

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojírenství  
Studijní zaměření: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Litina s lupínkovým grafitem se zvýšenou tvrdostí

Autor: **Martin SKOPEC**  
Vedoucí práce: **Ing. Josef Odehnal, Ph.D.**

Akademický rok 2017/2018

### **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

**V Plzni dne:** .....

.....  
**podpis autora**

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Josefu Odehnalovi, Ph.D. za vedení mé práce, za pomoc, poskytnuté rady, za veškerý čas a trpělivost, které pomohli k vytvoření této práce. Dále bych chtěl poděkovat konzultantovi panu Ing. Josefu Jakobovi, za poskytnuté konzultace.

# ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Skopec	<b>Jméno</b> Martin	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	„Materiáloví inženýrství a strojírenská metalurgie“		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Odehnal Ph.D.	<b>Jméno</b> Josef	
<b>PRACOVÍŠTĚ</b>	ZČU - FST - KMM		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Litina s lupínkovým grafitem se zvýšenou tvrdostí		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KMM	<b>ROK ODEVZD.</b>	2018
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	46	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	46	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	
---------------	----	---------------------	----	----------------------	--

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Cílem práce je analyzovat rozložení tvrdosti v průřezu a po délce odlitku, dále analyzovat pevnost v tahu mikrostrukturu u materiálu typu LLG. Následně ze získaných hodnot navrhnout takové chemické složení, které by vedlo ke splnění požadovaných mechanických vlastností a to bez nutnosti tepelného zpracování.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p style="text-align: center;">LLG, zkoušky tvrdosti, equotip, chemické složení, legující prvky, simulace</p>

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Martin	Name Skopec		
<b>FIELD OF STUDY</b>	„Department of Material Science and Technology“			
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Odehnal Ph.D	Name Josef		
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKS			
<b>TYPE OF WORK</b>	<del>DIPLOMA</del>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>	
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Grey cast iron with increase hardness			

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KMM	<b>SUBMITTED IN</b>	2018
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	46	<b>TEXT PART</b>	46	<b>GRAPHICAL PART</b>	
----------------	----	------------------	----	-----------------------	--

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The aim of this bachelor thesis is to analyze the hardness distribution cross all cast, tensile strength, mikrostruktura and chemical structure of grey cast iron. Next point is to propose chemical structure, which is able to not use heat treatment.
<b>KEY WORDS</b>	Grey cast iron, testing of hardness, equotip, chemical struktura, alloy steel members

## Obsah

1	Úvod do řešené problematiky .....	2
2	Litiny s lupínkovým grafitem .....	2
3	Proces tavení litiny s lupínkovým grafitem .....	4
3.1	Vsázka .....	4
3.2	Tavicí agregát - Elektrická indukční pec .....	5
3.3	Očkování .....	6
4	Nukleace, vznik zárodků .....	8
4.1	Krystalizace primárního austenitu.....	8
4.2	Krystalizace grafitického eutektika.....	9
4.3	Fázové přeměny v tuhém stavu – překrystalizace.....	10
5	Zvyšování mechanických vlastností .....	11
5.1	Vliv legujících prvků.....	11
5.2	Tepelné zpracování .....	14
6	Zkoušky mechanických vlastností .....	15
6.1	Zkoušky tvrdosti.....	15
6.1.1	Zkouška tvrdosti dle Brinella .....	16
6.1.2	Zkouška tvrdosti Equotipem.....	17
6.2	Zkouška pevnosti v tahu.....	19
7	Úvod do experimentální části .....	21
8	Zkoušky mechanických vlastností .....	22
8.1	Zkoušky tvrdosti v příčném průřezu odlitku .....	22
8.1.1	Měření pro odlitek V1 .....	23
8.1.2	Měření pro odlitek V2 .....	25
8.2	Zkouška tvrdosti v podélném průřezu odlitku .....	26
8.2.1	Měření pro odlitek V1 .....	26
8.2.2	Měření pro odlitek V2 .....	30
8.3	Analýza meze pevnosti .....	33
9	Rozbor chemického složení a mikrostruktury odlitků V1 a V2 .....	35
9.1	Chemické složení odlitků V1 a V2 .....	35
9.2	Rozbor mikrostruktury .....	36
9.2.1	Mikrostruktura odlitku V1.....	36
9.2.2	Mikrostruktura odlitku V2.....	38
10	Simulace tvrdosti odlitku se změnou chemického složení.....	39
10.1	Simulace tvrdosti .....	40
10.2	Simulace pevnosti v tahu.....	42
11	Závěr .....	44
12	Použité zdroje.....	45

## 1 Úvod do řešení problematiky

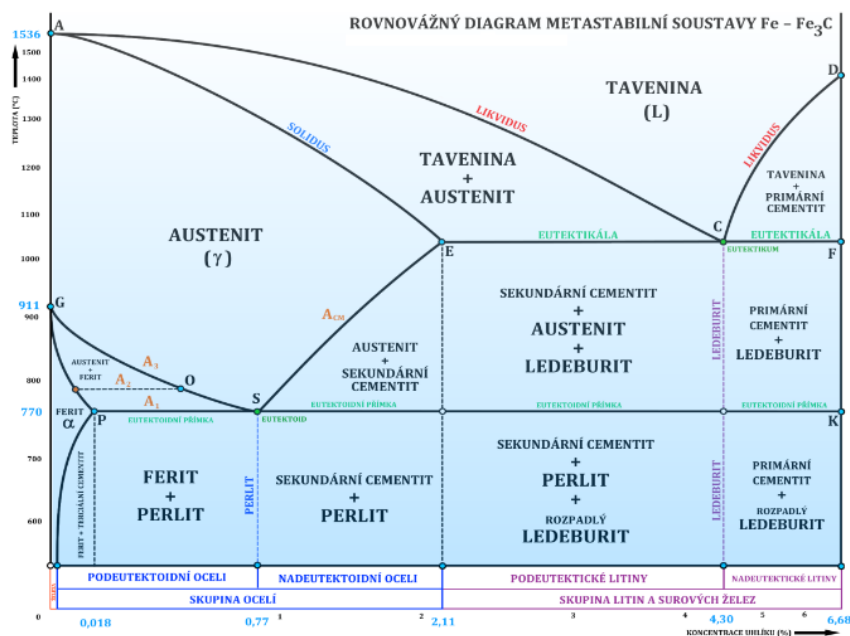
Bakalářská práce se zaměřuje na možnosti zvyšování tvrdosti legované litiny s lupínkovým grafitem (LLG) pomocí legujících prvků bez nutnosti tepelného zpracování při dodržení technického požadavku a dosažení tvrdosti 240-280 HB.

V první části bude proveden teoretický rozbor LLG a její způsob výroby. Dále bude proveden rozbor možností zvyšování tvrdosti za pomoci legujících prvků a tepelného zpracování. V závěru teoretické části budou popsány mechanické zkoušky, které se použijí v experimentu.

V praktické části práce budou provedeny samotné zkoušky tvrdosti pomocí equotipu a stacionárního tvrdoměru. Dále bude hodnocena dosažená mez pevnosti po zkoušce tahem. Pro získání informací o vlivu legujících prvků na mechanické vlastnosti litiny s lupínkovým grafitem se provede matematická simulace.

## 2 Litiny s lupínkovým grafitem

Litiny jsou slitiny železa, uhlíku a dalších prvků jako jsou např. mangan, fosfor, síra a další, v nichž obsah uhlíku převyšuje jeho mezní rozpustnost v austenitu [1]. U litin dochází ke krystalizaci podle metastabilního diagramu Fe-Fe<sub>3</sub>C, nebo stabilního diagramu Fe-C.



Obr. 1 Rovnovážný diagram železo-uhlík Fe-Fe<sub>3</sub>C [2]

Samotná struktura litiny je tvořena primární fází a eutektikem, která je závislá na druhu krystalizace. Při krystalizaci dle stabilní soustavy Fe-C vzniká grafitické eutektikum, které je tvořeno austenitem a uhlíkem, vyloučeným v některých z forem grafitu. Tyto litiny se nazývají litiny grafitické [3].

Při tuhnutí podle metastabilní soustavy Fe-Fe<sub>3</sub>C je eutektikum Ledeburit, viz obr.1. V této struktuře se nenachází volný grafit a tyto litiny se nazývají bílé, nebo karbidické [3]. Grafit se při tuhnutí může vylučovat v několika různých formách, podle kterých je litina dělena. Litiny se dle vyloučeného grafitu rozdělují na litiny s červíkovým grafitem, temperované litiny s vločkovým grafitem, litiny s kuličkovým grafitem a litiny s lupínkovým grafitem.

Bakalářská práce se zabývá pouze litinou s lupínkovým grafitem, proto následující odstavce teoretické části a praktická část budou zaměřeny pouze na její problematiku.

Litina s lupínkovým grafitem (LLG) neboli dříve nazývána litina šedá obsahuje grafit v podobě prostorových "hlávkových" útvarů, které v podélném řezu mají tvar lupínků. Jedná se o nejrozšířenější druh litiny [3].



Obr. 2 Tvar a rozložení grafitu v LLG, zvětšeno 100x



### 3 Proces tavení litiny s lupínkovým grafitem

Pro výrobu litiny s lupínkovým grafitem se používá řada tavicích agregátů fungujících na různém principu tavení vsázky. Mezi hlavní tavicí agregáty patří kupolové pece, bez koksové kupolové pece, bubnové pece, elektrické indukční pece a v ojedinělých případech se používají pro tavení litiny i elektrické obloukové pece.

#### 3.1 Vsázka

Z pravidla není vsázka pro tavení v různých agregátech odlišná. Jako základní prvek vsázky je surové železo, které je doplněno o vratný materiál, ocelový odpad a třísky. Dále se do vsázky umísťují legující prvky, doprovodné prvky a očkovačla, která se používají ke zvýšení uhlíku při tavení v elektrických pecích, kdy nedochází ke spalování koksu, či topných olejů.

Při výrobě litiny s lupínkovým grafitem není volba surového železe tak náchylná na obsah nečistot v ní obsažené. **Surové železo** se dělí dle obsahu křemíku, manganu a fosforu. Hlavním prvkem určujícím druh tavby surového železa je křemík, pro slévárenské využití tavení litiny s lupínkovým grafitem je v surovém železe obsaženo méně než 1,2 % Si.

**Vratný materiál** pochází z vlastní produkce slévárny a je tvořen vtokovou soustavou, nálitky a zmetkovými odlitky. Před použitím by měl být vratný materiál řádně otryskán a upraven na potřebnou kusovitost. Výhodou použití vratného materiálu je jeho známé chemické složení z předchozí tavby.

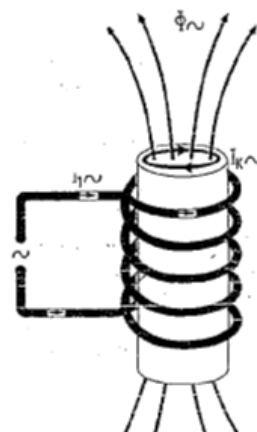
Účelem používání **ocelového odpadu a třísek** je snížení obsahu C a Si ve vsázce. Ocelový odpad bývá nejlevnější položkou, proto se slévárny snaží zařazovat ho co nejčastěji. Ocelový odpad je tvořen plechy, zbytky po lisovacích procesech a malými zmetkovými součástkami.

Všechny součásti vsázky by měly být před vsazením do pece pečlivě odmaštěny a vysušeny, neboť použití takto neupravené vsázky by vedlo k chemickým pochodům, které při výrobě nejsou žádány.

### 3.2 Tavicí agregát - Elektrická indukční pec

Elektrické indukční pece (EIP) jsou po kupolových pecích druhým nejpoužívanějším druhem při tavení litiny s lupínkovým grafitem. Oproti kupolovým pecím mají výhodu v jejich ekologičnosti provozu, kdy vytvářejí mnohem menší počet plynných a prachových exhalací, ale stále je zapotřebí umístit v systému EIP separátory k zachycení částic vzniklých při tavně.

K indukčnímu ohřevu u EIP dochází působením magnetického pole, které vzniká v indukční cívce uvnitř pece, při průchodu střídavého proudu. Podmínkou tavení je umístění elektricky vodivého materiálu uvnitř cívky, poté dochází k indukci taveného materiálu a vzniku silných vířivých proudů, které zapříčiňují ohřev tělesa. Princip indukčního ohřevu kovové vsázky je zobrazen na obr.3[3].



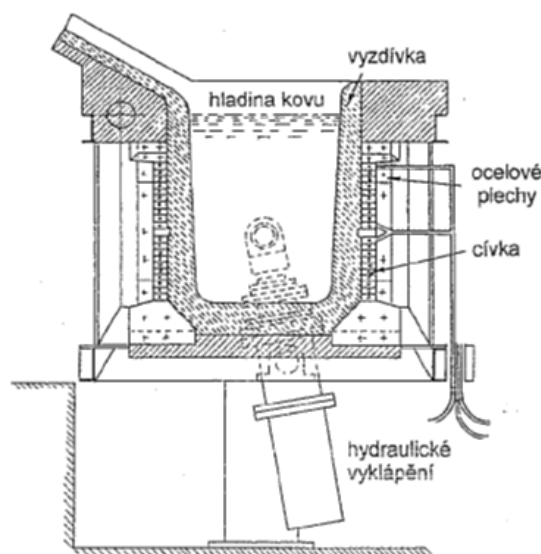
Obr. 3 Indukční ohřev kovové vsázky [3].

Elektrické indukční pece se rozdělují podle použité frekvence na nízkofrekvenční (síťové) a středofrekvenční tavicí pece [3].

Nízkofrekvenční tavicí pece používají jako vsázku vždy 1/3 taveniny z předchozí tavby, do této taveniny se přidává klasická vsázka do plného objemu kelímku. Při rozjezdu pece s nízkofrekvenční charakteristikou se na dno vyzdívky kelímku položí tzv. startovací blok. Toto uspořádání je díky nepřetržitému chodu ekonomicky méně náročné než středofrekvenční tavicí pece [3].

Jak je v literatuře [3] zmíněno, může být při použití středofrekvenčních tavicích pecí celý obsah kelímku vyprázdněn a nahrazen novou vsázkou, bez ohledu na předchozí tavbu. Výhoda tohoto použití je tavení materiálů o různém chemickém složení hned po sobě a výrazně snazší rozebíhání pece.

Základním prvkem EIP je tavicí kelímek, který je umístěn v ose indukční cívky. Je tvořen ze žáruvzdorného materiálu, který je vydusán do potřebného tvaru. Vyzdívka kelímku je volena s ohledem na tavený materiál. Pro každý druh tavného materiálu se používá odlišné chemické složení a vlastnosti vyzdívky, například pro tavení litiny s lupínkovým grafitem je využíváno kyselých žárovevých hmot. Aby kelímek plnil svůj účel, musí být před první tavnou zařazena operace syntrování, kdy dochází k postupnému vytvrzování žárovevých hmot. Životnost vyzdívky závisí na několika faktorech, např. tavený materiál, materiál vyzdívky, tavicí režim a způsob zavážení vsázky. Schéma EIP patrné z obr.4



Obr. 4 Schéma indukční kelímkové pece [3].

### 3.3 Očkování

Očkování je jedním z nejdůležitějších procesů při výrobě jakostních druhů litiny s lupínkovým grafitem. Jedná se o umělé vytváření grafitizačních zárodků v tavenině. Zárodky vznikají až vzájemnou interakcí mezi aktivními složkami očkovadla a některými prvky obsaženými v litině.

Vhodné očkovadlo pro litiny s lupínkovým grafitem, by mělo dodržovat několik zásad. Mělo by podporovat vznik lupínkového grafitu, efektivně snižovat zákalku, nesmí vytvářet příliš velké množství strusky, brát v tvorbě nadměrného počtu eutektických buněk a v neposlední řadě by mělo očkování být snadno rozpustné v celém objemu taveniny [1].

Tab. 1 Vybraná očkovadla na bázi křemíku-ferosilicia

Hutní označení	Si [%]	Maximální obsah [%]				Výrobce/norma
		Mn	Al	Ca	Ostatní prvky	
FeSi 90	87-95	0,2	2	-	-	ČSN 422206.1
FeSi 75	72-78	0,4-0,5	1,7-3,0	-	-	ČSN 422206.2
FG FeSi	74-78	-	1,0-1,6	0,4-1,0	-	ELKEM as [4]
FeSi 45	45-50	max. 1	max 2	-	C:0,2; S:0,02; P:0,05; Cr:0,5	Commexim group ISO 5445-80 [5]
FeSi 75 2	72-80	-	max 2	-	C:0,2; S:0,04; P:0,05	Commexim group ISO 5445-80 [5]
FeSi 65	63-68	-	0,5-2	-	C:0,05-0,2; S:0,01-0,02; P:0,02-0,05	Lenoxplus [6]
FeSi 75	72-80	-	0,5-2	-	C:0,05-0,2; S:0,01-0,02; P:0,02-0,05	Lenoxplus [6]

Výše uvedené vlastnosti nejlépe splňují očkovadla na bázi slitiny Fe-Si, obchodně nazývaná ferosilicia. Po naočkování ferosiliciem vzniká v litině chemická heterogenita a v místech větší koncentrace křemíku dochází ke zvětšené aktivitě uhlíku a tím je podporována nukleace grafitického eutektika. Ferosilicia, kromě křemíku, obsahují další krystalizačně aktivní prvky, které mají za úkol zlepšovat očkovací účinek, zlepšovat rozpustnost při nízkých teplotách a zpomalovat rychlost odeznívání. Mezi tyto prvky se řadí hliník, síra, barium, zirkon, mangan a titan. Vybraná očkovadla na bázi křemíku jsou znázorněna v tab.1 [3].

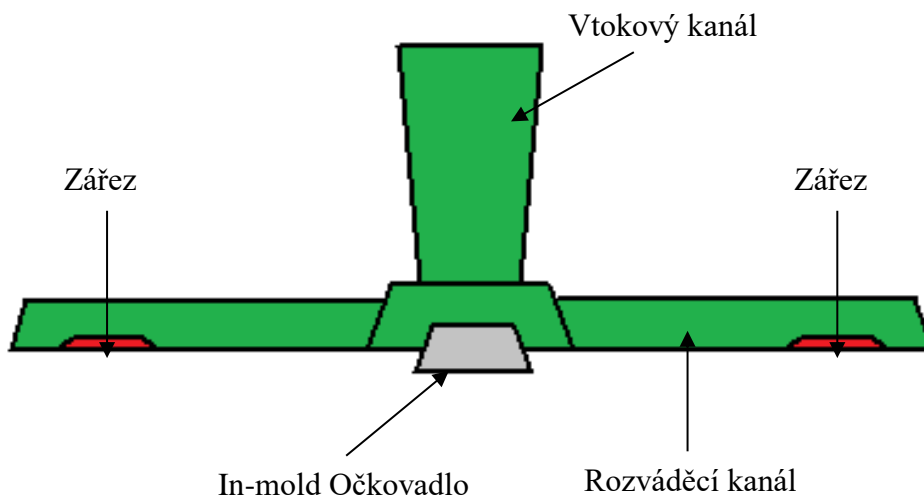
Vedle nejrozšířenějších očkovadel na bázi křemíku jsou očkovadla na bázi uhlíku, tyto očkovadla obsahují obvykle mezi 30 až 40 %C a vysoký obsah křemíku kolem 50 %. Očkování pomocí uhlíkových očkovadel se používá při vyšších teplotách, cca 1400 °C při kterých dochází k optimálnímu rozpuštění v tavenině. Největší účinky mají očkovadla u litin s vyšším obsahem síry, proto se používají pro očkování litiny s lupínkovým grafitem jen zřídka [3].

Hlavní metoda očkování litiny je, **vnášení očkovačla do pánve**. Tato metoda očkování je nejrozšířenější a při dodržení správných zásad jedna z efektivních metod. Očkovačlo se zanášá přímo do pánve s taveninou ihned po stažení strusky. Zrnitost očkovačla je volena podle teploty, a objemu kovu v pánvi, při příliš malé zrnitosti může docházet k ulpívání očkovačla na stěny pánve a jeho vyplavováním spolu se struskou [3].

**Očkování do proudu kovu** je používáno v automatovém provozu, kdy je očkovačlo kontinuálně dávkováno přímo do proudu kovu při odlévání formy. Tato metoda vyžaduje jemně mleté, nebo práškové formy očkovačel. Množství očkovačla je řízeno automaticky a stanovuje se podle rychlosti proudu taveniny, nebo je určen poměr očkovačla na jednu formu [1].

Dalším způsobem je **očkování plněným profilem**. Očkovačlo je obsaženo v dutém drátu, který se zasouvá do proudu kovu v pánvi, tím dochází k natavování obalu očkovačla a samotnému očkování taveniny. Dávkování se určuje jako délka profilu přidána na množství kovu a při kontinuálním očkování se dávkování řídí rychlostí přidávání plněného profilu. Metoda očkování plněným profilem má výhodu ve snadnosti dávkování očkovačích látek [2].

Očkování **In-mold** neboli očkování do formy funguje na principu umístění očkovačla ve formě tablety, nebo granulí přímo do vtokové soustavy. Důležitým faktorem při výběru in-mold očkovačla musí být rozpustnost těchto očkovačel v tavenině. K očkování taveniny dochází ihned po průtoku roztaveného kovu skrze očkovačací těleso. Obr. 5 ilustruje in-mold metodu očkování [1].



Obr. 5 In-mold metoda očkování; očkovačlo uložené pod vtokovým kanálem [1]

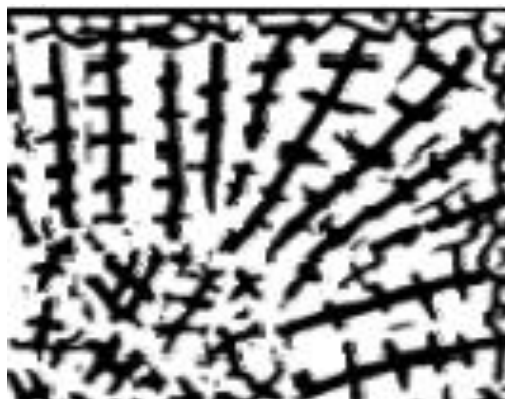
## 4 Nukleace, vznik zárodků

Tuhnutí litin probíhá ve dvou procesech. V prvním dochází ke krystalizaci primárních fází a poté ke krystalizaci eutektika, přičemž krystalizace eutektika je samostatný proces, který je primární fází ovlivněn. Každý z těchto krystalizačních dějů je zahájen nukleací zárodků příslušné fáze a jejím postupným nárůstem. Jako primární fáze u litiny s lupínkovým grafitem se vylučuje primární austenit.

Krystalizace litiny s lupínkovým grafitem je podrobně rozepsána v následujících bodech.

### 4.1 Krystalizace primárního austenitu

Po překročení teploty likvidu začíná tuhnutí vylučováním primárních dendritů austenitu. Růst dendritů je kontrolován rychlostí ochlazování, segregací a difuzí prvků. Tvar dendritů primárního austenitu je znázorněn na obr. 6. Čím větší je rychlost ochlazování tím je jemnozrnnější struktura. Během krystalizace austenitu se tavenina obohacuje uhlíkem a její složení se stává eutektické. Vznik dendritů austenitu a vylučování uhlíku pokračuje až do dosažení eutektické teploty, po jejím překročení dochází k eutektické krystalizaci a začátku růstu zrn grafitického eutektika.



Obr. 6 Primární zrna austenitu [1]

Na primární strukturu mají vliv různé činitele:

Vysoká **tavicí a licí teplota** zvětšuje oblasti čistě dendritické s orientovanou strukturou, na druhou stranu nižší tavicí teplota umožňuje vznik menších dendritů, které jsou nepravidelně uspořádány.

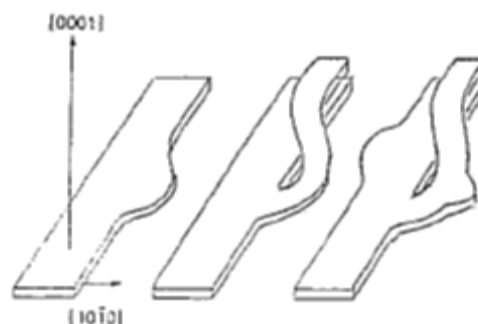
Dalším faktorem ovlivňující primární fázi je **chemické složení**. Při vyšším obsahu uhlíku má litina sklon k exogennímu tuhnutí, délka dendritů a jejich množství je přitom maximální pouze při nízkém ekvivalentu uhlíku [1].

**Očkování** působí zejména na vývoj grafitu a brání tvorbě nežádoucích karbidů, ale má též vliv na tvar a rozměry primárních dendritů austenitu. Mezi hlavní vlastnosti většiny komerčních očkovadel patří pokles, nebo růst dendritů austenitu. Hlavní prvky očkovadel jsou titan, vanad, a hliník, tyto prvky mají největší vliv na větší počet dendritů.

## 4.2 Krystalizace grafického eutektika

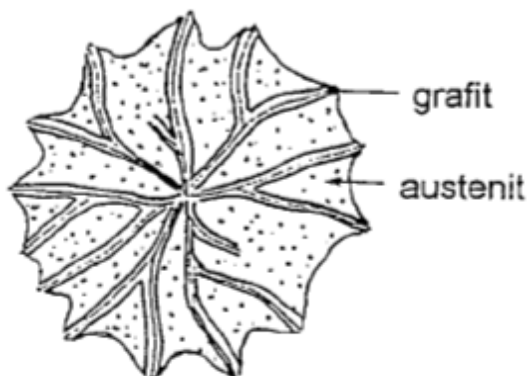
Jak již bylo řečeno v předchozí podkapitole, při překročení eutektické teploty a za podmínky mírného přechlazení dají eutektické zárodky podnět k eutektické krystalizaci, při níž se začnou vylučovat zrna grafitu. Grafitizační zárodky při tuhnutí litiny nejsou rozpustné a neshlukují se, jsou velmi rovnoměrně rozloženy [3].

Vznik lupínkového grafitu podléhá heterogenní nukleaci a vzniká jen tehdy pokud je rychlost difuze atomů železa v jednom směru větší než-li v druhém. Dále je spojen s přítomností relativně vysokého obsahu kyslíku a síry, tyto prvky snižují velikost povrchového napětí a usnadňují růst grafitu v planárních rovinách [1010]. Grafit roste ze zárodků radiálním směrem, vlivem okolního austenitu a nečistot dochází k rozvětvení grafického lupínku a tím vzniká eutektická buňka hlávkového tvaru typická pro lupínkový grafit. Frekvence rozvětvení grafitových lupínků je úměrná k velikosti přechlazení, čím je ochlazování rychlejší, tím častěji dochází k větvení a vzniku jemnějšího grafitu. Mechanismus větvení grafitu je znázorněn na obr. 7 [2].



Obr. 7 Mechanismus větvení lupínku grafitu [3].

Prostor růstu grafického eutektika je vymezen prostorem mezi větvemi primárního austenitu. Austenit vznikající při eutektické krystalizaci se připojuje již ke vzniklým dendritům a vytváří spolu jednotnou fázi. Růst eutektické buňky s lupínkovým grafitem je znázorněn na obr. 8.



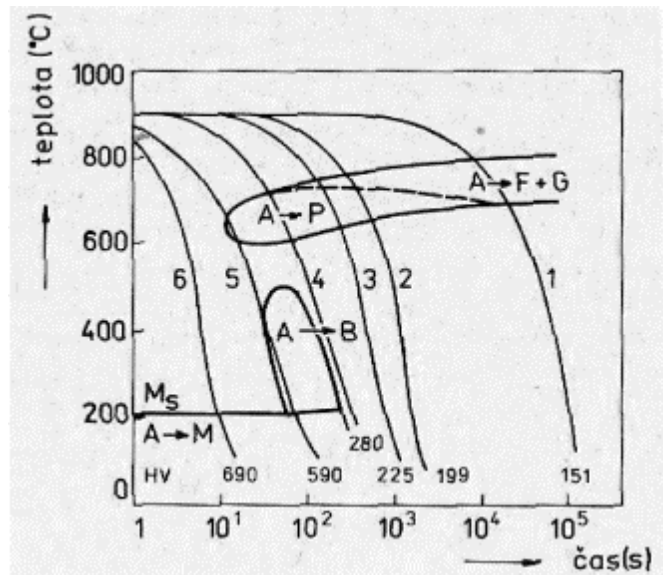
Obr. 8 Růst eutektické buňky s lupínkovým grafitem [3].

Zvyšování počtu grafitizačních zárodků se provádí pomocí očkování. Mezi hlavní komponenty, které ovlivňují vznik zárodků lupínkového grafitu můžeme zařadit oxidy ( $\text{SiO}_2$ ), silikáty, nitridy (nitrid boru) Sulfidy ( $\text{MnS}$ ,  $\text{CaS}$ ) a karbidy (zejména  $\text{Al}_4\text{C}_3$ ) [1].

### 4.3 Fázové přeměny v tuhém stavu – překrystalizace

Fázové přeměny v tuhém stavu probíhají při dalším, dostatečně pomalém ochlazování ztuhlé litiny. Přeměny v tuhém stavu u grafitických litin, které probíhají v podmínkách plynulého ochlazování lze pozorovat v diagramu ARA, znázorněném na obr.9. Při velmi pomalém ochlazování z teploty austenitizace (křivka 1) vzniká z austenitu grafitický eutektoid s feritickou maticí.

Se zvětšující se rychlostí ochlazování se zvětšuje přechlazení austenitu a tím probíhají oba druhy eutektoidní přeměny. Matrice litiny je feriticko-perlitická a ochlazování probíhá podle křivek 2 a 3.



Obr. 9 Diagram anisotermického rozpadu austenitu [1]

Při dostatečné rychlosti ochlazování je stabilní eutektoidní přeměna potlačena a produktem přeměny je pouze perlit (Křivka 4).

Ochlazováním podle křivky 5 se získá strukturní směs perlitu, bainitu, martenzitu a zbytkového austenitu

Při dostatečně velké rychlosti ochlazování podle křivky 6 jsou potlačeny veškeré difúzní přeměny a výsledná matrice je tvořena pouze martenzitem a zbytkovým austenitem.

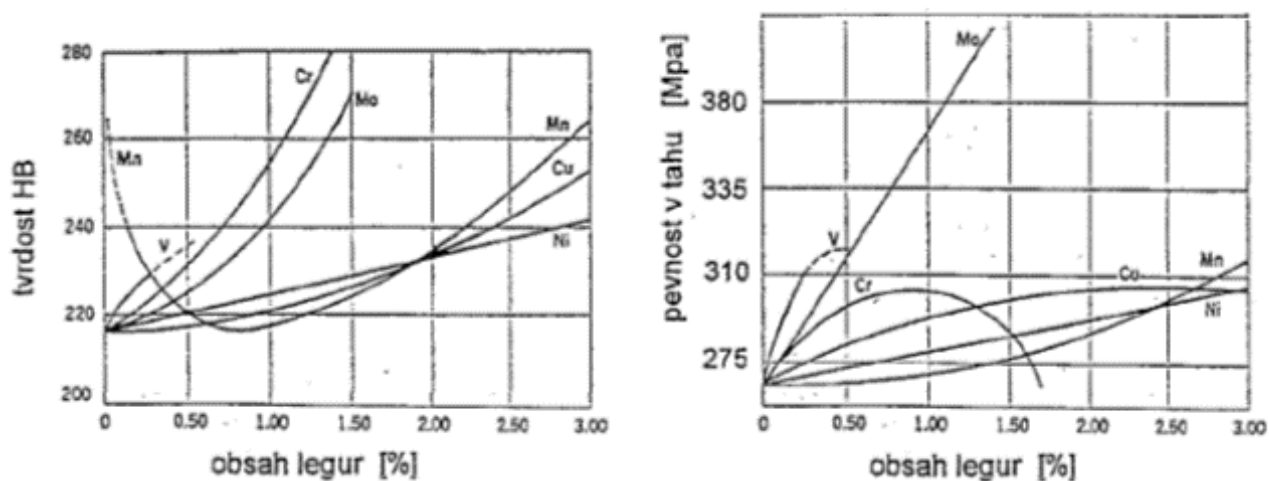
## 5 Zvyšování mechanických vlastností

Litina s lupínkovým grafitem jeví nejlepší mechanické vlastnosti za předpokladu, že perlit v ní obsažený je jemnozrná struktura. Toho se dá docílit pomocí legujících prvků, nebo tepelným zpracováním.

### 5.1 Vliv legujících prvků

Legování se provádí přidáním legujících prvků do vsázky, nebo přimícháním přímo do taveniny. Jednotlivé legující přísady mají za úkol ovlivňovat různé vlastnosti, jako jsou např. odolnost proti korozi, vysokoteplotní odolnost a zlepšení mechanických vlastností. Legující prvky ovlivňují mechanické vlastnosti litiny s lupínkovým grafitem velmi rozdílně, přičemž rozhodující jsou vlivy na hodnoty tvrdosti a pevnosti. Dalším faktorem je jejich množství a vhodnost použití pro mikrolegování [1].

Vliv legujících prvků na nárůst tvrdosti a pevnosti v tahu udávají Crosbyho diagramy znázorněné na obr. 10.



Obr. 10 Vliv legujících přísad na tvrdost a pevnost v tahu litiny dle Crosbyho[3].

Pro zvyšování mechanických vlastností litin je nutno dosáhnout jemnozrné perlitické struktury s vysokou dispersitou perlitu. Leguje se nejčastěji prvky: vanad, chrom, molybden, měď, křemík, mangan. Tak aby výsledná struktura byla homogenní, bez výskytu feritu a volných karbidů. Podrobný popis všech legujících a přísadových prvků a jejich výsledný vliv na mechanické vlastnosti LLG je zaznamenána v tab.2



Tab. 2 Souhrn vlivů legujících a přídavných prvků na vlastnosti litiny s lupínkovým grafitem. [1]

Souhrn vlivů legujících a přídavných prvků na vlastnosti litiny s lupínkovým grafitem				
Prvek		Charakter prvku	Kladné (zlepšuje/zvyšuje)	Negativní (zhoršuje/snižuje)
Zkratka	Název			
C	uhlík	grafitotvorný	počet zárodků grafitotvorného eutektika	vyšší % = horší mech. vlastnosti
Si	křemík	grafitotvorný feritotvorný	počet zárodků grafitotvorného eutektika rozpad cementitu zvyš. eutektickou teplotu podporuje grafitizaci	interval tuhnutí teplotu likvidu pevnost vysoký obsah = zvyšování křehkosti
Mn	mangan	stabilizační perlitotvorný	růst perlitu pevnost feritu a perlitu/ litiny desoxidační účinek	menší % C a Si = horší mech. vlastnosti
P	fosfor	stabilizační grafitizační	tvrdost součinitel tření zabíhavost	rozpustnost C křehkost lámavost pevnost
S	síra	feritotvorný	stabilizuje karbid Fe	houževnatost lámavost
Cu	měď	grafitizační perlitotvorný	pevnost tvrdost odolnost proti opotřebení odolnost proti korozi růst perlitu	tažnost
Ni	nikl	grafitizační perlitotvorný	pevnost houževnatost odolnost proti korozi růst perlitu zjemňování grafitu	vysoký obsah = vznik bainitické struktury
Mo	molybden	perlitotvorný	pevnost v tahu tvrdost vznik feritu	vysoký obsah = vznik bainitické struktury perlitickou transformací
Ti	titan	grafitizační	tvrdost grafitizace	nodularita vznik struskových vad a bodlin
As	arsen	perlitotvorný karbidotvorný	tvrdost nodularita	mechanické vlastnosti rázová houževnatost
B	bor	perlitotvorný karbidotvorný nitridotvorný	tvrdost odolnost proti opotřebení	vytváření karbidů boru mechanické vlastnosti
Cr	chrom	stabilizační	pevnost tvrdost odolnost proti opotřebení tepelná odolnost odolnost proti korozi růst perlitu	malé % Cr potlačuje vznik feritu vyšší % Cr zhoršuje obrobitelnost

Sn	čín	perlitotvorný karbidotvorný	pevnost tvrdost odolnost proti opotřebení růst perlitu potlačení krystalizace feritu	tažnost vyšší % Sn = křehkost
V	vanad	stabilizační	pevnost tvrdost	opracovatelnost přítomnost V karbidů
Bi	bismut	perlitotvorný	počet zárodků grafitotvorného eutektika	mechanické vlastnosti
Pb	olovo	-	-	mechanické vlastnosti rázová houževnatost destrukce grafitu
Sb	antimon	perlitotvorný karbidotvorný	rozpuštěnost uhlíku stabilizace perlitu dobré kluzné vlastnosti odolnost proti opotřebení	potlačuje grafitizaci
Au	zlato	-	-	-
Al	hliník	feritotvorný	pevnost struktura bez vměstků odolnost proti okujení	struskoplynné vady bodliny
Nb	niob	-	-	-
W	wolfram		pevnost tvrdost	-
N	dusík	perlitotvorný	pevnost tvrdost	překročení rozpustnosti= vytváření bublin
H	vodík	karbidotvorný	-	vysoký obsah = vznik bodlin a karbidů

V neposlední řadě lze litinu s lupínkovým grafitem legovat pomocí kombinace legujících prvků. Kombinacemi se zesilují účinky legujících prvků tak, že účinek kombinace je vyšší než součet účinků samostatných prvků. Největším zastoupením jsou dvojkombinace, které jsou např. měď + chrom, nikl + chrom, chrom + molybden. Kombinace prvků mají obdobný vliv na vlastnosti jako jednotlivé prvky v ní obsažené [1].

## 5.2 Tepelné zpracování

Rozhodující vlastnosti odlitků z litiny s lupínkovým grafitem určuje především lupínkový tvar a množství grafitu získané již ve stavu po odlití. Proto má tepelné zpracování litiny s lupínkovým grafitem největší vliv na zvyšování tvrdosti. Ostatní mechanické vlastnosti, na rozdíl od tvárné litiny, jsou ovlivněny velmi málo [1].

U odlitků z litiny s lupínkovým grafitem se používají tři základní druhy tepelného zpracování. Žihání za nízkých teplot, žihání za vysokých teplot spojené s překrytím a kalení s následujícím popouštěním.

Přehled způsobů tepelného zpracování a jejich požadavky pro grafitické litiny jsou znázorněny v tab. 3. V této tabulce jsou hodnoty času u jednotlivých druhů tepelného zpracování závislé na tloušťce odlitku a jsou pouze orientační, čím větší má odlitek stěnu, tím větší musí být výdrž tepelného zpracování. Z pravidla se na 25,4 mm stěny uvažuje 1h prodlevy při dané teplotě [1].

Tab. 3 Přehled způsobů tepelného zpracování grafitických litin [1].

Tepelné zpracování	Druh materiálu odlitku	Požadavek	Teplota	Čas	způsob ochlazování
Snížení vnitřních pnutí	nelegovaná nizkolegovaná vysocelegovaná	Snížení vnitřních pnutí	500-550°C 560-600°C 600-650°C	1h	pec
Měkké žihání při nízkých teplotách	nelegovaná nizkolegovaná	feritická struktura, lepší obrobiteľnosť	700-760°C	45 min. až 1h	pec
Měkké žihání při středních teplotách	nelegovaná nizkolegovaná vysocelegovaná	feritická struktura, lepší obrobiteľnosť	790-900°C	přes 45 min.	v peci do 300°C
Měkké žihání při vyšších teplotách	bílá struktura	feritická struktura, lepší obrobiteľnosť	900-955°C	1h až 3h	v peci do 300°C
Normalizace Perlitizace	všechny druhy	perlitická struktura	850-955°C	1h až 3h	vzduch do 540°C pak pec do 300°C
Kalení	všechny druhy	martenzitická struktura, vysoká tvrdost	800-955°C	1h	vzduch nebo lázeň na <200°C
Popouštění (zušlechťování)	všechny druhy	snížení důsl. martenzit. transformace	150-650°C	1h	vzduch nebo pec

## 6 Zkoušky mechanických vlastností

Pomocí mechanických zkoušek získáváme zásadní údaje a vlastnosti námi zkoušeného materiálu. Pro provedení zkoušek se používají zvláštní zkušební stroje a zařízení k tomu určené. Aby byla zajištěna reprodukovatelnost mechanických zkoušek byly předepsány normy, dle kterých je nutno se řídit [8].

Mechanické zkoušky se dají rozdělit dle způsobu zatěžování, fyzikálních podmínek a stavu napjatosti.

Podle druhu napjatosti dělíme mechanické zkoušky na tahové, tlakové, ohybové, krutové a stříhové.

Mechanické zkoušky podle způsobu zatěžování rozlišujeme, zda se jedná o působení statické nebo dynamické. Zvláštním druhem mechanických zkoušek podle způsobu zatěžování jsou zkoušky tvrdosti.

V praktické části budou prováděny pouze zkoušky tvrdosti a pevnosti v tahu, proto další odstavce teoretické části budou zaměřeny pouze na toto téma.

### 6.1 Zkoušky tvrdosti

Jsou v praxi velmi rozšířené a používají se nejčastěji k doplnění hodnot získaných z ostatních mechanických zkoušek. Mezi hlavní přednosti patří jednoduchost provedení zkoušky a zároveň odpadá nutnost zhotovovat zkušební těleso, zkoušky tvrdosti se dají provádět buď přímo na výrobku, nebo na zkušebním tělese již použitým pro jiné mechanické zkoušky [8].

Mechanické zkoušky tvrdosti se rozdělují na zkoušky mikrotvrdosti a makrotvrdosti. Dále se dají rozdělit podle rychlosti zatěžující síly na statické, či dynamické.

Statické zkoušky tvrdosti jsou charakterizovány zkušebním tělesem, které je do základního materiálu vtlačováno klidnou silou, která se plynule zvyšuje. Při zkoušce dojde ve zkušebním tělese k vrypu nebo ke vtisku, proto se rozlišují statické zkoušky vrypové a vnikací.

Hlavními představiteli statických zkoušek tvrdosti jsou měření podle Vickerse, Rockwell a Brinella.

Dynamické zkoušky tvrdosti jsou charakteristické zatěžující silou, která působí dynamicky neboli rázem. Přesnost dynamických zkoušek je menší než u zkoušek statických vnikacích. Podle základního principu se dynamické zkoušky rozdělují na plastické a elastické.

V praktické části bude na zkušebních tělesech provedena statická zkouška podle Brinella a dynamická zkouška Equotipem, Podrobný popis zkoušek je proveden v bodech 6.1.1 a 6.1.2.

### 6.1.1 Zkouška tvrdosti dle Brinella

Zkouška tvrdosti podle Brinella je vhodná na zkoušení měkkých a středně tvrdých materiálů, které mají heterogenní strukturu. Proto najde uplatnění pro zkoušku tvrdosti odlitků, materiálů s hrubozrnnou strukturou, nebo pro tvářené materiály. Zkouška nevyžaduje velké nároky na čistotu povrchu a není tak citlivá na dodržení správných zkušebních podmínek [8].

Jak je zmíněno v literatuře [9], tak podstatou zkoušky je vtlačování kulovitěho tělesa o průměru  $D$  do zkušební vzorku působením normálové síly  $F$  kolmé k povrchu zkušební vzorku po určitý normalizovaný čas. Po odstranění indentoru zůstane ve zkušebním vzorku vtisk, změřením jeho průměru dojde k přesnému stanovení tvrdosti.

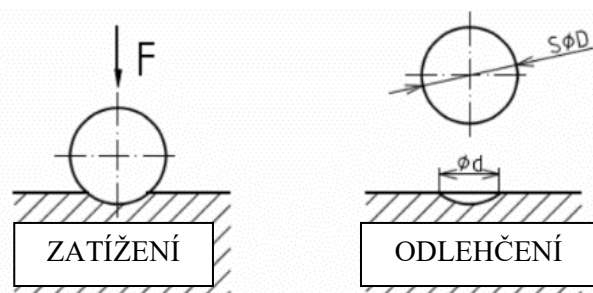
Tvrdot podle Brinella HB je vyjádřena jako poměr působící síly k ploše povrchu kulovitěho vtisku a určí se ze vztahu (1) nebo se přímo odečte z tabulek podle průměru vtisku [8].

$$HB = \frac{0,102 \cdot F}{A} = \frac{0,102 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

Síla  $F$ , čas průběhu zkoušky a průměr zkušební tělesa  $D$  jsou normovány. Norma ČSN ISO 6506-1 udává zkušební těleso o průměrech  $D$ : 10; 5; 2,5; 2 a 1 mm.

Podmínkou pro správné uskutečnění zkoušky musí být tloušťka zkušební vzorku, která je minimálně desetinásobek hloubky vtisku [8].

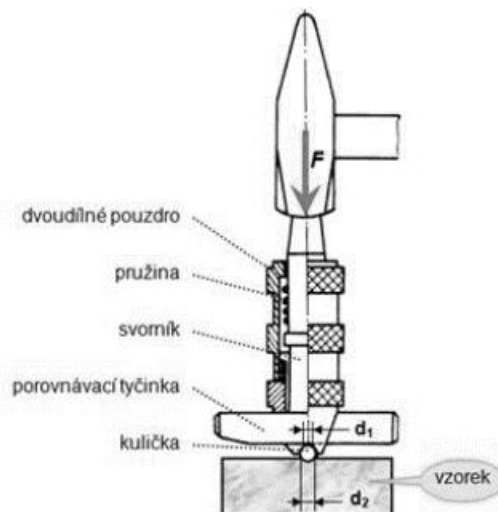
Princip mechanické zkoušky tvrdosti podle Brinella je patrný na obr. 11.



Obr. 11 Princip zkoušky tvrdosti podle Brinella [8].

Možnou nevýhodu zkoušky pomocí Brinella lze shledat v nemožnosti použití na tvrdé materiály, není proto jednotná Brinellova stupnice tvrdosti kovů od nejměkčího po nejtvrďší. Mezi další nevýhody patří nepřesnost měření, z důvodu kruhových vtisků, které mohou být deformovány a nemají jednoznačný průměr.

Speciálně pro použití zkoušky tvrdosti podle Brinella i mimo laboratoře bylo vyvinuto Poldi kladívko. V kladívku je uložen etalon o známé tvrdosti, který přenáší úder kladívka do svorníku na indentor, který následně vytvoří vtisk do zkušební vzorku. Tímto rozmístěním, jsou eliminovány nepřesnosti vytvořené deformací částí Poldi kladívka. Podmínka pro použití měření tvrdosti pomocí Poldi kladívka je tvrdost zkušební materiálu, která nesmí být větší než tvrdost porovnávacího etalonu. Přesný popis zkoušky je znázorněn na obr. 12.

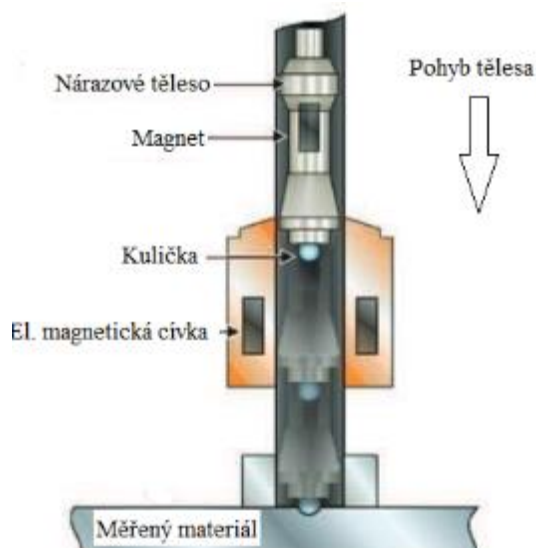


Obr. 12 Princip fungování Poldi kladívka pro měření tvrdosti HB [10]

### 6.1.2 Zkouška tvrdosti equotipem

Equotip je přenosné měřicí zařízení, kterým lze měřit tvrdost jak statickou metodou podle Rockwella, tak i dynamickou odrazovou metodou dle LEEBA. Výhodou použití equotipu pro mobilní měření tvrdosti je nízká náročnost na čistotu povrchu zkušebního tělesa.

Měření dynamické zkoušky tvrdosti dle LEEBA je prováděno vystřelením ocelové kuličky oproti měřenému vzorku. Měření tvrdosti použitím dynamické odrazové zkoušky probíhá nepřímo ztrátou kinetické energie nárazového tělesa. Nárazové těleso po průchodu elektromagnetickou cívkou generuje indukční napětí, které je úměrné rychlosti tělesa. Po dopadu na měřený materiál dojde k jeho deformaci a ke ztrátě kinetické energie nárazového tělesa, která se projeví v nižším indukčním napětí, tudíž v nižší odrazové rychlosti. Řez měřicí sondou je znázorněn na obr. 13 [12].



Obr. 13 Řez měřicí sondou equotipu [12]

Při použití equotipu se musí dbát na určité zásady. Jednou z nich je umístění měřicího přístroje kolmo k měřenému tělesu, umístění šikmé, nebo zespona by vedlo k velké nepřesnosti měření vlivem gravitační síly, to lze napravit třemi způsoby:

Ruční opravou měřených hodnot dle tabulky, což je nepřesné a dochází k častým chybám.

Ručním zadáním směru měření do přístroje, které je nutné provést před měřením, v případě odchylky od zadaného směru měření je měření nepřesné.

Automatickou kompenzací, která je velmi přesná a pomocí ní nemusí uživatel směr měření vůbec zvažovat.

Další zásadou používání mobilního měřicího přístroje pro dynamické měření tvrdosti je jeho nevhodnost použití pro tenkostěnná zkušební tělesa. Při měření tenkých stěn dochází po nárazu kuličky k oscilaci stěn a tím k zavádějícím výstupním hodnotám [12].

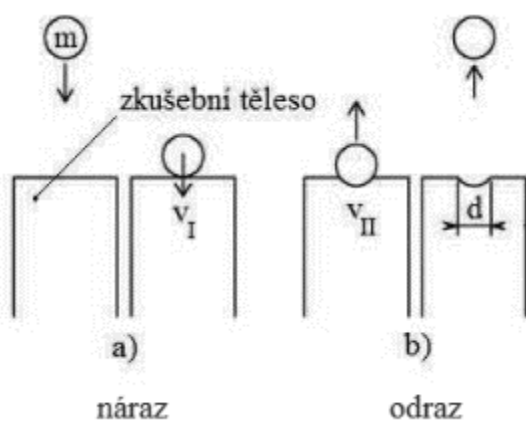
Výpočet tvrdosti se tak provede podílem rychlostí před a po odrazu podle rovnice (2)

Rovnice tvrdosti dle LEEBA:

$$HL = \frac{V_{II}}{V_I} * 1000 \quad (2) [12]$$

$V_{II}$  = Rychlost kuličky po odrazu [ $m \cdot s^{-1}$ ]

$V_I$  = Rychlost kuličky při dopadu [ $m \cdot s^{-1}$ ]



Obr. 14 Princip dynamické odrazové metody [12]

## 6.2 Zkouška pevnosti v tahu

Zkouška pevnosti v tahu se řadí mezi statické mechanické zkoušky, kdy síla lineárně vzrůstá až do porušení zkušební tělesa. Jedná se o základní a jednu z nejdůležitějších zkoušek mechanických vlastností vůbec. Přesné provedení udává norma ČSN EN ISO 6892-1 [8].

Při namáhání dochází k deformaci zkušební tyče, která se prodlužuje až do přetržení. Zjišťují se při tom napěťové a deformační charakteristiky, kterými jsou pevnost v tahu, mez kluzu, tažnost a kontrakce. Měření tažnosti a kontrakce má největší význam u vzorků z oceli, u litiny se neměří.

**Tažnost** lze získat přepočtem podle vzorce (3) z poměrného prodloužení, které se získá po přetržení zkušební tělesa. Pokud nedojde k přetržení, výpočet tažnosti nelze použít. Dále je tažnost měřítkem tvárnosti.

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} * 100 [\%] \quad (3) [8]$$

$L_u$  = Délka zkušební vzorku po přetržení

$L_0$  = Délka zkušební vzorku před přetržením

Další charakteristikou tvárnosti je **kontrakce**. Určuje se ze změny průřezu před a po provedení zkoušky na zkušebním vzorku podle rovnice (4)

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} * 100 [\%] \quad (4) [8]$$

$S_u$  = Průřez zkušební vzorku po přetržení

$S_0$  = Průřez zkušební vzorku před přetržením

Další hodnotou je **pevnost v tahu**, které je závislá na maximálním zatížení a je určena mezi pevnosti v tahu. Pevnost v tahu je určena dle vzorce (5)

$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_0} [\text{MPa}] \quad (5) [8]$$

$F_{\max}$  = maximální zatěžující síla [N]

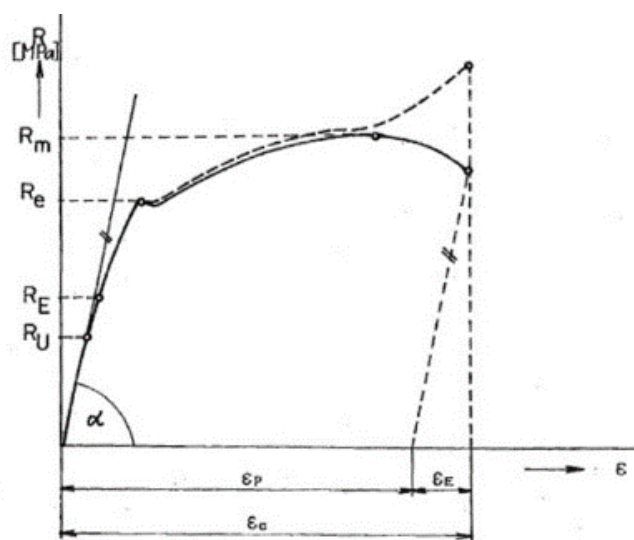
$S_0$  = Průřez zkušební vzorku před přetržením [mm<sup>2</sup>]

Hlavním výstupním prvkem zkoušky pevnosti v tahu je pracovní tahový diagram. Kromě výše uvedených charakteristik lze z něj určit také celkovou deformaci  $\epsilon_c$ , podíl elastické deformace  $\epsilon_e$ , podíl plastické deformace  $\epsilon_p$  a jednotlivé meze materiálu.



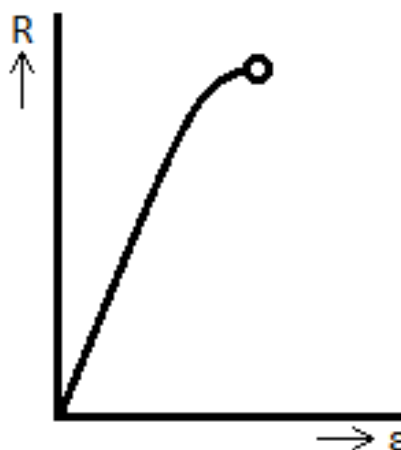
Tvar pracovního diagramu tahové zkoušky závisí na druhu materiálu, na obr. 15 je znázorněn diagram měkké uhlíkové oceli u které jsou velmi dobře patrné všechny meze až do meze pevnosti v tahu, za kterou dochází k odlehčení napětí a k přetržení zkušebnímu tělesu.

Charakteristické meze materiálu jsou: mez úměrnosti  $U$ , mez elasticity  $E$ , mez kluzu  $e$  a mez pevnosti v tahu  $m$ . K jednotlivým mezím jsou definovány jejich adekvátní napětí  $R$ . Přičemž pro technickou praxi jsou důležitá pouze dvě napětí, napětí na mezi kluzu  $R_e$  a mezi pevnosti  $R_m$ .



Obr. 15 Pracovní diagram zkoušky tahem měkké uhlíkové oceli [8]

V pracovním diagramu zkoušky tahem pro křehké materiály, např. pro litinu s lupínkovým grafitem, není znatelná mez kluzu a k přetržení zkušebnímu tělesu dochází zpravidla hned za ní. Na obr. 16 je tento tvar diagramu znatelný [8].

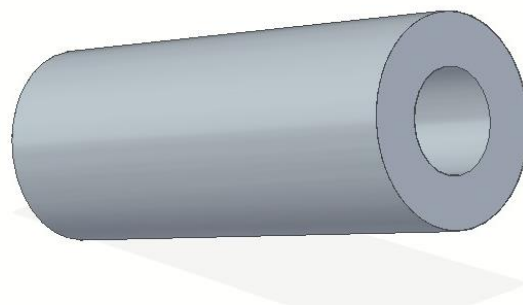


Obr. 16 Pracovní diagram pro křehké materiály [8]

## 7 Úvod do experimentální části

Výroba odlitku z litiny s lupínkovým grafitem proběhla v elektrické indukční peci. Nejdříve byl zhotoven odlitek V1, který vážil 11500 kg surové hmotnosti. 3D podoba odlitků je znázorněna na obr. 17.

Po ztuhnutí, zchladnutí a očištění odlitku od formovací směsi následovalo měření tvrdosti equotipem. U odlitku V1 v litém stavu byla naměřena tvrdost 180-195 HB, která nespĺňovala požadavek zákazníka, a tak do procesu výroby muselo být zařazeno tepelné zpracování.



Obr. 17 3D podoba odlitku

Režim tepelného zpracování odlitku V1 zahrnoval ohřev na 930 °C s výdrží 8 hodin a následné ochlazení v olejové lázni na 300 °C, dále byl odlitek zavezen do pece ohřáté na teplotu 300 °C s výdrží 6 hodin a řízené ochlazení do 50 °C se spádem 40 °C/h. Popouštění bylo provedeno při teplotě 610 °C s výdrží 10 hodin a následným řízeným ochlazením do 100 °C se spádem 30 °C/h.

Experiment pokračoval úpravou chemického složení a následným odlitím odlitku V2 o surové hmotnosti 15000 kg. Po ztuhnutí, zchladnutí a očištění odlitku od formovací směsi následovalo měření tvrdosti equotipem. U odlitku V2 byla naměřena tvrdost v litém stavu 200-230 HB, která nespĺňovala požadavek zákazníka, a tak do procesu výroby muselo být opět zařazeno tepelné zpracování.

Režim tepelného zpracování odlitku V2 zahrnoval ohřev na 930 °C s výdrží 9 hodin a následné ochlazení v olejové lázni „do studena“. Popouštění bylo provedeno při teplotě 608 °C s výdrží 9 hodin a následným řízeným ochlazením do 50 °C se spádem 50 °C/h.

Pro ověření mechanických vlastností a mikrostruktury po průřezu odlitku byl proveden rozřez tepelně zpracovaných odlitků a následný rozbor. Získané výsledky budou použity pro návrh další úpravy chemického složení k dosažení požadovaných mechanických vlastností v litém stavu.

### Tavbová analýza prvního odlitku:

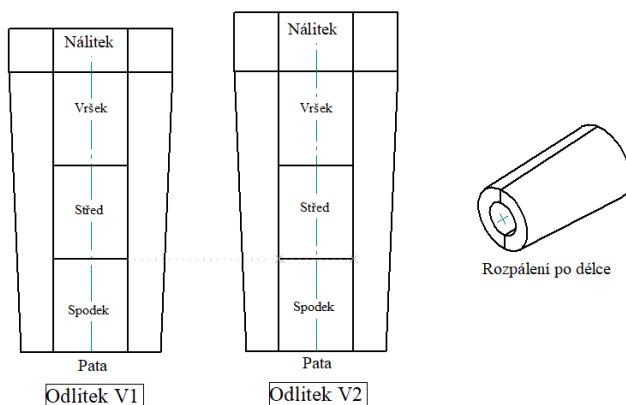
V1: C:2,95%, Mn:0,900%, Si:1,80%, P:0,084%, S:0,045%, Cr:0,265%, Ni:0,300%, Mo:0,20%, Cu:0,32%

### Tavbová analýza druhého odlitku:

V2: C:2,70%, Mn:0,988%, Si:1,80%, P:0,064%, S:0,042%, Cr:0,508%, Ni:0,274%, Mo:0,24%, Cu:1,10%

## 8 Zkoušky mechanických vlastností

Pro zjištění mechanických vlastností odlitků s různým chemickým složením a tepelným zpracováním bylo provedeno rozpálení odlitků po délce, ofrézování plochy k měření tvrdosti, a poté byl odlitek rozřezán na pásové pile na vzorky určené k měření pevnosti v tahu, měření chemie a metalografické hodnocení. Schéma rozřezu odlitku je znázorněno na obr. 18. Rozřez obou odlitků byl totožný.

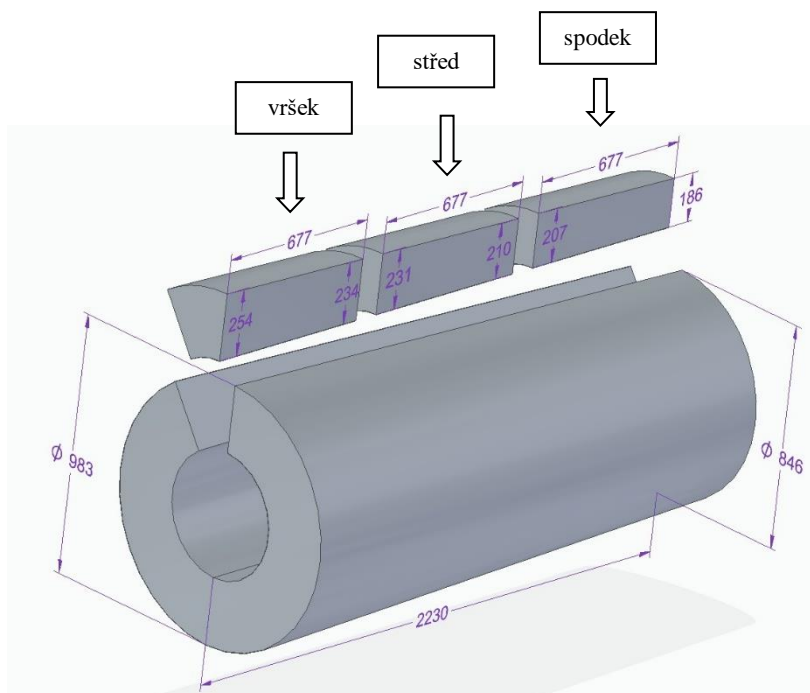


Obr. 18 Schéma rozřezu odlitku

Označení vzorků pro mechanické zkoušky bylo z odlitku V1, LT10187 V1-1/3 pro spodek odlitku, LT10187 V1-2/3 pro střed odlitku a LT10187 V1-3/3 pro vršek odlitku a pro odlitek V2 bylo značení následující, LT10187 V2-1/3 pro spodek odlitku, LT10187 V2-2/3 pro střed odlitku a LT10187 V2-3/3 pro vršek odlitku

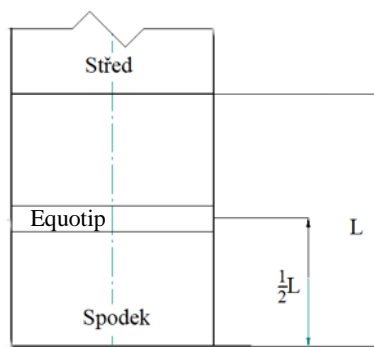
### 8.1 Zkoušky tvrdosti v příčném průřezu odlitku

Vzorky pro měření tvrdosti v průřezu odlitku byly určeny tak, že byl odlitek rozdělen na přibližně stejné třetiny, na spodek, střed a vršek dle schématu znázorněného na obr. 18. Samotná 3D podoba vzorků spolu s kótami tloušťek stěny, průměrů a délek je vyobrazena na obr. 19.



Obr.19 Vzorky pro měření tvrdosti po průřezu odlitku

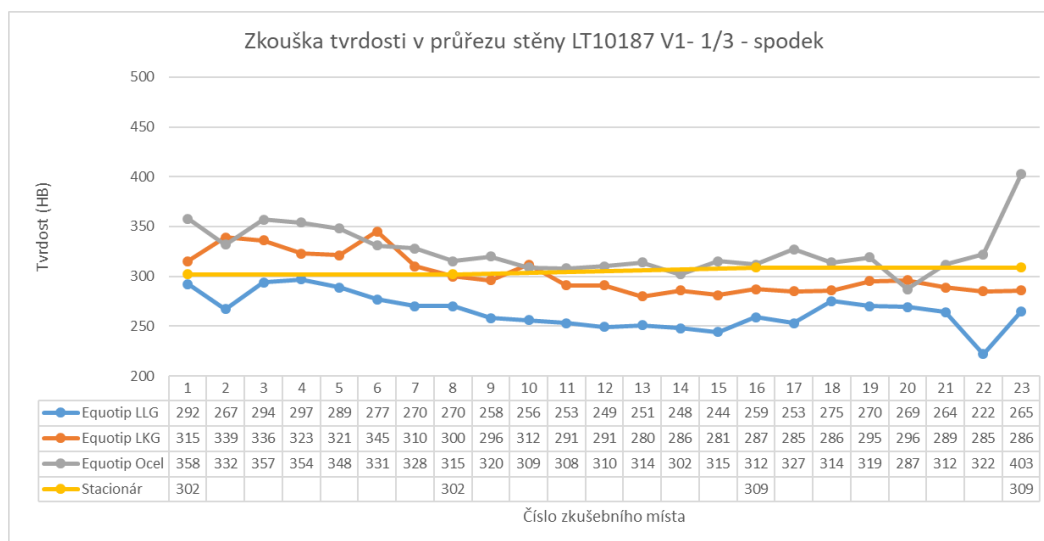
Měření probíhalo na ofrézovaných plochách vzorků, kdy se frézováním odstranila tepelně ovlivněná oblast po dělení odlitků. Měření se provedlo na všech vzorcích totožně a řídilo se schématem na obr. 20, kde je znázorněno schéma pro spodek prvního odlitku V1.



Obr. 20 Schéma měření u vzorku s označením spodek

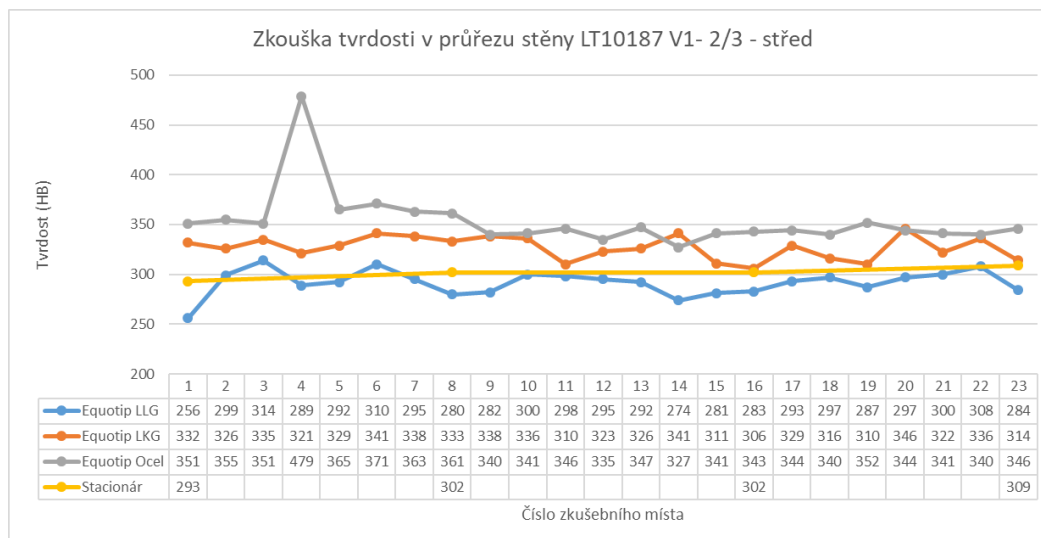
### 8.1.1 Měření pro odlitek V1

Na každém vzorku probíhalo měření pomocí equotipu v nastavení pro měření LLG, následně se hodnoty porovnyaly s měřením v nastavení equotipu na LKG a ocel. Další porovnání měření proběhlo se stacionárním měřením tvrdosti HB dle Brinella, které mělo prokázat správnost měření pomocí equotipu v nastavení pro měření LLG. Výsledné hodnoty pro odlitek V1 jsou zaznamenány v grafech 1 až 3.



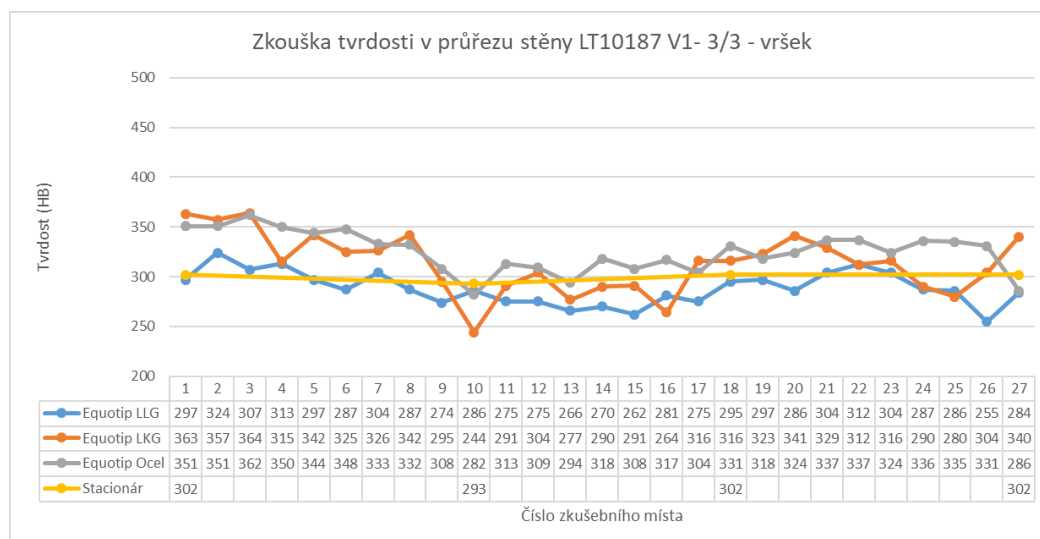
Graf 1 Tvrdost v průřezu stěny pro vzorek LT10187 V1 1/3

Z grafu 1 je patrné, že se tvrdost zjištěná stacionárním tvrdoměrem přibližuje k hodnotám zjištěným pomocí equotipu v nastavení pro ocel nikoliv pro LLG.



Graf 2 Tvrđost v průřezu stěny pro vzorek LT10187 V1 2/3

Z grafu 2 je patrné, že se tvrdost zjištěná stacionárním tvrdoměrem přibližuje k hodnotám equotipu v nastavení pro LLG.



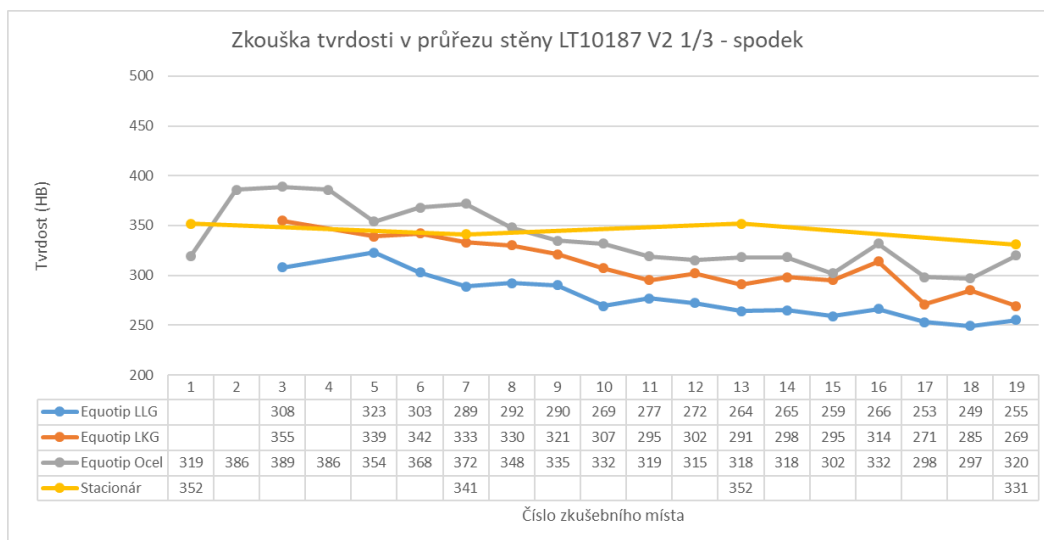
Graf 3 Tvrđost v průřezu stěny pro vzorek LT10187 V1 3/3

Z grafu 3 je patrné, že se tvrdost zjištěná stacionárním tvrdoměrem přibližuje nejvíce k hodnotám equotipu v nastavení pro LLG.

Měření tvrdosti v průřezu pro první odlitek V1 pomocí equotipu v nastavení LLG neprokázalo naprostou shodu se stacionárním měřením tvrdosti dle Brinella, neboť se u měření vzorku s označím LT10187 V1-1/3 hodnoty zjištěné stacionárním měřením přibližovaly k hodnotám získaných equotipem v nastavení pro ocel, nikoliv v nastavení v LLG.

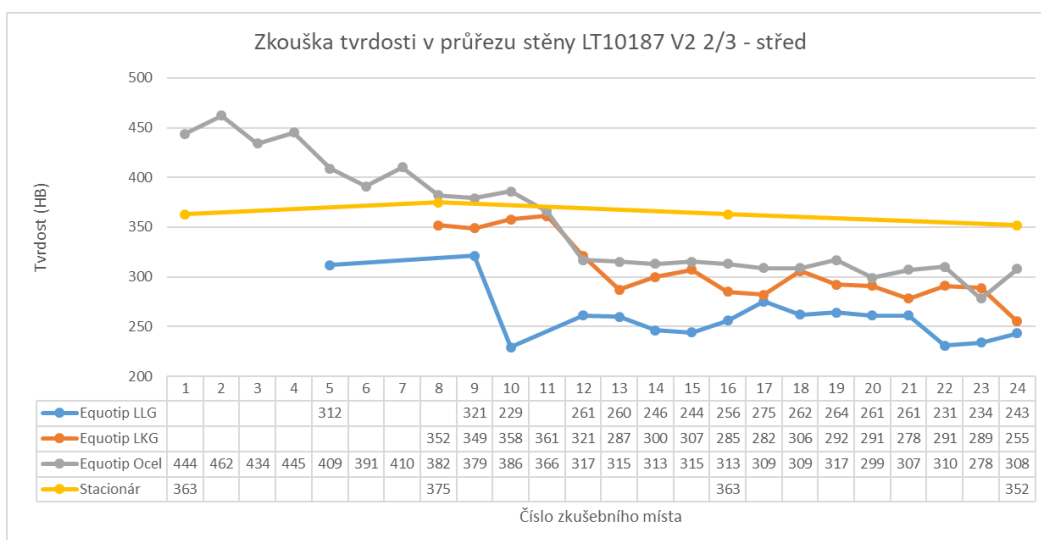
## 8.1.2 Měření pro odlitek V2

Měření pro odlitek V2 a následné srovnání equotipu v nastavení pro LLG se stacionárním tvrdoměrem probíhalo stejně jako pro odlitek V1. Výsledné hodnoty jsou znázorněny v grafech 4-6.



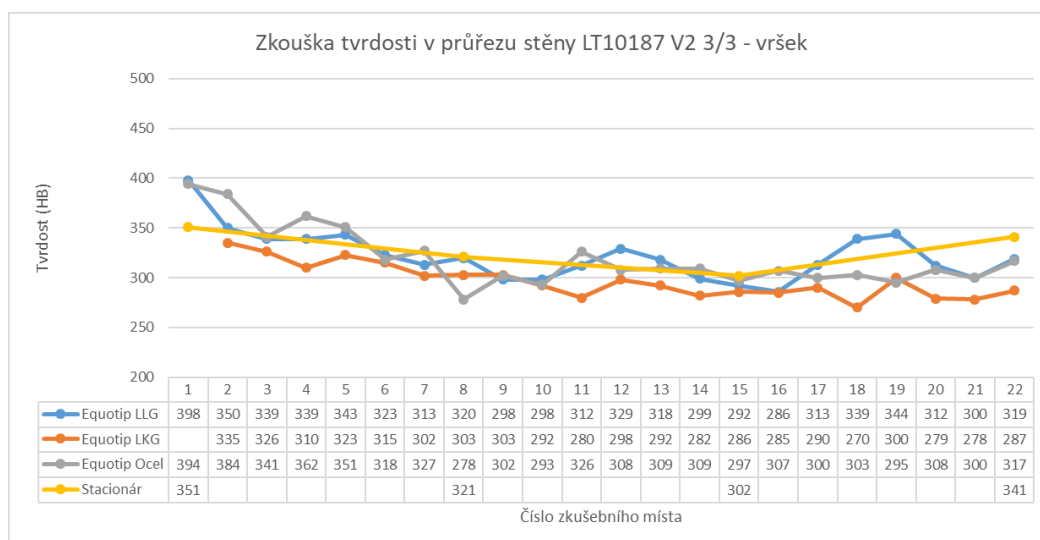
Graf 4 Tvrdost v průřezu stěny pro vzorek LT10187 V2 1/3

Z grafu 4 je patrné, že se hodnoty zjištěné pomocí stacionárního měření tvrdosti přibližují k hodnotám equotipu v nastavení pro ocel, s equotipem v nastavení pro LLG se stacionární měření významně liší.



Graf 5 Tvrdost v průřezu stěny pro vzorek LT10187 V2 2/3

Stacionární měření se dle grafu 5 nepřibližuje k žádným hodnotám zjištěným pomocí equotipu. Měření equotipem v nastavení LLG vykazuje značně velké odchylky od stacionárního měření.



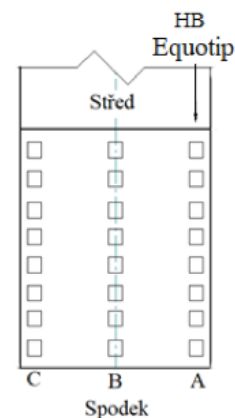
Graf 6 Tvrdost v průřezu stěny pro vzorek LT10187 V2 3/3

Z grafu 6 je patrné, že se stacionární měření nejlépe přibližuje k měření pomocí equotipu v nastavení pro LLG.

Ani měření pro odlitek V2 neprokázalo naprostou shodu mezi stacionárním měřením a měření pomocí equotipu v nastavení LLG. Hodnoty z měření vzorku LT10187 V2 2/3 se nepřibližovaly význačně k žádným hodnotám.

## 8.2 Zkouška tvrdosti v podélném průřezu odlitku

Další měření tvrdosti probíhalo po délce vzorku. Celý vzorek byl rozdělen v podélném směru do tří sloupců s označením A, B, C, viz obr. 21 a na každém tomto sloupci probíhalo 11 měření ve stejných intervalech vzdálenosti.

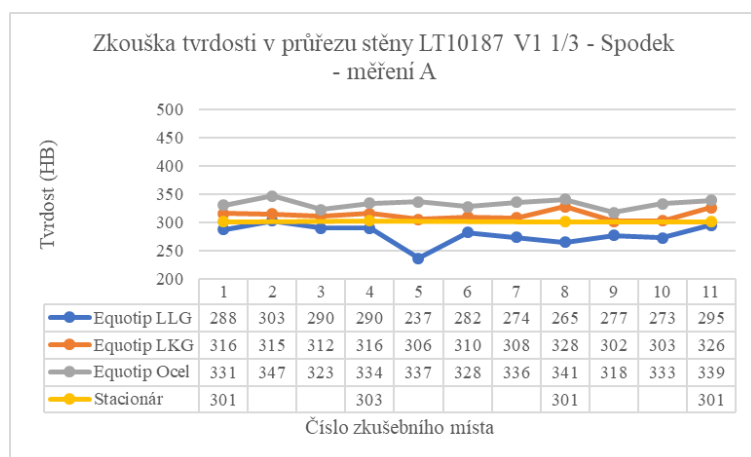


Obr.21 Schéma měření tvrdosti po délce vzorku

### 8.2.1 Měření pro odlitek V1

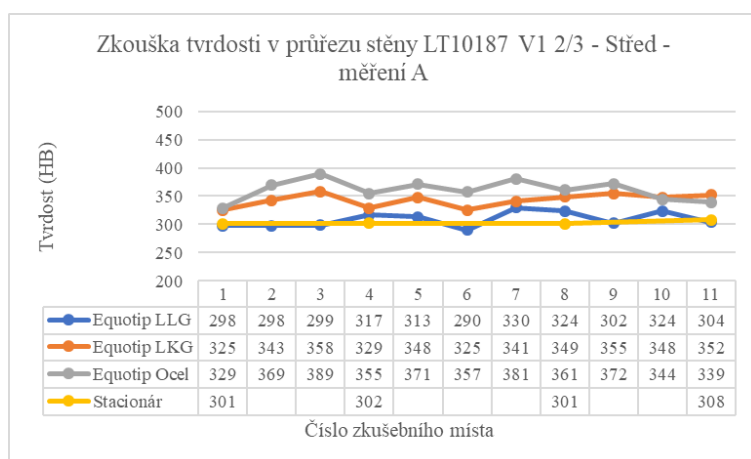
Naměřené hodnoty pomocí equotipu, v nastavení pro LLG, se srovnaly s nastavením pro LKG a ocel. Poslední srovnání proběhlo se stacionárním měřením tvrdosti, které mělo za úkol prokázat jaké nastavení equotipu je pro tuto jakost LLG správné.

Hodnoty měření sloupců A, B, C pro vzorky z odlitku V1 jsou znázorněny v grafech 7 až 15.



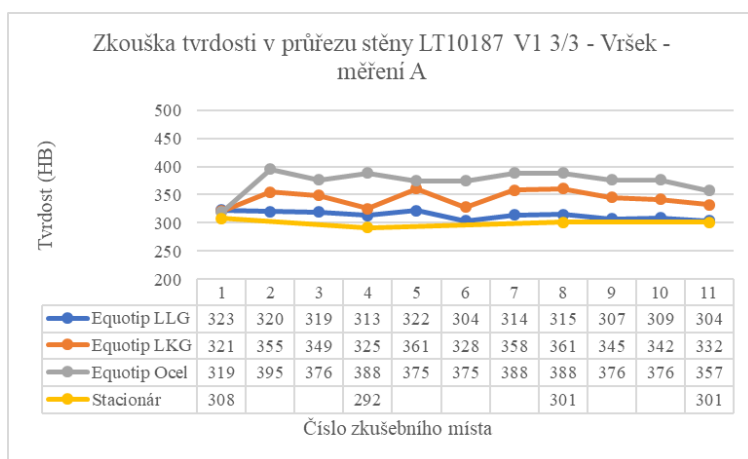
**Graf 7 Měření tvrdosti po délce LT10187 V1 1/3 – spodek – měření A**

Z grafu 7 je patné, že se hodnoty získané měřením pomocí stacionárního měření tvrdosti HB nejvíce shodují s equotipem v nastavení pro LKG.



**Graf 8 Měření tvrdosti po délce LT10187 V1 2/3 – střed – měření A**

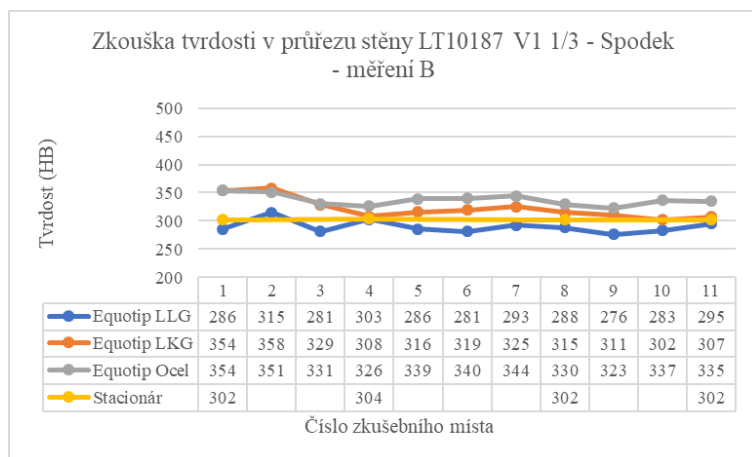
Z grafu 8 je patné, že se hodnoty získané měřením pomocí stacionárního měření tvrdosti HB nejvíce shodují s equotipem v nastavení pro LLG.



**Graf 9 Měření tvrdosti po délce LT10187 V1 3/3 – vršek – měření A**

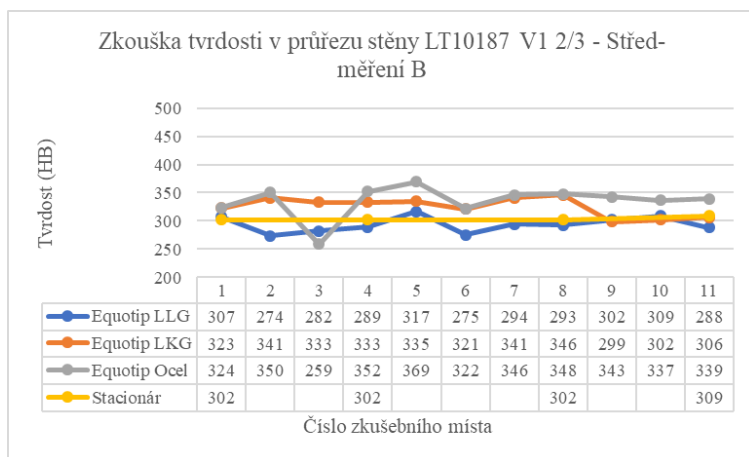
Z grafu 9 je patné, že se hodnoty získané měřením pomocí stacionárního měření tvrdosti HB nejvíce shodují s equotipem v nastavení pro LLG.





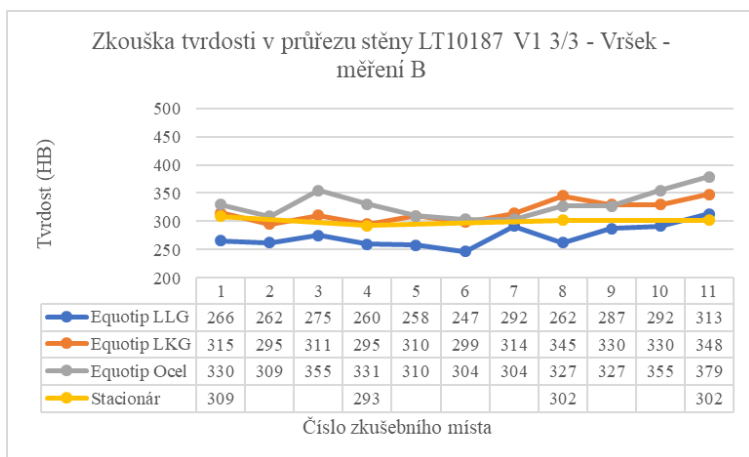
**Graf 10 Měření tvrdosti po délce LT10187 V1 1/3 – spodek – měření B**

Z grafu 10 je patné, že se hodnoty získané měřením pomocí stacionárního měření tvrdosti HB nejvíce shodují s equotipem v nastavení pro LLG.



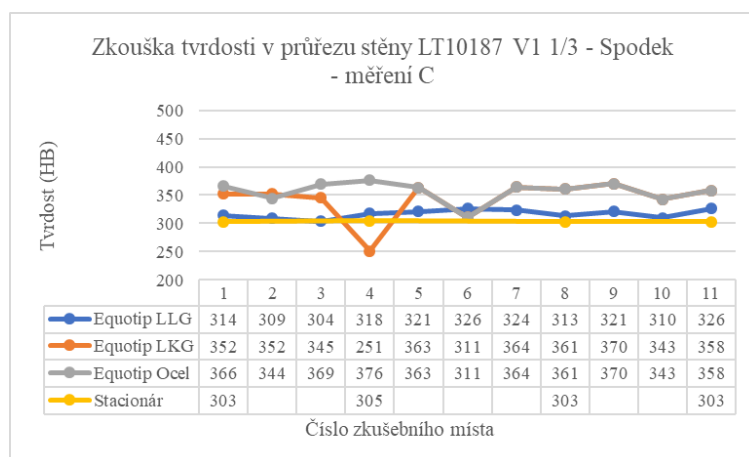
**Graf 11 Měření tvrdosti po délce LT10187 V1 2/3 – Střed – měření B**

Z grafu 11 je patné, že se hodnoty získané měřením pomocí stacionárního měření tvrdosti HB nejvíce shodují s equotipem v nastavení pro LLG.



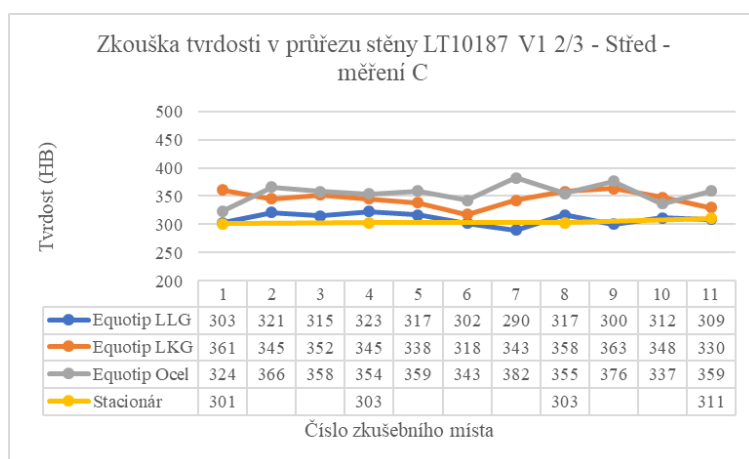
**Graf 12 Měření tvrdosti po délce LT10187 V1 3/3 – vršek – měření B**

Z grafu 12 je patné, že se hodnoty získané měřením pomocí stacionárního měření tvrdosti HB nejvíce shodují s equotipem v nastavení pro LKG.



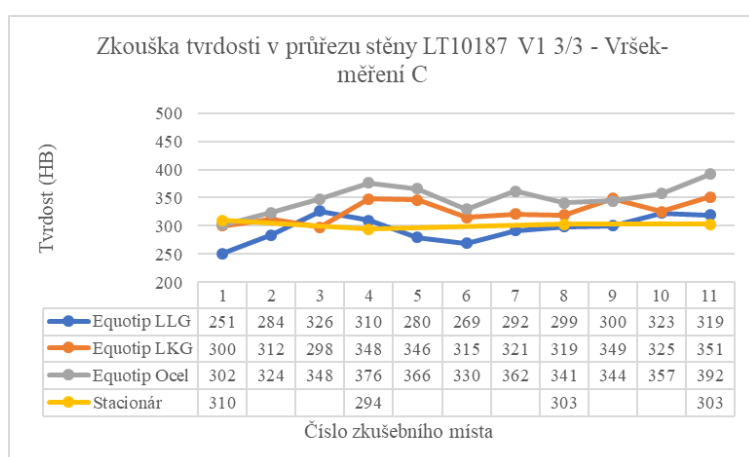
**Graf 13 Měření tvrdosti po délce LT10187 V1 1/3 – spodek  
– měření C**

Z grafu 13 je patrné, že se hodnoty získané měřením pomocí stacionárního měření tvrdosti HB nejvíce shodují s equotipem v nastavení pro LLG.



**Graf 14 Měření tvrdosti po délce LT10187 V1 2/3 – střed  
– měření C**

Z grafu 14 je patrné, že se hodnoty získané měřením pomocí stacionárního měření tvrdosti HB nejvíce shodují s equotipem v nastavení pro LLG.



**Graf 15 Měření tvrdosti po délce LT10187 V1 3/3 – vršek  
– měření C**

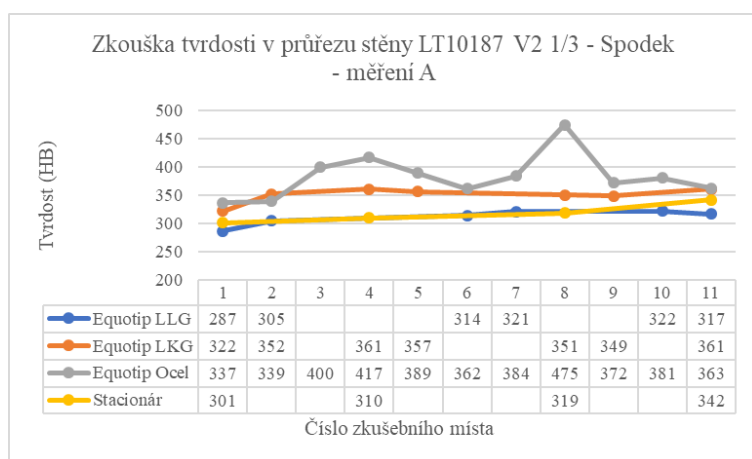
Z grafu 15 je patrné, že se hodnoty získané měřením pomocí stacionárního měření tvrdosti HB s malými odchylkami nejvíce shodují s equotipem v nastavení pro LLG.

Měření tvrdosti po délce odlitku u odlitku V1 pomocí equotipu v nastavení pro LLG prokázalo shodu s kontrolním měřením pomocí stacionárního tvrdoměru. Pouze u měření 10187 V1 1/3 – měření A a u měření LT10187 V1 1/3 – vršek – měření B equotip v LLG vykazoval mírné odchylky od stacionárního měření, tudíž nelze konstatovat naprostou shodu mezi stacionárním měřením a měřením pomocí equotipu v nastavení LLG.

## 8.2.2 Měření pro odlitek V2

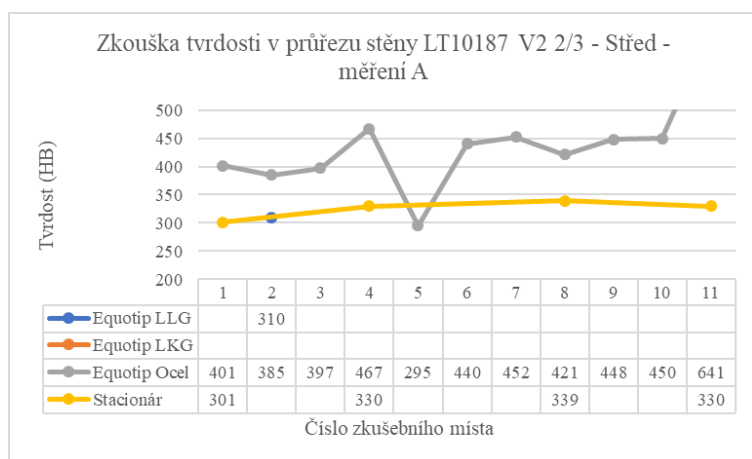
Naměřené hodnoty pomocí equotipu, v nastavení pro LLG se srovnaly s nastavením pro LKG a ocel. Poslední srovnání proběhlo se stacionárním měřením tvrdosti, které mělo za úkol prokázat jaké nastavení equotipu je pro tuto jakost LLG správné.

Hodnoty měření sloupců A, B, C pro vzorky z odlitku V1 jsou znázorněny v grafech 16 až 24.



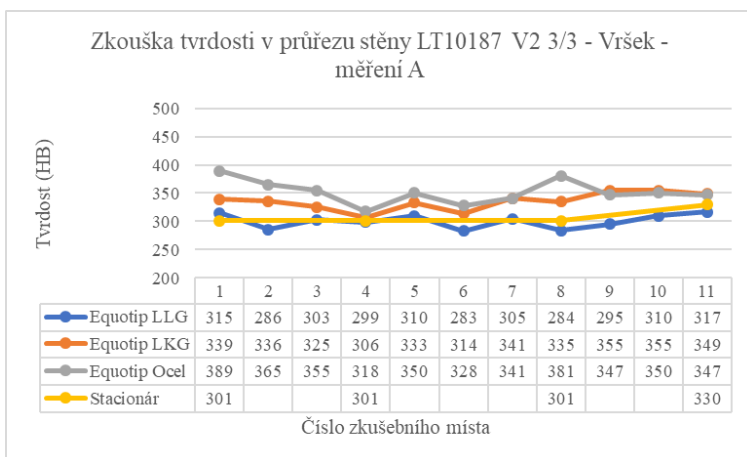
Z grafu 16 je patrné, že se naměřené hodnoty pomocí stacionárního měření nejvíce shodují s equotipem v nastavení pro LLG.

**Graf 16 Měření tvrdosti po délce LT10187 V2 1/3 – spodek – měření A**



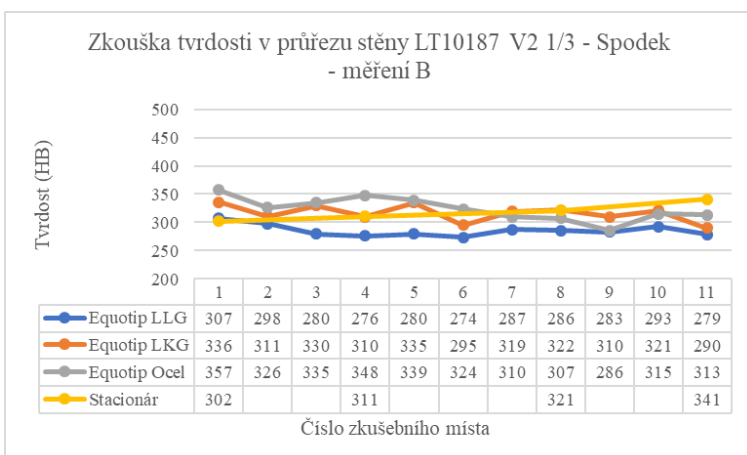
Z grafu 17 není možné porovnat podobnost hodnot stacionárního měření a nastavení equotipu pro LKG a LLG. V nastavení pro LKG a LLG byly hodnoty mimo rozsah měření kromě jednoho bodu.

**Graf 17 Měření tvrdosti po délce LT10187 V2 2/3 – střed – měření A**



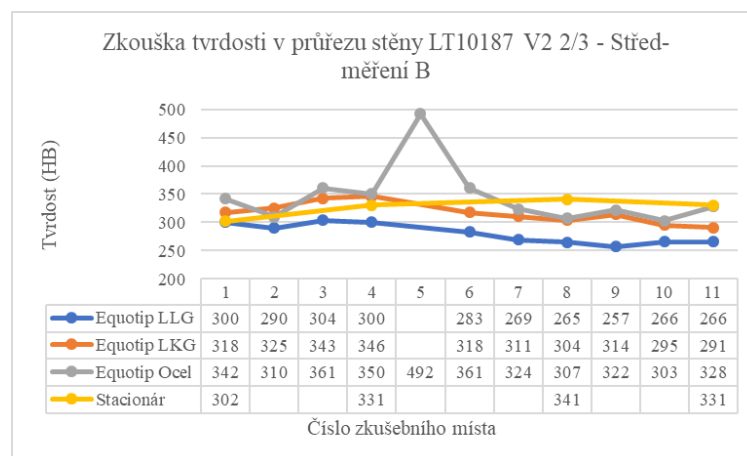
**Graf 18 Měření tvrdosti po délce LT10187 V2 3/3 – vršek – měření A**

Z grafu 18 je patrné, že se naměřené hodnoty pomocí stacionárního měření nejvíce shodují s equotipem v nastavení pro LLG.



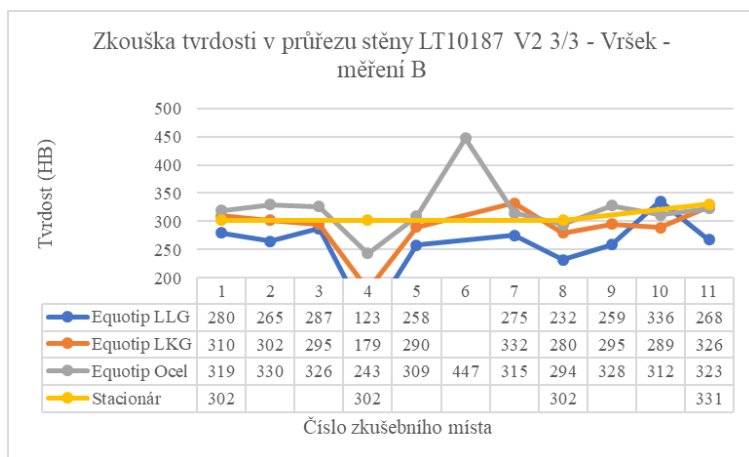
**Graf 19 Měření tvrdosti po délce LT10187 V2 1/3 – spodek – měření B**

Z grafu 19 je patrné, že se naměřené hodnoty pomocí stacionárního měření nejvíce shodují s equotipem v nastavení pro LKG.



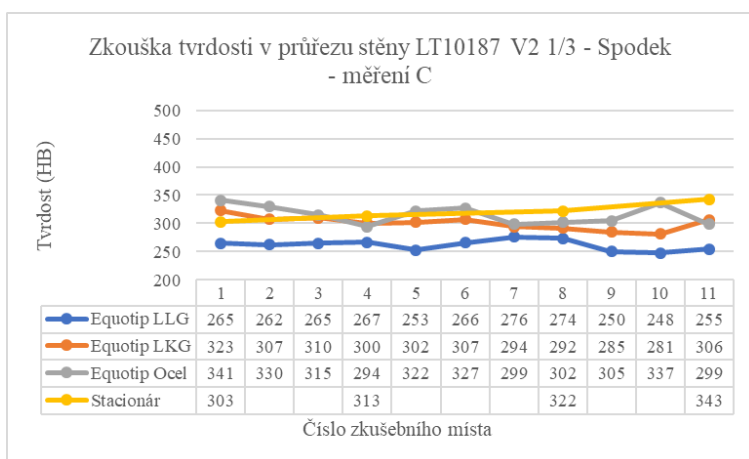
**Graf 20 Měření tvrdosti po délce LT10187 V2 2/3 – střed – měření B**

Z grafu 20 je patrné, že se naměřené hodnoty pomocí stacionárního měření nejvíce shodují s equotipem v nastavení pro LKG.



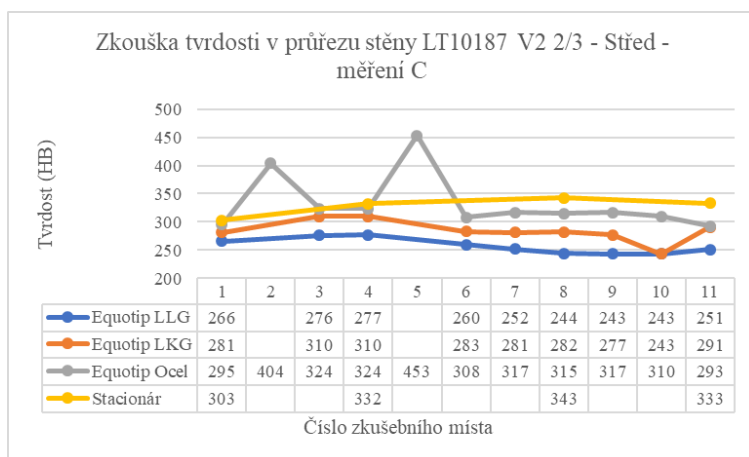
**Graf 21 Měření tvrdosti po délce LT10187 V2 3/3 – vršek – měření B**

Z grafu 21 je patrné, že se naměřené hodnoty pomocí stacionárního měření nejvíce shodují s equotipem v nastavení pro LKG avšak měření v bodě 4 vykazuje značně velké odchylky.



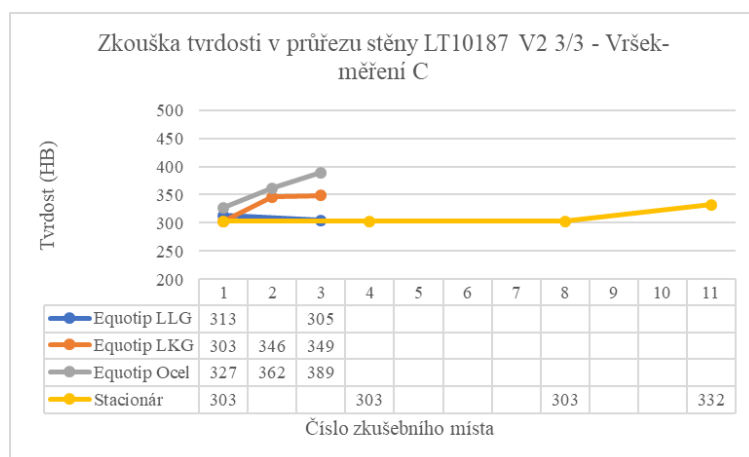
**Graf 22 Měření tvrdosti po délce LT10187 V2 1/3 – spodek – měření C**

Z grafu 22 je patrné, že se naměřené hodnoty pomocí stacionárního měření nejvíce shodují s equotipem v nastavení pro LKG a v nastavení pro ocel.



**Graf 23 Měření tvrdosti po délce LT10187 V2 2/3 – střed – měření C**

Z grafu 23 je patrné, že se naměřené hodnoty pomocí stacionárního měření nejvíce shodují s equotipem v nastavení pro ocel, avšak u měření č. 2 a č. 5 dosahují velké odchylky.



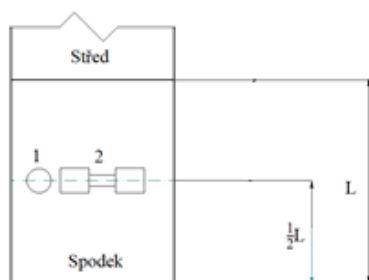
Z grafu 24 nelze jednoznačně určit shodu mezi stacionárním měřením a měřením pomocí equotipu v různém nastavení. Důvodem nezískání hodnoty měření je tvrdost mimo rozsah stupnice equotipu.

**Graf 24 Měření tvrdosti po délce LT10187 V2 3/3 – vršek – měření C**

U měření tvrdosti po délce u odlitku V2 nelze konstatovat správnost měření pomocí equotipu v nastavení LLG, protože docházelo často k neshodě v hodnotách mezi stacionárním měřením.

### 8.3 Analýza meze pevnosti

Analýza meze pevnosti se prováděla pomocí statické tahové zkoušky na vzorcích z odlitků V1 a V2, tedy na spodku, středu a vršku. Z každého vzorku byly vyrobeny dvě zkušební tyče dle normy ČSN EN ISO 6892-1. První zkušební trhací tyč byla vyrobena ve směru kolmém k rozřezu odlitku a druhá zkušební tyč byla vyrobena ve směru kolmém k povrchu odlitku. Schéma umístění zkušebních tyčí je znázorněno na obr. 22.



**Obr. 22 Umístění zkušebních tyčí ve spodním výřezu z odlitku**



**Obr. 23 Přetržené zkušební tyče pro spodek odlitku V1**

U zkušebních tyčí z odlitků V1 a V2 došlo k přetržení a ke vzniku křehkého lomu, tento lom je znázorněn na obr. 23, konkrétně pro zkušební tyč ze spodku odlitku V1 s označením 2.

Výsledné hodnoty meze pevnosti v tahu pro odlitky V1 a V2 jsou zaznamenány v tab. 4.

**Tab. 4 Výsledné hodnoty pevnosti v tahu**

Pevnost v tahu - Rm [MPa]		
Číslo vzorku	Pro odlitek V1 [13]	Pro odlitek V2 [14]
1/3-1	548,3	440,1
1/3-2	420,1	<b>544</b>
2/3-1	<b>596,9</b>	451,9
2/3-2	<b>562,9</b>	<b>504,8</b>
3/3-1	365,8	252,3
3/3-2	489,2	419,2

Z hodnot v tab. 4 je patrné, že největší pevnost v tahu pro odlitek V1 měly zkoušky 2/3-1 a 2/3-2 ze středové části. U druhého odlitku byla největší pevnost v tahu zaznamenána u zkoušky 1/3-2 ze spodní části odlitku a zkoušky 2/3-2 ze středové části. Odchyly mezi jednotlivými naměřenými hodnotami lze přisoudit heterogenní struktuře základní matrice a různé hrubosti grafitických lamel.

## 9 Rozbor chemického složení a mikrostruktury odlitků V1 a V2

V následujících kapitolách bude proveden rozbor chemického složení odebraných zkušebních vzorků z odlitků V1 a V2. Dále bude prověřena mikrostruktura z oblasti rozřezu pro zkoušku tahem viz obr. 22.

### 9.1 Chemické složení odlitků V1 a V2

Na vzorcích vyjmutých z materiálu pro zkoušku tahem vyřezaném z obou odlitků bylo ověřeno chemické složení, které je uvedeno v tab. 5. Naměřené chemické složení má určitou odchylku od tavbové analýzy z důvodu spektrometrického rozboru tuhého roztoku s vyloučenými lupínky grafitu. Tavbová analýza se provádí z rychle ztuhlého vzorku, kde není vyloučen grafit ze základní matrice.

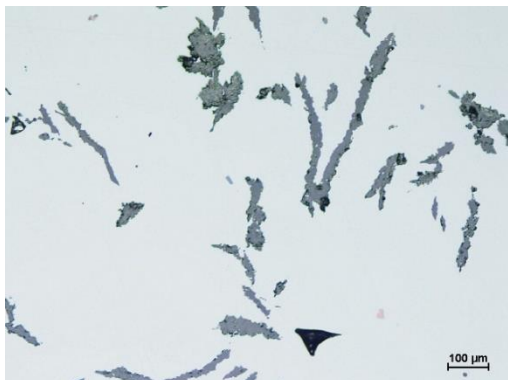
Tab. 5 Chemické složení odlitků V1 a V2

Chemické složení odlitků V1 a V2 [hm%]						
Prvek	Odlitek V1			Odlitek V2		
	V1 1/3	V1 2/3	V1 3/3	V2 1/3	V2 2/3	V2 3/3
<b>C</b>	3,53	3,67	3,6	2,07	2,32	2,5
<b>Mn</b>	0,77	0,77	0,86	0,951	0,795	0,93
<b>Si</b>	1,51	1,44	1,45	1,92	2,11	1,92
<b>P</b>	0,031	0,041	0,051	0,079	0,035	0,073
<b>S</b>	0,021	0,024	0,065	0,04	0,017	0,01
<b>Cr</b>	0,18	0,2	0,22	0,686	0,508	0,713
<b>Ni</b>	0,27	0,26	0,26	0,263	0,286	0,261
<b>Cu</b>	0,63	0,62	0,62	0,91	1,07	0,93
<b>Mo</b>	0,23	0,3	0,34	0,32	0,17	0,32
<b>V</b>	0,014	0,006	0,015	0,016	0,008	0,015
<b>Ti</b>	0,013	0,011	0,014	0,017	0,013	0,014
<b>Sn</b>	0,008	0,009	0,01	0,007	0,005	0,007
<b>Al</b>	0,008	0,010	0,009	0,007	0,006	0,008
<b>Co</b>	0,004	0,004	0,003	0,005	0,005	0,005
<b>Sb</b>	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001
<b>B</b>	0,0001	0,0001	0,0001	0,0011	0,001	0,0013
<b>Ca</b>	0,0001	0,0001	0,0001	0,0011	0,001	0,0013
<b>As</b>	0,002	0,003	0,003	0,003	0,002	0,002
<b>Zn</b>	0,006	0,007	0,007	0,006	0,008	0,008
<b>Bi</b>	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
<b>Pb</b>	0,003	0,003	0,003	0,002	0,002	0,002
<b>Ce</b>	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001

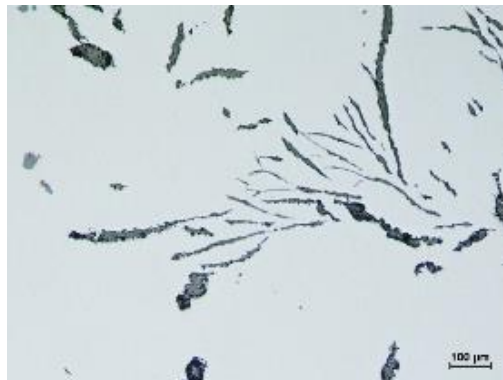


## 9.2 Rozbor mikrostruktury

Pro rozbor mikrostruktury byly použity závitové hlavy z tyčí pro zkoušku tahem. Vzorky byly následně broušeny, leštěny a leptány. Z každého vzorku jsou ukázány 2 reprezentativní mikrostruktury. Na obr. 24 a obr. 25 jsou ukázány reprezentativní mikrostruktury obou odlitků v neleptaném stavu.



Obr. 24 LT10187 V1 3/3; rozložení lupínkového grafitu u odlitku V1 v neleptaném stavu; zvětšeno 100x



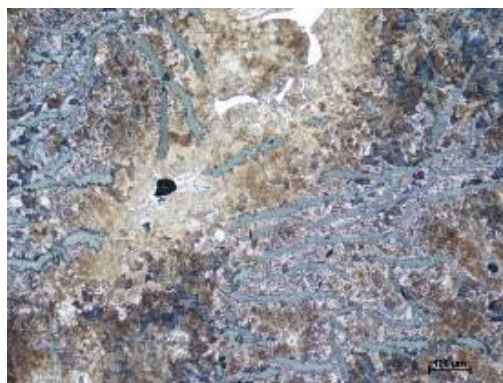
Obr. 25 LT10187 V2 3/3; rozložení lupínkového grafitu u odlitku V2 v neleptaném stavu; zvětšeno 100x

### 9.2.1 Mikrostruktura odlitku V1

Snímky zachycující mikrostrukturu pro odlitek V1 jsou znázorněny na obr. 26 až obr.31. Popis mikrostruktury je uveden pod každým obrázkem.



Obr. 26 LT10187 V1 1/3-1; na snímku zachycen perlit, bainit a malé množství feritu, zvětšeno 100x



Obr.27 LT10187 V1 1/3-2; na snímku zachycen bainit, perlit a v oblastech drobnějších ledeburit, zvětšeno 100x



**Obr.28** LT10187 V1 2/3-1; na snímku zachycen perlit, malé množství bainitu, stopové množství feritu a malé množství hrubého ledeburitu; zvětšeno 100x



**Obr. 29** LT10187 V1 2/3-2; na snímku zachycena směs perlitu a bainitu, stopové množství feritu a ledeburit; zvětšeno 100x



**Obr. 30** LT10187 V1 3/3-1; na snímku zachycen perlit, bainit, ledeburit v oblastech drobnějších karbidů a stopové množství feritu; zvětšeno 100x



**Obr. 31** LT10187 V1 3/3-2; na snímku zachycen perlit, bainit, ledeburit v oblastech drobnějších karbidů a stopové množství feritu; zvětšeno 100x

Dále se ve vzorcích z prvního odlitku, které byly zkoumány z hlediska mikrostruktury vyskytuje ojediněle cementit ve formě hrubších karbidů.

## 9.2.2 Mikrostruktura odlitku V2

Snímky zachycující mikrostrukturu pro odlitek V2 jsou znázorněny na obr. 32 až obr.37. Popis mikrostruktury je uveden pod každým obrázkem.



Obr.32 LT10187 V2 1/3-1; na snímku zachycen perlit, malé množství hrubého cementitu netvořící síťoví a menší výskyt jemných karbidů  $Fe_3C$ ; zvětšeno 100x



Obr.33 LT10187 V2 1/3-2; na snímku zachycen perlit, malé množství hrubého cementitu netvořící síťoví a menší výskyt jemných karbidů  $Fe_3C$ ; zvětšeno 100x



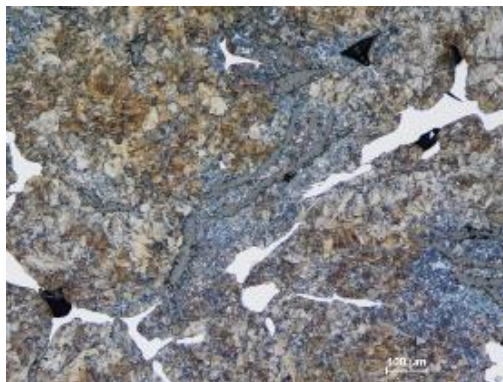
Obr.34 LT10187 V2 2/3-1; na snímku zachycen perlit, malá místa hrubého cementitu netvořící síťoví, menší výskyt jemných karbidů  $Fe_3C$ , nitrid, sulfid; zvětšeno 100x



Obr.35 LT10187 V2 2/3-2; na snímku zachycen perlit, malá místa hrubého cementitu netvořící síťoví, malé shluky jemných karbidů  $Fe_3C$ ; zvětšeno 100x



Obr.36 LT10187 V2 3/3-1; na snímku zachycen perlit, malá místa hrubého cementitu netvořící síťoví, malé shluky jemných karbidů  $Fe_3C$ ; zvětšeno 100x



Obr.37 LT10187 V2 3/3-2; na snímku zachycen perlit, malá místa hrubého cementitu netvořící síťoví, malé shluky karbidů  $Fe_3C$ ; zvětšeno 100x

## 10 Simulace tvrdosti odlitku se změnou chemického složení

Před simulacemi byla provedena analýza vlivů legujících prvků dle literatury [1] pro zkušební tyče o průměru 30 mm a délce 50 mm pro 3 výchozí litiny o různém chemickém složení na kterých byla následně zkoumána taková kombinace legujících prvků, která zaručovala výslednou tvrdost v zadaném intervalu 240–280 HB. Vliv základních legujících prvků v litině s lupínkovým grafitem na tvrdost HB je zaznamenán v tab. 6. V tabulce jsou zvýrazněny ty kombinace, které dosahovaly největších hodnot tvrdosti v zadaném intervalu.

Tab. 6 Vliv legujících prvků v LGG na mechanické vlastnosti [1]

Vliv legujících prvků v LGG na mechanické vlastnosti						
	Cr	Mo	Cu	Ni	V	HB
Výchozí litina C=3,25% Si=1,93% P=0,11% Sc=0,91%	0,61	0,56	-	-	-	262
	0,49	-	-	1,45	-	255
	-	0,47	-	-	0,13	255
	-	0,49	-	0,66	-	269
	-	0,54	0,65	-	-	269
	0,49	0,43	-	1,45	-	285
	0,47	0,43	0,52	-	-	248
Výchozí litina C=3,0-3,3% Si=1,1-1,6% P=0,4-0,5%	Cr	Mo	Cu	Ni	V	HB
	-	0,25	-	2,52	-	268
	0,71	-	-	2,19	-	284
	0,38	-	1	-	-	260
	0,7	-	2,29	-	-	293
	-	0,54	-	0,79	-	255
	-	0,76	-	1,16	-	284
	-	0,63	1,16	-	-	273
-	0,75	1,63	-	-	296	
Výchozí litina C=2,6-2,8% Si=1,5-2,5% P=0,13%	Cr	Mo	Cu	Ni	V	HB
	-	-	-	3,63	-	268
	-	-	3,01	-	-	258
	0,35	-	-	1,18	-	252
	0,63	-	-	2,67	-	283
	0,33	-	1,23	-	-	264
	0,58	-	2,11	-	-	274
	-	0,55	-	-	-	255
	-	0,74	-	-	-	268
	-	1,02	-	-	-	356
	-	0,62	-	0,84	-	280
	-	0,71	-	1,63	-	286
-	0,53	1,16	-	-	308	
-	0,74	1,4	-	-	312	

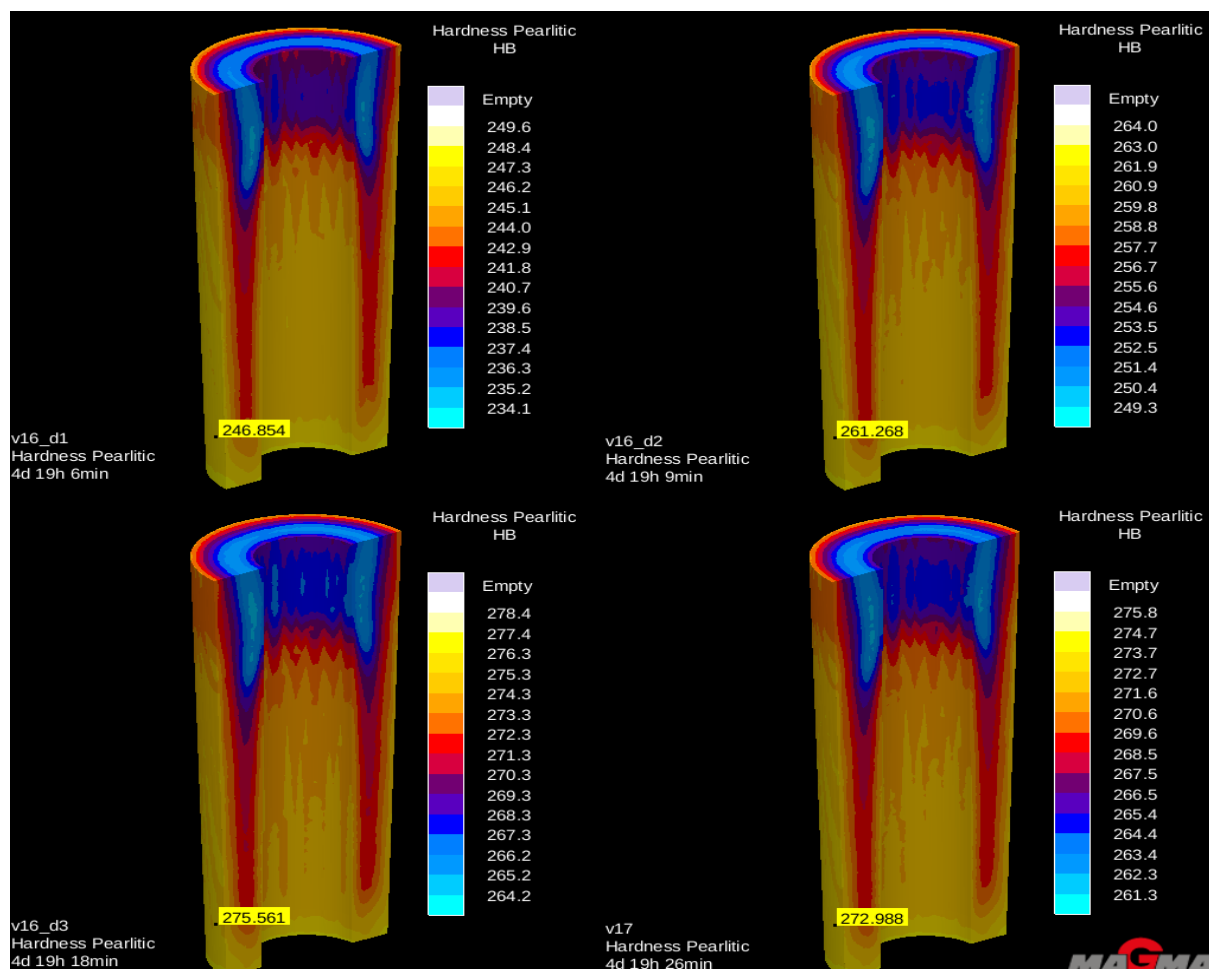
Pro zjištění vlivu změny chemického složení na tvrdost a pevnost v tahu v litém stavu byly provedeny simulace v software MAGMA v5.3 s modulem Iron. Byla vybrána čtyři chemická složení s různou koncentrací molybdenu:

- C:3,00%, Si:1,60%, P:0,40%, Mo:0,25%, Ni:2,52%;
- C:3,25%, Si:1,93%, P:0,11%, Mo:0,49%, Ni:0,66%;
- C:2,70%, Si:1,80%, P:0,13%, Mo:0,62%, Ni:0,84%;
- C:2,70%, Si:1,80%, P:0,13%, Mo:0,74%.

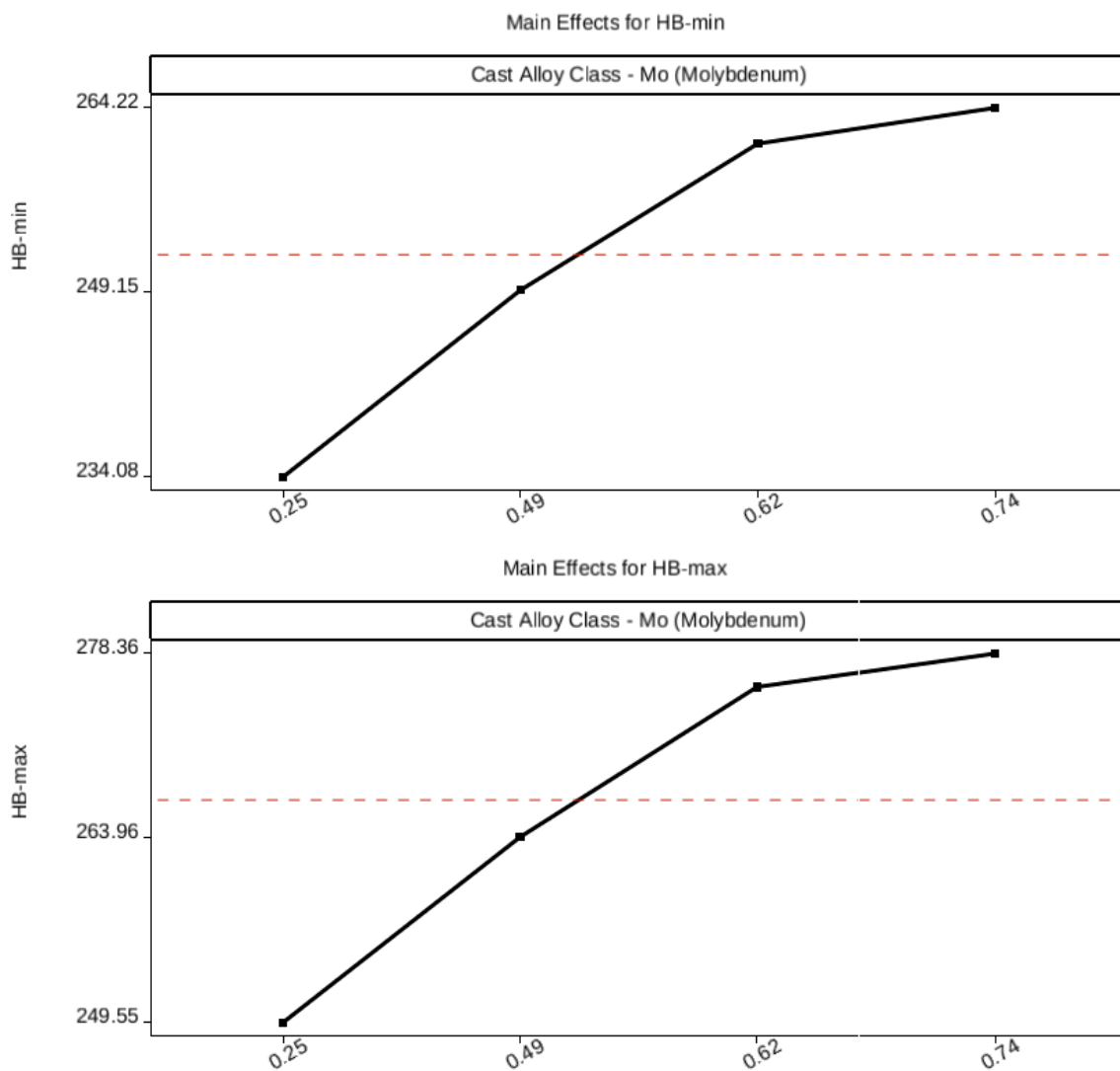
Výsledky simulace tvrdosti budou uvedeny v kapitole 10.1 a výsledky simulace pevnosti v tahu budou uvedeny v kapitole 10.2.

## 10.1 Simulace tvrdosti

Na obr. 38 jsou zobrazeny výsledky simulace tvrdosti v litém stavu pro chemická složení uvedená v kapitole 10 s různou koncentrací molybdeny. Výsledky jsou také přehledně zobrazeny grafu 25. Z výsledků simulace lze zjistit, že doba tuhnutí a chladnutí odlitku byla 4 dny 19 hodin a 9 minut.



Obr. 38 Výsledky simulace tvrdosti v sw. MAGMA v5.3

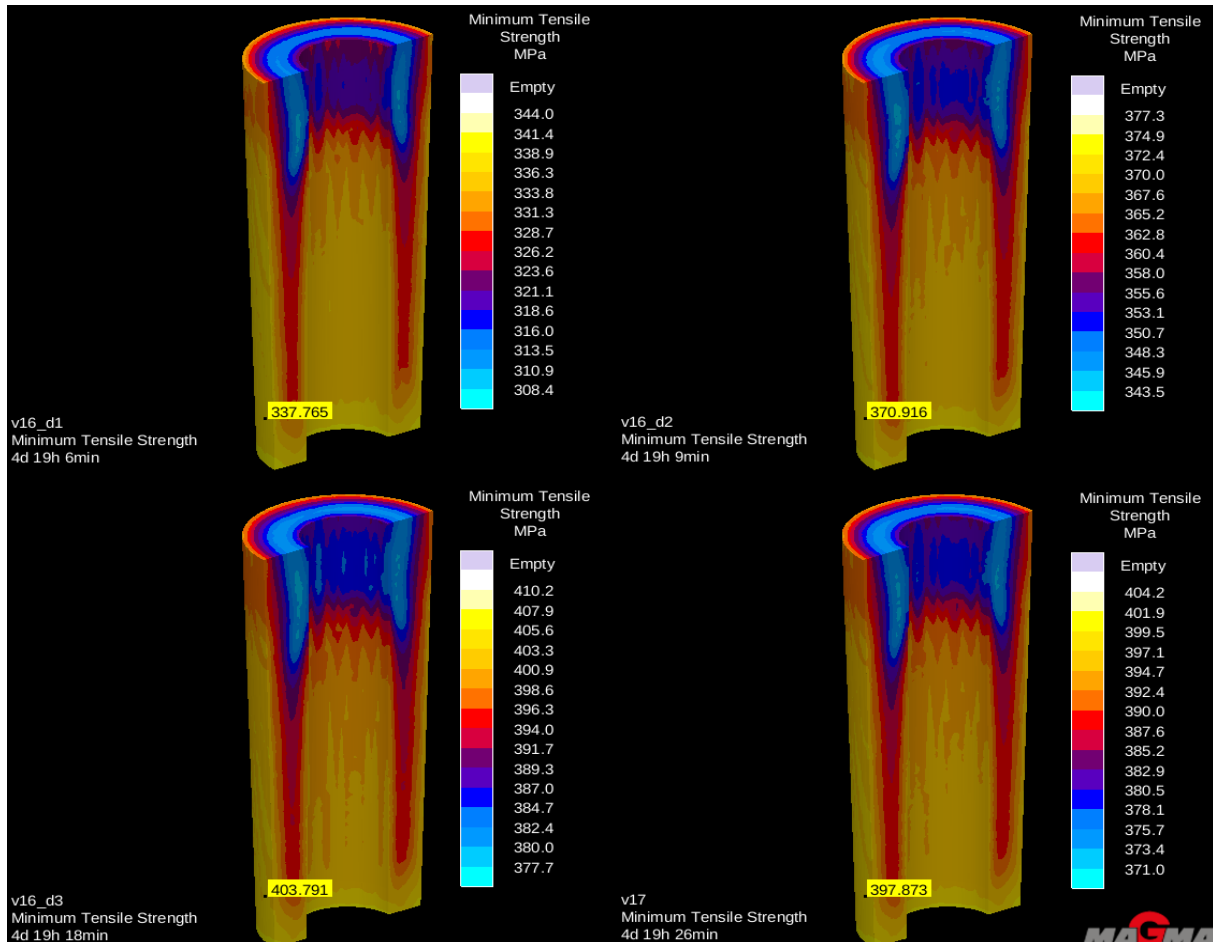


Graf 25 Znázornění efektu molybdenu na maximální a minimální tvrdost HB

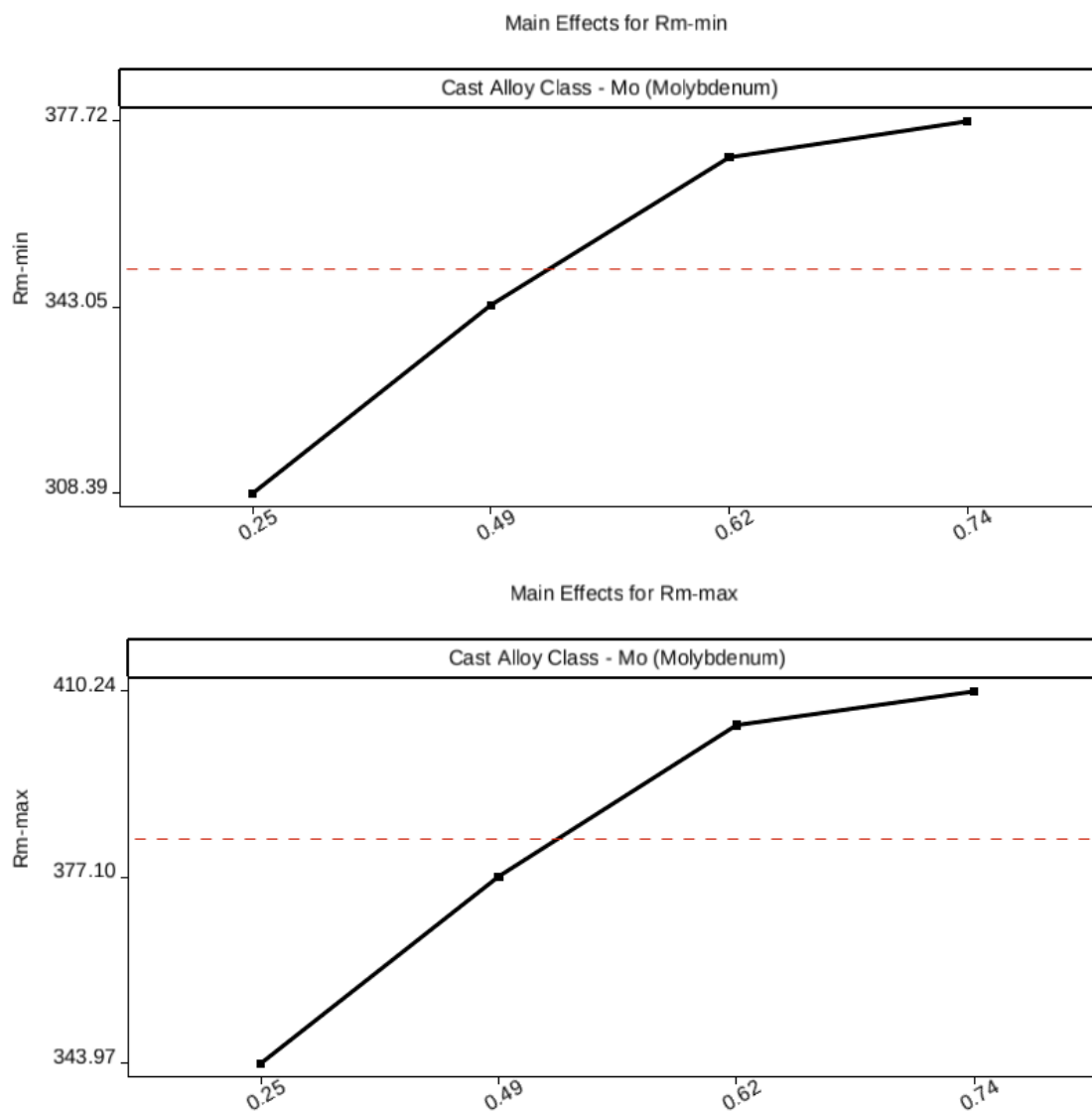
Z grafu 25 je zřejmé, že čím větší je obsah molybdenu v LLG, tím vyšší je tvrdost.

## 10.2 Simulace pevnosti v tahu

Z výsledků simulací dosažené maximální a minimální pevnosti v tahu uvedených na obr.39 a v grafu 26 je vidět, že molybden má vliv také na zvýšení pevnosti v tahu - čím vyšší koncentrace molybdenu v LLG, tím vyšší je pevnost v tahu.



Obr.39 Simulace ochlazování, maximální a minimální pevnosti v tahu



Graf 26 Znárodnění vlivu koncentrace molybdenu na maximální a minimální pevnost v tahu

Z grafu 26 je patrné, že čím větší obsah molybdenu v litině, tím úměrně roste i pevnost v tahu.



## 11 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo provést analýzu rozložení tvrdosti v průřezu a po délce, pevnosti v tahu a mikrostruktury po průřezu u odlitků z legované litiny s lupínkovým grafitem. Dále pak ze získaných výsledků vyhodnotit nejvhodnější chemické složení, které by vedlo k dosažení požadovaných mechanických vlastností bez nutnosti aplikace tepelného zpracování.

V teoretické části bylo provedeno seznámení se základní charakteristikou a výrobou litiny s lupínkovým grafitem, procesem výroby vzorků, na kterých byla později provedena analýza mechanických vlastností. Dále byl proveden rozbor vlivu legujících prvků na výsledný materiál. Další bod teoretické části zahrnoval druhy tepelného zpracování a jejich vlivy na LLG. V posledním oddíle teoretické části práce byly popsány metodiky měření mechanických vlastností.

Experimentální část zahrnovala výrobu odlitků dle požadavků zákazníka a jejich následné mechanické zkoušky, které měly za úkol zjistit vhodnost použití měření tvrdosti pomocí equotipu s nastavením LLG, kterou požadoval zákazník. Při výrobě odlitku V1 nevycházely hodnoty tvrdosti v litém stavu zjištěné pomocí equotipu, proto následovalo tepelné zpracování, ve formě kalení a popouštění. Následně bylo upraveno chemické složení pro odlitek V2 dle zkušeností metalurga a ekonomického hlediska. Měření tvrdosti v litém stavu u odlitku V2 opět prokázalo nižší hodnoty, než byl požadavek a z tohoto důvodu bylo také u odlitku V2 zařazeno tepelné zpracování.

Mechanické zkoušky byly zahájeny zkouškami tvrdosti v průřezu. Hodnoty měření pomocí equotipu s nastavením pro LLG byly srovnány se stacionárním měřením tvrdosti. Při srovnání byla zjištěna odchylka mezi měřením stacionárním tvrdoměrem a měřením tvrdosti pomocí equotipu v nastavení pro LLG. Hodnoty získané equotipem v nastavení LLG se v některých případech významně lišily od hodnot získaných ze stacionárního měření. Další měření tvrdosti probíhalo po délce odlitku. Výsledky měření získané stacionárním tvrdoměrem se neshodovaly s hodnotami equotipu v nastavení LLG. Z výsledků zjištěných měřením v průřezu odlitku a měřením po délce odlitku lze konstatovat, že equotip v nastavení pro měření LLG není pro tuto jakost LLG nejvhodnějším měřicím zařízením.

Další mechanickou zkouškou byla tahová zkouška, kdy se zjišťovala mez pevnosti v tahu. Pro zjištění meze pevnosti v tahu byly vyrobeny, z každé části odlitku, dvě normované zkušební trhací tyče, jedna v kolmém směru k povrchu a druhá v kolmé směru k rozřezu.

V poslední řadě byl proveden rozbor chemického složení každého odlitku, kde je ukázán rozdíl v koncentracích legujících prvků v litině a rozbor mikrostruktury vzorků z každé části odlitků V1 viz kapitola 9.2.1 a V2 viz kapitola 9.2.2.

Z důvodu nutnosti aplikace tepelného zpracování a tím zvýšení výrobních nákladů bylo nutné provést matematické simulace v sw. MAGMA v5.3 k ověření vlivu rostoucí koncentrace molybdenu na minimální a maximální tvrdost bez tepelného zpracování. Výsledek simulace prokázal, že v litém stavu lze dosáhnout zvýšení tvrdosti při koncentraci 0,74 % Mo u horní hranice zadaného intervalu 240 - 280 HB při dodržení podmínky jemných grafitických lamel v základní matici.

Dle uvedených závěrů lze konstatovat splnění zadaných cílů práce.

## 12 Použité zdroje

- [1] OTÁHAL, Vlastislav. *Šedá litina s lupínkovým grafitem, monografie*. Brno: Technicko-ekonomické poradenství, 2007.
- [2] MAZANCOVÁ, Eva. *Technické materiály I, kovové materiály*. Ostrava: Vysoká škola báňská – technická univerzita Ostrava, 2012.
- [3] ROUČKA, Jan. *Metalurgie litin I.vydání*. Brno : PC-DIR Real, 1998. 166 s. ISBN 80-214-1263-1.
- [4] ELKEM. [Online]. ©2018 [cit. 25.4.2018] Dostupné z: <https://www.elkem.com/foundry/ferrosilicon/>
- [5] COMMEXIM GROUP. [Online]. ©2018 [cit. 25.4.2018] Dostupné z: <http://www.commexim.com/Ferosilicium/>
- [6] LENOX PLUS. [Online]. ©2018 [cit. 25.4.2018] Dostupné z: <http://www.lenoxplus.cz/komodity-ferosilicium-str-20-1-3-2>
- [8] SKÁLOVÁ, Jana KOVAŘÍK, Rudolf, BENEDIKT, Vladimír. *Základní zkoušky kovových materiálů*. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2010. ISBN 97880-70434178.
- [9] TABOR, David. *The Hardeness of Metals*. Oxford. . ISBN 0 19850776-3.
- [10] PTÁČEK A KOL. *Nauka o materiálu I a II*. Cerm 2003.
- [11] PROCEQ. [Online]. ©2018 [cit. 25.4.2018] Dostupné z: <https://www.proceq.com/compare/equotip-portable-hardness-testing>
- [12] FRANK, Stefan. *Portable hardeness testing-principles and aplications*. Barcelona 2002.
- [13] Protokol o zkouškách odlitku LT10187 V1; č. protokolu: 561/2016
- [14] Protokol o zkouškách odlitku LT10187 V2; č. protokolu: 65/2017