



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# VLIV MN A CU NA STRUKTURU A MECHANICKÉ VLASTNOSTI LITINY

INFLUENCE OF MN AND CU ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF CAST IRON

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ivo Musil

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Václav Kaňa, Ph.D.

BRNO 2023

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Ivo Musil**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **Ing. Václav Kaňa, Ph.D.**  
Akademický rok: 2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Vliv Mn a Cu na strukturu a mechanické vlastnosti litiny

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Struktura grafitických litin je tvořena grafitem a základní kovovou hmotou. Druh základní kovové hmoty, nazývané také matrice, je hlavním faktorem ovlivňujícím mechanické vlastnosti litiny. O druhu matrice pak rozhoduje především chemické složení litiny. Zvýšení pevnosti se dosahuje zvýšením obsahu perlitu ve struktuře a toho lze nejnáze docílit legováním perlitotvornými prvky, mezi které patří především Mn a Cu.

### **Cíle bakalářské práce:**

Cílem práce je sepsat literární rešerši pojednávající o vlivech různých faktorů, zejména chemického složení, na strukturu a vlastnosti grafitických litin. Dále bude proveden experiment ověřující vliv Mn a Cu na strukturu litiny a s tím spojené mechanické vlastnosti.

### **Seznam doporučené literatury:**

ROUČKA, J. Metalurgie litin. Brno: PC-DIR, 1998. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1263-1.

ALAGARSAMY, A. Ductile iron handbook. Des Plaines, Ill.: American Foundrymen's Society, 1992. ISBN 08-743-3124-2.

SILMAN, G., V. KAMYNNIN, V.A. TARASOV. Effect of Copper on Structure Formation in Cast Iron. Metal Science and Heat Treatment. 45 (2003), pp. 254 - 258. ISSN 0026-0673.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

---

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá vlivem různých faktorů, zejména chemického složení na strukturu a vlastnosti grafitických litin. V praktické části je proveden plánovaný experiment ověřující vliv manganu a mědi na mechanické vlastnosti a strukturu grafitických litin, při němž jsou odlity vzorky litiny s lupínkovým grafitem legované různým obsahem manganu a mědi, u nichž je měřena výsledná tvrdost a zkoumána jejich struktura.

### **Klíčová slova**

mangan, měď, chemické složení, mechanické vlastnosti, plánovaný experiment

## **ABSTRACT**

This bachelor's diploma thesis deals with the influence of various factors, especially the chemical composition, on the structure and properties of graphitic cast irons. In the practical part, a planned experiment verifying the influence of manganese and copper on the mechanical properties and structure of graphitic cast irons is carried out, in which samples of cast iron with flake graphite alloyed with different manganese and copper contents are cast, the resulting hardness is measured and their structure is examined.

### **Keywords**

manganese, copper, chemical composition, mechanical properties, design of experiments

---

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

MUSIL, Ivo. *Vliv Mn a Cu na strukturu a mechanické vlastnosti litiny* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/145772>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Václav Kaňa.

---

## PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci na téma Vliv Mn a Cu na strukturu a mechanické vlastnosti litiny jsem vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 25. 5. 2023

---

podpis

---

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu Ing. Václavu Kaňovi, Ph.D. za jeho ochotu, vstřícnost a trpělivost a cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování této bakalářské práce a odbornou pomoc v průběhu její praktické části. Dále bych chtěl poděkovat svoji rodině, přítelkyni, kamarádům a spolužákům za pomoc a podporu během celého studia.

---

---

**OBSAH**

ÚVOD .....	9
1 Litiny .....	10
1.1 Druhy litin .....	11
1.1.1 Bílá litina (ledeburitická).....	11
1.1.2 Litina s lupínkovým grafitem (LLG, GJL).....	11
1.1.3 Litina s kuličkovým grafitem (LKG, GJS).....	11
1.1.4 Litina s červíkovitým grafitem (LČG, GJV) .....	12
1.1.5 Litina s vločkovým grafitem - temperovaná litina (TL, GJM).....	12
2 Grafitické litiny .....	13
2.1 Očkování grafitických litin.....	14
2.1.1 Metody očkování .....	16
2.2 Chemické složení .....	17
2.2.1 Základní prvky.....	17
2.2.2 Vliv chemického složení na transformaci austenitu .....	18
2.2.3 Řízení struktury matrice pomocí chemického složení.....	20
2.2.4 Vliv Mn a Cu na strukturu a vlastnosti litin .....	23
2.3 Vliv rychlosti ochlazování na strukturu litin .....	28
2.4 Vliv tepelného zpracování na strukturu a vlastnosti litin .....	29
3 Plánovaný experiment (DOE) .....	31
4 Praktická část.....	32
4.1 Mechanické vlastnosti .....	34
4.2 Mikrostruktura.....	36
ZÁVĚR.....	40

Seznam použitých zdrojů

---

## ÚVOD

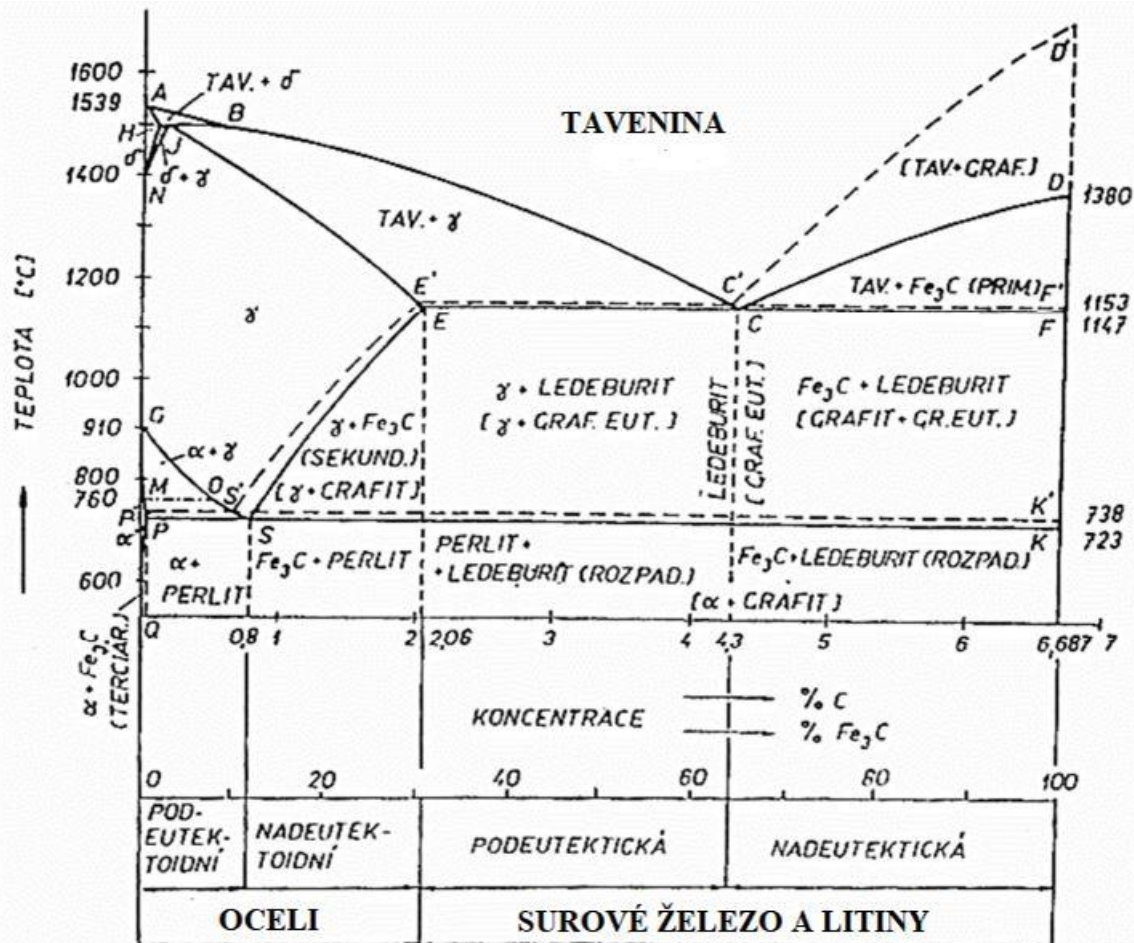
Litiny jsou slitiny železa a uhlíku. Litiny tvoří největší část z veškerých slitin ve slévárenství. Za jeden rok se v České republice vyrobí přibližně 400 000 tun odlitků z litiny. Drahé odlitky z oceli jsou mnohdy nahrazeny litinou s kuličkovým grafitem pro příznivější uživatelské a výrobní parametry. I když byl první odlitek z litiny odlit v Číně přibližně v roce 600 př. n. l., tak spousta metalurgických procesů byla nalezena a začala se aplikovat až před nedávnem. V současné době se silně rozšiřuje hlavně výroba moderních vysokopevnostních litin. Hlavními spotřebiteli litinových odlitků jsou především průmysl automobilový, průmysl tvářecích strojů a strojů na obrábění nebo výroba odstředivě litých trubek. [1;2]

Litina je tvořena grafitem a základní kovovou hmotou (matricí). Větší tvrdosti a pevnosti litiny se dosahuje dodáním perlitu do struktury matrice, čím více perlitu v matrici je, tím je litina tvrdší a pevnější. Zvýšení perlitu ve struktuře se dosahuje pomocí perlitotvorných prvků, ke kterým patří mimo jiné také mangan a měď. [2;3;4]

## 1 LITINY

Litina je slitina železa, uhlíku a dalších prvků (manganu, křemíku, síry, fosforu), přičemž uhlík v těchto prvcích je vyloučen buď ve formě grafitu, nebo může být vázán jako karbid  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Bez vlivu ostatních prvků je obsah C v litinách minimálně 2,08%. [2]

Krystalizace litin probíhá buď podle stabilního diagramu Fe-C, kde vzniká grafitické eutektikum (tyto litiny jsou tedy nazvány grafitické), nebo může probíhat krystalizace litin rychleji podle metastabilního diagramu Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$ , kde vzniklým eutektikem je ledeburit (tyto litiny jsou tedy nazvány bílé nebo taky karbidické). [2;3;4]



Obr. 1 Rovnovážný diagram Fe-C a Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  [2].

Litiny se taví v kuplovnách, elektrických pecích (obloukových nebo indukčních), dále se mohou tavít v pecích bubnových. Účelem výroby je upravit chemické složení litin, zejména obsah C a zbavit se škodlivých přísad. Litina se taví v naprosté většině sléváren v kuplovnách a elektrických indukčních pecích. [5]

Kuplovný jsou pořád z ekonomického hlediska nejvýhodnější, avšak mívají problémy s plněním ekologických norem a limitů, a také s dodržением chemického složení. Z tohoto důvodu spousta sléváren přechází na elektrické indukční pece, které tyto problémy odstraňují. [2;4]

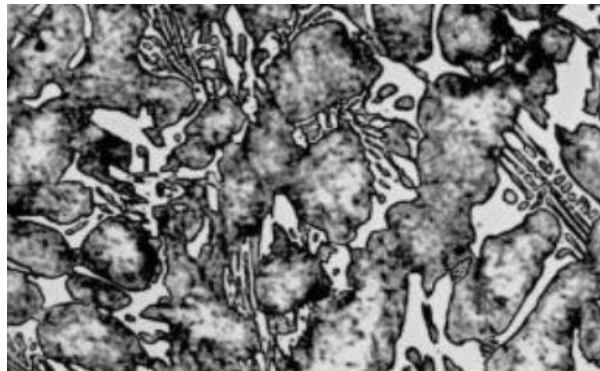
## 1.1 Druhy litin

K rozdělení litin je hlavním kritériem jejich strukturní hledisko. Litiny krystalizují podle stabilní soustavy Fe-C a metastabilní Fe-Fe<sub>3</sub>C. Za určitých podmínek (např. rychlost ochlazování, chemické složení litiny) vzniká eutektikum grafitické nebo cementické – ledeburit. Cementit zbarví povrch litiny na bílo, zatímco grafit na šedo. Podle tohoto zbarvení se litiny v podstatě dělí na dva základní druhy (šedé litiny – grafitické a bílé litiny – ledeburitické). Litina, jejíž struktura obsahuje oba druhy eutektika zároveň je označována jako tzv. maková litina. [3;4]

### 1.1.1 Bílá litina (ledeburitická)

Tyto litiny mají strukturu odpovídající tuhnutí podle metastabilní soustavy, kterou tvoří cementit a perlit, jenž vznikly eutektoidní přeměnou ledeburitického austenitu a u podeutektických litin transformací primárního austenitu. Tvrdost této litiny se pohybuje v rozmezí 350 až 500 HB a ovlivňuje ji především množství cementitu ve struktuře. Tato litina se používá hlavně pro výrobu odlitků jednoduchých tvarů. [4]

Klasickými výrobky z bílé litiny jsou rotory, lopatky, skříně čerpadel nebo obložení komor tryskáčů. [6]



Obr. 2 Mikrostruktura bílé chrom-molybdenové litiny Cr15Mo (zvětšena 500x) [6].

### 1.1.2 Litina s lupínkovým grafitem (LLG, GJL)

Původně označována jako litina šedá, je slitina železa s uhlíkem, ve které je volný uhlík vyloučen jako grafit ve tvaru lupínků. Lupínky mají ostrý konec a jejich délka je výrazně větší než tloušťka. Velký počet vrubů vytvářených lupínky grafitu v základní kovové hmotě má za následek snižování mechanických vlastností této litiny. Tyto litiny mají tažnost nižší než 1%. Litina s lupínkovým grafitem zaujímá nepřetržitě první místo v objemu výroby odlitků po celém světě. Za to vděčí nízkým výrobním nákladům a dobrým technologickým vlastnostem, mezi něž patří snadná obrobitelnost, vysoká pevnost v tlaku a dobré tlumící vlastnosti.[2;3;7;9]

### 1.1.3 Litina s kuličkovým grafitem (LKG, GJS)

Původně označována jako litina tvárná, je druh litiny, kde je uhlík vyloučen většinou ve tvaru kuliček. Dokonalá kulička je optimálním tvarem z pohledu vlastností litiny, ale obvykle se objevuje i nedokonale zrnitý grafit. V porovnání s litinou s lupínkovým grafitem má mnohem lepší mechanické vlastnosti, nikoliv jen výrazně větší pevnost, ale hlavně též vysokou houževnatost a tažnost. Díky vysoké tažnosti má i mez kluzu velmi vysokou. Všechny tyto

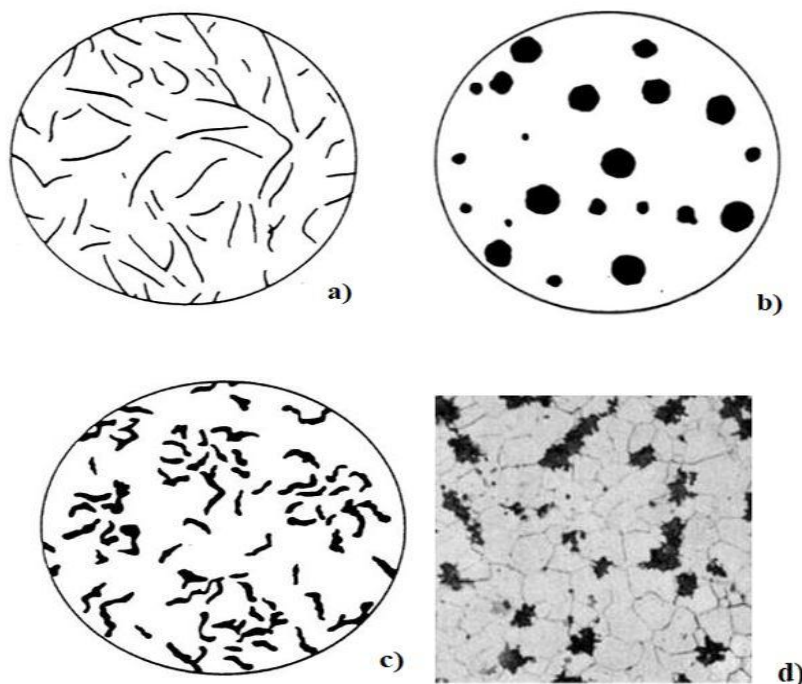
vlastnosti jsou dány tím, že kulovitý tvar grafitu mnohem méně poškozuje pevnost základní kostry než lupínkový grafit. [2;3;8;9]

#### 1.1.4 Litina s červíkovitým grafitem (LČG, GJV)

Nazývána též jako vermikulární litina. Grafit má červíkovitý tvar a podle tvaru grafitu ji lze zařadit mezi litinu s kuličkovým a lupínkovým grafitem. Typický tvar červíkovitého grafitu je způsoben ztrátou přímého kontaktu grafitu s taveninou v konkrétní fázi jeho tvorby. V porovnání s litinou s lupínkovým grafitem je ale červíkovitý grafit tlustší, kratší a má zaoblený konec. Tato litina má kvalitnější pevnostní vlastnosti a trochu větší tepelnou vodivost než litiny s lupínkovým grafitem. Z toho důvodu se tyto litiny hodí pro teplotně namáhané odlitky, hlavně ty, které jsou vystaveny teplotním změnám jako např. kokily, části brzd, hlavy válců. [2;3;9]

#### 1.1.5 Litina s vločkovým grafitem - temperovaná litina (TL, GJM)

Tuhne jako bílá litina podle metastabilní soustavy. Uhlík je vázán ve formě karbidu železa  $Fe-Fe_3C$ . Tato litina má dobrou houževnatost a obrobitelnost, avšak tyto vlastnosti získává až následujícím tepelným zpracováním nazývaným temperování. Teprve po tomto tepelném zpracování se temperovaný uhlík vyloučí ve tvaru vloček. Rozděluje se na litinu s bílým nebo černým lomem. [2;3]



Obr. 3 Tvary grafitu v grafitických litinách a) LLG b) LKG c) LČG d) TL [10].

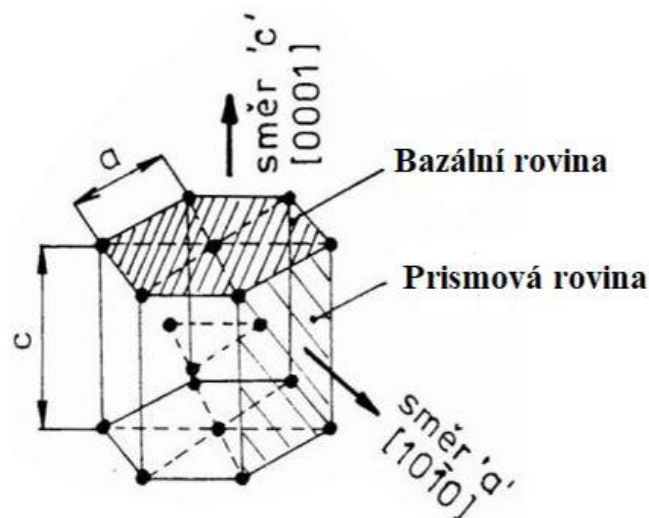
## 2 GRAFITICKÉ LITINY

Strukturu těchto litin, tuhoucích podle stabilního systému, tvoří grafit a základní kovová hmota (tzv. matrice). [2;3]

Grafit má obrovský účinek na vlastnosti litin. Jedná se o krystalickou formu uhlíku krystalizující v hexagonální soustavě. Má dobré vrubové účinky a tlumivé vlastnosti. Za běžných krystalizačních podmínek je grafit vyloučen ve tvaru lupínků. Pro vznik jiných tvarů grafitu než je grafit lupínkový se do taveniny dodá konkrétní množství tzv. modifikátoru. Grafit má velmi malou tvárnost a pevnost, avšak výbornou tepelnou vodivost. [2;4]

Grafit lze rozdělit na tyto druhy: [2]

- Primární – Jedná se o primární fázi vznikající při tuhnutí nadeutektických grafitických litin. Má podobu hrubých lupínků. Když odlitek tuhne dostatečně pomalou rychlostí nebo když je litina odsáta, vyplave na hladinu. Tento druh grafitu má špatný vliv na strukturu a mechanické vlastnosti litiny.
- Eutektický – Tento grafit vznikne během tuhnutí eutektika. Tvoří spolu s austenitem grafitické eutektikum. Patří sem grafit kuličkový, lupínkový a červíkovitý.
- Temperový - Grafit, jenž vzniká během tepelného zpracování rozpadem metastabilních složek
- Grafit vznikající kvůli zmenšování rozpustnosti uhlíku v austenitu – během eutektoidní transformace se většinou přidává k útvarům grafitů, které už existují.



Obr. 4 Hexagonální krystalová mřížka grafitu [2].

Jako bazální roviny jsou označovány podstavy mřížky. Prismové roviny vytvářejí obvod šestihranu. Jako 'a' [1010] je značena orientace růstu grafitu v bazálních rovinách. Během budování nových bazálních rovin jde o růst ve směru 'c' [0001]. [2]

Základní kovová hmota, též nazývaná matrice, je významnou složkou struktury litin. Dle transformačních podmínek austenitu se rozlišují tyto druhy: [4]

- Perlitická – Perlit má v litinách lamelární tvar. Čím více perlitu v matici je, tím více vzrostou mechanické vlastnosti litiny jako je tvrdost nebo mez pevnosti v tahu a také odolnost vůči opotřebení, na druhou stranu se však snižuje tvárnost litiny.
- Feritická – Ferit ve struktuře litiny zlepšuje její tvárnost a také vrubovou houževnatost, avšak zhoršuje její tvrdost, pevnost v tahu a odolnost proti opotřebení. Je to tuhý roztok křemíku a uhlíku v železe  $\alpha$ .
- Feriticko – Perlitická
- Cementit – Vznikne při rozpadu ledeburitu. Ve struktuře litin je nežádoucí, protože je tvrdý, ale křehký, má horší obrobitelnost a skoro žádnou tvárnost.

## 2.1 Očkování grafitických litin

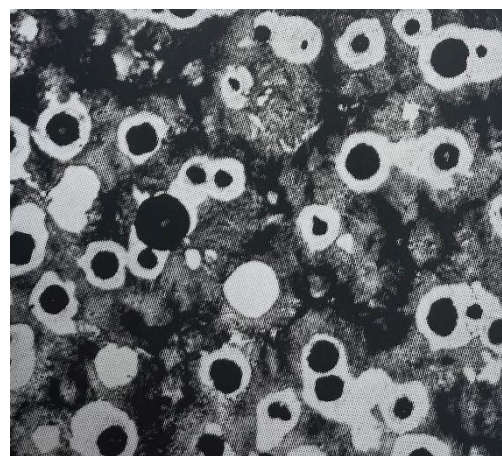
Je jednou z nejvýznamnějších metod mimopecního zpracování roztavených litin. Používalo se ve výrobě LLG dávno předtím než byla objevena LKG v roce 1948. Ovlivňuje finální strukturu litiny. Očkování znamená vnést do roztavené litiny určité látky, jenž mají za následek vznik heterogenních zárodků pro krystalizování grafitu. [2;11;12]

Základem očkování je heterogenní nukleace, ke které přispívají vnášené očkovací látky, jenž jsou většinou na bázi FeSi. Očkování navýší množství cizích grafitizačních zárodků, zjemní vyloučený grafit, a sníží přítomnost zákalky v nebezpečných průřezích odlitku. U tvárné litiny má vliv na strukturu základní kovové hmoty a u šedé litiny na formu vyloučeného grafitu. Také se jím dá zvýšit obrobitelnost. Čím horší jsou grafitizační podmínky, tím je dán větší smysl pro očkování litin. [2;12]

V důsledku nedostatečného očkování začne vznikat grafit nepravidelně rozložený, tzv. typ B, nebo mohou vzniknout přechlazené formy, grafit typu D a E. Někdy mohou vzniknout oblasti se strukturou metastabilní. Tyto struktury mají za následek vznik nepříznivých mechanických vlastností, špatných technologických vlastností pro odlévání, a také zvýšené tvrdosti. Při výrobě LKG je očkování nezbytné. Naočkovanou a nenaočkovanou strukturu lze vidět na obrázku 5. [2;11]



a)

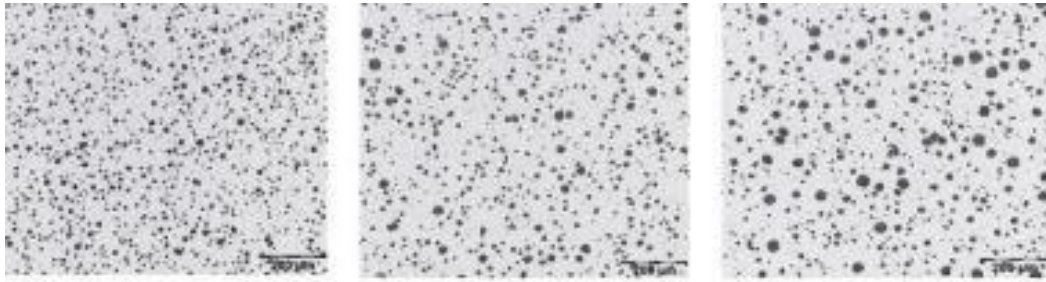


b)

Obr. 5 Struktura LKG a) nenaočkováná b) naočkováná [11].

Byl zkoumán vliv chemického složení očkovaadel typu FeSi70 na strukturu a mechanické vlastnosti tenkostěnné LKG. Byly odlity desky o tloušťce 3, 5 a 8mm. Byl zkoumán grafitizační efekt 6 typů očkovaadel, jenž se navzájem lišily obsahem aktivních nukleačních prvků hliníku, vápníku a zirkonia a jeden z nich měl vyšší obsah manganu. [13]

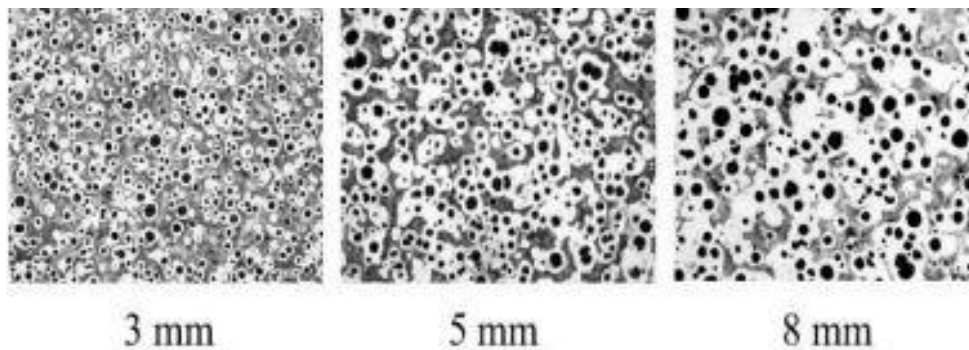
Na obrázku 6 je možné vidět struktury grafitu ve zkušebních vzorcích tloušťky 3, 5 a 8mm. Ukazuje se, že s rostoucí tloušťkou odlitku se zvyšuje citlivost velikosti grafitu a jeho rozptyl. Nejmenšího grafitu je dosaženo pomocí očkovaadel obsahujících zirkonium. [13]



Obr. 6 Grafit naočkovaných vzorků tloušťky 3, 5 a 8mm [13].

Tvrдость odlitku je závislá na tloušťce stěny, což svědčí o velké citlivosti na rychlost ochlazování, kterou představuje tloušťka odlévané stěny. Ukazuje se, že vliv očkování na tvrдость je méně významný než tloušťka stěny. [13].

Ve všech testovaných vzorcích je matrice feriticko – perlitická a nebyl zjištěn žádný výskyt cementitu. Na obrázku 7 je možné vidět struktury matrice v leptaném stavu. Je vidět že s rostoucí tloušťkou stěny se zvyšuje podíl feritu v matrici. Vliv očkovaadla má opět menší význam než tloušťka odlitku. [13]



Obr. 7 Struktura vzorků tloušťky 3, 5 a 8mm [13].

Bylo zjištěno, že velikost a disperze grafitu vysoce závisí na rychlosti ochlazování. Vliv očkovaadla na morfologii grafitu u odlitků stejné tloušťky je méně důležitý. Podobná závislost jako u tvrđosti byla zjištěna u pevnosti v tahu, kde byl zaznamenán zásadní pokles se zvyšující se tloušťkou stěny z 3 na 5mm. I zde byl vliv očkovaadla méně významný. S rostoucí tloušťkou odlitku se zvyšuje jeho tažnost a vliv očkovaadla na tvárnost je méně významný. [13]

### 2.1.1 Metody očkování

V moderní době se využívá spousta rozličných způsobů přidání očkovačného do roztavených litin. Během očkování je potřeba zabezpečit homogenizaci taveniny, aby bylo očkovačného rozpuštěno. Kov musí mít dostatečnou teplotu, aby bylo očkování účinné. Je příhodné očkovat co nejpozději, eventuálně během odlévání kvůli odeznívání očkovačného účinku. Tím se významně sníží dávkování očkovačného. [2;12]

Mezi hlavní metody očkování patří: [2;11]

- Očkování v pánvi – Očkovačného se hodí do licí pánve během lití kovu z pece nebo transportní pánve. V čase přidání očkovačného je už dno pánve zalito kovem. Očkovačného se nedává do prázdné pánve, protože hrozí nebezpečí, že se přilepí na dno, zatímco kdyby byla pánve už plná roztaveného kovu, očkovačného by se nerozpustilo a lázeň by se nehomogenizovala. Jedná se o nejméně výhodnou metodu z důvodu využití očkovačného. Tato skutečnost je způsobena dlouhou dobou od očkování do lití. Navzdory tomu se jedná o nejčastější metodu.
- Očkování do proudu kovu – Uplatňuje se hlavně během odlévání za pomoci automatizovaných licích zařízení. Pro očkování LKG se jedná o nejlepší metodu. Očkuje se buď bezprostředně do proudu taveniny, nebo do mezipánve během celé doby lití. To v jakém množství dávkovat očkovačného záleží na rychlosti tuhnutí, tloušťce a chemickém složení litiny. Tzv. pozdní očkování je také metoda očkování do proudu kovu, avšak rozdíl je v tom že se očkuje buď přímo při odlévání, nebo je očkovačného přidáno do dutiny formy.
- Očkování plněným profilem – V dutém tenkostěnném profilu z oceli je umístěno očkovačného. Profil je sunut do taveniny. Očkování probíhá do proudu taveniny v pánvi, ale často taky v mezipánvi. Výhodou je nenáročný dávkování a velké využití očkovačného.
- Očkování pomocí očkovačných tělísek – Očkovačného v podobě tělísek je umístěno do osazení na dno licí jamky, pod vtokový kůl nebo do filtru. Jejich velikost záleží na tom, jak velké množství kovu ve formě je.

## 2.2 Chemické složení

Nejvýznamnějším faktorem, jenž ovlivňuje tvar grafitu a má podstatný vliv na strukturu kovové matrice, je chemické složení. Každý z prvků specificky ovlivňuje strukturu tuhnutí a mikrostrukturu kovové matrice. V podstatě každý prvek z periodické tabulky nějak ovlivňuje strukturu a vlastnosti litin. [11;14]

Prvky je možno rozdělit na: [11;14]

- Základní – C, Mn, Si, P, S
- Modifikační – Mg, Ca, kovy vzácných zemin ( La, Ce )
- Legující – Cu, Mo, Ni
- Karbidotvorné – Cr, V, B, Te, Mo
- Speciální a zbytkové – Al, Bi, Sb, Pb

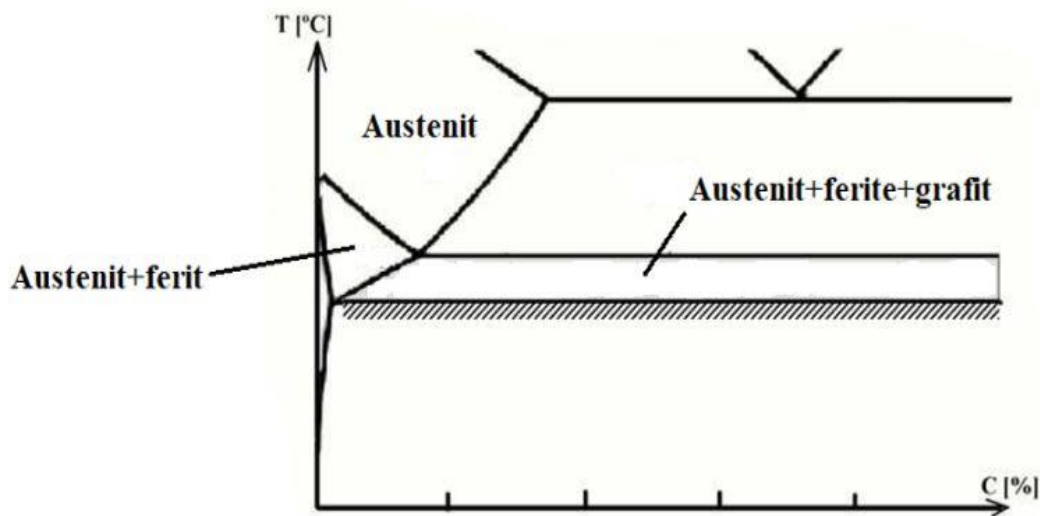
### 2.2.1 Základní prvky

Za základní prvky jsou obecně považovány uhlík, mangan, křemík, fosfor a síra. Tyto prvky jsou v jisté míře přítomny při výrobě všech slitin a mají vliv na strukturu matrice. [11;14]

- Uhlík – Má rozsáhlý vliv na strukturu a vlastnosti litin. Má poměrně malý vliv na mechanické vlastnosti. Snižuje tvrdost a pevnost ale jen lehce. Přispívá ke grafitizaci. Ve větším množství zkvalitňuje tlumící vlastnosti. Ze základních prvků nemá uhlík vliv na strukturu matrice přímo, avšak ovlivňuje množství přítomných fází feritu a perlitu. Množství těchto fází v matrici je závislé na tom jak jsou atomy uhlíku schopny se stěhovat do grafitových nodulů v průběhu ochlazování. [2;14]
- Křemík – Mimo uhlík se jedná o nejvýznamnější prvek ve struktuře litin. Přispívá ke grafitizaci. Má velký vliv na vznik feritu v matrici, zvyšuje jeho tvrdost a tepelnou vodivost litin. Ovlivňuje umístění dílčích rovnovážných teplot u stabilního i metastabilního systému. [2;4;14]
- Mangan – Ve struktuře má lehce antigrafitizační vliv při množství nad 0,5%. Funguje jako stabilizátor perlitu a zvyšuje pevnost a tvrdost. Pokud je jeho obsah nad 1% může ve struktuře vzniknout přechlazený grafit. Má velký význam při odsiřování litiny. V litině bývá v množství 0,4 až 0,8%. Při jeho nadbytku je litina je tvrdá a křehká. [2;4;14]
- Fosfor – I když je perlitotvorným prvkem, nepoužívá se tak. Jeho vliv na strukturu matrice je zanedbatelný. Naproti tomu snižuje tažnost, houževnatost, svařitelnost a má negativní vliv na pevnost odlitků. Jeho obsah by měl být co nejnižší, nejčastěji pod 0,03%. Při výrobě otěruvzdorných tvárných litin se fosfor kombinuje s mědí. Tato struktura obsahuje kromě volných částic mědi také vrstvu fosfidického eutektika, které zvyšuje otěruvzdornost těchto litin. [14;15]
- Síra – Má negativní vliv na strukturu litin. Znemožňuje grafitizaci a zapříčiňuje křehkost. Často bývá vázána na mangan. Vyšším obsahem manganu je možné vyrovnávat negativní účinky síry. U litin jakostních vlastností nesmí její obsah překročit 0,1%. [2;4;14]

### 2.2.2 Vliv chemického složení na transformaci austenitu

Mikrostruktura matrice je u litin dána způsobem přeměny, k níž dochází během ochlazování austenitické matrice v kritickém rozsahu teplot. V závislosti na jakosti litiny může být mikrostruktura matrice plně feritická, smíšená feriticko-perlitická, anebo plně perlitická. Martenzitické struktury se dosahuje tepelným zpracováním. Jakékoliv požadované mikrostruktury se dosahuje řízením přeměny austenitické fáze, která je do velké míry řízena chemickým složením. Austenitická kovová matrice se mění na jiné fáze během ochlazování pevného odlitku z bodu tuhnutí na pokojovou teplotu. Tyto fáze jsou stabilnější při nízkých teplotách. K této přeměně dochází po ochlazení austenitu pod horní kritickou teplotu 738°C (horní hranici austenitu+feritu+perlitu), jenž je zobrazena na Obr. 8. [11;14]



Obr. 8 Fázový diagram Fe-C [16].

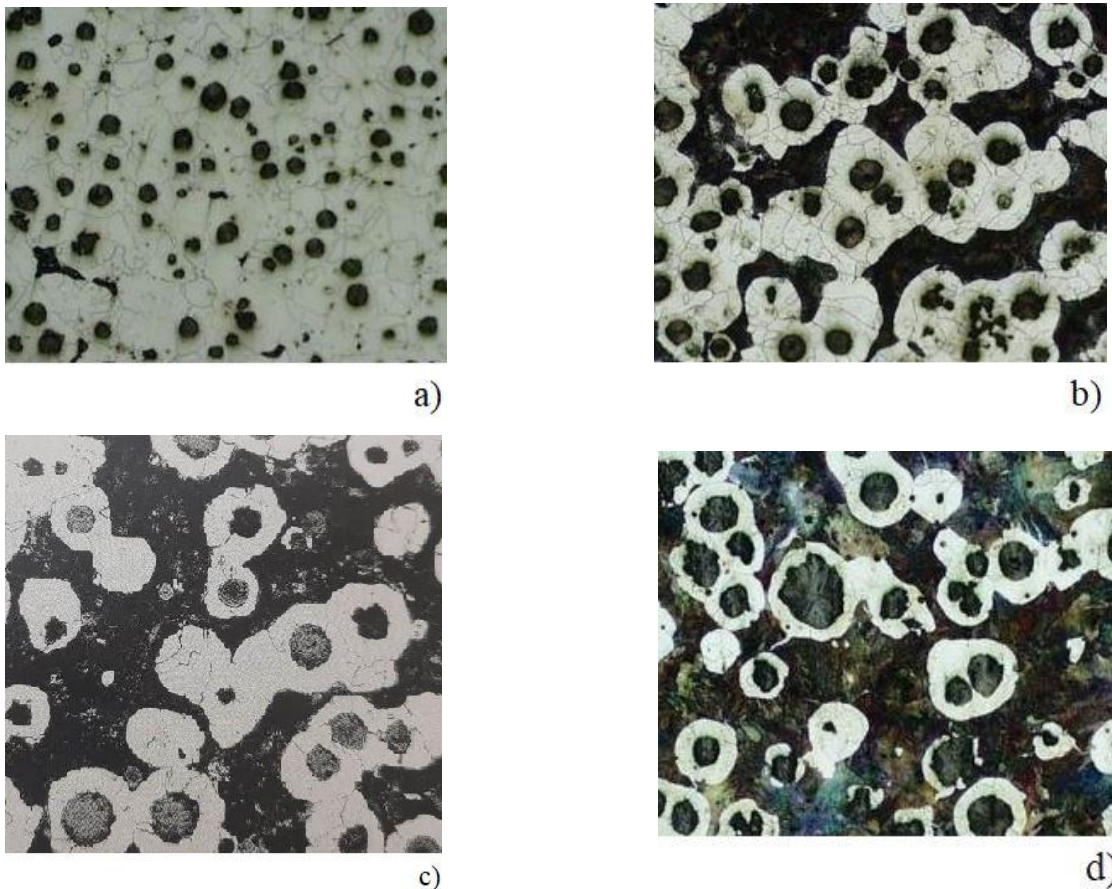
Správným řízením chemického složení můžeme dosáhnout feritické a perlitické struktury pomocí perlitotvorných legujících prvků. Správné vyvážení legujících prvků dovoluje dosáhnout rozmanitých mikrostruktur. Kterýkoliv z legujících prvků má významnou funkci během získávání různých struktur. [17]

Specifickým znakem feritické struktury je fakt, že u materiálů odlévaných s feritickou strukturou není pozorována redistribuce substitučních prvků na hranicích feritu a austenitu. Jinak řečeno ferit podědí obsah legujících prvků základního austenitu. Ve feritu se může rozpustit jen velmi nízký obsah uhlíku v porovnání se základním austenitem. V průběhu tvorby feritu se může uhlík zčásti vyloučit do austenitu, avšak grafit bude růst dále především díky difuzi uhlíku do grafitu přes feritické dvorce. Ferit zlepšuje tvárnost litin, má výbornou tažnost a dobře tlumí rázy. Vysoký obsah feritu ve struktuře snižuje tvrdost, odolnost proti opotřebení a pevnost v tahu. [17;18]

Mezi prvky podporující vznik feritu ve struktuře patří křemík, hliník a titan. U tvárných litin křemík zpevňuje ferit, avšak zvyšuje jeho křehkost. Vyšší množství křemíku v litinách má za úkol potlačit působení manganu a fosforu na tvorbu perlitu. Vliv křemíku na mechanické vlastnosti je propojen s množstvím manganu ve struktuře, protože když je obsah manganu malý, křemík navyšuje určité mechanické vlastnosti jako například pevnost v tahu a mez kluzu. [2;17]

Stejně jako u ocelí se perlit tvoří i v litinách. Perlitická struktura umožňuje skvělé spojení pevnosti a houževnatosti. Výsledná litina má vysokou pevnost, dobře odolává opotřebení, má střední tažnost a je odolná vůči nárazům. S rostoucím obsahem perlitu se zvětšuje i tvrdost matrice. Mezi perlitotvorné prvky patří mangan, měď, cín, antimon, chrom, fosfor, molybden a další. Perlitotvorné prvky se dále dají rozdělit na karbidotvorné, kam patří například chrom a vanad, a na prvky austenitotvorné jako jsou mangan a nikl. [2;17]

Výborné kombinace mechanických vlastností, obrobitelnosti a houževnatosti, je možné docílit pomocí kombinované feriticko-perlitické mikrostruktury. Menší množství feritu, jenž obstupuje grafitové noduly v perlitické matrici, má dobrý vliv na navýšení houževnatosti a pevnosti v tahu. U feriticko-perlitické matrice se dosahuje mezistupně mezi feritem a perlitem s výbornou obrobitelností a dobrou cenou. [17;18]



Obr. 9 Mikrostruktura tvárné litiny a) 100% feritická b) 60% feritu, 40% perlitu c) 50% feritu, 50% perlitu d) 30% feritu, 70% perlitu [11;17].

### 2.2.3 Řízení struktury matrice pomocí chemického složení

Vlastnosti litiny jsou dány hlavně strukturou její matrice. Převažující feritické mikrostruktury lze dosáhnout ve stavu po odlití pouze správnou kontrolou chemického složení litiny. Plně perlitické mikrostruktury se dosáhne tím, že se do litiny přidá dostatečné množství legujících prvků, jenž podporují vznik perlitu. Když je u litiny vyžadována velká pevnost, většinou je nutné tepelné zpracování pro vznik matenzitické mikrostruktury. V tom případě je nutné legování pro zvýšení kalitelnosti a pro potlačení přeměny na feritickou nebo perlitickou strukturu. Legováním lze taktéž vyrábět austenitické tvárné litiny, jenž mají stabilní austenitickou matici. [11;14]

- Podpora vzniku perlitu – Perlit ve struktuře vzniká za pomoci perlitotvorných prvků mezi něž patří Mn, Cu, Mo, Sn, P, Ni nebo Cr. [14;15]

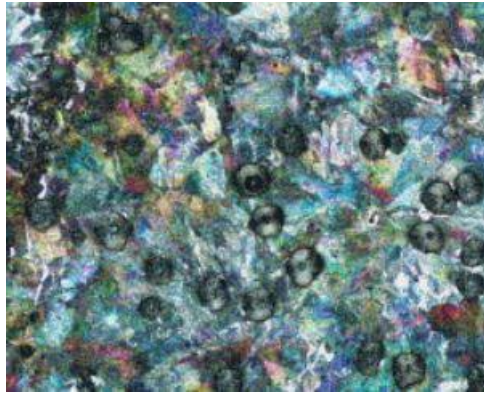
Měď působí ve struktuře perlitotvorně, nepodporuje vznik karbidů. Je prvkem grafitizačním. Je široce využívána díky svým silným perlitotvorným sklonům. Její rozpustnost v litině je maximálně 2,5%, avšak bývá omezena na 1,5%, aby neměla negativní vliv na tvárnost. Samotná měď dodává litině určitou tvrdost, ale v kombinaci například s molybdenem je účinná mnohem více. To se používá například pro zvýšení kalitelnosti litin. [11;14]

Mangan funguje jako legující prvek, který zvyšuje tvrdost a pevnost a stabilizuje a zušlechťuje perlit. Tento vliv na strukturu matrice je zjevný při nízkém obsahu manganu. U většiny perlitických odlitků je obsah manganu 0,50 až 0,70%. Mangan je při tvorbě perlitu asi pětikrát účinnější než nikl. U kalené a popouštěné litiny se používá pro zvýšení kalitelnosti. Pokud obsah manganu přesáhne 0,80% lze strukturu považovat za karbidickou. [11;14]

Cín podporuje vznik perlitu velice silně, protože se hromadí hlavně na povrchu grafitu a tím brání difuzi uhlíku, což zabraňuje tvorbě feritické struktury. Litina s obsahem manganu 0,20%, jejíž struktura, by byla po odlití feritická, bude mít po přidání 0,05% cínu zcela perlitickou strukturu s pevností v tahu asi 700MPa, tažností 4,6% a tvrdostí 260HB. Tvrdost, pevnost v tahu a mez kluzu se zvyšují s rostoucím obsahem cínu až do 0,07%. Pokud je přítomna měď, je nárůst výrazný méně. [11;15]

Měď a cín jsou nejúčinnějšími a nejekonomičtějšími prvky pro podporu tvorby perlitu v matici během odlévání. Cín je z hlediska účinnosti výhodnější, avšak jeho obsah ve struktuře by neměl být větší než 0,05% aby nevznikal vločkový grafit. Oproti tomu bezpečný obsah mědi je až do 2%, což se přibližuje hranici její rozpustnosti, avšak tu lze zvýšit legováním niklem. To se ale dělá jen zřídka kdy, protože je to drahé a málokdy nutné. [14;15]

Prvky jako arsen a antimon také silně podporují vznik perlitu a také jsou silně grafitotvorné. Protože mají velký vliv na tvar grafitu je jejich vliv na strukturu matrice diskutabilní. Plně perlitickou strukturu lze vidět na obrázku 10. [14;15]



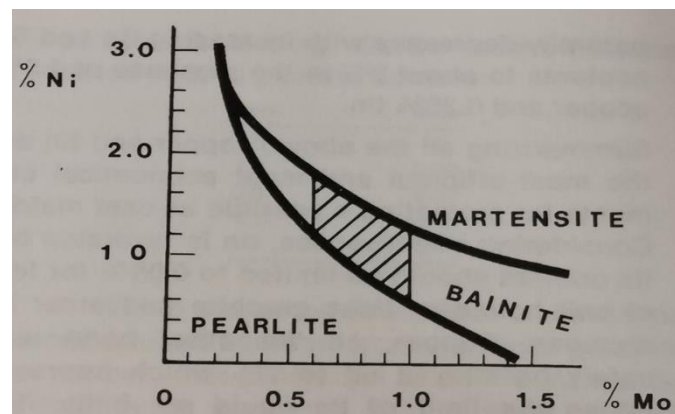
Obr.10 Plně perlitická mikrostruktura tvárné litiny [19].

- Zlepšení vlastností za vysokých teplot – Molybden je prvkem perlitotvorným, avšak pro tento účel se málokdy používá samotný. Na druhou stranu se velmi často v litinách používá pro zlepšení mechanických vlastností za vysokých teplot. Obdobně působí nikl, který je skoro vždy doprovodným prvkem při legování molybdenem. Legování tvárné litiny molybdenem při obsahu 2,0% významně zvyšuje její pevnost za vysokých teplot, a také odolnost proti tečení. Nicméně tento obsah má špatný vliv na tažnost u odlitků vyšší hmotnosti, a proto se obsah molybdenu omezuje na 0,5 až 1%. Snížením molybdenu v litinách se docílí legováním niklem v obsahu 1,0 až 2,0%. Toto legování se musí provádět za velké opatrnosti, jelikož kombinace niklu a molybdenu může zapříčinit tvorbu martenzitické struktury. [14;15]

Legování litiny 15% kobaltu ve spojení s 0,9% molybdenu nebo 1,5% niobu zvyšuje mez kluzu za vysokých teplot na 290MPa při teplotě asi 500°C. Přitom se snižuje tažnost na 1 až 2%. [14;15]

Litiny s obsahem křemíku v rozmezí 3,5 až 7% jsou odolné vůči oxidaci za vysokých teplot. Optimum z tohoto rozmezí závisí na provozní teplotě. Odlitky s vysokým obsahem křemíku jsou odolné proti oxidaci až do teploty 800°C. Pro provoz za mírně zvýšených teplot stačí 3,5 až 5% křemíku. [14;15]

- Podpora vzniku bainitu – Bainitickou matici je možno získat buď litím, nebo izotermickým zušlechťováním. V obou případech se litina leguje kombinací prvků molybdenu a niklu. Pro odlitky velkých hmotností se volí vyšší obsah niklu. V tom případě je potřeba nechat odlitek ve formě zchladnout alespoň na teplotu 200°C či nižší. U odlitků s tenčí tloušťkou stěny než je 25mm je těžké získat bainitickou strukturu litím, proto se takto tenké odlitky raději tepelně zpracovávají izotermickým zušlechťováním. [14;15]



Obr. 11 Kombinace molybdenu a niklu pro odlitky s bainitickou strukturou [15]

Vlastnosti litin se mění v závislosti na teplotě, při níž dochází k přeměně austenitu na bainit. Přeměna za vysokých teplot podporuje vysokou tažnost a také mírně pevnost. U nízkoteplotní přeměny je to naopak. Tyto extrémy jsou označovány jako horní a dolní bainit. Někdy může být část molybdenu nahrazena dvojitým množstvím wolframu. [15]

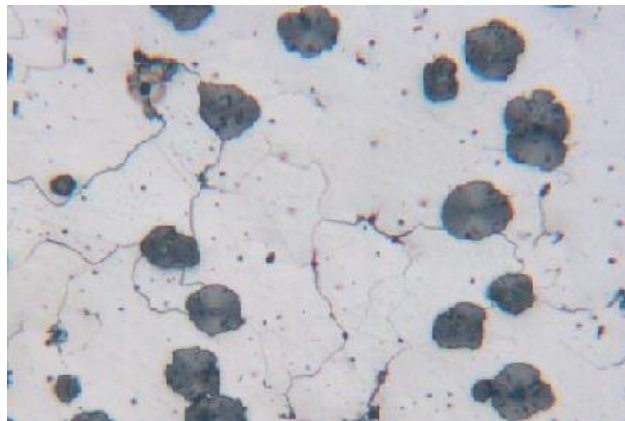
- Další legující prvky a jejich kombinace – Zvláštností je že mangan v kombinaci s fosforem přispívá ke vzniku perlitu, avšak tento efekt, jenž vzniká jejich spojením, je odstraněn vlivem křemíku. [19]

Větší obsah uhlíku a křemíku a zároveň i hořčík ve spojení s křemíkem mají za následek navýšení počtu grafitových nodulů. Chrom podporuje vznik perlitu v matrici, ale tento jeho efekt záleží na množství nodulů, tudíž vliv chromu v litinách je závislý na množství uhlíku a křemíku ve struktuře. Menší množství křemíku ve struktuře navyšuje u litin pevnost v tahu. [19]

Prvky jako nikl, měď a molybden, jenž mají vliv na pevnost, tvrdost a korozivzdornost, se musí do struktury přidávat obezřetně, jelikož v momentu jejich přidání jsou schopny mít velký vliv na strukturu matrice. [19]

Dusík je prvkem perlitotvorným. V litinách se aplikuje v podobě kyanamidu vápenatého nebo dusíkatého feromanganu. Dusík má za následek tvorbu děr, proto se jeho množství musí kontrolovat. Když přesáhne mez rozpustnosti 0,008 až 0,009% je možné očekávat jeho pórovitost. [19]

Chrom, molybden a hliník po jejich přidání do litiny s austenitickou matricí, jenž byla legována niklem manganem a mědí, vedou ke zvýšené tvorbě tvrdých míst, avšak menší přídavek hliníku tuto vlastnost mírně omezuje. Přídavek chromu a molybdenu zmenšil termodynamickou stabilitu austenitu, a ještě s přídavkem 0,4% hliníku měl odlitek jednu z nejvyšších pevností v tahu. [20]



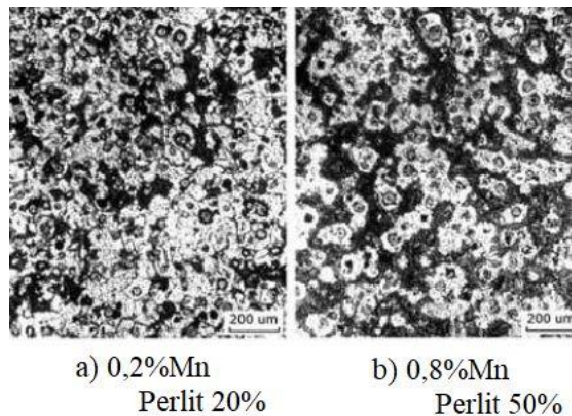
Obr. 12 mikrostruktura austenitické tvárné litiny [21]

Pokud je prvek sám, neúčinkuje tak dobře jako v kombinaci s dalšími prvky. Kvůli tomu účinnost pro získání lepších vlastností odlitku závisí na celém souboru legujících prvků. Správnou rovnováhou legujících prvků je možné docílit požadované mikrostruktury a mechanických vlastností a perfektně nahradit procesy tepelného zpracování. [19]

### 2.2.4 Vliv Mn a Cu na strukturu a vlastnosti litin

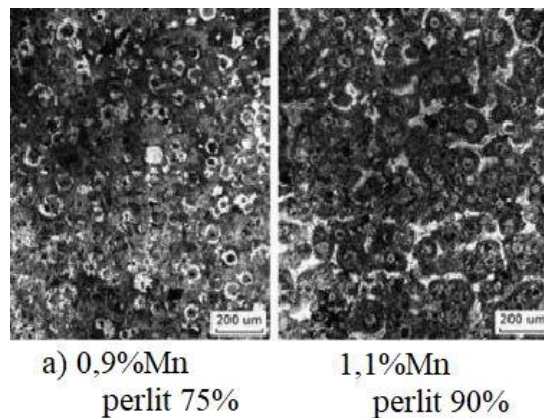
Mangan je silný perlitotvorný prvek, jenž se do litiny přidává vždy pro zvýšení pevnosti, avšak při vysokém obsahu manganu má litina často nedostatečnou plasticitu. Kvůli tomu by se měla hladina manganu regulovat na přiměřené rozmezí, aby se zaručilo, že pevnost a plasticita budou současně splňovat stanovené požadavky. V praxi jsou pro určení množství manganu využívány některé z empirických hodnot. [22]

Se zvyšujícím se obsahem manganu ve struktuře litin roste pevnost v tahu, průměrná tvrdost a obsah perlitu v matrici, avšak tažnost klesá. Pokud je obsah manganu větší než 0,9% je možné vyrobit litinu vysoké pevnosti a tvrdosti, avšak tažnost je při tomto obsahu nízká. Když je obsah manganu nižší než 0,8% je možné docílit litiny vysoké tažnosti, ale nedostačující pevnosti. Během zvýšení obsahu manganu z 0,2% na 0,8% se perlit ve struktuře zvýšil z 20% na pouhých 50%. Tuto strukturu je možné vidět na obr. 13 a) a b). V tomto případě je dominantní fází v matrici ferit. Mangan se rozpouští ve feritu a stává se jeho zpevňující fází. To je hlavním příčinou zvýšení pevnosti. [22]



Obr. 13 LKG s různým obsahem manganu [22].

Pokud obsah manganu překročí množství 0,9%, obsah perlitu ve struktuře se začne prudce navyšovat. Příčinou tohoto navýšení jsou probíhající reakce mezi Mn, Fe a C, které vedou ke vzniku ledeburitického cementitu  $\text{FeMn}_3\text{C}$  v matrici. Ten se nakonec promění na drobné částice perlitu, jenž se rozptýlí po celém odlitku. Tyto částice významně zvyšují pevnost a tvrdost. Při vysokém obsahu manganu je velký problém kvůli segregaci manganu na hranici zrn. To vede k tvorbě velkého množství karbidu na hranici zrn. Mimo to narušuje segregace stabilitu přechlazeného austenitu a do určité míry brání procesu nodularizace grafitu. Kvůli tomu se v tomto případě prudce snižuje plasticita tvárné litiny. Struktura je na obrázku 14.a) a b). [22]



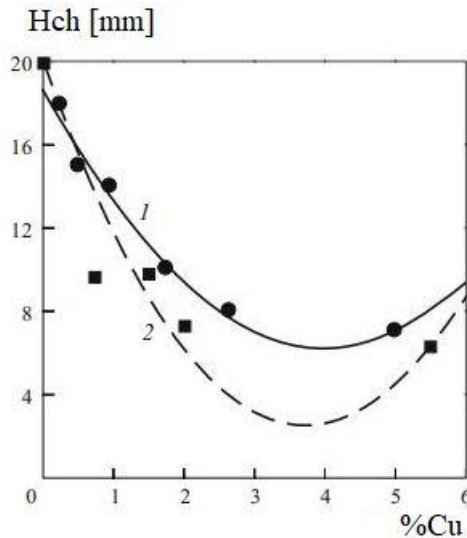
Obr. 14 LKG s vyšším obsahem manganu [22].

Měď je jeden z primárních legujících prvků v litinách. Má značný vliv na jejich strukturu a vlastnosti. Zvyšuje tvrdost, odolnost proti korozi a opotřebení a také má výborné antifrikční účinky. V oblasti ochrany proti tření má měď velkou důležitost u antifrikčních litin, které mají vysoký obsah mědi. [23;24]

Měď je prvkem grafitizačním. Během eutektické transformace litin podporuje odstraňování ledeburitického chladnutí a rozpad eutektické struktury. Také zvyšuje množství perlitu ve struktuře a posiluje stabilitu a disperzitu eutektoidního cementitu. Rovněž značně ovlivňuje mechanické vlastnosti litin. Zpevňuje perlit a tím navyšuje pevnost a tvrdost litin. Mikrotvrdost perlitu, jenž je legován mědí dosahuje 600 až 700HV nebo i vyšší, ale mechanismus takového zpevnění nebyl dosud stanoven. Spojení zpevněného perlitu s obsahem mědi, značně ovlivňuje tribologické vlastnosti litin. V současné době je litina se zvýšeným obsahem mědi přes 1,5% využívána v různých součástech tribologických zařízení. [23;24]

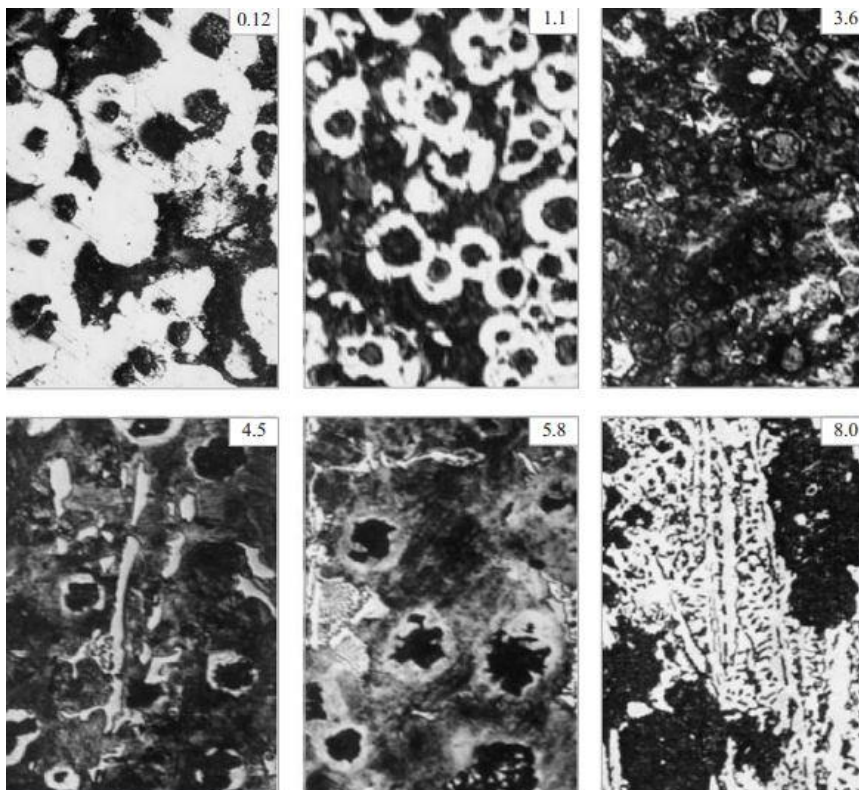
Měď podporuje stabilizaci a zjemňování perlitu. Do určité míry to souvisí s tím, že měď zvyšuje stabilitu austenitu a posunuje perlitickou přeměnu do oblasti nižších teplot. Stabilita eutektoidního cementitu je výsledkem termokinetiky, jenž doprovází fázové přeměny v litinách a ocelích legovaných mědí. Zvláštní vlastnosti perlitu vytvořeného mědí jsou vysvětlitelné jeho třífázovou strukturou. Analýza mechanismu vzniku třífázového měděného perlitu ukazuje, že cementitové destičky vzniklé při eutektoidní přeměně vytlačují měď, jež se hromadí na hranicích mezi cementitovými a feritovými vrstvami obalujícími cementitové destičky. Perlit vzniklý v litině legované mědí se tedy skládá z cementitových destiček, tenkého obalu měděné  $\epsilon$ -fáze a feritových vrstev. Hlavní mechanismus perlitotvorného působení mědi má spíše kinetickou než termodynamickou povahu a spočívá ve vytlačování mědi destičkami krystalizujícího perlitického cementitu a tvorbě tenké vrstvy měděné  $\epsilon$ -fáze na těchto destičkách, jenž je pro uhlík v podstatě nerozpustná a tak výrazně stabilizuje strukturu perlitu. [23]

Měď je prvkem grafitizačním. Špatně se rozpouští v cementitu a hlavně v jeho vysokoteplotních typech primárním a eutektickém. Zjemňuje eutektickou strukturu během krystalizace. V intenzitě grafitizačního působení je měď horší než křemík, avšak jsou případy, kdy je její využití jako grafitizačního prvku výhodnější než křemík. Grafitizační účinek mědi se může měnit v závislosti na jejím množství a chemickém složení litiny s ohledem na ostatní prvky. Měď má i opačný tzv. chladící účinek. Určení hranice koncentrace mědi v litině, při níž dojde ke změně jejího grafitizačního účinku na chladící, bylo zkoumáno v experimentu. Křivka 1 ukazuje výsledky ochlazování litiny s vločkovým grafitem a křivka 2 známá data. Při ochlazování litiny s vločkovým grafitem (obr. 15) je vidět, že se obě křivky chovají podobně a měď má nejvyšší grafitizační účinek, když je v kovu obsažena v množství do 2%. V rozmezí 2 až 3% je grafitizační účinek mnohem menší. Při 3 až 4% je stejný (neměnný). Při 4% mají obě křivky inflexi, jenž naznačuje změnu povahy účinku mědi. To naznačuje, že se jedná o obsah, jenž je možné považovat za hranici, kdy je grafitizační účinek nahrazen chladícím. V počáteční části křivky 2 je účinek mědi intenzivnější než u křivky 1. To je nejspíš způsobeno odlišnými podmínkami experimentů. [23]



Obr. 15 Vliv obsahu mědi na její chladicí efekt (Hch – chladicí hloubka) [23].

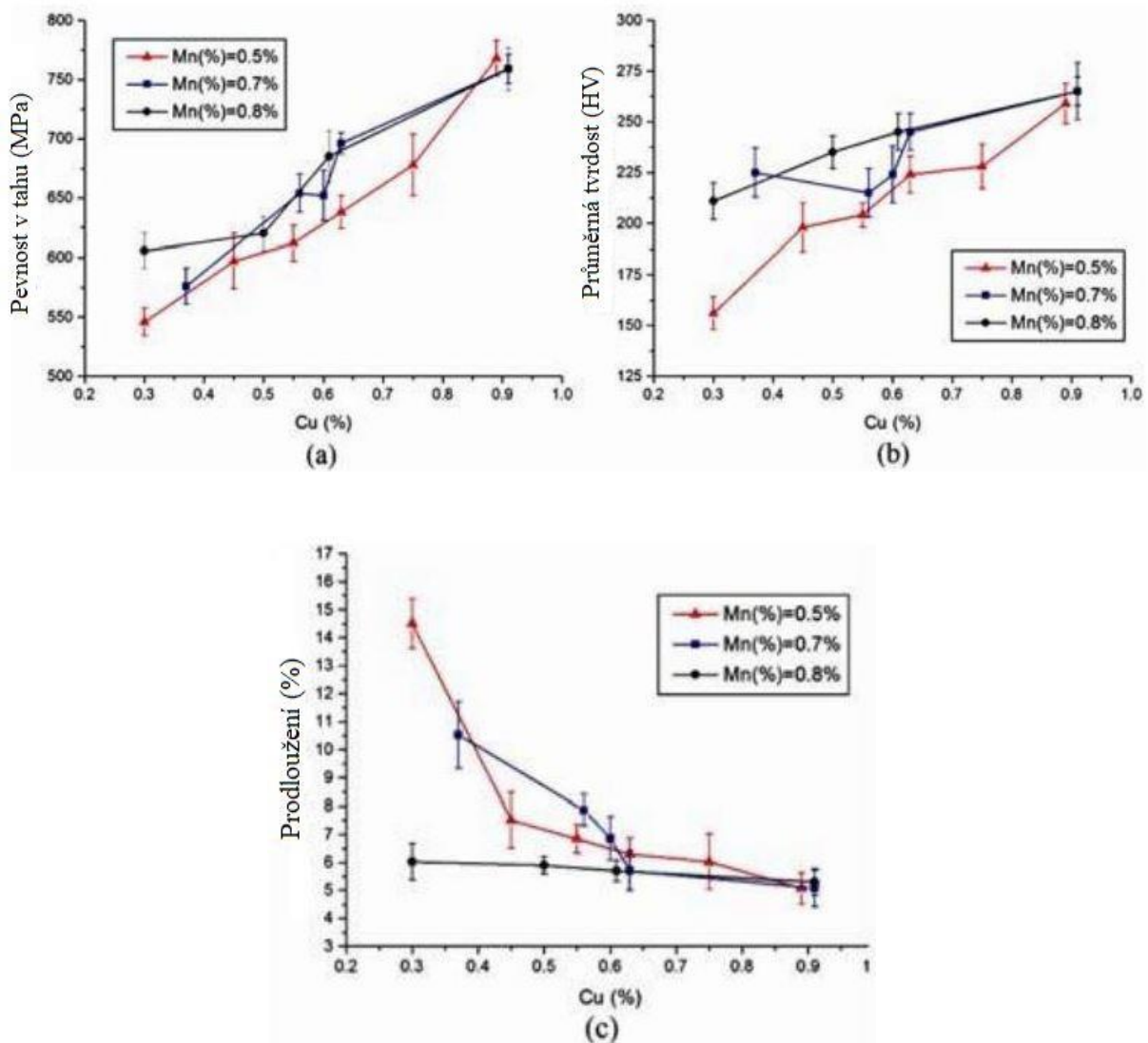
Pár vzorků s různým obsahem mědi bylo zkoumáno za pomoci metalografické analýzy (obr. 16). Jak je možné vidět na vzorcích, se zvyšujícím se obsahem mědi roste množství perlitu ve struktuře. Při obsahu mědi 4 až 4,5% začínají vznikat inkluze sekundárního a eutektického cementitu. Při zhruba 6% mědi jsou vidět jednotlivé inkluze cementitu a při 8% kov krystalizuje s převahou ledeburitické struktury. U tvárné litiny je tedy hranice počátku chladícího účinku mědi 4%. [23]



Obr. 16 Struktura tvárné litiny s různým obsahem mědi [23].

V jednom experimentu bylo odlito několik vzorků Y bloků z tvárné litiny s rozdílným obsahem manganu a mědi. Finální mechanické vlastnosti vzorků lze vidět na obr. 16 (a) - (c). Z výsledků, jež jsou uvedeny na obrázku 17 a) a b) vyplývá, že průměrná tvrdost a pevnost v tahu se zvyšuje při stejném obsahu manganu s rostoucím obsahem mědi. V litině s nízkým obsahem manganu má měď mnohem výraznější zpevňující schopnost, než v litině s vysokým obsahem manganu. [22]

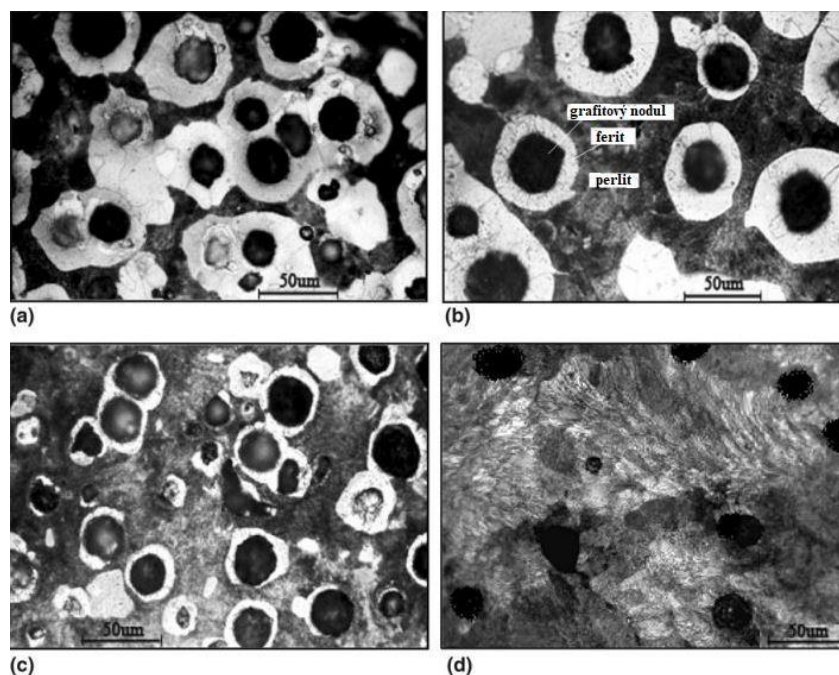
Obr. 17 c) ukazuje, jak obsah mědi ovlivňuje tažnost při různém množství manganu. Je patrné, že s rostoucím obsahem mědi se tažnost snižovala u všech hladin manganu. U litiny legované 0,5% Mn se tažnost snížila z 14,5% na 7,5%, při zvýšení obsahu mědi z 0,3% na 0,45%. Avšak u litiny legované 0,7% Mn, tažnost klesla z 6,1% na 5,5% při zvýšení mědi z 0,3% na 0,9%. Při dosažení 0,8% Mn nemůže tažnost překročit 6% bez ohledu na obsah mědi. Vliv mědi na tažnost je malý při stejném obsahu manganu, když je obsah mědi vyšší než 0,6%. Z toho vyplývá, že tažnost je mnohem citlivější na obsah mědi při nízkém obsahu manganu, než při vysokém obsahu manganu a míra citlivosti rychle klesá při obsahu mědi vyšším než 0,6%. [22]



Obr. 17 Mechanické vlastnosti litiny při různém obsahu mědi a manganu [22]

V jiném experimentu byl rozebírán vliv účinku přídavku manganu až do 1% v kombinaci s 0,5 až 1% mědi na mikrostrukturu odlitku. Byly odlity čtyři vzorky (a)-(d), které je možné vidět na obrázku 18. [25]

Mikrostruktura slitin a), b) a c) je převážně perlitická s feritem ve tvaru dvorce, jenž obklopuje grafitové noduly. Slitina d) však nevykazuje žádný volný ferit okolo uzlíků. Mangan a měď patří mezi perlitotvorné prvky. Postupné zvyšování množství těchto prvků, ať už jednotlivě nebo v kombinaci ze slitiny a) do slitiny d) vedlo k tomu, že ve slitině a) a d) se zvýšil obsah perlitu. Při zvýšení obsahu manganu z 0,45% ve slitině a) na 0,82% ve slitině b) se jen nepatrně změnil obsah perlitu. Ve slitině c) a d) se podíl volného feritu ztateně snížil. Ve slitině d), jenž byla legována 1% manganu a 1% mědi se prakticky nevyskytoval žádný volný ferit. Zvýšení obsahu mědi ve slitině d) z 0,5% na 1% vedlo k poklesu počtu nodulů. Ukazuje se, že měď a její úloha při podpoře tvorby perlitu ve struktuře je velmi důležitá, avšak pouze tehdy pokud je kombinována alespoň s nízkým přídavkem manganu. [25]



Obr. 18 Mikrostruktury litiny s různým obsahem manganu a mědi [25]

slitiny	procentuální objem grafitu	počet grafitových uzlíků	nodularita
A	14	115	> 85
B	16	110	> 85
C	16	180	> 85
D	20	130	> 85

slitiny	procento feritu	procento perlitu
A	20	66
B	20	64
C	10	74
D	špetka	80

Obr. 19 Štítky ukazující procentuální objem grafitu a procento jednotlivých fází v matrici slitin [25]

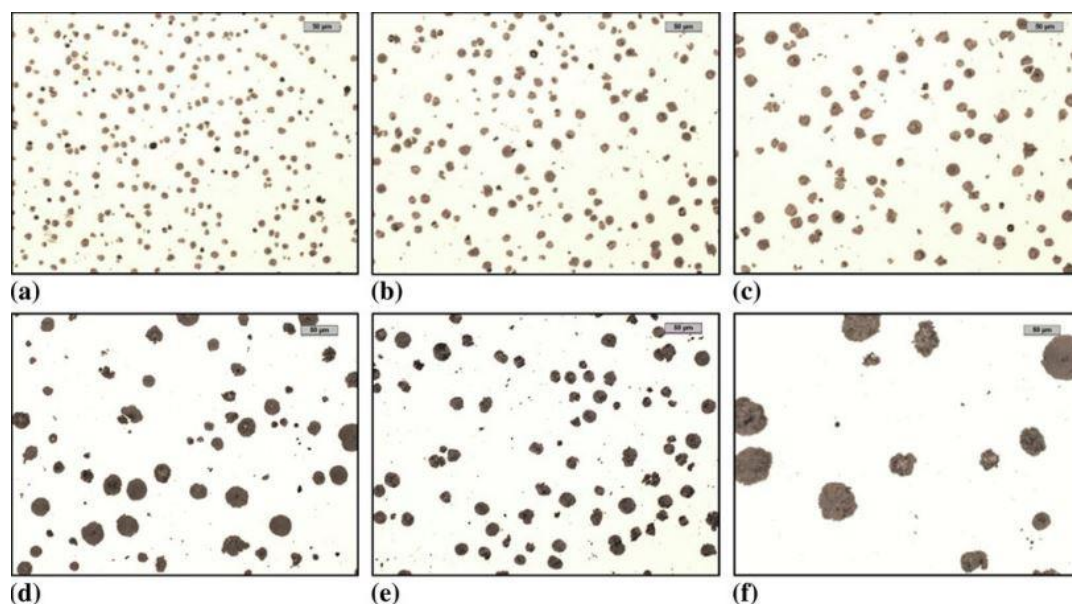
### 2.3 Vliv rychlosti ochlazování na strukturu litin

Rychlost ochlazování v kritickém teplotním rozsahu má obrovský vliv na to jaký typ mikrostruktury v litině vznikne. Při dostatečně dlouhé době chlazení v transformační oblasti vznikne plně feritická struktura. Při rychlejším ochlazování vzniká perlitická struktura. Litiny se stejným chemickým složením můžou mít velice odlišnou strukturu matrice od převážně perlitické po převážně feritickou a to je zapříčiněno řízením rychlosti ochlazování odlitku ať už ve formě nebo mimo formu. Avšak jednoduchost a přesnost řízení struktury matrice v průběhu ochlazování je velkou měrou dána chemickým složením. [11;14]

U nelegovaných tříd litin není austenit za pokojové teploty stabilní, proto se musí přeměnit na jinou krystalickou fázi železa a tou je ferit. Tato přeměna musí proběhnout za teploty nižší než 723°C. Uhlík má nulovou rozpustnost ve feritu, takže při přeměně není přijat. Za dobrých podmínek a během pomalé rychlosti ochlazování všechnen uhlík migruje do grafitových nodulů a stane se jejich součástí. [15]

Rychlé ochlazení neumožní migraci uhlíku, ale uhlík je ve feritu nerozpustný a austenit se musí přeměnit. Uvnitř austenitu se vytvoří velice tenké destičky karbidu železa. Ty přerušují kontinuitu a střídají se s destičkami feritu a tím vytváří perlitickou strukturu. [15]

Na rychlost ochlazování má velký vliv tloušťka stěny odlitku. Se zmenšující se tloušťkou stěny roste rychlost ochlazování. Navýšení ochlazovací rychlosti má významný vliv na strukturu odlitku. Grafit a struktura matrice se zjemní, čímž se zvýší tvrdost a sníží pevnost a obrobitelnost. Vysoká rychlost ochlazování u tenkostěnných odlitků se snižuje pomocí formovacích materiálů, které mají nízký koeficient schopnosti materiálu absorbovat teplo. Ty zásadně snižují rychlost ochlazování. To znamená, že rychlost ochlazování ovlivňuje mimo tloušťku stěny, zejména schopnost materiálu formy absorbovat teplo. Změna písku na písek izolační výrazně zmenšuje rychlost ochlazování, čímž se navýší množství feritu v matrici. Podíl feritu u odlitku tloušťky 2mm dosažený použitím izolačního písku je obdobný podílu feritu dosaženém u odlitku tloušťky 13mm s využitím křemičitého písku. Výslednou mikrostrukturu je možné vidět na obrázku 20. [26]

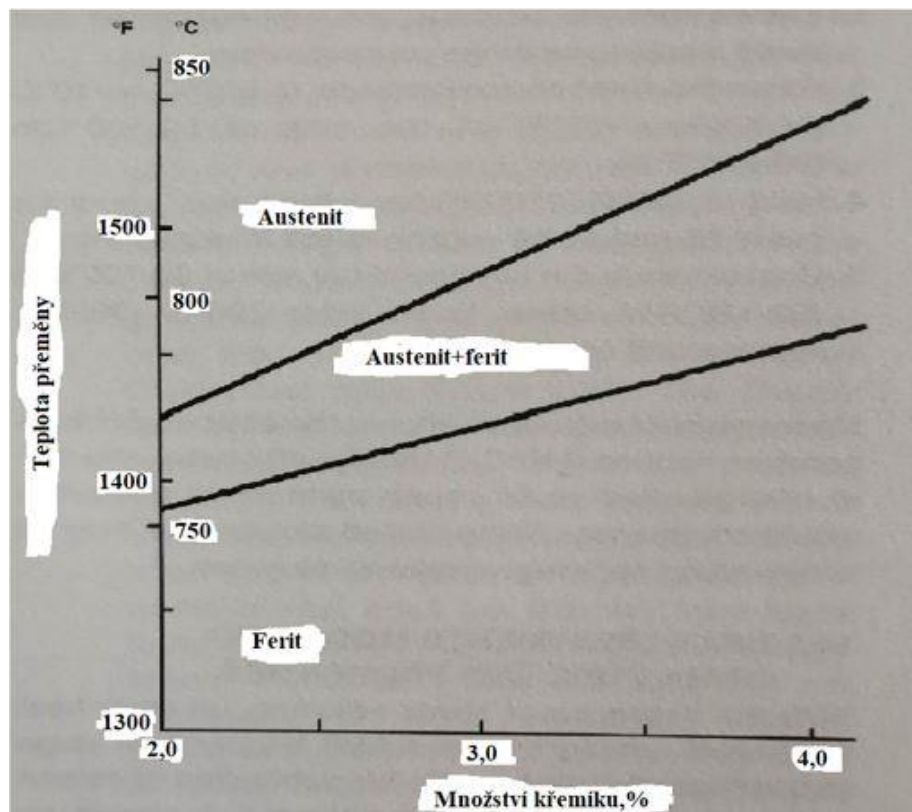


Obr. 20 Mikrostruktura LKG s rozdílnou tloušťkou stěny a) 2mm b) 3mm c) 5mm d) 13mm e) 2mm f) 13mm [26].

## 2.4 Vliv tepelného zpracování na strukturu a vlastnosti litin

Kontrola nad mikrostrukturou a vlastnostmi litin, která je možná během odlévání, umožňuje ve většině případů vyhnout se tepelnému zpracování a s tím spojených nákladů. Feritickou nebo perlitickou litinu standardních jakostí lze ve slévárnách vyrábět bez následného tepelného zpracování. Avšak stále existují situace, kdy je vhodné nebo nevyhnutelné určitě tepelné zpracování použít. Mezi základní druhy tepelného zpracování patří žíhání, kalení nebo zušlechťování. [2;11;14;27]

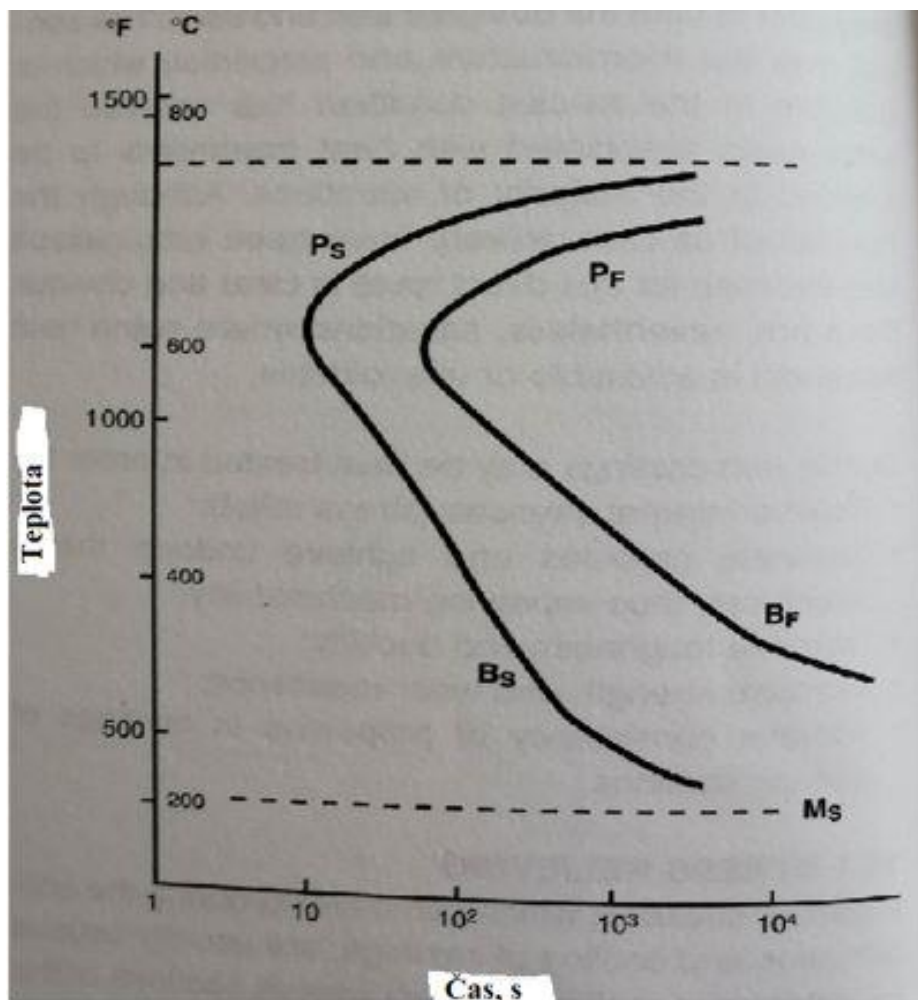
Kromě žíhání ke snížení pnutí zahrnují všechny ostatní druhy tepelného zpracování fázi vysoké teploty (austenitizace) během níž se znatelně mění rozložení uhlíku v matrici. Vysoký obsah uhlíku a křemíku ve srovnání s ocelí vede ke značným rozdílům v reakci na tepelné zpracování. Kritická teplota roste se zvyšujícím se obsahem křemíku, jak je možné vidět na obrázku 21. Množství uhlíku v matrici určuje její konečnou tvrdost. Čím je vyšší, tím je vyšší i tvrdost. Vyšší obsah uhlíku také zlepšuje kalitelnost a umožňuje tak tepelně zpracovávat odlitky velkých hmotností bez nutnosti nákladného legování. Naopak může uhlík ve větším množství způsobovat vznik prasklin během kalení. Proto se při tepelném zpracování kontroluje složení odlitku, teplota austenitizace a podmínky kalení. Vyšší obsah křemíku vede ke snížení rozpustnosti uhlíku v austenitu. Během pomalého ochlazování s rostoucím obsahem křemíku se proto uhlík snáze vyloučí ve formě grafitu, čímž podporuje tvorbu feritu. Grafitové noduly fungují jako zdroje, odkud může uhlík difundovat do okolní austenitové matrice během ohřevu, a naopak jako místa, kam může uhlík difundovat během pomalého ochlazování. Křemík napomáhá difuzní pohyblivosti uhlíku během těchto sekvencí. Obsah uhlíku v matrici je ovlivněn množstvím křemíku a tepelnou historií odlitku. [14;27]



Obr. 21 Graf rozsahu teplotní transformace feritu a austenitu v závislosti na obsahu křemíku [14].

Řízení přeměny austenitu v průběhu ochlazování je základem pro většinu tepelných úprav, které se používají u litiny. V závislosti na rychlosti ochlazování a chemickém složení se austenit rozpadá procesem difuze uhlíku na ferit, perlit nebo bainit. Při rychlejších ochlazování se mění bezdifuzním smykovým mechanismem na martenzit. Přeměnu austenitu na tyto různé fáze lze nejlépe popsat pomocí izotermických transformačních diagramů, jenž lze vidět na obrázku 22. Z diagramu je patrné, že při pomalém ochlazování pod dolní kritickou teplotu se austenit rozkládá na ferit, přičemž uhlík se ukládá jako grafit na povrchu litiny. To je základem tepelného zpracování, jenž se nazývá feritizační žihání. S vyšší rychlostí ochlazování se zkracuje doba difuze uhlíku a austenit se rozpadá na perlit. To je základem normalizačního žihání. Při ještě větší rychlosti ochlazování se může austenit přeměnit na jehlicovitou bainitickou strukturu, což vede ke zvýšení tvrdosti a pevnosti. Během velmi rychlého ochlazování je čas pro difuzi uhlíku tak omezený, že se austenit transformuje na martenzit smykovým mechanismem. Částečné nebo zcela martenzitické struktury se dosahuje pomocí kalení. [14;27]

Smíšené austeniticko – bainitické struktury se dosahuje pomocí izotermického kalení. To se používá hlavně u tvárné litiny. Litina, jenž má bainitickou strukturou má pevnost v tahu 800 až 1400 MPa. Ochlazovací prostředek je zvolen dle kritické rychlosti ochlazování. Může to být horký olej, solná lázeň nebo proudící vzduch. Kritická rychlost ochlazování se u silnostěnných odlitků reguluje pomocí legování niklem, molybdenem nebo mědí. Množství manganu by mělo být co nejmenší, protože při větším množství oddaluje transformaci bainitu. [14;27]



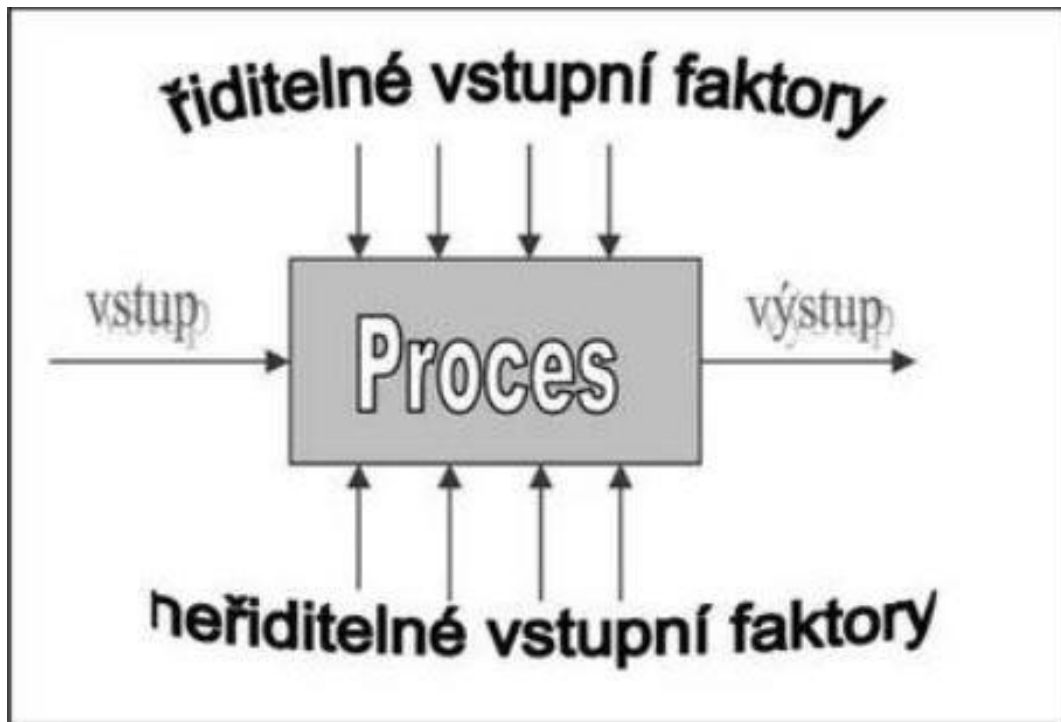
Obr. 22 Teplotní transformační diagram pro nelegovanou LKG [14].

### 3 PLÁNOVANÝ EXPERIMENT (DOE)

Anglicky Design of Experiments. Jedná se o obor matematické statistiky, který se zabývá shromažďováním dat ve stavu, kdy je informace, kterou se snažíme získat, z velké části založena na náhodnosti. DOE se používá pro zkoušení úloh, u nichž je finální výsledek určen kombinací spousty faktorů. DOE je vytvořeno na zkoušení kombinací různorodých úrovní faktorů. Díky DOE se sníží množství testovaných kombinací pouze na ty, které jsou významné. [28;29]

Pomocí DOE se dají vytvářet například predikce nebo rovnice. Mezi jeho cíle patří kvantifikování kvality, získání ideální úrovně pozorovaného znaku a redukce variability hodnot pozorovaného znaku. Mezi jeho výstupy patří zhodnocení důležitosti rozličných vlivů, získání vzájemné interakce vlivů a objevení ideálních podmínek. Průběh plánovaného experimentu je možné vidět na obrázku 23. [30]

Plánovaný experiment bude proveden v praktické části práce.



Obr. 23 Průběh plánovaného experimentu [31]

## 4 PRAKTICKÁ ČÁST

Dalším cílem práce je provést experiment ověřující vliv manganu a mědi na strukturu a mechanické vlastnosti litiny. Na posouzení vlivu těchto dvou prvků byl navrhnut plánovaný experiment (DOE). Tavenina byla připravena v elektrické indukční peci. Bylo odlито 6 vzorků ve třech tavbách. Byla odlévána LLG ve tvaru bloků Y2. Jako formovací směs byla použita samotuhnoucí směs s pojivem geopol. Tyto vzorky lze vidět na obrázku 24. Jediné co bylo u vzorků v plánovaném experimentu měněno byl obsah manganu a mědi.

Všechny kombinace těchto dvou prvků, které byly v experimentu použity jsou popsány v Tab.1. Mangan ve vzorcích se pohybuje v rozmezí 0,15% na spodní hranici až 0,89% na horní hranici a měď mezi 0% na spodní hranici až 1,33% na horní hranici. Do prvního vzorku 1A nebylo přidáno žádné množství ani jednoho z prvků. Do druhého vzorku 1B byl přidán mangan na horní hranici 0,8% a měď žádná. Vzorky 2A a 2B byly oba legovány na střední hodnotě obou prvků tj. 0,4% manganu a 0,65% mědi. V plánovaném experimentu se tyto dvě tavby označují jako centrální bod. Do tavby 3A byla přidána měď na horní hranici 1,3% a mangan žádný. A do poslední tavby byly přidány oba prvky na horní hranici tj. 0,8% manganu a 1,3% mědi. Výsledné chemické složení odlitých vzorků je popsáno v Tab.2.



Obr. 24 Odlité vzorky

Tab. 1 Obsah Mn a Cu v dílčích tavných

tavba	% Mn	% Cu
1A	0	0
1B	0,8	0
2A	0,4	0,65
2B	0,4	0,65
3A	0	1,3
3B	0,8	1,3

Tab. 2 Výsledné chemické složení odlitých vzorků

Vzorek	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cu
1A	3,30	1,90	0,13	0,010	0,013	0,02
1B	3,18	1,86	0,85	0,012	0,016	0,02
2A	3,22	2,18	0,41	0,033	0,042	0,73
2B	3,15	2,21	0,47	0,033	0,043	0,72
3A	3,21	2,17	0,18	0,012	0,013	1,33
3B	3,07	2,10	0,89	0,011	0,015	1,33

#### 4.1 Mechanické vlastnosti

Po odlití byly vzorky vytlučeny z forem a nařezány na pásové pile na pásky tloušťky 20mm. Tyto pásky byly posléze řezáním zkráceny na délku 50mm a je možné je vidět na obrázku 25. U vzorků byla měřena výsledná tvrdost.



Obr. 25 Nařezané vzorky

Tvrdość byla měřena podle Brinella na tvrdoměru LECO LCB. U každého vzorku byly provedeny 4 vtisky. Po provedení měření byla z každého vtisku odečtena tvrdost na světelném mikroskopu Neophot 32 v softwaru QuickPHOTO INDUSTRIAL 3.2. Tyto hodnoty byly zprůměrovány a jsou uvedeny v Tab.3.

Tab. 3 Výsledná tvrdost měřených vzorků

Vzorek	1A	1B	2A	2B	3A	3B
1.	159 HB	160 HB	196 HB	202 HB	187 HB	212 HB
2.	155 HB	165 HB	200 HB	206 HB	186 HB	206 HB
3.	153 HB	170 HB	206 HB	207 HB	183 HB	203 HB
4.	154 HB	172 HB	207 HB	214 HB	178 HB	199 HB
$\bar{x}$	<b>155 HB</b>	<b>167 HB</b>	<b>202 HB</b>	<b>207 HB</b>	<b>184 HB</b>	<b>205 HB</b>

Ukazuje se, že nejvyšší tvrdost 207 HB má vzorek 2B do něhož byl během tavby přidán mangan a měď na střední hodnotě. Vzorek 2A do něhož bylo během tavby přidáno stejné množství manganu a mědi jako do vzorku 2B má tvrdost o něco málo nižší 202 HB. Množství manganu a mědi je u vzorku 2B 0,47% Mn a 0,72% Cu a u vzorku 2A 0,41% Mn a 0,73% Cu. Pokud z těchto dvou prostředních hodnot uděláme aritmetický průměr, dostaneme průměrnou tvrdost 205 HB, což je stejná tvrdost jako u vzorku 3B.

Nejvyšší tvrdosti 205 HB dosahuje společně se vzorky 2A a 2B vzorek 3B, jenž byl v průběhu tavby legován na horní hranici manganu a mědi. Obsah těchto dvou prvků ve vzorku 3B je 0,89% Mn a 1,33% Cu. I přesto je tvrdost tohoto vzorku stejná nebo jen nepatrně vyšší než průměrná tvrdost vzorků 2A a 2B. Ukazuje se tedy, že legováním na střední hodnotě manganu a mědi se dosáhne téměř stejné hodnoty tvrdosti jako při legování na horní hranici těchto prvků. U těchto vzorků se ukazuje, že největší tvrdosti u litiny docílíme legováním kombinací manganu a mědi dohromady.

Vzorek 3A, který byl legován pouze mědí na horní hranici má průměrnou tvrdost 184 HB, což je druhá nejvyšší tvrdost. Vzorek 1B, jenž byl zase legován pouze na horní hranici manganu má po vzorku 3A třetí nejvyšší tvrdost 167 HB. Na těchto dvou vzorcích se ukazuje, že legování pouze manganem nebo pouze mědí nemá tak výrazné účinky na tvrdost jako legování kombinací těchto dvou prvků dohromady. Také se ukazuje, že měď sama o sobě má o něco vyšší účinek na tvrdost, než samotný mangan.

Nejnižší tvrdost 155 HB má podle očekávání vzorek 1A, který nebyl v průběhu tavby legován ani manganem ani mědí. Vzorek obsahuje pouze 0,13% Mn a 0,02% Cu, což je velmi málo, a proto je jeho tvrdost tak nízká.

Poté byla pomocí programu Minitab, do něhož byly zadány výsledné hodnoty tvrdosti spolu s procentuálním množstvím manganu a mědi v každém vzorku, určena rovnice popisující závislost tvrdosti na obsahu manganu a mědi v litině. Koeficienty určené programem Minitab je možné vidět na obrázku 26.

#### Estimated Coefficients for HB using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	216,317
A obsah Mn	-59,0052
B obsah Cu	-28,8274
A obsah Mn*B obsah Cu	67,2170
Ct Pt	13,8246

Obr. 26 Koeficienty určené programem minitab

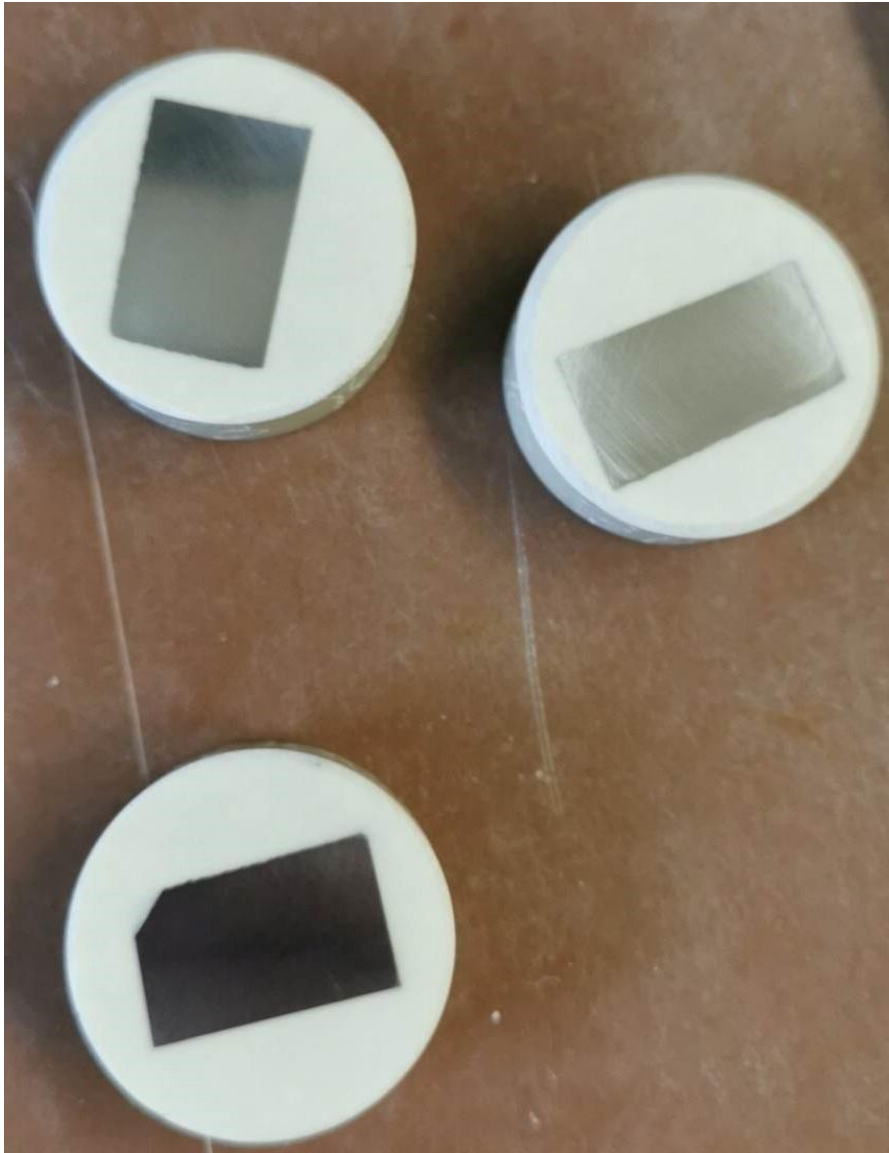
Z těchto koeficientů byla určena výsledná rovnice :

$$HB = 216,317 + (-59,0052) \cdot \%Mn + (-28,8274) \cdot \%Cu + (67,217) \cdot \%Mn \cdot \%Cu$$

Rovnice udává jaké množství manganu a mědi musí být do litiny přidáno, aby bylo dosaženo požadované tvrdosti.

## 4.2 Mikrostruktura

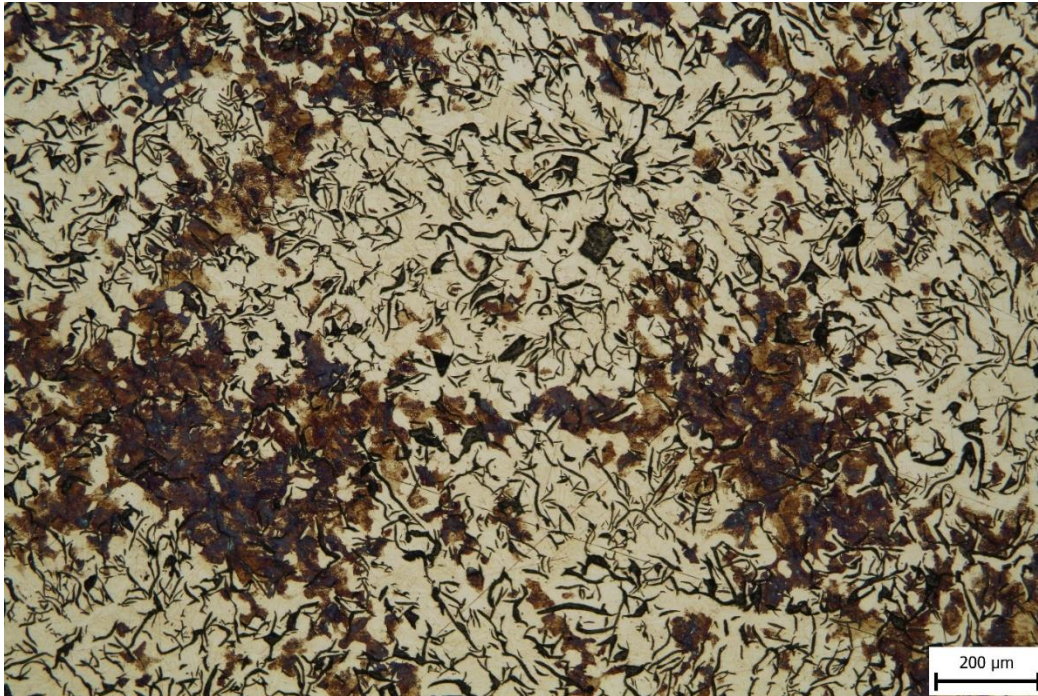
Následně byly vzorky znovu nařezány na laboratorní kotoučové pile Struers Labotom – 3 a dále zalisovány do plastické hmoty na laboratorním lisu Metkon Ecopress 100. Zalisované vzorky je možné vidět na obrázku 27.



Obr. 27 Zalisované vzorky

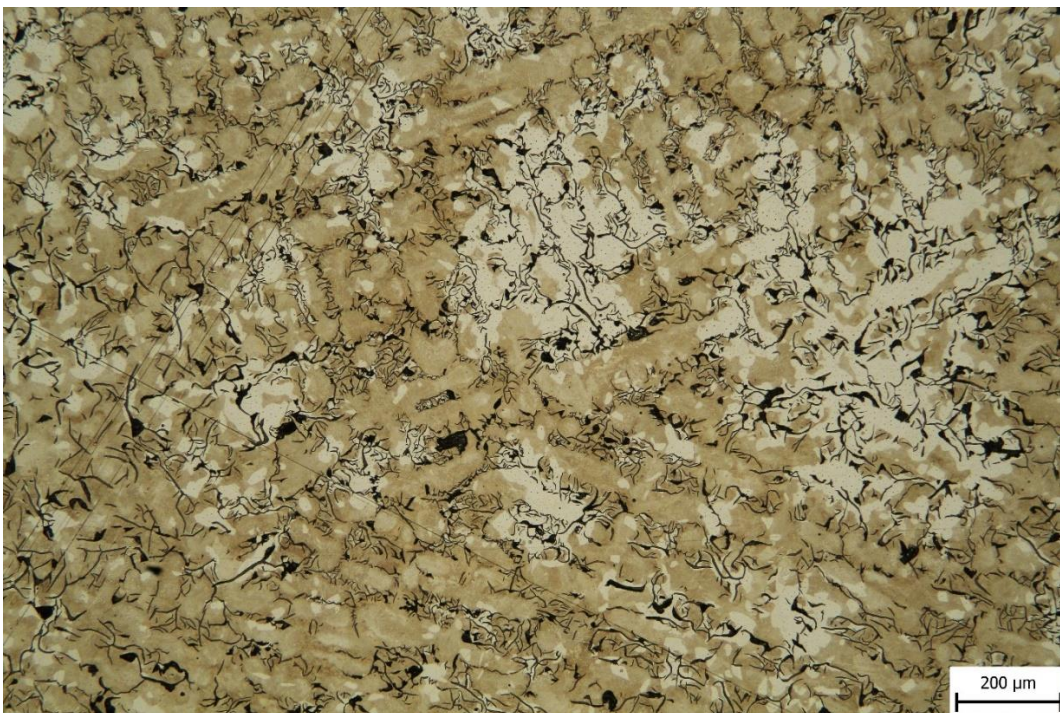
Poté byly vzorky broušeny a leštěny na laboratorní brusce a leštičce Struers LaboPol – 5. Povrch metalografických výbrusů byl naleptán pomocí leptadla Nital. Následně byla hodnocena jejich mikrostruktura na světelném mikroskopu Neophot 32. Struktura byla zkoumána pouze u pěti vzorků, protože vzorek 2A a 2B mají téměř stejné složení. Z tohoto důvodu byl vzorek 2A vynechán. Obsah feritu a perlitu ve struktuře byl určen podle normy ČSN EN ISO 945-1. Bílá místa na mikrostruktuře jsou místa, kde je ferit, a tmavá místa jsou místa s obsahem perlitu.

Na obrázku 28 je znázorněna mikrostruktura vzorku 1A. Podle Tab. 4 obsahuje litina 0,13% Mn a 0,02% Cu. Nízkému obsahu těchto perlitotvorných prvků odpovídá i výsledná matrice, která obsahuje z 80% ferit a pouze z 20% perlit.



Obr. 28 Mikrostruktura vzorku 1A (80% feritu, 20% perlitu)

Mikrostruktura vzorku 1B je znázorněna na obrázku 29. Dle tabulky 2. obsahuje vzorek 0,85% Mn a 0,02% Cu. Matrice tohoto vzorku obsahuje pouze 15% feritu a 85% perlitu. U tohoto vzorku se silně projevuje perlitotvorný účinek manganu, kterým byl tento vzorek legován.



Obr. 29 Mikrostruktura vzorku 1B (15% feritu 85% perlitu)

Mikrostrukturu vzorku 2B je možné vidět na obrázku 30. Vzorek obsahuje 0,47% Mn a 0,72% Cu. Jeho matrice obsahuje téměř 0% feritu a 100% perlitu. U tohoto vzorku se projevuje velmi silný perlitotvorný účinek legování kombinací obou prvků.



Obr. 30 Mikrostruktura vzorku 2B (0% feritu, 100% perlitu)

Matrice vzorku 3A, kterou je možné vidět na obrázku 31, obsahuje 8% feritu a 92% perlitu. Obsah manganu ve vzorku je 0,18% a obsah mědi 1,33%. Ukazuje se, že legování samotnou mědí bez manganu má na vznik perlitu v matrici trochu větší vliv než legování samotným manganem, jak bylo možné vidět u vzorku 1B.



Obr. 31 mikrostruktura vzorku 3A (8% feritu, 92% perlitu)

Mikrostrukturu vzorku 3B lze vidět na obrázku 32. Vzorek obsahuje 0,89% Mn a 1,33% Cu. Obsah feritu a perlitu je u tohoto vzorku téměř stejný jako u vzorku 2B. Matrice se skládá ze 4% feritu a 96% perlitu. I zde se projevuje silný perlitotvorný účinek obou prvků a zároveň se ukazuje, že nejlepší vliv na tvorbu perlitu ve struktuře má legování kombinací obou těchto prvků, avšak při vyšším množství mají téměř stejný, možná i nepatrně horší účinek na tvorbu perlitu než při středním množství.



Obr. 32 Mikrostruktura vzorku 3B (4% feritu, 96% perlitu)

## ZÁVĚR

V rešeršní části práce byly popsány základní druhy litin a dále vliv různých faktorů, očkování, tepelného zpracování, rychlosti ochlazování a hlavně chemického složení na strukturu a vlastnosti grafitických litin. Ukazuje se, že největší vliv na strukturu a vlastnosti litin má chemické složení. Feritické nebo perlitické struktury lze u litin dosáhnout správným řízením chemického složení bez následného tepelného zpracování, ale pokud je požadována ušlechtlejší mikrostruktura, např. bainit nebo martenzit, použije se po odlití tepelné zpracování.

V praktické části byl navržen plánovaný experiment (DOE) ověřující vliv manganu a mědi na mechanické vlastnosti a strukturu litiny. Celkově bylo odlito šest vzorků, u nichž se měnil obsah manganu a mědi. Následně byla na těchto vzorcích měřena tvrdost podle Brinella. Ukazuje se, že mangan a měď mají významný vliv na tvrdost. Avšak jejich nejlepšího účinku se dosáhne legováním kombinací obou prvků. Vzorky, které byly legovány buď samotným manganem, nebo samotnou mědí nedosahují takové tvrdosti. Nejnižší tvrdost má podle očekávání vzorek 1A, jenž nebyl legován ani jedním z prvků. Výsledná tvrdost všech šesti vzorků se pohybovala v rozmezí asi 155 až 205 HB. Tvrdost vzorků spolu s jejich obsahem manganu a mědi byla zadána do programu minitab a tímto programem byla určena výsledná rovnice závislosti tvrdosti na obsahu manganu a mědi v litině:

$$HB = 216,317 + (-59,0052) \cdot \%Mn + (-28,8274) \cdot \%Cu + (67,217) \cdot \%Mn \cdot \%Cu$$

Následně byl hodnocen vliv manganu a mědi na mikrostrukturu. Ukazuje se, že s rostoucím obsahem perlitu ve struktuře roste i výsledná tvrdost. Hodnotil se podíl feritu a perlitu ve struktuře. Podle očekávání bylo nejvíce feritu asi 80% a nejméně perlitu asi 20% u prvního vzorku, který nebyl legován ani manganem ani mědí. Poté se podíl perlitu značně zvyšoval u legovaných vzorků. Ukazuje se, že stejně jako u tvrdosti tak i u mikrostruktury mají vzorky legované kombinací obou prvků manganu a mědi více perlitu ve struktuře, mezi 96 až 100%, než vzorky legované každým prvkem zvlášť. Prvky s největším podílem perlitu ve struktuře vykazují i nejvyšší tvrdost.

Avšak pokud srovnáme vzorky 2A a 2B se vzorkem 3B získáme velmi podobné výsledky, které se liší jen nepatrně. Vzorky 2A a 2B byly legovány na střední hodnotě manganu a mědi a vzorek 3B byl legován na horní hranici obou prvků, avšak výsledná tvrdost je téměř stejná a mikrostruktura se téměř neliší. Z toho vyplývá, že téměř stejných mechanických vlastností a struktury lze dosáhnout legováním polovičním množstvím manganu a mědi, což se promítne na výsledné ceně.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [32]

- [1] PIEKAR, D. *Návrh technologie lití kotlového článku*. Ostrava, 2013. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - technická univerzita Ostrava.
- [2] ROUČKA, J. *Metalurgie litin*. Brno: PC-DIR Real, s.r.o., Brno, 1998. ISBN 80-214-1263-1.
- [3] PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [4] NOVÁ, I. *Teorie slévání II*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-185-5.
- [5] MACHEK, V. *Kovové materiály 1: Struktury kovových materiálů*. Praha: CVUT Praha, 2013. ISBN 978-80-0105-248-8.
- [6] SUCHÁNEK, J. Trendy vývoje bílých ořezavzdorných litin. *Slévárenství*. Svaz sléváren České republiky, LXV 2017(1-2), 16-20. ISSN 0037-6825.
- [7] Litina s lupínkovým grafitem. *ww.esterer-giesserei.de/cz: Slévárna ESTERER* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.esterer-giesserei.de/cz/technika-odlevani/litina-s-lupinkovym-grafitem-en-gjl/>
- [8] Litina s kuličkovým grafitem. *ww.esterer-giesserei.de/cz: Slévárna ESTERER* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.esterer-giesserei.de/cz/technika-odlevani/litina-s-kulickovym-grafitem-en-gjs/>
- [9] BEDNÁŘ, B, BRYKSI, B. a NĚMEC, M. *Teorie slévání*. Praha: CVUT Praha, 2016. ISBN 978-80-01-06026-1.
- [10] Foundry lexicon: Graphite classification chart. In: *www.giessereilexikon.com* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/graphite-classification-chart-3800/?cHash=83335e5457eafbfac507bf4150f62825&fbclid=IwAR1GmmYj4ryGvfZdZ0trmXo3mnB9FT5b0ksNgyBRO8UOZK3qcyWL-35fEtw>
- [11] ALAGARSAMY, A. *Ductile Iron Handbook*. 2nd Edition. Illinois: American Foundrymen's Society, Des Plaines, 1993. ISBN 08-743-3124-2.
- [12] VONDRÁK, V., HAMPL, J. a HANUS, A. *Metalurgie litin: mimopecní zpracování roztavené litiny: očkování, modifikace*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005. ISBN 80-248-0777-7.
- [13] ROUČKA, J., V. KAŇA, T. KRYŠTŮFEK a A. CHÝLKOVÁ. Effect of Inoculants on the Structure and Properties. *Archives of Foundry Engineering* [online]. Vol. 2022, Issue

- [14] *The Sorelmetal Book of Ductile Iron*. Canada: Rio Tinto Iron & Titanium, 2004.
- [15] KARSAY, S.I.. *Ductile Iron. - 1: Production*. 2nd Edition. Quebec Iron and Titanium Corporation, 1976.
- [16] *Fázový diagram Fe-C* [online]. In: . [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Fe-C-Si-equilibrium-phase-diagram-for-a-fixed-Si-percentage-The-grey-area-delimits-the\\_fig8\\_44097651](https://www.researchgate.net/figure/Fe-C-Si-equilibrium-phase-diagram-for-a-fixed-Si-percentage-The-grey-area-delimits-the_fig8_44097651)
- [17] GONZAGA, R.A. Influence of ferrite and pearlite content on mechanical properties of ductile cast irons. *Materials Science and Engineering A*, vol. 567, 2013.
- [18] LACAZE, J., J. SERTUCHA a L.M. ABERG. Microstructure of as-cast ferritic-pearlitic nodular cast irons. *ISIJ international*. Vol 56, Issue 9, 2016.
- [19] GONGAZA, R.A a J.F. CARRASQUILLA, 2005. Influence of an appropriate balance of the alloying elements on microstructure and on mechanical properties of nodular cast iron. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 162-163, 2005.
- [20] MEDYŃSKI, D. a A. JANUS. Effect of Cr, Mo and Al on Structure and Selected Mechanical Properties of Austenitic Cast Iron. *Archives of Foundry Engineering* [online]. vol. 19, Issue 4/2019 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://journals.pan.pl/dlibra/publication/129627/edition/113142/content>
- [21] 4/2022. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://journals.pan.pl/dlibra/publication/143955/edition/125443/content>
- [22] RAO, L., W.W. TAO, S. WANG, M. GENG a G. CHENG. Influence of the composition ratio of manganese and copper on the mechanical properties and the machining performance of ductile iron. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. Vol. 21, October 2014.
- [23] SILMAN, G.I., V.V. KAMYNIN a V.V. GONCHAROV. On the mechanisms of copper effect on structure formation in cast iron. *Metal Science and Heat Treatment*. Vol. 49, 7-8, 2007.
- [24] SILMAN, G.I., V.V. KAMYNIN a A.A. TARASOV. Effect of Copper on Structure Formation in Cast Iron. *Metal Science and Heat Treatment*. Vol. 45, 7-8, 2003.
- [25] Dasgupta, R.K., Mondal, D.K., Chakrabarti, A.K. *et al.* Microstructure and Mechanical Properties of As-Cast Ductile Irons Alloyed with Manganese and Copper. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21, 1728–1736 (2012).
- [26] GÓRNY, M. a E. TYRAFA. Effect of Cooling Rate on Microstructure and Mechanical Properties of Thin-Walled Ductile Iron Castings. *Journal of Materials Engineering and Performance volume*. 22, 2013.
- [27] HERRING, D.H. Heat Treatment of Cast Irons. *Industrial Heating*. december 2018.

- [28] HOLEC, T. *Plánovaný experiment*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [29] ONDRA, P. DOE: Plánování experimentů. *Www.prumysloveinzenyrstvi.cz* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.prumysloveinzenyrstvi.cz/2017/05/18/doe-planovani-experimentu/?fbclid=IwAR3c3uul9UBJJSOQP-ePPjrASgBR7e9DnpaZyldUBxKYDw1neihVtj8im0Q>
- [30] MISÁK, P. *Navrhování experimentů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví, 2017. Dostupné z: <http://www.sz.k.fce.vutbr.cz/vyuka/CI059/DOE.pdf>
- [31] MAROŠ, B., 2007. Plánování experimentů - DOE. *www.techportal.cz* [online]. [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: [https://www.techportal.cz/33/planovani-experimentu-doe-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EkV75G4Ef0m1JbFQ9\\_JW24rzqJkitzn52A/](https://www.techportal.cz/33/planovani-experimentu-doe-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EkV75G4Ef0m1JbFQ9_JW24rzqJkitzn52A/)
- [32] CITACE.PRO [online]. 2015 [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/>