



Hodnocení struktury brzdových kotoučů automobilů vyrobených z litiny s lupínkovým grafitem

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství
Autor práce: **Vítek Žitný**
Vedoucí práce: prof. Ing. Iva Nová, CSc.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vítek Žitný**
Osobní číslo: **S12000643**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojní inženýrství**
Název tématu: **Hodnocení struktury brzdových kotoučů automobilů
vyrobených z litiny s lupínkovým grafitem**
Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s rozdělením, výrobou a strukturou grafitických litin.
2. Provedte metalografické hodnocení vybraných brzdových kotoučů osobních automobilů, které jsou k dispozici na katedře strojírenské technologie, stanovte stupeň eutektičnosti litin.
3. Zhodnoťte získané poznatky a formulujte dílčí závěry.

Rozsah grafických prací: **tabulky, grafy**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- [1] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie litin*. [Skripta] FSI - VUT Brno, 1998.
[2] OTÁHAL, Vlastislav. *Jakostní litiny - litina s lupínkovým grafitem: výroba, vlastnosti*. Brno.
(http://otahalconsult.cz/wp-content/pdf/Jakostni_litiny_vytah.pdf, 10.10.2015);
[3] NOVÁ, Iva. *Teorie slévání II - Teoretické základy metalurgie slévárenských slitin*. [Skripta]. KSP, FS - TU v Liberci 2006.
[4] HANZL, Stanislav, PLACHÝ, Jan, RŮŽIČKA, Alfred. *Metalurgie slévárenských slitin*. [Skripta] FS - ČVUT Praha 1984.


Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Iva Nová, CSc.**
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání bakalářské práce: **1. února 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **1. května 2017**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

dne

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Abstrakt

Tato bakalářská práce je rozdělena do dvou částí – teoretické a experimentální. Teoretická část se zabývá základními informacemi o brzdových kotoučích a jejich materiálech. V této části jsou také charakterizovány grafitické litiny, kde hlavní pozornost je zaměřena na litinu s lupínkovým grafitem a její hodnotící kritéria. Experimentální část se zabývá přípravou a metalografickým rozbořem vzorků, které byly získány z jednotlivých brzdových kotoučů. Při metalografickém rozboru se hodnotí tvar, rozložení a velikost grafitu litin brzdových kotoučů. Dále se hodnotí strukturní fáze litiny brzdových kotoučů a měřením tvrdosti brzdových kotoučů z litiny s lupínkovým grafitem.

Klíčová slova: litina, brzdové kotouče, struktura, hodnotící kritérium, chemické složení

Abstract

This bachelor thesis is divided into two parts – theoretical part and experimental part. The theoretical part is focused on basic information about brake discs and their materials. In this part are also characterized graphite irons, main attention is focused on gray iron and its evaluation criteria. The experimental part deals with the preparation and metallographic analysis of samples which were obtained from the individual brake discs. Metallographic analysis assesses the shape, size and distribution of graphite cast iron brake discs. This is followed by evaluation of the structural phase cast iron brake discs and brake discs measuring the hardness of gray cast iron.

Key words: iron, brake discs, structure, evaluation criteria, chemical composition

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval prof. Ing. Ivě Nové, Csc. z katedry strojírenské technologie TU Liberec za trpělivost a připomínky, které mi velmi pomohly k napsání této bakalářské práce.

Obsah

1 ÚVOD	9
2 TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE	10
2.1 Základní charakteristika brzdových kotoučů	10
2.2 Charakteristika a rozdělení litin	12
2.3 Bílé litiny.....	14
2.3.1 Temperovaná litina.....	15
2.4 Litiny grafitické.....	18
2.4.1 Charakteristika a struktura grafitických litin.....	18
2.4.2 Litina s kuličkovým grafitem	20
2.4.3 Litina s červíčkovým grafitem	22
2.4.4 Litina s lupínkovým grafitem.....	23
2.4.4.1 Krystalizace litiny s lupínkovým grafitem.....	26
2.4.4.2 Vliv prvků a hodnotící kritéria litin	28
2.4.4.3 Tavení litiny s lupínkovým grafitem.....	30
2.4.4.4 Očkování litiny s lupínkovým grafitem	32
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE	35
3.1 Hodnocení kvality litiny s lupínkovým grafitem podle hodnotících kritérií	36
3.2 Metalografické hodnocení litiny s lupínkovým grafitem brzdových kotoučů....	39
3.2.1 Hodnocení grafitu litiny brzdových kotoučů	39
3.2.2 Hodnocení strukturních fází litiny brzdových kotoučů.....	41
3.3 Měření tvrdosti brzdových kotoučů z litiny s lupínkovým grafitem	43
4 DISKUSE VÝSLEDKŮ	45
5 ZÁVĚR	48
6 POUŽITÁ LITERATURA	50
PŘÍLOHA A	51
PŘÍLOHA B	52

Seznam tabulek

Tabulka 2.1 Chemické složení legovaných brzdových kotoučů z litiny s lupínkovým grafitem.....	11
Tabulka 2.2 Hodnoty vybraných vlastností litiny s lupínkovým grafitem pro výrobu brzdových kotoučů.....	11
Tabulka 2.3 Základní vlastnosti brzdových kotoučů	12
Tabulka 3.1 Chemické složení brzdových kotoučů	36
Tabulka 3.2 Hodnoty hodnotících kritérií litin s lupínkovým grafitem brzdových kotoučů.....	36
Tabulka 3.3 Souhrnné značení mikrostruktury litinových vzorků sledovaných brzdových kotoučů.....	43
Tabulka 3.4 Naměřené hodnoty tvrdosti brzdových kotoučů.....	44
Tabulka A.1 ČSN EN 1561: Charakteristika chemického složení a vlastností litiny s lupínkovým grafitem	51

Seznam obrázků

Obr. 2-1 Schéma silových podmínek na brzdovém kotouči při brzdění	10
Obr. 2-2 Základní rozdělení litin	13
Obr. 2-3 Rovnovážný binární diagram Fe-C metastabilní.....	13
Obr. 2-4 Rovnovážný binární diagram Fe-C stabilní	14
Obr. 2-5 Struktura bílé litiny.....	15
Obr. 2-6 Struktura temperované litiny s bílým lomem.....	17
Obr. 2-7 Struktura temperované litiny s černým lomem	18
Obr. 2-8 Struktura temperované litiny perlitické.....	18
Obr. 2-9 Závislost pevnosti a tažnosti u grafitických litin.....	20
Obr. 2-10 Mikrostruktura litiny s kuličkovým grafitem a feritickou maticí	22
Obr. 2-11 Tvar červíkovitého grafitu a struktura litiny s červíkovitým grafitem a feritickou maticí.....	23
Obr. 2-12 Řada podporujících a brzdících prvků	24
Obr. 2-13 Struktura feritické litiny s kuličkovým grafitem	25
Obr. 2-14 Struktura perlitické litiny s lupínkovým grafitem	25
Obr. 2-15 Feriticko-perlitická struktura litiny s lupínkovým grafitem.....	26
Obr. 2-16 Křivka tuhnutí a chladnutí litiny s lupínkovým grafitem.....	27
Obr. 2-17 Pseudobinární rovnovážný diagram Fe-C-Si (2 hmot. %).....	28
Obr. 2-18 Schéma kuplovný a detail jejího předpecí.....	31
Obr. 2-19 Základní rozdělení očkovaní litiny s lupínkovým grafitem	33
Obr. 3-1 Pohled na sledované brzdové kotouče	35
Obr. 3-2 Tvar, velikost a rozložení grafitu litinového brzdového kotouče A (neleptaný stav).....	40
Obr. 3-3 Tvar, velikost a rozložení grafitu litinového brzdového kotouče B (neleptaný stav).....	40
Obr. 3-4 Tvar, velikost a rozložení grafitu litinového brzdového kotouče C (neleptaný stav).....	40
Obr. 3-5 Charakter grafitu a základní kovové hmoty litinového brzdového kotouče A (leptáno – Nital 3%).....	41
Obr. 3-6 Charakter grafitu a základní kovové hmoty litinového brzdového kotouče B (leptáno – Nital 3%).....	41
Obr. 3-7 Charakter grafitu a základní kovové hmoty litinového brzdového kotouče C (leptáno – Nital 3%).....	42
Obr. B-1 Hodnoty tvrdosti dle Brinella pro EN GJL (litiny s lupínkovým grafitem)	52
Obr. B-2 Hodnoty pevnosti v tahu pro litinu EN GJL (litiny s lupínkovým grafitem) ..	52

1 ÚVOD

V současné době je velký rozvoj automobilového průmyslu, kde se uplatňují odlitky jak z neželezných kovů, které se vyznačují nízkou hustotou, tak odlitky ze slitin železa. Mezi tyto slitiny se řadí litiny s lupínkovým grafitem. Vyznačují se velmi dobrou odolností při namáhání v tlaku, útlumovými a dobrými kluznými vlastnostmi. V konstrukci automobilů mají uplatnění při výrobě vložek a pístních kroužků spalovacích motorů, dále při výrobě brzdových bubnů a brzdových kotoučů. Na litinové odlitky brzdových kotoučů jsou kladeny velmi vysoké nároky, sledují se mechanické vlastnosti, chemická čistota a odolnost proti korozi. U brzdových kotoučů je velmi významná struktura, neboť brzdové kotouče tvoří brzdovou soustavu automobilů, která je velmi důležitá z hlediska bezpečnosti silničního provozu. Při brzdění dochází k abrazivnímu tření mezi brzdovou plochou kotouče a brzdnými destičkami, tření způsobuje značné zahřívání brzdového kotouče. Proto je od materiálu brzdového kotouče vyžadována vyhovující tepelná vodivost, nízký součinitel teplotní roztažnosti a vysoká teplota tavení. Z dalších vlastností je to odolnost proti opotřebení a korozi.

Na našem pracovišti – Katedře strojírenské technologie, FS – TU v Liberci se zabýváme problematikou výroby, mechanickými vlastnostmi a získanou strukturou různých typů litin pro automobilový průmysl.

Problematikou sledování struktury a hodnocením kvality litin se také zabývá tato bakalářská práce, která porovnává materiály tří typů brzdových kotoučů z litiny s lupínkovým grafitem a řeší téma: „Hodnocení struktury brzdových kotoučů automobilů vyrobených z litiny s lupínkovým grafitem“.

2 TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE

2.1 Základní charakteristika brzdových kotoučů

Brzdové kotouče tvoří brzdovou soustavu automobilů, jež pracuje na principu zvětšování odporu abrazivního tření. Brzdová soustava je nejdůležitější částí automobilu z hlediska aktivní bezpečnosti. Při brzdění vozidla se snižuje pohybová energie, která se mění na teplo. Z materiálového hlediska se jedná o takové materiály, které vykazují vyhovující vlastnosti při brzděném účinku. Jsou to odolnost proti opotřebení, teplotní a tvarová stálost, vyhovující odvod tepla a odolnost proti korozi. Na obr. 2-1 je uveden brzdový kotouč. Zde jsou též naznačeny normálové a třecí síly při brzdění. Moment při brzdění lze vypočítat:

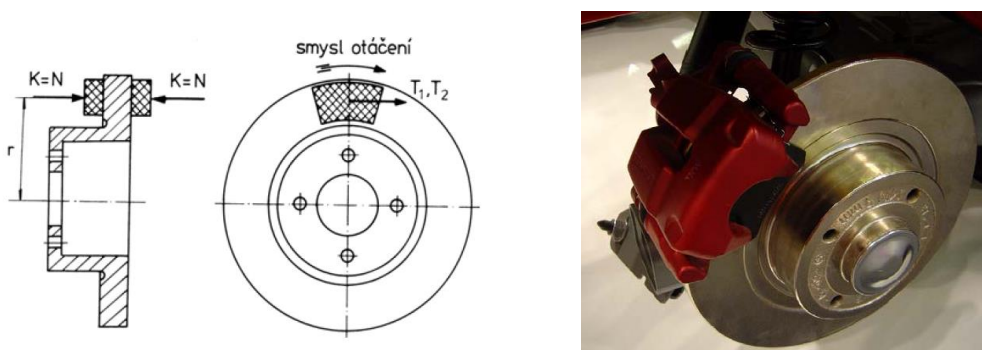
$$M_B = (T_1 + T_2) \cdot r \quad (1)$$

kde značí: M_B – brzdový moment [$\text{N} \cdot \text{m}$]; T_1 – třecí síla [N], T_2 – třecí síla [N]; r – poloměr [m].

Brzdový moment lze také vypočítat:

$$M_B = 2 \cdot \mu \cdot N \cdot r \quad (2)$$

kde značí: μ – součinitel tření mezi kotoučem a brzdovou destičkou ($\mu = 0,3$ až $0,4$ pro kotouč z litiny s lupínkovým grafitem); N – normálovou sílu [N].



Obr. 2-1 Schéma silových podmínek na brzdovém kotouči při brzdění

Materiálem brzdových kotoučů je litina s lupínkovým grafitem. Používá se pro výrobu kotoučů většiny automobilů. Tato litina se používá s ohledem na doporučení asociace SAE (**Society of Automotive Engineers**), která definovala dle směrnice SAE J341 materiál pro výrobu brzdových kotoučů. Jedná se o legovanou šedou litinu s lupínkovým grafitem o obsahu 3,4 % uhlíku. Legury zlepšují materiálové vlastnosti litiny s lupínkovým grafitem. K legování se používá např. molybden, měď, chrom nebo

titan. Měď v litině zvyšuje její odolnost proti korozi. Litina s lupínkovým grafitem splňuje výše zmíněné požadavky a řadí se tak k nejrozšířenějšímu používanému materiálu pro výrobu brzdových kotoučů běžných automobilů. V tabulce 2.1 je uvedeno chemické složení legovaných brzdových kotoučů z litiny s lupínkovým grafitem. V tabulce 2.2 jsou uvedeny hodnoty vybraných fyzikálních vlastností pro teplotu 20 °C. Je však nutno připomenout, že při brždění může teplota kotouče stoupnout až na hodnotu cca 500 °C. Tím se změní hodnoty uvedené v tabulce 2.2. Z fyzikálního hlediska jsou tyto hodnoty závislé na teplotě. Tabelárně nejsou nikde uváděny, je třeba je stanovit fyzikálním měřením. Litina s lupínkovým grafitem se vyznačuje velmi homogenní strukturou a nižším teplotním napětím.

Tabulka 2.1 Chemické složení legovaných brzdových kotoučů z litiny s lupínkovým grafitem, [1]

<i>Chemické složení litiny s lupínkovým grafitem pro výrobu brzdových kotoučů</i>								
[hmot. %]								
C	Si	Mn	Ti	Mo	Cr	Ni	S	P
3,4	1,50	0,60	0,15	0,13	0,09	0,084	0,075	0,015

Tabulka 2.2 Hodnoty vybraných vlastností litiny s lupínkovým grafitem pro výrobu brzdových kotoučů, [1]

<i>Vybrané fyzikální vlastnosti litiny s lupínkovým grafitem pro výrobu brzdových kotoučů</i>	
Hustota ρ [kg·m ⁻³]	7 250
Měrná tepelná kapacita c [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	540
Součinitel teplotní roztažnosti α [K ⁻¹]	13·10 ⁻⁶
Youngův modul pružnosti E [MPa]	130 000
Poissonovo číslo μ [1]	0,211
Pevnost na mezi kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	195
Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]	268
Teplota tavení [°C]	1 147

Dále se pro výrobu brzdových kotoučů používá hliníkový kompozit s kovovou maticí (Al – MMC), který se používá pro výrobu brzdových kotoučů vlaků, nákladních automobilů a motocyklů.

Brzdové kotouče z keramiky se používají nejčastěji u závodních vozů. Tyto kotouče vykazují vyšší životnost a vyšší brzdny výkon. Keramické kotouče jsou vyrobeny z tzv. kompozitu, který tvoří uhlíková vlákna zpevňovaná keramickou maticí. V keramické matici má největší podíl karbid křemíku, který vykazuje vysokou odolností proti otěru. Životnost keramických brzdových kotoučů odpovídá najetí až 300 000 km a úbytek tloušťky keramického brzdového kotouče činí během celé jeho životnosti jen asi 0,5 mm. Keramické brzdy jsou také naprosto odolné vůči korozi.

V tabulce 2.3 je uveden přehled základních vlastností materiálů brzdových kotoučů.

Tabulka 2.3 Základní vlastnosti brzdových kotoučů, [1]

Materiál kotouče	Hustota [kg·m ³]	Tepelná vodivost [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Součinitel teplotní roztlačnosti [K ⁻¹]
Litina s lupínkovým grafitem (3,4 hmot. %)	7 200	52	10·10 ⁻⁶ až 13·10 ⁻⁶
Hliníkový kompozit s kovovou maticí (Al – MMC)	2 700	180	18·10 ⁻⁶ až 25·10 ⁻⁶
Kompozit s uhlíkovými vlákny	1 700	300	0,1·10 ⁻⁶ až 1,5·10 ⁻⁶

2.2 Charakteristika a rozdělení litin

Litina je slitina železa, uhlíku a dalších prvků (Si, S, Mn, P) s obsahem uhlíku vyšším, než je 2,14 hm. % C. Struktura litin je tvořená primární fází a eutektikem. Litiny obsahují mimo jiné vyšší množství uhlíku a dalších přísadových směsí, například křemík, mangan, síru a fosfor, na rozdíl od ocelí. Mezi nejdůležitější přísadu patří křemík.

Existují dvě formy uhlíku, tudíž i dva systémy Fe-C (stabilní a metastabilní), v průběhu tuhnutí se u bílých litin projevuje vznik cementitického eutektika (ledeburit), u grafitických litin závisí na složení taveniny a podmínkách ochlazování. Podmínky ovlivňující strukturu litin, [12] jsou:

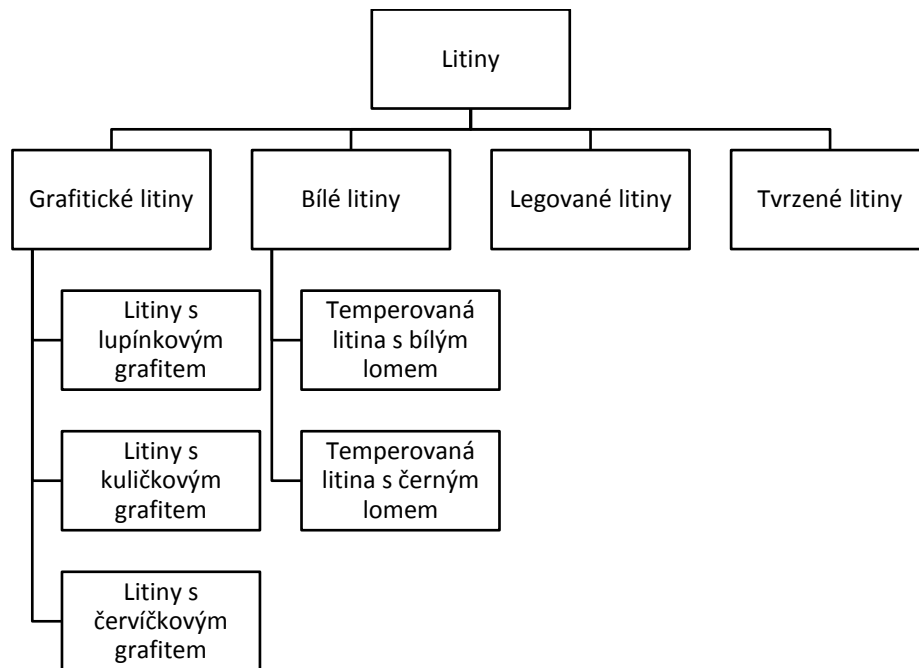
Chemické složení taveniny – C, dále Si, Mn, P, S a obsah dalších prvků;

Rychlost tuhnutí a chladnutí – tloušťka stěny odlitku, typ formy a jader;

Zárodečný stav taveniny – vliv očkování, modifikace, teploty a doby přehřátí taveniny;

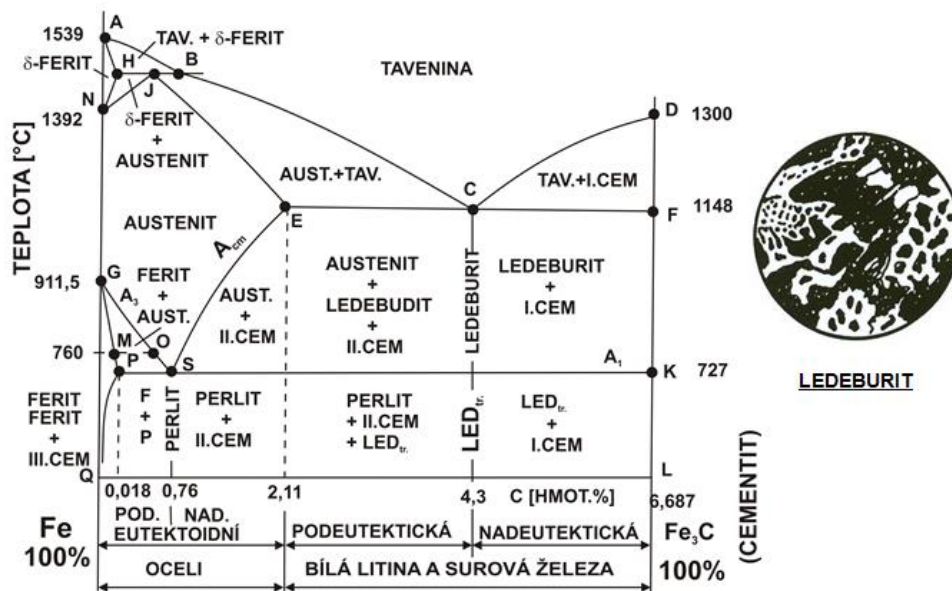
Způsob tepelného zpracování – bainitické kalení, temperování, atd.

Na obr. 2-2 je uvedeno schéma rozdělení dvou základních druhů litin.

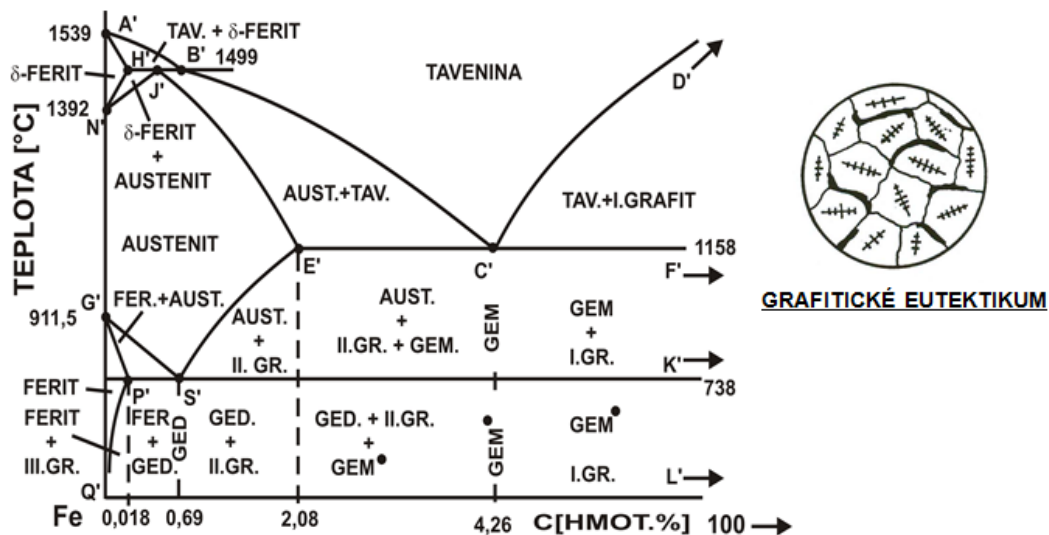


Obr. 2-2 Základní rozdělení litin

Na obr. 2-2 je základní rozdělení litin. Na obr. 2-3 a 2-4 jsou uvedeny diagramy obou typů soustav.



Obr. 2-3 Rovnovážný binární diagram Fe-C metastabilní [12]



Obr. 2-4 Rovnovážný binární diagram Fe-C stabilní, [12]

2.3 Bílé litiny

Tyto litiny se dnes téměř nevyrábějí. Dříve byla bílá litina základem pro výrobu temperované litiny. Bílá litina tuhne podle metastabilní soustavy Fe-C a základem struktury je ledeburit, resp. ledeburitický cementit, který je velmi tvrdý. Litina s takovou strukturou má bílý lom, vysokou tvrdost a dobrou odolnost proti opotřebení. Je však značně křehká a má menší pevnost než litina s lupínkovým grafitem. Tvrdost roste se zvětšováním obsahu uhlíku, tj. s množstvím cementitu ve struktuře, [4].

Legováním lze tvrdost ještě zvětšit. Příznivě působí zejména přísada Ni, Mn, Cr. Velmi značně zvětšuje tvrdost i přísada boru. Podle obsahu uhlíku může být litina podeutektická až nadeutektická. V praxi se nejčastěji používá litin podeutektických. Z bílé litiny se zhotovují odlitky, které mají mít velkou tvrdost. Podeutektická litina vymezeného složení je výchozím materiálem pro výrobu temperované litiny, [5].

Avšak bílou litinu můžeme také nechtěně získat v tenké části odlitku při jeho výrobě z litiny s lupínkovým grafitem (to závisí na rychlosti tuhnutí a chladnutí odlitku, resp. na jeho tloušťce stěny i na jeho chemickém složení), [4], [12]. Na obr. 2-5 je struktura bílé litiny.



a) podeutektická bílá litina



b) eutektická bílá litina



c) nadeutektická bílá litina

Obr. 2-5 Struktura bílé litiny, [13]

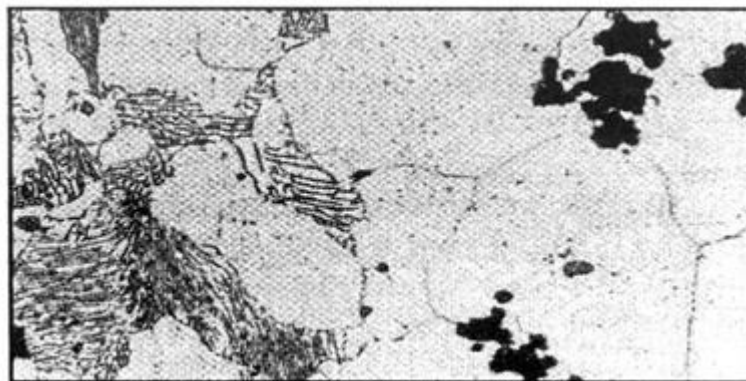
2.3.1 Temperovaná litina

Dlouhodobým žháním bílé litiny při teplotě cca 950 až 1 050 °C, dochází k rozkladu cementitu, čímž se vyrábí *temperovaná litina*. Temperovaná litina je houževnatý, snadno obrobitelný konstrukční materiál vyrobený temperováním (dlouhodobé žhání odlitku z bílé litiny). K zajištění úspěšné výroby musí mít bílá litina podeutektické složení. Její struktura po odlití se má skládat pouze z cementitu a perlitu. Grafít nemá být přítomen. Tomu vyhovuje litina s nízkým stupněm eutektičnosti. Taková litina má však zhoršenou zabíhavost a větší smrštění než litina s lupínkovým grafitem. Proto výrobní technologie odlitku z temperované litiny je choulostivější, takže nedovoluje zhotovovat velké odlitky, [5].

Rozkladem cementitu vzniká vločkový grafit, který je rozložen v základní kovové hmotě litiny (matrici). Základní hmota temperované litiny je závislá na způsobu temperování (na černý lom, na bílý lom, na perlit). Při temperování na černý lom vzniká matrice feritická, při temperování na bílý lom vzniká matrice feriticko-perlitická, poslední způsob je temperování za vzniku perlitické matrice. Temperované litiny se vyznačují velmi dobrými mechanickými vlastnostmi, s perlitickou maticí dosahuje pevnost v tahu až 700 MPa. Dnes temperovaná litina nahrazuje kvalitní litiny, které jsme schopni vyrobit pouze odlitím, [4].

Temperovaná litina s bílým lomem – podle doby, teploty žíhání a rozměrů odlitků se dosáhne úplného oduhličení jen na povrchu, nebo v celém průřezu odlitku. Uhlík z povrchu se odstraňuje působením plynné fáze. Při žíhání v rudě vzniká napřed reakcí vzdušného kyslíku s uhlíkem z povrchových vrstev odlitků kysličník uhličitý. Při zvýšení teploty se vzniklý CO_2 částečně redukuje uhlíkem na povrchu odlitku na CO. Pro nerušené oduhličování je třeba udržovat parciální tlak CO dostatečně nízký. Oduhličením povrchu se sníží obsah uhlíku v austenitu. Tím se poruší rovnováha mezi austenitem a přítomným cementitem do austenitu. Množství cementitu se tím zmenšuje. Jakmile všechny cementit z povrchové vrstvy přejde do tuhého roztoku, dochází při dalším oduhličování k zmenšení obsahu uhlíku v austenitu, které je vyrovnáno difusí z hlubších vrstev. Vzhledem k tomu, že difusní dráhy jsou nyní poměrně značné, vyrovnává se složení pomalu a může se stát, že povrch je již značně oduhličen, zatímco uvnitř průřezu je ještě nerozložený cementit, [5].

Rychlost oduhličení je řízena difusí uhlíku z vnitřních částí odlitku k povrchu a roste teplotou. Při žíhání může probíhat i další pochod – rozpad cementitu na grafit a austenit. Grafit se však rozpouští v nenasyceném austenitu podstatně pomaleji než cementit. Jeho přítomnost pro hladký průběh procesu není žádoucí, poněvadž se doba temperování značně prodlužuje. Výsledkem je litina buď úplně oduhličená, nebo více či méně oduhličená, [5]. Na obr. 2-6 je struktura temperované litiny s bílým lomem.

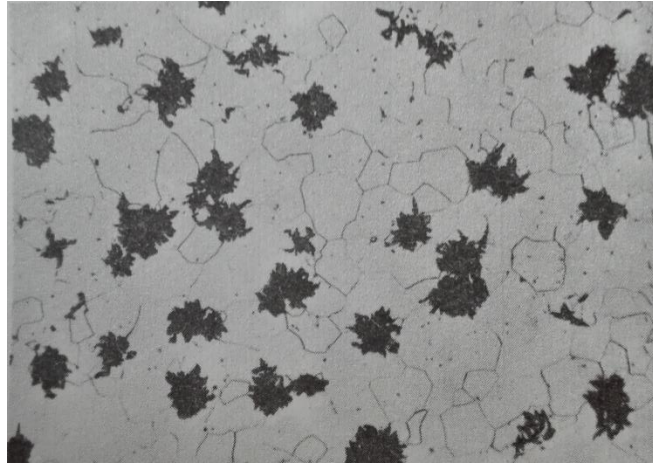


Obr. 2-6 Struktura temperované litiny s bílým lomem, **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

Temperovaná litina s černým lomem – při výrobě litiny s černým lomem se jedná v podstatě o rozložení eutektického popř. i eutektoidního cementitu dostatečně dlouhým žiháním, aniž se odstraní uhlík. Pochod probíhá ve dvou stádiích, [5].

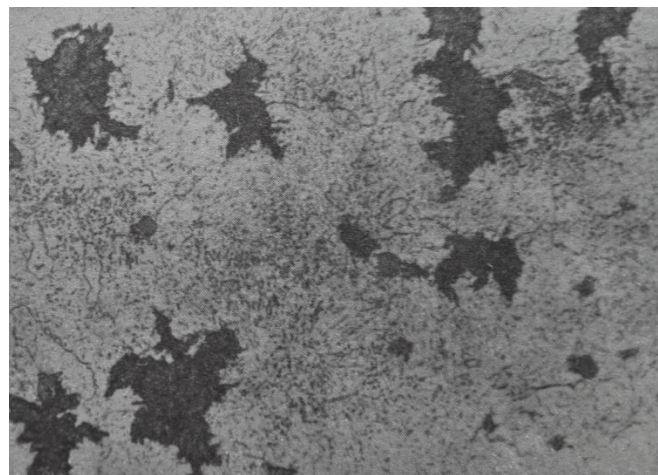
Při *prvním stadiu grafitizace* (při teplotě asi 900 až 1 050 °C) proběhne rozpad eutektického cementitu na grafit (temperovaný uhlík) a austenit. Rychlost grafitizace závisí na teplotě a složení litiny. Rozpad začíná po určité inkubační době, jeho rychlost se zvětšuje a po dosažení maxima klesá. I když teplota, malý obsah uhlíku a větší obsah křemíku podporují grafitizaci, jsou jejich přípustné hranice omezeny. Horní hranice teploty je dána tvarem vyloučeného grafitu (při vysokých teplotách se grafit vylučuje členitý, málo kompaktní), nebezpečím deformace odlitků a větším opotřebením žihacího zařízení. Malý obsah uhlíku zhoršuje slévateľnost, příliš velký obsah křemíku zvětšuje nebezpečí vzniku grafitu již během tuhnutí, [5].

Po skončení prvního stupně grafitizace je v litině přítomen grafit a austenit. Další udržování odlitku na teplotě není účelné. V následujícím úseku temperování je nutno, aby se austenit vhodným ochlazením rozpadl na směs feritu a grafitu (litina feritická) nebo na perlit (perlitická litina). Je to tzv. *druhé stadium grafitizace*. Konečná struktura je závislá na rychlosti přechodu přes teplotu perlitické přeměny. U temperované litiny jde o interval 6 až 12 °C podle obsahu Si. Při velmi pomalém ochlazení, tzv. mezní rychlost se přeměňuje austenit na ferit a grafit. Kromě této přímé přeměny austenitu na ferit a grafit lze provést přeměnu austenitu rychlým ochlazením předem na perlit, popřípadě směs perlitu a feritu, načež udržováním teploty v oblasti perlitické přeměny se provede rozpad perlitického cementitu na ferit a grafit, [5]. Na obr. 2-7 je pro ilustraci struktura temperované litiny s černým lomem.



Obr. 2-7 Struktura temperované litiny s černým lomem, [13]

Temperovaná litina perlitická – vyrábí se grafitizačním žháním bez oduhličování (první stadium je shodné s výrobou litiny s černým lomem). Ochlazování z teploty 1. stadia grafitizace se provede dostatečně rychle, aby se austenit transformoval na perlit. Konečná struktura litiny je tvořena grafitem, uloženým v perlitické základní hmotě. K dosažení perlitické struktury je třeba vhodně volit složení. Zvyšuje se v ní obsah manganu za současného mírného zvýšení obsahu křemíku, [5]. Na obr. 2-8 je struktura temperované litiny perlitické.



Obr. 2-8 Struktura temperované litiny perlitické, [13]

2.4 Litiny grafitické

2.4.1 Charakteristika a struktura grafitických litin

Vlastnosti grafitických litin závisí na vlastnostech základní kovové hmoty (matrice) a typu tvaru, velikosti a rozložení grafitu. Strukturu matrice grafitických litin po odlití tvoří obvykle perlit, ferit nebo jejich směs (popř. eutektický cementit, fosfidické

eutektikum, výjimečně bainit nebo martenzit). Perlit je nejčastěji lamelární a s jeho rostoucím podílem se zvyšuje pevnost, tvrdost, odolnost proti opotřebení a klesá tažnost a houževnatost. Vzrůstající množství feritu v matrici se projeví snížením pevnostních vlastností a zvýšením tažnosti a houževnatosti. Cementit v grafitických litinách je nežádoucí, protože zvyšuje jejich tvrdost a křehkost a zhoršuje obrobitelnost, [6].

Grafit – má velký vliv na vlastnosti litiny, neboť jeho částice zmenšují aktivní průřez kovové hmoty litiny, avšak lupínkový grafit způsobuje útlumové vlastnosti litiny. Grafit je elementární uhlík, který krystalizuje v hexagonální soustavě. Vzniká při eutektické přeměně litiny podle stabilního diagramu Fe-C a zůstává ve struktuře litiny bez ohledu na to, zda probíhala další přeměna podle stabilního, nebo metastabilního diagramu Fe-C. Grafit má v porovnání s kovovou matricí litiny téměř zanedbatelnou pevnost, [4].

Důležitý je tvar (morfologie) grafitu. Za normálních podmínek krystalizuje grafit ve formě lupínků. Přidání určitého množství tzv. modifikátoru do taveniny způsobí vyloučení např. kuličkového nebo červíčkového grafitu. Dále je důležitá velikost a rozložení grafitu. Chceme-li grafit drobnějšího vzhledu s pravidelným vyloučením, přidáváme před odléváním do taveniny tzv. očkovadlo (uhlík, fosfor, měď, atd.), [4].

Základní kovová hmota – může být podle způsobu transformace austenitu vzniklého při eutektické krystalizaci litiny feritická, feriticko-perlitická a perlitická. Současně se mohou ve struktuře litiny objevovat i další, výše uvedené, strukturní součásti.

Ferit – ve struktuře litin snižuje pevnost v tahu, tvrdost a odolnost proti opotřebení, ale zvyšuje tvárné vlastnosti a vrubovou houževnatost litin. Ferit je u litin definován jako tuhý roztok uhlíku a křemíku v Fe_{α} , [4].

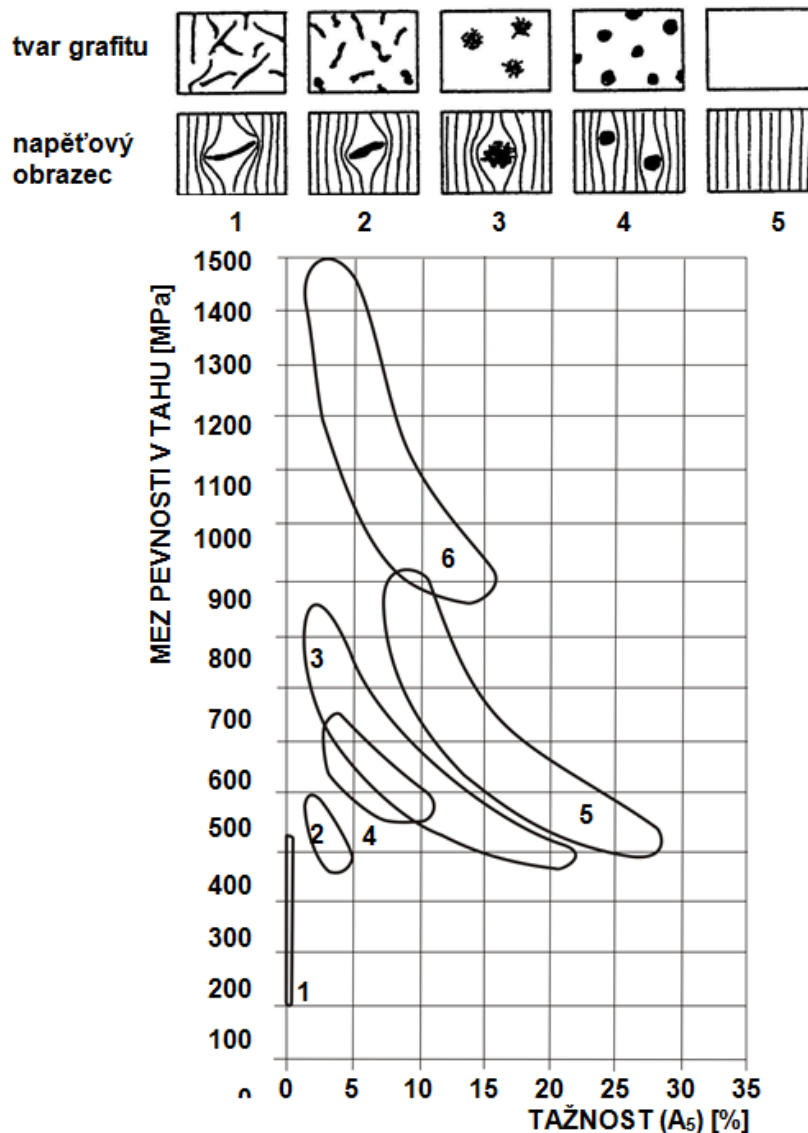
Perlit – je v litinách v lamelárním stavu. Čím je větší množství perlitu v matrici, tím se zvyšují mechanické vlastnosti litiny (pevnost v tahu, tvrdost) a odolnost vůči opotřebení, avšak klesá tvárnost litiny, [4].

Steadit – ternární fosfidické eutektikum, je směs (Fe – Fe_3C – Fe_3P). Ve struktuře litiny se objevuje ve formě „pavučinek“. Toto nepříjemné eutektikum se vyskytuje při vyšším obsahu fosforu, tj. od 0,3 %. Má nízkou teplotu tání (950 °C). Je velmi tvrdou a nepříznivou strukturní složkou litiny, [4].

Podle tvaru grafitu rozdělujeme tyto litiny na tři velké skupiny:

1. Litina s lupínkovým grafitem, dle ČSN EN 1561 se označuje GJL;
2. Litina s červíčkovým grafitem, dle ČSN EN se označuje GJV;
3. Litina s kuličkovým grafitem, dle ČSN EN 1563 se označuje GJS;

Na obr. 2-9 jsou uvedeny pevnostní vlastnosti vybraných typů litin.



1 - LLG, 2 - LČG, 3 - LKG, 4 - TLP, 5 - ocel na odlitky, 6 - ADI (izotermicky kalená LKG)

Obr. 2-9 Závislost pevnosti a tažnosti u grafitických litin, [12]

2.4.2 Litina s kuličkovým grafitem

Litiny s kuličkovým grafitem obsahují ve struktuře vyloučený kuličkový grafit. Podrobným zkoumáním grafitu se zjistilo, že grafit je složitý polykrystal. Ve složení kuličkovitého grafitu převládají paprskovitě uspořádané pyramidální krystaly uspořádané v kuželových spirálách. Předpokládá se, že na krystalizaci zrnitého grafitu mají vliv přídavné látky do tekutého kovu, které po dobu krystalizace zvyšují povrchové napětí, a tak vyvolávají krystalizaci grafitu ve tvaru s nejmenším povrchem. Na tvorbu grafitu jsou navíc zapotřebí mimo železa a uhlíku, i křemík a kyslík. Na tvorbu kuličkového grafitu jsou nutné přídavné látky, které dovedou snížit obsah kyslíku

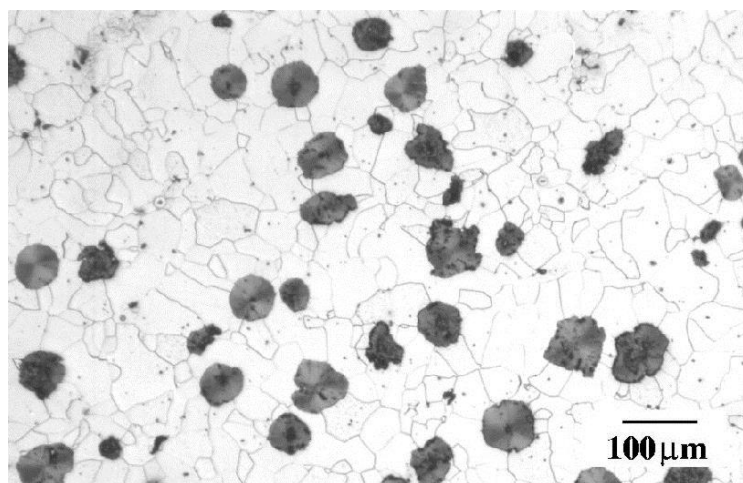
a podpořit růst grafitu. Kuličkového tvaru grafitu se dosahuje přidáním takové látky do tekutého kovu před odlitím, která ovlivní růst zárodku grafitu, [8].

Tento proces se nazývá modifikování. Přídavnou látkou bývá hořčík a jeho slitiny. Po modifikování musí následovat grafitizační očkování z důvodu zvýšení stability karbidu vlivem hořčíku. Schopnost vyvolat stejný účinek mají i další prvky používané především na minimalizaci prudkosti reakce nebo optimalizace metalurgických podmínek. Náklady na modifikaci jsou závislé na obsahu síry ve zpracovaném kovu. Litina s kuličkovým grafitem obvykle obsahuje 3,2 až 4,2 % C; 1,5 až 4 % Si; 0,4 až 0,8 % Mn; pod 0,1 % P; pod 0,02 % S, [8].

Tato litina je vysoce jakostní materiál, který v sobě spojuje přednosti ocelí na odlitky s přednostmi litiny s lupínkovým grafitem. [9]

Struktura matrice je ovlivněna mnoha faktory, nejdůležitější z nich jsou: chemické složení tekutého kovu, rychlost ochlazování, modifikace a očkování. Výsledná struktura základní kovové hmoty u litin s kuličkovým grafitem může být perlitická, feriticko-perlitická nebo feritická. Modifikace a očkování má vliv na primární krystalizaci grafitu, ale i sekundární vliv na chemické složení matrice. Strukturu matrice odlitku lze dále upravovat tepelným zpracováním. Nežádoucí složkou matrice jsou karbidické fáze. Ty nepříznivým způsobem ovlivňují mechanické vlastnosti litiny. Východiskem při výrobě litiny s kuličkovým grafitem je šedá litina, která je modifikována hořčíkem pro zabezpečení grafitizační schopnosti litiny. Pro splnění požadavků vysoké grafitizační schopnosti se využívá vyššího obsahu uhlíku a křemíku, [8].

Litina s kuličkovým grafitem je prosazována jako alternativní materiál oceli na odlitky. V současné době se dává přednost materiálům, které dosáhly výslednou strukturu po ztuhnutí odlitku. Odlitky z ocelí na odlitky dále vyžadují tepelné zpracování, což je dnes technicky zdlouhavé a ekonomicky nákladné. V normě ČSN EN 1661 je dnes zařazeno 8 skupin GJS, nelegovaných litin s kuličkovým grafitem odstupňovaných podle pevnosti v tahu od 350 do 900 MPa. Tyto litiny jsou vhodné pro dynamicky namáhané odlitky s tloušťkou stěny od 5 do 100 mm, u kterých je požadována záruka mechanických vlastností a vysoké hodnoty plasticity při nízkých teplotách. V automobilovém průmyslu se nejvíce používají pro vačky, klikové hřídele, součásti převodových skříní, motorové vložky a ozubená kola, [8]. Na obr. 2-10 je uvedena struktura litiny s kuličkovým grafitem a feritickou maticí.



Obr. 2-10 Mikrostruktura litiny s kuličkovým grafitem a feritickou matricí, [12]

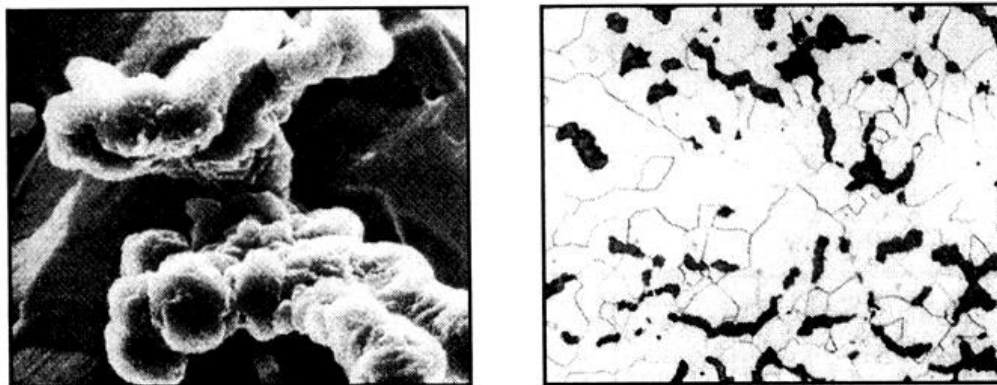
2.4.3 Litina s červíčkovým grafitem

Litina s červíčkovým grafitem obsahuje v základní struktuře červíčkovitý (vermikulární) grafit. Někdy struktura litiny s červíčkovým grafitem obsahuje i malé množství zrnitého nepravidelného kuličkového grafitu, avšak maximálně 20 % ze sledované mikrostruktury při zvětšení 100×. Červíčkovitý grafit je v podstatě varianta grafitu nacházející se mezi lupínkovým a kuličkovým grafitem. Jedná se v podstatě o prostorově různě tvarované útvary zakončené zaoblením. Základní podmínkou pro výrobu litiny s červíčkovým grafitem je eutektické složení litiny a nízký obsah síry cca 0,02 hm. %. Při výrobě se používá takový způsob modifikování, který zaručí neúplnou sferoidizaci grafitu, resp. je vyloučení ve tvaru červíčků. Využívá se čtyř druhů modifikátorů zaručující tento proces, [8]:

1. Modifikování hořčíkem – obsah hořčíku musí být menší než u tvárné litiny a musí být volen pro konkrétní obsah kyslíku a uhlíku. Tato volba je v reálných podmínkách velmi problematická.
2. Modifikování kombinací globurizačních a antigloburizačních prvků – při této variantě modifikování se využívá kombinace Mg a Ti. Výhodou této kombinace je větší interval optimálního působení oproti samotnému hořčíku. Nevýhodou je podmínka, aby vratný materiál obsahoval maximálně 0,1 hm. % Ti.
3. Modifikování lantanoidy – jedná se o koncentráty získané z úpravy rudy s obsahem přibližně 50 % Ce a 20 % La. Tímto způsobem se dosahuje ještě většího intervalu optimálního působení na červíčkový tvar grafitu. Nevýhodou při mírném předávkování je vznik cementitu v základní matrici.

4. Modifikování Mg a lantanoidy – při tomto modifikování se využívá předností jednotlivých prvků, [8].

Na obr. 2-11 je uveden detail červíkovitého grafitu a mikrostruktura litiny s červíkovitým grafitem a feritickou maticí



Obr. 2-11 Tvar červíkovitého grafitu a struktura litiny s červíkovitým grafitem a feritickou maticí, **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

Litina s červíkovitým grafitem má své místo při výrobě tvarově náročných odlitků, které jsou více namáhané a nemohou proto být vyrobené pouze z litiny s lupínkovým grafitem. Omezujícím faktorem, proč se litina s červíkovitým grafitem nerozšiřuje předpokládaným tempem, je náročnost na čistotu surovin a technologických postupů. Tyto omezující faktory mají asi větší význam než nárůst mechanických vlastností. Litina s červíkovým grafitem má velmi dobrou tepelnou vodivost. Hlavní oblastí, kde se litina s červíkovitým grafitem využívá, je automobilový průmysl. Používá se na odlitky hlav válců a ventilových pouzder, [8].

2.4.4 Litina s lupínkovým grafitem

Litina s lupínkovým grafitem byla dříve označována jako šedá litina. Pro konstrukční účely se používá podeutektického složení. Dříve používaná norma ČSN označovala tuto litinu ČSN 42 24XX, kde poslední dvojčíslí udává minimální pevnost v tahu v $\text{kp}\cdot\text{mm}^{-2}$, dnes je jednotkou pevnosti Pa nebo MPa. Pak přepočet na MPa je $\text{kp}\cdot\text{mm}^{-2}\cdot 9,81$. V současné době se označování jednotlivých typů grafitických litin provádí dle norem Evropské unie. Způsob značení se řídí normou ČSN EN 1560. Chemické složení této litiny bývá 2,8 až 3,6 % C, 1,4 až 2,8 % Si, 0,5 až 1,0 % Mn, 0,2 až 0,6 % P a maximálně 15 % S, [4]. Chemické složení má na krystalizaci litiny velký vliv. Měníme-li složení litiny, můžeme za jinak stejných podmínek dosáhnout toho, že odlitky budou mít různou strukturu a jiné mechanicko-fyzikální vlastnosti, [8]. Většina


prvků přítomných v litině s lupínkovým grafitem může být klasifikována podle jejich vlivu na mikrostrukturu. Tyto zahrnují:

1. Primární prvky (C, S, Mn, P, Si);
2. Legující prvky (Cu, Ni, Mo);
3. Prvky zbytkové a pro určité účely, se speciálním záměrem (As, Bi, Pb, Sb, atd.);
4. Perlito – a karbidotvorné prvky (As, B, Cr, Sn, V);
5. Plyny (H, N, O).

Výsledná struktura základní kovové hmoty litiny je během ochlazování, při průchodu kritickou teplotní oblastí ovlivněna způsobem transformace austenitu. V závislosti na druhu litiny může mít buď zcela feritickou strukturu, směs feritu a perlitu nebo zcela perlitickou strukturu. Ostatní struktury, například martenzitickou, austenitickou a další, lze získat tepelným zpracováním. Požadované struktury v litém stavu lze docílit řízenou transformací austenitu, a to především volbou chemického složení, [10].

Jak uvedeno, má na krystalizaci a změnu struktury rozhodující vliv chemické složení litiny. To se pohybuje ve velmi širokém rozmezí a řídí se účelem použití. Mění-li se složení litiny, je možno za jinak stejných podmínek získat různou strukturu odlitku. Vliv jednotlivých prvků na grafitizaci vyjadřuje následující řada, [10], viz obr. 2-12.

+ Al, C, Si, Ti, Ni, Cu, P, Co, Zr, Nb, W, Mn, Mo, S, Cr, V, Te, Mg, Ce, B -



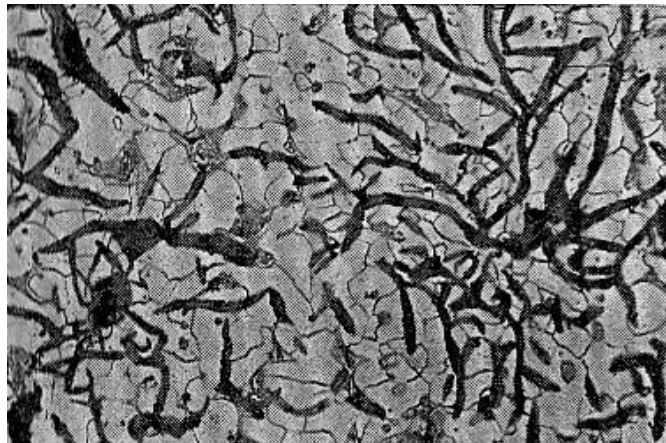
Obr. 2-12 Řada podporujících a brzdících prvků, [10]

Vedle základní kovové hmoty, má na kvalitu a vlastnosti litiny výrazný vliv i grafit. Lupínkový grafit vytváří v základní kovové hmotě litiny vrubové účinky (vruby), které přispívají k poklesu pevnostních hodnot matrice litiny. Současně je materiálově rozdílný od strukturních součástí základní kovové hmoty. To je též příčinou, proč se struktura litiny posuzuje dvojím způsobem, z hlediska *základní kovové hmoty a tvaru, velikosti a rozložení grafitu*.

Struktura základní hmoty tepelně nezpracované litiny s lupínkovým grafitem může být:

feritická – je-li chladnutí pomalé, anebo je-li dostatečně vysoký obsah grafitizačních přísad. Litiny tohoto druhu jsou velmi měkké a málo pevné a jako konstrukčních materiálů se jich nepoužívá. Veškerý uhlík je vyloučen jako grafit, jeho tvar je velmi

hrubý a počet lupínků velký, [10]. Na obr. 2-13 je struktura feritické litiny s kuličkovým grafitem.



Obr. 2-13 Struktura feritické litiny s kuličkovým grafitem, [10]

perlitická – je-li obsah grafitizačních přísad v dokonalém souladu s rychlostí chladnutí. Je to velmi hodnotný konstrukční materiál a převážná část odlitku se vyrábí z perlitické litiny s lupínkovým grafitem. Snižováním množství grafitizačních přísad a obsahu uhlíku se zvyšuje pevnost litiny, neboť klesá hrubost a množství grafitu, případně se zjemňuje perlit. Příliš malé množství grafitizačních přísad, ale i zvýšená rychlost ochlazování, může způsobit, že grafitizace zcela neproběhne, ve struktuře se objeví volný cementit a litina je tvrdá a špatně obrobitelná. Taktéž její mechanické vlastnosti klesají, [10]. Na obr. 2-14 je perlitická struktura litiny s lupínkovým grafitem.



Obr. 2-14 Struktura perlitické litiny s lupínkovým grafitem, [10]

feriticko-perlitická – jsou-li pro danou rychlost chladnutí odlitku grafitizační prvku v přebytku, vytvoří se litina s lupínkovým grafitem, ve které jsou většinou grafitové lupínky uloženy ve feritu, a zbytek je vyplněn perlitem. Ve srovnání s perlitickou litinou je feriticko-perlitická litina měkčí, méně pevná, a proto jako konstrukční materiál méně

vhodná. Vzniku feriticko-perlitické základní hmotě nelze, bez určitých opatření zcela zabránit, a to především v silnějších průřezích odlitku, u kterých jsou větší rozdíly v tloušťce jednotlivých stěn. Přítomnost feritu ve struktuře je žádoucí tehdy, má-li svou tvárností zmenšovat pnutí, například mezi teplejšími a studenějšími částmi odlitku (ocelářské kokily, válce) a snižovat tak nebezpečí praskání, [10]. Na obr. 2-15 je feriticko-perlitická struktura litiny s lupínkovým grafitem.



Obr. 2-15 Feriticko-perlitická struktura litiny s lupínkovým grafitem, [10]

2.4.4.1 Krystalizace litiny s lupínkovým grafitem

Pod pojmem krystalizace litiny rozumíme v podstatě vznik fází, které vznikají z taveniny, která při ochlazování dosáhne teploty likvidu. Krystalizace končí, dosáhne-li tavenina eutektické teploty $T_{E1,1}$, [12].

Mechanismus, který se děje při teplotách nižších (nehledě ke krystalizaci steaditu) tj. myšleno při eutektoidní teplotě, nenazýváme již krystalizací, ale eutektoidní přeměnou austenitu. Výsledkem všech probíhajících přeměn v litině je struktura litiny tvořená grafitem a základní kovovou hmotou, [12].

Krystalizace podeutektické litiny s lupínkovým grafitem

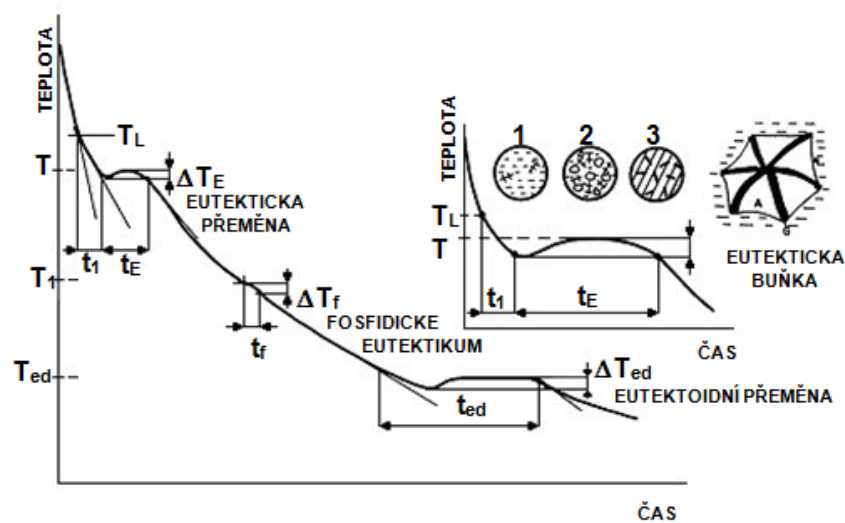
Postup tuhnutí, resp. krystalizace podeutektických LLG je možno rozdělit do dvou etap:

1. Primární krystalizaci – tj. 1. etapa krystalizace;
2. Eutektickou krystalizaci (přeměnu) – tj. 2. etapa krystalizace.

1. etapa krystalizace: vytváří se na krystalizačních zárodcích dendrity austenitu, které rostou až do počátku druhé etapy krystalizace (kdy začíná krystalizovat grafitické eutektikum).

2. etapa krystalizace: krystalizuje grafitické eutektikum, kdy se vytváří a rostou eutektické buňky, které jsou mimo jiné též ovlivňovány rychlostí chladnutí taveniny.

Krystalizace začíná na příslušné větvi likvidu, již zmíněnou tvorbou primárních dendritů (prostorových, resp. rozvětvených krystalů) austenitu, přímo z taveniny. Dendrity rostou během krystalizace na úkor taveniny, která se současně obohacuje uhlíkem. Jakmile uhlík v ní dosáhne eutektické koncentrace, počne tavenina tuhnout jako grafitické eutektikum. Při eutektické krystalizaci je vedoucí fází grafit. Jeho zárodky se mohou tvořit přímo z taveniny, nebo na povrchu již přítomných krystalů austenitu. Grafit roste z jednotlivých zárodků, ochuzuje okolní taveninu o uhlík a vytváří tak podmínky pro další krystalizaci austenitu. Vzniklý grafit spolu s austenitem tvoří eutektické buňky, [12]. Na obr. 2-16 je uveden postup krystalizace litiny s lupínkovým grafitem.



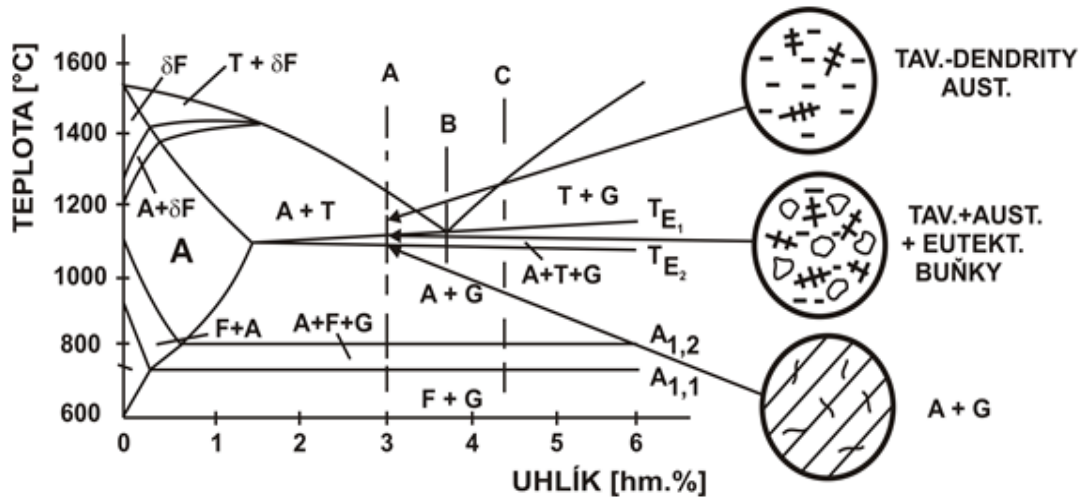
T_L - teplota počátku primární krystalizace; T_E - teplota eutektické přeměny;
 ΔT_E - interval teplot eutektické přeměny; T_f - teplota počátku krystalizace fosfidového eutektika; ΔT_f - interval teplot krystalizace fosfidového eutektika;
 T_{ed} - teplota eutektoidní přeměny; ΔT_{ed} - interval teplot eutektoidní přeměny;
 t_1 - čas primární krystalizace; t_E - čas eutektické přeměny; t_r - čas krystalizace fosfidického eutektika; t_{ed} - čas eutektoidní přeměny

Obr. 2-16 Křivka tuhnutí a chladnutí litiny s lupínkovým grafitem, [12]

Krystalizace eutektické a nadeutektické litiny s lupínkovým grafitem

Průběh krystalizace litin s eutektickým složením se proti popsanému mechanismu příliš neliší, avšak začíná v okamžiku, kdy tavenina docílí eutektické teploty. Docílením této teploty se začnou v tavenině vytvářet eutektické buňky. Další průběh krystalizace je stejný jako v předchozím případě, [12]. Znázornění eutektických litin je čarou B na obr. 2-17.

U nadeutektických litin, jak je naznačeno na obr. 2-17 čára C, začíná opět krystalizace dosažením teploty příslušné větve likvidu vyloučením uhlíku z taveniny. Tavenina je zde velmi bohatá na uhlík. Uhlík vylučovaný z takto přesycené taveniny má formu grafitu ve tvaru hrubých lupínků. Dosáhne-li se eutektické teploty, nastává krystalizace grafitu opět v rámci vzniku eutektických buněk, [12].



Obr. 2-17 Pseudobinární rovnovážný diagram Fe-C-Si (2 hmot. %), [12]

2.4.4.2 Vliv prvků a hodnotící kritéria litin

Uhlík – spolu s křemíkem má největší vliv na strukturu a vlastnosti litin. Samotný uhlík má malý vliv na mechanické vlastnosti. Uhlík však podporuje grafitizaci. Větší množství uhlíku, vyloučeného ve formě grafitu zlepšuje útlumové vlastnosti. Litina při vylučování grafitu zvětšuje svůj objem, tím se vyrovnává důsledek stahování, ke kterému dochází při krystalizaci austenitu. Čím více se vyloučí uhlíku ve tvaru grafitu, tím je celkové stažení, obzvláště LLG menší. To je důsledek, proč tenkostěnné odlitky z LG se téměř nenálitkují. Čím je však vyšší obsah uhlíku v litině, tím se vyloučí hrubší grafit, [12].

Křemík – snižuje teplotu tání litiny a zvyšuje její tekutost. Současně zvětšuje sklon k tvorbě bublin a pórů. Přítomnost Si snižuje koncentraci uhlíku v eutektiku i eutektoidu. Např. při 2 hm. % Si v litině je obsah uhlíku v perlitu asi 0,65 hm. % a v ledeburitu 3,7 hm. %. Nejen přítomnost křemíku, ale také fosforu v litině posouvá eutektický bod (4,26 hm. % C) doleva tak, že v těchto případech má eutektické složení obsah nižší, než je 4,26 hm. % C. Proto se při hodnocení litin musí brát v úvahu současný vliv těchto prvků a pak sledujeme tzv. uhlíkový ekvivalent (ekvivalentní uhlík) C_E . Křemík podporuje průběh fázových přeměn v souladu se stabilní rovnováhou

soustavy Fe-C. To prakticky znamená, že pro danou tloušťku odlitku je struktura litiny závislá na obsahu C a Si, [12].

Mangan – má u litin opačný vliv než křemík, neboť je prvkem karbidotvorným, stabilizuje cementit. Přítomnost Mn je důležitá pro odsíření litiny. Proto jeho obsah v litině bývá 0,4 až 0,8 hm. %. Přebytek manganu přispívá k metastabilní rovnováze a zvyšuje tvrdost a křehkost litiny, [12].

Síra – působí v litině podobně jako Mn, brzdí rozpad cementitu. Litiny s vyšším obsahem S mají čím větší tvrdost, tím horší mechanické vlastnosti. Síra zvětšuje smrštění odlitku a zmenšuje také homogenitu odlitku. Nepříznivý vliv síry lze kompenzovat zvýšením obsahu manganu, s nímž síra tvoří sulfid manganatý nebo zvětšením obsahu Si (platí, že 0,1 hm. % S lze eliminovat přísadou asi 0,5 hm. % Si). U litin kvalitních vlastností nemá síra přesáhnout 0,1 hm. %, avšak u litin s kuličkovým grafitem je nutný podstatně nižší obsah síry cca 0,02 hm. %, [12].

Fosfor – zvyšuje tekutost litiny a interval krystalizace a stabilizuje cementit. Proto se u litiny pro umělecké účely používá záměrně vyšší obsah fosforu. Vedle tvorby již zmíněného steaditu, zhoršuje obrobiteľnosť a odolnosť litiny proti dynamickému namáhání, proto je příznivý jeho obsah v litině pod 0,3 hm. %. Odlévá se však i fosforatá litina, která obsahuje cca 1 hm. % fosforu, vyniká dobrými třecími vlastnostmi a používá se pro výrobu brzdových špalíků, [12].

Hodnotící kritéria litin

Uhlíkový ekvivalent – lze vypočítat:

$$C_E = C + 0,3 \cdot (\% Si + \% P) \quad (3)$$

kde značí: C, Si, P – obsah prvků v litině v hm. %.

Je-li C_E roven 4,3 (tj. cca eutektickému složení uhlíku), lze litinu považovat za *eutektickou*,

je-li nižší, pak se jedná o litinu *podeutektickou* a je-li vyšší, tak je to litina *nadeutektická*.

Stupeň eutektičnosti – litina se jím posuzuje mnohem častěji:

$$S_C = \frac{\% C}{4,23 - 0,27 \% P - 0,297 \% Si} \quad (4)$$

Je-li: $S_C = 1$, litina je eutektická;

$S_C < 1$, litina je podeutektická;

$S_C > 1$, litina je nadeutektická.

Poměr uhlíku a křemíku

$$\frac{C}{Si} = 1,7 \text{ až } 1,8 \quad (5)$$

hodnotí správné množství uhlíku a křemíku v litině.

Grafitizační koeficient – hodnotí grafitizační schopnost litiny:

$$K = \frac{4}{3} \cdot Si \cdot \left(1 - \frac{5}{3C+Si}\right) \quad (6)$$

Je-li $K = 0,65$, je pro zkušební tyče $\varnothing 30$ mm předpoklad, že bude mít strukturu bílé litiny. Pro přechodovou (makovou) litinu je K od 0,65 do 0,85. Pro litinu s perlitickou matricí je K od 0,85 do 2,05. Je-li K 2,05 až 3,1, pak lze předpokládat vznik perliticko-feritické základní hmoty. Pro čistě feritickou matricí se předpokládá K 3,1 a více.

Na základě chemického složení litin lze stanovit i mechanické vlastnosti, to především platí pro LLG.

Výpočet pevnosti v tahu a tvrdosti podle Collauda:

$$R_m = (100,6 - 80 \cdot S_c) \cdot 10 [MPa] \quad (7)$$

$$Hb = 465 - 270 \cdot S_c \quad (8)$$

Výpočet modulu pružnosti litiny s lupínkovým grafitem:

$$E = \frac{R_m}{HB} \cdot 10^5 [MPa] \quad (9)$$

Všechny uvedené vztahy jsou stanoveny na základě zkoušek litinových tyčí, nejčastěji $\varnothing 30$ mm, [12].

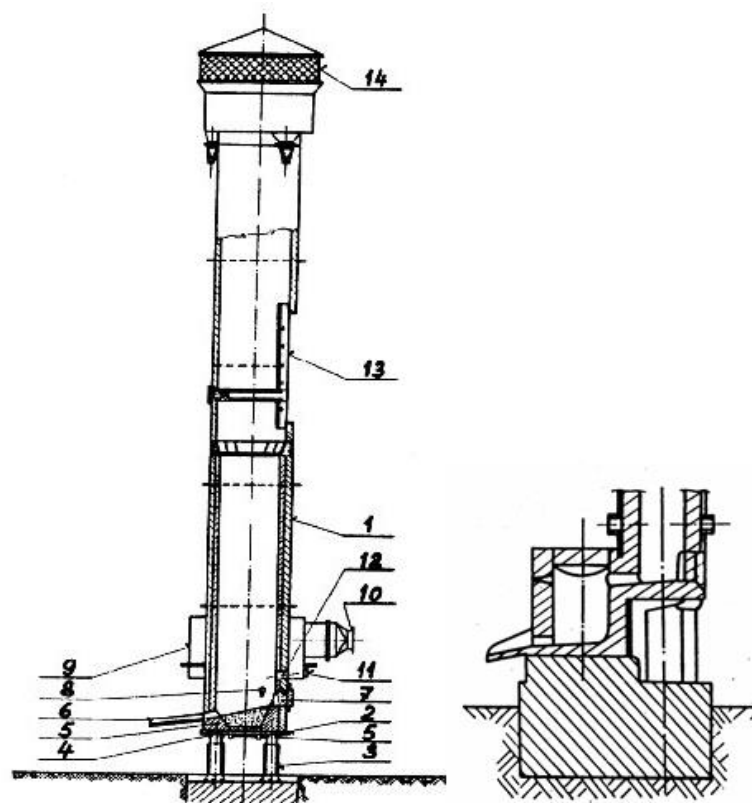
2.4.4.3 Tavení litiny s lupínkovým grafitem

Tavící zařízení jsou velmi důležitá zařízení, pomocí kterých se připravuje kov, resp. tavenina k odlévání. Je důležité, aby tavící proces nezhoršoval její kvalitu. Naopak se předpokládá, že probíhající reakce umožňují i metalurgické zásahy, [12].

Pro výrobu, tj. tavení litiny byla vyvinuta a stále se používá řada různých tavících agregátů. Tavící jednotky různých velikostí a rozměrů, různých energetických zdrojů a různých technologií a výrobních procesů slouží k přípravě taveniny pro výrobu odlitku z litiny s lupínkovým grafitem. Nejstarší a stále nejrozšířenější jsou **kupolové**

pece, dále pak *elektrické indukční pece*, podstatně méně rozšířené jsou *rotační bubnové pece* a *elektrické obloukové pece*, [10].

Kuplovna – kuplovna je tavicí zařízení, které slouží k výrobě taveniny, nejčastěji pro výrobu litiny s lupínkovým grafitem. Je to šachtová pec kruhového průřezu stojící na čtyřech sloupech. Velikost kuplovny se hodnotí podle průměru šachty v oblasti dmyšek, obvykle je od 0,7 do 1,4 m. Výška bývá 4,5 až 7,5 m u velkých kuploven. Povrch je z ocelového pláště. Kolem je přívod vzduchu pomocí větrovodu. Součástí kuplovny je vsázkový otvor, žlábkový pro taveninu a strusku, dvířka pro manipulaci a vyprazdňování kuplovny a dalších částí. Z tepelného hlediska kuplovna funguje jako protiproudý výměník tepla. Dnes existují kuplovny různé konstrukce, které lze rozdělit podle různých kritérií, např. dle provozu (s jednodenním provozem nebo s kampaňovým provozem), podle předpecí (s předpecím; bez předpecí), předpecí může být vyhřívané nebo bez vyhřívání, [12]. Na obr. 2-18 je uvedeno schéma řezu kuplovnou bez předpecí.



Obr. 2-18 Schéma kuplovny a detail jejího předpecí, [12]

- 1. – válcový plechový plášť; 2. – základová deska kuplovny; 3. – nosné sloupy; 4 – dvířka kuplovny; 5. – petlice na dvířkách; 6. – odpichový žlábek; 7. – pracovní otvor pece s dvířky;
- 8. – otvor pro vypouštění strusky; 9. – okružní větrovod; 10. – potrubí; 11. – nástavky;
- 12. – dmyšní trubice; 13. – kychtový otvor; 14. – komín kuplovny

Její **výhoda** je vysoká měrná výrobnost a nízká spotřeba paliva. Konstrukce kuplovný i provozní obsluha je poměrně jednoduchá. Přitom můžeme získat litinu o teplotě 1500 °C. Další výhodou je možnost změny vložení vsázky v průběhu tavby, což je důležité zejména při výrobě různých druhů litin s lupínkovým grafitem, [12].

Tavení v kuplovně má i své **nevýhody**, k nim se řadí kolísání chemického složení litiny během tavby (obtížně se taví litiny s nízkým obsahem uhlíku a nemožnost udržení teploty taveniny bez použití speciálního zařízení – např. indukční předpecí). Přímý styk taveniny s palivem a kupolními plyny jsou příčinou nežádoucích příměsí v litině a zdrojem zvýšeného obsahu nekovových vměstků a plynů, [12].

Pracovní prostor kuplovný se skládá z těchto důležitých částí:

Nístěj je spodní část pece až do úrovně dmyšen. Její výška je 0,50 až 0,80 m. Nístěj je při tavení uzavřená spodními dvířky, nad nimiž je vrstva žáruvzdorné výdusky se sklonem k odpichovému otvoru, [12].

Šachta je střední část kuplovný od dmyšních trubic až po sazebnu. U starších kuploven je šachta válcového tvaru, u modernějších se směrem k nístěji rozšiřuje. V horní části šachty dochází k přehřívání vsázky, ve spodní k tavení a přehřívání taveniny litiny, [12].

Dmyšní trubice se volí k průměru kuplovný k poměru 1 : 6 až 1 : 10. Obvyklý tvar je obdélníkový. U malých kuploven se volí 4 až 6, u větších 8 až 10 trubic po obvodě. Pro větší intenzifikaci tavení se volí ve dvou řadách. Množství dmychaného větru do kuplovný vychází z rozměrů šachty a potřebného tlaku větru, [12].

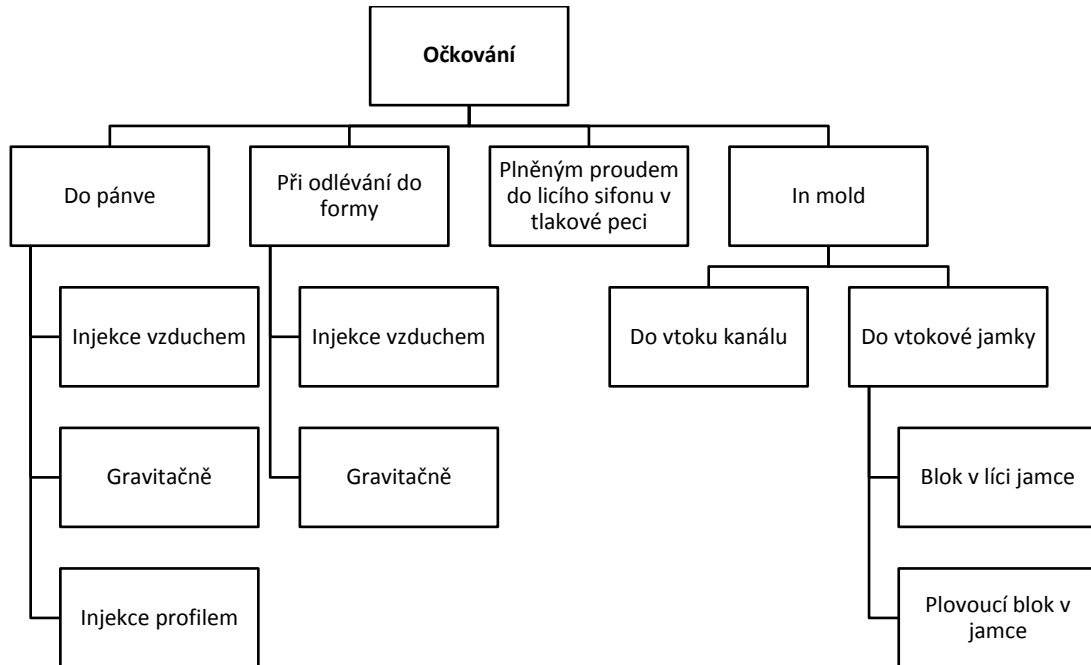
V slévárnách se často vyžaduje větší množství taveniny, proto se používá předpecí kuplovný, sloužící jako zásobník taveniny uložený mimo pracovní část kuplovný viz obr. 2-17 vpravo. **Výhody kuploven s předpecím jsou:** vyrovnání chemického složení litiny, menší nauhličení a nasíření litiny, úspora plnicího koksu, atd. **Nevýhodou kuploven s předpecím jsou:** pokles teploty v nevyhříváném předpecí, větší spotřeba žáruvzdorných materiálů, vyšší investiční náklady a náklady na údržbu, [12].

2.4.4.4 Očkování litiny s lupínkovým grafitem

Očkování je obecně technologická operace, při které se do tekutého kovu vnáší malé množství vhodně zvolené substance (očkovadla), a tím se zvýší množství krystalizačních zárodků určité fáze. Grafitizační očkování litiny s lupínkovým grafitem umožňuje zvýšit počet krystalizačních zárodků grafitu. Tímto způsobem se zvýší mechanické vlastnosti litiny, protože se sníží vliv grafitu jako „vrubů“ v matici.

Očkováním dostaneme větší množství menších lupínků. Je jedním z nejdůležitějších procesů při výrobě jakostních druhů litiny s lupínkovým grafitem, **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**, [10].

Na obr. 2-19 je základní rozdělení očkování litiny s lupínkovým grafitem.



Obr. 2-19 Základní rozdělení očkování litiny s lupínkovým grafitem

Očkování na žlábek tavící pece při odpichu – je nejjednodušší metodou dávkování zrnitých očkovadel. Má výhodu rovnoměrného rozdělení očkovadla v tavenině, avšak též nevýhodu v prodloužení doby mezi očkováním prvního kovu z odpichu a odlévání forem (při napouštění a sběru taveniny do velkých lících pánví, které mnohdy trvá i desítky minut, dochází ke značnému odeznění očkovacího efektu a prvky v očkovadle se v litině prostě rozpustí), [10].

Očkování do pánve – je značně rozšířené, i když není snadné dodržet zásadu rovnoměrného přidělování očkovadla do proudu kovu. Nejpříznivější je zahájit přidávání očkovadla do pánve asi do ¼ naplněné a přidávat rovnoměrně očkovadlo po dobu 50 až 60 % doby plnění pánve. Jednorázové vhození očkovadla do pánve nedává dobré výsledky. Obecně výrobci očkovadel razí zásadu, že se očkovadlo musí stále přidávat do litiny a nikoliv přelévát očkovadlo litinou. Při nesprávných podmínkách přidávání se může očkovadlo spékat a slepovat, což může mít za následek jeho zestruskování, [10].

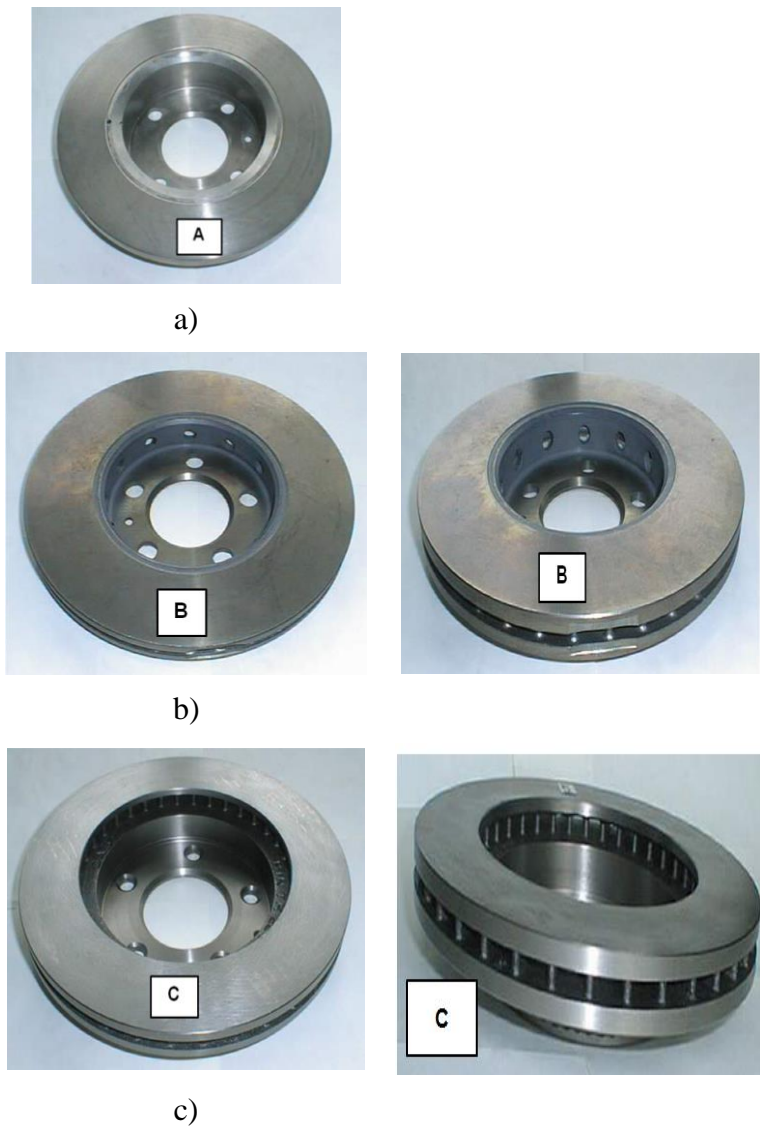
Očkování In-mold – přímé očkování do formy, nebo in-mold proces ukládá očkovadlo přímo do vtokového systému, a to buďto přímo do licí jamky, nebo do vtokového kanálu (kůlu), nebo do vhodně upravených zásobníků v rozváděcích kanálech (ne do zářezu). Očkovadla pro in-mold metody jsou buď ve formě jemné drtě, jemných granulí, peletovaných granulí, nebo předlitých nábojů, nebo bloků. Důležitým faktorem musí být rozpustnost těchto očkovaadel v tavenině, [10].

Očkování v licí jamce – Zakotvený blok – je blok očkovaadla, který je vhodně vytvarován, ukotven do spodku licí jamky v místě, kam dopadá proud taveniny při odlévání, zde je omýván taveninou a rozpouštěn. Pevná přepážka v licí jamce zachycuje strusku a brání jejímu postupu do vtokového systému. U větších forem pro těžší odlitky je možno použít i různé upravené zátky, které umožňují vpuštění naočkované taveniny až po dosažení horní hranice licí jamky a znemožňují tak nepravidelnosti při počátku odlévání. Po uvolnění zátky proudí naočkovaná tavenina do vtokového kanálu (kůlu) a dále do formy. **Plavoucí blok** – je tvořeno válcovým, nebo kubickým blokem volně umístěným do licí jamky těsně před odléváním. Částečné postupné rozpouštění očkovaadla zajišťuje efektivní pozdržené grafitizační očkování litiny. Blok musí mít takové rozměry, že i po částečném rozpuštění nesmí projít ústím vtokového kanálu (kůlu) a dále pak do celého vtokového systému. Licí jamka je taktéž opatřena pevnou přepážkou ze stejných důvodů, jak je uvedeno v předešlém případě, [10].

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

Úkolem této části bakalářské práce bylo posouzení tří typů brzdových kotoučů osobních automobilů, vyrobených z legované litiny s lupínkovým grafitem. Cílem experimentálního řešení bylo metalografické hodnocení struktury kotoučů a výpočty hodnot vlastností hodnotících kritérií.

Kotouče byly vyráběny odléváním do pískových bentonitových forem. Tavenina litiny byla připravena v indukční středofrekvenční peci. Výrobce kotoučů záměrně nezveřejňuje technologické podrobnosti jejich výroby. Sledované kotouče jsou na obr. 3-1. Na obr. 3-1a) je uveden neodvětrávaný kotouč a na obr. 3-1b) a 3-1c) jsou kotouče odvětrávané.



Obr. 3-1 Pohled na sledované brzdové kotouče

Chemické složení litinových kotoučů bylo sledováno na spektrometru TASMAN Q4. Při měření chemického složení je třeba natavit vzorek elektrickým výbojem mezi elektrodami a pak v tomto místě sledovat chemické složení. Chemické složení sledovaných brzdových kotoučů je uvedeno v tabulce 3.1.

Tabulka 3.1 Chemické složení brzdových kotoučů

Kotouč	Chemické složení grafitické litiny [hmot. %]								C _E
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	
A	3,23	0,52	1,82	0,018	0,063	0,04	0,03	0,10	3,8
B	3,37	0,75	1,62	0,019	0,090	0,09	0,02	0,24	3,9
C	3,38	0,62	1,75	0,024	0,035	0,08	0,02	0,03	3,9

3.1 Hodnocení kvality litiny s lupínkovým grafitem podle hodnotících kritérií

Podle rovnice (3) byl vypočítán pro všechny brzdové kotouče z litiny s lupínkovým grafitem uhlíkový ekvivalent, jehož hodnoty jsou uvedeny v tab. 3.1.

Na základě chemického složení jednotlivých kotoučů byly stanoveny hodnoty hodnotících kritérií podle rovnic (4), (5), (6), (7), (8) a (9). Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.2.

Tabulka 3.2 Hodnoty hodnotících kritérií litin s lupínkovým grafitem brzdových kotoučů

Kotouč	<i>Hodnoty určené podle vybraných hodnotících kritérií</i>					
	C/Si [1]	Stupeň eutektičnosti Sc	Grafitizační koeficient K	Mez pevnosti v tahu R _m [MPa]	Tvrdość podle Brinella HBW	Youngův modul pružnosti v tahu [MPa]
A	1,8	0,87	1,4	305	230	132 608
B	2,1	0,90	1,3	286	222	128 828
C	1,9	0,91	1,4	276	219	126 027

Na základě hodnot uvedených v tabulce 3.2 je patrné, že litina s lupínkovým grafitem jednotlivých kotoučů je rozdílná. Jednotlivé kotouče lze charakterizovat následovně:

Brzdový kotouč A (neodvětrávaný)

Jeho chemické složení, jak je zjevné z tabulky 3.1, kde obsah uhlíku je 3,23 hm. %. Tento obsah podle hodnoty uhlíku, viz příloha A – dle ČSN EN 1561, odpovídá litině

ČSN EN GJL 250. Také obsah křemíku 1,82 hm. % odpovídá litině ČSN EN GJL 250. Obsah manganu činí pouze 0,52 hm. %, což odpovídá litině ČSN EN GJL 150. Obsah fosforu je nízký, činí jen 0,018 hm. %, proti tabelované hodnotě 0,5 hm. %, ČSN EN 1561, viz příloha A. Také hodnota síry je nízká, činí 0,063 hmot. %, v porovnání s hodnotou max. 0,15 hm. % dle ČSN EN 1561, viz příloha A. Dále litina obsahuje 0,04 hm. % chromu, 0,03 hm. % niklu a 0,10 hm. % mědi. Pokud toto množství tří posledních prvků porovnáme s doporučením asociace SAE (**Society of Automotive Engineers**), které je definováno dle směrnice SAE J341, pak je nutno konstatovat, že směrnice doporučuje vyšší obsah těchto prvků. To je 0,09 hm. % chromu, 0,084 hm. % niklu.

Podle vzorce hodnotícího kritéria (7) byla vypočítána hodnota pro mez pevnosti v tahu, která vychází 305 MPa, tato hodnota odpovídá litině ČSN EN GJL 300. Dále byl také vypočítán stupeň eutektičnosti podle vzorce (4), který je 0,87 a z toho vyplývá, že litina tohoto brzdového kotouče je podeutektická (hodnotící kritérium $S_C < 1$). Dále bylo vypočítáno podle vzorce (6) další hodnotící kritérium – grafítizační koeficient K, jehož hodnota je 1,4. Z tohoto čísla je zřejmé, že struktura tohoto brzdného kotouče bude perlitická. Kritérium K pro perlitickou strukturu je v rozmezí 0,85 až 2,05. Dalším hodnotícím kritériem je Youngův modul pružnosti v tahu, který byl vypočítán podle vzorce (9), jeho hodnota je 132 600 MPa. Dle této hodnoty je možno při porovnání s ČSN EN 1561, viz příloha A, usoudit, že odpovídá litině s lupínkovým grafitem GJL 300. Hodnota tvrdosti této litiny byla vypočítána dle vzorce (8), která je 230 HB. Tato hodnota je o 10 HB nižší než udává ČSN EN 1561 pro GJL 250.

Brzdový kotouč B (s odvětráváním)

Chemické složení tohoto brzdného kotouče je uvedeno v tabulce 3-1. Z této tabulky je zřejmé, že obsah uhlíku brzdného kotouče B je 3,37 hm. %. Z přílohy A je patrné, že litina s tímto obsahem uhlíku dle ČSN EN 1561 odpovídá litině ČSN EN GJL 200. Také obsah manganu 0,75 hm. % odpovídá litině ČSN EN GJL 200. Obsah křemíku činí pouze 1,62 hm. %, což odpovídá litině ČSN EN GJL 300. Obsah fosforu je také velmi nízký, pouze 0,019 hm. % oproti hodnotě uvedené v tabulce podle ČSN EN 1561, viz příloha A, která činí 0,3 hm. %, taktéž obsah síry v této litině je velmi nízký, pouze 0,09 hm. %, oproti hodnotě max. 0,15 hm. % podle ČSN EN 1561, viz příloha A. Tato litina obsahuje ještě další tři prvky: 0,09 hm. % chromu, 0,02 hm. % niklu a 0,24 hm. % mědi. Pokud toto množství tří posledních prvků porovnáme s doporučením asociace

SAE, které je definováno dle směrnice SAE J341, pak je nutno konstatovat, že směrnice doporučuje vyšší obsah niklu 0,084 hm. %. Tato směrnice doporučuje obsah chromu 0,09 hm. %. Toto množství je shodné s množstvím v této litině.

Pomocí vzorce (7) byla vypočítána hodnota meze pevnosti v tahu, která je pro tento brzdový kotouč 286 MPa, což odpovídá podle ČSN EN 1561 litině GJL 250. Dále byl vypočítán podle vzorce (4), stupeň eutektičnosti, jehož hodnota činí 0,9. Z toho je patrné, že se jedná o litinu podeutektickou, (stupeň eutektičnosti $S_C < 1$). Hodnota grafítizačního koeficientu K , která byla vypočítána podle vzorce (6) činí 1,3. Z této hodnoty je evidentní, že se jedná o litinu se základní kovovou hmotou perlitickou. Hodnotícím kritériem K pro perlitickou kovovou hmotu je v rozmezí 0,85 až 2,05. Dále byla vypočítána ze vztahu (9) hodnota Youngova modulu pružnosti v tahu, která je 128 828 MPa, z ČSN EN 1561, viz příloha A, je patrné, že modul pružnosti v tahu této litiny odpovídá litině ČSN EN GJL 300. Hodnota tvrdosti této litiny byla vypočítána dle vzorce (8), která je 222 HB. Tato hodnota je o 2 HB větší než udává ČSN EN 1561 pro GJL 200.

Brzdový kotouč C (s odvětráváním)

Chemické složení tohoto kotouče je patrné z tabulky 3-1, kde obsah uhlíku je 3,38 hm. %. Tento obsah uhlíku, viz příloha A – dle ČSN EN 1561, odpovídá litině ČSN EN GJL 200. Také obsah křemíku 1,75 hm. % odpovídá litině ČSN EN GJL 200. Obsah manganu činí pouze 0,62 hm. %, což odpovídá litině ČSN EN GJL 200. Sledovaná litina obsahuje velmi nízký obsah fosforu, který činí pouze 0,019 hm. %. Podle ČSN EN 1561, viz příloha A, tento obsah fosforu je max. 0,5 hm. % pro litinu s lupínkovým grafitem GJL 200. Také obsah síry, který činí pouze 0,035 hm. %, v porovnání s hodnotou dle ČSN EN 1561, viz příloha A, je max. 0,15 hm. %. Litina obsahuje ještě další prvky, jedná se o 0,08 hm. % chromu, 0,02 hm. % niklu a 0,03 hm. % mědi. Jak je zřejmé, tato litina obsahuje oproti předchozím litinám velmi nízký obsah hm. % mědi. Pokud toto množství tří posledních prvků srovnáme s doporučením asociace SAE, které je definováno dle směrnice SAE J341, pak je nutno konstatovat, že směrnice doporučuje vyšší obsah těchto prvků. To je 0,09 hm. % chromu a 0,084 hm. % niklu.

Pomocí hodnotícího kritéria (7) byla vypočítána hodnota meze pevnosti v tahu, která je 276 MPa. Tato litina má nejmenší mez pevnosti v tahu z těchto sledovaných brzdových kotoučů. Hodnota 276 MPa odpovídá dle ČSN EN 1561, viz příloha A, litině

ČSN EN GJL 250. Dále byl vypočítán podle vztahu (4) stupeň eutektičnosti S_c , který je 0,91. Podle výsledku je patrné, že se jedná o litinu podeutiktickou, protože je hodnota $S_c < 1$. Dále podle vztahu (6) byl vypočítán grafitizační koeficient K , který je 1,4, z výsledku je zřejmé, že se jedná o litinu se základní kovovou hmotou perlitickou. Hodnota grafitizačního koeficientu K pro perlitickou strukturu se pohybuje v rozmezí 0,85 až 2,05. Modul pružnosti v tahu, který byl vypočítán ze vztahu (9) činí 126 027 MPa, což odpovídá podle ČSN EN 1561, viz příloha A. litině ČSN EN GJL 300. Hodnota tvrdosti této litiny byla vypočítána dle vzorce (8), která je 219 HB. Tato hodnota je o 1 HB nižší, než udává ČSN EN 1561 pro GJL 200.

V příloze B této práce je přehled vlastností litiny GJL 250 dle německých podkladů.

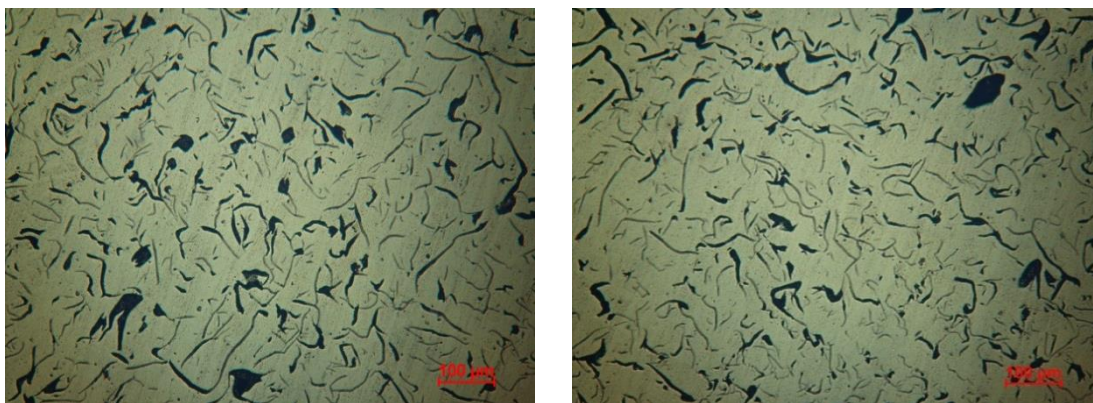
3.2 Metalografické hodnocení litiny s lupínkovým grafitem brzdových kotoučů

Z každého brzdového kotouče, viz obr. 3-1. byl odebrán jeden vzorek pro metalografické pozorování struktury. Tyto vzorky byly k metalografickému pozorování připraveny běžným způsobem (byly zality do dentacrylové hmoty, dále broušeny na brusných kotoučích a leštěny). Pro zvýraznění struktury vzorků (leptadlo) byl použit Nital 3%. Vzorky litiny byly sledovány na světelném mikroskopu jak ve stavu neleptaném, tak v leptaném stavu. Neleptaný stav vzorků je určen pro zjištění tvaru, velikosti a rozložení grafitu. Stavem po leptání se určuje charakter základní kovové hmoty (matrice) litiny.

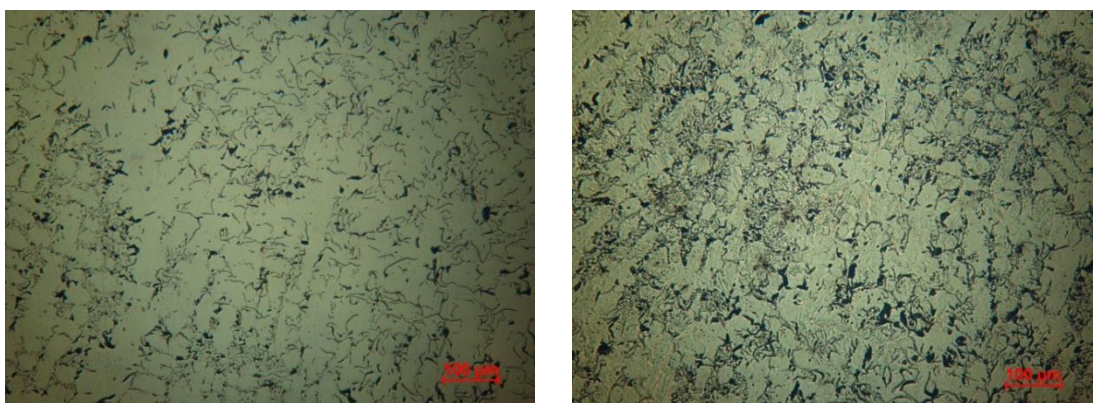
Označení vzorků pro metalografické pozorování je stejné, jako je označení kotoučů.

3.2.1 Hodnocení grafitu litiny brzdových kotoučů

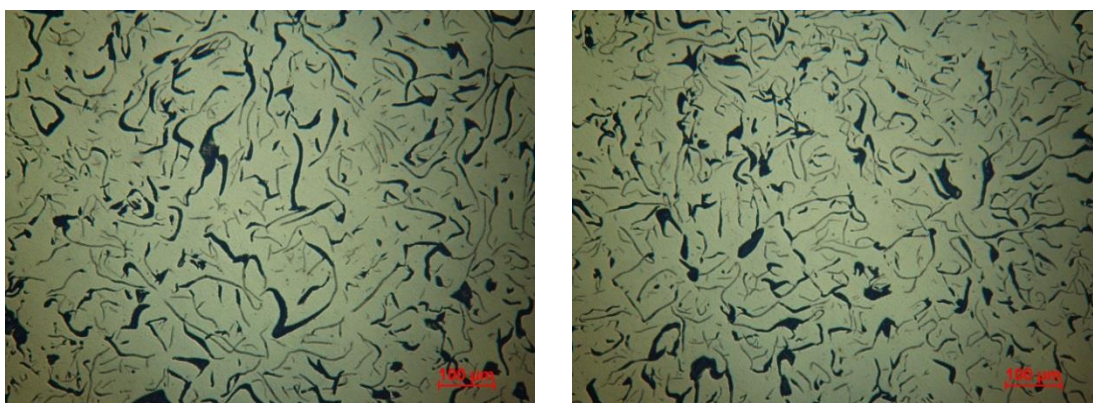
Na obr. 3-2, obr. 3-3 a obr. 3-4 je uveden tvar, velikost a rozložení grafitu brzdových kotoučů A, B, C. Hodnocení grafitu bylo provedeno podle ČSN EN ISO 945-1 a příslušných etalonových řad.



Obr. 3-2 Tvar, velikost a rozložení grafitu litinového brzdového kotouče A (neleptaný stav)



Obr. 3-3 Tvar, velikost a rozložení grafitu litinového brzdového kotouče B (neleptaný stav)



Obr. 3-4 Tvar, velikost a rozložení grafitu litinového brzdového kotouče C (neleptaný stav)

Hodnocení tvaru, rozložení a velikosti grafitu litin brzdových kotoučů

Kotouč A

Z obr. 3-2 je patrné, že grafit (při stonásobném zvětšení) je lupínkový **I**, s rozložením smíšeným, tj. označení **C**. Velikost grafitu je **4** (od 120 do 250 μm). Tvar grafitu podle výše uvedené normy vykazuje označení **I C 4**.

Kotouč B

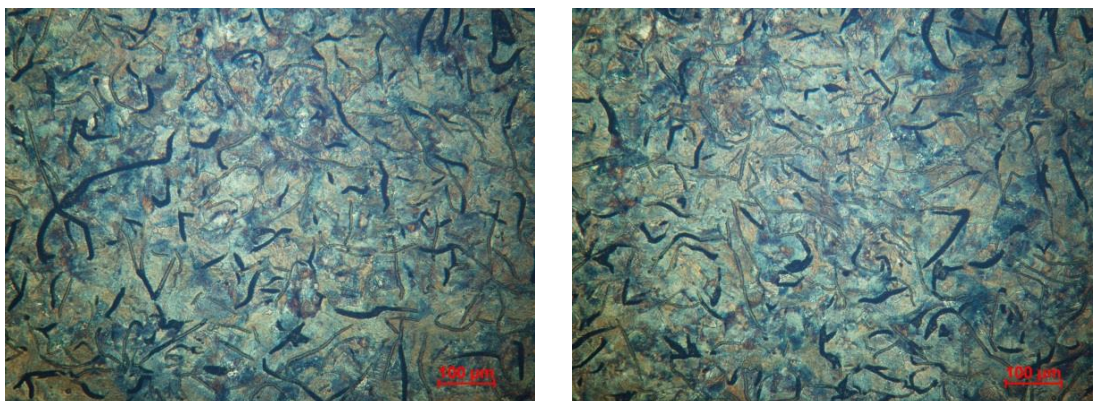
Z obr. 3-3 je patrné, že grafit je lupínkový **I**, s rozložením mezidendritickým neusměrněným a v některých partiích vzorku i mezidendriticky usměrněným, tj. označení **D** až **E**. Velikost grafitu je **6** (nad 30 do 60 μm). Tvar grafitu podle výše uvedené normy vykazuje označení **I D až E 6**.

Kotouč C

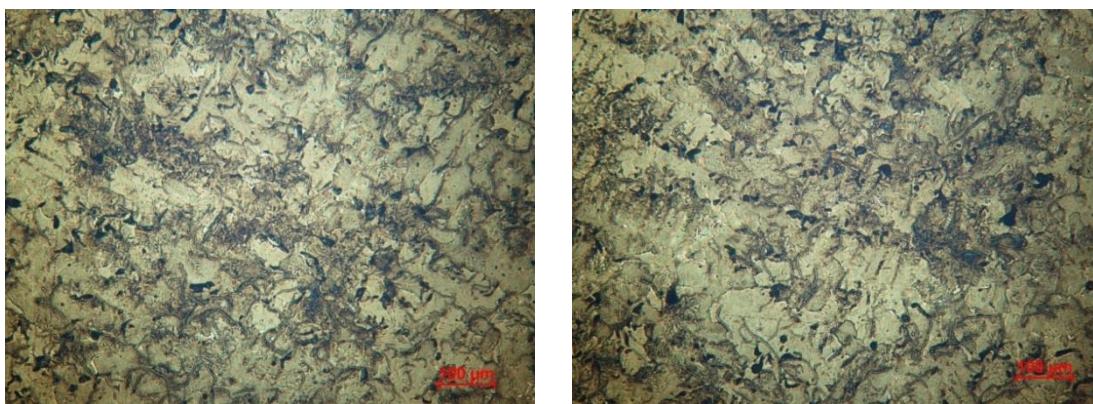
Z obr. 3-4 je patrné, že grafit je lupínkový **I**, s rozložením smíšeným, tj. označení **C**. Velikost grafitu je **3** (nad 250 do 500 μm). Tvar grafitu podle výše uvedené normy vykazuje označení **I C 3**.

3.2.2 Hodnocení strukturních fází litiny brzdových kotoučů

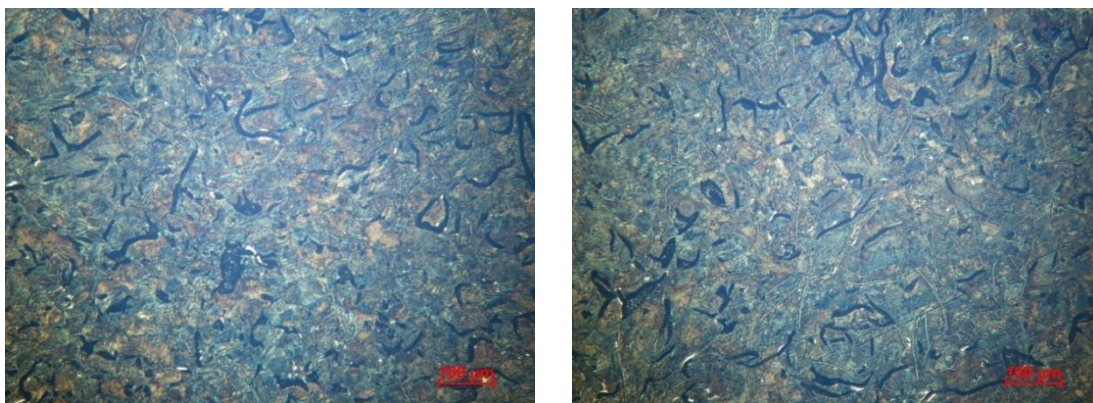
Na obr. 3-5, obr. 3-6 a obr. 3-7 jsou mikrostruktury litin jednotlivých brzdových kotoučů. Hodnocení strukturních fází a součástí struktury litiny bylo též provedeno podle ČSN EN ISO 945-1 a příslušných etalonových řad.



Obr. 3-5 Charakter grafitu a základní kovové hmoty litinového brzdového kotouče A (leptáno – Nital 3%)



Obr. 3-6 Charakter grafitu a základní kovové hmoty litinového brzdového kotouče B (leptáno – Nital 3%)



Obr. 3-7 Charakter grafitu a základní kovové hmoty litinového brzdového kotouče C (leptáno – Nital 3%)

Hodnocení strukturních fází litiny brzdových kotoučů

Kotouč A

Z obr. 3-5 je patrné, že charakter základní kovové hmoty (matrice) litiny perlitický. Tvar perlitu je lamelární, značení je P1. Obsah perlitu je nad 98 %, tj. značení P (obsah feritu je do 2 %, značení je Fe 0). Distribuce perlitu je nad 0,8 do 1,3 μm , tj. Pd 1,0. Obsah cementitu je 0, tj. značení C 0. Částice cementitu nebyly zjištěny. Fosfidové eutektikum díky nízkému obsahu fosforu nebylo zjištěno, ani nebylo identifikováno síťoví fosfidového eutektika. Značení základní kovové hmoty: **P1 – P – Pd 1,0 – C 0.**

Celkové označení litiny brzdového kotouče C je následující:

I C 4 – P1 – P – Pd 1,0 – C 0.

Kotouč B

Je nutno poznamenat, že struktura tohoto kotouče je výrazně odlišná od litiny kotoučů A a C. Poměrně komplikovaný typ litiny signalizuje již poměr C/Si, který činí 2,1. Norma ČSN EN 1561 doporučuje poměr 1,7 až 1,8. Z obr. 3-6 je patrná struktura základní kovové hmoty litiny. Struktura je perliticko-feritická. Vzorek obsahuje oblasti s větším, či menším množstvím feritu. Tvar perlitu je lamelární, značení je P1. Obsah perlitu je nad 85 %, tj. značení P85 (obsah feritu je od 10 do 20 %, značení je Fe 15). Distribuce perlitu je nad 1,3 do 1,6 μm , tj. Pd 1,4. Obsah cementitu je 0, tj. značení C 0. Částice cementitu nebyly zjištěny. Fosfidové eutektikum díky nízkému obsahu fosforu nebylo zjištěno, ani nebylo identifikováno síťoví fosfidového eutektika. Značení základní kovové hmoty: **P1 – P85 – Pd 1,4 – C 0.**

Celkové označení litiny brzdového kotouče C je následující:

I D až E 6 – P1 – P85 – Pd 1,4 – C0.

Kotouč C

Z obr. 3-7 je zjevné, že charakter základní kovové hmoty (matrice) litiny je téměř perlitický. Tvar perlitu je lamelární, značení je P1. Obsah perlitu je nad 94 do 98 %, tj. značení P96 (obsah feritu je nad 2 do 6 %, tj. značení Fe4). Distribuce perlitu je nad 1,3 do 1,6 μm ., tj. Pd 1,4. Obsah cementitu je více než 0 do 2, tj. značení C2. Částice cementitu nebyly zjištěny. Fosfidové eutektikum díky nízkému obsahu fosforu nebylo zjištěno, ani nebylo identifikováno síťoví fosfidového eutektika. Značení základní kovové hmoty: **P1 – P96 –Pd 1,4 – C2**.

Celkové označení litiny brzdového kotouče C je následující:

I C 3- P1 – P96 –Pd 1,4 – C2.

V tabulce 3.3 je uvedeno souhrnné značení mikrostruktury litinových vzorků sledovaných brzdových kotoučů.

Tabulka 3.3 Souhrnné značení mikrostruktury litinových vzorků sledovaných brzdových kotoučů

<i>Hodnocení tvaru grafitu a základní kovové hmoty brzdových kotoučů</i>		
Označení vzorku	Hodnocení grafitu	Hodnocení základní kovové hmoty
A	I C 4	P1 – P – Pd 1,0 – C 0
B	I D až E 6	P1 – P85 – Pd 1,4 – C 0
C	I C 3	P1 – P96 – Pd 1,4 – C 2

3.3 Měření tvrdosti brzdových kotoučů z litiny s lupínkovým grafitem

Pro měření tvrdosti litinových brzdových kotoučů byla použita metoda podle Brinella, viz ČSN EN ISO 6205-1, tj. pro litinu s lupínkovým grafitem s ohledem na její výrobní kvalitu se používá indentor – ocelová kalená kulička o \varnothing 5 mm, zátěžná síla je 750 kp (7358 N) a doba zatěžování se volí cca 30 s.

Měření tvrdosti sledovaných brzdových kotoučů nemohlo však být provedeno dle této normy, protože na naší škole, ani v dalekém okolí není již k dispozici např. tvrdoměr firmy Carl Zeiss Jena, který by vyvodil zátěžnou sílu 7358 N. To je pro výzkum odlitků z litiny s lupínkovým grafitem značná nevýhoda.

I přes tuto komplikaci bylo přistoupeno, alespoň jen pro orientační účely, k měření tvrdosti brzdových kotoučů. K tomuto účelu byl použit tvrdoměr HPO 250

LABCONTROL, který je k dispozici na naší katedře, pracuje na stejném principu jako tvrdoměr od firmy Carl Zeiss Jena (tj. metoda podle Brinella). Pro měření byl použit mimořádně indentor - ocelová kalená kulička \varnothing 2,5 mm. Tento tvrdoměr je opatřen optickou jednotkou, pomocí které se zjišťují rozměry průměrů vtisku ve dvou navzájem kolmých směrech. Pomocí vyhodnocovacího software byla stanovena hodnota příslušné tvrdosti určitého místa brzdového kotouče. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.4.

Tabulka 3.4 Naměřené hodnoty tvrdosti brzdových kotoučů

<i>Naměřené hodnoty tvrdosti litinových kotoučů</i>								
Označení vzorku	<i>Tvrdost v jednotlivých místech kotouče HBS</i>					Aritmetický průměr tvrdosti HBS	Směrodatná odchylka tvrdosti HBS	Variační koeficient [1]
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>			
A	224	226	226	228	226	226,0	1,3	$5,6 \cdot 10^{-3}$
B	225	239	241	234	239	235,6	5,8	$2,5 \cdot 10^{-2}$
C	220	231	230	221	218	224,0	5,4	$2,4 \cdot 10^{-2}$

4 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Výsledky obsažené v této bakalářské práci přináší dílčí informace o materiálu tří typů brzdových kotoučů vyrobených z litiny s lupínkovým grafitem. Velkou pozornost materiálu litinovým kotoučům věnuje Americká asociace SAE, která pro výrobu kotoučů doporučuje legovanou šedou litinu s lupínkovým grafitem o obsahu cca 3,4 hm. % obsahu uhlíku. Doporučuje legury, které zlepšují materiálové vlastnosti litin pro výrobu brzdových kotoučů (molybden, měď, chrom nebo titan, dále měď, která zvyšuje odolnost proti korozi). Brzdové kotouče osobních automobilů se podle ČSN EN 1561 vyrábějí z litiny, která odpovídá ČSN EN GJL 200 a ČSN EN GJL 250. Litina GJL 250 vykazuje matici perlitickou, obzvláště při tloušťkách 6 mm, což je tloušťka stěny odvětrávaného kotouče. V této je nutno konstatovat, že z hlediska mechanických vlastností a odolnosti litiny proti otěru je velmi vhodná litina s pravidelným rozmístěním grafitu menší velikostí (grafit vykazuje vrubové účinky a narušuje souvislost kovové matrice litiny) a s perlitickou kovovou hmotou. Z hlediska tepelně-fyzikálních vlastností je nutné, aby litina vykazovala vyšší hodnotu tepelné vodivosti. Vyšší hodnotu tepelné vodivosti mají litiny s vyšším obsahem feritu. Tak např. litině ČSN EN GJL 200 odpovídá hodnota součinitele tepelné vodivosti $48 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$, litině ČSN EN GJL 250 odpovídá hodnota součinitele tepelné vodivosti $44 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$. To znamená, že lépe bude při brzdění rozvádět teplo brzdový kotouč z litiny GJL 200. Pokud se týká součinitele teplotní roztažnosti, pro litiny se pohybuje od $10\cdot 10^{-6}$ do $13\cdot 10^{-6} \text{ [K}^{-1}]$, což je pro materiál a konstrukci brzdových kotoučů příznivá hodnota teplotní roztažnosti, [1].

Pokud se týká hodnocení struktury jednotlivých kotoučů, pak je z výše uvedených hodnot zřejmé, že velmi kvalitní litina s lupínkovým grafitem je na neodvětrávaném kotouči, který je označen **A**. Jeho kvalitu je možno rychle, ale pouze orientačně posuzovat podle poměru $C/Si = 1,8$. Jeho chemické složení je 3,23 hm. % uhlíku; 1,82 hm. % křemíku; 0,52 hm. % manganu; 0,018 hm. % fosforu, 0,063 hm. % síry; 0,04 hm. % chromu; 0,03 hm. % niklu a 0,10 hm. % mědi.

Kotouč **B** vykazuje $C/Si = 2,1$, což není doporučené normou ČSN EN 1561. Je možno se domnívat, že výrobce kotouče prováděl experiment, jak vyšší hodnota C/Si ovlivní charakter litiny. Jeho chemické složení je 3,27 hm. % uhlíku; 1,62 hm. %

křemíku; 0,75 hm. % manganu; 0,019 hm. % fosforu, 0,09 hm. % síry; 0,09 hm. % chromu; 0,02 hm. % niklu a 0,24 hm. % mědi.

Kotouč **C**, poměr C/Si je 1,9 je mírně nad požadovanou hodnotou dle výše uvedené normy. Jeho chemické složení je 3,38 hm. % uhlíku; 1,75 hm. % křemíku; 0,62 hm. % manganu; 0,024 hm. % fosforu, 0,035 hm. % síry; 0,08 hm. % chromu; 0,02 hm. % niklu a 0,03 hm. % mědi.

Dále je nutno konstatovat, že pro výrobu litiny s lupínkovým grafitem je nutné dodržovat i přesné podmínky pro metalurgickou přípravu taveniny litiny, včetně jejího očkování a použitého typu očkovačla. To však výrobci automobilových dílů nesdělují, ani neuvádějí.

Pokud hodnotíme výsledky dosažené výpočtem, podle hodnotících kritérií, která jsou pouze orientační, pak z tabulky 3.2 je zřejmé, že mezi stupněm eutektičnosti jednotlivých kotoučů není téměř žádný rozdíl. Vypočítané hodnoty jsou v rozmezí 0,87 až 0,91. To znamená, že litina všech sledovaných brzdových kotoučů je podeutektická. Hodnota 0,91 charakterizuje litinu kotouče na hranici mezi GJL 200 a GJL 250. Hodnota 0,87 odpovídá litině GJL 250. Grafitizační koeficient *K* také není příliš rozdílný u všech tří typů kotoučů, pohybuje se od 1,3 do 1,4 a tím je předpoklad, že litiny budou mít perlitickou nebo převážně perlitickou matici. Rozdílnější hodnoty byly stanoveny výpočtem pro mez pevnosti v tahu všech tří typů kotoučů. Tyto hodnoty se pohybují od 305 do 276 MPa. Tento výpočet zařadil litinu kotoučů do skupiny litin GJL 250 až GJL 300. Nejvyšší hodnota byla stanovena pro neodvětrávaný kotouč **A**, tj. 305 MPa. Nejnižší hodnota pevnosti v tahu 276 MPa odpovídá odvětrávanému kotouči **C**. Poměrně odpovídající jsou vypočítané hodnoty tvrdosti jednotlivých typů kotoučů. Nevykazují velký rozdíl, pohybují se od 230 do 219 HB, resp. HBS. Nejvyšší hodnotu tvrdosti vykazuje opět neodvětrávaný kotouč **A**. Vypočítaný Youngův modul pružnosti v tahu také zařazuje litinu všech typů kotoučů do skupiny litiny ČSN EN GJL 250, i o něco výše.

Pokud posuzujeme mikrostrukturu litiny jednotlivých brzdových kotoučů je možno konstatovat, že grafit všech typů kotoučů je lupínkový, jehož rozložení není u všech vzorků kotoučů stejné. Kotouče označené **A** a **B** mají rozložení lupínkového grafitu smíšené. Kotouč **B** má rozložení grafitu mezidendriticky neusměrněné až mezidendriticky usměrněné. Velikost lupínkového grafitu v litině kotouče **A** je nad 120

do 250 μm . Velikost grafitu litiny u kotouče B je nad 30 do 60 μm a u litiny kotouče C je nad 250 do 500 μm .

Z hodnocení základní kovové hmoty litin kotoučů je zřejmé, že všechny kotouče mají lamelární perlit.

Základní kovová hmota kotouče **A** je dále tvořena téměř 100% perlitem, což odpovídá značení P. Disperzita perlitu je u litiny kotoučů **B** a **C** stejná a činí nad 1,3 do 1,6 μm . U litiny kotouče **A** je perlit jemnější, jeho disperzita je nad 0,8 do 1,3 μm . Vzhledem k nízkému obsahu fosforu u litiny všech tří kotoučů nebyla ve struktuře litiny indentifikována přítomnost fosfidového eutektika ani síťoví fosfidového eutektika. Také přítomnost volného cementitu nebyla zjištěna.

Orientačně změřené hodnoty tvrdosti kotoučů, což není součástí zadání bakalářské práce, bohužel nebyly provedeny dle příslušné normy ČSN EN ISO 6205-1. Naměřené hodnoty také nepřinesly očekávaný výsledek. Porovnáme-li vypočítané hodnoty tvrdosti, uvedené v tabulce 3.2, se středními hodnotami tvrdosti, viz tabulka 3.4, je zřejmé, že tvrdosti brzdového kotouče **A** se liší o 1,7 %. Tvrdost brzdového kotouče **B** se liší o 5,7 % a tvrdost brzdového kotouče **C** se liší o 2,3 %.

Rozdíly tvrdostí na brzdovém kotouči **B** je možno vysvětlit větší nerovnoměrností struktury. Na kotouči jsou oblasti, které vykazují větší přítomnost feritu a současně jsou oblasti, které mají jemnější disperzitu perlitu.

Hlavním nedostatkem měření tvrdosti kotoučů jsou nevyhovující parametry tvrdoměru (jiná zátěžná síla než je 7 358) a současně neodpovídající průměr kuličky 5 mm, jak předepisuje příslušná norma.

5 ZÁVĚR

Bakalářská práce, která je zpracována na téma: „Hodnocení struktury brzdových kotoučů automobilů vyrobených z litiny s lupínkovým grafitem“, byla rozdělena do dvou základních částí – teoretické a experimentální.

V teoretické části jsou shrnuty základní informace o brzdových kotoučích a jejich materiálech. Pro výrobu brzdových kotoučů osobních automobilů se používá především litina s lupínkovým grafitem. Proto v další rešeršní části jsou charakterizovány grafitické litiny a hlavní pozornost je zaměřena na litinu s lupínkovým grafitem a její hodnotící kritéria, která byla uplatněna také v experimentální části při sledování charakteristiky litiny sledovaných kotoučů.

Hlavní část práce – experimentální byla zaměřena na sledování mikrostruktury litiny tří typů brzdových kotoučů (jednoho kotouče s konstrukcí neodvětrávaného a dvou odvětrávaných kotoučů, které byly vyrobeny s odlišným chemickým složením).

Poznatky a dílčí výsledky této bakalářské práce lze shrnout do těchto bodů:

1. Pro metalografické pozorování mikrostruktury litiny je důležitá pečlivá metalografická příprava vzorku, jak v části broušení s využitím postupné velikosti zrnitosti od 120 do cca 800, tak i leštění a leptání. Jako leptadlo je pro litinu vhodný Nital 3 %. Pečlivou přípravu vzorků pro metalografické pozorování je nutno věnovat vzorkům, jejichž chemické složení obsahuje měď v množství nad 0,1 hm. %. Tyto vzorky při leptání velmi rychle „korodují“ a zdokumentování jejich struktury je velmi náročné.
2. Porovnáním mikrostruktury litiny všech tří typů brzdových kotoučů bylo zjištěno, že jsou vyrobeny z litiny s lupínkovým grafitem. Velikost grafitu byla u jednotlivých litin kotoučů odlišná. Pohybovala se u litiny kotouče označeného **A** od 120 do 250 μm . Velikost grafitu litiny u kotouče **B** od 30 do 60 μm a u litiny kotouče **C** od 250 do 500 μm . Charakter základní kovové hmoty litiny jednotlivých kotoučů je perlitický s různou disperzitou perlitu od 0,8 do 1,6 μm . Nejnižší disperzitu perlitu nad 0,8 do 1,3 μm vykazoval kotouče **A**. Tento brzdový kotouč vykazoval stoprocentní obsah perlitu. Litina kotouče označovaného **C** vykazovala nepatrné množství feritu, cca do 2 až 4 %. Naopak, kotouč označený **B** vykazoval 85 % perlitu a cca 15 % feritu. Toto množství feritu je příznivější pro vyšší hodnotu teplotní vodivosti, která je potřebná při intenzivním brždění

a zahřívání brzdového kotouče. Vzhledem k nízkému obsahu fosforu u litiny všech tří kotoučů nebyla ve struktuře litiny indentifikována přítomnost fosfidového eutektika ani síťoví fosfidového eutektika. Také přítomnost volného cementitu nebyla zjištěna.

3. Výsledky výpočtů podle hodnotících kritérií jsou pouze orientační. Mezi významné kritérium se řadí stupeň eutektičnosti, který hodnotí litinu z hlediska jejího postavení vůči eutektickému bodu metastabilní soustavy Fe – C. Tento výpočet potvrdil, že litina všech sledovaných brzdových kotoučů je podeutektická. Další významné kritérium je podíl C/Si, který dle normy ČSN EN 1561 má být u kvalitní litiny 1,7 až 1,8.
4. Měření tvrdosti kotoučů nepřineslo očekávané výsledky z důvodu, že nebyl k dispozici příslušný tvrdoměr (zátěžná síla 7358 N a ocelová kalená kulička \varnothing 5 mm).
5. Řešením této bakalářské práce jsem výrazně zvýšil své znalosti o grafitických litinách a jejich hodnocení.

6 POUŽITÁ LITERATURA

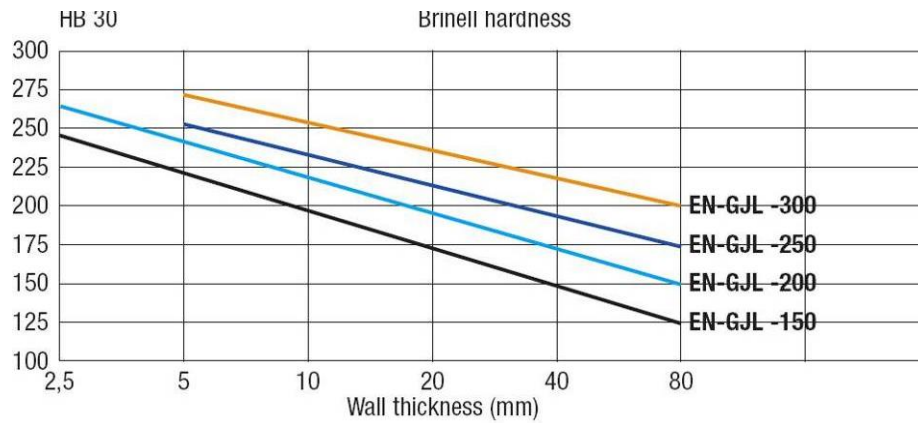
- [1] MALCOLM, P. MACNAGHTAN, C. KROSNAR, J. *Cast Iron a drake discs material for the future*. 2nd International Seminar on automotive Braking. University of Leeds, UK May 1998. [cit. 2016-06]: [http://www.euracgroup.com/hres/cast %20iron %20a %20brake %20disc %20material %20for %20the %20future.pdf](http://www.euracgroup.com/hres/cast%20iron%20a%20brake%20disc%20material%20for%20the%20future.pdf).
- [2] BAČOVSKÝ, M. *Tepelně-mechanická analýza brzdových kotoučů*. FSI – VUT Brno 2014 [cit. 2016-06-22]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=83981.
- [3] VOCH, R. *Hodnocení opotřebení a změn tribologických vlastností brzdových kotoučů*. ZUČ Plzeň 2007 [cit. 2015-11-15]. Dostupné z: <http://www.aterm.cz/download/Presentation>.
- [4] NOVÁ I., NOVÁKOVÁ I., BRADÁČ, J.: *Technologie I. Slévání a svařování*. [Skripta]. FS, KSP – TU v Liberci, 2006.
- [5] PLUHAŘ, J a J KORITTA. *Strojírenské materiály*. Praha: SNTL, 1966.
- [6] ODEHNALOVÁ, D. *Litiny*. [Výuková pomůcka předmětu Nauka o materiálu]. KMT – TU v Liberci, 2010.
- [7] Machek V., Sudomka J.: *Nauka o materiálu I*, ČVUT, Praha 2000.
- [8] SKOČOVSKÝ, Petr; PODRÁBSKÝ, Tomáš. *Grafitické litiny*. 1.vydanie. Žilina: Edis, 2005.
- [9] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II. 2*. Brno: CERM, 2002.
- [10] OTÁHAL, Vlastislav. *Jakostní litiny – litina s lupínkovým grafitem: výroba, vlastnosti*. Brno. [s.n.].
- [11] GIRŠOVIČ, N.G. *Šedá litina I: Krystalizace litiny a vznik její struktury, vlastnosti litin*. Praha: STNL, 1955.
- [12] NOVÁ, I. *Teorie slévání II – Teoretické základy metalurgie slévárenských slitin*. [Skripta]. FS, KSP – TU v Liberci, 2006.
- [13] BENEŠ, Antonín a kol. *Nauka o kovech. 2*. Praha: STNL, 1974.

PŘÍLOHA A

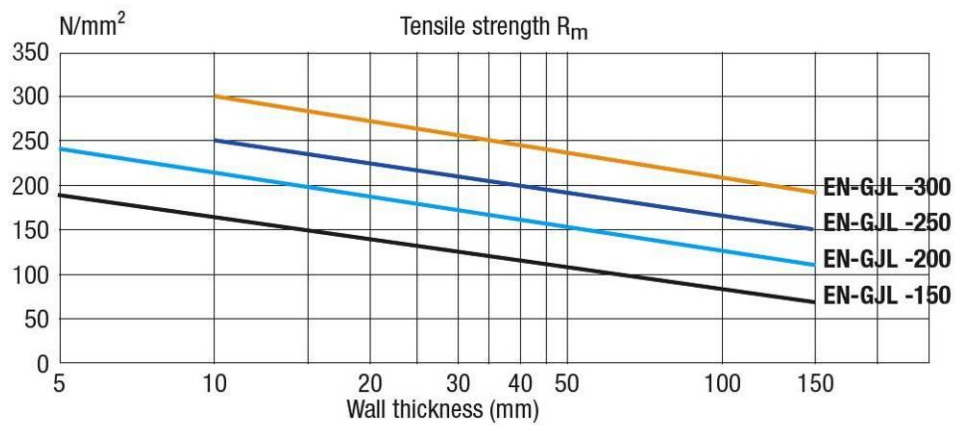
Tabulka A.1 ČSN EN 1561: Charakteristika chemického složení a vlastností litiny s lupínkovým grafitem

<i>Litina s lupínkovým grafitem – GJL</i>						
EN-GJL	100	150	200	250	300	350
C [hm. %]	3,5–3,7	3,4–3,6	3,3–3,5	3,1–3,3	3,0–3,2	2,8–3,1
Si [hm. %]	2,3–2,5	1,9–2,2	1,8–2,1	1,7–1,9	1,6–1,8	1,5–1,7
Mn [hm. %]	0,4–0,6	0,5–0,7	0,6–0,8	0,8–1,0	0,9–1,1	1,1–1,3
P [hm. %]	max. 0,7	max. 0,6	max. 0,5	max. 0,5	max. 0,3	max. 0,25
S [hm. %]	max. 0,15	max. 0,15	max. 0,15	max. 0,15	max. 0,15	max. 0,10
S_E	1,05–1,11	0,99–1,05	0,93–0,99	0,87–0,93	0,81–0,87	0,75–0,81
Doporučená tl. stěny odl. [mm]	4 až 15	5 až 30	8 až 45	15 až 70	25 až 100	40 až 150 i více
Struktura	ferit + stopy perlitu	ferit + perlit	ferit + perlit	perlit	perlit	perlit
R_m [MPa]	100–200	150–250	200–300	250–300	300–400	350–450
R_{P0,2} [MPa]	–	98–165	130–195	165–228	195–260	228–285
R_d [MPa]	–	600	720	840	960	1080
E.10³ [MPa]	–	78–103	88–113	103–118	108–137	123–143
HB	180	200	220	240	260	270

PŘÍLOHA B



Obr. B-1 Hodnoty tvrdosti dle Brinella pro EN GJL (litiny s lupínkovým grafitem)



Obr. B-2 Hodnoty pevnosti v tahu pro litinu EN GJL (litiny s lupínkovým grafitem)