nemění objem prostředí, ve kterém se vlny šíří. Jejich rychlost je podstatně menší než u vln podélných. Zajímavostí je, že příčné vlny se mohou šířit jen v prostředí tuhém. [4-2-3]

Stanovení hodnot počátečního modulu pružnosti v tahu  $E_0$ . Tento postup je určen pro ocele.

Hodnoty  $E_0$  se vypočítávají ze vzorce (5)

$$E_0 = (437,8 * v_r) * 2 \text{ [MPa]}$$

přičemž ke stanovení relativní rychlosti šíření ultrazvuku  $v_r = L/L_u$  je třeba naměřit jednak tloušťku materiálu posuvným měřítkem v měřeném místě  $L$  a dobu návratu vyslaného signálu po odrazu vyjádřenou hodnotou tloušťky. [4-2-3]

Stanovení hodnot pevnosti litiny v tahu  $R_m$  (MPa):

Hodnota  $R_m$  se vypočítává ze vzorce:

$$R_m = f * \left( \frac{L}{L_u} * HB \right)$$

### 3.4 Mechanické zkoušky materiálu (destruktivní)

#### 3.4.1 Tahová zkouška

Jednou ze základních zkoušek je tahová zkouška. Zkušební vzorek válcového tvaru, jehož základní tvar je předepsán normou, je uchycen do zkušebního stroje. Vzorek je zatěžován rostoucí osovou silou, která způsobí prodloužení vzorku až do jeho přetržení. Na obrázku je ukázán zkušební stroj, zkušební vzorky před a po přetržení.



Obrázek 17: Trhací zařízení na měření pevnosti v tahu

Zkušební stroje zahrnují snímače. Těmito snímači se měří zatěžující osová síla a průtahoměr, který slouží pro měření prodloužené zkušební části vzorku. Trhací stroje jsou vybaveny automatickým průtahoměrem. Zkušební těleso se zatěžuje do porušení a zaznamenává se do pracovního diagramu zatěžující síla a deformace. Přitom se mění délka zkušební tyče z  $l_0$  na  $l_u$  a průřez  $S_0$  na  $S_u$ ).

Síla  $F$  se vztahuje na jednotku plochy  $S$ .

Smluvní napětí:

$$R = \frac{F}{S_0}$$

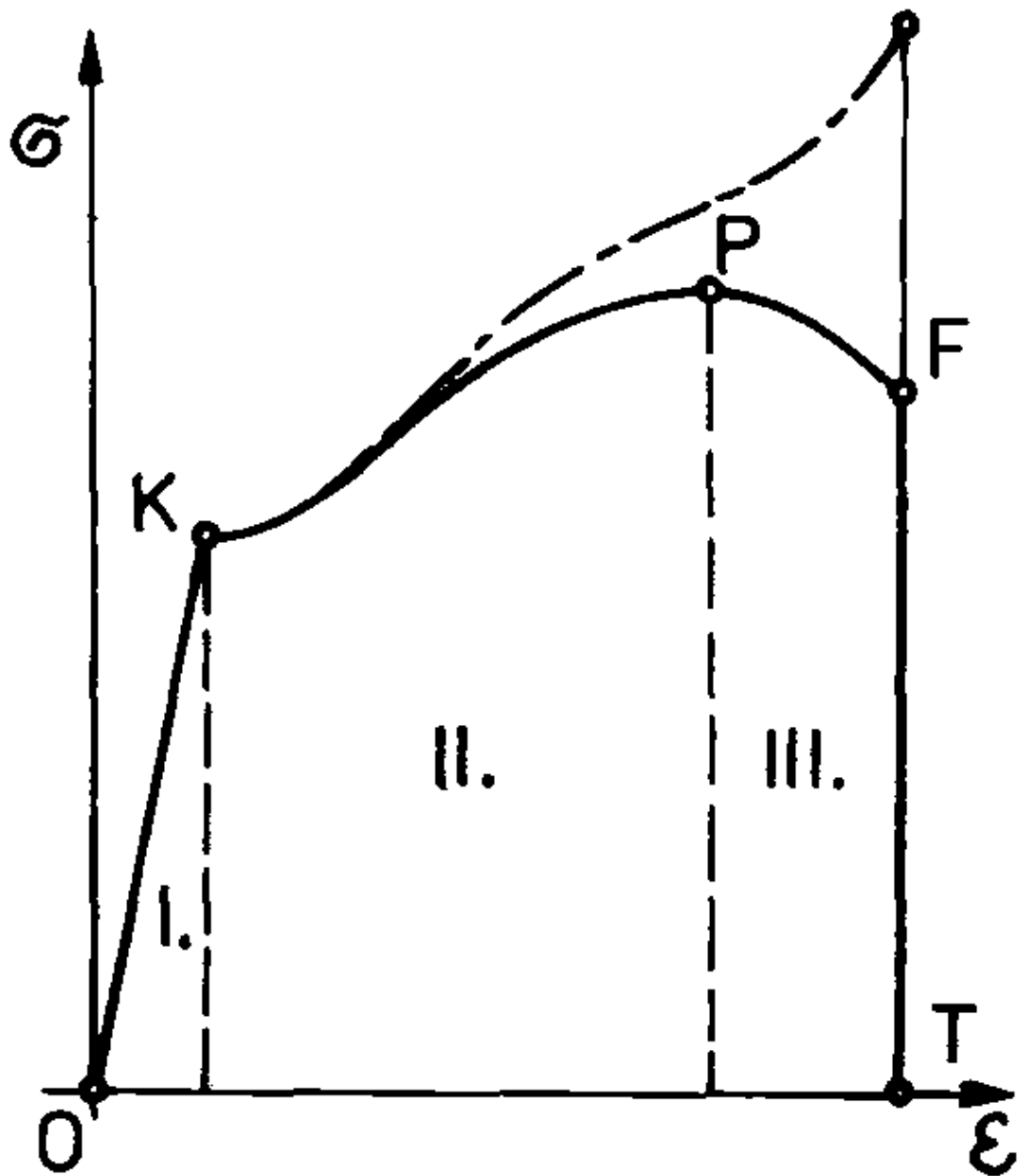
Absolutní prodloužení:

$$\Delta l = l_0 - l_u$$

Poměrné prodloužení:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} * 100 [\%]$$

Pracovní smluvní diagram



Obrázek 18.: Pracovní smluvní diagram [8]

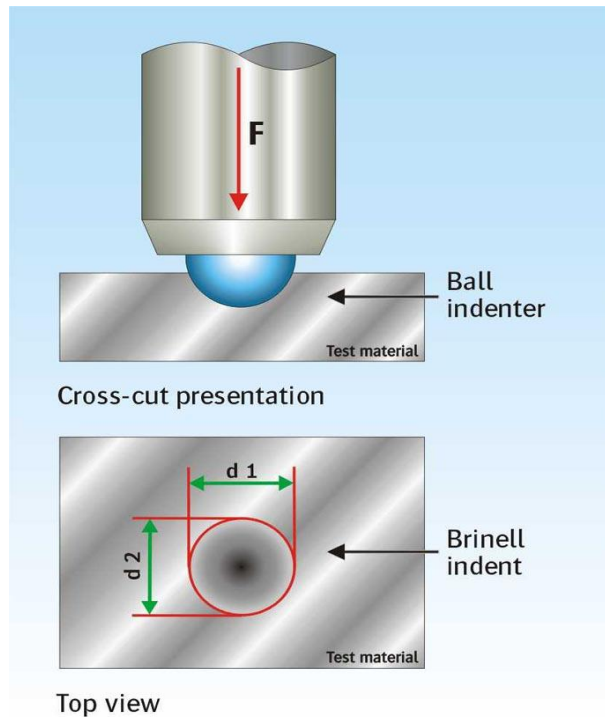
### 3.4.2 Zkoušení tvrdosti materiálu

#### Definice tvrdosti

- odolnost materiálu proti vniknutí cizího tělesa,
- plastická deformace,
- po odlehčení – stacionární klasické tvrdoměry,
- plastická i elastická deformace,

- při zatížení – přenosné tvrdoměry, dynamická, UCI ultrazvuková, TIV optická.

### Podle Brinella



Obrázek 19: Metoda měření tvrdosti Brinell

Podstatou Brinellovy zkoušky je zatlačování ocelové kalené kuličky průměru  $D$  do vyleštěné plochy zkoušeného kovu konstantním zatížením. Obr. č. 19.

Tvrdotost je pak vyjádřena vztahem:  $HB = \frac{FS}{S}$

Je-li  $d$  průměr a  $h$  hloubka vtisku, pak je jeho plocha dána vztahem:

$$S = pDh = pD \cdot 0,5 [D - (D^2 - d^2)^{0,5}]$$

Po provedení zkoušky je třeba změřit průměr nebo hloubku vtisku. Měření průměru je pomocí měřicího mikroskopu, tzv. Brinellovy lupy, možné až na setiny mm, kdežto přesné změření hloubky je mnohem obtížnější. Při sériových zkouškách je měření mikroskopem zdoluhavé, proto jsou tvrdoměry konstruovány tak, že lze tuto hloubku odečíst přímo na přístroji. S ohledem na možnost vytvoření valu v okolí vtisku je tento postup vhodný pouze při poměrném stanovování tvrdosti. Pro přesné určení hodnoty tvrdosti je třeba vycházet z průměru vtisku.

Zkušební podmínky je nutno dodržovat z důvodu srovnatelnosti naměřených výsledků. Na výsledek má vliv zejména velikost zatížení, které se volí s ohledem na průměr použité kuličky a měřený materiál.

Průměry kuliček: 10; 5; 2,5; 1,25; 0,625 mm

Zatížení se volí dle vztahu  $F = KD^2$

Koeficient K je volen pro ocel K 30 pro neželezné kovy a slitiny  $k = 10$  pro měkké neželezné kovy a kompozice  $K = 2,5$ . Doba zatěžování se volí u ocelí a litin 10 až 15 s, u neželezných kovů může být podle měřeného materiálu 10 až 180 s.

Výsledek zkoušky za normálních podmínek, tj. při  $\text{Æ} D = 10 \text{ mm}$ ,  $F = 29\,430 \text{ N}$  (300kp)

a době zatížení 10 až 15 s, se označuje pouze číslem tvrdosti a písmeny HB, tedy

např. HB= 280. Jestliže byly podmínky zkoušky jiné, uvádějí se za označením HB v pořadí:  $\text{Æ} D$  (mm),  $F$  (kp), doba zatěžování (s), např. HB 5/750/20=280.

Jak již bylo uvedeno, povrch zkoušeného předmětu musí být rovný, hladký, bez okují a nečistot. Tloušťka předmětu nesmí být menší než osminásobek hloubky vtisku. Vzdálenost středu vtisku od okraje vzoru má být minimálně 2,5d u ocelí a litin, 3d u neželezných kovů.

Velikost vtisku musí být mezi hodnotami 0,25D a 0,6D.

Mezi tvrdostí HB a pevností v tahu  $R_m$  (MPa) je přímá závislost dle vztahu: (6)

$$R_m = k \cdot HB$$

Koeficient  $k$  je závislý na materiálu, u ocelí je  $k$  v rozsahu 3,1 až 4,1. Litý bronz má  $k = 2,3$ , hliník  $k = 2,6$ . [8]

#### Podle Vickerse

Indentorem je čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem stěn  $136^\circ$ , takže vznikají pravidelné čtyřhranné vtisky. Tento úhel je volen tak, aby tření co nejméně



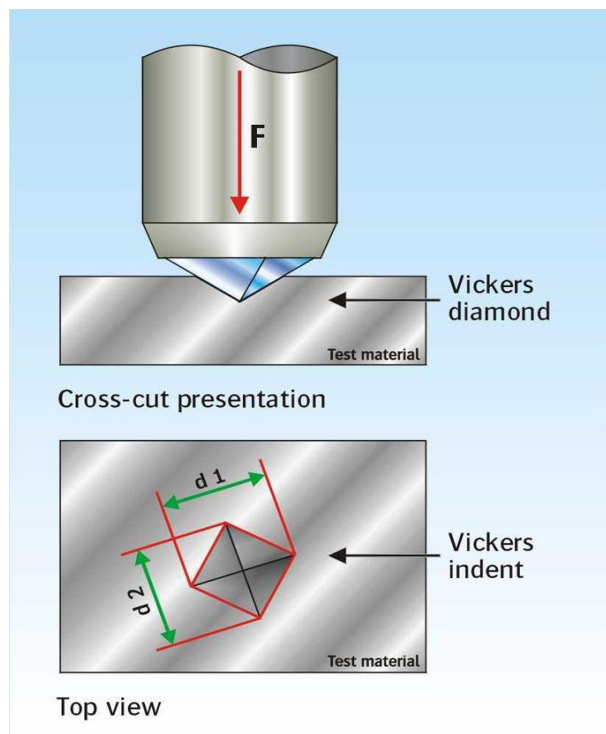
ovlivňovalo výsledek a dále proto, aby se hodnoty tvrdosti příliš neodlišovaly od tvrdosti stanovené metodou dle Brinella. Po provedení vtisku se měří jeho úhlopříčka. Její hodnota je pak dosazena do vztahu:

$$HV=0,189 F/u^2$$

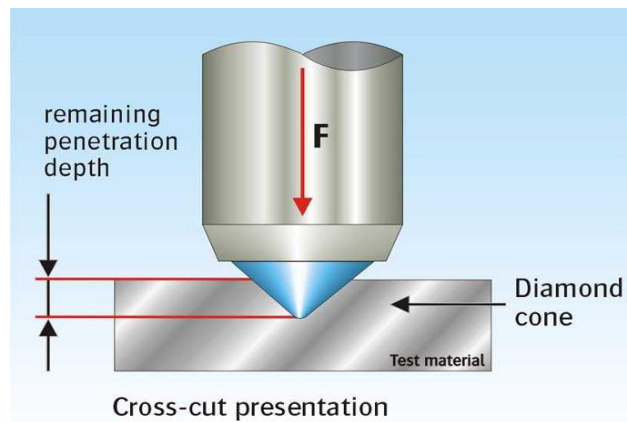
F – zátěžná síla [N], u – průměrná hodnota úhlopříčky [mm]

Obvyklá zatížení dle normy ČSN 42 0374 jsou 9,8; 29,4; 49; 98; 294 a 490 N. Vickersova zkouška je ze všech dosavadních metod jediná, která splňuje všechny teoretické požadavky. Dává jednotnou stupnici tvrdosti od nejměkčích kovů až po nejtvrďší kalené ocele. Hodnoty tvrdosti jsou na velikosti zatížení prakticky nezávislé. Přesto je-li zatížení jiné než dříve používaných 30 kp (29,4 N) je třeba toto zatížení uvést spolu s naměřenou hodnotou, např. HV10 – zatížení 10 kp.

Následkem rozdílného zpevnění při hranách jehlanu a uprostřed ploch nemusí být průmět vtisku přesně čtvercový, nýbrž strany mohou být buď vyduté u měkkých materiálů, nebo vypouklé.



Obrázek 20: Měření tvrdosti podle Vickerse

Rockwellova zkouška

Obrázek 21: Měření tvrdosti podle Rockwella

Rockwellova zkouška je vnikání indentoru z diamantu, diamantový kužel s vrcholovým úhlem  $120^\circ$  se zaoblením poloměrem 0,2 mm.

Metoda je vypracována pro sériové kontrolní zkoušky kalených, zušlechtovaných nebo jinak tepelně zpracovaných ocelí. Tato zkouška tvrdosti nevyžaduje upravený povrch, hloubka vtisku se měří tak, že při zatížení 98 N se ustaví hloubkoměr na nulu, zatíží se hlavní silou. Po odlehčení na hodnotu původních 98 N se odečte hloubka vtisku. Kdyby se odečítalo při plném zatížení, jevila by se tvrdost značně menší nejen o pružné deformace vtisku, ale také o veškeré pružné deformace stojanu stroje, podložky apod. [8]

Princip měření HRC tvrdosti

Celková měřitelná hloubka při použití kuželového indentoru je 0,2 mm. Tato hloubka je rozdělena na 100 dílků. Tvrdost materiálu je rovna tvrdosti diamantu v případě, že se hrot po odlehčení na 10 N vrátí do původní, nulové polohy. Nejměkčí kov, který se dá touto metodou zkoušet, odpovídá pevnosti v tahu 80 MPa. Metodu HRC lze dle naší normy použít od minimální tvrdosti HRC 20. Pro měkčí materiály je nutno použít namísto diamantového kužele ocelovou kuličku s menším zatížením.

## II. PRAKTICKÁ ČÁST

## CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem bakalářské práce bylo využití nedestruktivních zkoušek (ultrazvuková zkouška) pro měření mechanických vlastností odlitků. Byly vyrobeny tři typy zkušebních těles, na kterých byly změřeny mechanické vlastnosti (zkouška tahem, zkouška tvrdosti dle Brinella a Instrumentovaná zkouška mikrotvrdosti), které byly porovnány s mechanickými vlastnosti měřenými nedestruktivní zkouškou (ultrazvuková zkouška). Měření bylo na každém vyrobeném zkušebním tělese provedeno vždy 10x. Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Postup bakalářské práce byl následující:

1. Vypracování literární studie na dané téma.
2. Příprava zkušebních vzorků pro experimentální část.
3. Provedení experimentu.
4. Vyhodnocení naměřených výsledků.

### 3. PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ PRO EXPERIMENT

#### 3.5 Měření pevnosti šedé litiny nedestruktivní metodou

Zkušební vzorky, na kterých byla prováděna měření, byly vyrobeny ve Slévárně a.s. Malenovice, Zlín.

Vlastní výroba odlitků byla realizována na částečně automatizovaných výrobních linkách za použití technologie ručního pěchování. Společnost má vlastní dřevomodelárnu, která primárně slouží pro výrobu modelových zařízení pro slévárnu.

#### 3.6 Příčina měření

Shodu materiálové jakosti technické dokumentace (odběratele odlitků) s odlitkem (vyrobeným slévárnou) obvykle deklarují mechanické vlastnosti naměřené na zkušební tyči předkládané atestem. Uživatele a odběratele odlitků zajímají často hodnoty mechanických vlastností v konkrétních částech (stěnách) odlitku, zejména pro pevnostní výpočty a návrhy nových výrobků. Ty se od hodnot atestu mohou významně odlišovat. [2].

Přínosem takto určovaných mechanických vlastností by mohla být rychlost a jednoduchost měření. Možnost využití v praxi by mohla urychlit jednotlivé operace z hlediska kontrolního oddělení a vnitropodnikové logistiky. Mechanické vlastnosti materiálu zjištěné předběžně nedestruktivní metodou, by pomohly předurčit, zda budou splněny podmínky např. pevnosti v tahu ještě dříve, než bude provedena tahová zkouška na zkušebním tělese. Takový materiál by mohl být postoupen dalšímu opracování tedy ještě dříve, než bychom znaly přesné výsledky mechanických zkoušek.

Samotné měření pevnosti zkušebních vzorků pro praktickou část, vyrobených ze šedé litiny, bude prováděno prozvučením ultrazvukem a poté budou získané hodnoty porovnány s naměřenými hodnotami, pořízenými běžnými destruktivními zkouškami.

#### 3.7 Leštění zkušebních těles

Pomocí této úpravy se zlepší a zpřesní proces měření mikrotvrdomosti. Samotné leštění bylo provedeno na leštičce BUEHLER EcoMet 250 PRO (Obr. 30). Zkušební tělesa byla leštěna v několika krocích, aby bylo dosaženo co nejlepšího efektu. Nejprve se povrch leštil po-

mocí brousících kotoučů s různými zrnitostmi a nakonec se doleštil pomocí textilního plát-  
na a diamantové suspenze s velikostí brousících zrn 3  $\mu\text{m}$ .

- Parametry leštění:
- přitlačná síla – 25 N,
  - otáčky vzorků – 30  $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$ ,
  - otáčky plátne – 300  $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$ .



Obr. 22: Leštička BUEHLER EcoMet 250 PRO

## 4 MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI

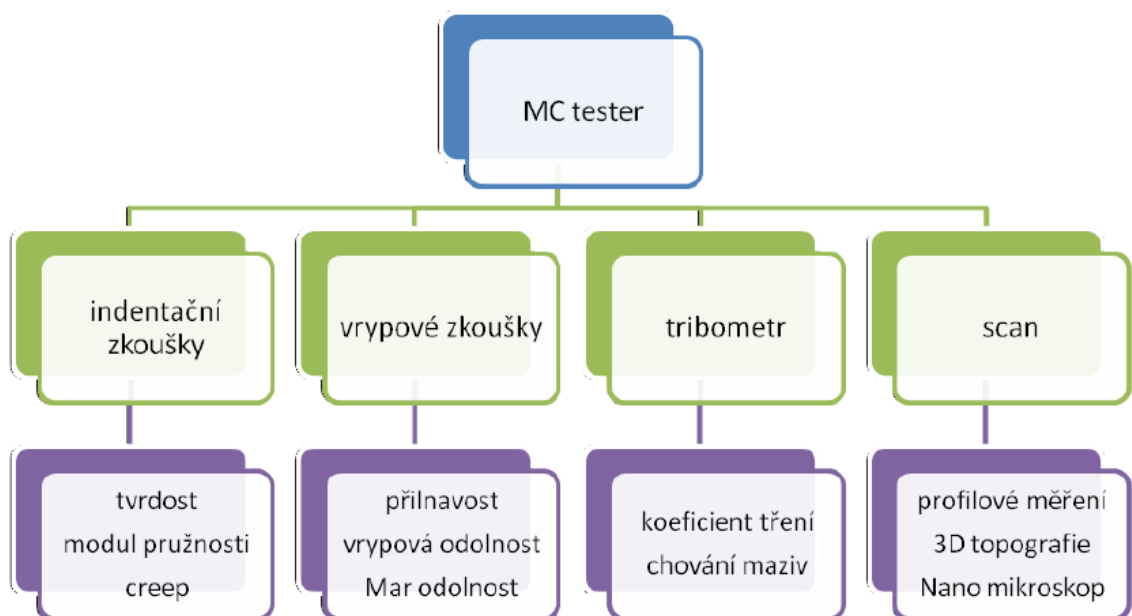
Měření mikrotvrdomosti zkušebních vzorků bylo provedeno na přístroji MicroCombi Tester dle normy ČSN EN ISO 14577-1.

Parametry zkoušky:

- aplikované zatížení – 1 N
- zatěžující a odlehčující rychlost –  $2 \text{ N} \cdot \text{min}^{-1}$  (pro 1 N)
- doba setrvání na maximálním zatížení – 10 s,
- Poissonovo číslo – 0,3.

### 4.1 Tvrdoměr Micro-Combi Tester

Tento tvrdoměr od firmy CSM Instruments disponuje velkou řadou způsobů měření s pomocí přídatných modulů (Obr. Číslo 23)



Obrázek 23: Moduly pro Micro-Combi Tester



Obrázek 24: Tvrdoměr Micro-Combi Tester

(1 – měřicí hlava, 2 – univerzální držák, 5 – posuv, 6 – optický mikroskop, 7 – modulová hlava, 8 – anti-vibrační stojan, 9 – optický senzor, 10 – kryt stolu)



## 5 STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Vyhodnocení výsledků získaných metodou instrumentované vnikací zkoušky pro stanovení tvrdosti a dalších materiálových parametrů proběhla v souladu s normou ISO 14577.

### 5.1 Měřené materiálové parametry

1. Vtisková tvrdost	$H_{IT}$ [MPa]
2. Vtiskový modul pružnosti	$E_{IT}$ [GPa]
3. Vtiskové tečení (Creep)	$C_{IT}$ [%]
4. Elastická deformační práce	$W_e$ [pJ]
5. Plastická deformační práce	$W_p$ [pJ]
6. Koeficient zpětné deformace	$n_{it}$ [%]

### 5.2 Statistické vztahy

#### 1. Aritmetický průměr

Je nejpoužívanější a nejznámější statistická veličina, který vyjadřuje typickou hodnotu popisující soubor mnoha hodnot. Aritmetický průměr se obvykle značí vodorovným pruhem nad názvem proměnné. Jeho definice je součet všech hodnot souboru vydělený jejich počtem.

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (8)$$

kde:  $\bar{x}$  – aritmetický průměr

$n$  – počet měření

$x$  – i-tá hodnota měřené veličiny

#### 2. Směrodatná odchylka

Jedná se o kvadratický průměr odchylek hodnot znaku od jejich aritmetického průměru. Jednoduše řečeno vypovídá o tom, jak moc se od sebe navzájem liší typické případy v souboru zkoumaných čísel. Pokud je malá, jsou si hodnoty v souboru navzájem podobné.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (9)$$

kde:  $s$  – směrodatná odchylka

$\bar{x}$  – aritmetický průměr

$n$  – počet měření

$x_i$  –  $i$ -tá hodnota měřené veličiny

### 5.3 Provedení experimentu

#### Přístroje použité k měření hodnot

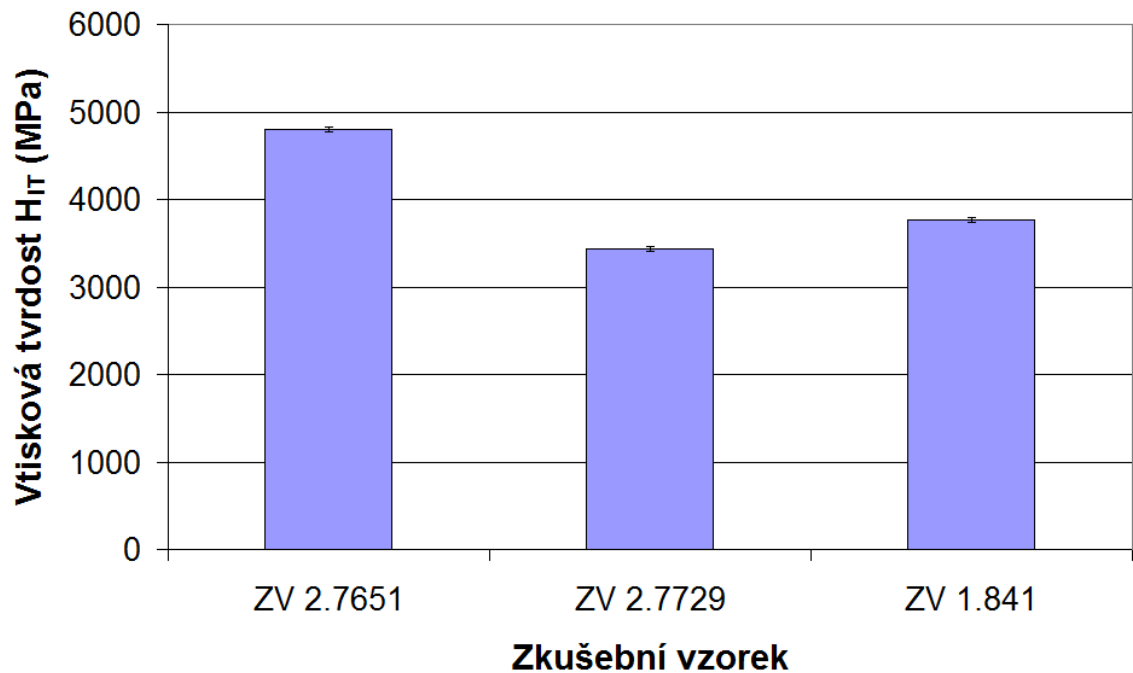
- tvrdost litiny byla měřena metodou měření Brinellovy tvrdosti na stacionárním tvrdoměru (ČSN EN ISO 6205-1) a to kuličkou 5 mm,
- pevnostní a elastické vlastnosti byly zjišťovány zkouškou tahem za teploty okolí (ČSN EN ISO 6892-1),
- ultrazvukem VSM 35S – Krautkramer,
- posuvné měřidlo,
- měření rychlosti šíření ultrazvukové vlny v materiálu a následným výpočtem

Tabulka 2: Výsledky mechanických vlastností testovaných zkušebních vzorků [vlastní tvorba]

	ZV 2.7651	ZV 2.7729	ZV 1.841
Vtisková tvrdost HIT (MPa)	4799	3438	3764
Vtiskový modul pružnosti EIT (GPa)	172	181	160
Tvrdost Vickers HVIT (Vickers)	453	324	355
Elastická deformační práce Welast (pJ)	235013	199689	205396
Plastická deformační práce Wplast (pJ)	1003242	1169938	1116495
Celková deformační práce Wtotal (pJ)	1238255	1369626	1321891
Elastická část deformační práce nIT (%)	19,23	14,73	15,63
Mez pevnosti v tahu Rm (MPa)	355	315	324
Podelná rychlost zvuku CL (m/s)	5015	4754	4847
HB Brinel 0,5/750 (mm/kg)	234	215	227

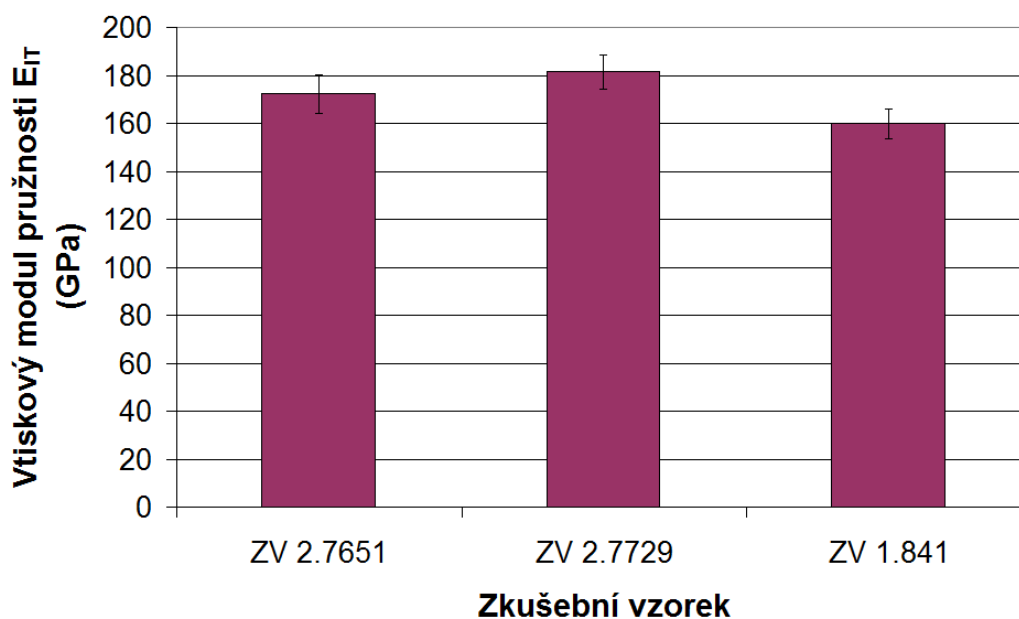
## 6 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ

Instrumentovaná zkouška mikrotvrdomsti:

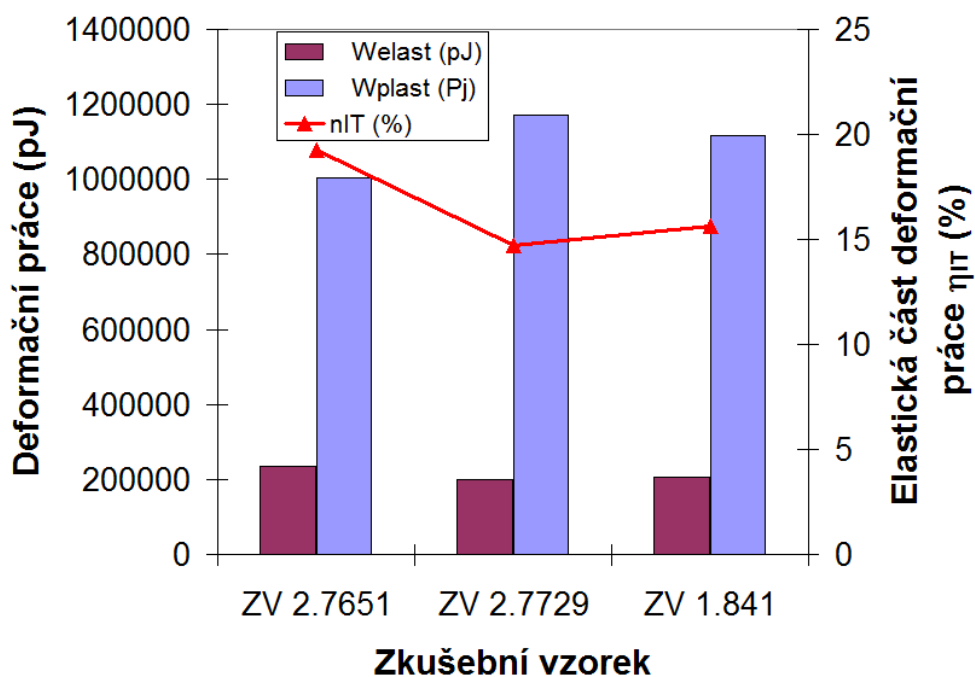


Obrázek 25: Vtisková tvrdost  $H_{IT}$

Z výsledků zkoušek mikrotvrdomsti je patrné, že nevyšší hodnotu vtiskové tvrdosti vykázal zkušební vzorek ZV 2. 7651, zatímco nejmenší hodnota vtiskové tvrdosti byla zjištěna u zkušebního vzorku ZV 2.7729, jak je patrné z obrázku číslo 25.

Obrázek 26: Vtiskový modul pružnosti  $E_{IT}$ 

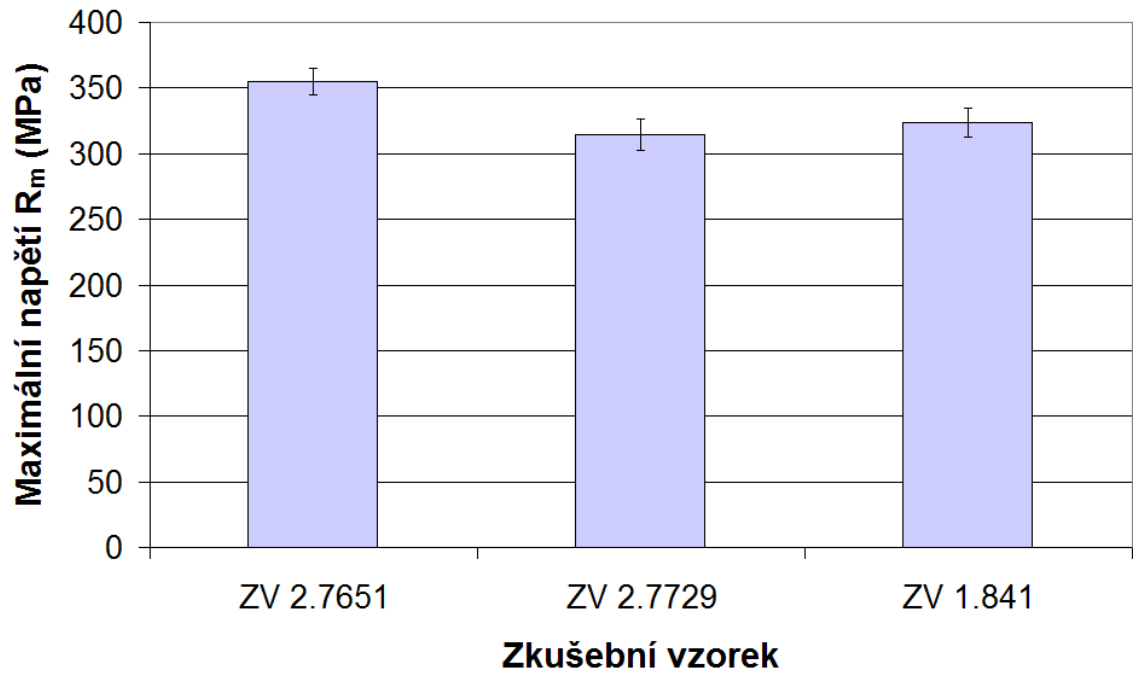
Výsledky testů mikrotvrdomosti ukázaly, že nejvyšší hodnota vtiskového modulu pružnosti, který reprezentuje tuhost testovaného povrchové vrstvy, byla naměřena u zkušebního vzorku ZV 2. 7729. Naopak nejmenší hodnota tuhosti (vtiskový modul pružnosti) byla zjištěna u zkušebního vzorku ZV 1.841, jak je patrné z obrázku 26.



Obrázek 27: Deformační práce

Nejvyšší hodnota elastické deformační práce byla naměřena u zkušební vzorku ZV 2.7651. Naopak nejmenší hodnota elastické deformační práce byla zjištěna u zkušební vzorku ZV 2.7729. Plastická deformační práce vykazala nejvyšší hodnotu u zkušební vzorku ZV 2.7729, naopak nejmenší její hodnota byla zjištěna u zkušební vzorku ZV 2.7651. Nejmenší hodnotu elastické části deformační práce vykázal zkušební vzorek ZV 2.7729, zatímco nejvyšší hodnota byla naměřena u zkušební vzorku ZV 2.7651, jak je patrné z obrázku číslo 27.

Zkouška tahem



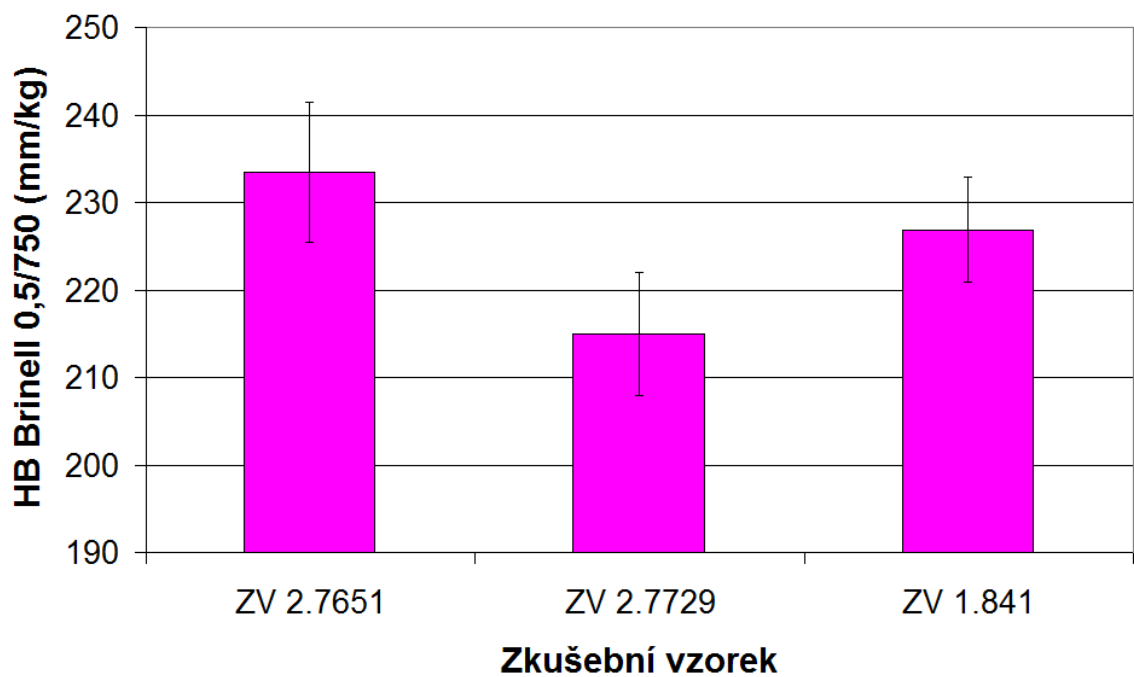
Obrázek 28: Maximální napětí v tahu (mez pevnosti v tahu) [vlastní tvorba]

Z výsledků tahové zkoušky je patrné, že nejvyšší hodnota maximálního napětí (meze pevnosti v tahu) u testovaných zkušebních těles byla zjištěna u zkušebního tělesa ZV 2.7651. Naopak nejmenší hodnotu maximálního napětí vykazoval zkušební vzorek ZV 2.7729, jak je patrné z obrázku číslo 28.

Zkouška tvrdosti dle Brinella



Obrázek 29: stacionární tvrdoměr (ČSN EN ISO 6205-1) [vlastní tvorba].



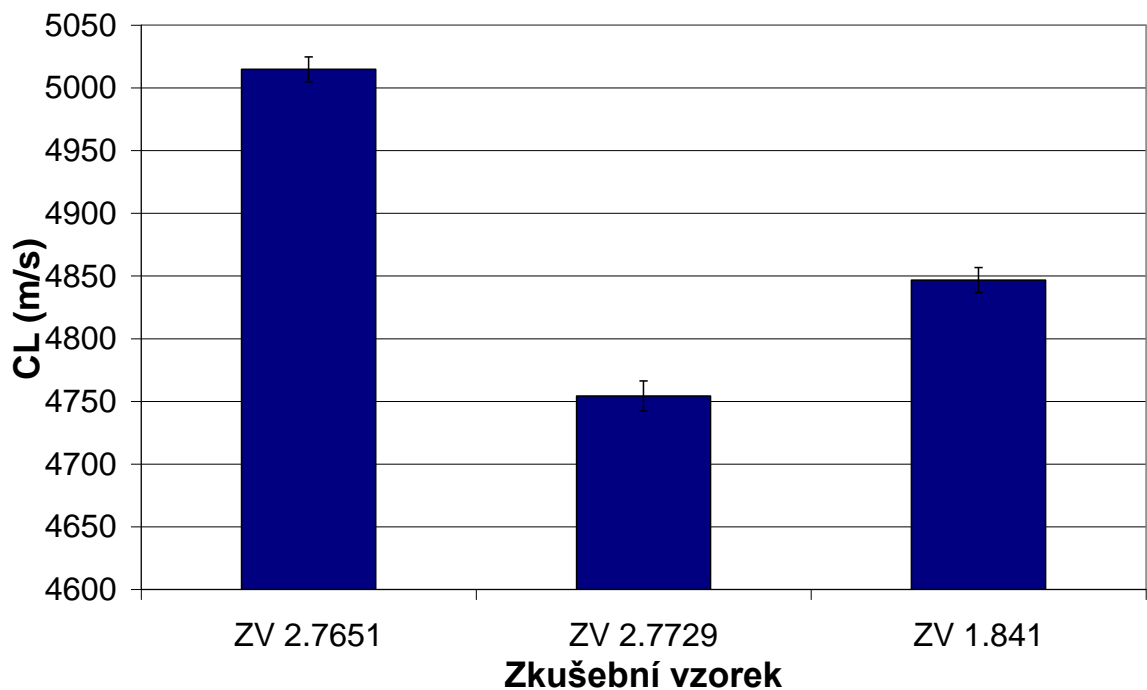
Obrázek 30: Tvrdost dle Brinella [vlastní tvorba]

Výsledky zkoušky tvrdosti ukázaly, že nejvyššího hodnota tvrdosti dle Brinella byla naměřena u zkušebního vzorku ZV 2.7651. Nejmenší hodnotu tvrdosti dle Brinella vykázal zkušební vzorek ZV 2.7729, jak je patrné z obrázku číslo 30.

Ultrazvuková zkouška



Obrázek 31: Ultrazvuk VSM 35S – Krautkramer



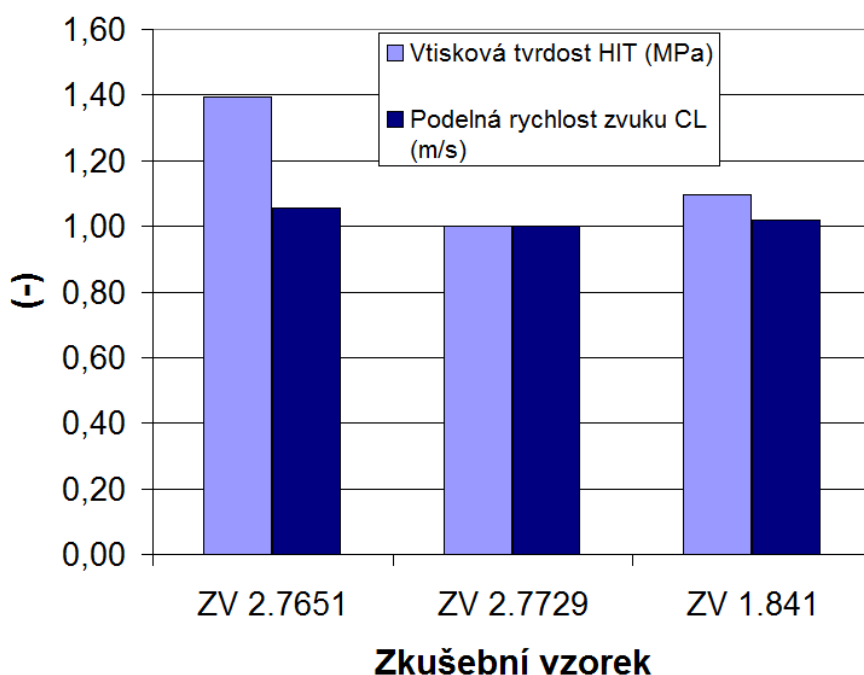
Obrázek 32. Podélná rychlost zvuku



Výsledky ultrazvukové zkoušky ukázaly, že nejvyšší hodnota podélné rychlosti zvuku byla zjištěna u zkušební vzorku ZV 2.7651. Nejmenší hodnotu podélné rychlosti zvuku vykázal zkušební vzorek ZV 2.7729, jak je patrné z obrázku číslo 32.

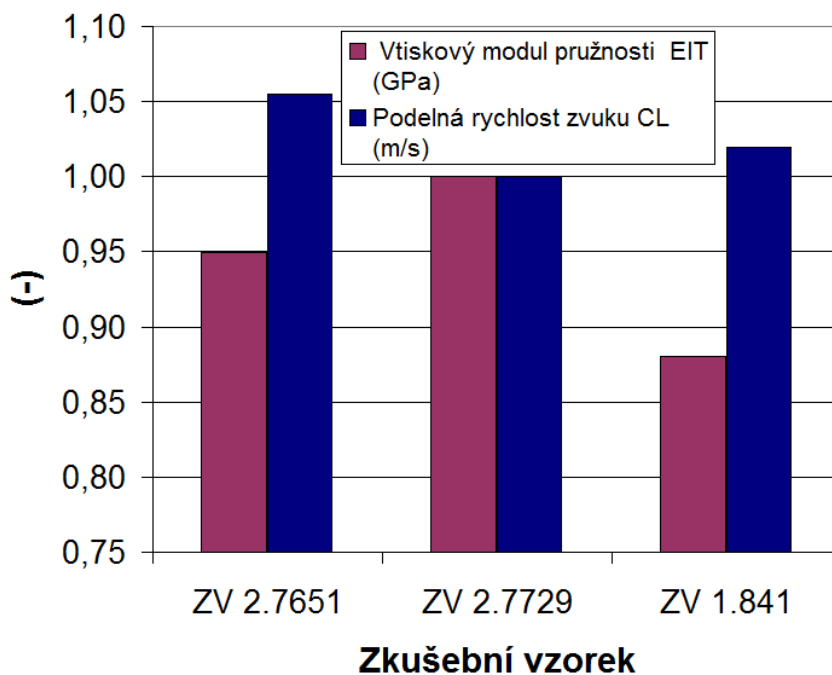
## 7 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Bakalářské práce řeší problém využití nedestruktivních zkoušek (ultrazvuková zkouška) pro měření mechanických vlastností odlitků. Byly vyrobeny tři typy zkušebních těles, na kterých byly změřeny mechanické vlastnosti (zkouška tahem, zkouška tvrdosti dle Brinella a Instrumentovaná zkouška mikrotvrdosti), které byly porovnány s mechanickými vlastnosti měřenými nedestruktivní zkouškou (ultrazvuková zkouška). Měření bylo na každém vyrobeném zkušebním tělese provedeno vždy 10x. Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.



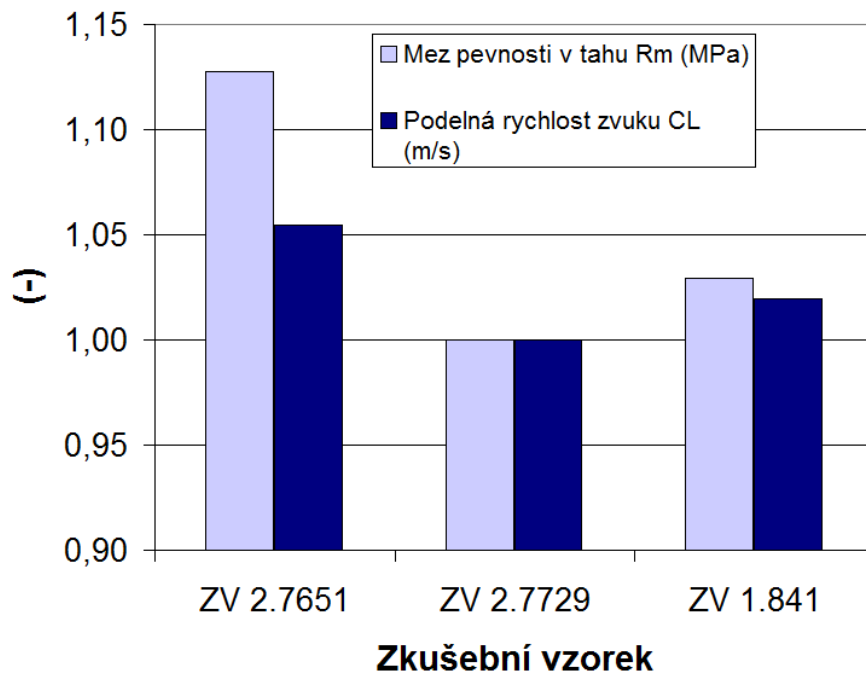
Obrázek 33: Porovnání vtiskové tvrdosti a podélné rychlosti zvuku

Porovnání výsledných hodnot vtiskové tvrdosti a podélné rychlosti zvuku vyšlo najevo, že výsledné hodnoty u testovaných zkušebních vzorků mezi sebou korelují. Nejmenší hodnotu vtiskové tvrdosti vykázal zkušební vzorek ZV 2.7729, který také vykázal nejmenší hodnotu podélné rychlosti zvuku. Naopak nejvyšší hodnota vtiskové tvrdosti a podélné rychlosti zvuku byla naměřena u zkušebního vzorku ZV2.7651, jak je patrné z obrázku číslo 33.



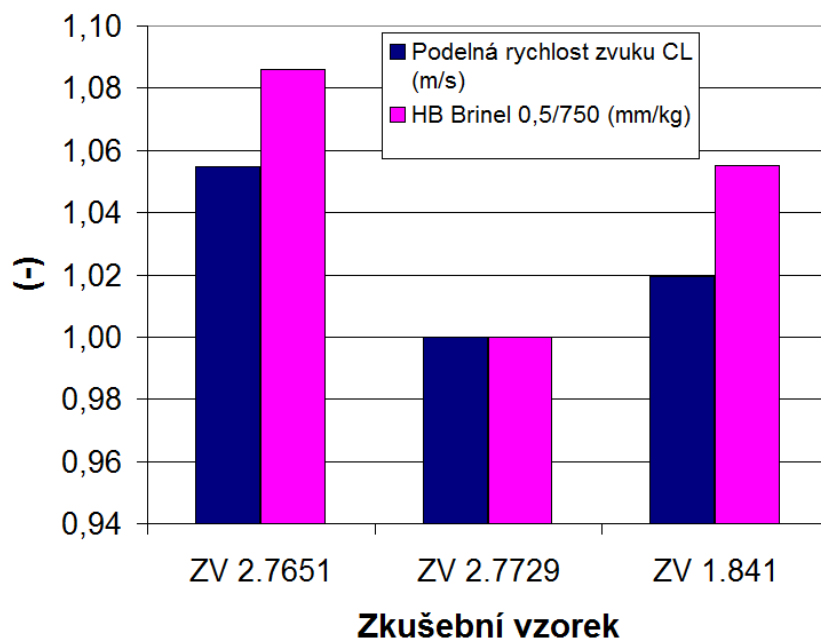
Obrázek 34: Porovnání vtiskového modulu pružnosti a podélné rychlosti zvuku.

Porovnáním vtiskového modulu pružnosti, který reprezentuje tuhost testovaného zkušební-  
ho tělesa (povrchové vrstvy) vyšlo najevo, že nejmenší hodnotu tuhosti vykázal zkušební  
vzorek ZV 1.841, který zároveň vykázal druhou nejvyšší hodnotu podélné rychlosti zvuku.  
Nejvyšší hodnotu tuhosti vykázal zkušební vzorek ZV 2.7729, které také vykázal nejmenší  
hodnotu podélné rychlosti zvuku, jak je patrné na obrázku číslo 34. Korelace mezi vtisko-  
vým modulem pružnosti (tuhosti) a podélnou rychlosti zvuku nebyla potvrzena.



Obrázek 35: Porovnání meze pevnosti v tahu s podélnou rychlostí zvuku

Porovnáním meze pevnosti v tahu s podélnou rychlostí zvuku vyšlo najevo, že nejvyšší hodnotu meze pevnosti v tahu i podélné rychlosti zvuku vykázal zkušební vzorek ZV 2.7651. Naopak nejmenší hodnota podélné rychlosti zvuku a meze pevnosti v tahu byla zjištěna u testovaného zkušební vzorku ZV 2.7729, jak je patrné z obrázku 35.

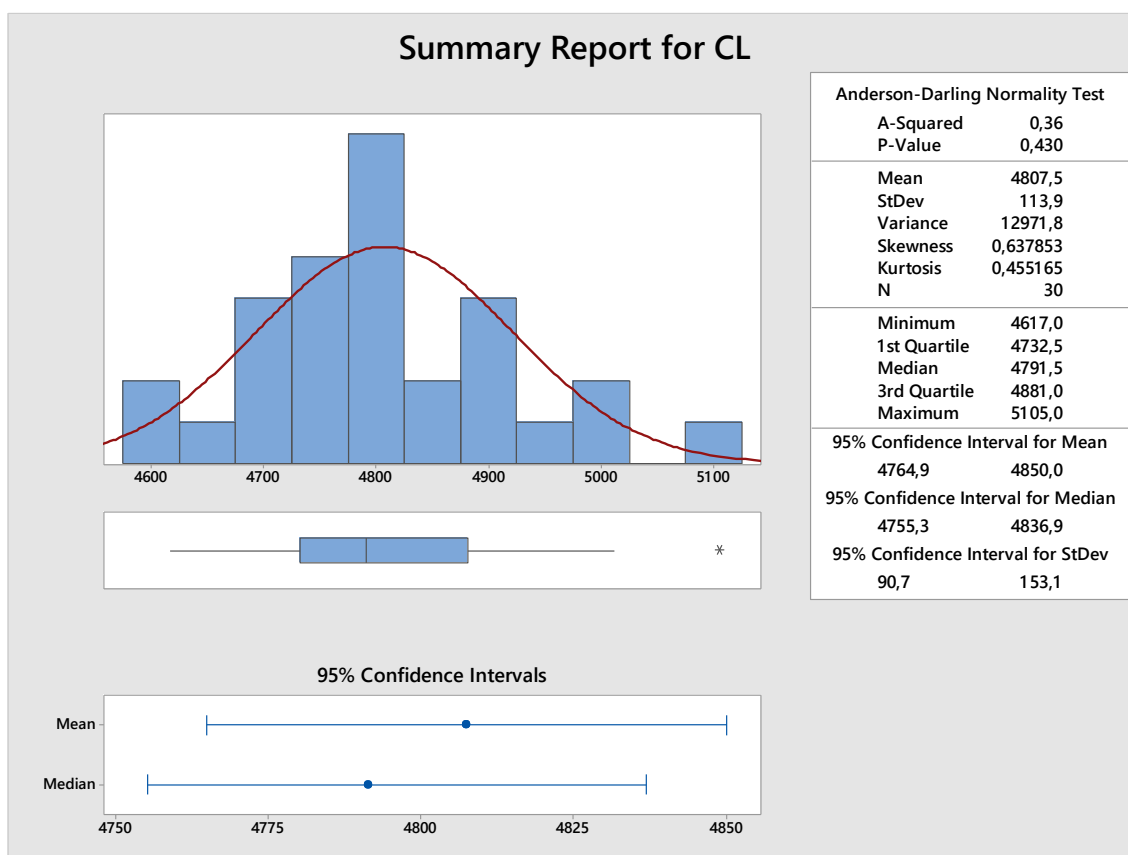


Obrázek 36: Porovnání tvrdosti dle Brinella s podélnou rychlostí zvuku. [vlastní tvorba]

Porovnání tvrdostí dle Brinella s podélnou rychlostí zvuku vyšlo najevo, že nejmenší hodnotu podélné rychlosti zvuku i tvrdosti dle Brinella vykázal testovaný zkušební vzorek ZV 2.7729. Naopak nejvyšší hodnota podélné rychlosti zvuku a tvrdosti dle Brinella byla naměřena u testovaného zkušebního vzorku ZV 2.7651, jak je patrné na obrázku 36. Pevnosti v tahu koreluje s podélnou rychlostí zvuku.

Statistické výpočty hledaných hodnot měření

Vzhledem k tomu, že dle naměřených hodnot není jednoznačně prokázána lineární závislost pevnosti  $R_m$  [MPa] na tvrdosti či rychlosti šíření zvuku litinovou maticí, musel jsem přistoupit ke statistickým výpočtům, aby se utřídila data na určitém intervalu a medián těchto dat nám určil lineární závislost s ohledem na rozptyl jednotlivých vzorků.



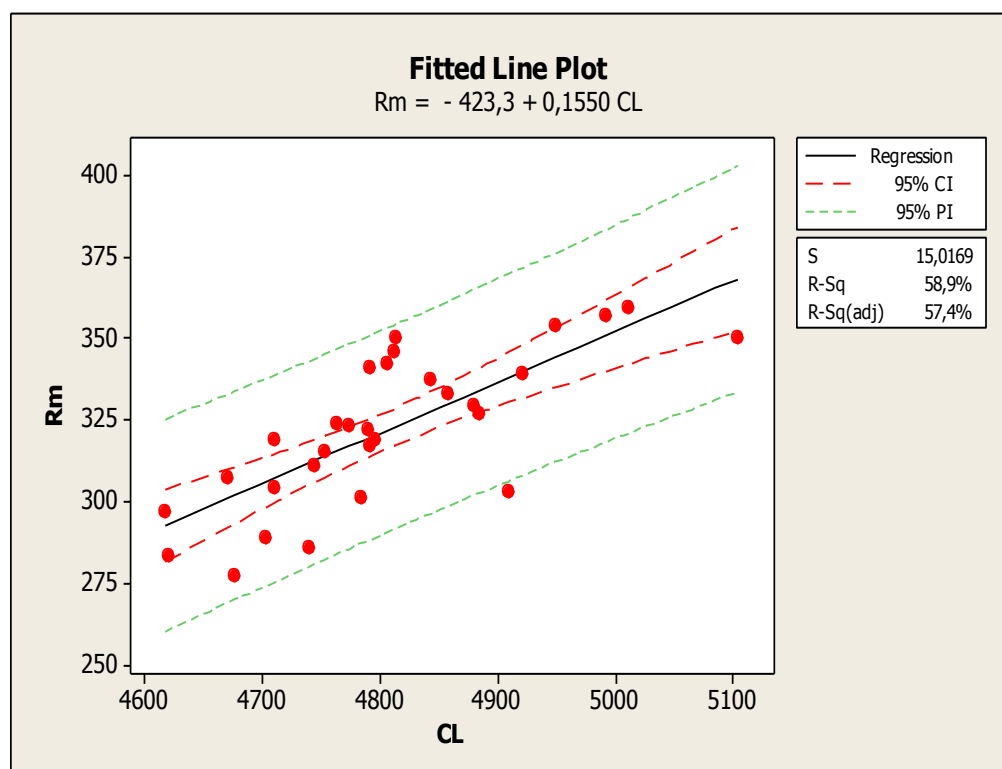
Obrázek 37. Výsledky měření ultrazvukových podélných vln na vzorcích.

Statistickým šetřením a porovnáváním jsem eliminoval výskyt možných chyb při měření a o výběrovém souboru mohu říci, že je pořádku. Obrázek 37 poukazuje na hodnoty minima 4617 m/s, maxima 5105 m/s a střední hodnoty medián 4791m/s. blížíci se rychlosti 5100 m/s. Při kontrole měření byla tato chyba vyloučena. Rovněž je z histogramu čitelný medián šíření rychlosti zvuku v litině okolo 4800 m/s.

Histogram CL poukazuje mimo jiné na hodnotu 5105 m/s. Překontrolováním měření jsem tuto hodnotu potvrdil jako správnou, jako chybu neoznačil a ve výběrovém souboru zůstává.

Z těchto grafů je vidět závislost mezi  $R_m$  [MPa] na  $CL$  [m/s] vzhledem k seskupení centrálních hodnot v rozmezí měření. Toto rozmezí je stanovené nejnižšími a nejvyššími hodnotami  $R_m$  [MPa] na  $CL$  [m/s] a HB.

Následující grafy určují Regresní závislost. První graf pro  $R_m$  je závislý na  $CL$  (obrázek 38), druhý graf je pro HB v závislosti na  $CL$  (obrázek 39).



Obrázek 38: Regrese  $R_m$  na  $CL$  [vlastní tvorba]

Graf  $R_m$  na  $CL$  popisuje cca 59 % rozptylů znázorněných přímkou. Červené křivky znázorňují 95 % pravděpodobnosti výskytu hodnot  $R_m$  po dosazení  $CL$  do vzorce na intervalu cca 280 – 315 [MPa].

Vzorec pro výpočet meze pevnosti v tahu: (10)

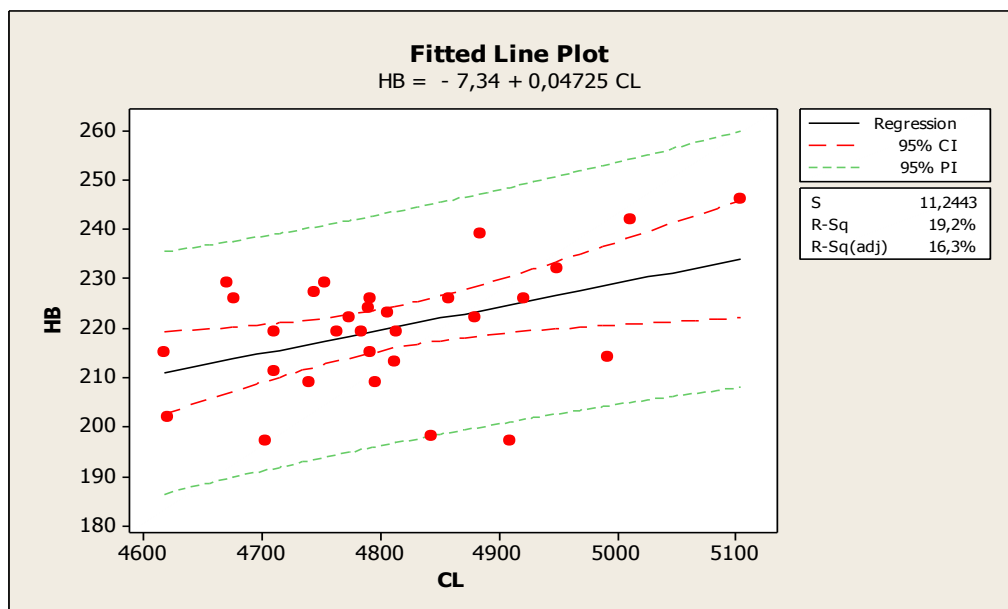
$$Rm = -A + B * C_L$$

Hodnoty A a B jsou konstanty pro výpočet meze pevnosti v tahu.

$$A = -423,3$$

$$B = 0,1550$$

$C_L$  = okamžitá hodnota podélné rychlosti ultrazvukových vln



Obrázek 39: Regrese  $C_L$  na HB [vlastní tvorba]

Vzhledem k vysokému rozptylu výsledků tvrdosti HB v regresi je patrné, že pomocí ultrazvuku nebude možné přesněji určit výsledné hodnoty tvrdosti. Graf regrese mezi  $C_L$  a HB udává interval od 200 - 220 HB a popisuje přímku jen s asi 20% pravděpodobností. (11)

$$HB = C + D * C_L$$

C a D jsou konstantní hodnoty.

$$C = - 7,34$$

$$D = 0,04725$$

## ZÁVĚR

Bakalářská práce řeší problém využití nedestruktivních zkoušek (ultrazvuková zkouška) pro měření mechanických vlastností odlitků. Byly vyrobeny tři typy zkušebních těles, na kterých byly změřeny mechanické vlastnosti (zkouška tahem, zkouška tvrdosti dle Brinella a Instrumentovaná zkouška mikrotvrdosti), které byly porovnány s mechanickými vlastnosti měřenými nedestruktivní zkouškou (ultrazvuková zkouška). Měření bylo na každém vyrobeném zkušebním tělese provedeno vždy 10x. Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Z výsledků měření vyplynulo, že existuje vztah mezi mechanickými vlastnostmi testovaných zkušebních těles a podélnou rychlostí zvuku měřenou ultrazvukovou zkouškou (nedestruktivní zkouška).

Pomocí lineární regrese byl vytvořen vzorec pro výpočet maximálního napětí v tahu (mez pevnosti v tahu) a tvrdosti dle Brinella.

Výpočet tvrdosti v závislosti na rychlosti šíření zvuku pro šedou litinu. Pravděpodobnost asi 20% přesnosti výsledku. 95% pro interval 200 – 220 HB. Hodnota – 7,34 a 0,04725 jsou konstantami.(11)

$$HB = -7,34 + 0,04725 * C_L$$

Výpočet pevnosti šedé litiny v závislosti na rychlosti šíření ultrazvukových vln litinovou maticí. Pravděpodobnost správného výsledku je 59% a 95% udává pravděpodobnost v intervalu 280 – 305 [MPa]. Hodnoty -423,3 a 0,1550 jsou opět konstanty. (10)

$$Rm = -423,3 + 0,1550 * C_L$$

Možnosti měření pevnosti a tvrdosti šedé litiny nedestruktivní metodou pomocí ultrazvuku.

Použití měření pevnosti a tvrdosti šedé litiny pomocí podélných ultrazvukových vln šířících se v maticí v širším rozsahu v praktických podmínkách přináší problém, kterým je bezpečná záruka naměřených výsledků. Hodnoty naměřené pomocí nedestruktivního měření nezaručují požadované mechanické vlastnosti. Poskytují pouze přibližnou informaci o tom, v jakém rozmezí hodnot pevnosti a tvrdosti se takto měřený materiál nachází. Pevnost



litiny je závislá na chemickém složení a podmínkách odlévání, především na rychlosti ochlazování a tím i na tloušťce stěny daného odlitku. Toto měření se tedy může stát orientačním způsobem kontroly jakosti a mechanických vlastností ve slévárnách, ale nepřesní ani nenahradí tradiční destruktivní metody pro měření pevnosti šedé litiny v praxi. Problémem znehodnocujícím nedestruktivní měření šedé litiny je grafit, který se vylučuje ve formě lupínků. Tím porušuje celistvost kovové hmoty a tím i plastické vlastnosti. Naopak zvyšuje útlum kmitů. Zkoušení a měření u odlitků ultrazvukovou metodou je sice možné, ale také dost obtížné. Tyto obtíže způsobuje často členitý tvar, dosti nepřesný a špatný povrch, ale hlavně je to dáno hrubou strukturou litiny.

Výsledky měření dokázaly, že není možné aplikovat navržený postup v podmínkách slévárny přímo na odlitcích, protože nepřesnosti vzniknuvší při měření by se v praxi ještě více zvětšovaly.

Příčinou by mohli být mimo jiné i teplotní rozdíly odlitků při měření přímo ve výrobě, kde nedokážeme zajistit stabilní podmínky a teplotu okolí 20°, jako v laboratoři. Rovněž stacionární měření tvrdosti bychom museli nahradit například Poldi kladívkem, které vykazuje větší odchylky chyb při měření. Povrchová struktura litiny a její členitost bez předchozího opracování (broušení, leštění) a konečně obtížnost praktického měření skutečné tloušťky stěny v místech, kde není přístup pro běžná měřidla, nám dále jen rozkládá přesnost našeho měření.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

Použitá literatura:

- [1] Projekt: Inovace oboru Mechatronik pro zlínský kraj CZ.1.07/1.1.08/03.009
- [2] Srovnávací nedestruktivní testy materiálů autodílů, Břetislav Skrbek, Vladimír Nosek, Technická univerzita v Liberci, [bretislav.skrbek@tul.cz](mailto:bretislav.skrbek@tul.cz)
- [3]<http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/index.htm>,
- [4] Metoda ultrazvuková, Publikace PTS 02 -36, Ing. Josef Solnař, 1999 a PTS 02 – 44, Materiál, vady a předpisy
- [5] Norma ČSN EN 1561 Slévárenství – litiny s lupínkovým grafitem
- [6] Pluhař J., Koritta J.: Strojírenské materiály, SNTL, Praha (1981), Vojtěch D.: Kovové konstrukční materiály II, VŠCHT, Praha (1997),  
[http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm\\_tepelne\\_zprac\\_oceli/fec.htm](http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_tepelne_zprac_oceli/fec.htm)
- [7] D. Odehnalová: [kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_bakalari/NOM2/LITINY\\_podklady.ppt](http://kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/NOM2/LITINY_podklady.ppt)
- [8] Základy pružnosti a pevnosti doc. Ing. Jakub Javořík, Ph.D.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obrázek 1: Diagram Fe <sub>3</sub> C (zdroje: [ 7]).....	15
Obrázek 2: Fe <sub>3</sub> -C diagram.....	16
Obrázek 3: Diagram železo – uhlík .....	17
Obrázek 4: Diagram železo – uhlík A1 až A3 .....	18
Obrázek 5: Fe <sub>3</sub> -C diagram.....	19
Obrázek 6: Diagram Fe <sub>3</sub> -C.....	20
Obrázek 7: Stabilní diagram Fe-C .....	22
Obrázek 8: Struktura bíle nelegované litiny [7].....	23
Obrázek 9: Rozložení a tvar grafitu 1. [7] .....	24
Obrázek 10: Rozložení a tvar grafitu 2. [7] .....	24
Obrázek 11: Tažnost litiny.....	25
Obrázek 12: Lupínky grafitu [7] .....	26
Obrázek 13: Perlitická litina s lupínkovým grafitem [7] .....	26
Obrázek 14: Kuličkový grafit ve struktuře litiny [7] .....	27
Obrázek 15: Vermikulární tvar grafitu [7].....	28
Obrázek 16: Ultrazvuková sada .....	33
Obrázek 17: Trhací zařízení na měření pevnosti v tahu .....	36
Obrázek 18.: Pracovní smluvní diagram [8].....	37
Obrázek 19: Metoda měření tvrdosti Brinell .....	38
Obrázek 20: Měření tvrdosti podle Vickerse .....	40
Obrázek 21: Měření tvrdosti podle Rockwella .....	41
Obrázek 22: Leštička BUEHLER EcoMet 250 PRO.....	45
Obrázek 23: Moduly pro Micro-Combi Tester.....	44
Obrázek 24: Tvrdoměr Micro-Combi Tester.....	47
Obrázek 25: Vtisková tvrdost Hit.....	51
Obrázek 26: Vtiskový modul pružnosti EIT .....	51
Obrázek 27: Deformační práce.....	51
Obrázek 28: Maximální napětí v tahu (mez pevnosti v tahu).....	53
Obrázek 29: stacionární tvrdoměr (ČSN EN ISO 6205-1) [vlastní tvorba].....	53
Obrázek 30: Tvrdost dle Brinella.....	53

---

Obrázek 31: Ultrazvuk VSM 35S – Krautkramer.....	55
Obrázek 32. Podélná rychlost zvuku.....	55
Obrázek 33: Porovnání vtiskové tvrdosti a podélné rychlosti zvuku.....	57
Obrázek 34: Porovnání vtiskového modulu pružnosti a podélné rychlosti zvuku.....	58
Obrázek 35: Porovnání meze pevnosti v tahu s podélnou rychlostí zvuku.....	59
Obrázek 36: Porovnání tvrdosti dle Brinella s podélnou rychlostí zvuku.....	59
Obrázek 37: Výsledky měření ultrazvukových podélných vln na vzorcích.....	60
Obrázek 38: Regrese $R_m$ na $Cl$ .....	61
Obrázek 39: Regrese $Cl$ na $HB$ .....	62

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1: Podíl jednotlivých chemických prvků v oceli a v litině .....	31
Tabulka 2: Výsledky mechanických vlastností testovaných zkušebních vzorků .....	49

## SEZNAM PŘÍLOH