



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# PREDIKCE MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ ODLITKŮ Z LITINY S LUPÍNKOVÝM GRAFITEM POMOCÍ NUMERICKÉ SIMULACE

PREDICTION OF MECHANICAL PROPERTIES OF LAMELLAR IRON CASTINGS BY MEANS OF  
NUMERICAL SIMULATION

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Szymon Filipek**

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.**

**BRNO 2019**

# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Bc. Szymon Filipek**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Slévárenská technologie  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.**  
Akademický rok: 2018/19

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 diplomové práce:

## **Predikce mechanických vlastností odlitků z litiny s lupínkovým grafitem pomocí numerické simulace**

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

Analýza shody simulovaných a reálných mechanických vlastností odlitků z různých druhů litiny s lupínkovým grafitem. Stanovení souvislosti lokálních vlastností s teplotním režimem tuhnutí a chladnutí v daných částech odlitků. Zjištění příčin odchylek simulovaných a reálných vlastností.

### **Cíle diplomové práce:**

Posouzení míry shody pomocí numerické simulace predikovaných a reálných mechanických vlastností odlitků z různých značek litiny s lupínkovým grafitem.

### **Seznam doporučené literatury:**

ALAGARSAMY, A. Ductile Iron Handbook, American Foundrymen's Society Inc. Des Plaines, Illinois, USA, 1993. ISBN 0-87433-124-2.

WALTON, CH.F. Iron Castings Handbook, Iron Founders' Society Inc., Cleveland, USA, 1971. Library of Congress Catalog Number 70-165866.

RÖHRIG, K. Legiertes Gusseisen, Giesserei/Verlag GmbH, Düsseldorf, 1970.

Ductile Iron Data for Design Engineers, QIT-Fer et Titane Inc., Sorel, Canada, 1990.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

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

## **ABSTRAKT**

FILIPEK Szymon: Predikce mechanických vlastností odlitků z litiny s lupínkovým grafitem pomocí numerické simulace.

---

Cílem diplomové práce bylo posouzení míry shody mechanických vlastností odlitků z litiny s lupínkovým grafitem s mechanickými vlastnostmi vyhodnocenými pomocí numerické simulace v softwaru MAGMA<sup>5</sup>. Hodnocení mechanických vlastností bylo zaměřeno na tvrdost a mez pevnosti v tahu v různých místech odlitků. Teoretická část se zabývá klasifikací litin, strukturními složkami litiny s lupínkovým grafitem a faktory určujícími výsledné mechanické vlastnosti materiálu. Praktická část prezentuje pokus o nalezení empirických závislostí mezi vstupními parametry a výsledky vyhodnocenými pomocí simulačního softwaru. V poslední části se práce zabývá porovnáním výsledků reálných se simulovanými mechanickými vlastnostmi.

Klíčová slova: mechanické vlastnosti, litina s lupínkovým grafitem, numerická simulace, MAGMAsoft

## **ABSTRACT**

FILIPEK Szymon: Prediction of mechanical properties of lamellar iron castings by means of numerical simulation.

---

The aim of this thesis was to assess the degree of conformity between the mechanical properties evaluated by numerical simulation in software MAGMA<sup>5</sup> and the measured values of hardness and ultimate tensile strength of lamellar graphite iron castings. The theoretical part of this thesis deals with the classification of cast iron, structural components of lamellar graphite iron, and the factors defining the resulting mechanical properties of the material. The practical part presents an attempt to find empirical dependencies between input parameters and results evaluated by simulation software. At the end, an analysis of the correlation between reality and simulation software is performed.

Keywords: mechanical properties, lamellar graphite iron, numerical simulation, MAGMAsoft



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

FILIPEK, Szymon. *Predikce mechanických vlastností odlitků z litiny s lupínkovým grafitem pomocí numerické simulace* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116658>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaromír Roučka.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci na téma „Predikce mechanických vlastností odlitků z litiny s lupínkovým grafitem pomocí numerické simulace“ jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V ..... dne 24.5.2019

.....  
Szymon Filipek

## **PODĚKOVÁNÍ**

Za odborné vedení, cenné připomínky a rady v období přípravy a realizace mé diplomové práce bych rád poděkoval svému vedoucímu panu doc. Ing. Jaromíru Roučkovi, CSc.

Mé poděkování rovněž patří všem pracovníkům slévárny HEUNISCH Brno, s. r. o., za spolupráci při tvorbě a zpracování experimentálního šetření.

Zvláštní poděkování patří pánu Bohu, mé milované manželce, rodině a všem, kteří mne při mé vědecké práci podporovali.

# OBSAH

	Str.
<b>1 CHARAKTERISTIKA LITIN .....</b>	<b>10</b>
1.1 STABILNÍ A METASTABILNÍ SYSTÉM ŽELEZO – UHLÍK .....	11
1.3 ROZDĚLENÍ LITIN.....	12
<b>2 CHARAKTERISTIKA LITINY S LUPÍNKOVÝM GRAFITEM .....</b>	<b>13</b>
2.1 ZÁKLADNÍ KOVOVÁ MATRICE V LLG .....	14
2.2 TVORBA, TVAR A ROZLOŽENÍ GRAFITU V LLG [3].....	17
2.3 CHEMICKÉ SLOŽENÍ LLG.....	19
2.3.1 Základní prvky v LLG.....	22
2.3.2 Legující prvky v LLG.....	23
2.4 OČKOVÁNÍ .....	24
2.5 MECHANICKÉ VLASTNOSTI LLG.....	27
2.5.1 Vliv struktury na mechanické vlastnosti .....	30
2.5.2 Závislost mechanických vlastností na velikost eutektických buněk .....	32
2.5.3 Vliv rychlosti tuhnutí a ochlazování na mechanické vlastnosti .....	32
2.5.4 Vliv legujících prvků na mechanické vlastnosti .....	34
<b>3 NUMERICKÉ SIMULACE VE SLÉVÁRENSTVÍ.....</b>	<b>36</b>
3.1 ZÁKLADNÍ VÝPOČETNÍ METODY A DRUHY SIMULAČNÍCH SOFTWARE .....	37
3.2 SIMULAČNÍ SOFTWARE MAGMASOFT.....	37
3.2.1 Metoda konečných objemů.....	38
3.2.2 Možnosti metody DoE.....	39
3.3 PRE-PROCESSING V SOFTWARE MAGMA <sup>5</sup> .....	40
3.3.1 Geometrie .....	40
3.3.2 Generování výpočetní sítě .....	41
3.3.3 Nastavení simulace .....	42
3.4 ZÁKLADNÍ ÚLOHY SIMULACE.....	43
3.5 VÝPOČET MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ V SIMULACI .....	44
<b>4 EXPERIMENTÁLNÍ SROVNÁNÍ REÁLNÝCH A SIMULOVANÝCH MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ .....</b>	<b>45</b>
4.1 TECHNOLOGIE ZHOVOVENÍ FOREM.....	48
4.2 METALURGICKÝ POSTUP.....	49
4.3 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ ODLITKŮ .....	51
4.3.1 Odběr vzorků pro mechanické zkoušky .....	51
4.3.2 Měření tvrdosti dle Brinella.....	54
4.3.3 Měření meze pevnosti v tahu.....	55
4.4 ANALÝZA MIKROSTRUKTURY ZKUŠEBNÍCH TĚLES .....	58
4.5 ANALÝZA NUMERICKÉ SIMULACE.....	62
4.5.1 Vstupní parametry pro simulaci.....	62
4.5.2 Vliv chemického složení na mechanické vlastnosti v MAGMA <sup>5</sup> .....	63
4.5.3 Analýza křivek tuhnutí a teplotního pole v MAGMA <sup>5</sup> .....	66
4.5.4 Mechanické vlastnosti vyhodnocené pomocí MAGMA <sup>5</sup> .....	73
4.6 POSOUZENÍ MÍRY SHODY REÁLNÝCH A SIMULOVANÝCH MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ.....	76
<b>5 ZÁVĚR .....</b>	<b>80</b>

## ÚVOD

Zlepšení výrobní efektivity, minimalizace defektů a zajištění požadovaných fyzikálních a mechanických vlastností odlitků patří mezi klíčové výzvy současného slévárenského průmyslu. S cílem překonat vyskytující se problémy a splnit požadavky zákazníka používá většina sléváren metodiku odlévání podporovanou numerickými simulacemi slévárenských procesů.

Diplomová práce byla vykonávána ve spolupráci se slévárnou HEUNISCH Brno s.r.o., která se zaměřuje zejména na sériovou produkci skříňových odlitků pro zemědělskou techniku z litiny s lupínkovým grafitem. Pro simulaci slévárenských procesů byl použit simulační software MAGMA<sup>5</sup>. Použití softwaru MAGMA<sup>5</sup> ve slévárně HEUNISCH Brno s.r.o. je na denním pořádku. Software je často používán pro ověření navržené slévárenské technologie, a to před samotným zhotovením modelového zařízení nebo také pro řešení vzniklých vad a jejich eliminaci ve výrobním procesu. Další aplikací softwaru ve slévárně je predikce mechanických vlastností v požadovaných místech a ověření předpisů stanovených zákazníkem. Předpis zákazníka se často týká požadavku na konkrétní mechanické vlastnosti v daných částech odlitků nebo tloušťkách stěn. Pokud simulace hodnotí nízké mechanické vlastnosti, slévárna volí cestu legování pro zvýšení mechanických vlastností a zajištění požadavků zákazníka. V tomto případě je potřeba optimalizovat chemické složení.

Teoretická část diplomové práce je věnovaná vlivům a faktorům, které definují, jaké mechanické vlastnosti lze očekávat v jednotlivých místech odlitku z litiny s lupínkovým grafitem. Dále pojednává o jednotlivých faktorech, na které je potřeba se zaměřit při definování okrajových podmínek před spuštěním simulace a vyhodnocení simulace.

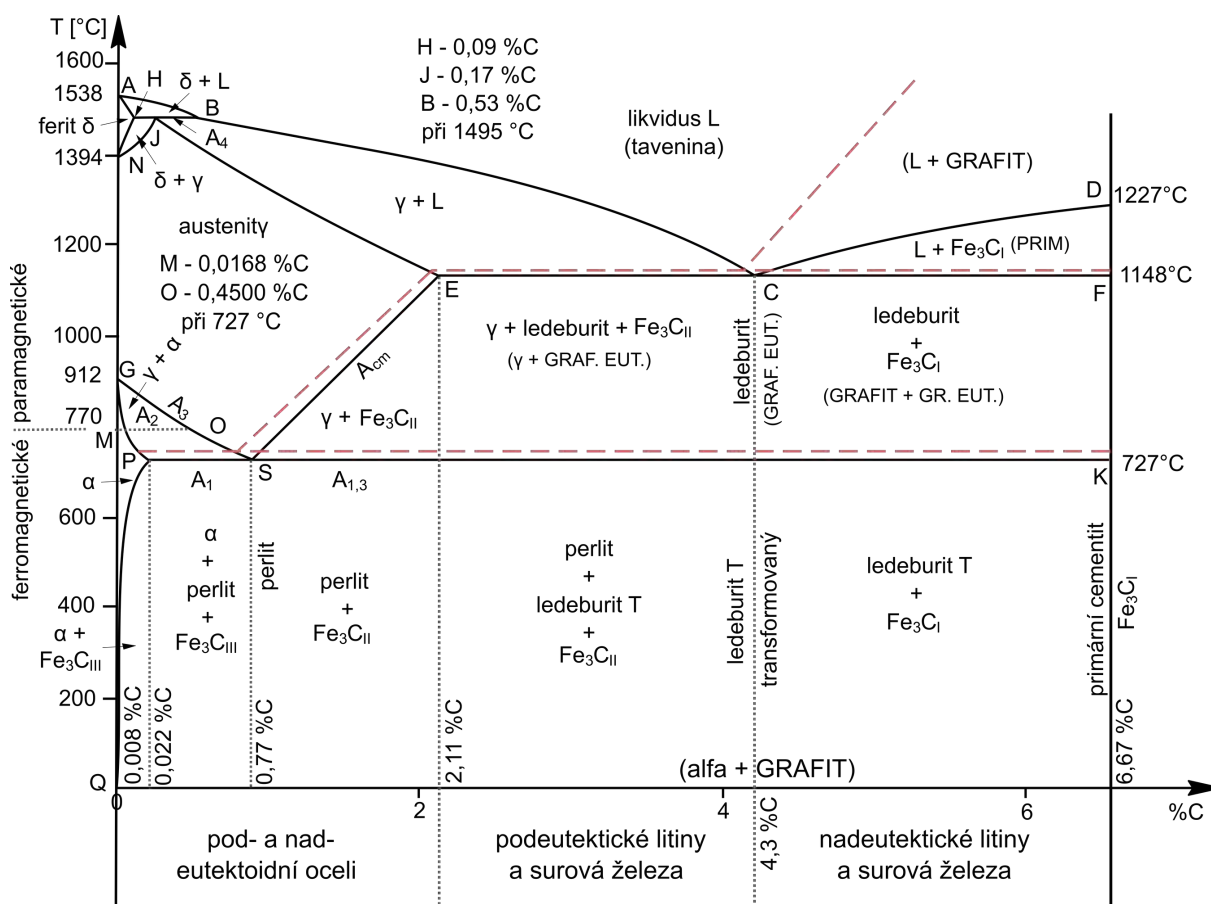
Cílem experimentu bylo porovnání a analýza reálných mechanických vlastností, odlitků z litiny s lupínkovým grafitem s mechanickými vlastnostmi vyhodnocenými pomocí numerické simulace v softwaru MAGMA<sup>5</sup>. Hodnocení mechanických vlastností bylo zaměřeno na tvrdost materiálu a mez pevnosti v tahu v různých místech odlitků.

# 1 CHARAKTERISTIKA LITIN

Litiny patří do jedné z nejstarších skupin konstrukčních materiálů. V dnešní moderní době, směřující k nahrazování slitin železa slitinami neželezných kovů, litiny nenašly náhradu ve své jedinečnosti a stále mají široké spektrum uplatnění. Především díky nízké ceně, dobrým slévárenským vlastnostem, dobré obrobitelnosti a mechanické odolnosti. Mezi další unikátní vlastnosti také patří výborný útlum vibrací, tepelná akumulace a samomaznost. Dokonce u některých typů grafitických litin lze dosáhnout srovnatelných mechanických vlastností s ocelí, a zároveň jsou zachovány jejich charakteristické vlastnosti. [1, 2]

Litiny jsou obecně slitiny železa, uhlíku, křemíku a dalších doprovodných prvků, s obsahem přibližně více než 2 % C. Uhlík se ve slitině vyskytuje ve třech různých formách. Tvoří samostatnou fázi – grafit, dále je vázán v chemické sloučenině jako karbid železa  $\text{Fe}_3\text{C}$ , případně karbid jiného prvku, nebo je rozpuštěný v tuhém roztoku. Charakteristickým znakem litin je eutektická krystalizace s eutektickým bodem. [3]

Při studiu železných slitin se vychází z binárního rovnovážného diagramu železa s uhlíkem (obr. 1), podle kterého předpokládáme, jaký typ struktury a jaké mechanické vlastnosti bude mít daná slitina.

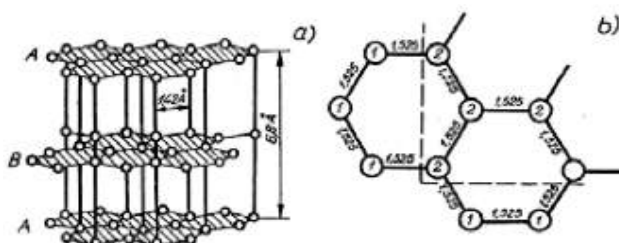


Obr. 1 Binární rovnovážný diagram železo – uhlík [4]

## 1.1 Stabilní a metastabilní systém železo – uhlík

Nad hranicemi rozpustnosti uhlíku v tuhé fázi, vytváří uhlík dvě různé samostatné fáze. Prvním případem je chemická sloučenina karbid železa,  $\text{Fe}_3\text{C}$  – cementit. Cementit je samostatná intermediární fáze, s obsahem 6,68 hm % C. Krystalizuje v ortorombické soustavě, jeho typickými vlastnostmi jsou křehkost a vysoká tvrdost (650 až 800 HB), což ovlivňuje výsledné vlastnosti litiny. Cementit, z termodynamického hlediska, je metastabilní fází, a za vhodných podmínek (žháním, temperováním) se rozpadá tzv. grafitizací. [5], [8]

Druhým případem samostatné fáze uhlíku je grafit. Jedná se o primární uhlík, který krystalizuje v hexagonální soustavě, kde atomy tvoří výrazné roviny (vrstvy). Pro růst krystalů grafitu, je směr těchto rovin z energetického hlediska nejméně náročný, proto má grafit sklon vytvářet ploché deskovité krystaly. Grafit v litině představuje křehkou, měkkou a málo pevnou složku struktury, která zhoršuje pevnostní vlastnosti slitiny. [5]



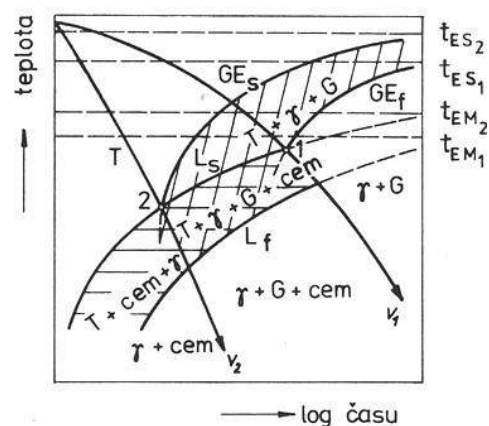
Obr. 2 a) Krystalická mřížka grafitu, b) vazebné řady mezi atomy uhlíku v grafitu [5]

Z důvodu existence dvou výše zmíněných samostatných fází uhlíku, vyskytujících se nad hranicí rozpustnosti, které mají rozdílné vlastnosti, musíme rozlišovat dva systémy binární soustavy železa s uhlíkem: [6]

- metastabilní systém Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  (obr. 1 plná čára)
- stabilní systém Fe- $\text{C}_{\text{graf.}}$  (obr. 1 přerušovaná čára)

Litiny krystalizují podle stabilního nebo metastabilního diagramu Fe-C, resp. Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$ , eventuálně se v průběhu tuhnutí a chladnutí uplatňují oba systémy. Zda-li litina bude krystalizovat dle stabilního či metastabilního systému rozhodují hlavně tyto faktory: obsah uhlíku ve slitině, rychlost ochlazování, obsah přísadových prvků a stav krystalizačních zárodků. Zvyšující se % C ve slitině podporuje vylučování grafitu, respektive krystalizaci podle stabilního systému. Tento efekt se ale projevuje až při větším množství, přibližně nad 2 % C. U menšího množství uhlíku nastává metastabilní rovnováha. [3, 7]

Dalším faktorem ovlivňujícím podmínky, podle kterého systému bude slitina krystalizovat, je rychlost ochlazování. Stabilní rovnováha u vyššího obsahu uhlíku nastává při malé rychlosti ochlazování. Naopak metastabilní rovnováha nastává při vysoké ochlazovací rychlosti. Tento jev vystihuje kinetický diagram anizotermické krystalizace na obrázku 3. [2]

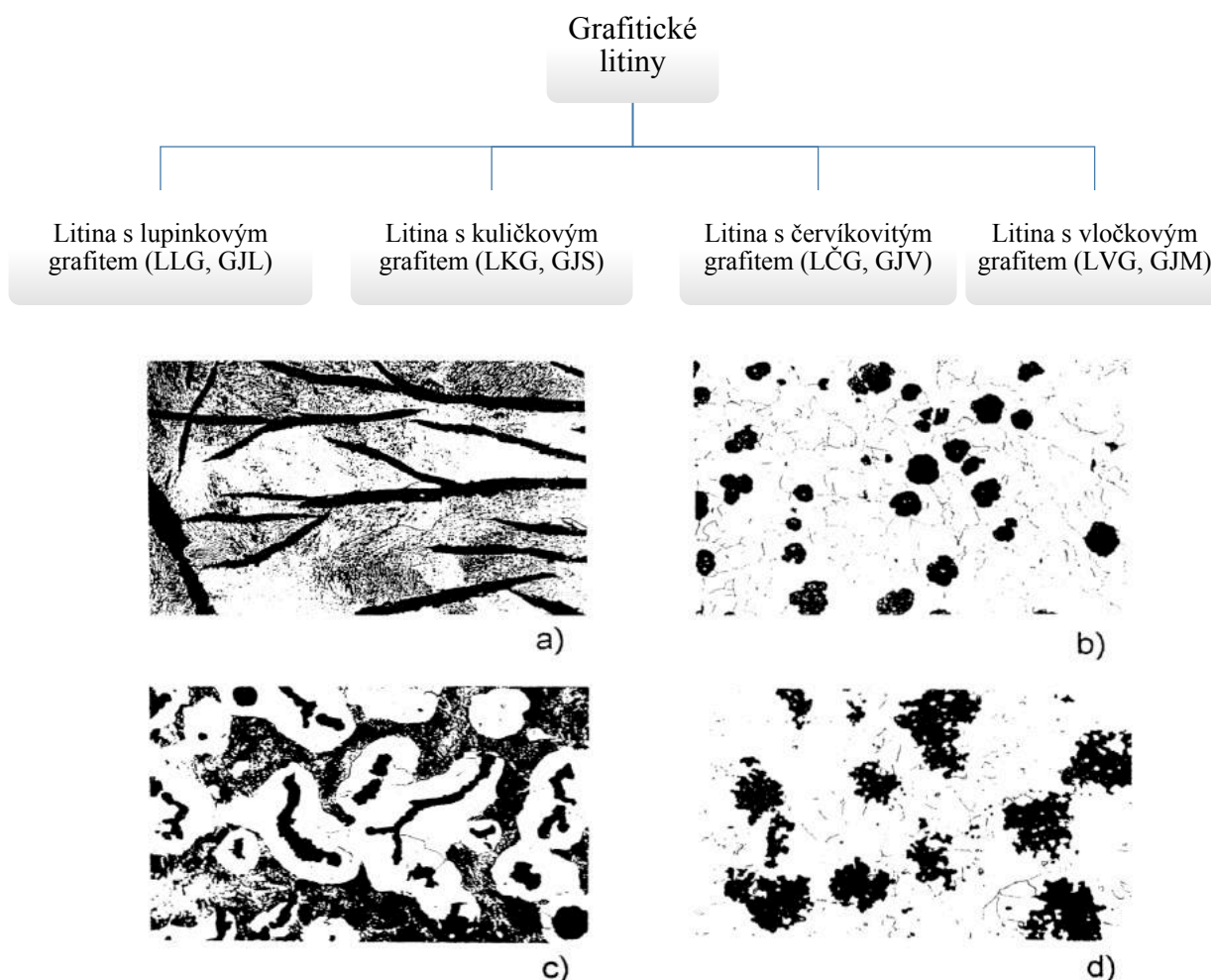


Obr. 3 Diagram anizotermické krystalizace eutektické litiny Fe-C-Si

Některé přísadové prvky podporují vylučování grafitu, respektive tuhnutí podle stabilního systému. Jsou to tzv. grafitotvorné prvky. Mezi ně patří křemík, hliník, nikl, měď a fosfor. Nejdůležitějším z nich je křemík, svou přítomností v litině snižuje rovnovážné teploty a tímto zabraňuje tuhnutí podle metastabilní soustavy. [5]

### 1.3 Rozdělení litin

Základní rozdělení litin vychází ze strukturního hlediska, podle něhož se rozlišují litiny s cementickým eutektikem (bíle litiny) a grafitickým eutektikem. Struktury několika základních typů grafitických litin jsou zaznamenány níže na obrázku 4. Ke grafitickým litinám náleží také temperovaná litina, jejíž grafit vzniká rozkladem cementitu v tuhém stavu. Přejíždovým typem je tvrzená litina, která obsahuje cementické i grafitické eutektikum. V této teoretické části práce se dále bude pojednávat pouze o charakteristikách a vlastnostech, souvisejících s litinou s lupínkovým grafitem, která je součástí skupiny grafitických litin. [6, 7]



Obr. 4 Tvar grafitu v jednotlivých typech litin: a) LLG b) LKG c) LČG d) LVG [7]

Vlastnosti litin určuje především druh matrice, morfologie, velikost a rozložení částic grafitu. Zhodnocení strukturních složek, vyskytujících se nejčastěji v litině, umožňuje norma ČSN 42 0461-75 (nově ČSN EN ISO 945-1), která kvalitativně a kvantitativně popisuje strukturní složky litin. [6]



## 2 CHARAKTERISTIKA LITINY S LUPÍNKOVÝM GRAFITEM

Obsah této kapitoly se zabývá složkami tvořícími litinu s lupínkovým grafitem, jenž určují výsledné mechanické vlastnosti a faktory, které zásadně ovlivňují tyto složky.

V odborné literatuře bývá tento materiál označován různě. U nás se pro litiny s lupínkovým grafitem užívá označení GJL. Způsob značení litin se řídí podle normy ČSN EN 1560. Někdy se také používá zkratka LLG. V anglické literatuře se mluví o gray cast iron, případně se používá zkratka LGI – Lamellar Graphite Iron. [6, 7]

Z názvu litiny již vyplývá, že charakteristickým prvkem pro LLG je uhlík, vyloučený ve formě grafitu, lamelovitého tvaru. Obvyklé chemické složení LLG je: 2,5 až 3,5 % C, 1,2 až 2,8 % Si, 0,5 až 1 % Mn, 0,2-0,5 % P a max. 0,15 % S. Norma ČSN 42 1241 určuje obsah prvků v normalizovaných druzích litin s lupínkovým grafitem. [5, 7]

Výsledné vlastnosti LLG primárně závisí na struktuře, tzn. na rozložení, množství, tvaru a velikosti grafitických částic a základní kovové matrice. Nejvíce ovlivňující faktory zmíněných prvků, které podrobněji budou vyhodnoceny a porovnány s výsledky simulace, jsou:

- chemické složení litiny,
- stav krystalizačních zárodků,
- rychlost tuhnutí a ochlazování tuhé fáze. [7]

Před řešením zmíněných faktorů budou popsány jednotlivé složky struktury, které vznikají při krystalizaci LLG. Výrazný vliv grafitu na celkové vlastnosti LLG a jeho veliká rozdílnost od strukturních součástí základní kovové matrice jsou příčinou, proč se struktura LLG hodnotí dvojím způsobem, a to z hlediska:

1. základní kovové matrice,
2. rozložení a tvaru grafitu. [6]

## 2.1 Základní kovová matrice v LLG

Ad. 1. Pomineme-li grafit, je majoritní část struktury LLG tvořená kovovou maticí. Kovová matrice neboli základní kovová hmota tepelně nezpracovaných grafitických litin za pokojové teploty může být [10]:

- a) Feritická, pokud je chlazení pomalé (tlusté stěny odlitků) anebo tavenina obsahuje dostatečně vysoký obsah feritotvorných prvků. Litiny s touto kovovou maticí jsou měkké a málo pevné. Veškerý uhlík se vylučuje jako grafit a jeho tvar je velmi hrubý se značnou disperzitou. Čistě feritická struktura u litiny v litém stavu se takřka nevyskytuje. Častěji vzniká pomocí tepelného zpracování z litin feriticko-perlitických. [6]



Obr. 5a Feritická struktura LLG (100x) [3]



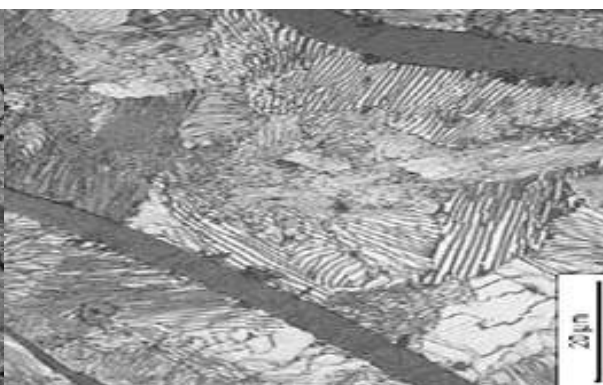
Obr. 5b Feritická struktura u LLG po vyžhání (500x) [6]

Ferit jako složka LLG vzniká při eutektoidní přeměně austenitu podle stabilního systému Fe-C<sub>graf</sub> (obr. 1). Při pokojové teplotě je rozpustnost C ve feritu nižší než 0,01 %. Zásadní vliv na vznik feritické struktury mají přísadové prvky, ze kterých je nejvýznamnější Si. Další legující feritotvorné prvky mohou být Al a Ti. Ferit je nositel houževnatosti materiálu. Mechanické vlastnosti samotného feritu jsou přibližně  $R_m = 220 \text{ MPa}$ ,  $HB = 50$ ,  $A_5 = 70 \%$ . [7]

- b) Perlitická, je-li obsah perlitotvorných prvků v dokonalém souladu s rychlostí ochlazování. Perlit je eutektoid, který je tvořen lamelami feritu a cementitu (karbidu železa  $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Rovněž je produktem rozpadu austenitu podle metastabilního systému Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$ . Vedoucí fází při perlitické přeměně je cementit, za kterým vznikají lamely feritu.

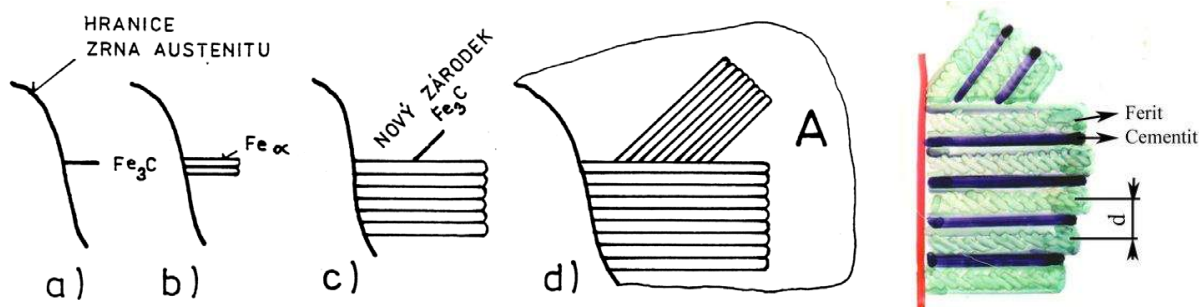


Obr. 6a Perlitická struktura u LLG (200x) [6]



Obr. 6b Perlitická struktura u LLG [12]

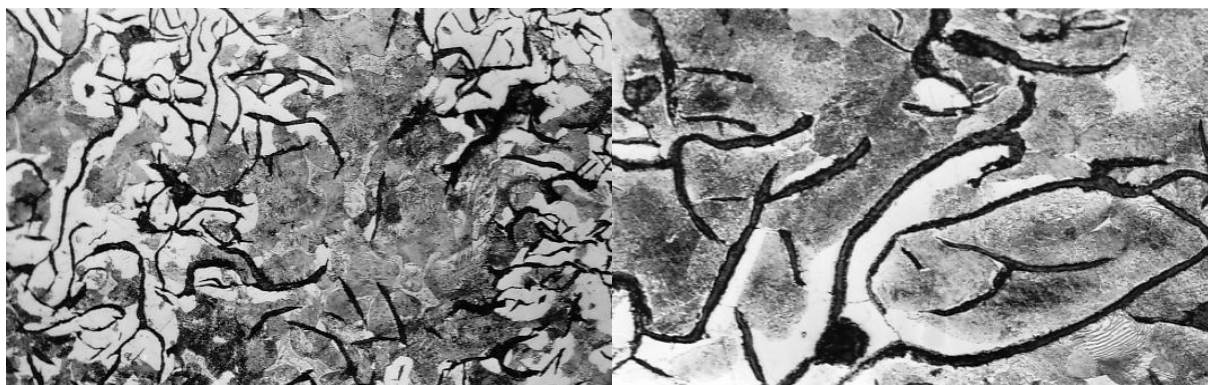
Z jednoho zrna austenitu může vznikat i několik zrn perlitu s různou orientací lamel. Dobře to znázorňuje obrázek č. 7 a 6b. Vyšší ochlazovací rychlosti (tenké stěny odlitku) napomáhají vzniku perlitu (obr. 9a). Mechanické vlastnosti jsou tím vyšší čím jemnější a hustěji vyloučený je perlit. Jemnost perlitu se hodnotí podle tzv. mezilamelární vzdálenosti perlitu ( $d$ ), kterou zachycuje pravá část obr. 7. Perlit má ve srovnání s feritem vyšší pevnost a tvrdost. Tyto hodnoty se pohybují zhruba:  $R_m = 800 \text{ MPa}$  a tvrdost  $280 \text{ HB}$ . Tvorbu perlitu v litině podporuje hlavně Mn, z legur je to Cu a Ni. [2, 7]



Obr. 7 Schéma vzniku perlitu a dispersita perlitu [3, 7]

Perlit může vystupovat také ve formě globulí, tzv. globulární perlit. Vzniká sbalením lamel při velmi pomalém ochlazování nebo tepelném zpracování. Sferoidizační žíhání se provádí ohřevem nad teplotu  $A_{c1}$ , na této teplotě vydrží minimálně 2 hodiny a následně pomalým ochlazením na teplotu  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $50 \text{ }^\circ\text{C/h}$ ), po kterém následuje rychlé dochlazení, nejčastěji na vzduchu. [13]

- c) Feriticko-perlitická, jsou-li pro danou ochlazovací rychlost odlitku feritotvorné prvky v přebytku. Vytvoří se sktruktura LLG, ve které jsou grafitové lupínky většinou uloženy ve feritu a zbytek je vyplněn perlitem (obr. 8a, 8b). Mechanické vlastnosti litin se smísenou strukturou jsou na rozhraní mechanických vlastností litin s feritickou a perlitickou strukturou (více kap. 2.5). Bez určitých opatření nelze zcela zabránit vzniku feriticko-perlitické kovové matrice, a to zvláště v tlustších stěnách odlitků, u kterých jsou větší rozdíly v tloušťce jednotlivých stěn. Ferit svou přítomností ve smíšené struktuře zmenšuje pnutí, vzniklé například mezi studenější a teplejší částí odlitku, a tak snižuje riziko prasknutí.



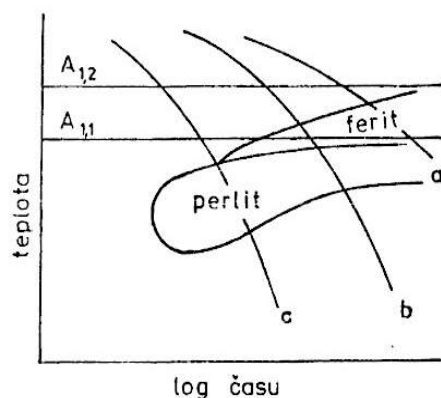
Obr. 8a Feriticko-perlitická struktura u LLG (200x) [6]

Obr. 8b Feriticko-perlitická struktura u LLG (400x) [6]

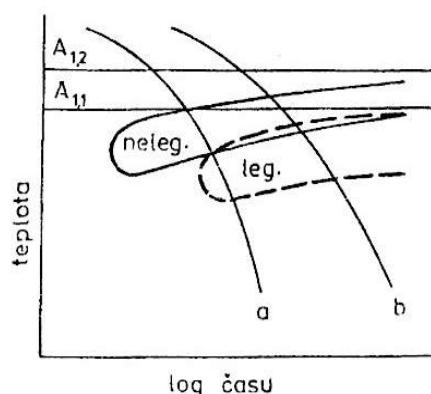
### ➤ Vliv rychlosti ochlazování na strukturu matrice

Jak již bylo zmíněno výše, rychlost ochlazování má zásadní vliv na výslednou strukturu. Vlastnosti LLG jsou značně spjaty s rychlostí ochlazování, proto je nutné tento fakt zohlednit při predikci vlastností v různých průřezích odlitků. V tlustších nebo průtočných stěnách (místech s plochým teplotním gradientem), přesněji při pomalém ochlazování, dochází k stabilnímu tuhnutí a sklonu ke vzniku feritické matrice. S rostoucí rychlostí ochlazování má materiál tendenci tuhnout metastabilně, tzn. vznik feriticko-perlitické struktury, popřípadě čistě perlitické.

Diagram anizotermického rozpadu austenitu (ARA) na obrázku 9a teoreticky zobrazuje průběh transformace austenitu v závislosti na rychlosti ochlazování. Křivky (a, b, c) znázorňují rychlosti ochlazování v materiálu, které povedou k jednotlivým druhům kovové struktury. Pokud jsou požadovány vysoké mechanické vlastnosti, je nezbytné zajistit perlitickou strukturu v materiálu. Tato struktura odpovídá kratší ochlazovací době, znázorňující křivka (c) v ARA diagramu. Z toho vyplývá, že taková struktura se bude vyskytovat primárně v tenkých neprůtočných stěnách odlitků.



Obr. 9a Vliv rychlosti ochlazování na transformaci austenitu [7]



Obr. 9b Vliv legur na tvar ARA diagramu [7]

### ➤ Vliv chemického složení na strukturu matrice

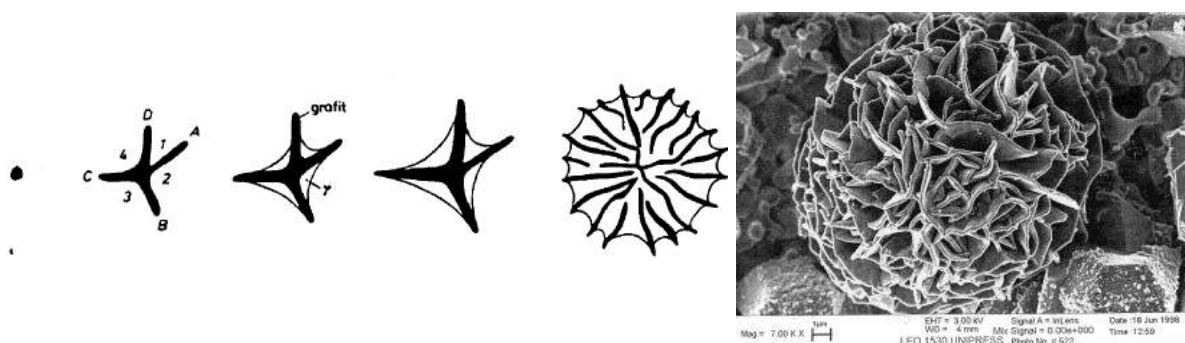
Struktura kovové matrice je určena způsobem transformace austenitu, v závislosti na chemickém složení a podmínkách ochlazování. Přísadové prvky ovlivňují aktivitu uhlíku v austenitu, což má vliv na způsob transformace austenitu a difuzní poměry na mezifázovém rozhraní při transformaci. Prvky ovlivňující základní kovovou hmotu dělíme na [7]:

- Feritotvorné (Si, Al, Ti)
- Perlitotvorné (Mn, Cu, Sn, Sb, Cr, V, W)
- Austenitotvorné (Ni nad 18 %)

Vlivem perlitotvorných prvků roste stálost perlitu a transformační křivky v ARA diagramu se posouvají k delším časům (obr. 9b). To umožňuje dosahovat perlitické struktury při pomalejším ochlazování, zejména v tlustších stěnách odlitků.

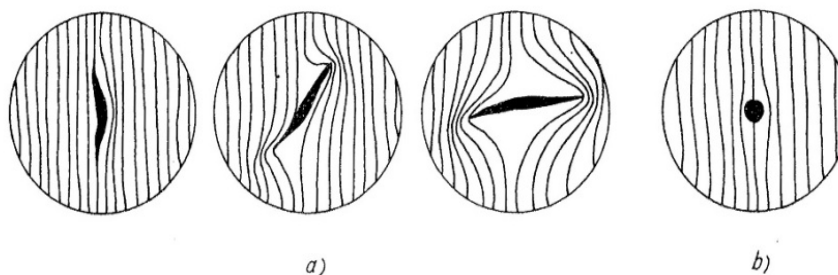
## 2.2 Tvorba, tvar a rozložení grafitu v LLG [3]

Ad. 2. Růst lupínkového grafitu začíná na vhodných krystalizačních zárodkách v tavenině. Grafit ze zárodků roste radiálním směrem do prostoru, a takto rozvětvený útvar spolu s austenitem tvoří eutektickou buňku (obr. 10). Vznik lupínkového grafitu je závislý na přítomnosti kyslíku a síry. Obsah prvků musí být skutečně optimální, v literatuře [7] se uvádí kolem 0,04 % S. Příliš vysoký obsah síry vede k opačnému jevu, tzn. potlačení grafitizace. Kyslík a síra snižují velikost povrchového napětí v prizmových rovinách grafitu a usnadňují růst na těchto rovinách (obr. 2). Aby mohl vznikat lupínkový grafit, musí rychlost růstu austenitu být nižší než rychlost růstu grafitu. Lupínky se na výbruse jeví jako rovné nebo zvlněné jehlice. V podstatě se však jedná o prostorově členěné útvary, podobající se hlávce salátu nebo květu růže. To je dobře zachyceno na snímku níže, který byl pořízen skenovacím elektronovým mikroskopem (SEM). [7, 11]



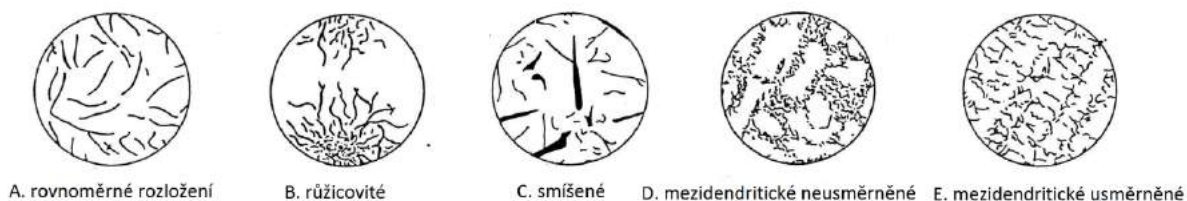
Obr. 10 Lupínkový grafit – schématický popis vzniku a SEM eutektické buňky. [11]

Tvar, tloušťka a rozložení grafitu jsou prvky, které mají významný vliv na mechanické vlastnosti výsledného materiálu. Je důležité zdůraznit, že lupínky grafitu jsou elementy, přerušující kontinuitu základní kovové hmoty. Při mechanickém zatěžování materiálu dochází ke koncentraci napětí na ostrých zakončeních grafitických částic (obr. 11). Tento jev se popisuje jako vrubový účinek lupínkového grafitu. Čím ostřejší je hrana lupínku, tím větší je vrubový účinek. Z tohoto důvodu litina s kuličkovým tvarem grafitu, oproti litině s lupínkovým grafitem, má vyšší pevnosti a lepší mechanické vlastnosti než LLG. [3]



Obr. 11 průběh napjatosti v litině a) s lupínkovým grafitem, b) s kuličkovým grafitem [14]

Základní druhy rozložení lupínkového grafitu jsou uvedeny na obrázku 12, dle ČSN EN ISO 945 (ČSN 40 0461), převzaté z ASTM. Z hlediska vlastností je nejvhodnější rovnoměrné rozložení, typ A. Nerovnoměrně rozložený grafit může způsobovat heterogenní rozložení napětí ve struktuře, a tedy zhoršovat mechanické vlastnosti. [6]



Obr. 12 Klasifikace grafitu v LLG podle ČSN EN ISO 945 [14]

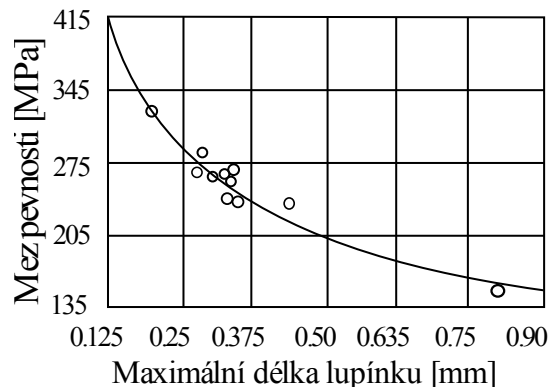
Další důležitou charakteristikou grafitu, se zřetelem na mechanické vlastnosti, je jeho velikost. Norma rozlišuje celkem 8 velikostních tříd, a to od 01 do 1000  $\mu\text{m}$ . Z hlediska požadavku na vysoké mechanické vlastnosti LLG je snaha získávat malý, jemný, rovnoměrně rozložený grafit ve struktuře. Zmíněných parametrů se dosahuje vícero způsoby. Jedním z nejpodstatnějších je vnášení cizích zárodků (očkování) do taveniny, na kterých pokračuje nukleace a růst grafitických zárodků. Očkování umožňuje zjemnění celkově vyloučeného grafitu. Jemnější grafit v matrici rovněž snižuje heterogenitu vnitřního napětí při zatěžování, respektive zmenšuje vrubový účinek grafitických lupínků. Z uvedených (daných) důvodů je možné očkováním zvýšit pevnost litiny. [6, 7]

#### ➤ Vliv rychlosti ochlazování na tvar a velikost grafitu v LLG

Při rychlejším tuhnutí dochází ke krystalizaci grafitu. Vzhledem ke kratším difuzním časům se vyskytují menší a kratší lupínky, zatímco v tlustších stěnách jako delší a hrubší lupínky. Velikost lupínků má významný vliv na mechanické vlastnosti. Závislost délky lupínků v LLG na mechanických vlastnostech je zobrazena v diagramu na obrázku 13.

Negativním přínosem příliš vysoké ochlazovací rychlosti může být krystalizace grafitu typu D, neboli podchlazeného grafitu. Ve srovnání s typem A má velmi jemnou grafitovou, nerovnoměrně rozloženou strukturu grafitu. Tvorba tohoto typu grafitu je podporována vysokým podchlazením, ale může být podpořena i některými prvky. Především nízká koncentrace síry a kyslíku podporuje tvorbu podchlazeného grafitu [17].

Důležitým aspektem pro docílení jemných grafitických lupínků, které jsou rovnoměrně rozložené a snížení rizika vzniku podchlazeného grafitu, je zvýšení počtu grafitizačních zárodků očkováním. Procesem očkování se podrobněji zabývá kapitola 2.4.



Obr. 13 Závislost délky lupínku grafitu na mezi pevnosti LLG [15]



### ➤ Vliv chemického složení na tvorbu grafitu

Prvky, které se podílejí a mají vliv na grafitizaci litiny při tuhnutí eutektika, členíme na [7]:

- Grafitizační – Si, Al, Ni, Cu
- Antigrafitizační – Cr, S, V, Mg, Ce, Te, B, Mo – slabě
- Neutrální – Mn, Zn, W, Co

Grafitizační přísadové prvky podporují tuhnutí litiny podle stabilního systému a také vylučování uhlíku ve formě grafitického eutektika. Antigrafitizační prvky snižují vylučování uhlíku v podobě grafitu, z důvodu vázání uhlíku ve formě karbidů. Rovněž mohou zabraňovat krystalizaci grafitu. Podporují tuhnutí podle metastabilního systému Fe-Fe<sub>3</sub>C a vznik metastabilního eutektika – ledeburitu. Takto vzniklý ledeburit je ve struktuře LLG nežádoucí a bývá nazýván zákalkou. [7]

## 2.3 Chemické složení LLG

Litiny s lupínkovým grafitem obsahují kromě železa i řadu dalších prvků, které můžeme dělit do tří skupin: základní prvky, legury a nečistoty. Základními prvky jsou C, Si, Mn, S a P. Při nižším obsahu prvků, než je smluvní mez dle normy ČSN EN 1559-3 pro chemické složení, se litiny považují za nelegované. S vyšším obsahem prvků, než tato norma uvádí, se pokládají za legující. Nejčastěji jako legující prvky v LLG se používají Mn, Cr, Ni, Cu, Mo, Ti a Sn. Poslední skupinu tvoří prvky, jejichž přítomnost je většinou nežádoucí. Do této skupiny se řadí Pb, Bi, As, V, Zr, a také Cr, Sn a Ti, pokud se nejedná o legující přísady. [6, 7]

Tab. 1 Obvyklé chemické složení LLG [5, 7]

% C	% Si	% Mn	% P	% S
2,5 – 3,5	1,2 – 2,8	0,5 – 1,0	0,2 – 0,5	max. 0,15

Vlivem jednotlivých prvků na aktivitu uhlíku v roztoku železa, který vede ke změně polohy eutektického bodu, přesněji změně hodnoty eutektické koncentrace uhlíku, byl zaveden pro hodnocení chemického složení uhlíkový ekvivalent  $C_E$ . Nejvýraznější vliv na změny v binárním, popřípadě ternárním diagramu, má křemík (Fe-C-Si). Snižuje rozpustnost uhlíku v tavenině, a tím pádem snižuje jeho obsah v eutektiku. Zjednodušený a nejčastěji používaný tvar uhlíkového ekvivalentu je dán vztahem (1) podle literatury [6]:

$$C_E = \% C + \frac{1}{3} (\% Si + \% P) \quad (1)$$

Uhlíkový ekvivalent je bezrozměrnou veličinou. Podle hodnoty  $C_E$  je možno určit o jaký typ slitiny se jedná. Hodnota  $C_E = 4,25$  odpovídá litině s eutektickým složením. Slitiny s nižší hodnotou uhlíkového ekvivalentu jsou podeutektické, a naopak s vyšší hodnotou jsou slitiny nadeutektické. [7]

Uhlík spolu s křemíkem jsou energetickými grafitizátory v litině. Pokud se jejich obsah zvyšuje, v LLG vzniká tendence růstu hrubých grafitových lupínků a mechanické vlastnosti klesají. Proto je snaha, aby celkové ekvivalentní množství uhlíku v LLG bylo co nejmenší. U jakostních očkovaných LLG se  $C_E$  pohybuje kolem 3,40. [6]

Jiným prostředkem pro vyjádření chemického složení může být použit tzv. stupeň eutektičnosti litiny,  $S_c$  (stupeň sycení). Pro výpočet stupně sycení byly v odlišných literaturách navrženy různé vzorce, zahrnující kromě C, Si a P, též Mn, S, případně Cr, Cu. V této práci byly pouze příkladově zvoleny dva vztahy (2) a (3) z literatury [3] a [7].

$$S_c = \frac{\%C}{4,26 - 0,31 \cdot \% Si - 0,27 \cdot \% P - 0,04 \cdot \% S - 0,074 \cdot \% Cu + 0,063 \cdot \% Cr + 0,027 \cdot \% Mn} \quad (2)$$

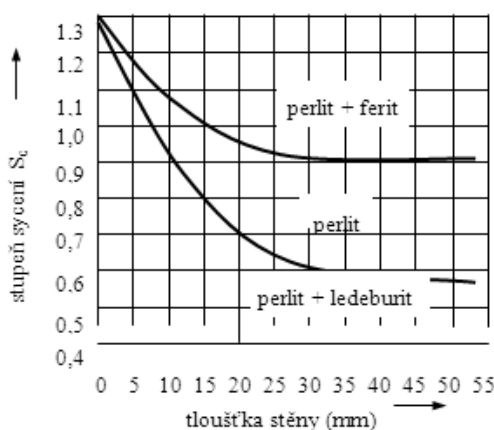
$$S_c = \frac{\% C}{4,25 - 0,30 \cdot (\% Si + \% P)} \quad (3)$$

Mezi uhlíkovým ekvivalentem  $C_E$ , stupněm sycení  $S_c$ , celkovým obsahem C a prvky Si a P platí závislost [6]:

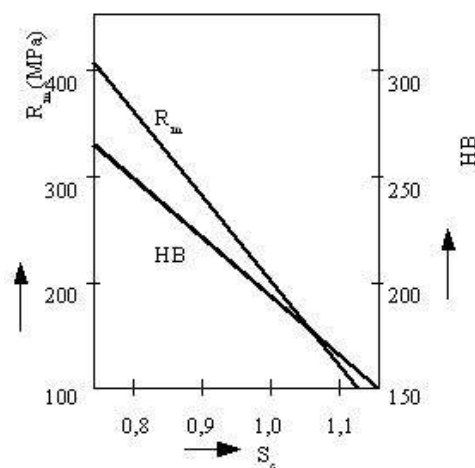
$$S_c = \frac{\% C}{4,3 - C_E + \% C} \quad (4)$$

Obdobně jak u hodnocení litin podle uhlíkového ekvivalentu  $C_E$  i u stupně sycení  $S_c$ , je možno rozdělit slitiny na eutektické ( $S_c = 1$ ), podeutektické ( $S_c < 1$ ) a nadeutektické ( $S_c > 1$ ).

Závislost stupně sycení a tloušťky stěny odlitku, respektive rychlosti ochlazování, demonstruje tzv. Sippův diagram (obr. 14a), na struktuře základní kovové matrice LLG. Dle tohoto diagramu je doporučeno volit chemické složení pro litinu, podle požadované struktury v konkrétním typu odlitku. Mechanické vlastnosti litiny úzce souvisí se vzniklou strukturou, která především závisí na chemickém složení (stupni sycení) a rychlosti ochlazování. Příklad závislosti mezi mechanickými vlastnostmi a chemickým složením demonstruje grafická závislost mezi tvrdostí, pevností a stupněm sycení v diagramu na obrázku 14b.



Obrázek 14a Vliv stupně sycení ( $S_c$ ) a tloušťky stěny odlitku na strukturu LLG [3]



Obr. 14b Závislost stupně sycení ( $S_c$ ) na mechanických vlastnostech LLG [3]

V technické praxi se pro obecné předpoklady struktury používají tzv. strukturní diagramy. Popisují vztah mezi strukturou a chemickým složením litiny. Nejsou to rovnovážné diagramy a platí pouze za předpokladu určitých rychlostí chladnutí. První strukturní diagram byl sestaven již v roce 1923 Maurerem a následně modifikovaný Holtzhausenem. Od té doby byla vypracována řada dalších modifikací. Jedno z posledních zpřesnění strukturních diagramů je diagram dle Laplanchea (obr. 15).

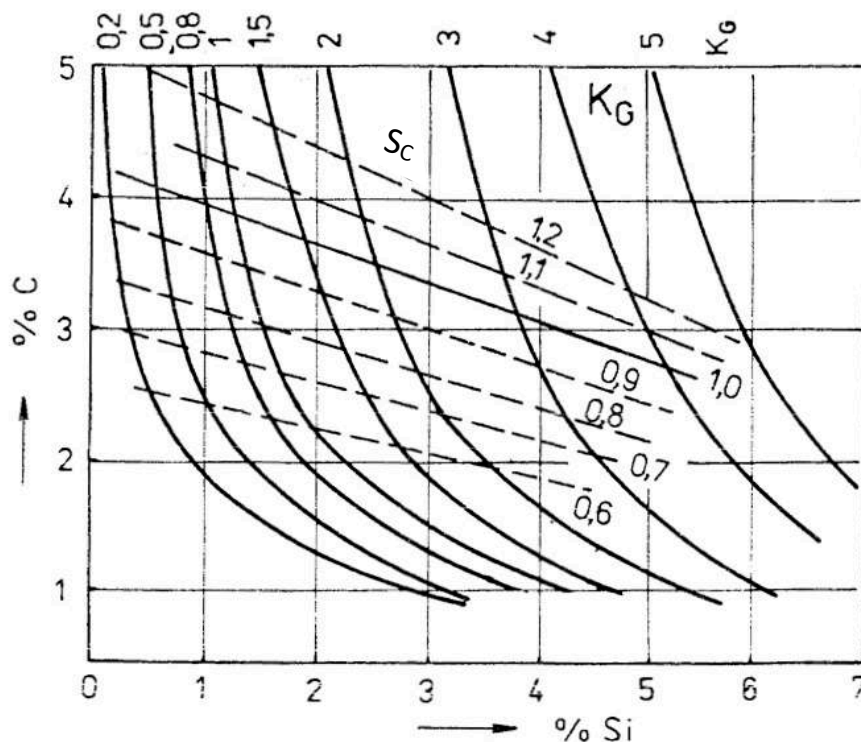


Hlavní modifikací v Laplancheově diagramu oproti Maurerova diagramu je, že hranice mezi oblastmi nejsou přímkové, ale hyperbolické. Jednotlivé strukturní oblasti jsou v Laplancheově odděleny křivkami grafitizačních koeficientů  $K_G$  podle vztahu:

$$K_G = \frac{4}{3} \cdot Si \cdot (1 - \frac{5}{3C + Si}) \quad (5)$$

Pokud by byly do tohoto diagramu zakresleny i přímky pro různé hodnoty stupně sycení je možno zjistit, že při určité konstantní hodnotě  $S_c$  lze získat rozdílné struktury litiny. Čím nižší je obsah uhlíku a vyšší křemíku, při konstantní hodnotě stupně sycení, tím vyšší jsou hodnoty  $K_G$  a tím více feritická je struktura.

Druh litiny	Koeficient grafitizace $K_G$ pro tloušťku stěny		
	30 [mm]	20 [mm]	10 [mm]
Bílá	< 0,65	< 0,75	< 1,05
Maková	0,65 – 0,85	0,75 – 1,10	1,05 – 1,50
Perlitická	0,85 – 2,05	1,10 – 2,25	1,50 – 2,35
Perliticko-feritická	2,05 – 3,10	2,25 – 3,40	2,35 – 3,50
Feritická	> 3,10	> 3,40	> 3,50



Obr. 15 Laplancheův strukturní diagram [7]

### 2.3.1 Základní prvky v LLG

#### ➤ Uhlík

Uhlík je nejdůležitějším prvkem grafitických litin. Spolu s křemíkem má největší vliv na strukturu a vlastnosti LLG. Čím více uhlíku se při tuhnutí vyloučí jako grafit, tím menší je stahování litiny při tuhnutí – tento děj se nazývá grafitickou expanzí. Uhlík ve formě grafitu při tuhnutí zvětšuje svůj objem (1 % vyloučeného grafitu zvětšuje objem litiny asi o 3,2 %). Tímto se zvyšuje využití kovu, a proto odlitky není potřeba tolik nálitkovat oproti ostatním železným slitinám. Na tvar a rozložení grafitu má vliv chemické složení a rychlost ochlazování (viz kapitola 2.2). [6,7]

#### ➤ Křemík

Po uhlíku je křemík nejvýznamnějším prvkem v LLG. Svou přítomností zmenšuje rozpustnost uhlíku v tekutém i tuhém stavu, a tím podporuje grafitizaci. Při transformaci austenitu podporuje vznik feritu. Křemík také zvyšuje eutektickou i eutektoidní teplotu a posouvá eutektický i eutektoidní bod doleva, to znamená k vyšším teplotám a nižšímu obsahu uhlíku. S rostoucím obsahem uhlíku a křemíku klesá teplota likvidu a zužuje se interval tuhnutí, což je pozitivní fakt z hlediska slévárenských vlastností. [6]

#### ➤ Mangan

Mangan v LLG se nejčastěji pohybuje v rozmezí od 0,55 % do 0,75 %. Se zvyšujícím se obsahem manganu ve slitině, roste tendence vzniku perlitické struktury. Také zvyšuje dispersitu (zjemnění lamelární struktury) a stabilizuje perlit ve struktuře. Tento pozitivní vliv na perlit vede ke zlepšení pevnosti tvrdosti a obrobitelnosti. Rovněž důležitou funkcí manganu v LLG je neutralizace vlivu síry. Váže se na síru a tvoří sirníky manganu (MnS). [11]

#### ➤ Fosfor

Mírně podporuje grafitizaci. Jeho účinek na grafitizaci je kladný v LLG přibližně do koncentrace 0,4 % až 0,5 % P. Zvyšování koncentrace fosforu zhoršuje mechanické vlastnosti. Snížení mechanických vlastností při vyšších koncentracích je způsobeno vznikem fosfidického eutektika – Steadit. Způsobuje výrazné snížení dynamických vlastností, tedy křehkost. Segregaci fosfidického eutektika podporuje Mo, Cr, W a V, proto je nutno v litinách legovaných těmito prvky udržovat co nejnižší koncentrace fosforu. Fosfor se jenom zřídka přidává záměrně. Do taveniny se dostává nejčastěji z vratného materiálu (litinové radiátory) nebo surového železa. [2, 7]

#### ➤ Síra

Je v LLG nežádoucím prvkem. Má vysoký sklon k segregacím a způsobuje zkřehnutí litiny. Do obsahu 0,15 % S probíhá ve struktuře vylučování grafitu typu A (obr. 12). Většina sléváren s kuplovnou drží obsah síry v LLG v rozmezí 0,09 % až 0,12 %. Při vyšším obsahu působí antigrafitizačně, nebo také způsobuje vznik plynových bublin u odlitků litých do pískových forem. Tento negativní účinek se odstraňuje přidáním manganu. Minimální obsah manganu pro LLG se doporučuje volit podle vztahu [7]:

$$Mn = 1,7 \cdot S + 0,3 \text{ [%]} \quad (6)$$

### 2.3.2 Legující prvky v LLG

Účelem legování, do cca 1,5 % obsahu legujícího prvku, je získání takových vlastností, které nelze dosáhnout u nelegovaných LLG. Mezi hlavní legující prvky patří: chrom, vanad, molybden, měď, nikl, cín, a občas se ještě používá hliník a titan. Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, některé z těchto prvků patří mezi karbidotvorné prvky. U těchto prvků, hlavně vanad a chrom, je potřeba dávat pozor na množství přísady, aby nedošlo k metastabilnímu tuhnutí a vzniku ledeburitické struktury. Tyto prvky se musí přidávat v omezeném množství nebo musí být kompenzovány grafitotvornými prvky, jako je měď a nikl. Následně budou popsány některé důležité legující prvky a také ty, které jsou použity pro legování odlitků, jenž byly použity pro experiment diplomové práce. [3]

#### ➤ Měď a Nikl

Měď a Nikl v LLG mají podobné účinky. Zejména zpevňují základní kovovou matici a snižují tendenci vzniku zákalky, respektive vyloučení uhlíku ve formě cementitu. Patří mezi prvky s mírným grafitizačním účinkem, proto se používají jako náhrada za část křemíku v LLG. Vliv mědi na vylučování grafitu je asi 0,2-0,3krát větší, než vliv křemíku. V čistém Fe je rozpustnost mědi neomezená, ale i malé množství C ve slitině výrazně snižuje rozpustnost Cu. U LLG se rozpustnost mědi pohybuje kolem 3,5 - 4 %. Při ochlazování v tuhém stavu se rozpustnost Cu v austenitu snižuje. Na eutektoidní teplotě je rozpustnost mědi ještě stále 3,5 %. Všechna Cu nad 3,5 % se vylučují jako sekundární Cu v podobě malých kuliček. Rozpustnost Cu v alfa-Fe je pouze 0,6 %, rozpustnost mědi ve feritu lze zvýšit přidáním niklu. Zvýšením obsahu niklu, přibližně na 15 % a mědi na 6 %, můžeme docílit austenitické struktury. Jinou možností docílení austenitické struktury je zvýšit obsah niklu na 20 %, jak popisuje norma ASTM pro austenitické litiny s lupínkovým grafitem. [18]

#### ➤ Chrom

Obsah chromu v LLG se pohybuje nejčastěji pod 0,10 % Cr, jako residuální prvek vnesen vratným materiálem. Chrom se často přidává cíleně do taveniny hlavně pro zvýšení tvrdosti ale také i pevnosti v tahu. Pro tento cíl se obsah chromu zvyšuje na 0,20 % až 0,35 % Cr. Nad tento obsah chromu je nutno zvýšit obsah grafitizačních prvků (např. Cu), aby se vyhnulo vzniku karbidu chromu a zákalky. Chrom také podporuje vlastnosti odlitků z LLG za zvýšených teplot. [18, 7]

#### ➤ Molybden

Jeden z nejčastěji používaných legujících prvků pro zvýšení pevnosti materiálu je molybden. Podobně jako chrom je karbidotvorným prvkem. Do obsahu 0,6 % Mo nemusí být základní složení litiny měněno. Při  $S_c > 0,87$  vznikají karbidy až při více než 2 % Mo. Podle Wolterse [19] se přítomností molybdenu zvyšuje počet eutektických buněk. Molybden se nejčastěji přidává v rozsahu 0,35 % Mo až 0,6 % Mo. [19, 18]

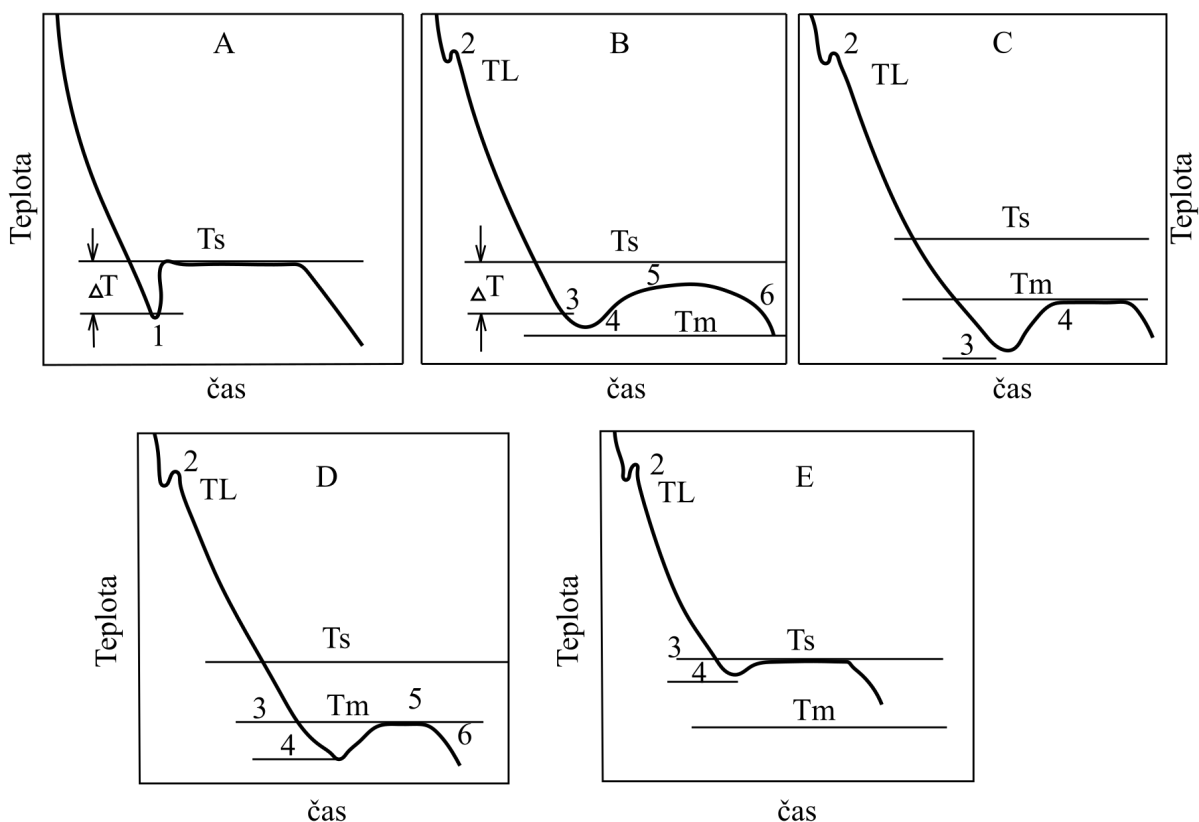
U legování molybdenem je nutno dávat pozor zvláště na obsah fosforu, protože se koncentruje ve zbývající tavenině a tvoří komplexní kvaternární eutektikum. Toto eutektikum napomáhá vzniku mikrostaženin a podporuje vznik trhlin. Z tohoto důvodu se v LLG legované molybdenem obsah fosforu snižuje (max. 0,2 % P), aby legování bylo co nejefektivnější. Molybden se také často používá jako legura pro odlitky, na které je kladen požadavek vysoké teplotní odolnosti. [18]

Podobné vlastnosti jako molybden má rovněž vanad, ale obsah musí být limitován max. do 0,15 %. Při vyšším množství vanadu vznikají v LLG karbidy vanadu. Dokonce i při tak nízkém obsahu jako je 0,15 %, má vanad velmi vysoký vliv na vlastnosti za zvýšených teplot. [18]

## 2.4 Očkování

Jedná se o mimopecní technologickou operaci, při které se do taveniny vnáší substance (očkovadlo), které vedou ke vzniku heterogenních zárodků pro následnou krystalizaci grafitu. Účelem očkování je tedy optimalizace struktury litiny pro dosažení jemného rovnoměrně vyloučeného lupínkového grafitu typu A. Grafítizační očkování litiny s lupínkovým grafitem umožňuje zvýšit počet krystalizačních zárodků grafitu, jenž vede ke zjemnění grafitu a snížení podchlazení, zabráňující vzniku zákalky. Je potřeba zdůraznit, že očkování není přímé vnášení zárodku, ale zárodky vznikají až při reciproční interakci mezi některými prvky v tavenině a aktivními prvky očkovadla. Teplota nukleace v očkované LLG je obvykle vyšší, než je eutektická teplota v metastabilním systému. Proto není prostor pro vznik karbidického eutektika, tzn. snížení rizika vzniku zákalky. [20, 6, 7]

Průběh krystalizace z taveniny se nejlépe sleduje na ochlazovacích křivkách, které velmi názorně vypovídají o charakteru primární struktury litiny po jejím ztuhnutí. Specifické průběhy ochlazování litin různého složení, chladnoucích různou rychlostí, představují ochlazovací křivky na obrázku 16. [6]



Obr. 16 Křivky ochlazování, A – čistý kov, B – litina s lupínkovým grafitem, C – bílá litina, D – maková struktura, E – naočkovaná litina [6]

Na obrázku 16E je znázorněn průběh ochlazování grafitizačně očkované litiny. V tomto případě po efektivně provedeném očkování nastává v bodě 3 krystalizace grafitu, při velmi malém přechlazení a při vysokém počtu krystalizačních zárodků grafitu, respektive vysokém počtu eutektických buněk. Tímto procesem se uvolní velké množství latentního tepla, takže se soustava podchladí pouze do bodu 4 a vzápětí znovu dosáhne rovnovážné teploty  $T_s$ . Následkem je, že se nevytloučí žádné přechodové struktury, ale jen struktura s grafitem typu A, jako výsledek vysoké střední teploty krystalizace. [6]

Mechanismus očkování není doposud jednoznačně objasněný. Mezi vědci převládá názor, že očkovačla obsahující prvky, které snižují rozpustnost uhlíku, způsobují v tavenině v uzavřeném objemu místní přesycenou taveninu právě uhlíkem. Takto přesycena oblast vede ke vzniku shluku grafitu, což je vlastně nový grafitický zárodek. Popřípadě se využívají tzv. oxidické zárodky, kdy po přidání FeSi proběhne v tavenině dezoxidace, jejímž produktem jsou jemné částice  $\text{SiO}_2$ . Krystalizační zárodky jsou pak startovací odrazové můstky, na kterých dále rostou grafitové útvary. Předpoklad pro růst grafitů na vzniklých grafitických zárodcích je, že zárodky by měly mít stejnou krystalografickou strukturu jako má grafit (hexagonální), anebo aspoň jeden stejný nebo velmi podobný parametr. [3, 20]

#### ➤ **Složení a princip působení očkovačla**

Očkování je složitý fyzikálně-chemický, termodynamický proces ovlivněn řadou faktorů. Hlavními faktory ovlivňující tento proces jsou:

- teplota taveniny,
- chemické složení taveniny,
- typ očkovačla (chemické složení očkovačla a zrnitost),
- technologie neboli způsob očkování,
- dobou od naočkování po odlití a dobou tuhnutí odlitků.

Očkovadla se nejčastěji přidávají do taveniny dvěma způsoby. Pouhým sypáním či plněným profilem do proudu kovu při vylévání z pece nebo sypáním do lící pánve, která je z 1/4 naplněná taveninou. Literatura [7] popisuje další moderní a efektivní způsoby očkování.

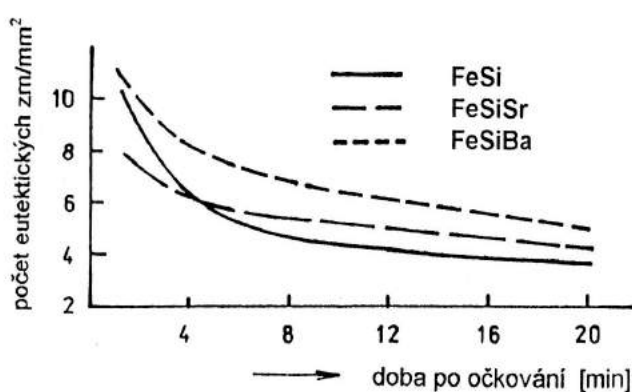
Očkovadla jsou tvořena dvěma složkami, nosičem a krystalizačně aktivní složkou. Nosič tvoří hlavní část očkovačla. Požadavky na nosič jsou, aby byl v souladu se složením kovu, zvyšoval aktivitu uhlíků, se rozpouštěl dobře v tavenině a zajistil vysokou dispersitu. Tyto požadavky nejlépe zajišťují slitiny Fe-Si. Proto ferosilicium FeSi75 (slitina Fe se 75 % Si) je nejčastěji používaným očkovačlem. Důvodem používání je také nízká cena a dostupnost. Dodává se ve formě zrnité, drátu (plněného profilu) nebo kompaktních bloků. Aktivní krystalizační složky očkovačla jsou obsaženy pouze v malé koncentraci, ale pro funkci očkovačla jsou nepostradatelné. Bylo prokázáno, že samotné ferosilicium nemá očkovačací účinek. Mezi aktivní prvky se řadí především Ca, Sr, Al, Zr nebo Ba. Tyto prvky se zejména vážou s kyslíkem a sírou. Tvoří s nimi sloučeniny (oxidy a siřníky), které mají vyšší teplotou tuhnutí, než má litina, tudíž slouží jako nukleační zárodky. [7, 3]

Dle [20] se obsah kyslíku považuje za rozhodující pro efekt očkování. Obsah kyslíku je závislý na teplotě taveniny, protože při určité limitní teplotě dochází k uhlíkovému varu. Tato teplota je ovlivněná chemickým složením. Dochází k redukci oxidu křemíku uhlíkem a obsah kyslíku klesá. Z tohoto důvodu je důležité nepřehřívát litinu na vysoké teploty, jelikož to způsobuje snížení počtu heterogenních zárodků. Daný problém lze vyřešit vícestupňovým očkováním, například prvním stupněm je přidáním očkovačla do proudu kovu při vylévání taveniny z pece. Dalším stupněm může být očkovací tělísko přímo ve formě odlitků. Celková hmotnost očkovačla se rozdělí do jednotlivých stupňů. [20]

Množství dávkovaného očkovačla se řídí především podle typu použitého očkovačla, tj. intenzitou jeho účinku, dobou do odlití poslední formy a metodou očkování. U většiny typů očkovačel pro LLG se dávkování pohybuje v rozmezí 0,2-0,4 %, případně až 0,6 % očkovačla na hmotnost tekutého kovu. [6]

### ➤ Odezňování očkovacího účinku

Je potřeba zdůraznit že účinek očkovačla na krystalizaci grafitu je časově limitován. Maximální účinnost je bezprostředně po naočkování. S časem odezňává, typicky 10-15 minut od naočkování. Tento čas závisí na teplotě kovu, druhu použitého očkovačla, jeho množství a zrnitosti. Odezňování je způsobeno hlavně koagulací zárodků, rychlejším vyplouváním v důsledku hrubnutí, a také v důsledku chemické homogenizace taveniny. Výsledkem homogenizace je vyrovnání chemické nehomogenity, tzv. lokálního přesycení grafitotvornými prvky (křemík a hliník), které podporovaly nukleaci grafitu. Dalšími faktory způsobující odezňování mohou být například nízká teplota varu některých prvků (Ca) nebo jejich nízká atomová hmotnost (Al). Některé vlivy se mohou i kombinovat. Například stroncium, přestože má teplotu varu již při 1364 °C, má značnou atomovou hmotnost, a proto z taveniny odchází pomaleji (obr. 17). [20, 21, 7]



Obr. 17 Odezňování očkovacího účinku [7]

Diagram na obrázku 17 znázorňuje odezňování očkovacího účinku. Z diagramu je patrné, že se očkovačlo na bázi stroncia oproti ostatním jeví jako vhodnější, protože po naočkování dává menší počet eutektických buněk, a přitom jeho účinek odezňává pomalu. Vysoký počet eutektických buněk ovlivňuje průběh tuhnutí. Litina s příliš vysokým obsahem eutektických buněk (přeočkovaná) může mít sklon k endogennímu neboli kašovitému tuhnutí a vzniku mikro staženin v objemu odlitku. [7]

Odezňování se projevuje zhoršením grafitizační schopnosti, zvětšením zákalky a postupným snižováním počtu eutektických buněk na výchozí stav před očkováním. Kvůli tomu je zapotřebí v co nejkratším čase po naočkování litinu odlít, obvykle do 10 minut nebo se musí provádět vícestupňové očkování. Jak již bylo uvedeno na příkladu stroncia v předchozím odstavci, některé prvky zpomalují, lépe řečeno mohou prodloužit kritickou dobu do odlití až na 20 min.

Důležitost očkovaní je tím vyšší čím nepříznivější jsou podmínky pro vznik grafitů. Zejména u tenkostěnných odlitků s vysokou rychlostí ochlazování a nepříznivým chemickým složením (nízkým uhlíkovým ekvivalentem, vysoký obsah karbidotvorných prvků). Pokud je litina nedostatečně naočkována, může vznikat nepravidelně rozložený grafit typu B, přechlazené formy grafitu typu D a E nebo oblasti s metastabilní strukturou. Tyto okolnosti vedou ke zhoršení technologických a mechanických vlastností litiny. Na druhou stranu, negativním efektem vysokého stupně očkovaní může být kašovitě tuhnutí litiny, které může vést ke vzniku porezity v odlitku. [6, 7]

## 2.5 Mechanické vlastnosti LLG

Mechanické vlastnosti jsou kvantitativní hodnocení chování materiálů, za působením vnějších mechanických sil. Mechanické vlastnosti slévárenských materiálů se vyjadřují především pevností a houževnatostí. Pevnostní hodnoty litiny s lupínkovým grafitem se zjišťují pomocí tahových zkoušek. Pevnost materiálu je pak vyjádřena jako pevnost v tahu ( $R_m$ ) nebo smluvní mez kluzu ( $R_{p0,1}$ ). Houževnatost je definována třemi veličinami: tažností, kontrakcí a nárazovou prací. U LLG se tažnost pohybuje pod 1 %. Tak nízká hodnota je téměř zanedbatelná a při zkouškách mechanických vlastností se tažnost téměř nezjišťuje. Další mechanickou charakteristikou materiálu je jeho tvrdost (nejčastěji určena jako HB – tvrdost podle Brinella) a modul pružnosti (E). [6]

### ➤ **Tvrdost**

Tvrdost závisí především na základní kovové matici. Hodnoty tvrdosti LLG jsou oproti běžným ocelím vyšší. S rostoucí pevností v tahu se také zvyšuje i tvrdost. Tvrdost LLG se obvykle pohybuje mezi 120 až 250 HB. Z důvodu rozdílných tvrdostí strukturních složek litiny s lupínkovým grafitem (grafit má značně nižší tvrdost oproti kovové matici) pro získání objektivních výsledků, se doporučuje měřit tvrdost pouze metodou podle Brinella, s průměrem kuličky 10 mm. [6]

### ➤ **Pevnosti v tahu ( $R_m$ )**

Definicí pevnosti materiálu je odpor proti deformaci a porušení vnějšími silami. Pevnost v tahu je výchozí charakteristikou jakosti LLG. Na rozdíl od ocelových materiálů jsou hodnoty pevnosti o poznání nižší, a to je zapříčiněno přítomností grafitu. Hodnoty pevnosti v tahu se pohybují u LLG v rozmezí 100 MPa až max. 400 MPa. Z konstrukčního hlediska se doporučuje zohlednit a přizpůsobit konstrukci namáhaných částí odlitků pro zatížení na tlaku, jelikož pevnost v tlaku LLG je přibližně čtyřnásobně vyšší než pevnost v tahu. Pevnost v tlaku LLG se pohybuje v rozmezí 600 až 1100 MPa. [6]

### ➤ Vztah mezi tvrdostí a pevností v tahu

Na základě mnoha rozsáhlých vědeckých prací byly vyhodnoceny vztahy mezi základními mechanickými vlastnostmi různých značek LLG a tloušťkou stěn testovacích těles a následně zpracovány do řady diagramů, příkladově je uveden diagram na obr. 18. [6]

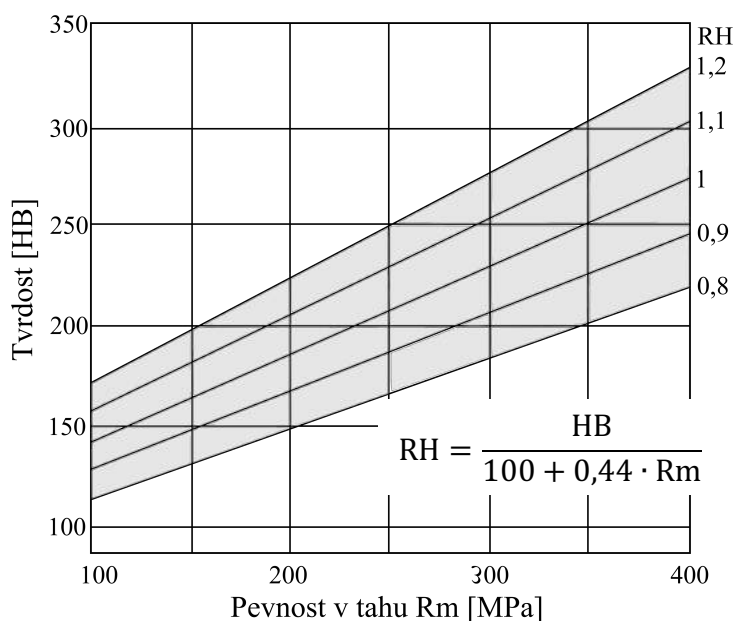
Pevnost a tvrdost, rovněž i Youngův modul pružnosti pro daný druh, jsou vzájemně v přibližné relaci. Často růst hodnot jedné charakteristiky se projeví růstem hodnot jiné mechanické vlastnosti. Mezi tvrdostí podle Brinella, a pevností v tahu pro nelegované LLG platí empirický vztah [6, 22]:

$$HB = RH \times (A + B \times Rm) \quad (7)$$

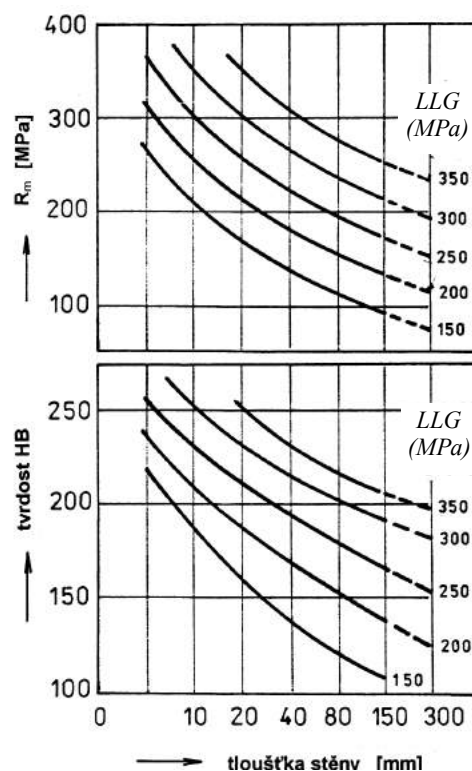
Zde jsou všeobecně přijímané hodnoty pro empirické konstanty:  $A = 100$ ,  $B = 0,45$ . Faktor RH je tzv. relativní tvrdost. Používá se pro posouzení skutečné kvality vzhledem k vypočteným hodnotám tvrdosti. Z diagramu na obrázku 19 je zřejmé, že RH faktor se pohybuje v mezích od 1,2 do 0,8. Hodnota faktoru hlavně závisí na vsázce, procesu tavení a metalurgické metodě zpracování. Množství detailů tykajících se RH je diskutováno v literatuře Pattersona, MacKenzie, Weise a dalších. Patterson ve své literatuře uvádí modifikaci vztahu (7) do následující podoby [6, 7, 22]:

$$\text{pro } Rm > 196 \text{ MPa: } HB = 100 + 0,438 \cdot Rm \quad (8)$$

$$\text{pro } Rm < 196 \text{ MPa: } HB = 44 + 0,724 \cdot Rm \quad (9)$$



Obr. 19 Poměr mezi tvrdostí (HB) a pevností v tahu pro LLG [22]



Obr. 18 Vliv tloušťky stěny na pevnost v tahu a tvrdost pro různé značky LLG [7]



Dle normy ČSN EN 1561 jsou normalizovány jakosti GJL s pevností 150 až 450 MPa. Rozmezí pevnosti v jednotlivých třídách je ohraničený interval, daný nominální pevností  $R_m$  až  $R_m + 100$  Mpa. Tvrdost litiny se uvádí rozmezím tvrdosti podle Brinella (HB), a to podle směrodatné tloušťky stěny odlitku [7]. Hlavní mechanické vlastnosti dle normy EN a ČSN jsou zaznamenány v tabulce 2, neuvedené vlastnosti LLG lze dohledat v literatuře [3].

Tab. 2 Mechanické a fyzikální vlastnosti LLG [3]

Vlastnost			Označení litiny dle EN a ČSN				
			EN-GJL-150 (EN-JL 1020) 42 2415	EN-GJL-200 (EN-JL 1030) 42 2420	EN-GJL-250 (EN-JL 1040) 42 2425	EN-GJL-300 (EN-JL 1050) 42 2430	EN-GJL-350 (EN-JL 1060) 42 2435
			struktura				
			Feriticko-perlitická	Perlitická			
Pevnost v tahu	$R_m$	N/mm <sup>2</sup>	150 až 250	200 až 300	250 až 350	300 až 400	350 až 450
Smluvní mez kluzu	$R_{p0,1}$	N/mm <sup>2</sup>	98 až 165	130 až 195	165 až 228	195 až 260	228 až 285
Tažnost	A	%	0,8 až 0,3	0,8 až 0,3	0,8 až 0,3	0,8 až 0,3	0,8 až 0,3
Pevnost v tlaku	$\sigma_{db}$	N/mm <sup>2</sup>	600	720	840	960	1080
Pevnost v ohybu	$\sigma_{bB}$	N/mm <sup>2</sup>	250	290	340	390	490
Pevnost ve střihu	$\sigma_{aB}$	N/mm <sup>2</sup>	170	230	290	345	400
Pevnost v krutu	$\tau_{tB}$	N/mm <sup>2</sup>	170	230	290	345	400
Max. tvrdost	HB		200	220	240	260	270
Modul pružnosti	E	kN/mm <sup>2</sup>	78 až 103	88 až 113	103 až 118	108 až 137	123 až 143
Poissonův poměr	$\nu$	-	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
Únavová pevnost v ohybu	$\sigma_{bW}$	N/mm <sup>2</sup>	70	90	120	140	145
Mez únavy, tah-tlak	$\sigma_{zdW}$	N/mm <sup>2</sup>	40	50	60	75	85
Lomová houževnatost	$K_{IC}$	N/mm <sup>3/2</sup>	320	400	480	560	650
Hustota	$\zeta$	g/cm <sup>3</sup>	7,10	7,15	7,20	7,25	7,30
Stupeň sycení	$S_c$	-	0,99-1,05	0,93-0,99	0,87-0,93	0,81-0,87	0,75-0,81
Doporučená tl. stěny	-	[mm]	5-30	8-45	15-70	25-100	40-150 i více

Poznámka: 1 N/mm<sup>2</sup> je ekvivalent k 1 MPa

V předchozích kapitolách (2.1, 2.2) byly popsány vlastnosti a charakteristiky jednotlivých složek, které spolu tvoří celek a definují výsledné vlastnosti odlitků z LLG. Z kapitol rovněž vyplývá, jakým způsobem se navzájem ovlivňují. Částečně byly zmíněny různé kombinace těchto faktorů, ovlivňující mechanické a fyzikální vlastnosti. V následujících podkapitolách bude rozvedeno, jak tyto hlavní stavební kameny (struktura, chemické složení, rychlost tuhnutí a ochlazování) ovlivňují mechanické a fyzikální vlastnosti.

### 2.5.1 Vliv struktury na mechanické vlastnosti

Litina s lupínkovým grafitem je křehký materiál, který v nízkém stupni podléhá deformacím. Při zatěžování dochází ke koncentraci napětí na koncích grafitických lupínků, které působí vrubově v matrici. Pevnost materiálu závisí na mikrostruktura, a především na vyloučeném grafitu. Pro řízení mikrostruktury a pevnosti se musí měnit rychlost ochlazování a chemické složení.

#### ➤ Grafit

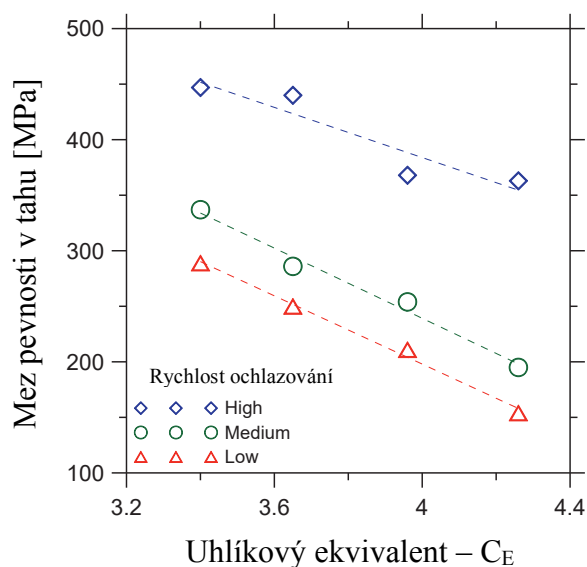
Příspěvky grafitových lamel nejvýznamněji ovlivňují mechanické vlastnosti. To činí množství, velikost, morfologii a dispersitu důležitými faktory. Vyšší obsah grafitu (vyšší  $C_E$ ) a delší grafitové lupínky snižují modul pružnosti a pevnost v tahu (obr. 20). Modul je tímto citlivý na slitinovou kompozici, což činí modul jedinečným pro každé složení. [23]

Grafit svou přítomností v materiálu ovlivňuje mechanické vlastnosti dvojím způsobem:

- zmenšuje nosný průřez odlitku v průběhu působení tahových sil, a tím snižuje mechanické vlastnosti odlitku
- působí vrubovým účinkem (obr. 10), tudíž dochází k nehomogennímu rozložení napětí v průřezu odlitku a vytváří krizová napětí při zatížení. Grafit svým rozložením a tvarem ovlivňuje celistvost základní kovové matrice a snižuje mechanické vlastnosti odlitku v porovnání s ocelí. [6]

Spolu se snížením pevnosti dochází i ke snížení tvrdosti, a obvykle také ke snížení plasticity a houževnatosti. Na druhou stranu při snížení pevnosti, zmenšuje se vrubová citlivost a zlepšují se tlumící schopnosti.

Nejnepříznivější účinek, z ohledu na mechanické vlastnosti, má lupínkový tvar grafitu. Naopak nejpříznivější účinek má kuličkový tvar grafitu. Nejlepších vlastností se dosahuje při rovnoměrně rozloženém grafitu typu A. Očkování napomáhá vzniku tohoto typu grafitu (viz kapitola 2.4). Růžicový, smíšený nebo mezidendritický grafit typu C, D a E, jsou známkou nízkých mechanických hodnot LLG. [6, 23]



Obr. 20 Závislost mezi uhlíkovým ekvivalentem a pevností v tahu, pro jednotlivé rychlosti ochlazování [24]

Další pozitivní vlastnost materiálu obsahující grafit je nižší hmotnost, na rozdíl od jiných slitin železa. Grafit má měrnou hmotnost asi  $2500 \text{ kg/m}^3$ , proto svou přítomností snižuje měrnou hmotnost litiny a zároveň i celkovou hmotnost odlitku. Grafit také zlepšuje kluzné vlastnosti a má tlumící schopnost. Pozitivní vlastnost LLG je velmi malá vrubová citlivost. Grafitické lupínky koncentrují napětí vevnitř materiálu na svých ostrých zakončeních, a vytváří mnoho vrubů, které výrazně zmenšují vliv vnějších vrubů na povrchu materiálu.

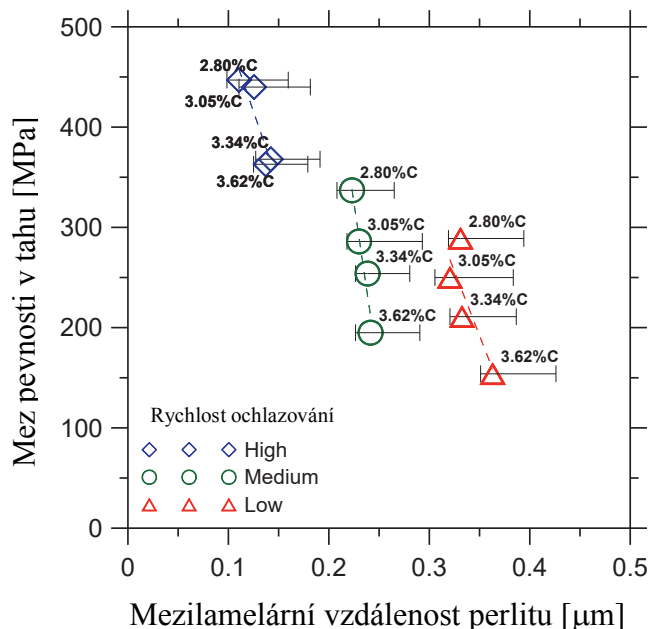
Při cyklickém namáhání, například u vibrací, vznikají v okolí lupínek třecí síly, mění se v teplo. Tření snižuje napěťové špičky, a proto litiny s lupínkovým grafitem mají vysokou hodnotu meze únavy. [23]

### ➤ Základní kovová matrice

V kapitole 2.1 byly popsány základní struktury, vznikající v tepelně nezpracované litině a jejich charakteristiky. Rozhodujícími činiteli, ovlivňující výslednou strukturu v odlitku (jestli bude perlitická, feritická nebo feriticko-perlitická), jsou stupeň sycení a rychlost ochlazování. Z tabulky 2 jasně vyplývá, že se zvyšujícím podílem perlitu v základní kovové matici rostou mechanické vlastnosti. Perlitická matrice obsahuje dvě fáze, ferit a cementit. Ferit je nositelem houževnatosti s nižší pevností, naopak cementit je tvrdá a křehká intermetalická sloučenina.

Hodnoty mechanických vlastností materiálů s perlitickou strukturou závisí na jemnosti perlitu, respektive na mezilamelární vzdálenosti perlitu. Bodový diagram na obrázku 21 reprezentuje výsledky akademické práce [24], která se mimo jiné zabývá vztahem mezi pevností v tahu a perlitickou mezilamelární vzdáleností u LLG. Z diagramu plyne, že se zmenšující se vzdáleností mezi perlitickými lamelami, roste pevnost v tahu. Přítomnost perlitu v matici je žádoucí pro mnoho konstrukčně funkčních součástí, proto její vznik v matici je často podporován přidáváním legujících prvků (více v kapitolách: 2.3.2, 2.5.4).

Z hlediska nejpříznivějších mechanických vlastností je optimální dosahovat u LLG jemný a rovnoměrně vyloučený lupínkový grafit typu A, s jemnou perlitickou strukturou základní kovové matrice. [23]



Obr. 21 Závislost mezilamelární vzdálenosti perlitu na pevnosti v tahu, pro jednotlivé rychlosti ochlazování [24]

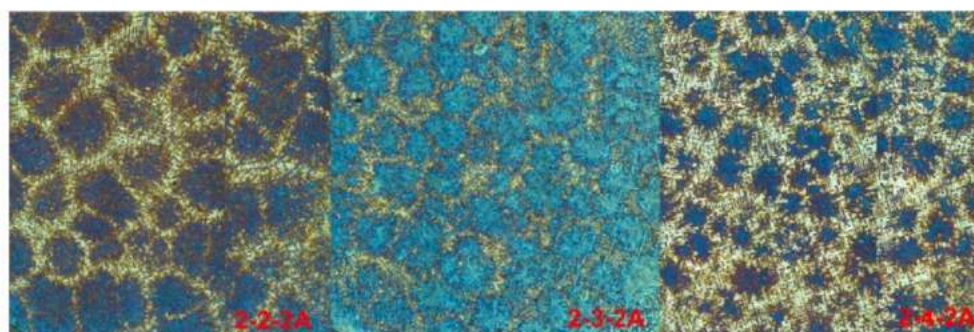
## 2.5.2 Závislost mechanických vlastností na velikost eutektických buněk

Další kritérium, podle kterého lze hodnotit výsledné mechanické vlastnosti, je velikost eutektických buněk. Eutektické buňky jsou tvořené rozvětveným grafitem a austenitem (kapitola 2.2 obr. 10). Vlivem použití očkovačla vznikají menší zrna, které tvoří jemnější strukturu materiálu, zatímco přehřátím taveniny a příliš dlouhou dobou tuhnutí vznikají větší zrna, respektive nižší mechanické vlastnosti. [23]

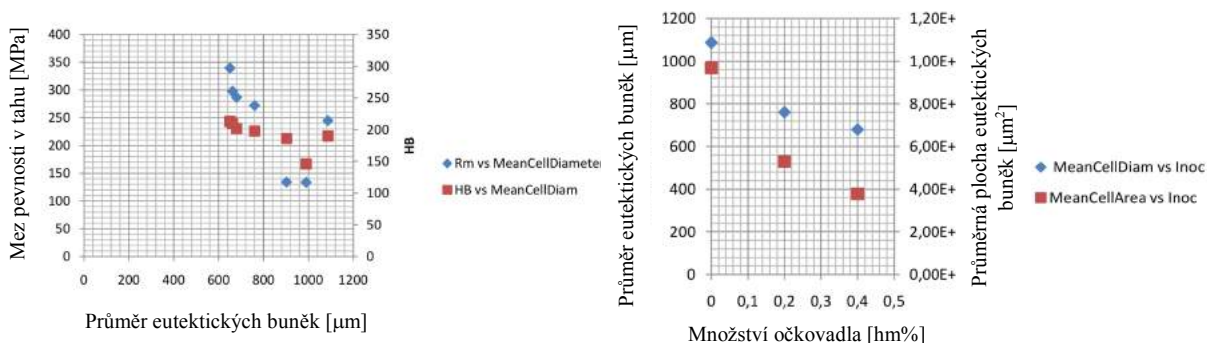
Danou problematikou se podrobněji zabývá ve své akademické práci Samuelsson [23], a také Górný [25] ve svém článku. Samuelsson pozoroval vliv množství očkovačla v GJL 300 na velikost eutektických buněk, v závislosti na změně mechanických vlastností litiny. Chemické složení, množství očkovačla a vliv velikosti eutektických buněk na mechanické hodnoty zachycuje obrázek 22.

Material	Cu (wt %)	Cr (wt %)	N (ppm)	CE*	Očkovačlo [%]
2.2.2A	0.50	0.31	90	3.92	0.0
2.3.2A	0.50	0.36	90	3.88	0.2
2.4.2A	0.52	0.38	90	3.93	0.4

\* CE is calculated as Equation 1.



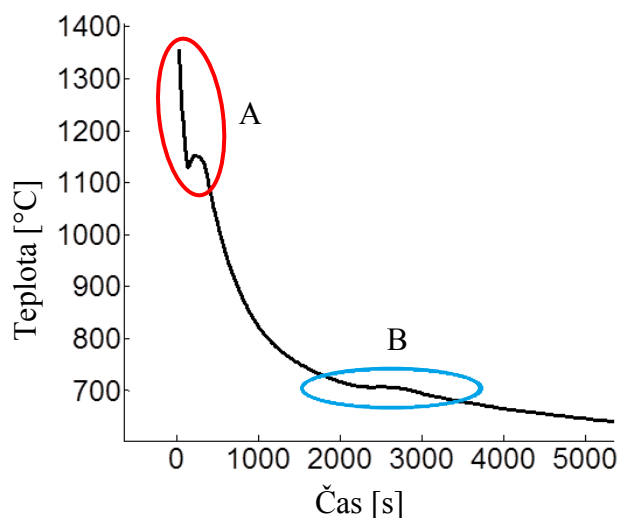
Naleptané vzorky 2-2-2A, 2-3-2A a 2-4-2A. Zobrazující různé velikosti a množství eutektických buněk při použití 100x zvětšení



Obr. 22 Výsledky závislosti mechanických vlastností na velikosti eutektických buněk v LLG [23]

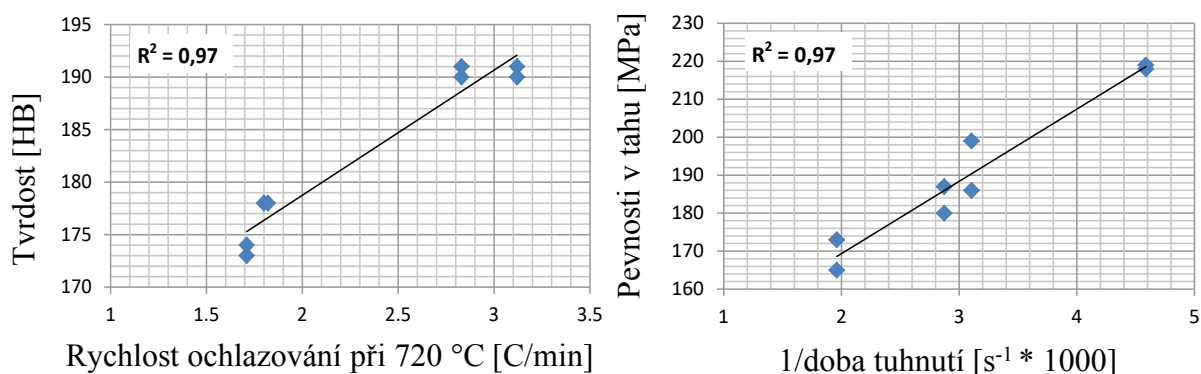
### 2.5.3 Vliv rychlosti tuhnutí a ochlazování na mechanické vlastnosti

V tradičních výzkumech se často dávají mechanické vlastnosti zkušebních geometrií (desky, schody) do souvislosti s tloušťkou stěny. Přesněji řečeno dobou od počátku tuhnutí až do momentu, kdy těleso dosáhne teploty, při které neprobíhají strukturální změny. Tímto dochází k nechtěnému splnutí dvou faktorů, doby tuhnutí a rychlosti ochlazování, do jednoho. Konkrétněji se jedná o dobu přeměny veškeré tekuté fáze na tuhou (oblast A na obr. 23) a rychlost ochlazování při eutektické teplotě, která může být vyjádřena jako °C/min (oblast B na obr. 23). Tuto problematiku popisuje více ve své práci [26] Schmidt.



Obr. 23 A – doba tuhnutí, B – rychlost ochlazování při eutektoidní překrystalizace

Zaobírá se vztahem mezi dobou tuhnutí, rychlostí ochlazování, mikrostrukturou a mechanickými vlastnostmi v nízko legované LLG. Schmidt na základě měřených mechanických vlastností (tvrdost, pevnost v tahu) v různých místech bloku motoru vyvozuje dva závěry. Jednotlivé mechanické vlastnosti jsou ovlivňovány různým způsobem. Podle lineární závislosti z grafu na obrázku 24 Schmidt poukazuje, že mez pevnosti především závisí na době tuhnutí a výsledné jemnosti grafitu. Na druhou stranu tvrdost materiálu závisí zvláště na rychlosti ochlazování během perlitické transformace a výsledné jemnosti perlitu. [26]



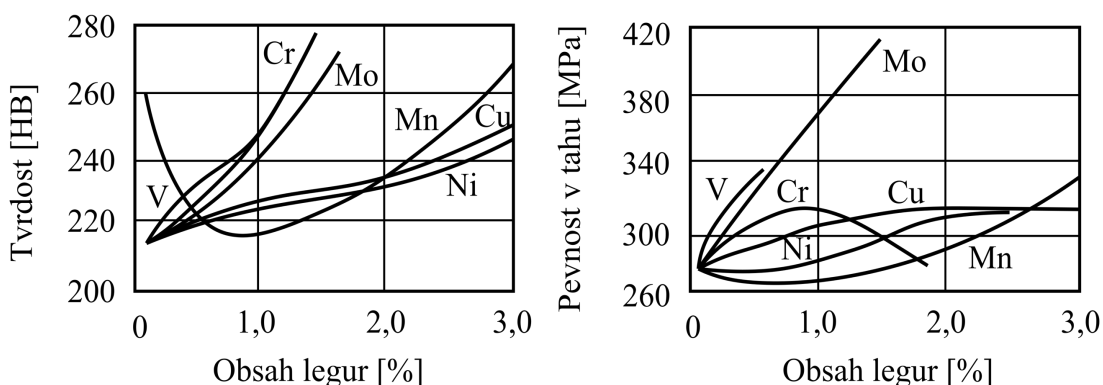
Obr. 24 Vztah mezi tvrdostí a rychlostí ochlazování při 720 °C; Vztah mezi pevností v tahu a dobou tuhnutí [26]

#### 2.5.4 Vliv legujících prvků na mechanické vlastnosti

Hlavním faktorem, určujícím výsledné mechanické vlastnosti LLG, je chemické složení. Příklad vztahu mezi chemickým složením a mechanickými vlastnostmi je zaznamenán na obrázku 14b na straně 20. Může být také popsán empirickým vztahem (10) z literatury [3]. Jednotlivé prvky ovlivňují zejména podmínky primární krystalizace a překrystalizace (množství, tvar a rozložení grafitu, velikost zrn a povaha základní kovové hmoty), která je podmíněná chemickým složením kovu. [6]

$$Rm = 258,3 + 1,275 \cdot HB - 63,7 \cdot \% C - 25 \cdot \% Si - 31,4 \cdot \% P \quad (10)$$

Jednotlivé legující prvky ovlivňují mechanické vlastnosti LLG různým způsobem. Při volbě druhu a množství se především dbá na vliv legury na mez pevnosti a tvrdost materiálu, zdali prvky budou zlepšovat nebo zhoršovat tyto základní charakteristiky, které jsou rozhodující pro LLG. Základní orientací pro účinek legujících prvků na mechanické vlastnosti popisují diagramy dle Röhriga a Crosbyho, na obrázku pod odstavcem. Z obrázku 25 je zřejmé, že přísadou V, Mo a Cr je možno dosáhnout nejvyšších hodnot pevnosti v tahu. Konkrétnější hodnoty množství, v jakém se doporučuje jednotlivé legující prvky přidávat do taveniny v technické praxi, s cílem dosažení nejpříznivějších mechanických vlastností, byly zmíněny v podkapitole 2.3.2. [6, 19]



Obr. 25 Vliv legujících přísad na tvrdost a pevnost v tahu LLG [6]

Základní přístup pro hodnocení účinku přísadových prvků může být rozdělení pomocí prvků, podporujících vznik perlitu (zvyšující pevnost perlitu) a podporujících vznik feritu. Hlavní prvky, které podporují vznik feritu, jsou Si a Al. Rozšiřují oblast feritu a posouvají ji k vyšším teplotám ve fázovém diagramu. Mn, Ni a Cu se řadí do skupiny prvků podporujících růst a tvorbu perlitu. Tato skupina zužuje a posouvá oblast feritu k nižším teplotám. Některé prvky se soustřeďují na hranicích zrn a ovlivňují difuzní rychlost. Sn a Cu se koncentrují na rozhraní mezi austenitem a grafitem a brání uhlíku v difuzi ke grafitu, což zabraňuje vzniku feritu. Z tohoto důvodu se Cu a Sn řadí mezi prvky, které podporují vznik perlitu. [19]

Hlavním účinkem působení legur je jejich vliv na kinetiku transformace austenitu. Pro vznik feritu, je zapotřebí delší difuzní doba uhlíku. Většina legujících prvků zpožďuje tvorbu feritu a podporuje tvorbu perlitu ve struktuře. Perlit, který vzniká za nižších teplot, je jemnější, pevnější, tvrdší a odolnější proti opotřebení. Taková struktura perlitu vede ke zvýšení mechanických vlastností odlitků. Obdobné vlastnosti lze získat i zvýšením rychlosti ochlazování, avšak za cenu zvýšení vnitřních pnutí v odlitku. [6]

Při legování V, Mo a Cr, pro zvýšení pevnosti litiny, je důležité zohlednit vzrůstající riziko vzniku zákalky. Toto může být do určité míry kompenzováno přidáním Ni nebo Cu, které potlačují vznik zákalky. K dosažení vyšších pevností v tahu u LLG se obvyklé používá kombinace dvou, popřípadě tří prvků. Při použití tří prvků jsou výsledky lepší, avšak zvětšuje se cena a náročnost dodržení chemického složení. Vhodné jsou kombinace Ni nebo Cu s Cr, popřípadě Mo s V. Speciální kombinace Mo s Ni nebo Cu může vést ke vzniku bainitické struktury. Často se také používá trojí kombinace: Cr-Cu-Ni nebo Cr-Ni-Mo. [6, 19, 27]

Kombinace prvků mají následující výhody:

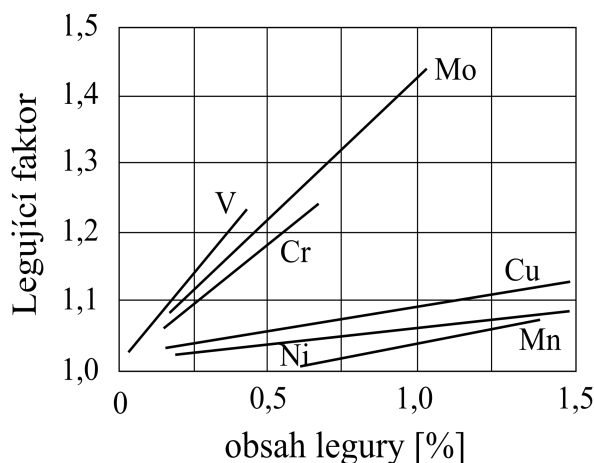
- vzájemně zvyšují legující účinek (jde v zásadě o legující faktor podle obr. 26),
- při kombinaci karbidotvorných prvků s prvky jako Cu nebo Ni, lze dosáhnout dalšího zvýšení pevnosti. [19]

Níže je příkladově uvedeno, dle Röhriga [19], zvýšení pevnosti v tahu v materiálu při kombinaci dvou prvků, v závislosti na obsahu C je podíl Cu/Ni k Mo 1,5 až 2 : 1. U litiny s 3-3,5 % C, 1,5-2,5 % Si lze dosáhnout legováním zvýšení pevnosti na:

- 0,5 % Mo + 1 % Cu zvýší se pevnost o 77 až 91 MPa,
- 0,5 % Mo + 0,5 % Ni zvýší se pevnost o 63 až 77 MPa,
- 0,75 % Mo + 0,75 % Ni zvýší se pevnost o 91 až 105 MPa. [19]

Předběžný odhad míry zvýšení meze pevnosti, v tahu LLG pomocí legování, můžeme vypočítat pomocí tzv. legujících faktorů  $f_1, f_2 \dots f_n$ , které se odečítají z diagramu na obrázku 26 a dále dosazují do rovnice (11):

$$Rm(\text{legovaná}) = Rm(\text{nelegovaná}) * (f_1) * (f_2) * \dots * (f_n) \quad (11)$$



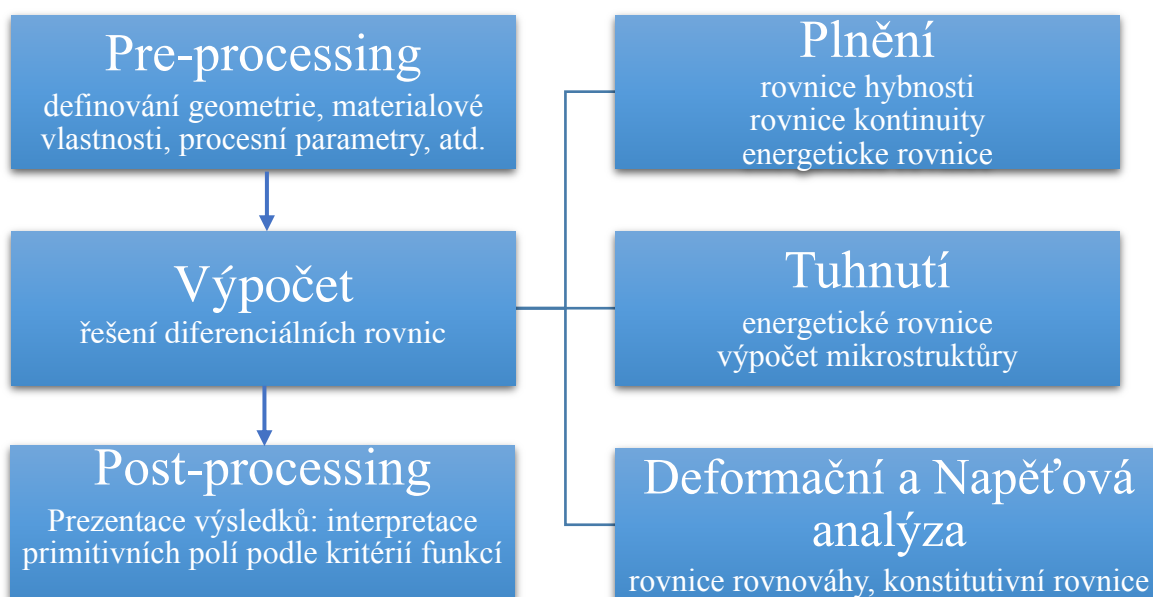
Obr. 26 Vliv množství legury na legující faktor dle Schneidewinda [6]

V této kapitole a podkapitolách byly popsány důležité faktory a vlivy, které definují mechanické vlastnosti odlitků z LLG. Litina s lupínkovým grafitem je komplexní materiál, ve kterém mnoho faktorů ovlivňuje předpokládaný výsledek, jenž se ne vždy podaří dosáhnout. Z ohledu na řešenou problematiku této práce byly popsány pouze vybrané mechanické vlastnosti.



### 3 NUMERICKÉ SIMULACE VE SLÉVÁRENSTVÍ

Zlepšení výrobní efektivity, minimalizace defektů a zajištění požadovaných fyzikálních a mechanických vlastností odlitků patří mezi klíčové výzvy současného slévárenského průmyslu. S cílem překonat vyskytující se problémy a splnit požadavky zákazníka používá většina sléváren metodiku odlévání podporovanou numerickými simulacemi slévárenských procesů. Numerické simulace zahrnují počítačové modelování odlitků, návrh výrobní technologie, simulace procesů a optimalizace. Možnost analýzy celého procesu odlévání a optimalizace ve virtuální doméně nahradila konvenční přístup založený na metodě „pokus-omyl“. Díky vědecktějšímu konceptu přístupu k výrobě vysoce kvalitních odlitků, predikce defektů a jejich minimalizace se stala mnohem snazší. Aplikace simulačních softwarů rovněž umožnila produkci vysoce kvalitních dílů mnohem vyšším tempem při nižších výrobních nákladech. Možnosti simulačních softwarů se neustále posouvají dopředu, ale vždy jdou ruku v ruce spolu s moderním vývojem v dané oblasti. Simulace slévárenských procesů závisí především na termo-fyzikálních zákonech. Z toho vyplývá, že veškeré požadavky na interpretaci reálných procesů pomocí simulace musí být popsitelné pomocí matematických závislostí. Pomineme-li matematický přístup, základní postup numerické simulace může být schematicky popsán ve třech krocích, jak je tomu na obrázku 27.



Obr. 27 Základní kroky numerické simulace odlévání [27]

S ohledem na výsledky, vyhodnocené pomocí simulace, je důležité zdůraznit, že pokud definování vstupních parametrů a okrajových podmínek je nepřesné, tak i následná simulace a její výsledky mohou být nesprávné. Z těchto důvodů je důležité, aby slévárny projevovaly zájem o zjišťování reálných parametrů, které vstupují do slévárenského procesu a tím docházelo k zpřesňování vstupních parametrů pro simulaci, tím pádem důvěryhodnějším výsledkům. Rovněž je nutno podotknout, že simulační software je pouze nástroj, který sám o sobě nedokáže poradit technologovi co zlepšit nebo jakým směrem se vydat pro dosažení požadovaného zlepšení.



Je tedy jasné, že není možné zahrnout do simulace zcela všechny vlivy, které do skutečného výrobního procesu vstupují. Jeden ze zásadních prvků ovlivňujících reálný výrobní proces a který je téměř nedefinovatelný v simulačním softwaru je lidský faktor. Každý pracovník má své vlastní pracovní postupy a návyky. I když technologicky postup je jasně stanoven, i tak si člověk rád najde způsob, jakým by si mohl upravit postup podle sebe a ušetřit si trochu práce. Někdy takový přístup může vést k zefektivnění výroby, avšak častější důsledek je opačný. Porušení technologické kázně je častou příčinou neshodné výroby. [28]

### 3.1 Základní výpočetní metody a druhy simulačních softwarů

Mezi nejrozšířenější slévárenské simulační softwary na českém trhu patří – MAGMASoft firmy MAGMA GmbH (Německo), ProCAST firmy ESI Group (Francie), Nova-Solid/Flow firmy Novacast AB (Švédsko) a FLOW3D Cast firmy Flow Science (USA).

Zatímco fyzikální podstata je pro všechny softwary stejná, jednotlivé software se liší v:

- diskretizaci (dělení) prostorového a časového kontinua,
- zpracováním materiálových vlastností (např. latentní teplo, hustota kovu),
- okrajovými podmínkami (např. koeficient přestupu tepla mezi kovem a formou),
- a použitou numerickou metodou.

Simulace odlévání se provádí implementací různých numerických technik. Mezi hlavní metody numericky řešených matematických modelů v simulačních softwarech patří:

- metoda konečných prvků – ProCAST (FEM – Finite Elements Method),
- metoda konečných objemů – MAGMASoft (FVM – Finite Volume Method)
- a metoda konečných diferencí – FLOW3D (FDM – Finite Difference Method). [29]

FVM a FDM při diskretizaci geometrie používají kubické nebo cihlově tvarované prvky, na druhou stranu metoda FEM využívá tetragonální nebo hexagonální prvky. Metodou FEM je možné modelovat tvar odlitku přesněji (s použitím nižšího počtu prvků), ale může vyžadovat vynaložení velkého úsilí při generování správné výpočetní sítě a náročné ruční úpravy této sítě, což může někdy trvat déle než samotný výpočet. [29]

### 3.2 Simulační software MAGMASoft

Pro realizaci diplomové práce a hodnocení mechanických vlastností odlitků z LLG pomocí numerické simulace byl použit simulační software MAGMASoft verze 5.4 MAGMA<sup>5</sup> s výpočetním modulem MAGMAiron. Tato podkapitola krátce představuje principy, metodiku a možnosti využití tohoto softwaru.

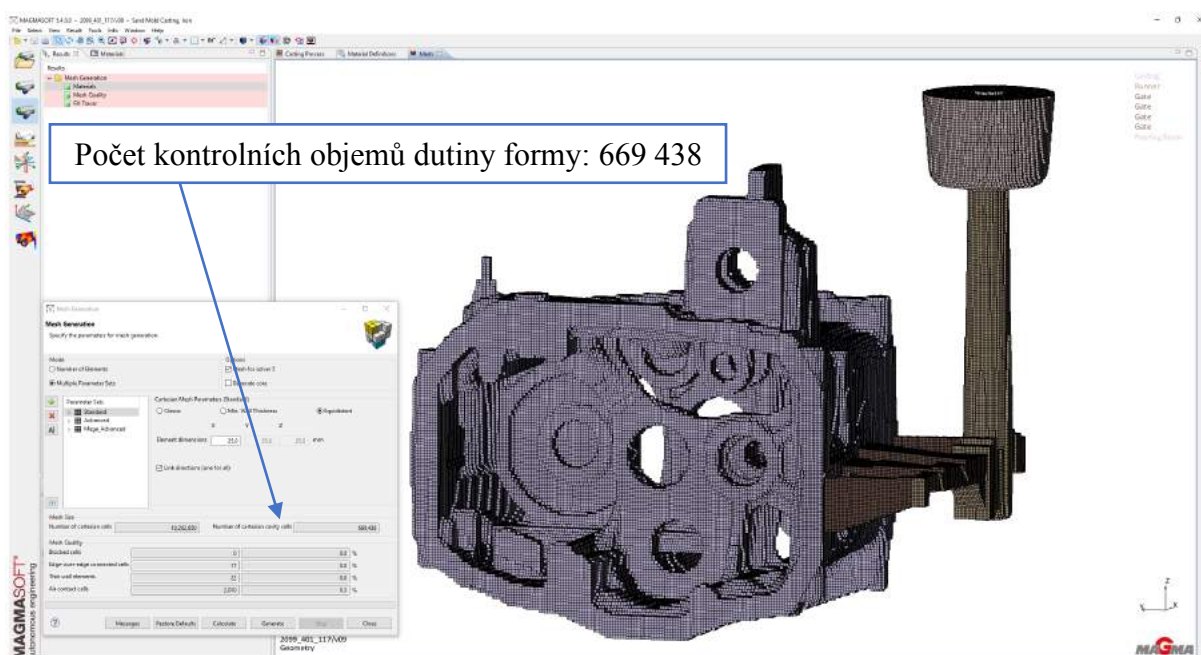
MAGMA je velmi komplexní simulační software, umožňující simulaci řady slévárenských materiálů a procesů, které probíhají při odlévání. Široké spektrum analýzy umožňuje simulaci od menších tlakově litých hliníkových odlitků, i z jiných neželezných materiálů jako jsou slitiny hořčíku a mědi, až po masivní ocelové odlitky, odlévané gravitačně do pískových forem. Pro jednotlivé typy slévárenských technologií nabízí software řadu doplňkových modulů, jenž obsahují rozšíření, které základní verze neobsahuje. Moduly obsahují specifické výpočetní metody přizpůsobené jednotlivým technologiím nebo typům materiálu.

Modul MAGMAiron je hlavně používán slévárnami vyrábějícími litinové odlitky. Tento modul využívá mikroskopický kinetický růstový model, který zohledňuje komplikovaný proces nukleace a růst grafitizačních zárodků v tavenině. Modul bere v úvahu kompenzaci objemových změn grafitickou expanzí, při tuhnutí a ochlazování, která je důležitá z ohledu na výskyt staženin. Predikuje také typ a množství vyloučeného grafitu v kovové matici. Software při výpočtu fázových přeměn zohledňuje faktor chemického složení, stupeň očkování taveniny a postupy při procesu tavení a odlívání. Toto umožňuje predikci křivek tuhnutí, mikrostruktury a mechanických vlastností v jednotlivých místech odlitků. Mezi další moduly patří například:

- MAGMAhpc, MAGMAlpc – modul pro vysokotlaké a nízkotlaké lití,
- MAGMAlostfoam – modul pro simulaci technologii na vypařitelný model
- MAGMAsteel – simulaci a predikci segregaci, tepelné zpracování ocelových odlitků

### 3.2.1 Metoda konečných objemů

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.1, simulační software MAGMASoft využívá při výpočtu simulace numerické metody konečných objemů (FVM). Základem této metody je rozdělení vytvořené geometrie na konečný počet malých kontrolních objemů (obr. 28). Kontrolní objemy tvoří tzv. výpočetní síť, která zásadně ovlivňuje kvalitu vyhodnocených výsledků a také výpočetní čas. Obdobně jak u metody konečných prvků a konečných diferencí, výpočty se vztahují k uzlovým bodům kontrolních objemů. Metoda konečných objemů využívá integraci diferenciálních rovnic celým kontrolním objemem. Přenos informací probíhá ve styku stěn jednotlivých kontrolních objemů a počítá se jako suma integrálů přes jednotlivé stěny. Dále základní rovnice (transportní, energie, continuity, atd.), které popisují spojitě prostředí jsou zjednodušeny do soustavy algebraických rovnic. Výhody této metody, na rozdíl od metody konečných prvků, jsou: značně nižší nároky na paměť, vyšší rychlost výpočtu komplikovanějších úloh. [30]



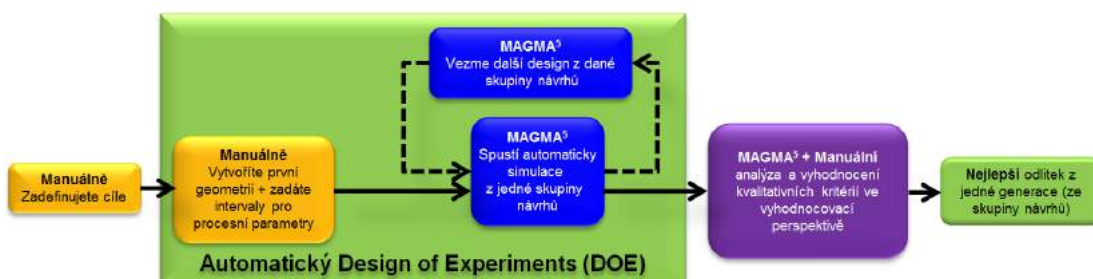
Obr. 28 Generovaná výpočetní síť v MAGMA<sup>5</sup>

### 3.2.2 Možnosti metody DoE

V softwaru MAGMA<sup>5</sup> je možné použít funkci DoE (Design of Experiments) jako nástroj pro realizaci skupiny virtuálních experimentů nebo optimalizaci zvoleného procesního parametru. DoE, neboli návrh experimentů, je systematická metoda pro zjištění a následné stanovení vztahů mezi parametry ovlivňujícími konkrétní proces a výstupy konkrétního procesu. Jinými slovy, použití metody DoE v simulaci vede ke zjištění vztahů příčina-následek.

Pro tuto metodu je možno definovat intervaly hodnot spojené s geometrií (rozměry a tvary jednotlivých částí vtokové soustavy, rozměr, umístění a počet zářezů nebo velikost, tvar a počet použitých náliček, atd.) nebo pro různé procesní parametry (chemické složení slitiny, stupeň očkování, čas lití, teplota lití, atd.). Software pak v rámci rozsahů stanovených parametrů automaticky tvoří, simuluje a vyhodnocuje různé technologické varianty. Je nutno podotknout, že uživatel nemusí jednotlivé varianty vytvářet „ručně“, ale pouze do zadání projektu definuje intervaly hodnot pro jednotlivé proměnné. [31]

Cílem této metody je zefektivnění simulačního procesu a časová úspora, a to pomocí automatického vyhodnocení všech možných variant (experimentů) a následného vyhodnocení varianty která, nejvhodněji uspokojuje předem stanovený cíl uživatelem. Pro jednodušší pochopení této metody je schematicky popsána na obrázku 29.



Obr. 29 Princip použití metody DoE v simulaci [30]

Návrh experimentu je silný nástroj, umožňující efektivně nalézt optimální procesní parametry pro jakýkoliv slévárenský proces. Tato možnost simulačního softwaru dokáže plně nahradit testovací slévárnu, jelikož tato metoda je aplikovatelná bez jakýchkoliv procesních nebo výrobních omezení. Metoda DoE také byla použita při simulacích v experimentální části této práce.

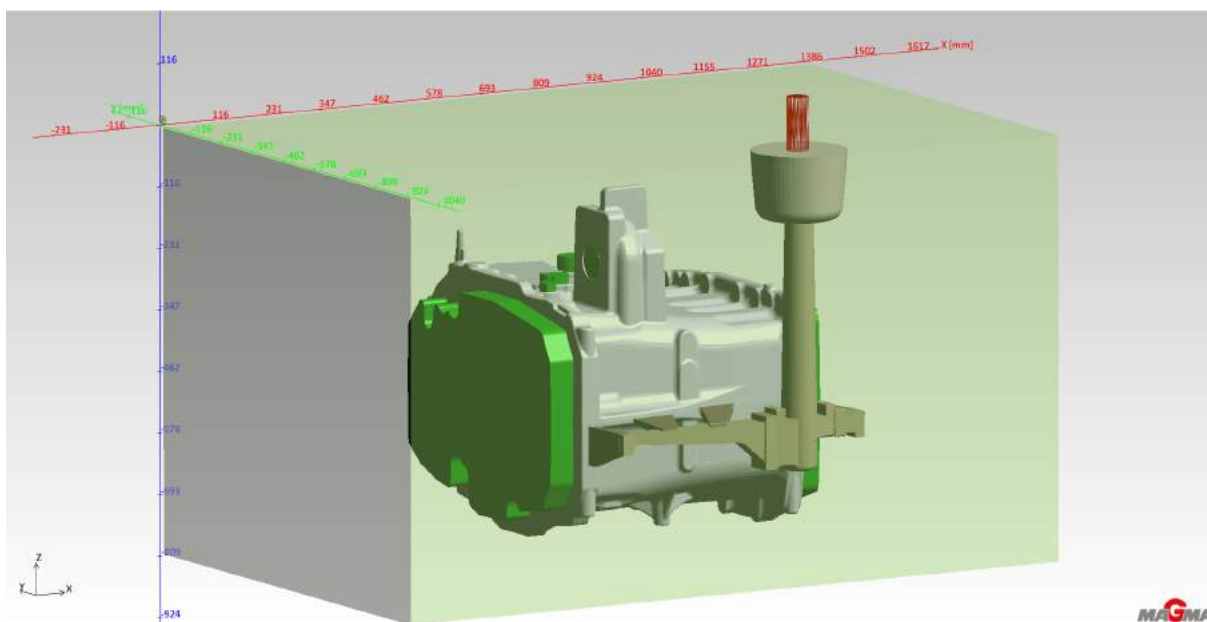
### 3.3 Pre-processing v softwaru MAGMA<sup>5</sup>

Tato podkapitola slouží jako krátké seznámení s uživatelským rozhraním simulačního programu MAGMA<sup>5</sup> a práci s ním. První okno se kterým se uživatel setká, je projektové okno s přehledem všech stávajících projektů vytvořených v softwaru. Na samém začátku vytváření projektu musí uživatel specifikovat typ procesu a typ slitiny. Toto v pozdější fázi ulehčí uživateli práci během definování celého procesu a eliminuje nevědomý špatný výběr materiálu.

#### 3.3.1 Geometrie

Hned dalším krokem po vytvoření nového projektu je vytvoření nebo importování geometrie. Veškeré 3D geometrie slévárenského modelu nebo celé technologie pro následné simulace mohou být vytvořeny přímo ve vestavěném modeláři MAGMY. Avšak tento modul má značně omezené funkce oproti klasickým CAD softwarům jako je Inventor, Solidworks nebo Catia. Hodí se spíše pro vytváření tvarově jednodušších částí, jako můžou být zářezy, vtokové soustavy, nálitky, chladítka atd. Software má možnost importování geometrie v různých CAD formátech (.stp, .stl, .CATPart, .asm). Také uživatel může zároveň kombinovat načtená CAD data s modely přímo vytvořenými v modeláři MAGMAY.

Po načtení/vytvoření geometrie se jednotlivé části rozdělí do tzv. materiálových skupin. Každá materiálová skupina je charakteristická svým vlastním identifikačním číslem (dále jen ID). Hlavně se jedná o přiřazení ID zvláště vtokové soustavě, nálitkům, filtrům, odlitku, jádrům atd. Tento postup je přínosný hlavně během vyhodnocování, protože někdy je potřeba skrýt některé části sestavy, aby nezkrášlovaly výsledné hodnoty. Například při vyhodnocení celkového objemu staženin, pokud by nebyly skryty nálitky a vtoková soustava atd. pak celkový objem staženin v odlitku by byl vyhodnocen i s těmi částmi, které jsou po odlití odstraněny. Pokud by částem bylo přiřazeno jedno ID, nebylo by možné skrýt jednotlivé části. [28]



Obr. 30 Geometrie odlitku v prostředí MAGMA<sup>5</sup>

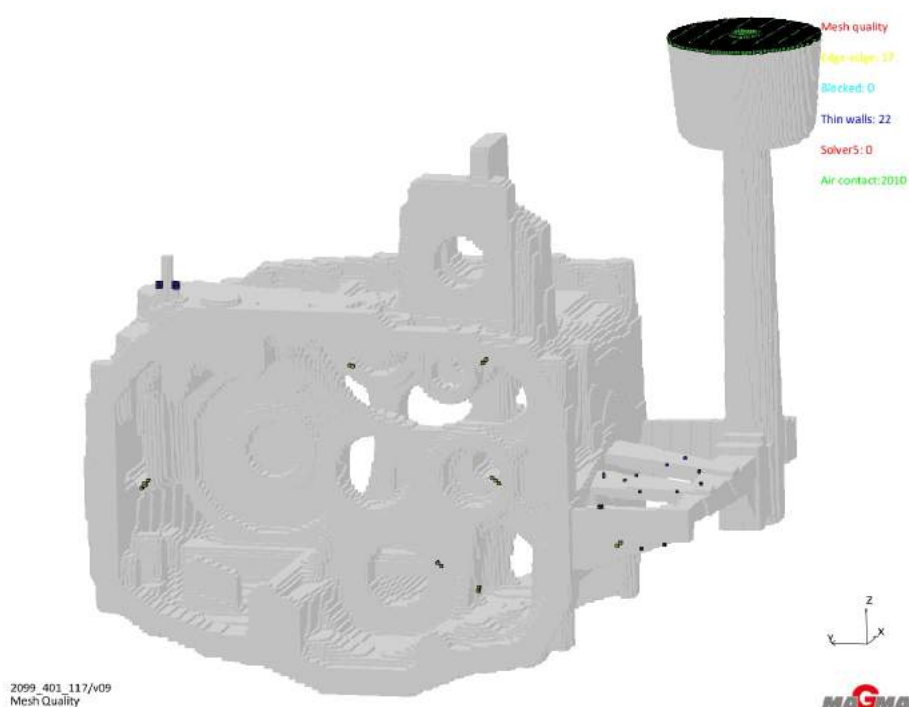
### 3.3.2 Generování výpočetní sítě

V prostředí pro tvorbu sítě uživatel stanoví parametry sítě, vygeneruje danou síť a následně vyhodnotí její kvalitu, zda splňuje jeho požadavky na jemnost, počet prvků, zda nejsou v síti problémové elementy apod. Celkový počet vygenerovaných elementů má asi nejvýznamnější vliv na výpočetní čas simulace a také na detailnost a exaktnost výsledků. Z jedné strany může být vyžadovaná krátká doba výpočtu, a proto se nechá vygenerovat příliš hrubá síť s malým počtem výpočetních elementů. Z druhé strany při vygenerování příliš hrubé sítě vzniká nebezpečí, že dojde ke skrytí některých vad nebo nepřesnostem výsledků. Riziko vzniká především v tenkých stěnách geometrie, kde by byl příliš nízký počet elementů pro korektní výpočet přestupu tepla a dalších parametru. Proto je doporučeno, aby v každé stěně byly minimálně tři elementy. Tuto podmínku lze také zohlednit jako kritérium při generování výpočetní sítě.

Existuje vícero způsobů pro vytvoření výpočetní sítě. Prvním, méně používaným, způsobem tvorby sítě je metoda, kdy uživatel určí celkový počet elementů a generátor sítě následně dopočítá velikost daných elementů a vytvoří síť. Druhý způsob je metoda ekvidistantních buněk, která umožňuje vytvořit síť s elementy stejné velikosti (obr. 28). Uživatel určí velikost elementů a algoritmus pro generování sítě potom rozdělí geometrii do takového počtu buněk, aby jednotlivé buňky měly identickou velikost, jakou zadal uživatel.

Další způsob je postavený na pokročilých síťovacích kritériích (více parametrů). Metoda tvorby sítě pomocí skupin parametrů dává uživateli možnost vytvořit různě jemnou síť pro různé části a elementy technologie odlitku.

Po vytvoření sítě je doporučeno provést kontrolu kvality sítě (obr. 31), aby bylo zkontrolováno a zjištěno, zda se v síti nevyskytují, nějaké chyby (nízký počet elementů v tenkých stěnách, plochy v kontaktu s atmosférou vzniklé nepřesnostmi v CAD modelech, atd.), které by mohly v následném výpočtu způsobit nepřesnosti.



Obr. 31 Kontrola kvality výpočetní sítě

### 3.3.3 Nastavení simulace

Posledním krokem před spuštěním simulace je nastavení vstupních parametrů a okrajových podmínek. Parametry jsou rozděleny do několika skupin od výběru materiálů, stanovení koeficientů přestupu tepla mezi materiály, stupeň očkování (obr. 32), technologii lití až po tuhnutí a moment kdy je odlitek vytloukán z formy, respektive kdy má být simulace tuhnutí a chladnutí ukončena. Při definování typu materiálů software nabízí možnost volby materiálů z databáze MAGMA<sup>5</sup>. Avšak z ohledu na autentičnost výsledků je uživateli doporučeno vytvořit v databázi vlastní materiál s vlastnostmi korelujícími s reálnými podmínkami ve slévárně.

Do zadání materiálů spadá nastavení všech materiálů a jejich vlastností. Od chemického složení až po typ použitého filtru a další parametry, které vstupují do procesu odlévání. Po zadání okrajových podmínek simulace se volí, které parametry mají být vypočteny a vyhodnoceny simulačním softwarem.

The image displays two screenshots of the MAGMASOFT 5.4.0.0 software interface. The top screenshot shows the 'Material Definitions' window, which contains a table of material properties. A blue box labeled 'definice materiálů' points to this table. The bottom screenshot shows the 'Casting Process' window, which displays a timeline of simulation steps. A blue box labeled 'nastavení slévarenského procesu od nalití až po zchladnutí (konec výpočtu)' points to the process steps. A dialog box titled 'Melt Treatment Definitions' is also shown, with a blue box labeled 'stupeň očkování' pointing to the 'Inoculation method' dropdown menu.

Material	Mat ID	Database/File Name	Initial Temperature (°C)	Feeding Effectivity (%)	Iron Composition
Cast Alloy		Global/GIL-300-SHB	1400.0	100.0	
					C (Carbon) 3.3 %
					Cr (Chromium) 0.0 %
					Cu (Copper) 0.0 %
					Mg (Magnesium) 0.0 %
					Mn (Manganese) 0.75 %
					Mo (Molybdenum) 0.0 %
					N (Nitrogen) 0.0 ppm
					Ni (Nickel) 0.0 %
					P (Phosphorus) 0.1 %
					S (Sulfur) 0.08 %
					Sb (Antimony) 0.0 %
					Si (Silicon) 1.8 %
					Sn (Tin) 0.0 %
Sand Mold		Global/Green_sand_SHB	15.0		
Core	ID 1	MAGMA/Coldbox_silica	3.0		

**Melt Treatment Definitions**  
Specify the melt treatment parameters.

Inoculation method	Very Good
Treatment yield	100.0 %
Graphite precipitation	7

Obr. 32 Nastavení parametrů simulace



### 3.4 Základní úlohy simulace

Z ohledu na výpočetní čas před spuštěním samotné simulace, lze definovat v softwaru parametry, které mají být spočítány. Například když uživatel analyzuje geometrii vtokové soustavy z ohledu na dimenzování, druh proudění kovu dutinou formy nebo účinnost jednotlivých zářezů během plnění, není potřeba aby software počítal procesy, které nesouvisí s analyzovanými parametry. V tento moment není potřeba ztrácet čas výpočtem tuhnutí a chladnutí nebo analýzou mikrostruktury. Snížením počtu parametrů, které nesouvisí s požadavky uživatele, může být dosaženo značné časové úspory během výpočtu simulace. Základní výpočetní procesy s ohledem na výsledky simulace lze rozdělit do dvou hlavních skupin: simulace plnění a simulace tuhnutí a chladnutí.

Simulaci plnění lze predikovat a sledovat děje, které probíhají ve formě během odlévání, lépe řečeno během plnění dutiny formy kovem. Lze sledovat:

- charakter proudění a postup fronty tekutého kovu
- teplotní a rychlostní pole kovu během plnění
- rozložení tlaku, uzavírání objemu vzduchu v dutině formy a funkčnost výfuků
- trasovací částice z ohledu na dobu v dutině odlitku

Z výsledků lze posoudit, zdali technologie pro konkrétní odlitek byla navržena správně, a které prvky bude potřeba změnit nebo optimalizovat, aby se dosáhlo uspokojivých výsledků.

Druhou skupinou je simulace tuhnutí a chladnutí. V této výpočetní etapě jsou sledovány veškeré děje, které probíhají v odlitku po naplnění dutiny formy do zchladnutí odlitku. Možnosti uživatele je také definování, kdy má být simulace tuhnutí a chladnutí ukončena. Například simulace je zastavena v momentě, kdy maximální teplota kdekoliv v odlitku klesne pod teplotu solidu nebo simulace je zastavena při dosažení uživatelem stanovené teploty v dané oblasti. Z výsledků tuhnutí a chladnutí lze posuzovat:

- podíl tekuté a tuhé fáze
- teplotní pole odlitku a vznik teplotních uzlů
- sledování smrštění a deformace během tuhnutí

Simulace tuhnutí a chladnutí je důležitá z ohledu na predikci mikrostruktury a vyhodnocení mechanických vlastností. Hlavním úkolem simulace mikrostruktury je vyhodnocení podílů jednotlivých strukturních fází v odlitku a zjištění rozměrových a tvarových parametrů u daných strukturních složek, které jsou:

- obsah primárního austenitu nebo primárního grafitu
- výskyt mezidendritického grafitu typu E a D
- poloměr eutektických buněk
- mezilamelární vzdálenost perlitické struktury

Poslední prvky, které lze vyhodnotit simulačním softwarem, jenž závisí na výsledcích simulace strukturních složek, jsou mechanické vlastnosti. Tímto způsobem pomocí simulačního softwaru lze predikovat Youngův modul pružnosti, pevnost v tahu a tvrdost podle Brinnella.

### 3.5 Výpočet mechanických vlastností v simulaci

Při výpočtu mechanických vlastností MAGMAiron zohledňuje jak mikrostrukturu, tak i chemické složení. Také zohledňuje přítomnost legujících prvků, které mohou způsobovat vytvrzení feritické struktury i feritických lamel v perlitu. Mechanické vlastnosti jsou kombinací pevnosti jednotlivých a kompozitních fází, jako je perlit. V případě hypoeutektických litin MAGMA<sup>5</sup> bere v úvahu delší difúzní vzdálenosti, a to v důsledku přítomnosti austenitických dendritů v ztuhlé mikrostrukturu. [27]

#### ➤ Tvrdost

Predikce tvrdosti LLG v softwaru MAGMA<sup>5</sup> závisí na několika parametrech. Výpočet odpovídá množství vyloučeného primárního austenitu, jakož i účinku legujících prvků a lamelární vzdálenosti perlitické struktury. Zásadní vliv na vyhodnocenou tvrdost má lokální rychlost ochlazování při teplotě eutektoidní přeměny. Během transformací v pevné fázi v LLG program předpokládá, že se vytvořila plně perlitická struktura. Rychlost růstu perlitu se vypočítá z eutektoidního ochlazování podle metastabilního fázového diagramu vypočteného ze složení slitiny. Jemnost perlitické struktury závisí na podchlazení, a je proto velmi závislá na rychlosti ochlazování (tepelné vlastnosti formy a koeficienty přestupu tepla). Z tohoto důvodu je velmi zásadní volba a specifikace vlastností odpovídajícím reálným materiálům ve slévárně, které jsou následně definovány v průběhu pre-procesingu. [27]

Vytvrzování v roztoku je fenomén, ke kterému dochází, když legující prvky přerušují mřížku materiálu. Nepravidelnosti v mřížce blokují dislokační pohyby a tím je materiál tvrdší. Při výpočtu tvrdosti LLG je také zohledněno vytvrzování roztoku feritu v perlitické matici způsobené přítomností legujících prvků v tavenině (tab. 3). [27]

Tab. 3 Prvky ovlivňující tvrdost, zohledněny simulačním softwarem MAGMA<sup>5</sup>

Název	Zkratka	Vytvrzování feritu	Vytvrzování perlitu
Křemík	Si	x	x
Mangan	Mn	x	
Fosfor	P	x	
Chrom	Cr	x	x
Měď	Cu	x	
Cín	Sn	x	
Molybden	Mo	x	
Nickel	Ni	x	

#### ➤ Youngův modul pružnosti a pevnost v tahu

Výsledek výpočtu modulu pružnosti závisí na množství a tvaru grafitu v mikrostrukturu. Vzhledem k tomu, že pro LLG MAGMAironu nepředpokládá růst feritu, software hodnotí modul jako konstantní v celém průřezu odlitku. MAGMA svůj výpočet primárně soustředí na výpočet tvrdosti, ze kterého je následně dopočtena mez pevnosti v tahu. [27]



## 4 EXPERIMENTÁLNÍ SROVNÁNÍ REÁLNÝCH A SIMULOVANÝCH MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Cílem této práce je ověření spolehlivosti simulačního softwaru. Záměrem slévárny Heunisch je využívat simulaci i pro predikci mechanických vlastností v požadovaných místech zákazníkem, a tímto se vyhnout nutnosti odlévání zkušebních sérií a destrukci množství odlitků. Predikce mechanických vlastností pomáhá při přizpůsobení chemického složení a technologie před samotnou výrobou, tím pádem přesnějšimu odhadu nákladu na výrobu odlitku. Pokud nejsou splněny požadavky zákazníka na mechanické vlastnosti (tab. 4), slévárna je nucena přidávat legující prvky za účelem zvýšení mechanických vlastností, bohužel většinou na vlastní náklady. Výsledky ze simulačního softwaru mohou sloužit i jako podklady při komunikaci se zákazníkem, v průběhu sjednávání podmínek a požadavků na mechanické vlastnosti odlitků.

Tab. 4 Požadavky zákazníka na mechanické vlastnosti pro GJL 300

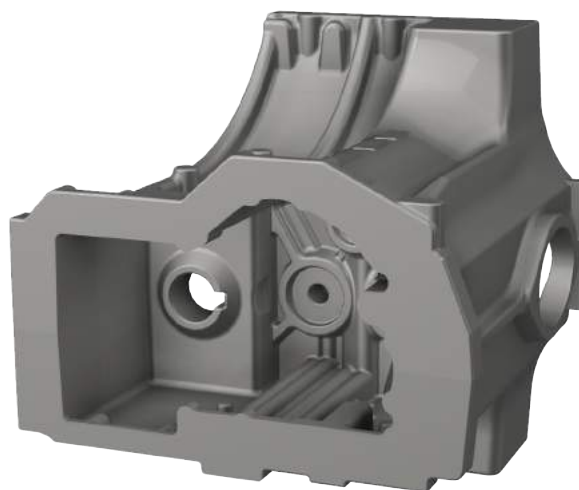
Tloušťka stěny [mm]	Tvrdoost podle Brinella [HB]	Mez pevnosti v tahu [MPa]
6 až 15	220 (max. 255)	300
15 až 35	200	270
35 a více	200	240

Cílem experimentu je porovnání a analýza reálných mechanických vlastností, odlitků z litiny s lupínkovým grafitem, s mechanickými vlastnostmi vyhodnocenými pomocí numerické simulace v softwaru MAGMA<sup>5</sup>. Hodnocení mechanických vlastností je zaměřeno na tvrdost materiálu a mez pevnosti v tahu v různých místech odlitků.

Pro vlastní experiment byly použity dva typy geometricky specifických odlitků (obr. 33a a obr. 33b). Společnou charakteristikou obou typů odlitků jsou vnitřní příčky, které tuhnou mezi dvěma jádry. Odlitky jsou gravitačně lity do jednotné bentonitové směsi z litiny GJL 300 s různým obsahem legujících prvků. Pro odlitky se používají křemenná jádra vyráběná metodou Cold-Box. Podrobné metalurgické údaje a materiálový předpis k jednotlivým odlitkům jsou v příloze 1.

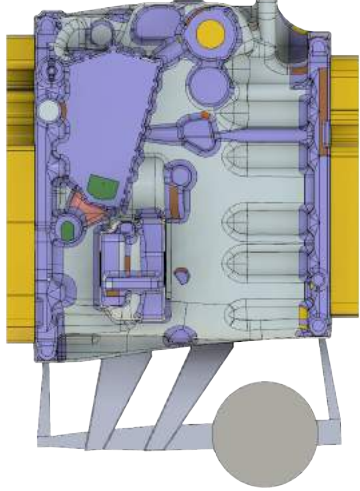
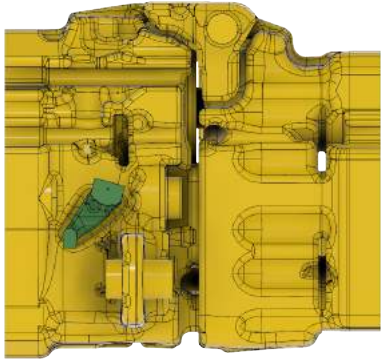
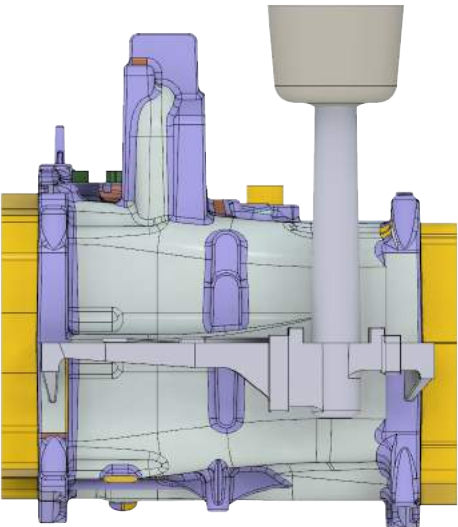
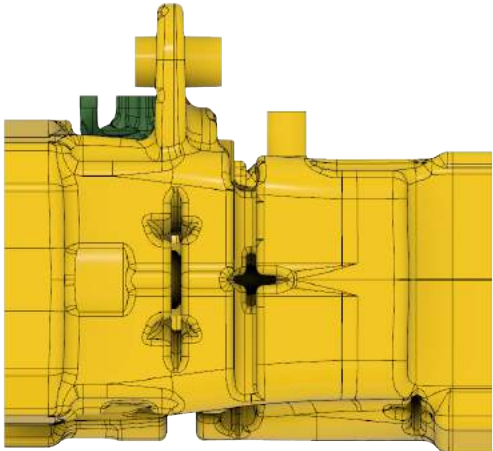
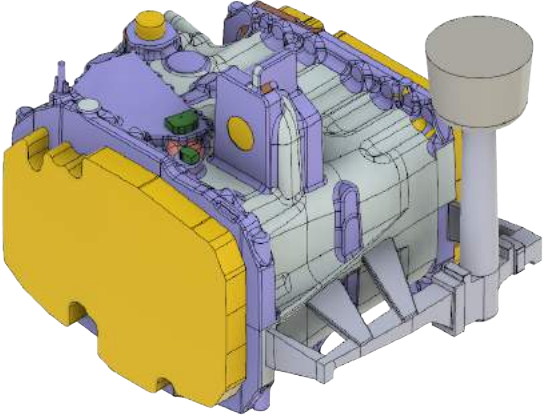
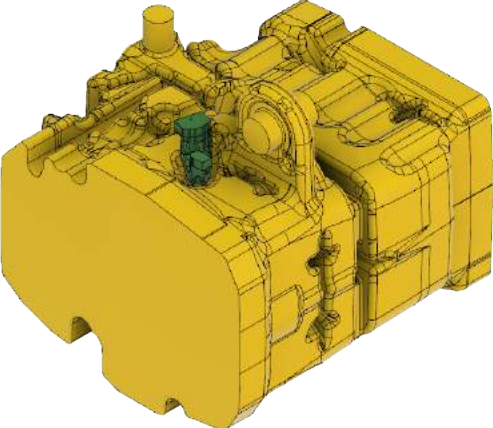


Obr. 33a Odlitek typu A, GJL 300 Cu+Cr, hmotnost 185 kg

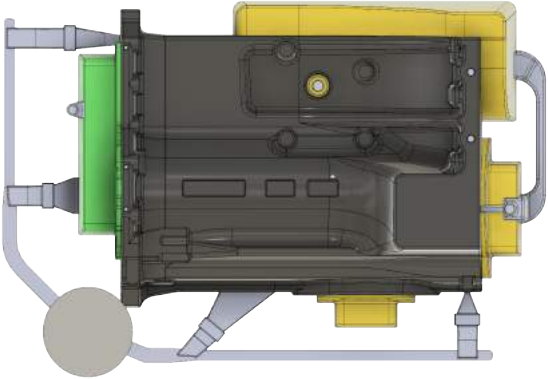
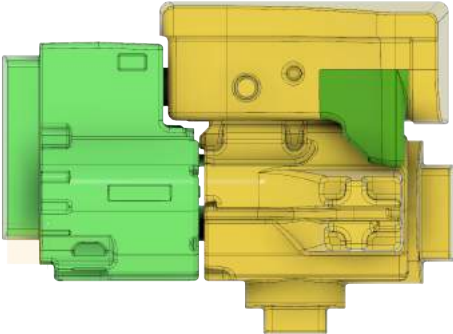
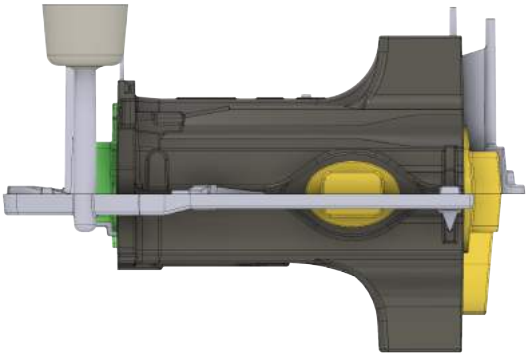
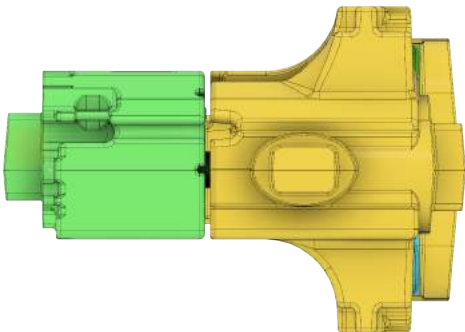
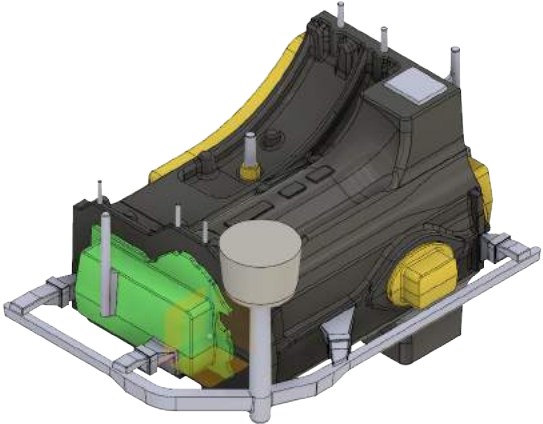
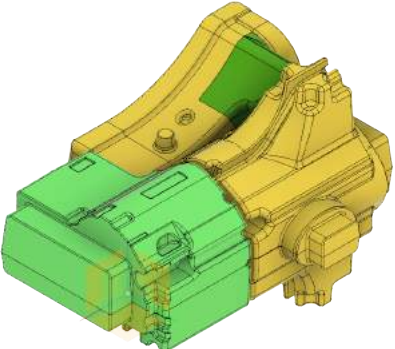


Obr. 33b Odlitek typu B, GJL 300 Cu, hmotnost 247 kg

Tab. 5 Technologie výroby odlitku typu A

Geometrie a technologie odlitku	Vnitřní jádra (celkem z 8 částí)
	
	
	

Tab. 6 Technologie výroby odlitku typu B

Geometrie a technologie odlitku	Vnitřní jádra (celkem z 6 částí)
	
	
	

Technologie řešených odlitků je navržena z ohledu na teplotní pole odlitků. Rozložení teplotního pole odlitků je podrobněji popsáno v kapitole 4.5.3.

Snahou je, aby navržena vtoková soustava jednotlivých odlitků plnila dutinu formy, co jak nejrovnoměrněji. Jedná se o podtlakovou vtokovou soustavu, kde řídicím průřezem je vtokový kůl. Poměr plochy vtokového kůlu, struskováku a zářezu, použitého při návrhu technologie pro odlitky typu A a B, je 1 : 1,2 : 1,4. Pro filtraci kovu jsou použity pěnokeramické filtry firmy LANIK (50x50 a 100x50 s pórovitostí 10ppi). Pro přesnější náhled do technologie zhotovení odlitků typu A a B viz příloha 1.

## 4.1 Technologie zhotovení forem

### ➤ Formovací směs

Řešené odlitky jsou vyráběny na automatické formovací lince GF s formovací jednotkou firmy HWS o výrobní kapacitě až 80 forem/h. Rozměr rámu je 1400x800x850. Používaná formovací směs ve slévárně je jednotná bentonitová směs obsahující uhlíkaté přísady. Pro přípravu směsi je používán dávkovací mísič ERICH DW29/6 s výkonem 90t/h. Jedna dávka směsi činí přibližně 4,4 t. V tabulce 7 jsou definovány hlavní parametry pro přípravu formovací směsi.

Tab. 7 Složky na jednu dávku 4,4 t

Dávkování čistého bentonitu	0,2	%
Dávkování bentonitu s uhlíkatou přísadou (75% bentonit, 25% nosič lesklého uhlíku)	0,98	%
Voda	1,54	%
Nový písek (Střeleč)	30	Kg
Spěchovatelnost	43	%
Doba mísení	90	s

Parametry, které se vyhodnocují ve slévárně pro bentonitovou směs, jsou: pevnost v laku, pevnost ve štěpu, vlhkost, spěchovatelnost, obsah vyplatitelných látek, obsah uhlíku ve formovací směsi, prodyšnost formy, pH, teplota formovací směsi, množství aktivního bentonitu, granulometrie, množství jemných zrn (pod 0,125mm) a sypaná objemová hmotnost.

### ➤ Jádra

Výroba jader řešených odlitků se provádí metodou Cold-Box (CB). Pro přípravu směsi je využíván dávkovací lopatkový mísič SEGAB o výkonu 100-450 kg/dávka. Jádra odlitků jsou tvarově složitá a obsahují vnitřní dutiny pro vytvoření vnitřních příček v odlitků (tab. 5 a 6). Z tohoto důvodu jsou jádra zhotovena z vícero částí (typ A: 8 částí, typ B: 6 částí), které jsou následně lepeny nebo šroubovány k sobě a jako jeden celek zakládány do formy (viz příloha 1). Složení směsi jednotlivých částí CB jader se může lišit podle požadavku na vlastnosti v jednotlivých částech. Křemenný písek (Šajdikove Humence) se používá jako ostřívo pro výrobu jader. Přibližné složení jádrové směsi je uvedeno v tabulce 8.

Tab. 8 Složky směsi pro výrobu cold-boxových jader

Pryskyřice	0,64	%
Aktivátor	0,62	%
Katalyzátor	0,13	%
Aditiva	0,8	%

Jako aditivum pro jádra se využívají dřevěné piliny. Hlavním důvodem použití těchto aditiv je snížení výskytu výronků. Hodnoty pevnosti jader se pohybují kolem 2,6 MPa po 10 minutách, 3,24 MPa po 24 hodinách.



Bezprostředně po vstřelení a vyjmutí z jaderníku jsou jádra namáčená do lihového nátěru. Následné schnutí jader probíhá v regálovém skladu na vzduchu. Pro jádra řešených odlitků byl použit alumosilikátový alkoholový nátěr. Tento nátěr slouží hlavně pro snížení penetrace kovů do jader a k dosažení lepší kvality povrchu odlitků. Dále se také používá grafitový nátěr, a to především lokálně pouze na určitých místech formy, k eliminaci vzniku zá lupů a připečenin.

Z důvodu krátkého času mezi vstřelením a namáčením (a také z důvodu sušení na vzduchu) se jádra nechávají odstát 24-48 hodin před použitím. Konkrétní údaje použitých nátěrů a technologie zhotovení jader lze nalézt v příloze 1.

## 4.2 Metalurgický postup

### ➤ Tavení

V převážné většině sléváren se litina taví v kuplovnách nebo elektrických indukčních pecích. Tavicí agregát používán ve slévárně Heunisch je horkovzdušná kuplovna GHW o výkonu 16 t/hod. Pro intenzifikaci tavení je do pece foukán vzduch 8000 m<sup>3</sup>/h + 400 m<sup>3</sup> O<sub>2</sub> při teplotě 550 °C. Složení vsázky je v tabulce 9. Nevýhodou kuploven je obtížné dodržení chemického složení, proto se slévárny řídí hlavně uhlíkovým ekvivalentem. Na rozptyl jednotlivých prvků vyráběných odlitků ve slévárně Heunisch poukazuje materiálový list v příloze 1, který zachycuje šířku intervalů jednotlivých prvků odlitků typu A a B. Tento jev byl také analyzován simulací a vyhodnocen pomocí metody DoE, jenž je zaznamenána na obrázku 45.

Tab. 9 Vsázka v [kg]

Ocelový odpad	Kupovaná litina	Vlastní vrat	Koks	Vápenec	FeSi 65 %	FeMn 78 %	Křemenec
1000	400	200	170	75	55	12	8

Následně je natavený kov udržován v elektrickém předpeci (kanálková pec ASEA 30 t), kde dochází k homogenizaci a v případě potřeby také k přehřívání taveniny. Ke zjištění výchozích hodnot chemického složení taveniny před očkovaním a legováním, je nutno provést odběr vzorku ještě před nalitím do lící pánve.

### ➤ Očkování a legování

Probíhá při přelévání z udržovací pece do přepravní a současně lící sifonové pánve o obsahu 2,2 t. Podle výchozího chemického složení je určeno a naváženo odpovídající množství očkovaadel a přísadových prvků. Pro očkování se používá očkovaadlo SB5. Doporučené množství je 0,27 % na hmotnost kovu. SB5 je očkovaadlo obsahující barium, které způsobuje prodloužení očkovacího účinku na 15 až 20 minut. Používá se z důvodu prodlev mezi jednotlivými operacemi. Očkovaadlo a legury se pozvolna vsypávají do proudu tekutého kovu během nalévání taveniny z předpeci do lící pánve. Dále je stažena struska, změřena teplota kovu a odebrány vzorky. Kvalita taveniny se hodnotí pomocí termické analýzy. Chemické složení je hodnoceno na spektrometru v laboratoři. Složení konkrétních odlitků, které byly použity pro experiment, je v tabulce 10 a 11.

### ➤ Doočkování

Odlitky typu A jsou očkované dvoustupňově kvůli své geometrické složitosti. První stupeň probíhá při plnění lici pánve. Druhý stupeň probíhá přímo ve formě pomocí očkovacího tělíska OPTIGRAN K200 (cca. 0,1kg tělíska na 100 kg kovu). Očkovací tělíska je umístěna vespod vtokového kůlu. Dvoustupňovým očkováním je prodloužen očkovací účinek a zvýšen počet zárodků. Tímto je dosaženo téměř identické jakosti očkování jak u prvního, tak i posledního odlitku, které byly odlity ze stejné pánve. Z 2,2 tunové pánve je převážně odlito 8 až 10 odlitků, v závislosti na surové hmotnosti odlitku. Doba mezi prvními očkováními a odlitím posledního odlitku může být až 12 min.

### ➤ Lití a režim chlazení

Teplota lití závisí na technologii a chemickém složení litiny. Teploty, ze kterých se odlévaly konkrétní odlitky, jsou v tabulce 10 a 11. Doba lití odlitků typu A je 12-17 s, odlitků typu B je kolem 20 s. Po odlití formy zajíždí do chladičného tunelu, kde setrvávají minimálně 2,5 hodiny, někdy však formy zůstávají v tunelu delší dobu (přes noc nebo celý víkend).

Tab. 10 Chemické složení a metalurgické parametry odlitků typu A

Odlitek typ A	materiál	C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cu [%]	Cr [%]	S [%]	P [%]	Tliquidu [°C]	Tlití [°C]	Očkování:
č. 1	GJL-300 Cu+Cr	3,30	1,78	0,77	0,46	0,33	0,087	0,072	1214	1440	0,27% SB5 + optigran K200
č. 2	GJL-300 Cu+Cr	3,30	1,78	0,77	0,46	0,33	0,087	0,072	1214	1440	0,27% SB5 + optigran K200
č. 3	GJL-300 Cu+Cr	3,32	1,76	0,77	0,48	0,30	0,066	0,063	1212	1437	0,27% SB5 + optigran K200

Tab. 11 Chemické složení a metalurgické parametry odlitků typu B

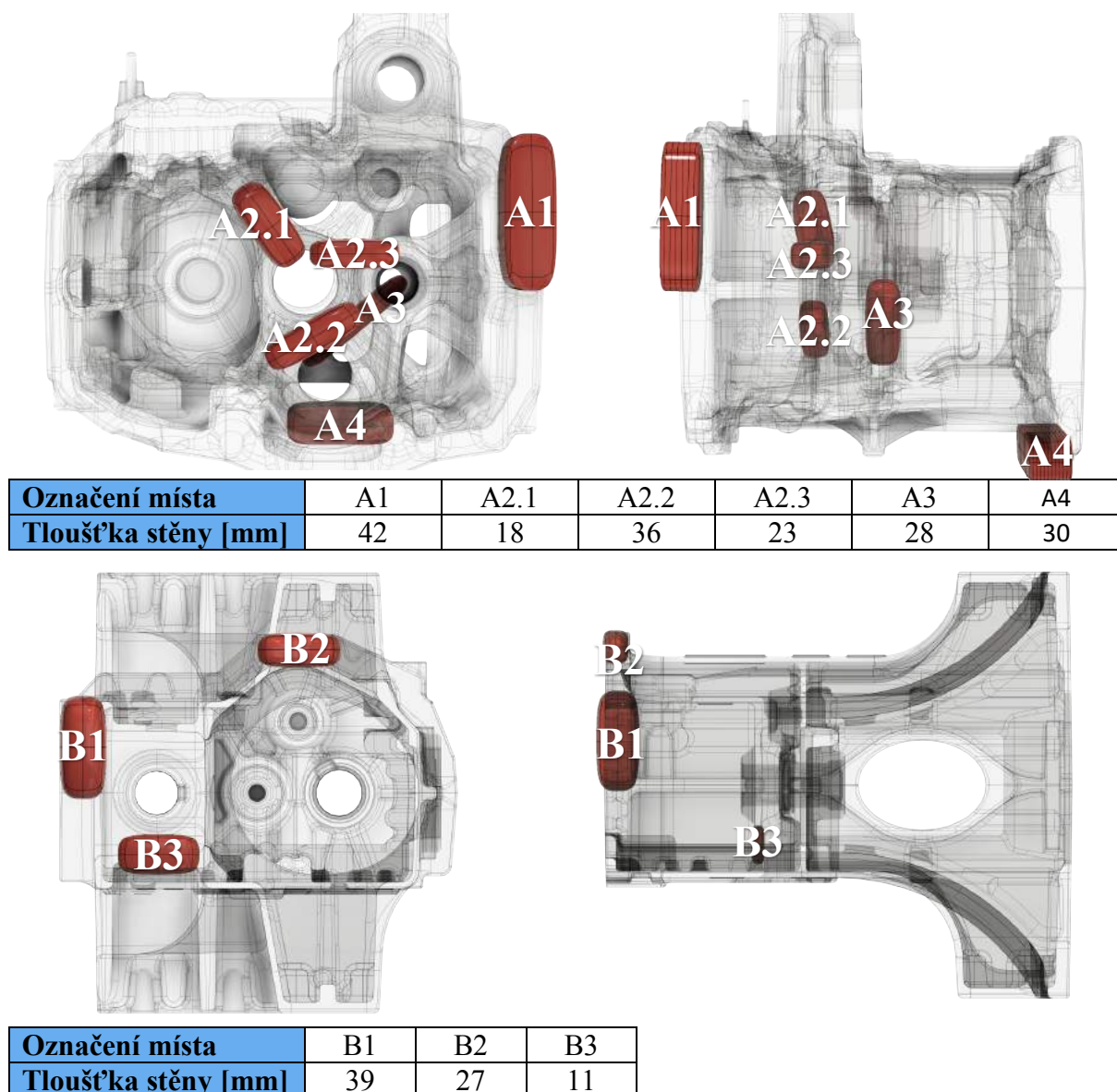
Odlitky typ B	materiál	C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cu [%]	Cr [%]	S [%]	P [%]	Tliquidu [°C]	Tlití [°C]	Očkování:
č. 1	GJL-300 Cu	3,30	1,93	0,76	0,36	0,07	0,090	0,087	1209	1420	0,27 % SB5
č. 2	GJL-300 Cu	3,30	1,88	0,78	0,36	0,07	0,090	0,087	1210	1426	0,27 % SB5
č.3	GJL-300 Cu	3,32	1,68	0,73	0,33	0,13	0,067	0,070	1211	1423	0,27 % SB5

### 4.3 Zkoušky mechanických vlastností odlitků

Experimentální část byla primárně soustředěná na odlitky typu A, odlitky typu B sloužily hlavně pro ověření a potvrzení předpokládaných vlastností a změn v simulaci. Z tohoto důvodu byl také zvolen vyšší počet vzorků pro mechanické zkoušky u odlitků typu A (18 vzorků ze 3 odlitků, tzn. 6 vzorků z odlitku) než u odlitků typu B (9 vzorků ze 3 odlitků, tzn. 3 vzorky z jednoho odlitku).

#### 4.3.1 Odběr vzorků pro mechanické zkoušky

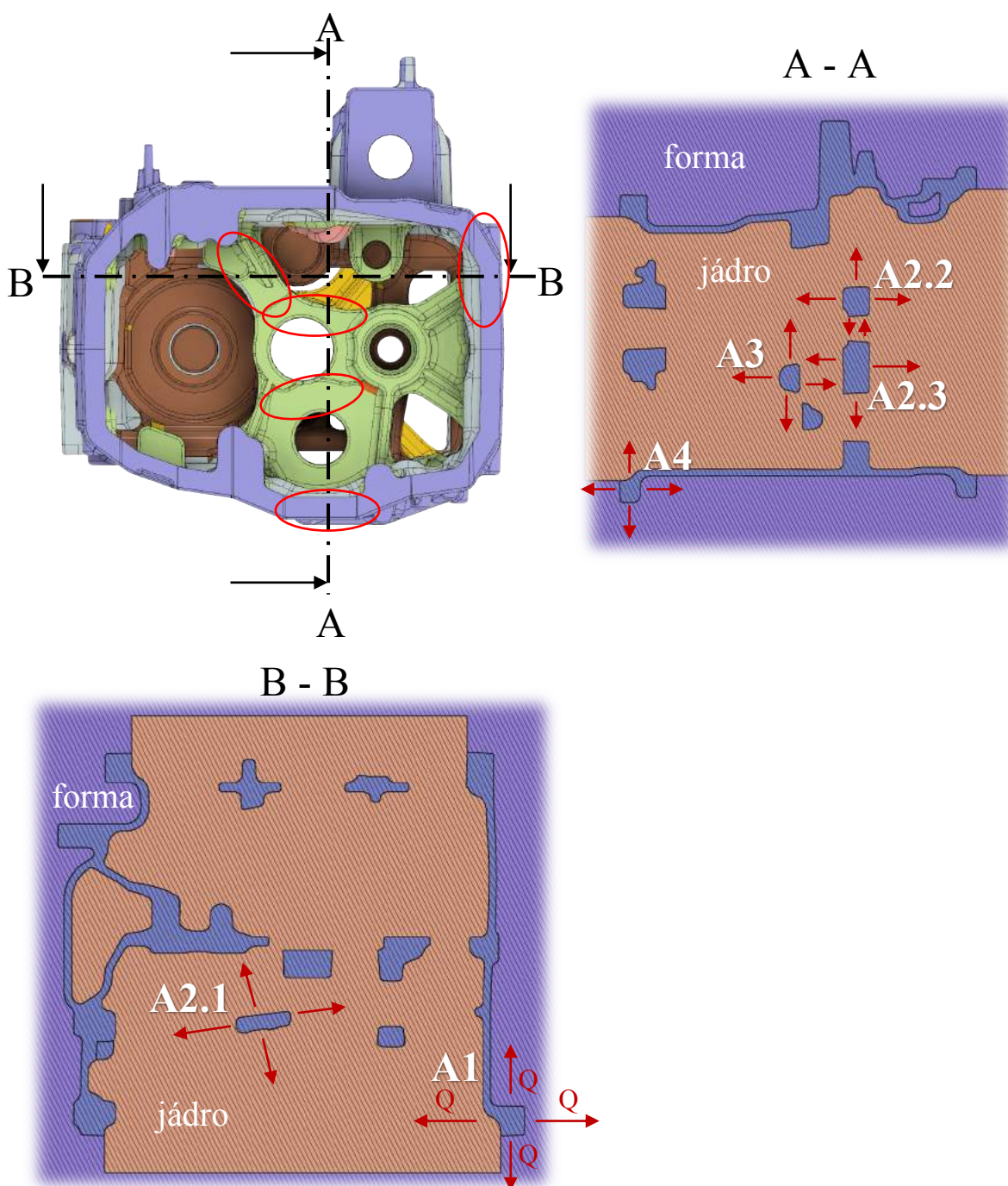
Z důvodu členitosti a složitých tvarů odlitků byla zvolena místa odběru vzorků tak, aby byly zachovány normalizované rozměry zkušebních těles. Místa odběru vzorků byla také volena podle pozice ve formě a typu obklopující směsi. Lépe řečeno byly vybrány místa styku forma-odlitek-jádro, jádro-odlitek-jádro (obr. 35 a 36). K odběru vzorků pro měření tvrdostí a pevnosti v tahu bylo použito 27 vzorků z 6 odlitků. Místa odběru jsou znázorněna na obrázcích níže.



Obr. 34 Místa odebraných vzorků pro zkoušky mechanických vlastností

Označení odběrných míst, v odlitcích typu A, je podle úrovně nacházejícího se místa v odlitku. Místo A1 (vršek) a A4 (spodek) jsou odebrány z límce odlitku a jsou to místa, které tuhnou mezi jádrem a formovací směsí (jádro-odlitek-forma). Toto lépe vystihuje řez A-A a B-B odlitku typu A na obrázku 35.

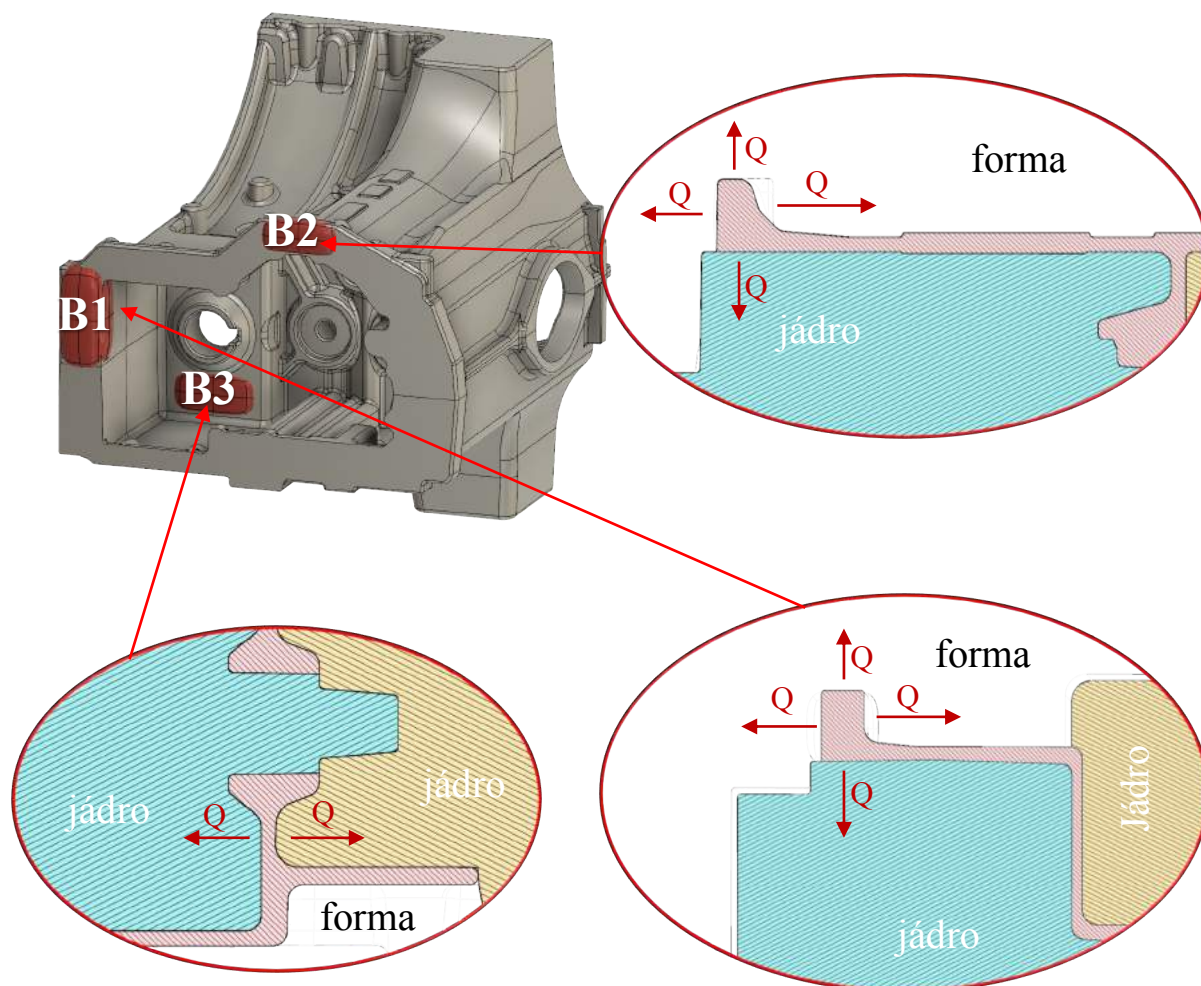
Další úrovní je vnitřní příčka (obr. 34), ze které byly zvoleny 3 odběrná místa (A2.1, A2.2, A2.3). Tato příčka se nachází vevnitř odlitku mezi dvěma jádry (jádro-odlitek-jádro). Posledním místem, které bylo odbíráno z odlitku typu A, je druhá úroveň vnitřních příček (místo A3), které leží rovněž mezi dvěma jádry. Veškerá odbíraná místa, jejich poloha v odlitku a směr odvodu tepla, jsou znázorněná zvýrazněnými oblastmi na obrázku 35.



Obr. 35 Místa odbíraných vzorků z odlitku typu A



Na odlitku typu B byly rovněž zvoleny dva místa z límce odlitku (B1, B2), které jsou ve styku s formou a jádrem (jádro-odlitek-forma). Posledním místem pro odebrání vzorků pro mechanické zkoušky z odlitku typu B bylo místo vnitřní tenké přičky B3, která tuhne mezi dvěma jádry (jádro-odlitek-jádro). Poloha odběrných míst z odlitku typu B a řezy jednotlivými místy znázorňuje obrázek 36.



Obr. 36 Místa odebrání vzorků z odlitku typu B

Postup přípravy zkušebních vzorků pro mechanické zkoušky byl následující:

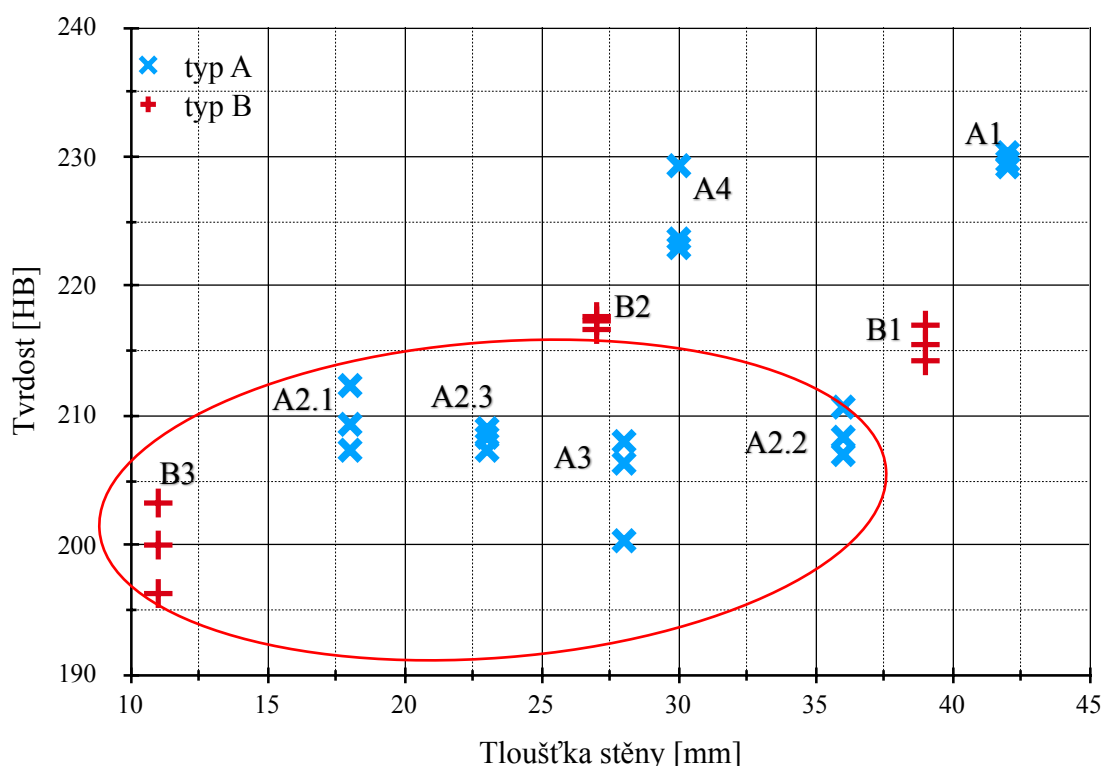
- Rozřezání odlitků na menší sekce.
- Označení místa a čísla odlitků.
- Zbroušení povrchové vrstvy a vytvoření dvou rovnoběžných ploch.
- Změření tvrdosti na zbroušené ploše.
- Ofrézování vyříznutých těles do hranolu.
- Osoustružení hranolu do podoby zkušebních těles pro zkoušky tahem.
- Provedení tahových zkoušek.

### 4.3.2 Měření tvrdosti dle Brinella

Měření tvrdosti bylo provedeno podle normy ČSN EN ISO 6506 na měřicím přístroji Brinell HPO 3000 v technické laboratoři slévárny Heunisch. Parametry měření jsou:

- indentor: kalená ocelová kulička průměru 10 mm,
- zátěžná síla: 30 000 N,
- doba zatížení: 10-15 sekund.

Na jednotlivých vzorcích byly vždy provedeny tři měření. Z těchto měření byl následně vypočten aritmetický průměr, a tato hodnota byla zavedena do grafu níže. Veškeré naměřené číselné hodnoty jsou zaznamenány v příloze 2.



Obr. 37 Výsledky měření tvrdosti v závislosti na tloušťce stěn odlitků typu A a B

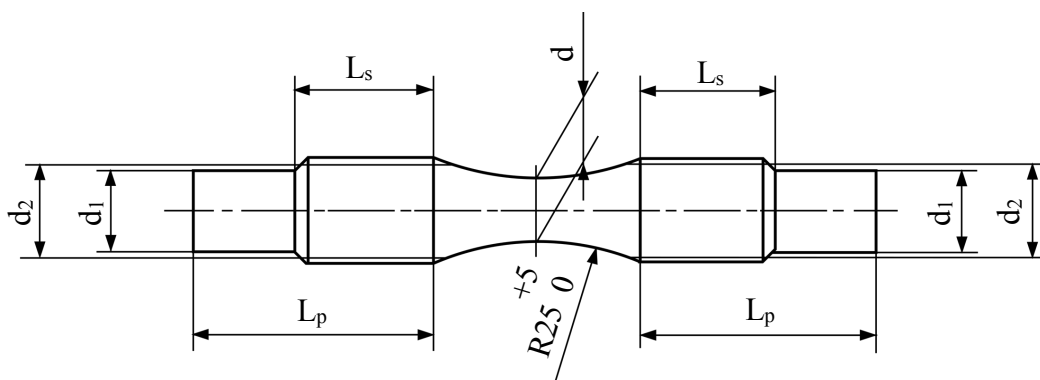
Z grafu měřených hodnot tvrdosti podle Brinella v odlitcích typu A a B lze pozorovat, že mezi tloušťkou stěny a tvrdostí není žádná závislost. Na základě teoretických znalostí by se dalo předpokládat vyšší mechanické vlastnosti v tenkých stěnách (zvýrazněná oblast v grafu, místa: B3, A2.1, A2.2, A2.3, A3), kde by mělo docházet k rychlejšímu ochlazování, avšak v případě odlitků typu A a B se to nepotvrzuje.

Z druhé strany z pohledu režimu tuhnutí a chladnutí lze předpokládat, že tenká místa, u kterých se vyskytuje nízká tvrdost, se nachází mezi jádry (zvýrazněná oblast v grafu). Veškerý odvod tepla v těchto místech jde do CB jader, která mají možnost odvádět teplo pouze přes známky. Tímto dochází k akumulaci tepla v jádrech odlitků a pomalejšímu chladnutí, respektive pomalé eutektoidní překrystalizaci, při které může vznikat hrubší perlit nebo ferit. Rozdílnosti ve struktuře v průřezu odlitků se projevují na jeho mechanických vlastnostech.

### 4.3.3 Měření meze pevnosti v tahu

Po změření tvrdosti byly odebrané vzorky ofrézovány a osoustruženy do tří velikostních skupin podle rozměrových možností původních vzorku, které byly vyřezané z odlitků. Zkušební tělesa pro zkoušku tahem byly vyrobeny v souladu s předpisy pro měření mechanických vlastností materiálu z litiny s lupínkovým grafitem podle normy ČSN EN 1561, rozměry zkušebních těles jsou popsány v tabulce na obrázku 38.

Rozměr d	Typ závitu zkušebního tělesa se závitem d <sub>2</sub>	Délka závitu L <sub>s</sub>	Průměr d <sub>1</sub> hladkých konců	Celková délka zkušebního tělesa se závitem
6 ± 0,1	M10	13	8	46
10 ± 0,1	M16	20	12	63
12,5 ± 0,1	M20	24	15	73



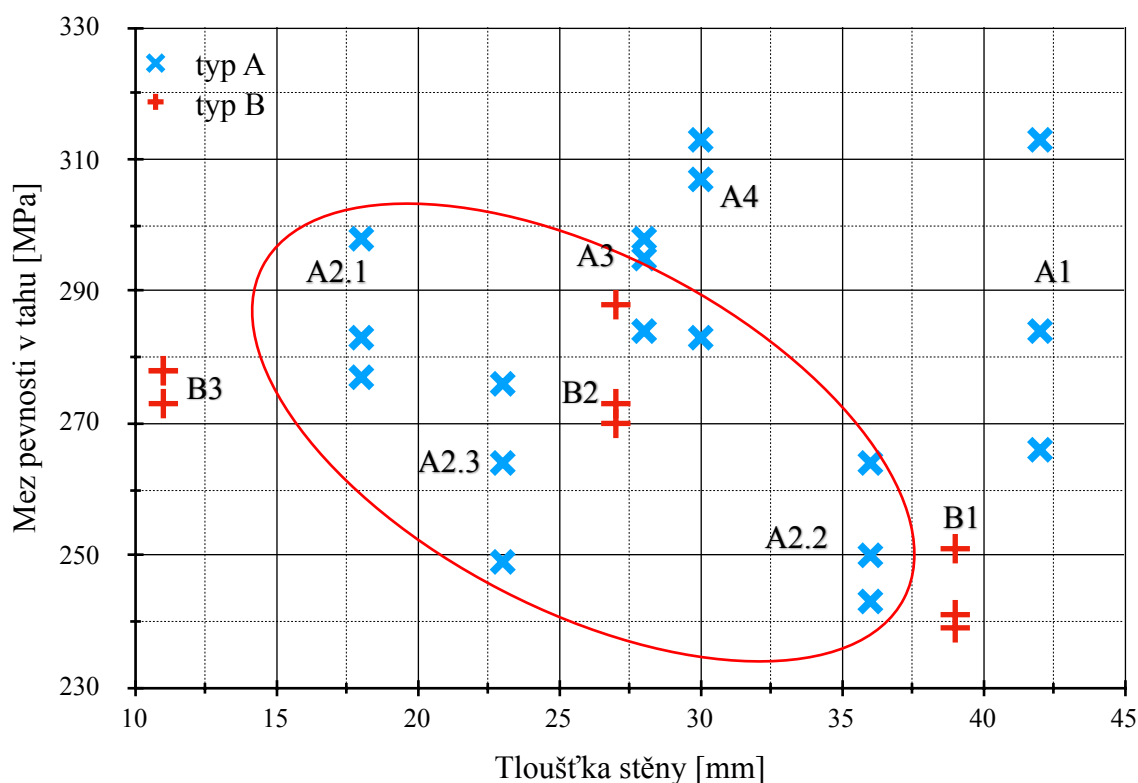
Obr. 38 Tvar a rozměry zkušebních těles pro zkoušku tahem dle ČSN EN 1561

Tahová zkouška byla realizována v technické laboratoři ÚMVI na VUT. Pro měření byl použit moderní přístroj ZWICK/ROELL Z250. Procesní parametry přístroje jsou zapsány v test reportu v příloze 3.

Tab. 12 Hodnoty pevnosti v tahu jednotlivých míst odlitků typu A a B

Místo	Odlitky: Zkušební těleso	č.1 Rm [MPa]	č.2 Rm [MPa]	č.3 Rm [MPa]	Statistika		
					Aritmetický průměr [μ]	Směrodatná odchylka STDEVP [σ]	Variační koeficient [σ/μ]
A1	M20	266	313	284	<b>288</b>	19,4	7 %
A2.1	M16	298	283	277	<b>286</b>	8,8	3 %
A2.2	M20	250	243	264	<b>252</b>	8,7	3 %
A2.3	M20	264	249	276	<b>263</b>	11,0	4 %
A3	M20	284	295	298	<b>292</b>	6,0	2 %
A4	M20	307	313	283	<b>301</b>	13,0	4 %
B1	M20	239	251	241	<b>244</b>	5,2	2 %
B2	M20	273	270	288	<b>277</b>	7,9	3 %
B3	M12	273	278	278	<b>276</b>	2,4	1 %

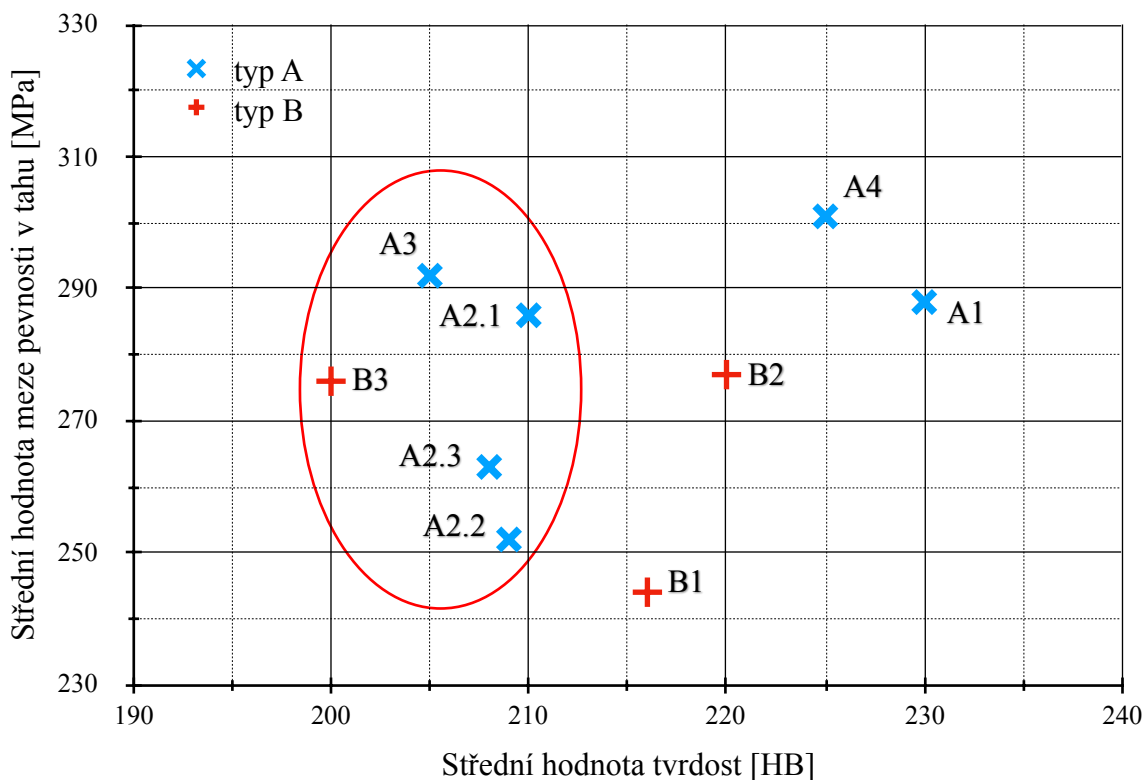
V tabulce 12 jsou zobrazeny všechny naměřené hodnoty meze pevnosti v tahu v jednotlivých místech odlitků typu A a B. Hodnoty jsou uspořádány podle typu odlitku a čísla odběrného místa. Aritmetický průměr ( $\mu$ ) a směrodatná odchylka ( $\sigma$ ) byly vypočteny za účelem ověření mechanických vlastností vzorků odebraných ze stejných míst různých odlitků (č. 1, č. 2, č. 3). Variační koeficient ukazuje, že naměřené hodnoty se odchyľují mezi 1-7 % od vypočteného aritmetického průměru, což znamená odchyľení mezi 2,4-19,4 MPa. To platí při analýze všech vzorků, ale většina vzorků vykazuje odchyľku pod 5 %. Jednotlivé hodnoty jsou znázorněny v grafu na obrázku 39, jako závislost na tloušťce stěny.



Obr. 39 Hodnoty měření pevnosti v tahu v závislosti na tloušťce stěn v odlitcích typu A a B

V grafu na obrázku 39 lze těžko pozorovat jakoukoliv korelaci mezi tloušťkou stěn a pevností v tahu u celkové množiny naměřených hodnot. Oproti výsledkům tvrdosti, kde vnitřní příčky (místa A2.1, A2.2, A2.3, A3, B3), které se nachází mezi jádry, mají celkově nižší tvrdosti než ostatní místa, což u výsledků meze pevnosti nelze pozorovat. Podle výsledku výzkumu Schmidta [26] lze předpokládat, že pevnost primárně závisí na době tuhnutí (kap. 2.5.3), která koreluje jenom do určité míry s tloušťkou stěny v odlitku. Pokud zanedbáme místa A3, A4 a A1, lze pozorovat určitou závislost pro mechanické vlastnosti odlitků typu A (zvýrazněná oblast na obrázku 39). V místech A2.1, A2.3 a A2.2, které jsou součástí jedné vnitřní příčky (obr. 34), lze pozorovat pokles meze pevnosti s rostoucí tloušťkou stěny.

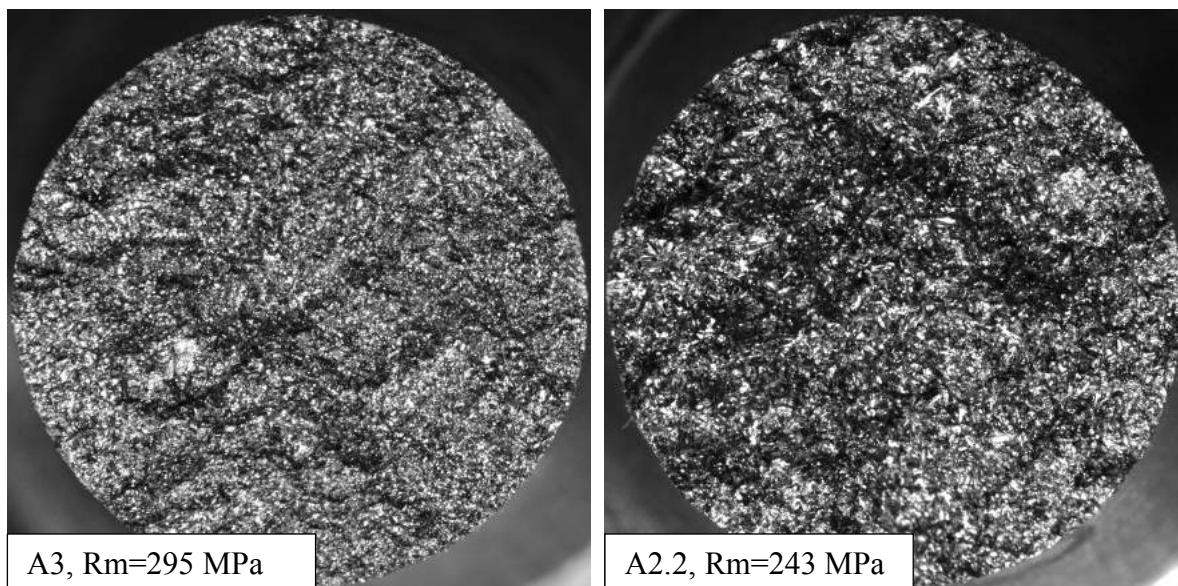
Aritmetický průměr hodnot pevnosti byl následně vztažen ke středním hodnotám tvrdosti v jednotlivých místech odlitků (obr. 40). V grafu lze pozorovat, že v místech vnitřních příček (zvýrazněná oblast), hodnoty pevnosti některých míst odpovídají hodnotám pevnosti tlustším stěnám límce (A1, A4, B1 a B2). Toto však nelze říct o tvrdosti. Tvrdost vnitřních příček (zvýrazněná oblast) je celkově nižší než tvrdost ostatních míst.



Obr. 40 Závislost mezi tvrdostí podle Brinella a pevnosti v tahu

### ➤ Fraktografie

Lomová plocha přetržených zkušebních těles (obr. 41: odlitek č. 2, místa A3 a A2.2) byla analyzována pomocí stereolupy. Z obrázku 41 je zjevné, že zkušební těleso z místa A3, které je o 52 MPa pevnější, má jemnější strukturu oproti místa A.2.2. Pro exaktnější zobrazení struktury byla provedena mikroskopická analýza, kterou se zabývá následující kapitola.



Obr. 41 Lomová plocha zkušebních těles z míst A3 a A2.2



#### 4.4 Analýza mikrostruktury zkušebních těles

Pro analýzy mikrostruktury bylo vybráno po jednom vzorku z každého místa obou typů odlitků. Po tahové zkoušce byla odřezaná část vzorku v místě závitu na zkušebním tělese (obr. 42). Postup odběru vzorků a přípravy pro analýzu se skládal z následujících kroků:

- Odběr vzorků z mechanicky testovaných těles.
- Zalisování vzorků do dentacrylu.
- Broušení a leštění povrchů a hodnocení grafitu v mikrostrukturu.
- Leptání a vyhodnocení kovové matrice.



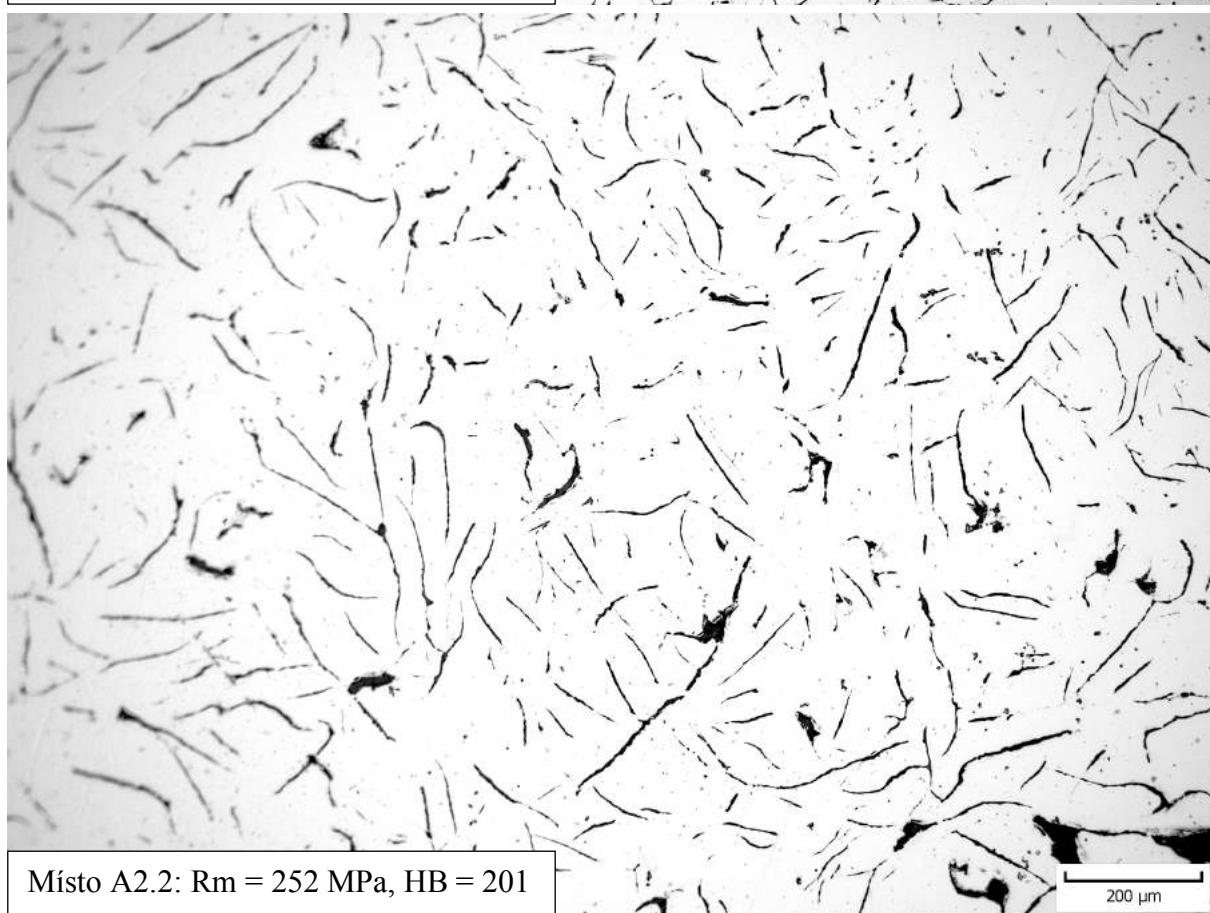
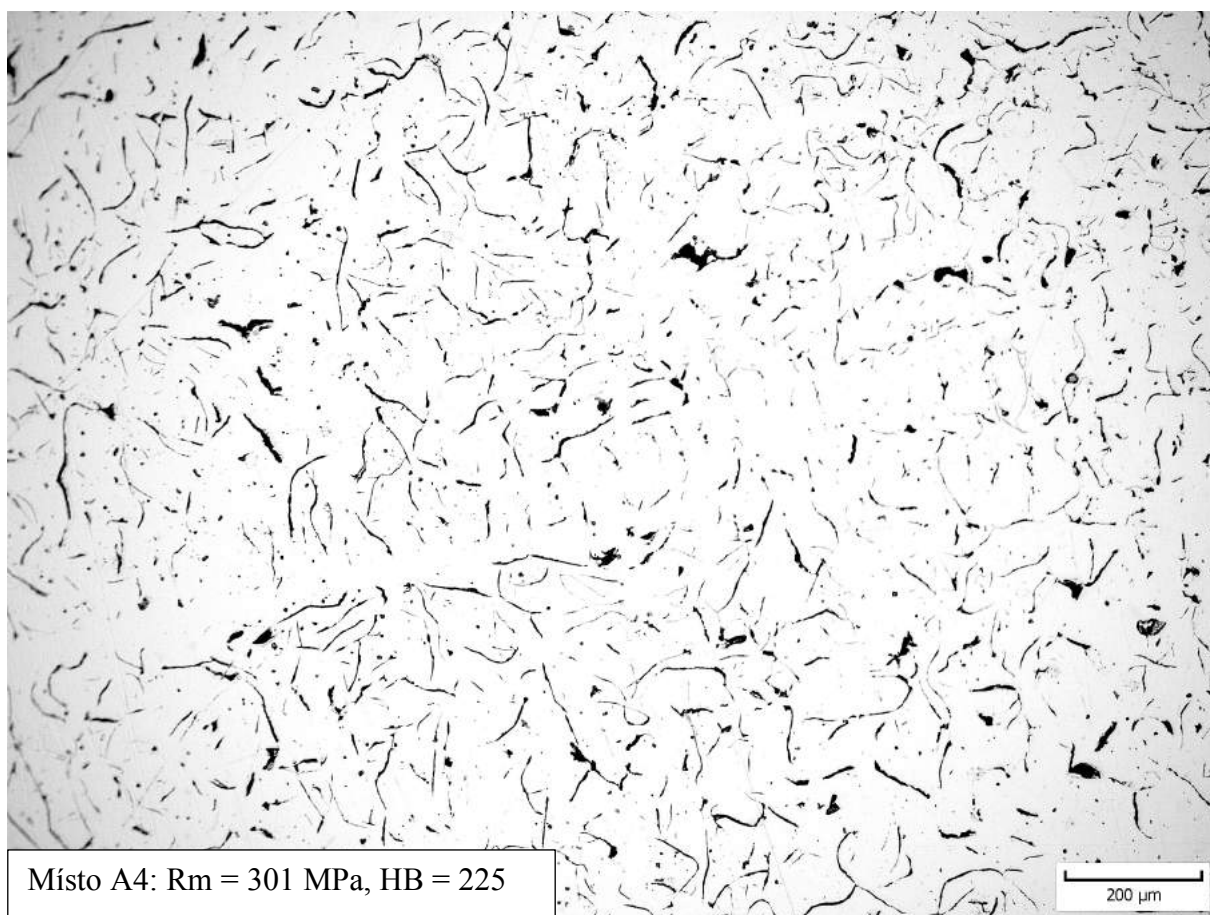
Obr. 42 Místo odběru vzorků ze zkušebních těles pro metalografickou analýzu

Vzorky byly broušeny na automatizovaném stroji pro přípravu metalografických vzorků s nadstavcem umožňujícím současné broušení tří vzorků. Pro broušení byly použity brousící kotouče se zrnitostí 250, 600, 800, 1200 a následně byly vzorky leštěny. Grafit je hodnocen v neleptaném stavu, základní kovová hmota po naleptání 3 % Nitalem.

Velikosti a dispersita grafitu a jednotlivých složek matrice byly hodnoceny při zvětšení 100x a 400x. Byl použit mikroskop firmy Olympus. Klasifikace grafitu a kovové matrice byla provedena podle normy ČSN EN ISO 945-1. Metalografické zhodnocení je obsaženo v tabulce 13. Tabulka je řazena od nejvyšší po nejnižší střední hodnotu meze pevnosti jednotlivých míst odlitků typu A a B. Veškeré metalografické snímky jsou zaznamenány v příloze 4.

Tab.13 Hodnocení struktury odlitků typu A a B

Vzorek	Stěna [mm]	Průměrná pevnost [MPa]	Tvar grafitu	Rozložení lupínkového grafitu	Velikost grafitu	Obsah perlitu nebo feritu
Typ A						
A4	30	<b>301</b>	I	90 % A + 10 % E	4/ <u>5</u> /6	P
A3	28	<b>292</b>	I	90 % A + 10 % E	4/ <u>5</u> /6	P
A1	42	<b>288</b>	I	100 % A	3/ <u>4</u> /5	P
A2.1	18	<b>286</b>	I	90 % A + 10 % E	<u>4</u> /5	P
A2.3	23	<b>263</b>	I	95 % A + 5 % E	3/ <u>4</u>	P
A2.2	36	<b>252</b>	I	95 % A + 5 % E	<u>3</u> /4	P
Typ B						
B2	27	<b>277</b>	I	95 % A + 5 % E	3/ <u>4</u> /5	P
B3	11	<b>276</b>	I	95 % A + 5 % E	3/ <u>4</u> /5	P
B1	39	<b>244</b>	I	100 % A	<u>3</u> /4	P



Obr. 43 Struktura vzorků s maximální a minimální pevností z odlitku typu A





Obr. 44 Struktura vzorků s maximální a minimální tvrdostí z odlitku typu A



Z veškerých metalografických hodnocených míst (viz příloha 4) byly v této části práce vybrány místa největších rozdílů mechanických vlastností, respektive místa s minimální a maximální pevností a tvrdostí (obr. 43 a 44). Již na první pohled lze pozorovat rozdílnosti ve struktuře jednotlivých míst. Na obrázku 43 lze pozorovat disperzitu a velikost grafitických lupínků v místech A4 a A2.2. Místo A4 je místem nejvyšší meze pevnosti odlitku typu A. V tomto místě lze pozorovat výskyt značně jemnějších a kratších grafitických lupínků oproti místu A2.2, které má na druhou stranu nejnižší pevnost.

Z tabulky 13 lze pozorovat, že v místě A4 se velikost lupínku pohybuje v rozsahu několika tříd, přičemž převládající je třída 5 (60-120  $\mu\text{m}$ ). V místě A2.2 zase převládá třída 3 (250-500  $\mu\text{m}$ ). Tato rozdílnost ve velikosti grafitických lupínků se projevuje na hodnotách pevnosti v tahu, které se v těchto místech liší téměř o 50MPa. Z ohledu na pevnost v tahu z tabulky 13 vyplývá, že se snižující pevností roste velikost grafitických lupínků.

Obrázek 44 znázorňuje rozdílnost v jemnosti vyloučené perlitické struktury v místech s maximální a minimální tvrdostí odlitků typu A. Tento obrázek dobře vystihuje závislost mezi tvrdostí a kovovou maticí. Místa A1 a A2.1 mají přibližně stejné hodnoty pevnosti ale diametrálně rozdílnou tvrdost. Předpokládaným důvodem takových rozdílů tvrdosti u míst s podobnou tloušťkou stěny (A1 = 42 mm, A2.1 = 36 mm) je rozdílná rychlost perlitické transformace, a to hlavně z důvodu polohy zkoumaného místa (A1 místo styku s formou, A2.1 místo mezi jádry viz obrázek 35 a tabulka 16 – analýza teplotního pole odlitku typu A).

## 4.5 Analýza numerické simulace

Cílem simulace je získat hodnoty mechanických vlastností pro srovnání s reálnými mechanickými vlastnostmi odlitků typu A a B. Předtím však jsou popsány vstupní parametry pro simulaci a vlivy jednotlivých faktorů, ze kterých MAGMA<sup>5</sup> vychází při výpočtu mechanické vlastnosti.

Pro analýzu numerické simulace je použit odlitek typu A. Simulace odlitku typu B byla provedena na konec, až když byla potvrzena správnost nastavení vstupních parametrů simulace odlitku typu A.

### 4.5.1 Vstupní parametry pro simulaci

Tabulka 14 zobrazuje vstupní parametry, které byly použity pro výpočet simulace odlitku typu A. Tyto parametry by měly odpovídat, v co jak největší míře technické praxi slévárny a technologickým údajům při výrobě odlitků.

Vlastnosti litiny jsou závislé na chemickém složení. MAGMA<sup>5</sup> obsahuje vlastní materiálovou databázi s přednastavenými hodnotami jednotlivých typů litin. Pro přiblížení skutečných vlastností materiálu, v co jak největší míře byly vytvořené vlastní materiály s chemickým složením konkrétních odlitků typu A a B. Z důvodu vícero neznámých vlastností (měrná tepelná kapacita, tepelná vodivost...) formovací směsi a CB jader ve slévárně, byly zvoleny pro simulaci přednastavené materiály z databáze, které odpovídají přibližným vlastnostem těchto materiálů.

Tab.14 Parametry pro simulaci

Materiál odlitku typu A	EN GJL 300	-
Hmotnost odlévaného kovu	220	Kg
Počáteční teplota lití	1440	°C
Doba lití	12	s
Formovací směs	Jednotná bentonitová směs	-
Počáteční teplota formovací směsi	20	°C
Materiál jader	CB – křemenný písek	-
Filtry zohledněný v simulaci	ANO - 10	ppi
Doba v chladicím tunelu po odlití	3	h
Ukončení simulace	odlitek se ochladí pod 50	°C

V modulu MAGMAiron lze také modifikovat fázovou nukleaci v závislosti na očkovacím procesu ve slévárně. Software nabízí volbu ze třech hodnot: „Very Good“, „Good“ a „Fair“. Správné počáteční hodnoty pro získání parametrů přizpůsobených aktuálním podmínkám slévárny jsou následující:

- Očkovaní do licí pánve: „Fair“
- Očkovaní do proudu kovu: „Good“
- Očkovaní in-mold (očkovacími tělísky) nebo do proudu kovu, s dodatečnou předúpravou taveniny: „Very Good“. Z ohledu na dvoustupňové očkovaní v reálném procesu, byla zvolena tato varianta očkovaní v simulačním softwaru.

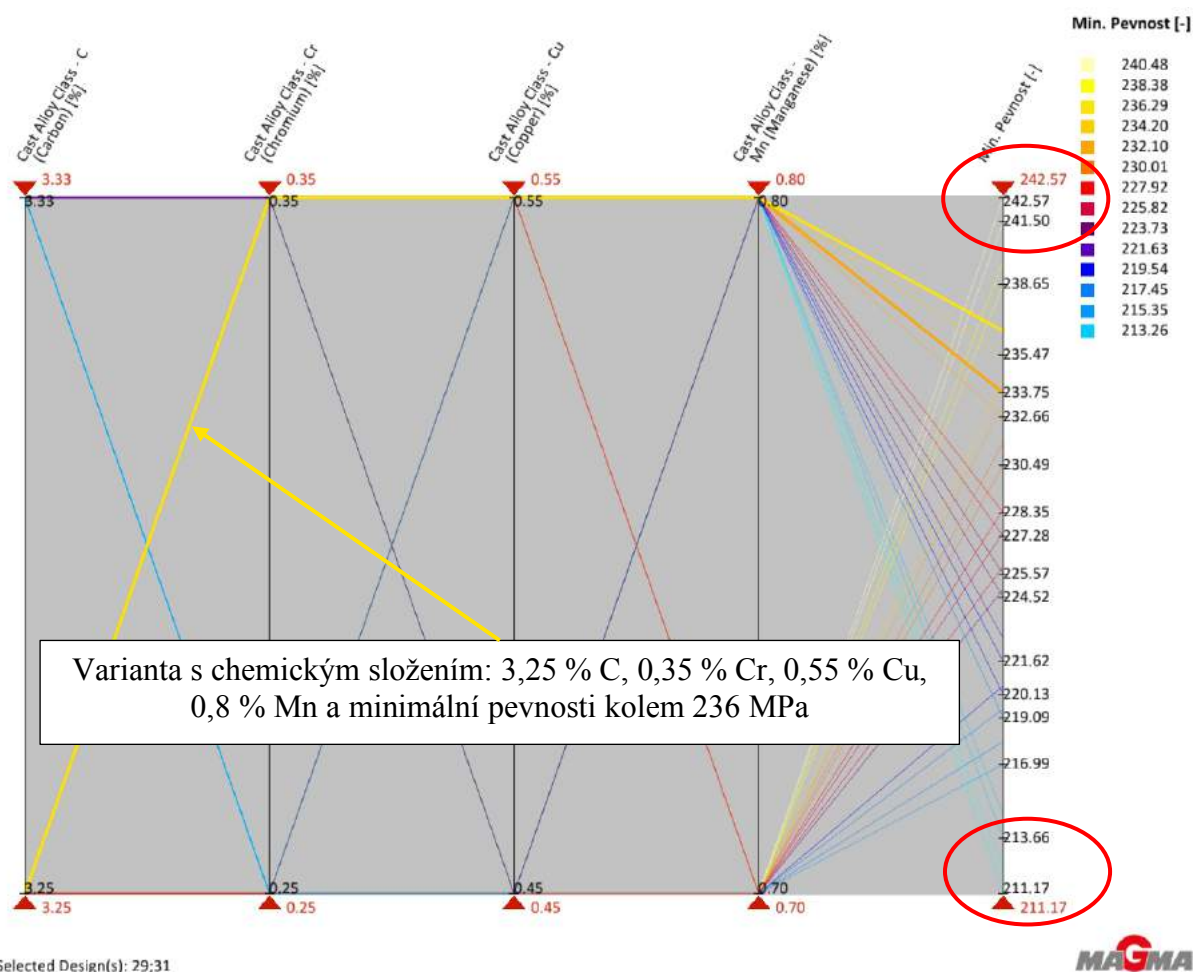
#### 4.5.2 Vliv chemického složení na mechanické vlastnosti v MAGMA<sup>5</sup>

Pro zhodnocení, do jaké míry chemické složení ovlivňuje vyhodnocené mechanické vlastnosti v softwaru, byla aplikovaná metoda DoE (kap. 3.2.2). Cílem DoE metody bylo nechat program prověřit veškeré varianty chemického složení, ve kterých byly kombinovány procesní proměnné (min. a max. obsahu jednotlivých prvků) a následně vyhodnoceny podle stanoveného cíle (minimální pevnost v tahu). Rozptyly obsahů jednotlivých prvků byly převzaty z materiálového listu z přílohy 1 pro odlitek typu A a jsou zapsány v tabulce 15.

Tab. 15 Rozptyl chemického složení u odlitků typu A

Prvky	CE	C	Si	Mn	Cu	Cr
Rozptyl obsahu	3,80-3,90	3,25-3,33	1,75-1,95	0,70-0,80	0,45-0,55	0,25-0,35

Pro vyhodnocení vlivu chemického složení posloužil spojnicový diagram (obr. 45), který pro každou variantu spojuje dané nastavení parametrů a výsledné hodnoty zvolených cílů (celkem vyhodnoceno 32 variant). Lepe řečeno jedna barva křivky ve spojnicovém diagramu označuje jednu variantu s konkrétním chemickým složením (např. zvýrazněná žlutá křivka).

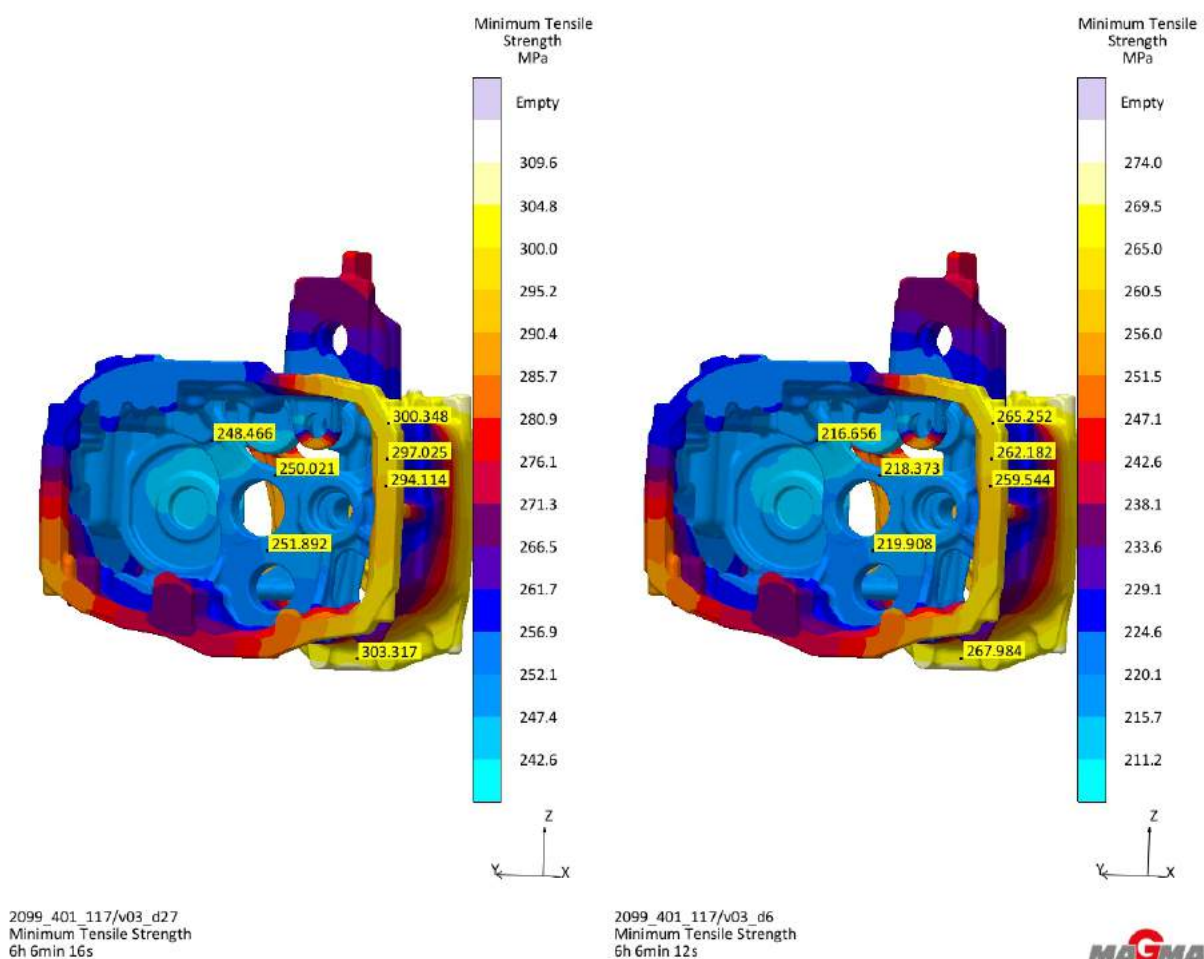


Obr. 45 Spojnicový diagram znázorňující veškeré varianty chemického složení

Ze spojnicového diagramu na obrázku 45 vyplývá, že při ideálním chemickém složení v rámci rozptylu (ve prospěch mechanických vlastností) se výsledná minimální pevnost nejlepší a nejhorší varianty liší až o 31MPa (zvýrazněná oblast obr. 45). Rozdílnost hodnot mechanických vlastností pro různé chemické složení je na obrázku 46.

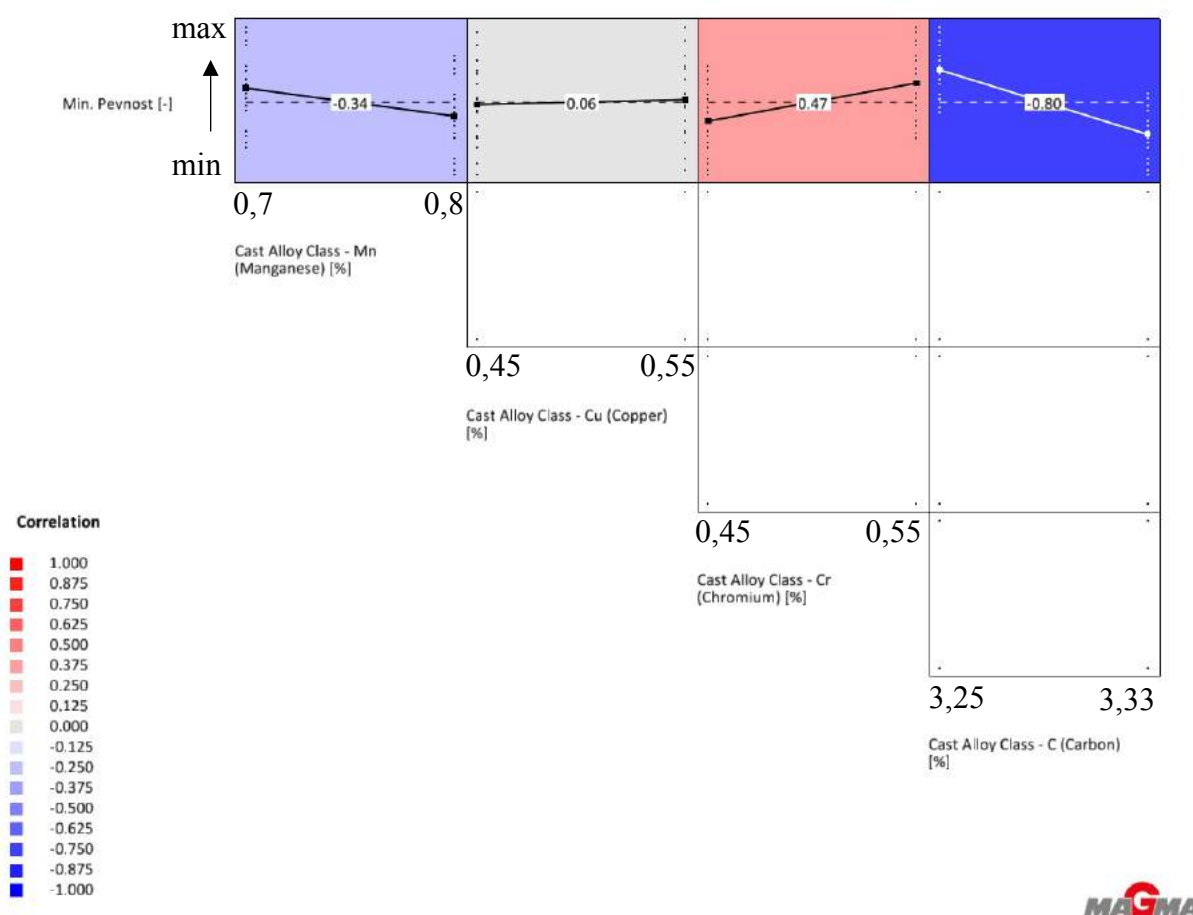
Tento fakt je důležitý, ale ze strany slévárny obtížně řešitelný. Z důvodu použití kuplovný jako tavicího agregátu ve slévárně, je dodržení konstantního chemického složení největší výzvou pro metalurgii. Z tohoto důvodu je hlavním předpisem pro hodnocení chemického složení uhlíkový ekvivalent, a ne obsah jednotlivých prvků.

Na základě výsledků metody DoE je důležité zohlednit toleranci při hodnocení mechanických vlastností. Pokud jsou srovnávány mechanické vlastnosti reálných odlitků se simulací, je důležité ujistit se, že chemické složení odpovídá konkrétním odlitkům.



Obr. 46 Varianty s nejvyšší (po levé) a nejnižší (po pravé) minimální mezí pevnosti v odlitku typu A

Pomocí metody DoE ze všech vypočtených variant lze také hodnotit, jak intenzivně jednotlivé parametry (obsah prvků) ovlivňují zvolený cíl. Vyhodnocení vlivů se provádí pomocí korelační matice (obr. 47), která je automaticky vytvořena softwarem MAGMA<sup>5</sup>. Z matice vyplývá, že nejvýznamnější vliv na minimální pevnost odlitku má obsah chromu a uhlíku. Tyto poznatky dobře korespondují s poznatky z teoretické části (kap. 2.3 a 2.5.4).



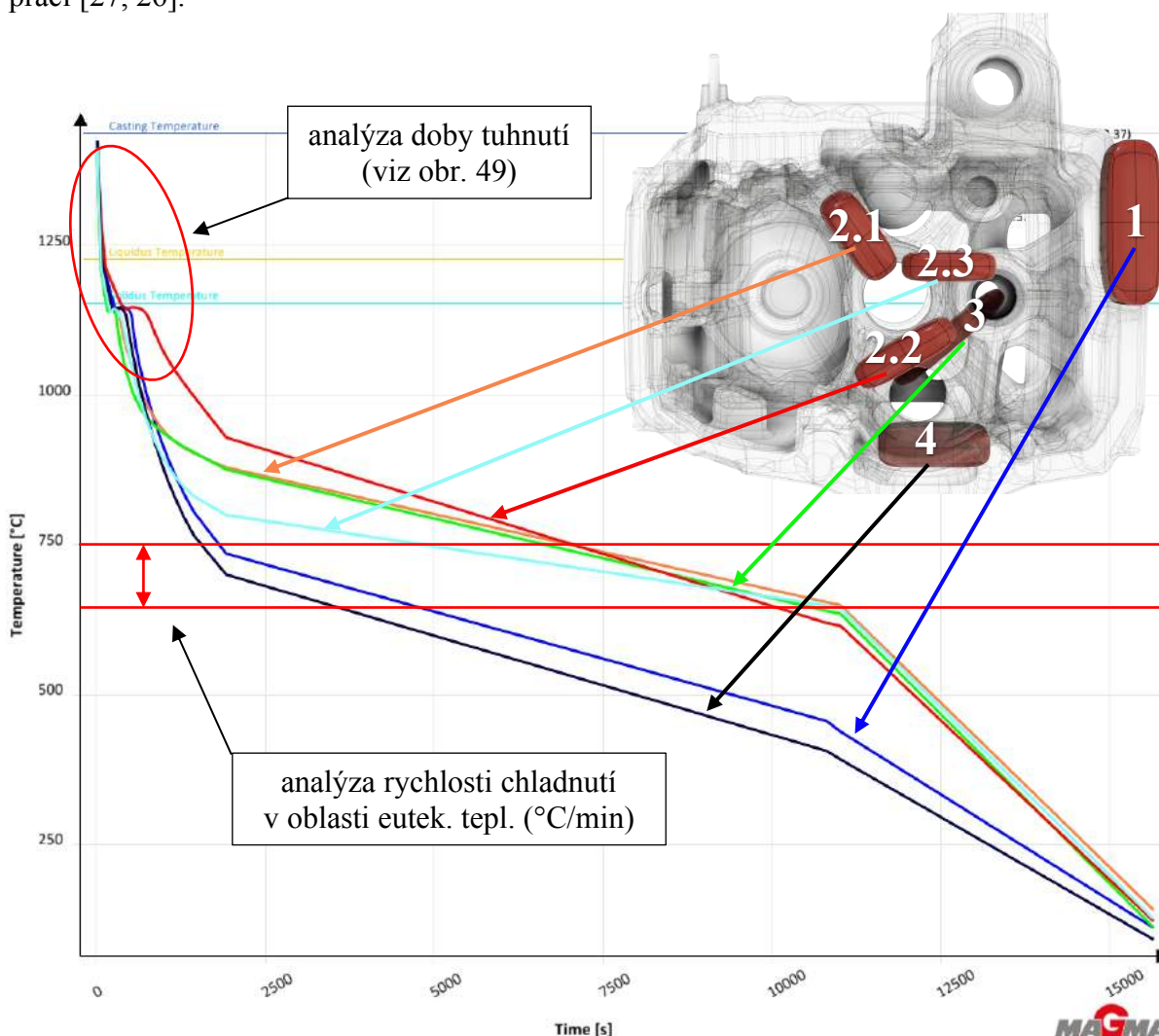
Obr. 47 Korelační matice zobrazující vliv jednotlivých prvků na mez v pevnosti

Po zhodnocení DoE metody byly odsimulovány varianty s chemickým složením odpovídajícím složení odlitků č.1, 2 a 3 typu A, které byly použity pro experiment této práce. Chemické složení odlitku je zaznamenáno v tabulce 10 na straně 50. Z ohledu na úzký rozptyl chemického složení u těchto jednotlivých odlitků se mechanické vlastnosti lišily v jednotlivých místech v rámci 1-1,5 %. Tento rozptyl je téměř zanedbatelný, proto pro další analýzu simulací byl použit výpočet s chemickým složením odlitku č.1.

### 4.5.3 Analýza křivek tuhnutí a teplotního pole v MAGMA<sup>5</sup>

Jak bylo již zmíněno v teoretické části, dalším ze základních faktorů, který určuje výsledné mechanické vlastnosti, je lokální teplotní charakter, respektive rychlost tuhnutí a chladnutí v daném místě. Díky použití termočlánků nebo „virtuálních termočlánků“ v simulaci, křivky tuhnutí pomáhají v analýze souvislosti mezi lokálními mechanickými vlastnostmi a teplotním režimem tuhnutí a chladnutí.

Měření průběhu tuhnutí a chladnutí reálných odlitků pomocí termočlánků nebylo možné provést, z důvodu sériové výroby a kontinuity provozu výrobní linky ve slévárně Heunisch. Proto byly použity křivky tuhnutí vyhodnocené pomocí virtuálních termočlánků v simulačním softwaru. Správnost výpočetního aparátu a shodu mezi vyhodnocenými křivkami tuhnutí v MAGMA<sup>5</sup> a experimentálně naměřenými křivkami, potvrzuje řada akademických prací [27, 26].



Obr. 48 Průběh tuhnutí v jednotlivých místech odlitku typu A

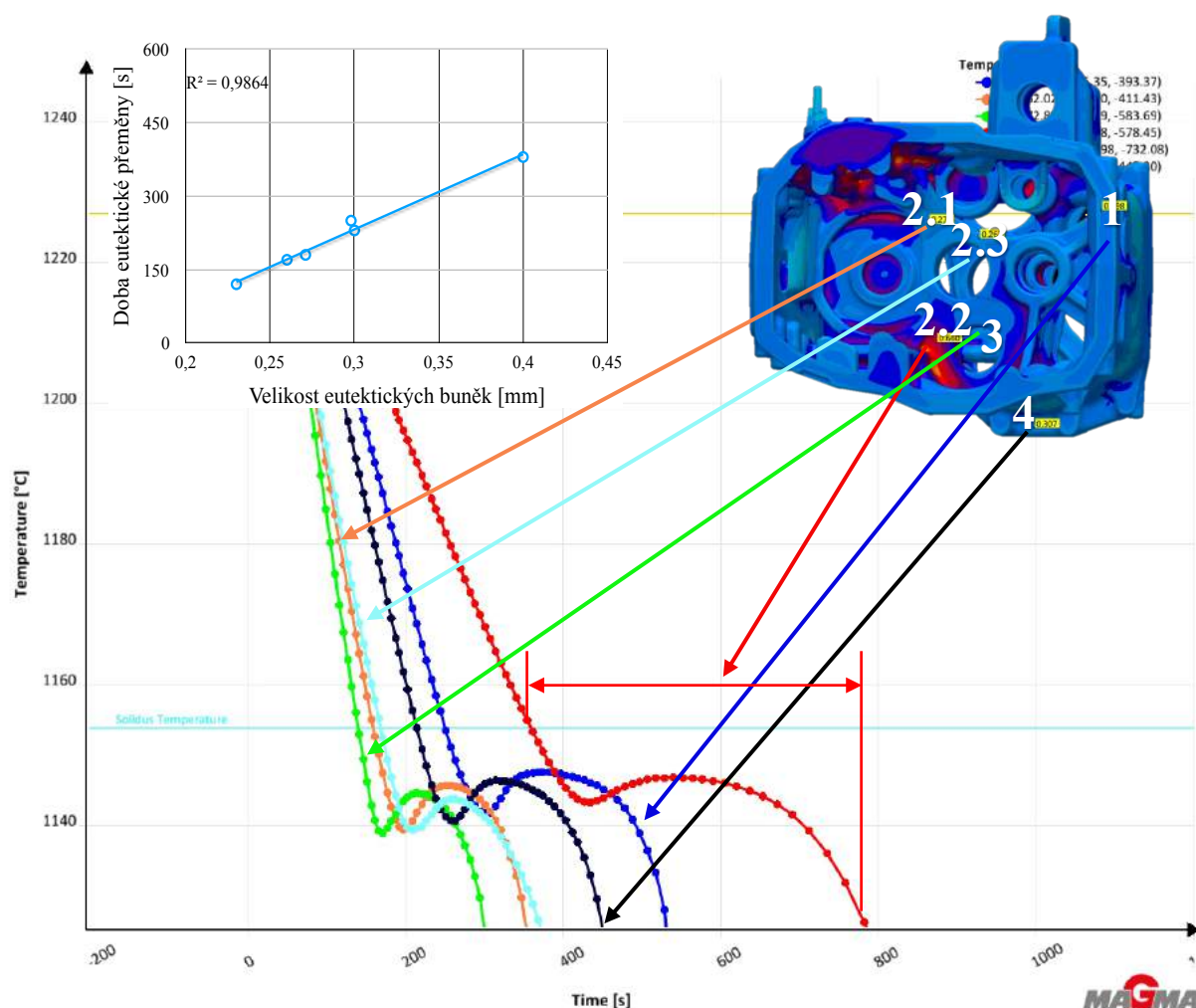
Obrázek 48 zachycuje teplotní režim tuhnutí a chladnutí na šesti zkušebních pozicích pomocí virtuálních termočlánků. Zajímavé je, že místa (A2.1, A2.3, A3) mají kratší dobu tuhnutí než ostatní místa, ale později se jejich rychlost ochlazování zpomalí a následně jim dlouho trvá dostat se pod eutektoidní teplotu. Další poznatek vyplývající z tohoto grafu je, že místo A2.2 má celkově nejdelší dobu tuhnutí, ale rychlost ochlazování při eutektoidní teplotě se mění a je vyšší oproti ostatním místům ve stejné přičce.



Z křivek tuhnutí lze také pozorovat značnou teplotní nehomogenitu v průřezu odlitku. Teplota v jednotlivých místech ve stejném čase se může lišit až o 250 °C. Tato teplotní nehomogenita odlitku může způsobovat trhliny, které vznikají v důsledku vnitřního pnutí materiálu.

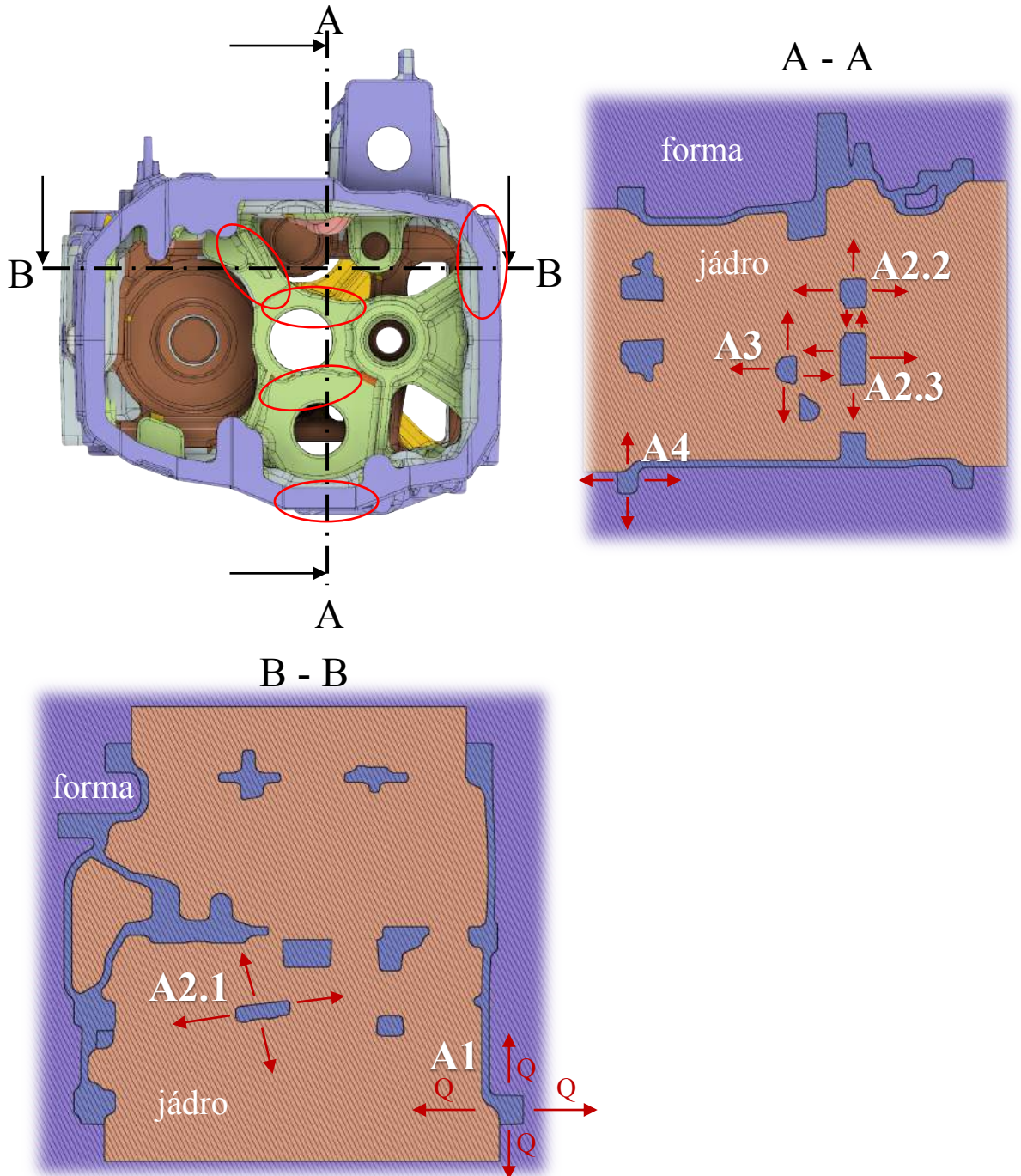
Obrázek 49, jako detail obrázku 48, zachycuje průběh tuhnutí při eutektické teplotě. Tvar křivek a nízké podchlazení poukazuje na efektivitu zvolené očkovací metody.

Vyznačená oblast eutektické transformace odpovídá hodnocenému parametru velikosti eutektických buněk. Korelace mezi dobou eutektické krystalizace a velikostí eutektických buněk je zachycen v grafu, který je součástí obrázku 49. Dle kapitoly 2.5.2 z teoretické části, velikost eutektických buněk může být jedním z kritérií, podle kterého lze hodnotit mechanické vlastnosti LLG. V této práci však nebyly hodnoceny reálné rozměry eutektických buněk vzhledem ke komplikovanosti jejich vyhodnocení.



Obr. 49 Oblast uvolnění latentního tepla při eutektické krystalizaci

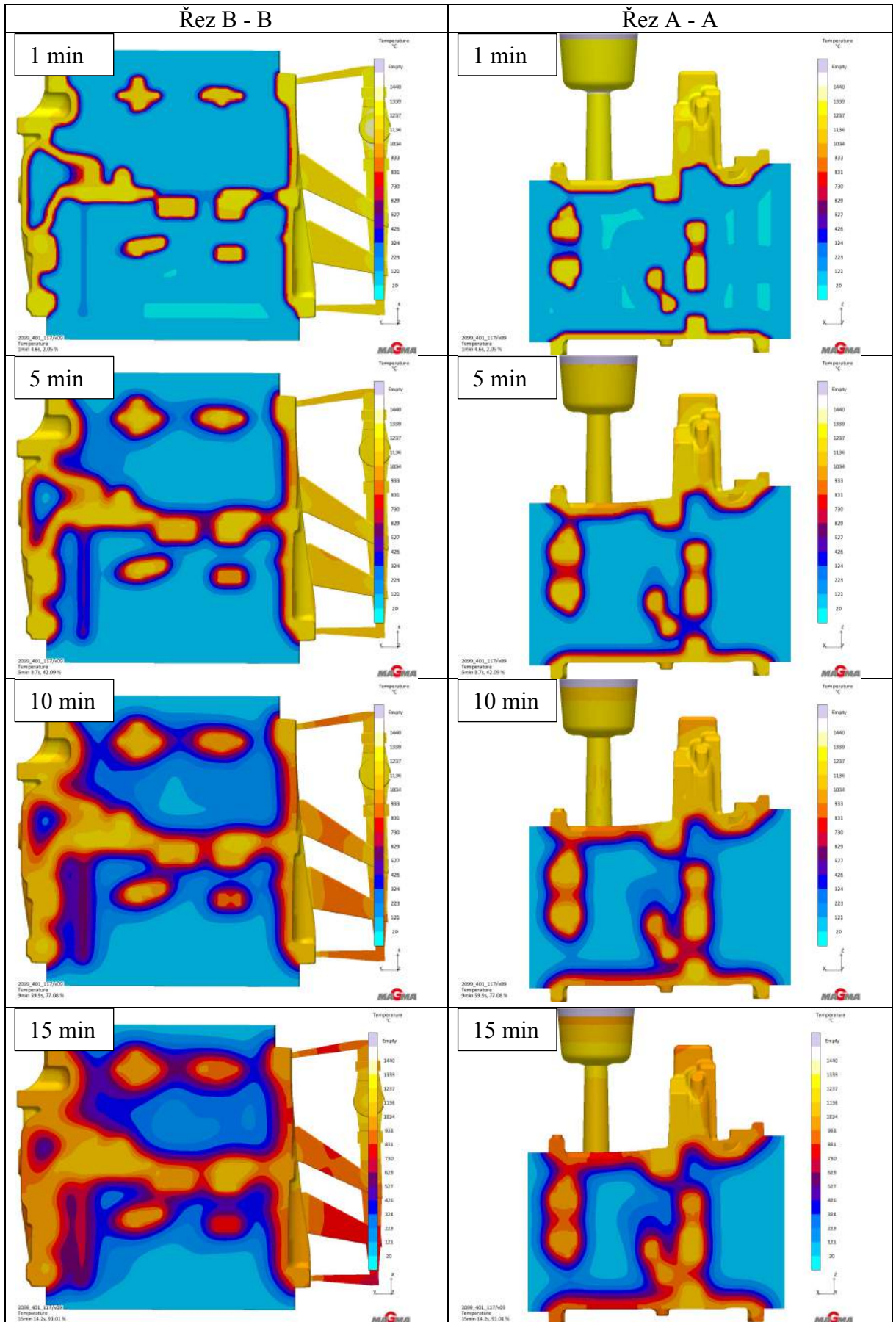
Pro lepší pochopení teplotních dějů vevnitř formy odlitku a lokálního teplotního charakteru, který vyjadřují křivky tuhnutí na obrázku 48 a 49, byl vyhodnocen průběh tuhnutí a chladnutí v jednotlivých časech. Snímky průběhu tuhnutí a chladnutí se nachází v tabulce 16. Pro lepší přiblížení polohy zkoumaných míst (A1, A2.1, A2.2, A2.3, A3, A4) je použit obrázek 50. Na základě obrázku lze předpokládat, že nejvíce teplotně exponovaná místa budou vnitřní příčky (A2.1, A2.2, A2.3, A3). Toto lze pozorovat na křivkách tuhnutí (obr. 48). Tyto místa se ochlazují nejpomaleji.

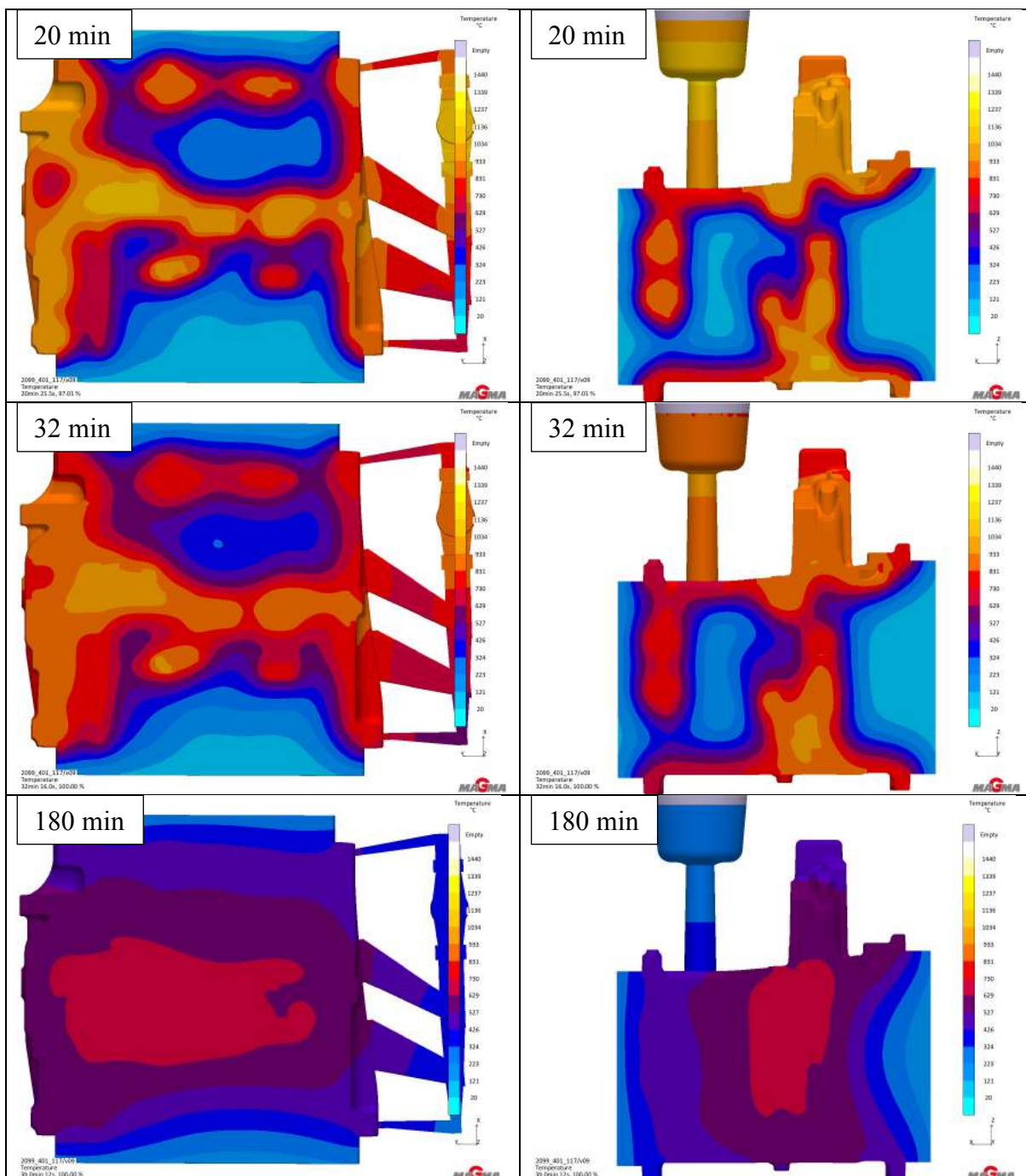


Obr. 50 Místa odebíraných vzorků z odlitku typu A

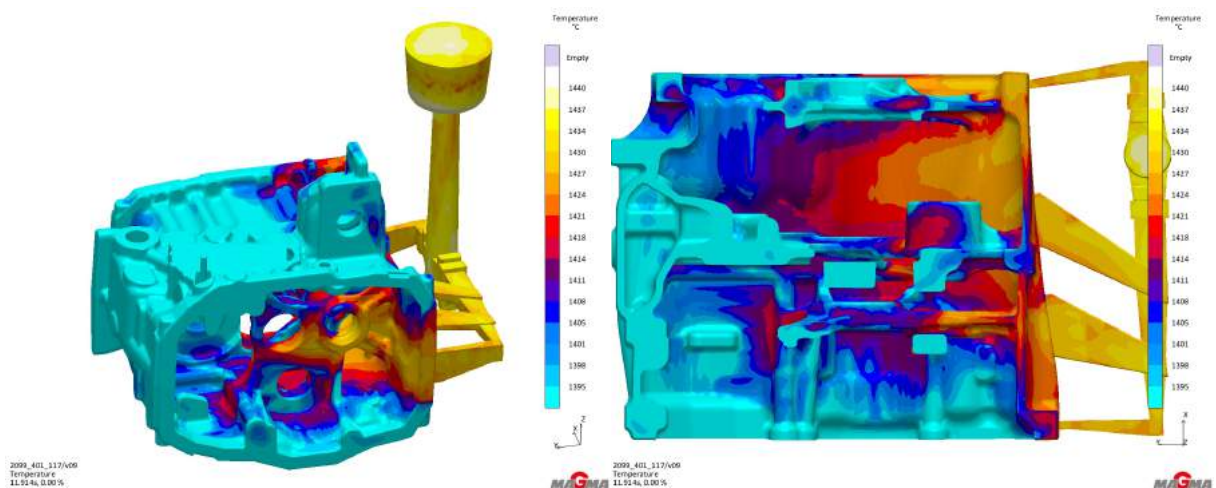


Tab. 16 Teplotní pole odlitku a jádra v řezu A-A a B-B



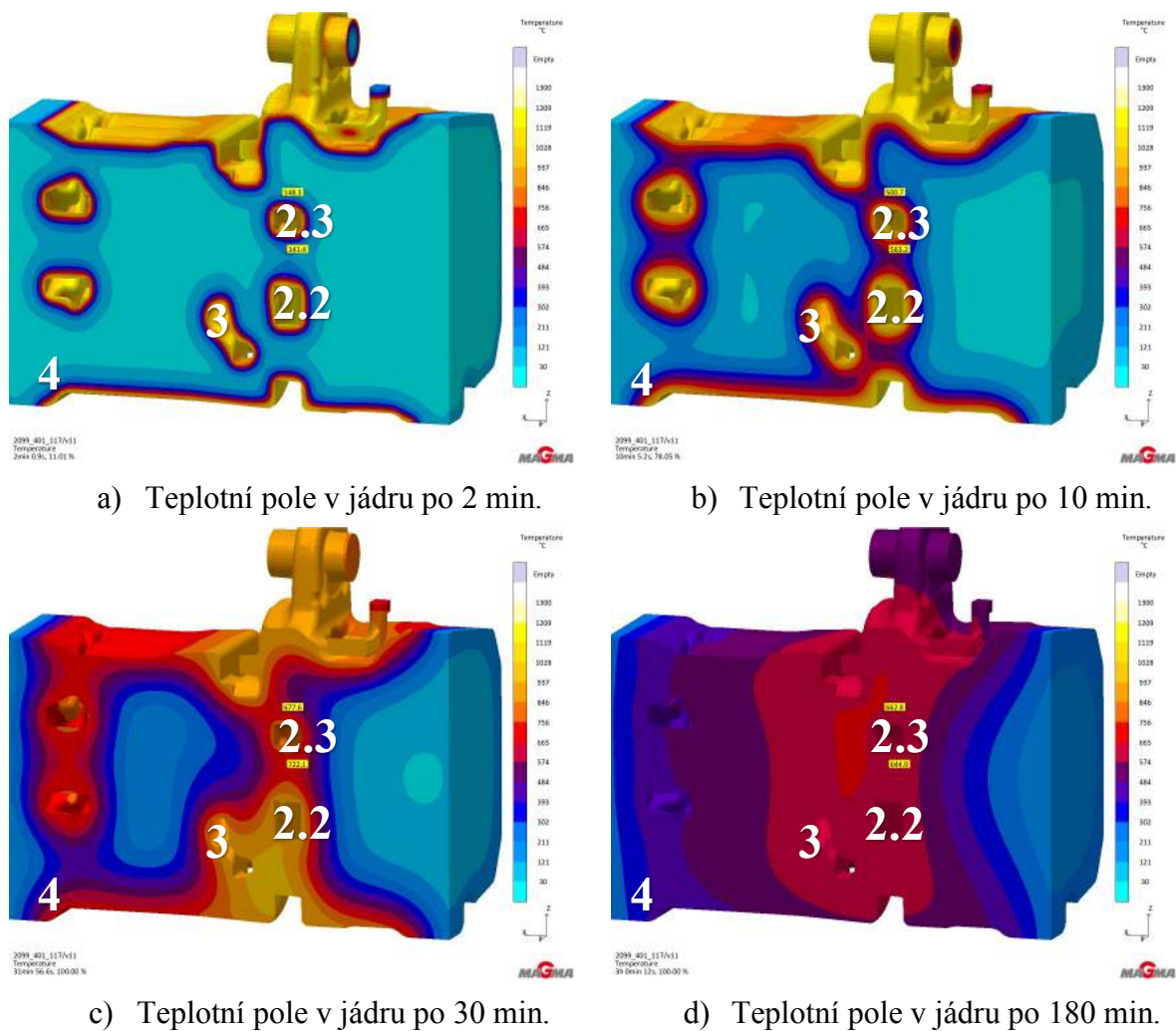


Ze snímků teplotního pole odlitku s vnitřním jádrem lze pozorovat postupné prohřívání jednotlivých oblastí a akumulace tepla uprostřed jádra v místech vnitřních příček odlitku. Porovnáme-li teplotní pole odlitku na začátku tuhnutí (po skončení lití, obr. 51) se snímkem po 180 minutách (vytloukání, tab. 16), lze pozorovat přesun teplotního pole od vtokové soustavy k protější straně. Z důvodu polohy příček v těsné blízkosti u sebe dochází k prohřátí okolní oblasti a spojení teplotního pole, které se chová jako jedna velmi pomalu chladnoucí tlustá stěna odlitku. K největší akumulaci tepla dochází v místě tenké příčky (A2.1), ve které dochází k rychlému ztuhnutí ale pomalému chladnutí. Toto se projevilo na mechanických vlastnostech (A2.1  $R_m=286$  MPa, HB=198) Srovnáme-li místo A2.1 s místem nacházejícím se v límci odlitku (A1, A4), hodnoty pevnosti jsou podobné, ale tvrdost se významně liší a to až o 30HB (A1:  $R_m = 288$ MPa, HB = 230). Toto lze také pozorovat na snímcích struktury (obr.43 a 44).



Obr. 51 Teplotní pole odlitků na konci lití

S průběhem teplotních křivek korelují snímky teplotního pole vnitřních jader (obr. 52) v jednotlivých časech v řezu jader, které tvoří příčky a dutinu odlitku. Na jednotlivých snímcích jsou také vyznačena zkoumaná místa, kterými řez prochází.



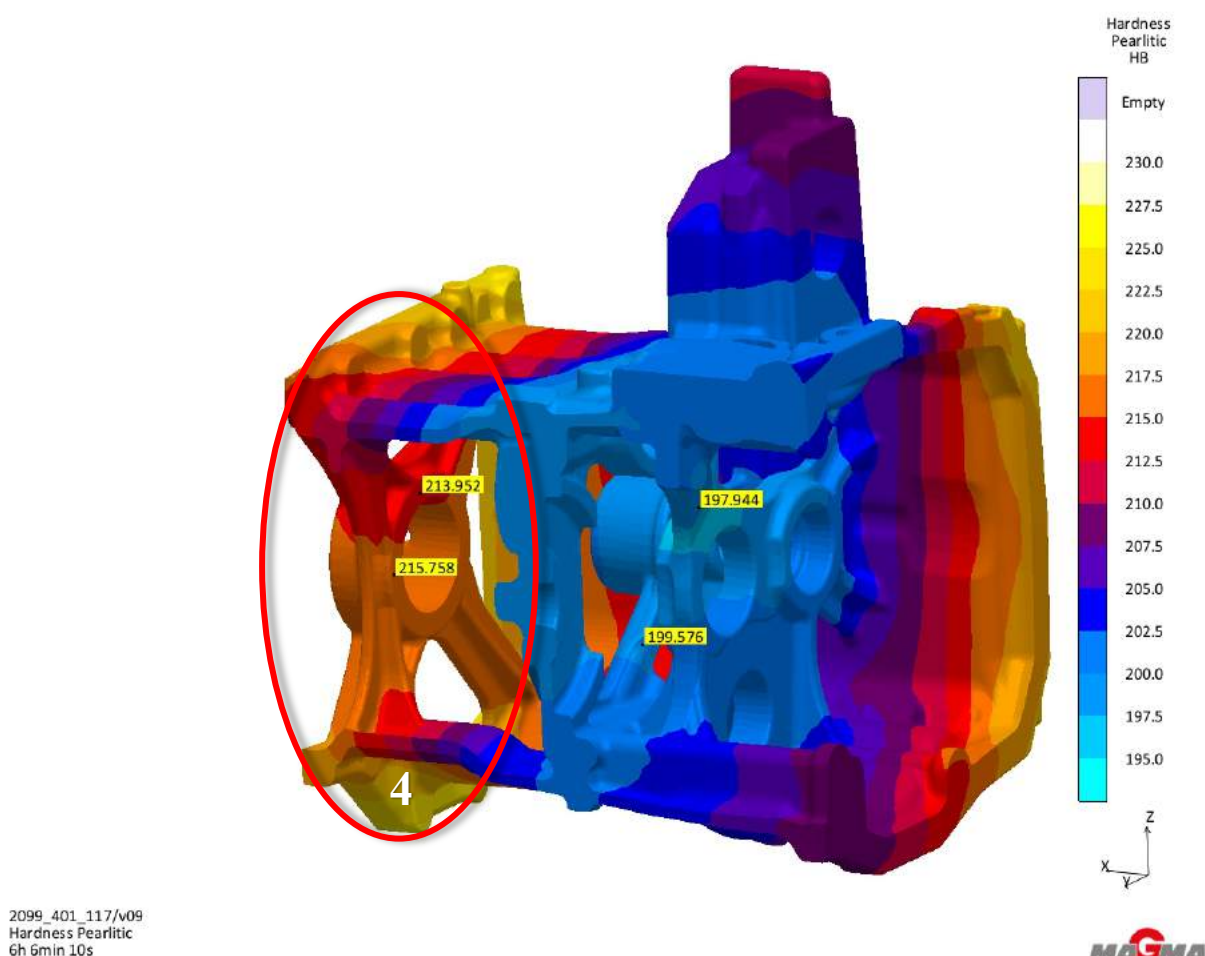
Obr. 52 Řez teplotním polem jádra v průběhu tuhnutí a ochlazování



Z technologického postupu výroby odlitků v kapitole 4.2 je známo, že odlitky se nachází ve formě 2-3 hodiny po odlití (simulace počítá se 3 hod). Někdy ale dochází ke značně delšímu setrvání odlitků ve formě (12 a více hod). Tato nestejnorodost v technologickém postupu může zásadně ovlivňovat výsledné mechanické vlastnosti, zejména tvrdost LLG, která je definovaná kovovou maticí, vznikající v důsledku rychlosti ochlazování při eutektoidní teplotě. Obrázek 52d zachycuje teplotu jádra při vytloukání, která má ve středových místech stále teplotu kolem 680 °C. Teplota samotných příček v odlitku je ještě vyšší (viz křivky ochlazování).

Při předpokladu, že odlitek je z formy odstraněn po 2 hodinách, může být teplota odlitku v některých místech stále ještě nad eutektoidní teplotou. Následné ochlazení na vzduchu způsobí rychlou překrystalizaci a vznik jemnější perlitické struktury. Na druhou stranu, pokud odlitek setrvá ve formě delší dobu (např. celý víkend), průběh chladnutí se značně prodlužuje. Tímto může vznikat hrubá ferito-perlitická struktura s většími mezilamelárními vzdálenostmi perlitu a nižšími mechanickými vlastnostmi (obr. 53).

Rozdílnost v mechanických vlastnostech v rámci odlitku typu A, způsobených rozdílnými teplotními podmínkami při chladnutí v rámci odlitku zachycuje obrázek 53, kde poslední příčka v úrovni zkoumaného místa A4 má značně vyšší tvrdost oproti vnitřním příčkám. Tento fakt lze pozorovat na rozdílnosti teplotního pole v jádru na obrázku 52d.



Obr. 53 Tvrdost podle Brinella zadní příčky v místě A4

#### 4.5.4 Mechanické vlastnosti vyhodnocené pomocí MAGMA<sup>5</sup>

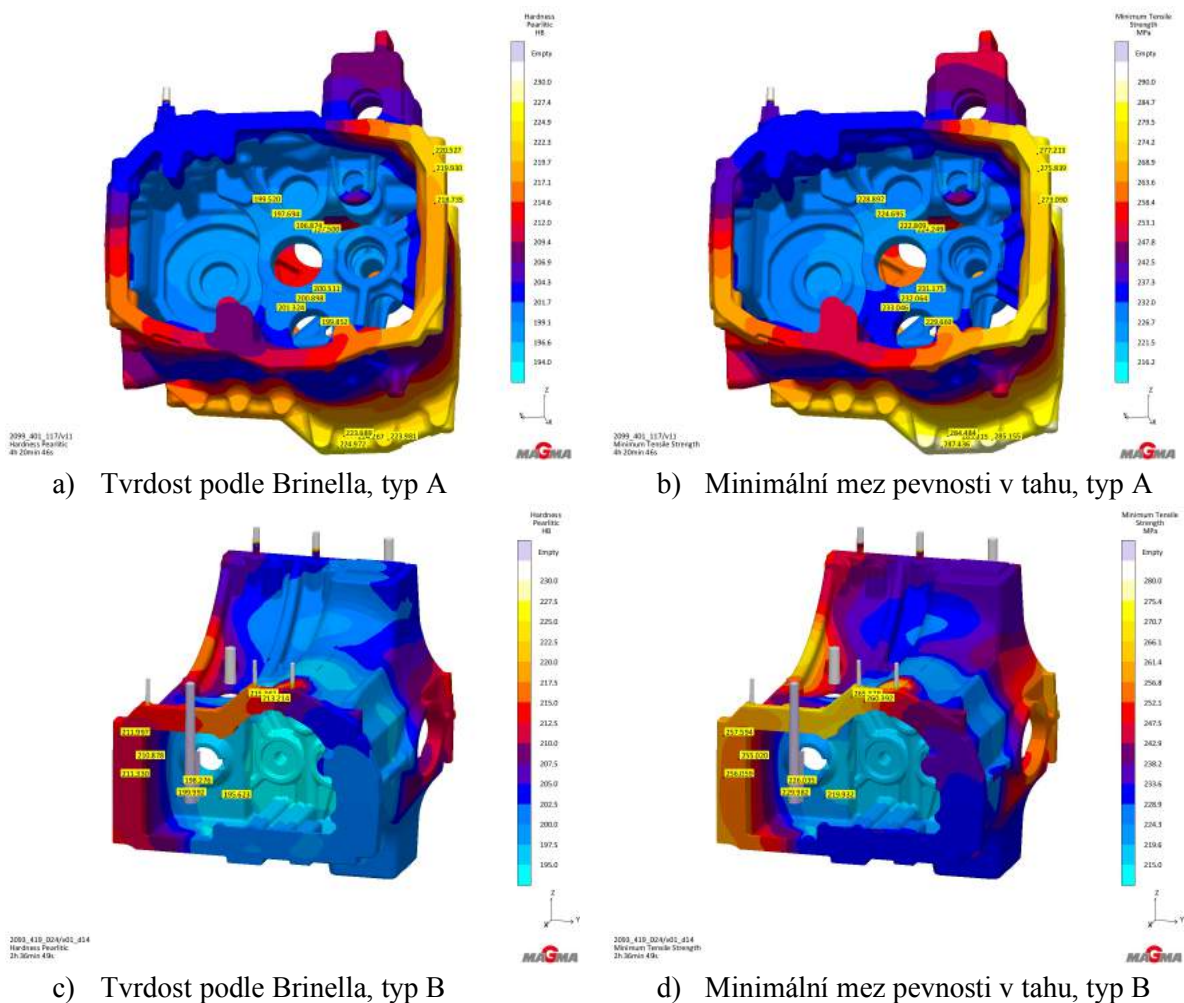
Poslední krok při analýze simulace je zaměřen na zhodnocení vypočtených mechanických vlastností. Jak již bylo zmíněno v teoretické části, týkající se simulačního softwaru, hlavní faktory, na základě, kterých software MAGMA<sup>5</sup> predikuje mechanické vlastnosti, jsou:

- Chemické složení taveniny (obr.45 a 47)
- Lokální rychlosti ochlazování při teplotě eutektoidní přeměny (obr. 48)
- Vzdálenosti perlitických lamel

Teplotní režim tuhnutí a vliv chemického složení byl popsán v předchozích kapitolách. Faktor vzdáleností perlitických lamel reálné struktury je prvek, který je obtížně hodnocen z ohledu na objektivnost výsledků. Proto nebyl hodnocen v praktické části a nebyl porovnáván s výsledky lamelární vzdálenosti ze simulace. Z tohoto důvodu také nejsou prezentovány výsledky vzdálenost perlitických lamel vyhodnocených simulaci.

##### ➤ Simulovaná tvrdost podle Brinella

Při hodnocení mechanických vlastností MAGMA<sup>5</sup> počítá parametr zvaný perlitická tvrdost, což je tvrdost podle Brinella, a to za předpokladu, že struktura matrice je plně perlitická. Výsledky tvrdosti odlitků typu A a B, vyhodnocené softwarem, jsou na obrázku 54a, 54c. Odečtené hodnoty pro jednotlivé hodnocené místa byly zapsány do tabulky 17 a 18.



Obr. 54 Výsledky mechanických vlastností ze simulace odlitku typu A a B

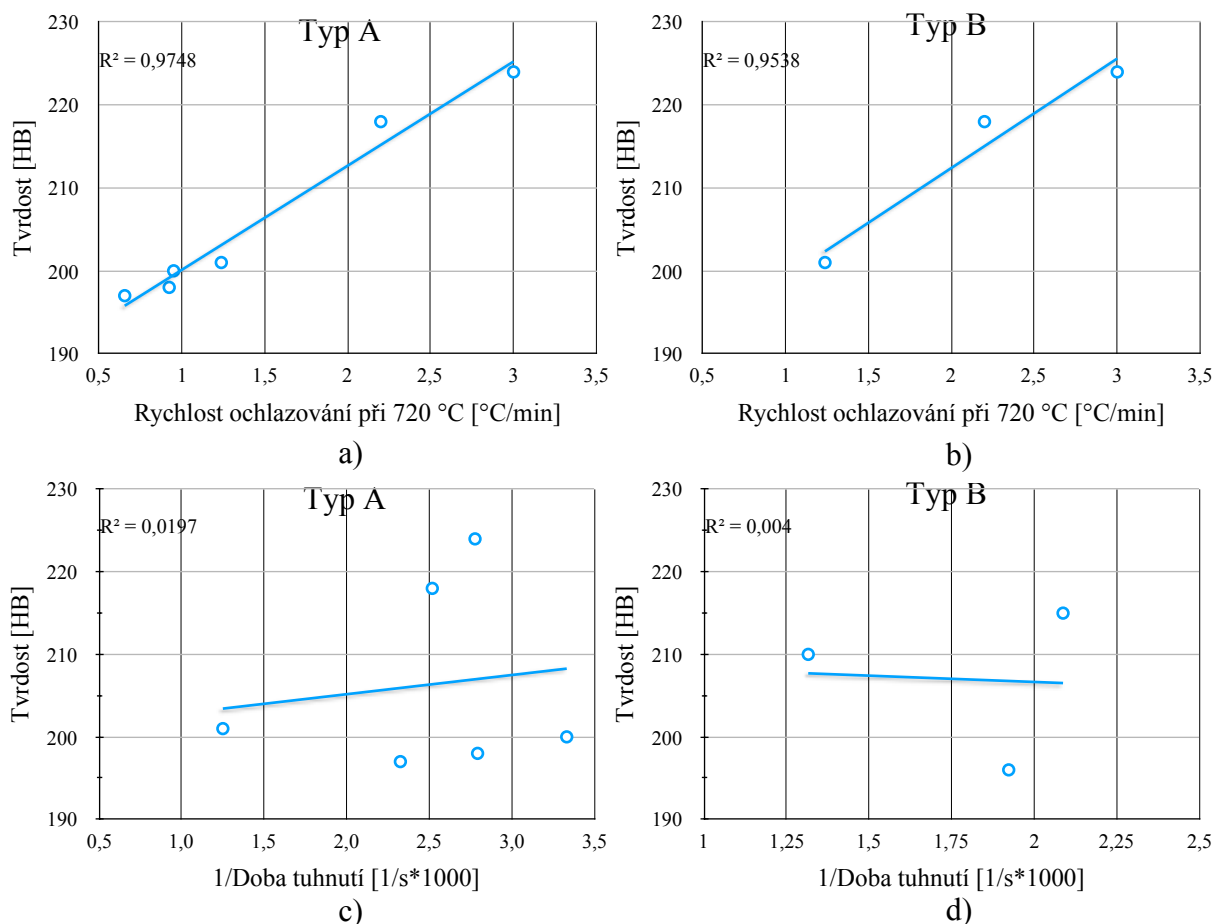
Tab. 17 Simulované hodnoty mechanických vlastností v odlitku typu A

Místo v odlitku	A1	A2.1	A2.2	A2.3	A3	A4
Tloušťka stěny [mm]	42	18	36	23	28	30
Tvrdość [HB]	219	198	201	197	200	224
Pevnosť [MPa]	273	226	232	223	229	286

Tab. 18 Simulované hodnoty mechanických vlastností v odlitku typu B

Místo v odlitku	B1	B2	B3
Tloušťka stěny [mm]	39	27	11
Tvrdość [HB]	210	215	196
Pevnosť [MPa]	253	265	230

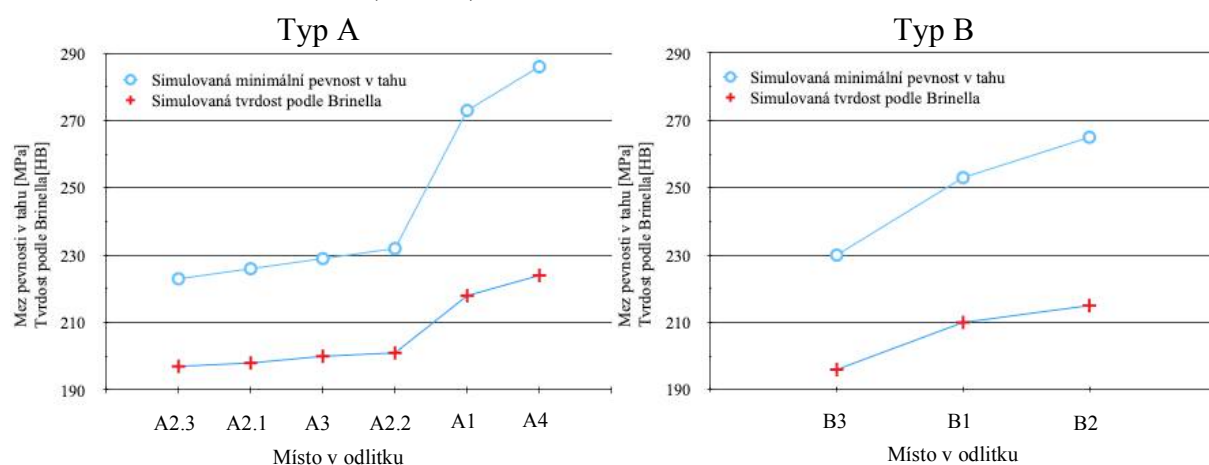
Z odečtených hodnot tvrdosti ze simulace a časových údajů převzatých z křivek tuhnutí, byly vytvořeny grafy na obrázku 55. Grafy vyjadřují korelaci mezi dobou tuhnutí/rychlostí ochlazování a tvrdostí obou typů odlitků. Grafy a) a b) zobrazují tvrdost vynesenu proti simulované rychlosti ochlazování při 720 °C, která je považována za kritérium rychlosti transformace perlitu. Jak lze vidět, v tomto případě existuje jasná lineární závislost. Na druhou stranu grafy c) a d) vyjadřují závislost mezi tvrdostí a dobou tuhnutí (vyjádřeno jako 1/doba tuhnutí \* 1000). V tomto případě nelze pozorovat žádnou závislost. Z tohoto vyplývá, že tvrdost vypočtena v simulaci je pouze závislá na chladnutí a nijak nezávisí na tuhnutí.



Obr. 55 Závislost mezi tvrdostí a dobou tuhnutí/ rychlostí ochlazování

### ➤ Simulovaná minimální pevnost v tahu

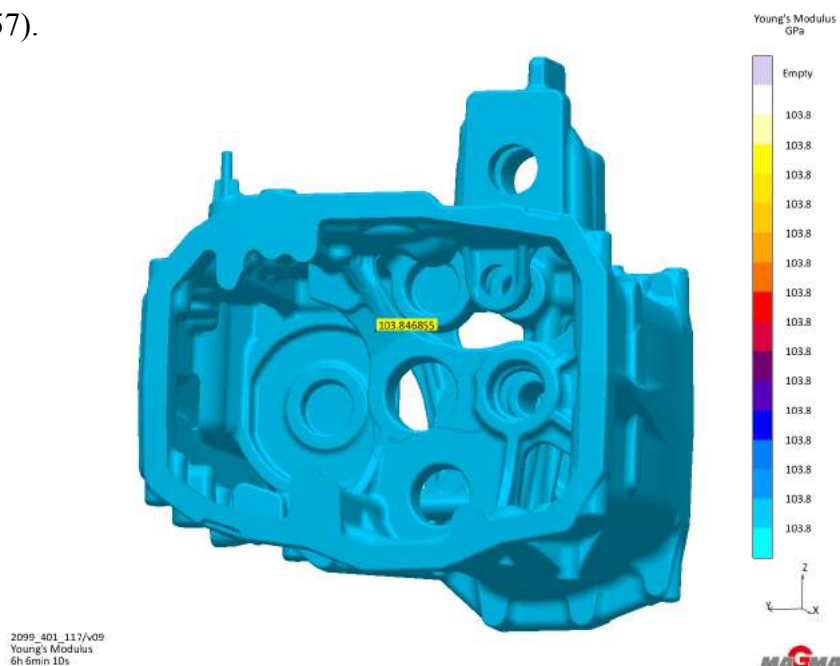
Další mechanická vlastnost, kterou software počítá, je mez pevnosti v tahu (obr. 54b, 54d). Na začátku této podkapitoly byly popsány faktory, na základě, kterých MAGMA<sup>5</sup> počítá mechanické vlastnosti. Avšak tyto faktory se týkají hlavně výpočtu tvrdosti. Hodnoty meze pevnosti program nepočítá samostatně, ale pouze dopočítává z vypočtené tvrdosti na základě nám neznámého vztahu. MAGMA<sup>5</sup> tedy počítá pevnost v tahu jako funkci tvrdosti. Tuto závislost zobrazují grafy (obr. 56), které zachycují vývojový trend mezi tvrdostí a pevností v tahu. V grafu lze pozorovat, že se vzrůstající tvrdostí úměrně roste i pevnost v tahu. Toto nasvědčuje o přepočtu tvrdosti na pevnost. Z tohoto důvodu reálné výsledky pevnosti a simulované se značně liší (obr. 58).



Obr. 56 Přepočet tvrdosti na pevnost v odlitku typu A a B

### ➤ Youngův modul pružnosti

Poslední mechanická vlastnost, kterou vyhodnocuje MAGMA<sup>5</sup> pro LLG, je Youngův modul pružnosti v tahu. Vzhledem k tomu, že pro litinu s lupínkovým grafitem MAGMA<sup>5</sup> nepředpokládá růst feritu, software hodnotí modul jako konstantní v celém průřezu odlitku (obr. 57).



Obr. 57 Youngův modul pružnosti

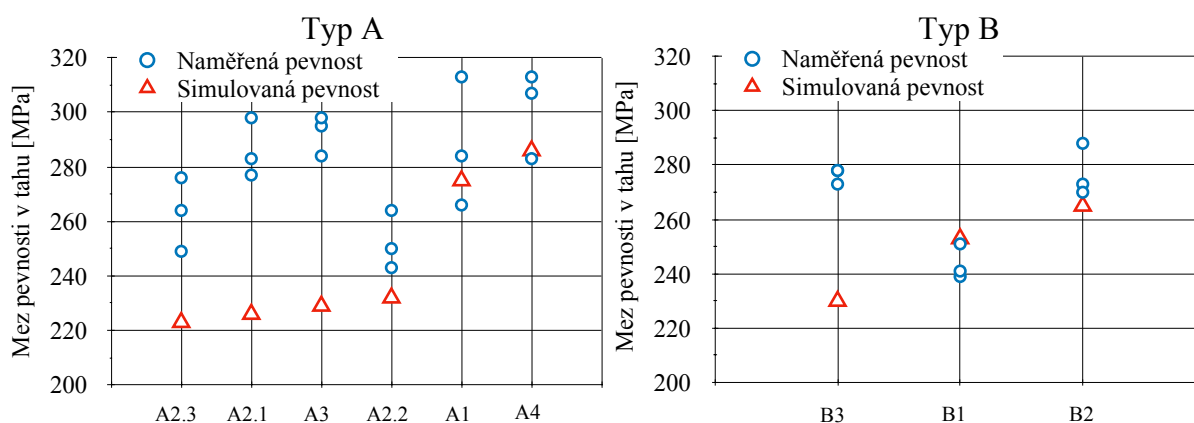
## 4.6 Posouzení míry shody reálných a simulovaných mechanických vlastností

Tato kapitola je věnovaná shrnutí a posouzení míry shody mezi experimentálně naměřenými mechanickými vlastnostmi a hodnotami mechanických vlastností, vyhodnocených pomocí slévárenského simulačního softwaru MAGMA<sup>5</sup>.

Naměřené hodnoty pevnosti (tab. 12 str. 55) a tvrdosti (příloha 2) jednotlivých typů odlitků byly porovnávány s hodnotami ze simulace (tab. 17 a 18) v grafech na obrázcích 58 a 60.

### ➤ Naměřená vs. simulovaná pevnost v tahu odlitků typu A a B

Z předchozí kapitoly je známo, že minimální mez pevnosti v tahu, vyhodnocená simulačním softwarem, je odvozena z tvrdosti (obr. 56). Výpočet tvrdosti ve značné míře závisí pouze na rychlosti ochlazování při eutektoidní teplotě (obr. 55a, 55b). Na druhou stranu, definujícím parametrem pro pevnost v tahu není struktura kovové matrice, ale tvar a jemnost vyloučeného grafitu, respektive doba do konce eutektické přeměny. Z tohoto důvodu lze pozorovat značnou neshodu mezi simulovanými a měřenými hodnotami pevnosti (obr. 58). Toto lze pozorovat hlavně v místech vnitřních příček (A2.1, A2.3, A3, B3).



Obr. 58 Zhodnocení shody naměřených a simulovaných hodnot meze pevnosti v tahu

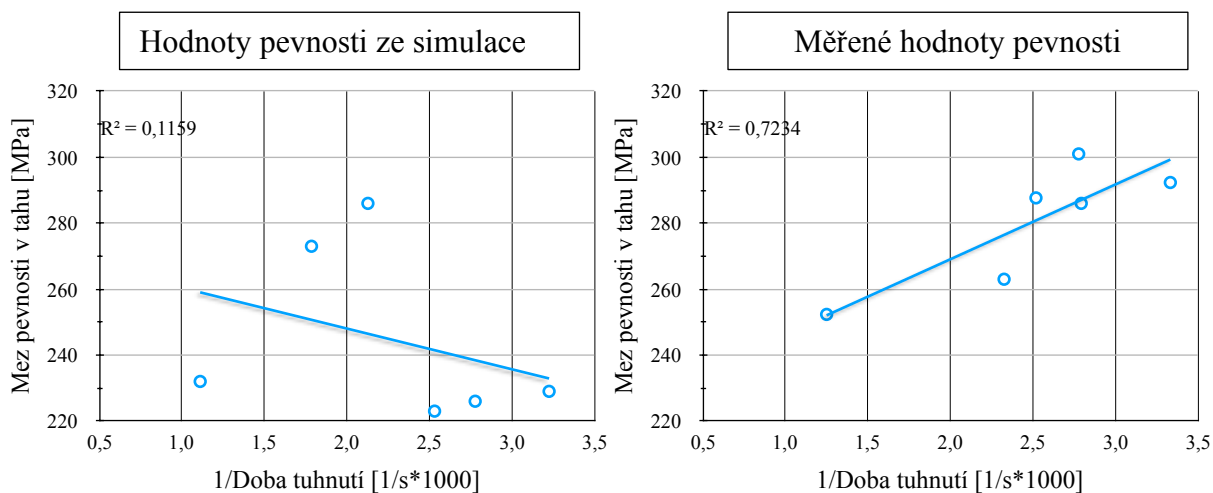
Místa A2.1 a A3 jsou tenké části vnitřních příček, kde dochází k rychlému ztuhnutí a následnému velmi pomalému ochlazování (obr. 48). Tyto části se nachází mezi jádry v místech největší koncentrace tepla při ochlazování (tab. 16). Jestliže pevnost v simulačním softwaru je odvozena z tvrdosti (obr. 56) závisle na době ochlazování nelze očekávat vysokou pevnost hodnocenou simulačním softwarem v těchto místech. Z tohoto důvodu je rozdíl v pevnosti mezi simulací a realitou v těchto místech největší.

Na druhou stranu, místa A1, A4, B1 a B2 tuhnou a ochlazují se stejnoměrněji a nejsou v prohrátých oblastech formy nebo jader. Z tohoto důvodu simulace predikuje pevnost přesněji protože i samotná tvrdost v těchto místech je vyšší.

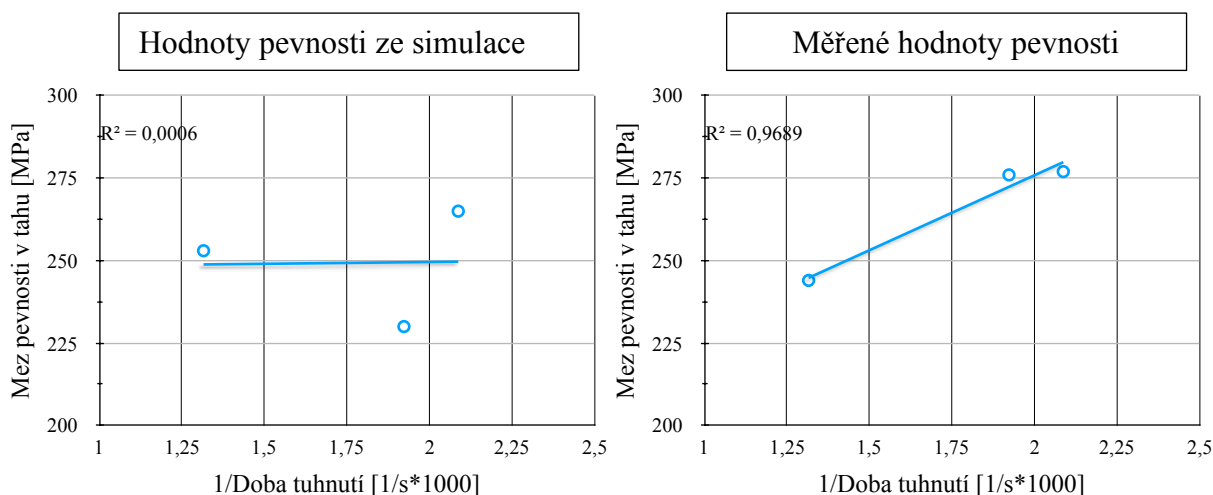
Místo A2.2 je oproti tomu na pomezí těchto dvou případů. Z křivek ochlazování (obr. 48) lze pozorovat podobný trend v průběhu tuhnutí a ochlazování jako v místech (A1, A4, B1 a B2), avšak tuhnutí v tomto místě oproti ostatním místům z vnitřních příček je nejdelší. Jedná se totiž o tlustou průtočnou oblast. Z důvodu dlouhé doby tuhnutí a pomalé rychlosti ochlazování jsou reálné hodnoty pevnosti a tvrdosti nízké. Proto simulace při predikování pevnosti se přiblížila v tomto místě nejbližše ze všech vnitřních příček.



Rozdílnost závislosti simulované pevnosti a měřených hodnot na době tuhnutí, zobrazují grafy na obrázku 59 a 60. Z levých grafu lze vidět, že mezi simulovanými pevnostmi a dobou tuhnutí není žádná závislost. Na druhou stranu z výsledků měřených pevností (z tab. 12) odlitků typu A a B, lze pozorovat korelaci mezi pevností a dobou tuhnutí. Z tohoto vyplývá, že výpočet pevnosti v simulačním softwaru pouze na základě tvrdosti není správný. Z uvedených grafu lze vyvodit, že měřené hodnoty pevnost v tahu korelují s dobou tuhnutí (eutektické krystalizaci) kterou simulační software nezohledňuje.



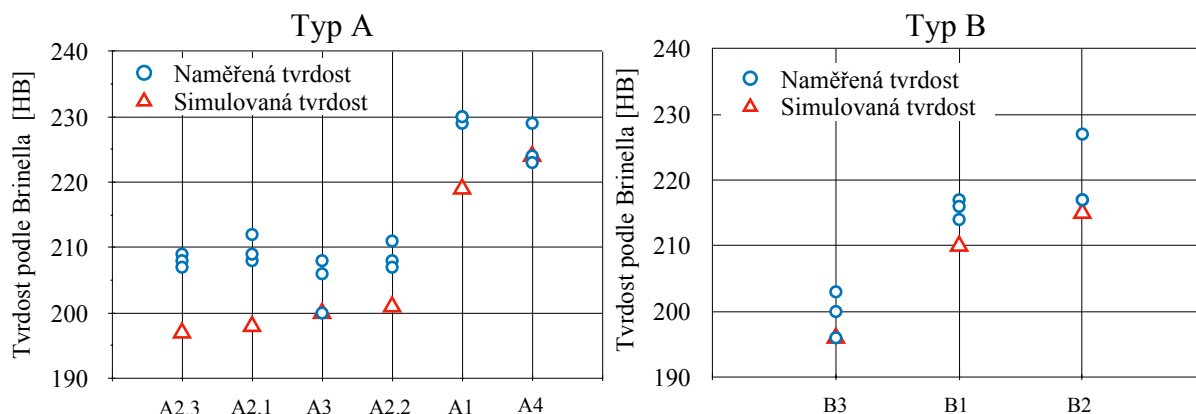
Obr. 59 Korelace mezi dobou tuhnutí a mezi pevnosti v tahu odlitku typu A



Obr. 60 Korelace mezi dobou tuhnutí a mezi pevnosti v tahu odlitku typu B

### ➤ Naměřená vs. simulovaná tvrdost podle Brinella odlitků typu A a B

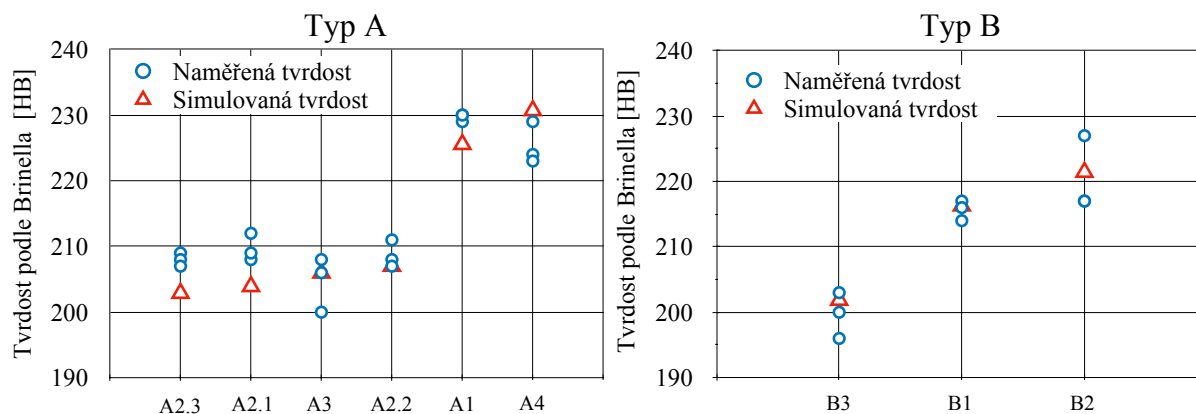
Na obrázku 61 lze pozorovat, že simulované hodnoty tvrdosti se nachází v blízkosti nebo přímo leží v intervalu měřených hodnot. Toto svědčí o korektnosti výpočetního algoritmu v simulačním softwaru. Z hodnot tvrdosti v grafu na obrázku 61 bylo vypočteno, že průměrná odchylka simulace od měřených hodnot pro odlitek typ A činí 4 % a pro odlitek typ B činí 2 %.



Obr. 61 Zhodnocení shody naměřených a simulovaných hodnot tvrdosti podle Brinella

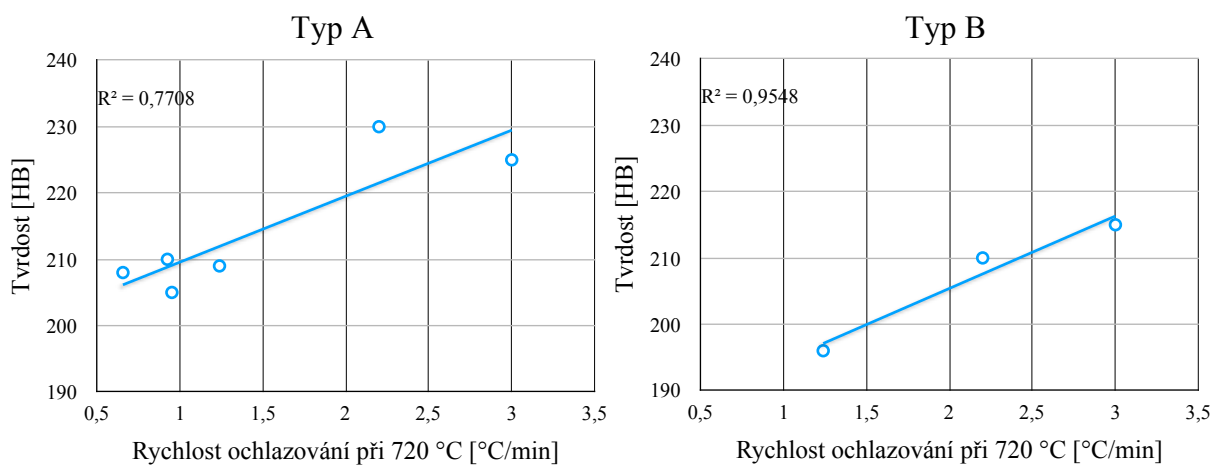
Z ohledu na specifický proces každé slévárny a také na nemožnost zohlednění všech faktorů v simulaci, MAGMA<sup>5</sup> poskytuje uživateli možnost použití tzv. uživatelského kritéria. To umožňuje specifické nastavení simulace tak, aby hodnocené výsledky korelovaly s realitou. Například, pokud slévárna ví, že MAGMA<sup>5</sup> vždycky vyhodnocuje tvrdost v odlitcích o 1-2 % HB méně, než ukazují experimentálně měřené hodnoty, lze do simulačního softwaru aplikovat uživatelské kritérium, které tyto hodnoty přiblíží realitě. Tímto kritériem může být nějaká funkce nebo koeficient kterým software automaticky násobí vypočtené tvrdosti.

V této práci bylo rovněž pro zpřesnění výsledků tvrdosti použito uživatelské kritérium. Na základě vypočtených hodnot odchylek simulace od reality byl aplikován koeficient 1,035. Výsledky hodnot tvrdosti při aplikaci uživatelského kritéria jsou zobrazeny v grafech na obrázku 62. Tento koeficient se jeví jako postačující. Slévárně bylo doporučeno rozšířit statistický soubor měřených hodnot pro více typů odlitků a ověření rozptylu těchto hodnot před aplikací koeficientu.



Obr. 62 Hodnoty tvrdosti odlitků A a B po aplikaci uživatelského kritéria

Nakonec byla ověřena závislost reálných měřených tvrdostí na rychlosti ochlazování při eutektoidní teplotě (720 °C). Z grafu na obrázku 63 lze vidět lineární závislost mezi těmito faktory u obou typů odlitků. Tyto výsledky se shodují s předpoklady Schmidovy [26] studie, o které pojednává kapitola 2.5.3.



Obr. 63 Závislost mezi tvrdostí a rychlostí ochlazování při teplotě 720 °C u odlitků typu A a B

## 5 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo porovnání a analýza reálných mechanických vlastností odlitků z litiny s lupínkovým grafitem s mechanickými vlastnostmi, vyhodnocenými pomocí numerické simulace v softwaru MAGMA<sup>5</sup>. Hodnocení mechanických vlastností bylo zaměřeno na tvrdost materiálu a mez pevnosti v tahu v různých částech odlitků.

Teoretická část práce byla věnovaná vlivům a parametrům definujícím, jaké mechanické vlastnosti lze očekávat v jednotlivých částech odlitku z litiny s lupínkovým grafitem. Také pojednává o faktorech, na které je potřeba se zaměřit při definování vstupních parametrů, okrajových podmínek a vyhodnocení simulace. Nabyté znalosti byly dále aplikovány při práci na experimentu a vyhodnocení výsledků s ohledem na cíl diplomové práce.

Na základě analýzy mechanických vlastností dvou typů skříňových odlitků vyplynulo, že simulační software MAGMA<sup>5</sup> se při výpočtu mechanických vlastností zaměřuje zejména na výpočet tvrdosti, ze kterého jsou následně dopočteny hodnoty meze pevnosti v tahu. Predikce tvrdosti v MAGMA<sup>5</sup> přímo koreluje s měřenými hodnotami. Dalo by se říct, že výpočetní algoritmus pro výpočet tvrdosti je bezchybný. Toto však nelze říct o predikovaných hodnotách meze pevnosti, které software hodnotí jako přepočtenou tvrdost.

Kvůli přepočtu tvrdosti na pevnost (obr. 56) software hodnotí, že v místech, kde jsou nižší tvrdosti, budou také nižší pevnosti. Toto však v reálných podmínkách neplatí. Z měřených výsledků (kap. 4.3.3) se totiž ukázalo, že vnitřní příčky nacházející se mezi jádry, mají hodnoty pevnosti podobné jako límec odlitku, ale hodnoty tvrdosti jsou značně nižší než ve zbytku odlitku (obr. 40). Toto vedlo k hlubší analýze teplotního režimu tuhnutí a chladnutí v daných částech odlitků (tab. 16).

Mechanické vlastnosti zkušebních geometrií v tradičních výzkumech jsou často vztaženy pouze k tloušťce stěny. Tímto však dochází ke spojení doby tuhnutí a rychlosti chlazení, což činí potíže tyto dva parametry rozlišit. Na základě zhodnocených parametrů se tyto dva parametry v případě této diplomové práce lišily. Z výše uvedených výsledků je tedy možné vyvodit dva důležité závěry:

1. Tvrdost závisí především na rychlosti ochlazování během perlitické transformace a výsledné jemnosti perlitu (obr. 63 a 55).
2. Pevnost v tahu závisí především na době tuhnutí a výsledné jemnosti grafitu (obr. 59 a 60).

Na základě výsledků této práce bylo vývojovému centru MAGMA GmbH doporučeno zhodnotit způsob výpočtu meze pevnosti v simulačním softwaru MAGMA<sup>5</sup>. Z perspektivy budoucnosti je potřeba provést hlubší analýzu na větším množství vzorků pro potvrzení závislosti (závěr 1. a 2.), které vyplynuly z této práce.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. PLUHAŘ, Jaroslav. *Nauka o materiálech*. Praha: SNTL, 1989, 552 s.
2. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. : il. ; 25 cm. ISBN 8072042483.
3. PODRÁBSKÝ, Tomáš a Simona POSPIŠILOVÁ. *Struktura a vlastnosti grafitických litin* [online].2006, poslední revize 16.11.2006 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/savgl/index.php?chapter=1>
4. ZIELIŃSKI, Adam. Fe-C-graphite-cs.svg. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-03-23].
5. SKOČOVSKÝ, Petr; PODRÁBSKÝ, Tomáš . *Grafitické liatiny*. 1.vydanie. žilina : Edis, 2005. 168 s. ISBN 80-8070-390-6.
6. OTÁHAL, Vlastislav. *Šedá litina*. Brno: [s.n.], 2006.
7. ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie litin*. Brno: PC-DIR, 1998, 166 s. : il. ISBN 8021412631.
8. PLUHAŘ, Jaroslav a Josef KORITTA. *Strojírenské materiály*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966. ISBN 80-05-00092-8.
9. E. Fras, M. Gorny and H. Lopez, "Eutectic cell and nodule count in grey and nodular cast irons," *Materials Science and Technology*, vol. 23, no. 9, p. 1109 , 2007. dostupne z: <http://www.afe.polsl.pl/index.php/pl/450/eutectic-cell-and-nodule-count-as-the-quality-factors-of-cast-iron.pdf>
10. OTÁHAL, V. *Jakostní litiny - litina s lupínkovým grafitem monografie*, OtáhalConsult, CD 79s. 2010
11. MOUMENI, Elham. *Solidification of cast iron - A study on the effect of microalloy elements on cast iron*. Department of Mechanical Engineering, 2013. Disertační práce. Technical University of Denmark. Vedoucí práce Prof. Jesper J. Hattel.
12. *Physical Metallurgy EBB222: Cast Irons* [online]. In: . [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: <https://slideplayer.com/slide/10251432/>
13. *MEDUNA: Sferoidizační žíhání* [online]. [cit. 2019-02-21]. Dostupné z: <http://www.kalirna.cz/cz/sluzby/item/13-sferoidizacni-zihani.html>
14. PÍŠEK, František a Adolf PLEŠINGER. *Slévárenství I: Obecná část*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1974. ISBN 04-209-74.
15. BATES, C.E., "Alloy Element Effects on Gray Iron Properties: Part II," *AFS Transactions*, 94 (1986), 889-912.
16. DAVIS, J. R. *Classification and basic metallurgy of cast irons*. American Society of Metals. ASM specialty handbook cast iron. Illinois: ASTM, 1996, 4-17.
17. FREDRIKSSON, H. a U. ÅKERLIND. Structure and structure formation in cast materials. *Materials processing during castin*, Wiley, 2006, pp. 150-2.
18. KRAUSE, D. E., "Gray Iron-A Unique Engineering Material" Gray, Ductile, and Malleable Iron Castings-Current Capabilities, ASTM STP 455, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1969, pp. 3-28.

19. RÖHRIG, Klaus. a D. WOLTERS. *Legiertes Gusseisen - Band 1: Gusseisen mit Lamellengraphit und karbidisches Gusseisen*. Düsseldorf: Giesserei-Verl., 1970-.
20. VONDRÁK, V. HAMPL, J. a HANUS, J. *Metalurgie litin: Mimopecní zpracování roztavené litiny (očkování, modifikace)*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2005. ISBN 80-248-0777-7.
21. SKALAND, T., ONSOEN, M.I. a RIPOSAN, I. *Complex (Mn, X)S compounds - major sites for graphitenucleation in greycast iron*. Transactions AFS. s. 1151-1162.
22. ČSN EN 1561. *Slévárenství – Litiny s lupínkovým grafitem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
23. SAMUELSSON, David. *Analysis of microstructural strain-fields in gray cast iron*. Goteborg, Sweden, 2011. Diploma work. Chalmers University of Technology.
24. FOURLAKIDIS, Vasilios. *Dendritic Morphology and Ultimate Tensile Strength of Pearlitic Lamellar Graphite Iron* [online]. Jönköping, 2019 [cit. 2019-04-22]. ISBN 978-91-87289-40-8. Dostupné z: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1293214/FULLTEXT01.pdf>. Disertační práce. Jönköping University.
25. GÓRNY, M. Eutectic cell and nodule count as the quality factors of cast iron. *ARCHIVES of FOUNDRY ENGINEERING*[online]. 2008, 3/2008(volume 8), 53-58 [cit. 2019-03-18]. ISSN 1897-3310. Dostupné z: <http://www.afe.polsl.pl/index.php/pl/450/eutectic-cell-and-nodule-count-as-the-quality-factors-of-cast-iron.pdf>
26. SCHMIDT, Pál. Correlation between Solidification Time and Cooling Rate, Microstructure and Tensile Strength of a Low Alloyed Grey Cast Iron. *Materials Science Forum*. 2018, (925), 257-263. ISSN 1662-9752.
27. EDBOM, Sebastian. *Determination of mechanical properties in CGI - cylinder blocks by experiment and simulation* [online]. Stockholm, 2014 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:867032/FULLTEXT01.pdf>. KTH Engineering Sciences.
28. JELÍNEK, David. *Racionalizace výroby odlitku tělesa koníku*. Praha, 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Aleš Herman, PhD.
29. RAVI, D. B. *Casting Simulation - Best Practices*, in IFC, Ahmedabad, 2010.
30. VODIČKA, Vít. *Přehled a vývoj CFD metod* [online]. Brno, 2011 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=38737](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=38737). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
31. FILIPEK, Szymon. *Predikce mechanických vlastností litinových odlitků pomocí numerické simulace*. Brno, 2017. 46s, 3 příloh, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor Slévárenství. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1: Materiálový list k odlitku A a B

Příloha 2: Numerické výsledky experimentálního měření tvrdosti

Příloha 3: Výsledky měření pevnosti v tahu ZWICK/ROELL Z250

Příloha 4: Metalografické snímky struktury odlitku typu A a B