

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA STROJNÍ**  
**ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**HODNOCENÍ KVALITY ODLITKŮ NA ZÁKLADĚ MATERIÁLOVÝCH  
CHARAKTERISTIK**

**EVALUATION OF CASTING QUALITY BASED ON MATERIALS  
CHARAKCTERISTICS**

AUTOR: Hájek Jiří  
STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství  
VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Čižmárová Elena, Ph.D.

**PRAHA 2018**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hájek** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **424052**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**  
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**  
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Hodnocení kvality odlitků na základě materiálových charakteristik**

Název bakalářské práce anglicky:

**Evaluation of casting quality based on materials characteristics**

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je posouzení kvality odlitků z litiny s lupinkovým grafitem, analýza přítomnosti vad a jejich klasifikace.

1. Literární rešerše v problematice.
2. Návrh metodického přístupu k řešení problematiky.
3. Provedení experimentu.
4. Vyhodnocení a zpracování naměřených dat.
5. Diskuse a závěry.

Seznam doporučené literatury:

1. NĚMEC, M., BEDNÁŘ, B., STUNOVÁ, B.: Teorie slévání. České vysoké učení technické v Praze, Česká technika - nakladatelství ČVUT, Praha : 2009. 218 s. ISBN 978-80-01-04395-0.
2. OTÁHAL, Vlastislav: Vady odlitků. Atlas vad. Železné a neželezné slitiny. 1. vyd. Brno: Metal Casting and Foundry Consult, Otáhal Vlastislav, Brno, Horská 27.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


**Ing. Elena Čižmárová, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

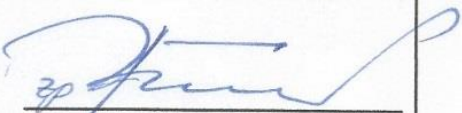
Datum zadání bakalářské práce: **03.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **30.07.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

  
Ing. Elena Čižmárová, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

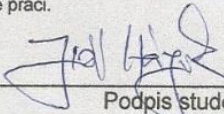
  
prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

23.4.18  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne: .....

.....

Podpis

## Anotace

Bakalářská práce se zabývá problematikou slévárenství, konkrétně odlitky z litiny s lupínkovým grafitem. Podstatou experimentální části bylo ověření, zda hodnocené odlitky splňují kvalitativní parametry vycházející z materiálových charakteristik. Materiálovými charakteristikami se rozumí hodnocení mikrostruktury včetně analýzy a klasifikace případného výskytu vad a dále také ověření mechanických vlastností. V práci byla provedena analýza mikrostruktury a pro ověření mechanických vlastností byla provedena zkouška tahem, zkouška rázem v ohybu metodou Charpy a měření tvrdosti.

## Klíčová slova

odlévání, vady odlitků, litina s lupínkovým grafitem, hodnocení mikrostruktury, mechanické zkoušky

## Annotation

Bachelor thesis is about problematics of casting focused on casts from gray cast iron with flake graphite. The target of experimental part of thesis were verification of qualitative parameters which were based on material characteristics of rated casts. Material characteristics includes microstructure analysis with defect detection and verification of mechanical properties. In the thesis was carried out microstructure analysis and tensile test, Charpy pendulum impact test and hardness measurement were performed to verify the mechanical properties.

## Keywords

casting, defects of casts, gray cast iron, microstructure analysis, mechanical tests

## Poděkování

Rád bych poděkoval všem osobám, které přispěly ke vzniku mé bakalářské práce svými radami a cennými podněty, bez kterých by tato práce nevznikla. Zejména pak svému vedoucímu práce Ing. Eleně Čižmárové, Ph.D. za konzultace a podnětné připomínky k tvorbě mé bakalářské práce.

# Obsah

Seznam použitých zkratk	8
Úvod	9
1. Teoretická část	10
1.1 Definice litiny, její rozdělení a vlastnosti	10
1.1.1 Definice litiny	10
1.1.2 Rozdělení litin	10
1.1.3 Litina s lupínkovým grafitem	11
1.1.4 Očkování litin	13
1.1.5 Hodnocení mikrostruktury litin dle normy EN ISO 945	14
1.2 Úvod do problematiky odlévání a vad odlitků	17
1.2.1 Definice odlitku a realizace odlévání	18
1.2.2 Příčiny vzniku vad odlitků a jejich prevence	20
1.2.3 Rozdělení vad odlitků	20
1.2.4 Typické vady vznikající očkováním	28
1.2.5 Parametry pro hodnocení kvality odlitků	29
2. Praktická část	30
2.1 Parametry použitého materiálu	30
2.2 Zkoumání mikrostruktury	31
2.2.1 Metalografický výbrus	31
2.2.2 Vyhodnocení mikrostruktury neleptaných vzorků	32
2.2.3 Vyhodnocení mikrostruktury leptaných vzorků	36
2.3 Experimentální ověření mechanických vlastností	39
2.4 Výsledky a diskuze zkoušek mechanických vlastností	40
2.4.1 Zkouška tahem	40
2.4.2 Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy	41
2.4.3 Zkouška tvrdosti dle Brinella	41
2.4.4 Souhrn zkoušek mechanických vlastností	43
3. Závěr	44
Citovaná literatura	45
Přílohy	46

## Seznam použitých zkratek

Zkratka	Jednotka	Význam
C	[-]	Uhlík
CCD	[-]	Zařízení s vázanými náboji
CO	[-]	Oxid uhelnatý
Cr	[-]	Chrom
Cu	[-]	Měď
ČSN	[-]	Česká státní norma
EN	[-]	Evropská norma
Fe <sub>3</sub> C	[-]	Karbid železa
Fm	[N]	Maximální síla v tahu
GJL	[-]	Označení pro litinu
HBW	[-]	Tvrдость podle Brinella
ISO	[-]	Mezinárodní organizace pro normalizaci
K	[J]	Nárazová práce (absorbovaná energie)
L <sub>0</sub>	[mm]	Počáteční délka zkušební tyče
LKG	[-]	Litina s kuličkovým grafitem
LLG	[-]	Litina s lupínkovým grafitem
LVG	[-]	Litina s vermikulárním grafitem
Mn	[-]	Mangan
Mo	[-]	Molybden
Ni	[-]	Nikl
P	[-]	Fosfor
Re	[MPa]	Mez kluzu
Rm	[MPa]	Mez pevnosti
S	[-]	Síra
S <sub>0</sub>	[mm <sup>2</sup> ]	Počáteční průřez zkušební tyče



## Úvod

Počátky technologie slévárenství sahají do doby před více než 5000 lety a spojují se s kulturami staré Persie, Číny a později Egypta. V našich zemích jsou první zmínky o odlévání z doby halštatské v 1. tisíciletí před naším letopočtem. [1]

Slévárenství je odvětvím, kde se předměty vyrábějí odléváním roztaveného kovu do forem. Výsledný produkt se nazývá odlitek a díky lití tekutého kovu může nabývat složitých tvarů s rozdílnou tloušťkou stěn s komplikovaným systémem vnitřních dutin. Podrobněji se technologii slévání věnuje jedna z kapitol teoretické části bakalářské práce, kde jsou stanoveny náležitosti pro odlévací formu, správná konstrukce odlitku a také vhodná formovací směs jako prevence vzniku vad odlitků. Jsou to právě vady odlitků, které patří k nevýhodám technologie odlévání. Jejich rozdělení podle různých kritérií je též obsaženo v teoretické části.

Samotné hodnocení vad je ovšem relativně novou záležitostí vzhledem k době vzniku odlévání. První práce zabývající se touto problematikou pocházejí z první poloviny 20. století. Ucelenějším přehledem vad byl pak první atlas vad odlitků vydaný Britským slévárenským institutem roku 1946 [1]. Pro klasifikaci vad litinových odlitků v bakalářské práci byl použit Atlas vad od Vlastislava Otáhalo, obsahující rozdělení dle normy ČSN 42 1240, schválené 1. 4. 1964.

První zmínka o litině pochází ze 4. stol. př. n. l. v Číně [1], zatímco v Evropě se začala vyrábět až ve 14. stol. a k rozmachu využívání slitin železa došlo až v 18. stol. [1] Konkrétně pro litinu, která byla hodnoceným materiálem experimentu, obsahuje teoretická část její definici, rozdělení a také vyhodnocení podle normy EN ISO 945-1.

Experimentální část bakalářské práce se zabývá hodnocením kvality odlitků, přičemž vychází z materiálových charakteristik. Nejprve byla vyhodnocena mikrostruktura, kde praktická část obsahuje stručný postup výroby metalografického vzorku a následné vyhodnocení struktury a případného výskytu vad, doplněné metalografickými snímky. Dále byly experimentálně ověřeny mechanické vlastnosti pomocí zkoušky tahem, metody Charpy a měření tvrdosti. Postupy, označení zkoušek a samotné experimentálně získané hodnoty jsou obsaženy v praktické části a byly porovnány se zadanými parametry k ověření.

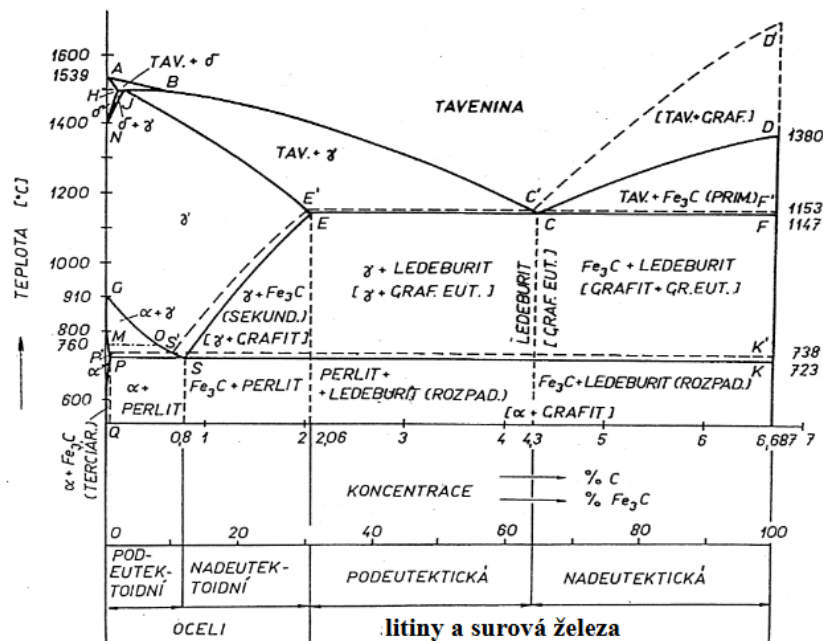
Cílem práce bylo experimentálně ověřit, zda odlitky splňují stanovená kritéria na kvalitu. To zahrnovalo analýzu přítomnosti vad a jejich klasifikaci a ověření mechanických vlastností, na jejichž základě bylo posouzeno, zda lze odlitky z litiny s lupínkovým grafitem považovat za kvalitní.

# 1. Teoretická část

## 1.1 Definice litiny, její rozdělení a vlastnosti

### 1.1.1 Definice litiny

Litina je slitinou železa s uhlíkem, která má hmotností podíl uhlíku 2% a více, což je hodnota přesahující maximální rozpustnost uhlíku v austenitu. Oblast, ve které se litiny nacházejí v závislosti na obsahu uhlíku, je znázorněna v rovnovážném diagramu Fe-C (Fe-Fe<sub>3</sub>C) na obr.1. Kromě uhlíku, který má z příměsí největší podíl, se v litinách nacházejí i další doprovodné a legující prvky, které ovlivňují krystalizaci litiny. [2]



Obr. 1 Rovnovázný diagram Fe-C (Fe-Fe<sub>3</sub>C) [3]

### 1.1.2 Rozdělení litin

Základní dělení litin je podle jejich struktury, která vzniká při eutektické přeměně. K eutektické přeměně dochází při tuhnutí a litiny se pak dělí podle toho, v jaké formě obsahují uhlík. Formu uhlíku ovlivňuje chemické složení, kde se prvky obsažené v litině dělí na grafitotvorné a karbidotvorné. Dalším faktorem ovlivňujícím krystalizaci je rychlost ochlazování, případně je možné krystalizaci ovlivnit vnějším zásahem tzv. očkovaním. [2]

#### Grafitické litiny

První možností je uhlík obsažený v eutektiku ve formě grafitu. Litiny s obsahem grafitu v eutektiku se nazývají litiny grafitické a patří mezi ně litina s lupínkovým grafitem (LLG), litina s kuličkovým grafitem (LKG) a vermikulární litina (LVG). Grafitické litiny patří mezi nejobvyklejší druh litin. [2]

## Karbidické litiny

Druhou formou je obsah uhlíku v chemické sloučenině  $\text{Fe}_3\text{C}$ , tedy karbidu železa a takové litiny nazýváme karbidické. Jedná se v podstatě o odlité surové železo, které se vyznačuje vysokou tvrdostí, křehkostí a špatnou obrobitelností. [2]

Dalším případem je litina vznikající tepelným zpracováním tzv. temperováním, které se realizuje žíháním při teplotě 900 až 1000 °C po dobu 15 až 24 hodin, při kterém dochází k rozpadu cementitu na grafit a k částečnému oduhličení povrchu. Po žíhání následuje velmi pomalé chladnutí a takto zpracovaná litina se nazývá temperovaná, také litina s vločkovým grafitem. Odlitky z temperované litiny tuhnou jako karbidické a grafit vzniká až rozpadem cementitu při žíhání. Po temperování je tedy možné tyto litiny zařadit mezi grafitické. [3]

Existuje i přechodový typ mezi grafitickými a karbidickými litinami, který ve svém eutektiku obsahuje jak grafit, tak uhlík ve formě karbidu železa. Litina kombinující obě formy uhlíku se nazývá maková litina. Výskyt zákalky a makové struktury v odlitcích se obvykle pokládá za nežádoucí. [3]

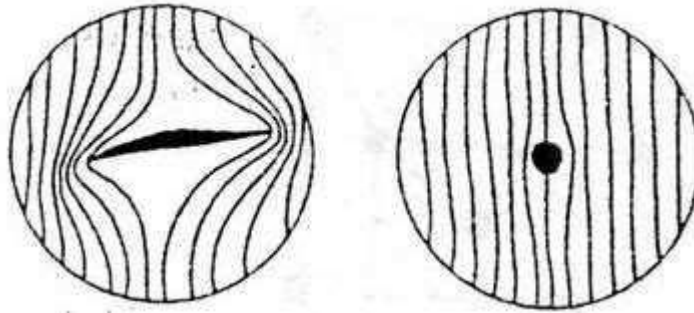
### 1.1.3 Litina s lupínkovým grafitem

#### Definice

Litina s lupínkovým grafitem je technická slitina železa s uhlíkem, jehož obsah je vyšší než 2,14%. Uhlík je vyloučen v elementární formě jako lamelární grafit v kovové matici feritu nebo perlitu. Krystalizaci ovlivňují příměsi, které představují doprovodné a legující prvky. Nejčastěji jsou to prvky nazývané primární a to křemík, mangan, fosfor a síra. Jako legující prvky se používají měď, nikl a molybden a dále prvky pro specifické účely jako arsen, bismut a olovo. Pro tvorbu perlitu a karbidů se také využívá příměsí boru, chromu, selenu a vanadu. V litině s lupínkovým grafitem také mohou být přítomny plyny jako je vodík, dusík a kyslík. Kromě příměsí se na krystalizaci podílí způsob a rychlost ochlazování. [3]

#### Vlastnosti

LLG dosahuje relativně vysoké pevnosti v tlaku. Její ostatní mechanické vlastnosti negativně ovlivňuje lamelární tvar grafitu, který snižuje zejména tažnost. Grafitové lamely totiž působí jako vruby (obr.2), ve kterých se koncentruje napětí v kovové matici a snižují pevnost v tahu na pouhých 100 až 350 MPa. Modul pružnosti se pohybuje v rozpětí 75 až 160 GPa. Lamelární forma grafitu zvyšuje tepelnou vodivost. [4]



Obr. 2 Znáznornění koncentrace napětí vlivem lupínku [2]

## Výroba

LLG se vyrábí přetavením surového železa a litinového šrotu v kuplovných nebo v elektrických pecích. Tavenina se potom odlévá převážně do pískových forem. Předností šedé litiny je její dobrá zabíhavost, relativně nízká tavicí a licí teplota v rozmezí 1100–1300 °C a díky tomu je vhodná pro odlévání i do složitých forem. [5]

## Tepelné zpracování

Pro litinu s lupínkovým grafitem se používají následující tepelná zpracování:

- Žíhání k odstranění vnitřního pnutí slouží k odstranění pnutí, které vzniklo nerovnoměrným chladnutím odlitku. Spočívá v pomalém ohřevu na 450 až 550 °C, po dobu 1 až 6 hodin podle tloušťky stěn odlitku a následujícím pomalým chladnutím. Za stejným účelem se může provádět tzv. stárnutí, které se využívá zejména u velkých a těžkých odlitků, při kterém se odlitky nechávají po delší dobu (až několik měsíců) volně ležet. [6]
- Žíhání pro zlepšení obrobitelnosti při 800 až 900 °C, při kterém dochází k rozpadu cementitu na grafit. [6]
- Zušlechťování pro zvýšení pevnosti, odolnosti proti opotřebení a k dosažení homogenní struktury, se provádí u litin legovaných niklem a chromem. Kalicí teplota je v rozmezí 800 až 900 °C, popouštěcí teplota 250 až 650 °C. [6]
- Povrchové kalení plamenem nebo vysokofrekvenčně [6]
- Nitridace [6]

## Aplikace

Litiny s lupínkovým grafitem se podle aplikovatelnosti rozdělují do tří skupin:

- litiny na běžné použití EN GJL–100 a EN GJL–150

Použití těchto litin se týká tenkostěnných odlitků s tloušťkou 4 až 30 mm. Používají se na odlitky, které nemusí splňovat vyšší nároky na mechanické vlastnosti. Z tohoto druhu litin se vyrábějí např.: součástky hospodářských strojů, mříže, části kotlů a tělesa ložisek. [6]

- Litiny značky EN GJL–200 a EN GJL–250

Tyto litiny jsou běžně očkované 75% ferosilíciem. Z nich se odlévají součástky, které již mají požadavek na záruku mechanických vlastností. Tento druh litin se nejčastěji používá v automobilovém a strojírenském průmyslu. Jsou vhodné např. pro převodové skříně, stojany lisů, soustruhy, frézky, motorové vložky, ozubená kola, motorové bloky, hlavy válců, písty, kompresorové válce a řemenice. [6]

- Litiny s nejvyšší pevností značky EN GJL-300 a EN GJL-350

Jsou označovány jako jakostní litiny a používají se na stojany těžkých lisů a obráběcích strojů, písty těžkých kompresorů, velká ozubená kola a pastorky. [6]

#### 1.1.4 Očkování litin

Účelem očkování je vnášení takových látek do roztavené litiny, které vedou ke vzniku zárodků pro krystalizaci grafitu. Očkováním se dává prostor vzájemné interakci mezi aktivními prvky v očkovaadle a některými prvky, které jsou již přítomny v litině. [3]

Očkováním se zmenšuje sklon ke vzniku negativního jevu zákalky, dochází ke zjemnění struktury grafitu a také lze docílit zrovnoměnění vyloučení grafitu v celém odlitku. Čím větší je počet aktivních zárodků, tím dokonalejší je grafitizace. [3]

Litina s jemnozrnnou strukturou má obvykle lepší mechanické vlastnosti, než litina s hrubou strukturou. Vysoký počet eutektických buněk má však negativní vliv na vnitřní homogenitu litiny. Čím větší je dispersita grafitu, tedy jemnost struktury grafitu, tím více má litina sklon k endogennímu, kašovitému tuhnutí a ke vzniku pórovitosti. Příliš vysoký počet eutektických buněk proto není žádoucí. [3]

Očkování je tedy metodou, s jejíž pomocí se umožňuje vznik grafitu navzdory nepříznivým podmínkám pro grafitizaci. Nepříznivými podmínkami jsou rychlejší ochlazování odlitku a chemické složení s nízkým uhlíkovým ekvivalentem a malým obsahem grafitizačních nebo naopak velkým obsahem karbidotvorných prvků. Při nedostatečném očkování vzniká nepravidelně rozložený grafit typu B, přechlazené formy grafitu typu D a E, nebo oblasti s metastabilní strukturou (zákalka), které jsou důsledkem špatných mechanických a technologických vlastností. Pomocí očkování se také zlepšuje obrobiteľnosť. [3]

## 1.1.5 Hodnocení litin dle normy EN ISO 945-1

### Základní struktura litin

Struktura litin je obecně tvořena grafitem a matricí. Výjimkou jsou karbidické litiny, které tvoří pouze matrice a grafit neobsahují. [7]

### Grafit

Grafit je krystalická forma uhlíku a v litinách se vyskytují jeho následující druhy:

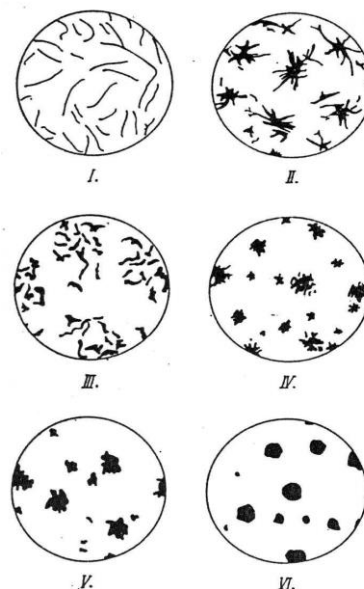
- Eutektický – V případě LLG má tvar lupínků a vzniká tuhnutím eutektika. Společně s austenitem tvoří grafitické eutektikum. [7]
- Primární - Vzniká jako primární fáze při tuhnutí nadeutektických grafitických litin a negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti struktury. Má tvar hrubých lupínků a při dostatečně pomalém tuhnutí odlitku nebo při odstátí litiny v pánvi vyplouvá na hladinu kovu a tvoří tzv. grafitický šum. [7]
- Grafit, který vzniká při rozpadu metastabilních složek během tepelného zpracování (temperování, žíhání na odstranění karbidů). [7]

Pro vyhodnocení struktury litin byla v bakalářské práci použita norma EN ISO 945-1, která se týká grafitu v litině obsaženém a hodnotí se dle následujících parametrů:

#### 1) Tvar grafitu

Tvar grafitu se hodnotí dle normy ČSN EN ISO 945-1, dělí se do 6 tříd [2] (viz obr.3):

- I - lupínkový grafit
- II - pavoučkový grafit
- III - červíkovitý grafit
- IV - vločkový grafit
- V - nedokonale zrnitý grafit
- VI - pravidelně zrnitý

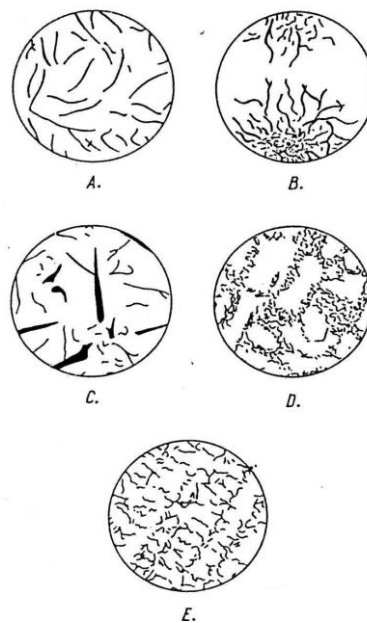


Obr. 3 Rozdělení tříd grafitu [2]

## 2) Rozložení grafitu

Podle pravidelnosti a stejnoměrnosti uspořádání grafitu se hodnotí rozložení grafitu dle normy EN ISO 945-1, která hodnocení realizuje etalonovou řadou, uvedenou na obrázku 4 a rozdělenou do 5 následujících tříd [2]:

- A - rovnoměrné rozložení
- B - růžicovité
- C - smíšené
- D - mezidendritické neusměrněné
- E - mezidendritické usměrněné



Z hlediska vlastností litin je nejvýhodnější rozložení grafitu typu A, kde je grafit rovnoměrně rozložený, se stejnoměrnou velikostí. Nepravidelné rozložení a výskyt hrubých grafitových útvarů zhoršuje mechanické vlastnosti. [2]

Typy grafitu D a E se nazývají též jako přechlazený grafit a vznikají při nedostatečném obsahu krystalizačních zárodků a při prudkém ochlazení. Jsou přechodem od stabilního k metastabilnímu tuhnutí. [2] [7]

Obr. 4 Rozložení grafitu [2]

## 3) Velikost grafitu

Z hlediska mechanických vlastností je u všech typů litin výhodný jemnozrný grafit, vyloučený ve formě drobných lupínků nebo kuliček. Zejména přítomnost hrubých lamel grafitu významně snižuje mechanické vlastnosti litiny. [2]

Podle normy EN ISO 945-1 se velikost grafitu dělí na 8 skupin, uvedených v tabulce níže. Jako rozměr pro vyhodnocení velikosti grafitu se uvažuje skutečná délka řezu eutektické buňky na výbrusu nebo průměr zrna v případě kuličkového grafitu. [2]

Tabulka 1 Rozdělení litin dle velikosti grafitu

Označení	1	2	3	4	5	6	7	8
Velikost (μm)	Nad 1000	1000-500	500-250	250-120	120-60	60-30	30-15	Pod 15

## Matrice

Matrici v nelegovaných litinách za normální teploty tvoří: ferit, perlit a případně ledeburit. Legováním nebo tepelným zpracováním lze získat rovněž austenit, martenzit, bainit nebo komplexní karbidy. [3]

Strukturu matrice ovlivňuje:

- chemické složení litiny
- rychlost ochlazování při tuhnutí a chladnutí
- krystalizační zárodky
- tepelné zpracování [3]

## Ferit

„Vzniká při eutektoidní transformaci austenitu podle stabilního diagramu.“ Jeho vznik podporuje pomalé ochlazování. [3]

Vlastnosti feritu

Ferit je měkký, tvárný, s relativně nízkou pevností. Díky těmto vlastnostem je dobře obrobitelný a v litinách je nositelem houževnatosti. Na vlastnosti feritu mají značný vliv legury a doprovodné prvky. Všechny přísady zvyšují tvrdost a pevnost feritu a mají také vliv na jeho houževnatost. Poměrně významné je snížení houževnatosti feritu se zvyšujícím se obsahem křemíku. [3]

## Perlit

„Eutektoid vzniklý rozpadem austenitu podle metastabilního systému.“ Tvoří ho ferit a perlitický cementit, které mu dodávají větší pevnost a tvrdost, než má ferit. [3]

Perlit má dvě morfologické formy - lamelární a globulární:

- lamelární perlit

V odlitcích se vyskytuje nejvíce a vzniká při běžném chladnutí, je tvořen lamelami feritu a cementitu, které rostou rovnoběžně vedle sebe. Z jednoho zrna austenitu obvykle vzniká několik zrn perlitu s rozdílnou orientací lamel. [3]

- globulární ferit

Vzniká sbalením lamel cementitu při sferoidizačním žíhání. Litiny s globulárním perlitem mají oproti lamelárnímu perlitu lepší obrobitelnost. [3]

Vlastnosti perlitu

Oproti feritu má perlit vyšší pevnost, odolnost proti opotřebení a tvrdost na úkor horších plastických vlastností a horší obrobitelnosti. „Perlit je v litinách nositelem pevnosti a tvrdosti ( $R_m$  cca 800 MPa, HB = 280).“ Vlastnosti perlitu významně ovlivňuje hustota perlitu daná jeho dispersitou. Dispersita je určena tím, jak daleko se od sebe dvě sousední lamely feritu nacházejí. [3]



## *Další příměsi v litinách*

### *Fosfidy*

Vznikají díky malé rozpustnosti fosforu v železe a vylučují se na hranicích zrn. Fosfidické eutektikum se nazývá steadit a má vysokou teplotu tuhnutí při teplotách kolem 950°C. Díky tomu se významně podílí na zlepšení zabíhavosti litin. Ve struktuře se vyskytuje při obsahu fosforu v litině nad cca 0,1%. [3]

#### **Vlastnosti fosfidů**

Fosfidy jsou tvrdé, velmi křehké a vzhledem ke svému vyloučení na hranicích zrn významně snižují dynamické vlastnosti litin. Výskyt fosfidů je nežádoucí zejména u LKG. [3]

## **1.2 Úvod do problematiky odlévání a vad odlitků**

Obor, do kterého odlévání spadá, se nazývá slévárenství a je technologickým odvětvím strojírenské výroby. [8]

V produkci světové výroby odlitků vzhledem k počtu obyvatel se podle průzkumu z roku 2014, Česká republika drží na horních příčkách společně s Japonskem a dominujícím Německem. [5] V České republice se za rok 2014 vyrobilo více než 40 kg litiny na 1 obyvatele. [3]

V celkové světové produkci odlitků dominuje Čína, která k roku 2014 vytvořila z celkové produkce kolem 40% odlitků, což je více než trojnásobek produkce odlitků ve Spojených státech amerických, které byly v roce 2014 v produkci odlitků na druhém místě. [5]

Oproti ostatním technologiím je výhodou slévárenství dobrá konkurenceschopnost, vysoká sériová produktivita a to i pro tvarově složité odlitky za relativně krátký výrobní čas a v neposlední řadě i úplná využitelnost materiálu včetně jeho recyklovatelnosti. Při využití technologií tlakového lití nebo vytavitelného modelu lze dosahovat i poměrně vysoké přesnosti odlitku. [8]

Mezi nevýhody patří vysoká energetická náročnost, způsobená potřebou vysoké tepelné energie na docílení vhodných podmínek pro požadované výsledky. Odlévání také představuje vysoké počáteční náklady, kvůli kterým je odlévání určené především pro sériovou výrobu. Další komplikací je nutnost vytvoření modelů vyráběné součásti a v neposlední řadě je nevýhodou i sklon výrobků k častým vadám. [5]

### 1.2.1 Definice odlitku a realizace odlévání

Odlitek je obecně definován jako napodobenina předmětu, zhotovená z hmoty původně kapalně a následně ztuhlé. Zhotovuje se zpravidla odléváním (podle něho vznikl název) do duté formy neboli matrice. [8]

Nejběžnější metodou odlévání, kterou používají slévárny v ČR, je metoda gravitačního odlévání do formovacích směsí pojených nasyrovo (jíly a zeminy), vodním sklem a pryskyřicemi vytvrzovanými za studena i tepla. [8]

Odlévání do kovových forem se nejběžněji praktikuje gravitačním a tlakovým litím. Kromě těchto dvou metod jsou zde i dále v menším množství zastoupeny speciální technologie výroby odlitků, mezi které patří odstředivé lití, metoda spalitelného a vytavitelného modelu. [5]

Pro kovové materiály není z materiálového hlediska prakticky žádné omezení pro výrobu odlitků. Nejčastějším materiálem používaným na odlitky ve slévárenském průmyslu jsou litiny. Ve světové produkci odlitků tvoří litiny 70% z celkové výroby za rok 2014. [5] Nejvíce je zastoupena litina s lupínkovým grafitem (LLG), která tvoří 45% produkce litin, druhá nejvíce zastoupená litina je pak litina s kuličkovým grafitem, která tvoří 24% z celkových 70%. [8]

Vysoký podíl litiny je způsoben ideálními materiálovými vlastnostmi pro výrobu odlitků. Mezi důležité vlastnosti litiny pro odlévání patří výborná tavitelnost, mechanické vlastnosti a dobrá zabíhavost do formy. [5]

Druhým nejčastějším materiálem ve světové produkci odlitků je ocel (11%), která je považována za složitější materiál pro výrobu kvůli jejím slévárenským vlastnostem. Ocel má v porovnání s litinou horší zabíhavost a je náročnější na čistotu taveniny. Na třetím místě jsou lehké kovy s 18%, kde je využíván převážně hliník. Tomuto druhu kovů je potřeba přizpůsobovat části výrobního procesu a celá výroba je mnohem komplikovanější než u ocelí a litin. [8]

V České republice je trend produkce podobný, pouze podíl litiny je nižší (zhruba 55%) a více je produkována ocel (19%). Lehké kovy se pohybují okolo 22%. [5]

Odlitky lze také rozdělit dle fáze zpracování, ve které se právě nacházejí, na tři následující skupiny:

- Surový odlitek

Jedná se o odlitek bezprostředně po vyjmutí z formy, který stále obsahuje vtokovou soustavu a výfuky. [9]

- **Hrubý odlitek**

Hrubý odlitek je odlitek zbavený vtokové soustavy a výfuků, který má stále přídavky připravené na následné obrábění. [9]

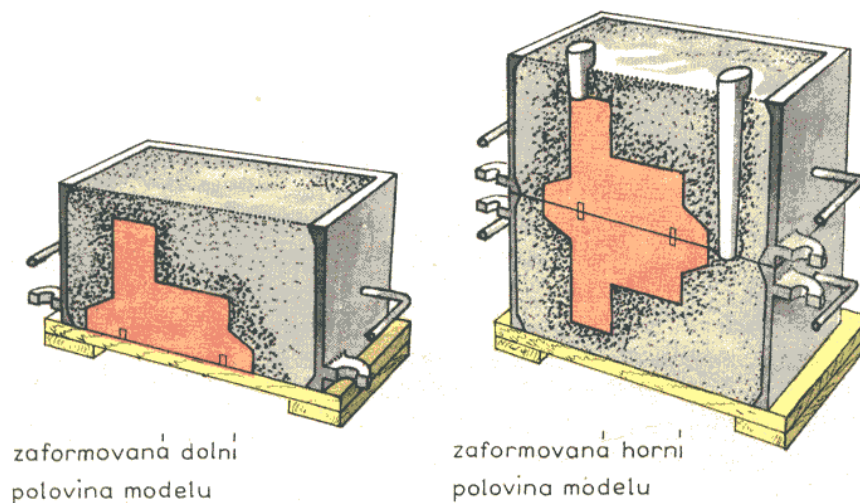
- **Čistý odlitek**

Jedná se o odlitek po obrobení. Je to tedy hotová součást připravená k expedování. [9]

### 1.2.1.1 Vhodná vtoková soustava jako prevence vad

Při vytváření odlitků je velice důležité vytvoření vtokové soustavy před odléváním do formy s formovací směsí, která je nejběžnější metodou pro litinové odlitky. [8]

Při odlévání a následném chladnutí litin dochází ke zmenšování jejich objemu. Změna objemu je závislá na typu litiny, konkrétně pro litinu s lupínkovým grafitem se zmenšení objemu pohybuje kolem 1%, přičemž ještě záleží na velikosti odlitku a na objemu jeho hmoty. Důsledkem smršťování při tuhnutí vznikají v odlitku staženiny a řediny (dutiny), což jsou nežádoucí jevy, které se posuzují jako vady odlitků. Abychom doplnili úbytek objemu při tuhnutí, musíme do formy nalít větší objem tekuté litiny, než je vlastní objem odlitku. Z tohoto důvodu je nutné k odlitku udělat vhodnou vtokovou soustavu. Pro zásobování tekutého kovu při úbytku objemu slouží součást vtokové soustavy nazývající se nálipek a je třeba, aby se staženina způsobená postupným ochlazováním odlitku soustředila právě v nálitku. Pro dosažení kvalitního odlitku musí jeho tuhnutí postupovat od nejbližšího místa až do nálitku, který má ztuhnout jako poslední. Nálipek se z odlitku následně odstraňuje uražením a můžeme ho vidět na obrázku 5 vpravo jako nejhlubší dutinu vedoucí k odlitku. Dutina v nejvyšší části odlitku se nazývá komín a slouží k odvodu plynů vznikajících při odlévání a zároveň také pro kontrolu, zda byla forma zcela vyplněna. [5] [8]



Obr. 5 Ukázka složení pískové formy včetně vtokové soustavy [8]

## 1.2.2 Příčiny vzniku vad odlitků a jejich prevence

Smrštění odlitku v pevném stavu je příčinou vzniku vnitřních pnutí, trhlin, prasklin nebo deformace odlitku. Jak bylo zmíněno výše, u litin dochází ke zmenšení rozměrů o 1% a je tedy potřeba o tuto hodnotu smrštění zvětšit rozměry modelu. Konstrukční zvětšení odlitku se nazývá přídavek na obrábění a dává prostor k dosažení přesných rozměrů odlitku následným obráběním. [8]

Proti vzniku těchto vad nestačí pouze odlitek zvětšit o jeho smrštění, ale je potřeba dbát na celkovou vhodnou konstrukci odlitku. Vhodně konstruovaným odlitkem se rozumí odlitek, který má plynulé přechody a rovnoměrné tloušťky stěn.

Dalším aspektem pro předcházení vadám, je dodržování technologických postupů ve výrobě a pomalé rovnoměrné ochlazování. Je to právě ochlazování, které ovlivňuje jemnost lupínkového grafitu ve vnitřní struktuře LLG. [8] [10]

Pokud přes všechna opatření vnitřní pnutí vznikne, je možné ho odstranit buď přirozeným stárnutím, které se realizuje dlouhodobým skladováním, nebo se využívá tepelného zpracování, konkrétně žíhání na odstranění pnutí. [8] [10]

Kromě změny objemu také roztavené kovy při odlévání rozpouští plyny, které bývají příčinou vzniku bublin v odlitku. Rozpustnost plynu klesá při ochlazování taveniny a výrazně se snižuje v okamžiku tuhnutí. Jedná se o vodní páru, vzduch, oxid uhelnatý, dusík a vodík. K odstranění těchto plynů z formy nestačí pouze samotná prodyšnost formovací směsi. Z tohoto důvodu se ve formě vytváří kanálky pro odvod plynů, které se nazývají výfuky a průduchy. Výfuk je hlavní kanálek umístěný vždy v nejvyšším bodě odlitku. Současně také slouží jako kontrola toho, že se forma zcela naplnila, protože roztavený kov po odlití do formy začne tento výfuk v momentě vyplnění formy naplňovat. [8] [10]

Nejčastější příčiny vad odlitků tedy vznikají z následujících důvodů, které jsou podrobněji rozepsány v kapitole o dělení vad odlitků:

- nevhodná konstrukce odlitku
- nevhodný formovací materiál
- nesprávně provedená vtoková soustava [8]

## 1.2.3 Rozdělení vad odlitků

Vady lze dělit z mnoha hledisek a do různě podrobných skupin. Proto jsou nejprve uvedena obecnější rozdělení, které se méně větví a jsou snáze představitelná.

### 1.2.3.1 Vady odlitků dle jejich viditelnosti

Úplně nejjednodušším rozdělením je jejich členění podle jejich viditelnosti, které má následující dvě podskupiny:

#### 1) Vady zjevné

Za zjevné vady považujeme povrchové degradace odlitku, které je možné odhalit při vizuální kontrole neopracovaného odlitku pouhým okem nebo jednoduchými pomocnými měřidly. Většinou se jedná o vady vnější, ale mohou zasahovat i do hlubší struktury odlitku pod povrchem. [9]

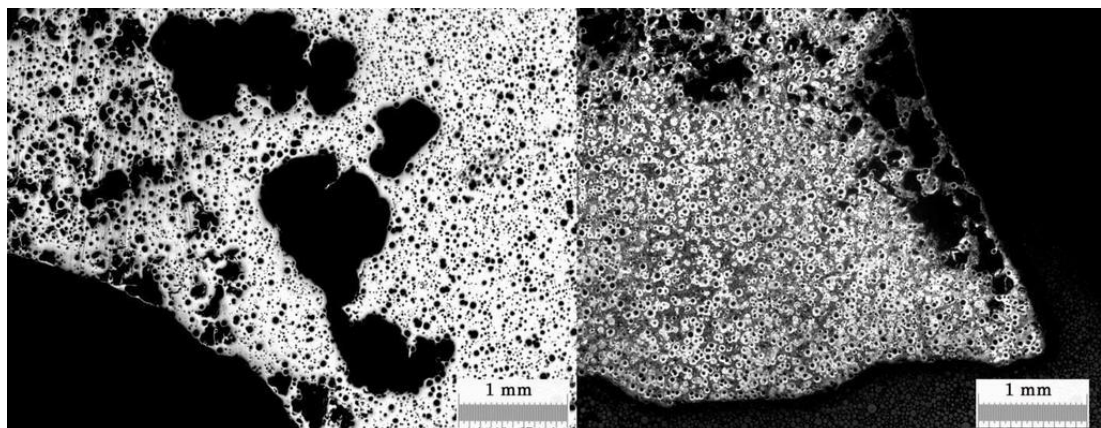
Reprezentativní ukázkou zjevné vady můžeme vidět na obrázku 6 níže, kde je znatelná pórovitost povrchu způsobená struskovými vměstkami.



Obr. 6 Ukázka zjevné vady odlitku [10]

#### 2) Vady skryté

Jak už název napovídá, skryté vady nelze zpozorovat pouhou vizuální kontrolou povrchu odlitku, protože se nachází uvnitř struktury bez toho, aby se projevovaly na zevnějšku. Takové vady máme vyobrazené na obr.7 a lze je odhalit až po obrobení odlitku, po přeměření rozměrů nebo například i po převážení odlitku za pomoci vhodných přístrojů a zařízení. Jedná se tedy převážně o vady podpovrchové (vnitřní). [9]



Obr. 7 Ukázka skryté vady odlitku [10]

### **1.2.3.2 Vady odlitků rozdělené dle přípustnosti**

Vada odlitku má podmíněný význam, který se hodnotí na základě ustanovených příslušných norem nebo za sjednaných podmínek, které si může stanovovat sám výrobce a každá vada pak může být hodnocena individuálně jako přípustná, zatímco v jiných případech může být brána za vadu nepřípustnou, opravitelnou nebo odstranitelnou v závislosti na ustanoveních a místě, kde se na odlitku nachází. [11]

Podle kritéria přípustnosti se tedy vady odlitků rozdělují do následujících skupin rozdělených podle závažnosti vad na:

- **Přípustné vady**

Jako vady přípustné, se označují jevy, které nemají negativní vliv na funkčnost odlitků a jsou buď výslovně povoleny, nebo nejsou výslovně zakázány. [11]

- **Nepřípustné vady**

Jsou obvykle jmenovitě uvedeny výrobcem a jejich výskyt znamená takové znehodnocení odlitku, které již nelze napravit a odlitek musí být vyřazen a hodnocen jako zmetkovitý. [11]

- **Opravitelné vady**

Opravitelné vady jsou takové vady, které lze vhodnými metodami odstranit na náklady slévárny, takže je potřeba zvážit, jestli oprava nepřesáhne vyzmetkování. [11]

- **Odstranitelné vady**

Vady, které jsou takovou odchylkou od sjednaných podmínek nebo příslušných norem, že je možné je po dohodě s odběratelem odstranit jen speciálními úpravami a nepředpokládanými výrobními postupy. [11]

### **1.2.3.3 Vady odlitků rozdělené dle příčiny vzniku**

Jedním z nejdůležitějších předpokladů pro hodnocení kvality odlitků, je znát příčiny, kvůli kterým by mohlo v odlitcích k vadám docházet a umět jim zamezit.

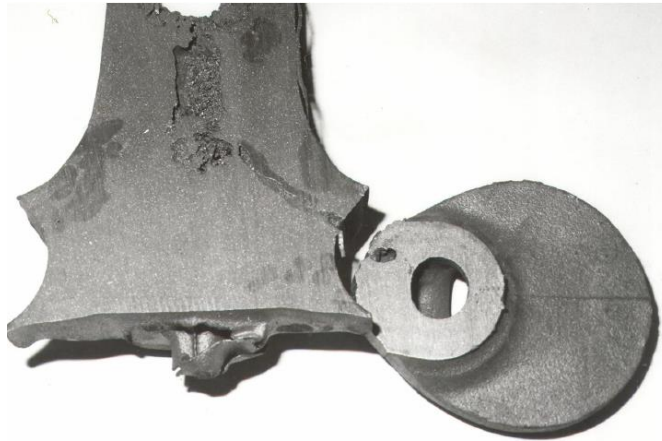
Příčiny vzniku vad odlitků se dělí na dvě skupiny uvedené dále, které obsahují další podskupiny, které podrobně vysvětlují příčinu, kvůli které k vadě došlo. Případné vady se tedy už více konkretizují a uvádějí se do souvislostí.

## Vady způsobené nevhodnou vtokovou soustavou

Co je to vtoková soustava a z jakých částí se skládá, bylo již vysvětleno v první kapitole teoretické části bakalářské práce. V této kapitole jsou uvedeny důsledky, které mohou v odlitcích vznikat v případě špatného návrhu vtokové soustavy:

- Struskové vměstky

Tuto vadu způsobuje nezadržená struska či oxidy kovů, které v odlitku způsobují povrchové prohloubení (viz obr.8) a vnitřní vady. Struska vzniká při zpracování roztavených tekutých kovů a jedná se o nekovové složky vsázky (okuje, korozní produkty, znečistění), produkty vzniklé při metalurgických reakcích v tavenině a stržené částičky z vyzdívek. Struska pak vyplouvá na povrch kovové lázně, kde vytváří více nebo méně souvislou vrstvu na povrchu taveniny. Struska má pozitivní vliv při tvorbě taveniny, ale před odléváním už se musí vysrážená vrstva na povrchu roztaveného kovu odstranit. [7]



Obr. 8 Příklad struskového vměstku [8]

- Sraženiny ve struktuře odlitku

Sraženiny vznikají při nerovnoměrném tuhnutí probíhajícím z vnějšku do vnitřku. Na silnějších stěnách se pak vytvářejí dutiny, které nazýváme sraženiny, v případě, že jsou stěny odlitku stejně tlusté, ke sraženinám nedochází. Nerovnoměrnému tuhnutí odlitků lze zabránit použitím přídavných chladících železek. [7]

- Bubliny

Bubliny ve struktuře odlitku způsobuje mokrá formovací písek, který uvolňuje při lici teplotě vodík a kyslík, který při nedostatečném odvodu vniká do struktury. K odvodu plynů z odlitku slouží komín umístěný v nejvyšším místě odlitku, v případě potřeby se zavádí k dostatečnému odvádění plynů komínů více. [7]

- **Trhliny v odlitku**

Trhliny vznikají špatným konstrukčním návrhem přechodů průřezů, při kterém dochází k pomalejšímu tuhnutí silnějších míst, stejně jako v případě sraženin je možné pro zrovnoměnění tuhnutí použít chladící želižka. [7]

- **Pnutí v odlitku**

Pnutí vzniká při smršťování ochlazováním taveniny nebo špatnou rozpadavostí formovací směsi, která způsobí tvoření trhlín. [7]

- **Segregace**

Vzniká při odměšování složek taveniny při tuhnutí a nestejným rozdělením legujících prvků, což způsobuje rozdílné vlastnosti materiálu uvnitř a na povrchu odlitku. [7]

### Vady způsobené při formování

Jak již název napovídá, jedná se o vady způsobené špatným sestavením jednotlivých dílů formy. Tyto vady se dělí na následující podskupiny:

- **Přesazený, zmetkový odlitek**

Vzniká při špatném dosedání částí formy do sebe. [11]

- **Okrajové nebo oválné zesílení**

Dochází k němu, pokud není forma dostatečně upěchována, což způsobuje ustupování pod tlakem licího materiálu. [11]

Nyní tedy známe i příčiny, kvůli kterým k vadám v odlitcích dochází. Samotné hodnocení jednotlivých vad je velice rozvětvené a složité. Z tohoto důvodu bylo pro hodnocení vad použito jediné rozdělení dle Atlasu vad odlitků od Vlastislava Otáhala, ze kterého byla použita členění vad dle normy. V následující kapitole jsou uvedeny příklady vad s jednotlivým členěním a označením.

#### 1.2.3.4 Vybrané vady odlitků dle normy ČSN 42 1240

Norma dělí vady odlitků na sedm skupin, které se dále větví na podskupiny a každá skupina nese trojčíferné označení typu vady. Dále jsou uvedeny 2 skupiny s rozepsanou podskupinou a jejím rozvětvením u konkrétní vady. [7]



## 400 – Dutiny

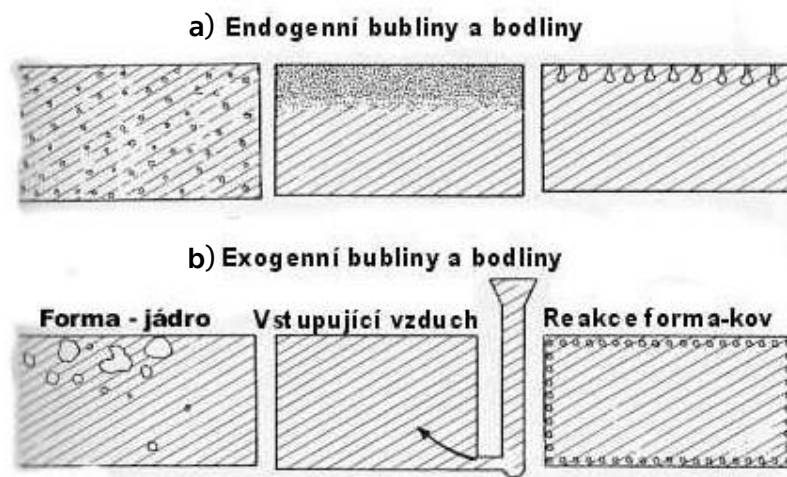
Mezi dutiny jakožto slévárenské vady patří bubliny, bodliny, odvařeniny a staženiny. Příčinou vzniku bublin, bodlin a odvařenin jsou plyny (kyslík, vodík, dusík a oxid uhelnatý). Staženiny vznikají fyzickým zmenšováním objemu kovu (stahováním) při jeho tuhnutí. [7]

Dutiny jsou vady poměrně snadno zjištělné prohlídkou odlitku nebo nedestruktivní kontrolou. Odlitky s touto vadou, především při výskytu na funkční ploše odlitku, nebo při snižování jeho mechanické vlastnosti, jsou většinou neopravitelné. [7]

## 410 – Bubliny

Bubliny mohou být otevřené, tedy vyskytující se na povrchu nebo uzavřené, jako vnitřní dutiny ve stěnách odlitku. Vyskytují se jako jednotlivé bubliny, nebo sdružené ve shlucích, ale mohou být také rozloženy po celých oblastech povrchu odlitku, kde vytváří síť, od toho se také označují jako síťkové bubliny. [7]

Vznikají buď jako bubliny s hladkým povrchem, které se vyskytují pouze uvnitř odlitku. Druhou možností jsou bubliny s povrchem zoxidovaným, který je typický pro bubliny otevřené, kde k oxidaci dochází následkem styku s atmosférou během tuhnutí a chladnutí odlitku. Tvary a velikosti bublin jsou velmi rozmanité, převládají bubliny kulového a elipsoidického tvaru, avšak vyskytují se i bubliny nepravidelného, protáhlého tvaru. Velikost bublin může být od několika desetin milimetrů až po jednotky, případně i desítky milimetrů. Bubliny podle původu dělíme na endogenní a exogenní. [7]



Obr. 9 Schéma vzniku endogenních a exogenních bublin [7]

Endogenní bubliny (obr.9a) vznikají z plynů rozpuštěných v tavenině, pokud tlak rozpuštěných plynů převyší odpory působící proti nim. Na jejich tvorbě se může podílet kyslík, vodík a dusík, popřípadě všechny uvedené prvky kombinovaně. Endogenní

bublíny vznikají buď na rozhraní formovacího materiálu a tuhajícího kovu jako otevřené, nebo v patách rostoucích dendritů, kde jsou zpravidla uzavřené. [7]

Exogenní bubliny (obr.9b) vznikají při odlévání, jestliže tlak plynů ve formě překoná odpor, který mu klade povrchová vrstva roztaveného kovu při chladnutí a tuhnutí. Tento druh bublin je převážně charakterizován jako zahlcený plyn a vzniklé dutiny mívají zploštělý a protáhlý tvar. [7]

*Podle příčin vzniku se bubliny dle ČSN 42 1240 dělí na:*

- *411 – bubliny způsobené kyslíkem*

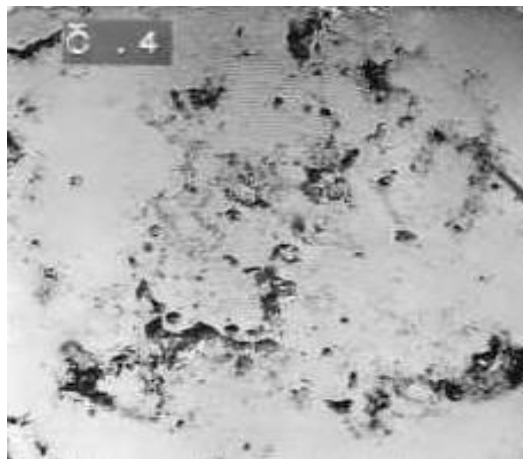
Vliv kyslíku na tvorbu bublin je v běžných případech kompenzován dezoxidačními reakcemi, při kterých kyslík postupně reaguje s dezoxidujícími plyny jako jsou vápník, hliník, křemík, mangan a v poslední fázi s železem, při vzniku oxidických vměstků. Pouze při extrémně vysokých obsazích kyslíku ve slitinách železa by mohly vznikat bubliny kyslíkové. U špatně dezoxidovaných slitin železa s nízkým obsahem uhlíku, tj. ocelí odlévaných do syrových forem nastává možnost vzniku bodlin. Bubliny způsobené kyslíkem nelze běžným ohledáním určit. [7]

- *412 – bubliny způsobené vodíkem*

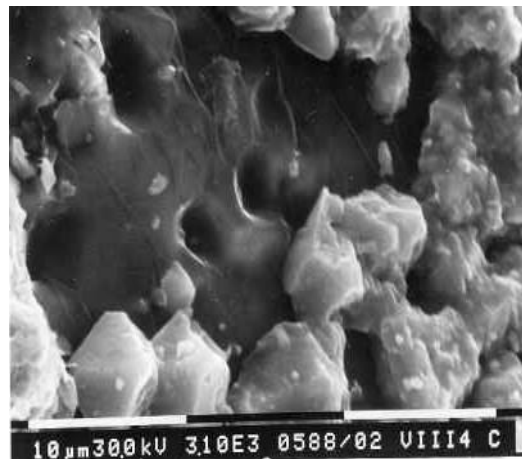
Tvorba vodíkových bublin probíhá v několika stupních. Především jsou způsobeny vodní párou v mezivrstvě formy a roztaveného kovu. Následnou reakcí vodní páry s doprovodnými prvky z taveniny vznikají oxidy kovů a atomární vodík, který proniká do taveniny.

Při běžných licích teplotách nedochází k přímé disociaci molekulárního vodíku. Spíše dochází k reakci oxidů kovů s uhlíkem z taveniny za vzniku molekul CO, které se z taveniny vylučují a tvoří mikrobubliny. [7]

Při reagování rozpuštěného uhlíku s vodíkem, se neslučuje již jednou vyloučený grafit se silně nahřátým vodíkem na metan. Z tohoto důvodu jsou ve vodíkových bublinách vždy obsaženy tenké vrstvy grafitu. Bubliny pak mohou být obklopeny čistě feritickou vrstvičkou, která neobsahuje perlit. [7]



Obr. 10 Vodíková bublina [7]



Obr. 11 Detail vodíkové bubliny [7]

Na obr.10 je pohled na mírně opracovanou stěnu odlitku ze šedé litiny s vodíkovými bublinami a na obr.11 je pohled na detail vodíkové bubliny.

### *Pokyny a doporučení pro správnou diagnostiku dutin*

Správná diagnóza při hodnocení vad projevujících se dutinami v odlitku není jednoduchou záležitostí. Je možné ji však zjednodušit některými praktickými poznatky. Velmi rozsáhlé dutiny (velké bubliny) jsou většinou externího původu (exogenní). [7]

Exogenní bubliny mají většinou rozdílnou velikost. Mohou se projevovat izolovaně, nebo se nacházejí v nepravidelných skupinách. [7]

Endogenní (vnitřního původu) bubliny jsou většinou malé, pravidelně uspořádané a nalézají se buď po celém odlitku, nebo se koncentrují v určitých oblastech. [7]

V železných slitinách mají vodíkové bubliny většinou světlé, lesklé stěny (často pokryté grafitovými povlaky různého rozsahu), bubliny CO jsou namodralé a bubliny od zahlcené atmosféry jsou šedé a lehce zoxidované. [7]

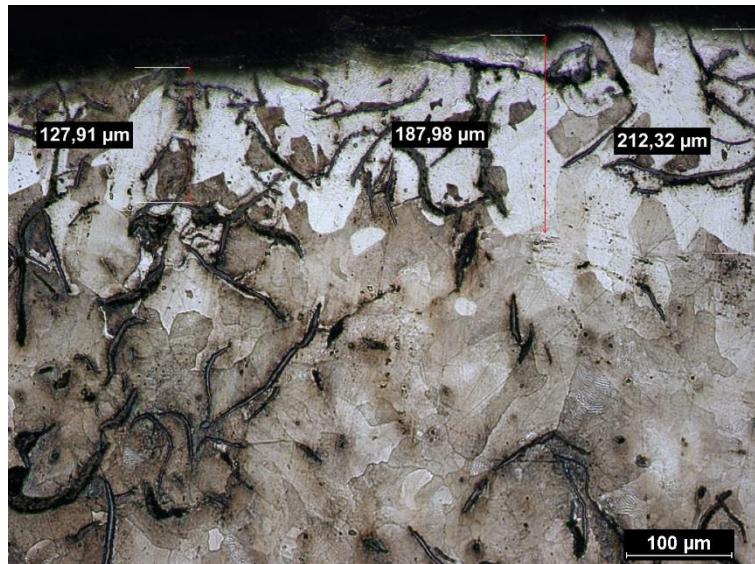
Běžným ohledáním vadného místa není někdy možné diagnózu vůbec provést. Obecně vyžaduje důkladné ohledání a poměrně ucelené a rozsáhlé praktické metalurgické a technologické znalosti. Pro přesnou diagnostiku je nezbytné použití nejmodernější laboratorní techniky. [7]

### *600 – Vady mikrostruktury*

Jedná se o odchylky parametrů vlastností odlitků od sjednaných technických podmínek a norem a nikoliv o vady v pravém slova smyslu. K posuzování vad této třídy je nutné provést metalografické strukturní rozbor, protože konvenčním kritériem pro odlišení mikrostaženiny, makrodefektu od mikrodefektu je rozlišovací schopnost lidského oka, která se udává mezní hodnotou 0,2 mm. [7]

## 670 – Oduhličení povrchu

Vada oduhličení povrchu představuje nepřijatelné oduhličení povrchu odlitku, spojené s nevyhovující strukturou, která může být příčinou neodpovídající tvrdosti a pevnosti povrchových vrstev, a z toho plynoucí nedodržení funkčních požadavků stanovených technickými přejímacími podmínkami. Na obrázku 12 je uvedeno povrchové oduhličení včetně jeho hloubek. [7]



Obr. 12 Oduhličení povrchové vrstvy

### Příčiny vzniku

K oduhličení dochází v důsledku reakce uhlíku s kyslíkem za vzniku oxidu uhličitého. K velkému oduhličení povrchu konkrétně u ocelového odlitku dochází především v průběhu tepelného zpracování v žíhacích pecích. [7]

### Opatření k zabránění vzniku vady

Nebezpečí nežádoucího oduhličení povrchu je malé při běžných technologických postupech výroby odlitků a jejich tepelného zpracování. Nebezpečí se může zvýšit u výroby speciálních odlitků, u kterých může být důležitá povrchová tvrdost neopracované části. [7]

### 1.2.4 Typické vady vznikající očkováním

U litin se provádí takzvané očkování, což je vnášení takových látek do roztavené litiny, které vedou ke vzniku zárodků krystalizace grafitu. Důsledkem očkování je zjemnění grafitu a zvýšení jeho rovnoměrného rozložení, jemnozrnná struktura pak sice vykazuje lepší mechanické vlastnosti, ale zároveň se negativně ovlivňuje vnitřní homogenita, která má vliv na zvyšování pórovitosti při tuhnutí. [3]

Vady spojené s očkovaním:

- **Plynové dutiny a bodliny**  
Vznikají při nevhodném složení očkovačla, vlhkosti nebo v případě přítomnosti dusíku v očkovačle [3]
- **Vměstky**  
Dochází k nim nerozpuštěním očkovačla, velkou zrnitostí očkovačla, při nízké teplotě kovu nebo nevhodné technice očkování [3]
- **Strusková vměstky**  
Vznikají při přeočkování [3]
- **Flotace grafitu**  
Flotace je způsobena nízkou teplotou očkování a přeočkováním. [3]
- **Staženiny a řediny**  
Vznikají při použití nevhodného očkovačla a přeočkování [3]

### 1.2.5 Parametry pro hodnocení kvality odlitků

Pro kvalitu odlitků je zásadní umět vadám předcházet znalostí příčin vzniku vad. Řízení kvality tedy spočívá v umění určit neshodu (vadu) odlitku, za použití co nejefektivnějších metod, které představuje správná a rychlá diagnostika vad. Efektivní diagnostika pak výrazně snižuje náklady na výrobu odlitku. [12]

Jako vadu odlitku označujeme odchylky (neshody) od:

- vzhledu
- tvaru
- rozměru
- hmotnosti
- struktury
- celistvosti (homogenity) a sjednaných podmínek a norem. [12]

## 2. Praktická část

### 2.1 Parametry použitého materiálu

Vyhodnocování kvality na základě materiálových charakteristik bylo provedeno pro dva odlitky z materiálu EN GJL-250 (viz obr.13 a obr.14) , kde se v oblastech označených na obrázcích odebraly vzorky pro zkoumání mikrostruktury a pro ověření mechanických vlastností. Tyto dva odlitky budou dále značeny čísly 2 a 5.

K odlitkům byly poskytnuty požadavky na mechanické vlastnosti, které jsou včetně standardů pro materiál uvedené v tabulce 2. Dále je v tabulce 3 uvedené chemické složení odlitků, které bylo experimentálně ověřeno v laboratořích s porovnáním oproti standardu pro materiál EN GJL-250 uvedeném v posledním řádku tabulky. V kapitole zabývající se vyhodnocením mikrostruktury vzorků je pak uvedena tabulka 4, která obsahuje požadavky na mikrostrukturu.



Obr. 13 Odlitek 2



Obr. 14 Odlitek 5

Tabulka 2 Mechanické vlastnosti

	Označení materiálu	Pevnost v tahu [MPa]	Povrchová tvrdost [HBW]
Požadavek	EN GJL-250	241	207-255
Standard pro odlitek s tloušťkou stěny 15-30 mm	EN GJL-250	250	200-260

Tabulka 3 Chemické složení odlitků [% hm.]

Prvek	C*	Mn*	Si*	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu*
2	3.226	0.752	1.62	0.031	0.02	0.215	0.12	0.008	0.633
5	3.082	0,742	1.62	0.031	0.02	0.215	0.123	0.008	0.638
Standard EN GJL-250	3.0 - 3.3	0.3 min or 3xS 0.6- 0.9*	1.8 - 2.2	0.5 max	0.15 max				0.5 - 0.75

\*Nepovinné údaje / typický interval

## 2.2 Zkoumání mikrostruktury

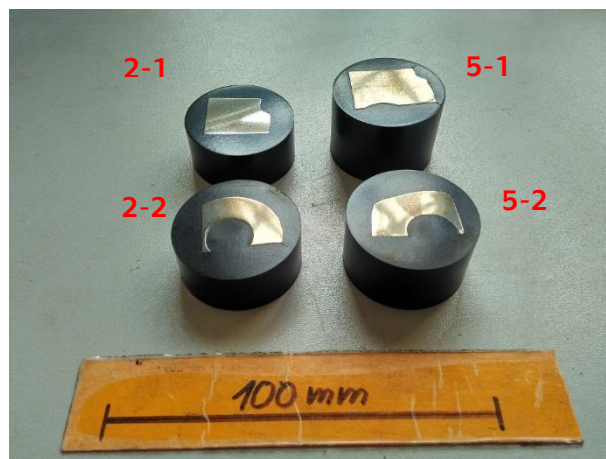
### 2.2.1 Metalografický výbrus

Za účelem zkoumání mikrostruktury materiálu, byly vytvořeny metalografické vzorky (viz obr. 16). Stručný postup výroby metalografického vzorku:

1. Nejprve bylo potřeba vhodně nařezat části odlitků tak, aby bylo možné zkoumat mikrostrukturu povrchu i jádra. K dělení materiálu byla použita pila LECO MSX 255 R1 s rozbrušovacím kotoučem na litinu, kde řezání probíhalo za stálého chlazení proudem chladící emulze, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění řezané oblasti.
2. Nařezané části materiálu byly zalisovány do bakelitového prášku.
3. Dalším krokem bylo broušení, pro které byla použita bruska MTH KOMPAKT 1031 (viz obr.15) při rychlosti 191 ot/min. Pro dosažení co nejjemnějšího povrchu vzorku bylo použito čtyř brusných kotoučů s označením P80, P220, P600 a P1000.



Obr. 15 Leštička LECO GPX300 (vlevo) a bruska MTH KOMPAKT 1031 (vpravo)



Obr. 16 Metalografické výbrusy

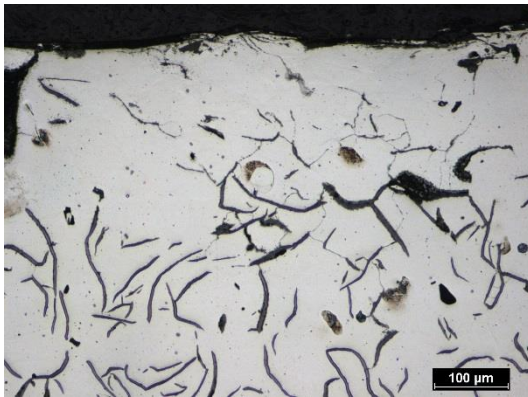
4. Zbroušené vzorky byly následně leštěny na leštičce LECO GPX300 (viz obr.15), kde byl použit kotouč na litinu s leštící emulzí o jemnosti  $3\mu$  při přítlačné síle 27N.

5. Posledním krokem bylo leptání, ke kterému byl použit 5% roztok Nitalu.

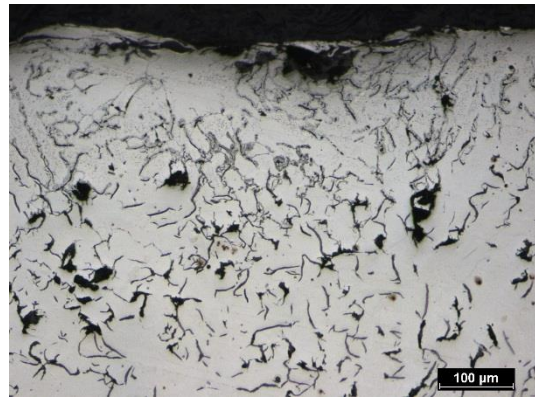
### 2.2.2 Vyhodnocení mikrostruktury neleptaných vzorků

Veškeré zkoumání a vyhodnocování mikrostruktury vzorků bylo zprostředkováno pomocí snímků z metalografického mikroskopu Neophot 32 vybaveného CCD kamerou.

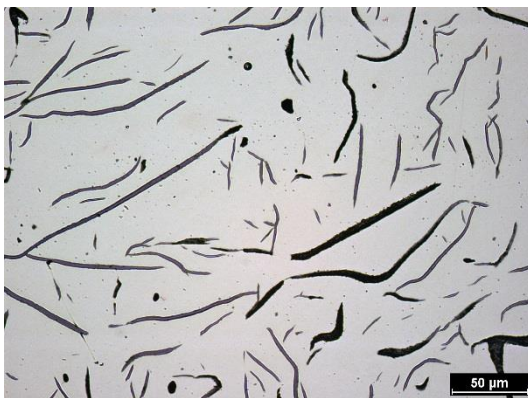
#### 2.2.2.1 Vzorek 2



Obr. 17 Vzorek 2-1 struktura povrchu



Obr. 18 Vzorek 2-2 struktura povrchu



Obr. 19 Vzorek 2-1 detail struktury jádra



Obr. 20 Vzorek 2-2 detail struktury jádra

#### Hodnocení grafitu podle normy EN ISO 945-1:

##### 1) Tvar grafitu

Prvním vyhodnocovaným kritériem byl tvar grafitu, který byl dle zkoumání metalografických výbrusů definován jako tvar I – lupínkový grafit.



## 2) Rozložení grafitu

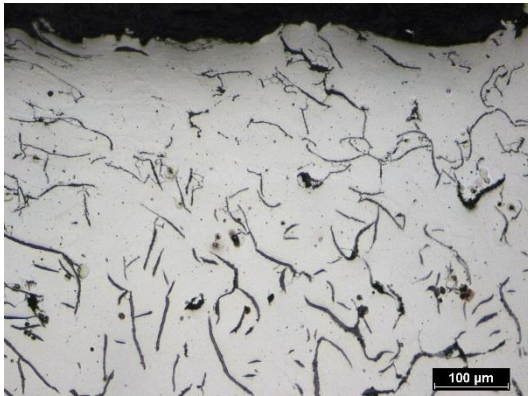
Grafit není v celé struktuře vzorku stejně rozložení a může tak docházet k nepatrné lokální anizotropii jeho vlastností. Jak si můžeme povšimnout konkrétně na obr.18 výše, v povrchové oblasti u vzorku 2-2 má grafit tendenci tvořit shluky lupínek, které jsou typické pro růžicové uspořádání grafitu. V mikrostruktuře je i náznak uspořádaného mezidendritického rozložení, kde jsou lupínky orientovány stejným směrem. Celkově bylo pro převládající výskyt pro oba vzorky rozložení hodnoceno jako rovnoměrné, tedy třída A.

## 3) Velikost grafitu

Velikost lupínek byla podle rozdělení v tabulce 1 vyhodnocena jako stupeň 4.

Tvar, rozložení a velikost grafitu u vzorků 2-1 a 2-2 byly dle normy EN ISO 945-1 vyhodnoceny jako EN ISO 945- 1 IA4. [13]

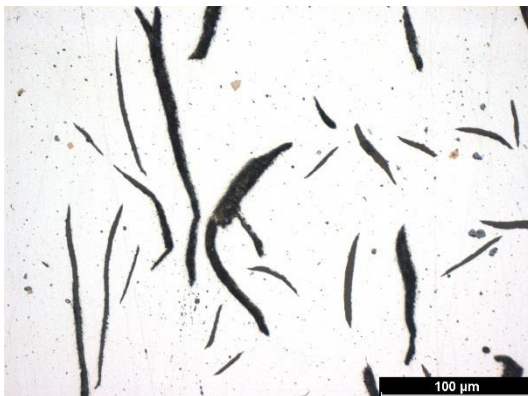
### 2.2.2.2 Vzorek 5



Obr. 21 Vzorek 5-1 struktura povrchu



Obr. 22 Vzorek 5-2 struktura povrchu



Obr. 23 Vzorek 5-1 detail struktury jádra



Obr. 24 Vzorek 5-2 detail struktury jádra

### Hodnocení grafitu podle normy EN ISO 945-1:

#### 1) Tvar grafitu

Stejně jako u vzorku 2 byl dle pozorování metalografických výbrusů shledán jako tvar I – lupínkový grafit.

## 2) Rozložení grafitu

Jak je patrné na metalografických snímcích výše, rozložení grafitu má drobné lokální odchylky, ale celkově ve struktuře převládá rozložení rovnoměrné, a proto byly vzorky 5-1 a 5-2 hodnoceny jako třída A – rovnoměrné rozložení grafitu.

## 3) Velikost grafitu

Velikost lupínků byla podle rozdělení v tabulce 1 vyhodnocena totožně jako v případě vzorku 2, tedy jako stupeň 4.

Tvar, rozložení a velikost grafitu u vzorků 5-1 a 5-2 byly dle normy EN ISO 945-1 vyhodnoceny jako EN ISO 945- 1 IA4. [13]

### *Velikost lupínkového grafitu*

Pro jednotlivé lupínky byla stanovena maximální velikost na rozměr 0,35mm (viz tabulka 4), která byla dle provedeného pozorování metalografických výbrusů splněna.

### *Vady mikrostruktury*

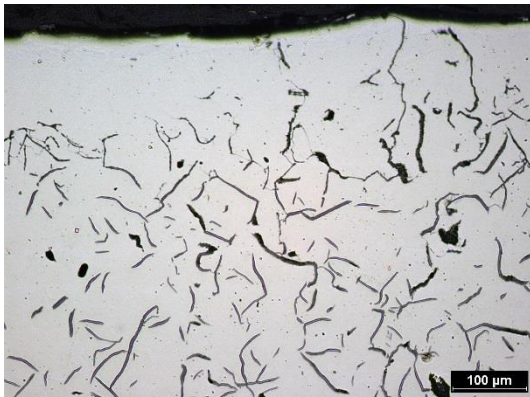
Pro odlitky byl uveden požadavek na vnitřní strukturu bez porezity způsobené sraženinami, avšak v nekritických oblastech může být tolerována a není hodnocena jako vada odlitku.

Za nekritické oblasti s tolerovatelnými vadami se považuje povrch, stoupání, vybrání a vyústění otvorů odlitku.

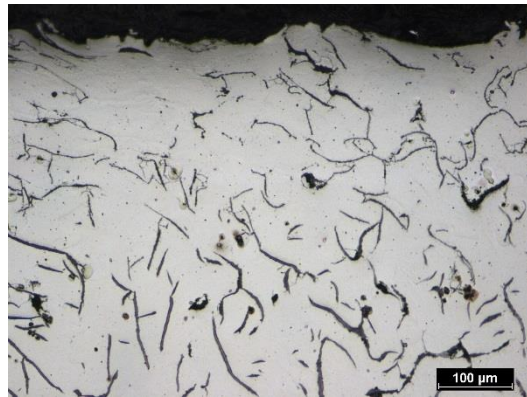
Pro grafit byl stanoven požadavek na převládající výskyt lupínkového grafitu ve vnitřní struktuře, zatímco v nekritických místech jsou tolerovány i výskyty jiného typu grafitu.

### *Řídnutí grafitu v povrchové vrstvě*

Rozložení grafitu ve struktuře bylo vyhodnoceno jako rovnoměrné, ale docházelo k lokálním odchylkám. V povrchové vrstvě bylo na mikroskopu (viz obr.25 a obr.26) zpozorováno řídnutí grafitu, kde byly na povrchu oblasti téměř bez výskytu grafitu. Tento jev se týkal pouze tenké povrchové vrstvy a to konkrétně v nekritické oblasti, kde byl tento jev shledán jako tolerovatelný. U vzorků 2-2 a 5-2 se tento jev nevyskytoval.



*Obr. 25 Vzorek 2-1, neleptaný, povrchová struktura*

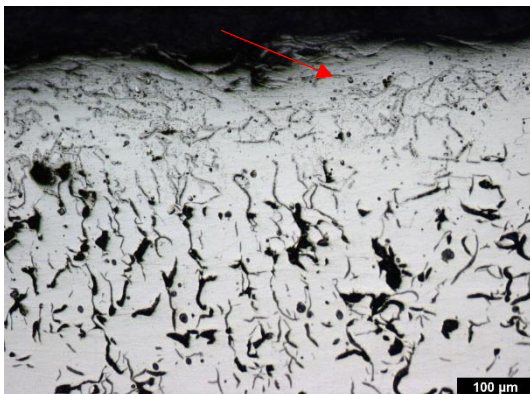


*Obr. 26 Vzorek 5-1, neleptaný, povrchová struktura*

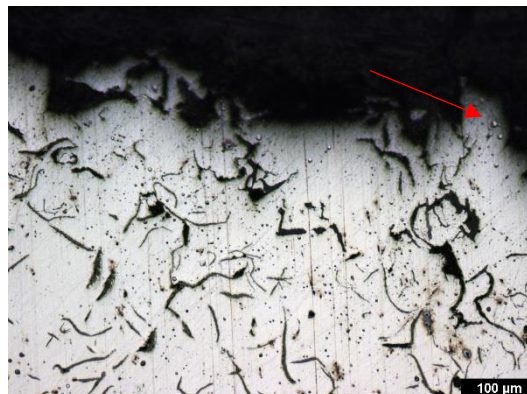
### *Bubliny v povrchové vrstvě*

Další vadou, která byla na mikroskopu zaznamenána, byly bubliny nacházející se v povrchové vrstvě, konkrétně v nekritické oblasti kulového vrchlíku. Na základě místa výskytu byly tyto vady klasifikovány jako přípustné (viz obr.27 a obr.28). Na vzorcích 2- 1 a 5-1 nebyl výskyt bublin pozorován.

Dle normy ČSN 42 1240 nese tato vada označení 410. [7]



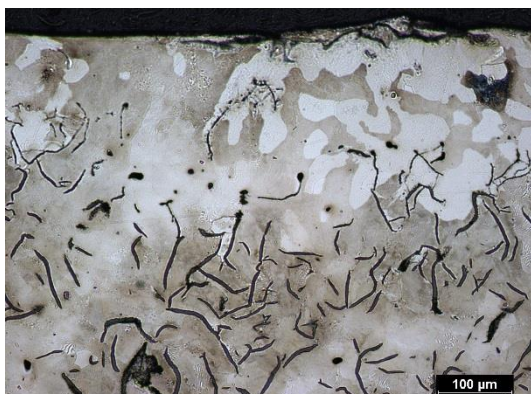
*Obr. 27 Vzorek 2-2 výskyt bublin v povrchové vrstvě*



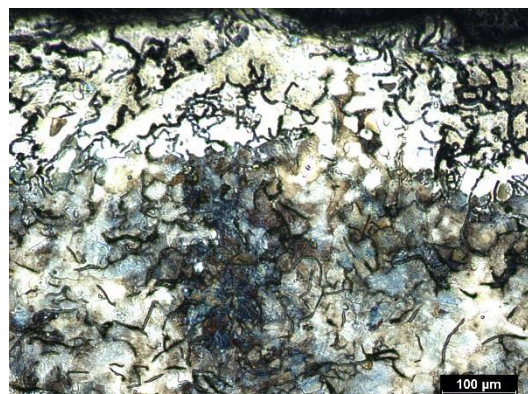
*Obr. 28 Vzorek 5-2 výskyt bublin v povrchové vrstvě*

## 2.2.3 Vyhodnocení mikrostruktury leptaných vzorků

### 2.2.3.1 Vzorek 2



**Obr. 29** Vzorek 2-1 leptaná struktura povrchu, Nital 5%



**Obr. 30** Vzorek 2-2 leptaná struktura povrchu, Nital 5%

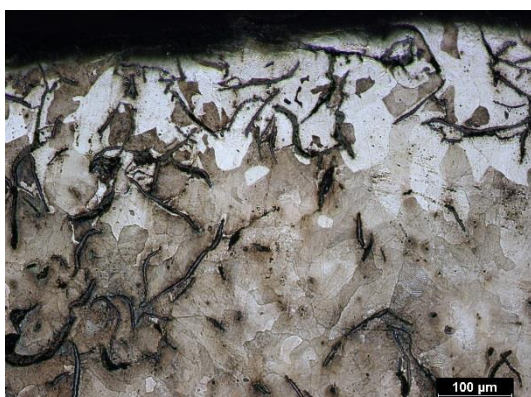


**Obr. 31** Vzorek 2-1 detail leptané struktury jádra, Nital 5%

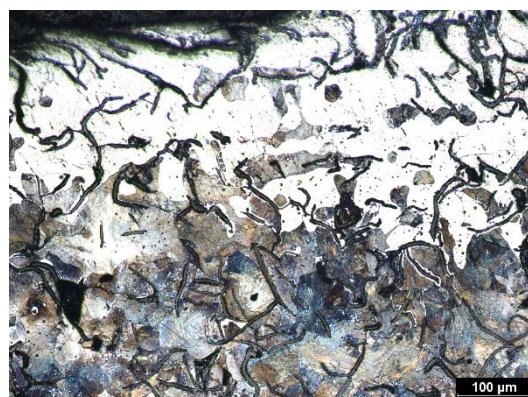


**Obr. 32** Vzorek 2-2 detail leptané struktury jádra, Nital 5%

### 2.2.3.2 Vzorek 5



**Obr. 33** Vzorek 5-1 leptaná struktura povrchu, Nital 5%



**Obr. 34** Vzorek 5-2 leptaná struktura povrchu, Nital 5%



Obr. 35 Vzorek 5-1 detail leptané struktury jádra, Nital 5%



Obr. 36 Vzorek 5-2 detail leptané struktury jádra, Nital 5%

V tabulce 4 níže, jsou uvedeny parametry pro mikrostrukturu, jejich zhodnocení následuje v dalších podkapitolách.

Tabulka 4 Mikrostruktura

Max. velikost grafitu	Matrice	Max. Obsah Feritu	Max. Obsah Karbidů	Max. Obsah Steaditů
0,35 mm	Perlitická	2 %	3 %	5 %

### 2.2.3.3 Vyhodnocení matrice

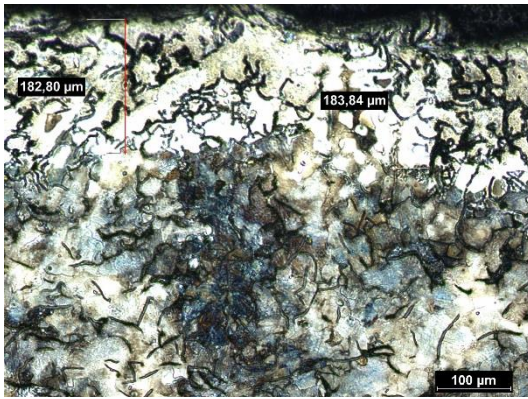
Pro určení typu matrice musely být vzorky leptány 5% roztokem Nitalu. Po naleptání vzorků byl na metalografickém mikroskopu pozorovatelný lamelární perlit, na základě kterého byla matrice vzorků shledána jako perlitická a byla tedy vyhodnocena jako odpovídající požadavkům. Lamelární perlit je nejlépe viditelný na snímcích detailu jádra (viz obr.31, obr.32, obr.35 a obr.36).

### 2.2.3.4 Vady struktury

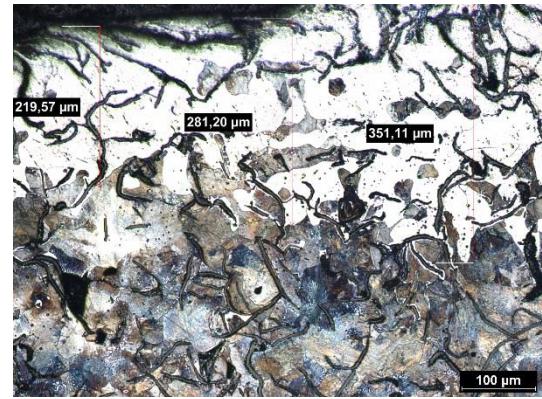
#### Oduhličení povrchové vrstvy

Oduhličení povrchové vrstvy bylo pozorované na všech metalografických vzorcích leptaných 5% roztokem Nitalu. Na snímcích níže je porovnání povrchového oduhličení vzorků 2 a 5 z obou oblastí, včetně uvedených hloubek oduhličené vrstvy, které se na snímcích pohybují od 120 μm do 350 μm.

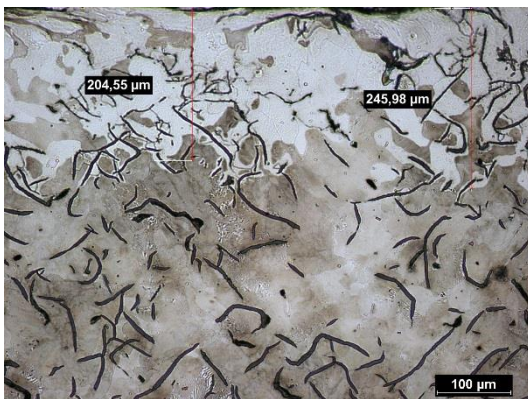
Povrchové oduhličení se dle normy ČSN 42 1240 označuje číselným označením 670. [7]



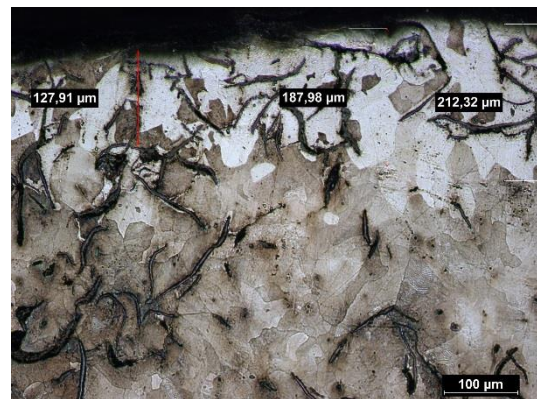
*Obr. 37 Vzorek 2-1, leptaná struktura povrchu, Nital 5%*



*Obr. 38 Vzorek 5-1, leptaná struktura povrchu, Nital 5%*



*Obr. 39 Vzorek 2-2, leptaná struktura povrchu, Nital 5%*



*Obr. 40 Vzorek 5-2, leptaná struktura povrchu, Nital 5%*

Vzhledem k tomu, že je oduhličení pozorovatelné pouze v povrchové vrstvě, bylo vyhodnoceno jako vada přípustná.

### Výskyt fosfidického eutektika (steaditů) ve struktuře jádra

Výskyt fosfidického eutektika (steaditu) byl nalezen ve struktuře jádra u vzorku 5-1 a 5-2, kde je tento výskyt označen na obrázcích 39 a 40 níže. Obsah steaditů ve struktuře má negativní vliv na rázovou houževnatost odlitku. Omezení pro jeho výskyt je stanoveno v tabulce 4 na 5% a pro velmi malé zastoupení ve struktuře bylo sledáno jako dodržené.



Obr. 41 Vzorek 5-1, leptaná struktura jádra, Nital 5%



Obr. 42 Vzorek 5-2, leptaná struktura jádra, Nital 5%

### Výskyt karbidů ve struktuře jádra

Karbidy nebyly ve struktuře metalografických vzorků nalezeny, takže jejich podmínka pro výskyt do 3% uvedená v tabulce 4, byla vyhodnocena jako splněná.

### 2.3 Experimentální ověření mechanických vlastností

Pro ověření mechanických vlastností odlitků z materiálu EN GJL-250 bylo použito vyhodnocení dle tří mechanických zkoušek. První provedenou zkouškou byla zkouška tahem na univerzálním trhačím stroji, kde byla ověřena minimální požadovaná pevnost v tahu. Druhou zkouškou byla zkouška rázem v ohybu metodou Charpy a jako poslední bylo provedeno měření tvrdosti podle Brinella pro tvrdost povrchu i jádra.



Obr. 43 Vzorky pro zkoušku lomové houževnatosti a tahovou zkoušku

## 2.4 Výsledky a diskuze zkoušek mechanických vlastností

### 2.4.1 Zkouška tahem

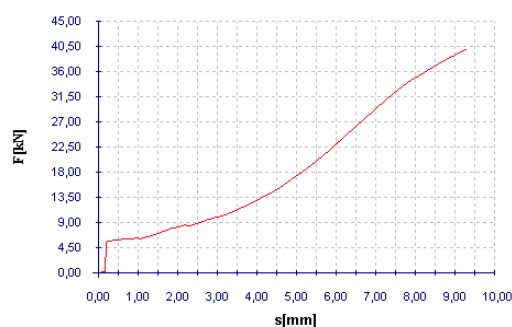
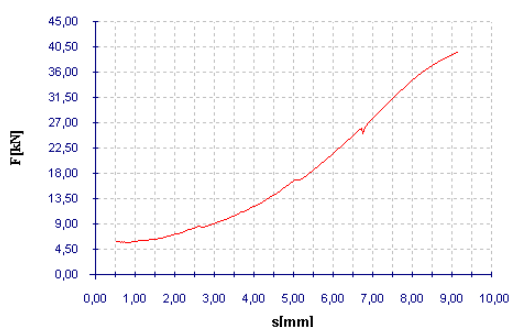
Zkouška tahem byla provedena na univerzálním trhacím stroji WEB 30t při pokojové teplotě 21°C, podle normy tahové zkoušky pro kovové materiály ČSN EN ISO 6892-1. Celkově byly zkoušeny tři vzorky kruhového průřezu pro každý z odlitků (viz obr.41) a výsledné naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.

Vzorky pro tahovou zkoušku byly ze dvou odlitků nesoucích označení 2 a 5 (viz obr.13 a obr.14). Vzorky byly odebrány z masы materiálu mimo dělicí roviny. Pracovní délka zkušebních vzorků pro vyhodnocování tahové zkoušky byla  $L_0 = 60\text{mm}$ . Při zkoušce tahem byla vyhodnocována mez pevnosti  $R_m$  [MPa], která je podílem maximální síly  $F_m$  [N] a počátečního průřezu  $S_0$  [mm<sup>2</sup>].

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (1)$$

Tabulka 5 Výsledky tahové zkoušky

Vzorek	$d_0$ [mm]	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	$F_m$ [N]	$R_m$ [MPa]
2	10	78,54	20209	257
	11,5	103,869	34275	330
	12,5	122,718	39708	324
$\bar{x} \pm s$				$304 \pm 41$
5	12,5	122,718	40038	326
	12	113,097	31197	276
	11	95,033	29451	310
$\bar{x} \pm s$				$304 \pm 26$



Obr. 44 Vzorek 2 grafický průběh tahové zkoušky    Obr. 45 Vzorek 5 grafický průběh tahové zkoušky

Na grafickém výstupu z univerzálního trhacího stroje WEB 30t na obrázcích výše máme porovnání grafického průběhu tahové zkoušky pro vzorek z odlitku 2 a 5. Z grafů není patrná výrazná mez kluzu  $R_e$ , která se u LLG obecně nehodnotí. Grafické průběhy všech tahových zkoušek jsou uvedeny v příloze v tabulce 9.



Pro zkoušené vzorky byl stanoven minimální požadavek na mez pevnosti v tahu a to 241 MPa (viz tabulka 2). Vzhledem k naměřeným hodnotám (viz tabulka 5) bylo posouzeno, že všechny vzorky podrobené zkoušce tahem splnily minimální požadovanou mez pevnosti včetně standardu pro materiál GJL-250.

#### 2.4.2 Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy

Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy byla provedena na Charpyho kladivu PH 300/450 s maximální nárazovou prací  $K=300\text{J}$  podle normy ČSN ISO 148-1 při pokojové teplotě. Zkoušeny byly 3 vzorky z obou odlitků (viz obr.41). Všechny tyto vzorky měly stejný rozměr a to 55x10x10mm.

Tabulka 6 Výsledky zkoušky rázem v ohybu

Vzorek	2				5			
Číslo měření	1	2	3	$\bar{x}$	1	2	3	$\bar{x}$
K (J)	8,7	5,0	5,4	6,4	4,8	4,9	5,3	5,0

Průměrnou experimentálně ověřenou hodnotou nárazové práce pro zkoušku rázem v ohybu metodou Charpy byla pro odlitek 2 naměřena  $K=6,4\text{J}$  a pro odlitek 5  $K=5\text{J}$ .

#### 2.4.3 Zkouška tvrdosti dle Brinella

Zkouška tvrdosti byla provedena metodou Brinell dle normy ČSN EN ISO 6506-1. Jako indentor byla použita kulička o průměru 5mm z tvrdokovu, pro měkké materiály jako je LLG, při zkušebním zatížení 750 kp (1 kp = 9,81 N). Označení pro zkoušku je tedy HBW 5/750 s poměrným zatížením 30 N/mm<sup>2</sup>. Měření tvrdosti bylo provedeno na univerzálním tvrdoměru EMCOTEST M4C pro povrch i jádro u vzorků z obou odlitků (viz obr.44), přičemž pro každý případ bylo provedeno pět měření (viz tabulka 7).

Před provedením zkoušky povrchové tvrdosti byl dodržen požadavek na zbrúšení povrchové vrstvy do hloubky 1,5 mm.



Obr. 46 Vzorky pro zkoušku tvrdosti

Tabulka 7 Vyhodnocení zkoušky tvrdosti

	Vzorek 2		Vzorek 5	
	povrch	Jádro	Povrch	Jádro
č. měření	HBW 5/750			
1	217	207	207	199
2	207	209	198	207
3	224	201	209	205
4	233	207	211	190
5	238	214	213	189
$\bar{x} \pm s$	$224 \pm 12$	$208 \pm 5$	$208 \pm 6$	$198 \pm 8$

Standard povrchové tvrdosti pro odlitek z materiálu GJL-250 s tloušťkou stěny 15-30 mm odpovídá 200-260 HBW (viz tabulka 2). Z experimentálně ověřených hodnot (viz tabulka 7) vyplývá, že byl splněn standard a zároveň byla dodržena i stanovená podmínka povrchové tvrdosti 207-255 HBW (viz tabulka 2). Pro odlitky byl dále stanoven požadavek, aby se tvrdost jádra nelišila o více než 30 HBW oproti tvrdosti na povrchu. I tomuto kritériu naměřené hodnoty vyhovují.

#### 2.4.4 Souhrn zkoušek mechanických vlastností

Pro přehledné zhodnocení mechanických zkoušek je uvedena níže tabulka, porovnávající požadované a experimentálně naměřené hodnoty.

Tabulka 8 Souhrnné porovnání mechanických vlastností

		Pevnost v tahu $R_m$ [MPa]	Povrchová tvrdost dle HBW 5/750	Tvrdost jádra dle HBW 5/750
Průměrné naměřené mechanické vlastnosti	Odlitek 2	$304 \pm 41$	$224 \pm 12$	$208 \pm 5$
	Odlitek 5	$304 \pm 26$	$208 \pm 6$	$198 \pm 8$
Minimální požadované mechanické vlastnosti pro EN GJL-250		241	207-255	177-225

Z dosažených experimentálních výsledků mechanických vlastností lze usoudit, že se dají považovat za dostačující a z hlediska mechanických vlastností tedy oba odlitky z EN GJL-250 dostaly stanoveným požadavkům.

### 3. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo v rámci požadavků na kvalitu odlitků z materiálu EN GJL-250 zhodnotit mikrostrukturu na metalografických výbrusech analýzou struktury a klasifikací případného výskytu vad. Dále pak byly hodnoceny mechanické vlastnosti na základě experimentálně provedených zkoušek tahem, rázem v ohybu metodou Charpy a měřením tvrdosti.

Z metalografického hodnocení odlitků lze konstatovat, že:

- struktura grafitu byla dle normy ČSN EN ISO 945-1 pro obě oblasti obou odlitků vyhodnocena jako EN ISO 945-1 IA4
- velikost lupínkového grafitu splnila maximální dovolený rozměr 0,35 mm, konkrétně pro odlitek 2 byla maximální pozorovaná velikost lupínku 0,3 mm a pro odlitek 5 pak 0,33 mm
- matrice obou oblastí u obou odlitků byla shledána jako perlitická
- výskyt feritu, karbidů a steaditu ve struktuře nepřekročil maximální povolené procentuální obsahy
- vady mikrostruktury byly klasifikovány jako přípustné, protože byl jejich výskyt zpozorován pouze v nekritických oblastech.

Na základě analýzy mikrostruktury ve dvou oblastech byly odlitky 2 a 5 shledány jako kvalitní s výskytem pouze přípustných vad mikrostruktury.

Podle experimentálních zjištění mechanických vlastností lze konstatovat, že:

- dle provedené zkoušky tahem podle normy ČSN EN ISO 6892-1 bylo dosaženo hodnot průměrné pevnosti v tahu vyšších než byl minimální požadavek stanovený na  $R_m=241$  MPa, odlitek 2 dosáhl průměrné meze pevnosti  $R_m = 304 \pm 41$  MPa a odlitek 5  $R_m = 304 \pm 26$  MPa
- dle provedeného měření tvrdosti metodou Brinell podle normy ČSN EN ISO 6506-1 byla dosažena požadovaná povrchová tvrdost 207- 255 HBW 5/750, konkrétní povrchová tvrdost pro odlitek 2 vyšla  $224 \pm 12$  HBW 5/750 a pro odlitek 5  $208 \pm 6$  HBW 5/750
- podmínka tvrdosti byla dodržena i pro jádro, kde se tvrdost neměla lišit o více než 30 HBW 5/750 oproti tvrdosti povrchu, pro odlitek 2 vyšla  $208 \pm 5$  HBW 5/750 a pro odlitek 5  $198 \pm 8$  HBW 5/750
- zkouška rázem v ohybu metodou Charpy podle normy ČSN ISO 148-1 vyšla pro odlitek 2  $K=6,4J$  a pro odlitek 5  $K=5J$ .

Dle provedených experimentálních ověření kvality byly odlitky z EN GJL-250 shledány jako kvalitní, splňující všechny parametry zadané k ověření. Všechny cíle práce byly splněny.

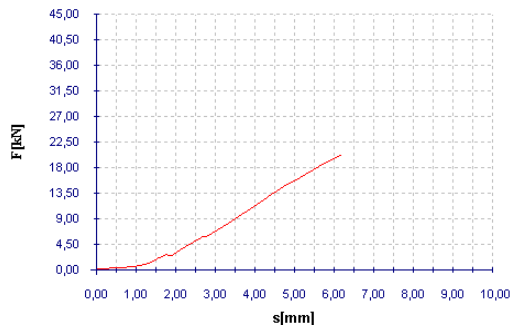
## Citovaná literatura

- [1.] **Roučka, J.** O slévárenství. *Ústav strojírenské technologie VUT v Brně*. [Online] [Citace: 20. Červenec 2018.] <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/uvod/o-slevarenstvi>.
- [2.] **MACHEK, V. a SODOMKA, J.** *Nauka o materiálu - Struktury kovových materiálů*. Praha : ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03379-1.
- [3.] **Roučka, J.** *Metalurgie litin*. Brno : PC DIR, 1998. ISBN 80-214-1263-1.
- [4.] **RYŠ, P., a další.** *Nauka o materiálu 1*. Praha : Československé akademie věd ACADEMIA, 1975.
- [5.] **Němec, M., Bednář, B. a Bryksí Stunová, B.** *Teorie slévání. 2. vydání*. Praha : ČVUT v Praze, 2016. ISBN 978-80-01-06026-1.
- [6.] **SKOČOVSKÝ, P. a PODRÁBSKÝ, T.** *Grafitické liatiny*. Žilina : Edis, 2005. ISBN 80-8070-390-6.
- [7.] **OTÁHAL, V.** *Vady odlitků. Atlas vad. Železné a neželezné slitiny. 1.vyd.* Brno : Metal Casting and Foundry Consult, Otáhal Vlastislav, Brno, Horská 27.
- [8.] **Elbel, T.** *Základy slévárenské technologie. Strojní lyceum Ostrava*. [Online] [Citace: 26. Červen 2018.] <http://strojnilyceum.wz.cz/maturita/tep/odlevani.pdf>.
- [9.] **VETIŠKA, A.** *Teoretické základy slévárenské technologie: učebnice pro strojní fakulty. 2., upr. vyd.* Praha : SNTL, 1974. Řada strojírenské literatury.
- [10.] **HAMPL, J.** *Metalurgie slévárenských slitin: studijní opora. VŠB - Technická univerzita Ostrava*. [Online] 2013. [Citace: 10. Červen 2018.] [https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/metalurgie-slevarenskych-slitin/HAMPL\\_Metalurgie-slevarenskych-slitin.pdf](https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/metalurgie-slevarenskych-slitin/HAMPL_Metalurgie-slevarenskych-slitin.pdf). ISBN 978-80-248-3585-3.
- [11.] **JELÍNEK, P.** *Slévárenství. 4. vyd.* Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2000. ISBN 8070789522.
- [12.] **ELBET, T.** *Diagnostika a řízení kvality odlitků: studijní opora. VŠB - Technická univerzita Ostrava*. [Online] 2013. [Citace: 10. Červen 2018.] [http://katedry.fmfi.vsb.cz/Modin\\_Animace/Opory/02\\_Metalurgicke\\_inzenyrstvi/08\\_Diagnostika\\_a\\_rizeni\\_kvality\\_odlitku/Elbel\\_Diagnostika\\_a\\_rizeni\\_kvality.pdf](http://katedry.fmfi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/08_Diagnostika_a_rizeni_kvality_odlitku/Elbel_Diagnostika_a_rizeni_kvality.pdf). ISBN 978-80-248-3584.
- [13.] **ČSN EN ISO 945-1.** *Mikrostruktura litin - Klasifikace grafitu vizuální analýzou*. Praha : ÚNMZ, 2011.

# Přílohy

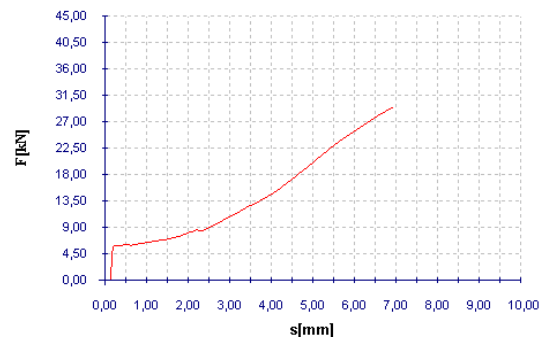
Tabulka 9 Grafický výstup univerzálního trhačího stroje WEB 30t

Vzorek 2

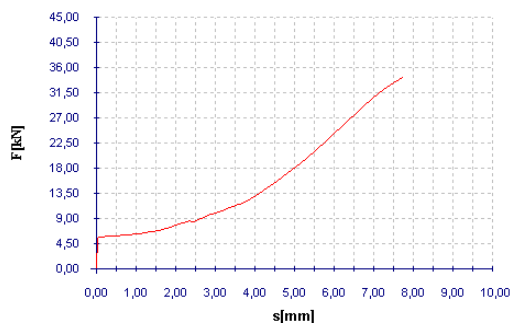


*tloušťka 10mm*

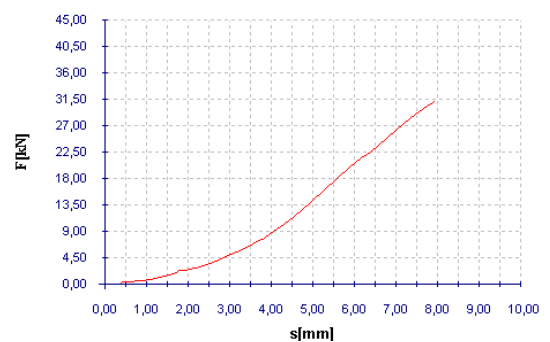
Vzorek 5



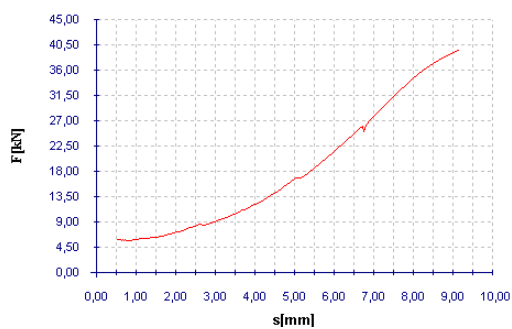
*tloušťka 11mm*



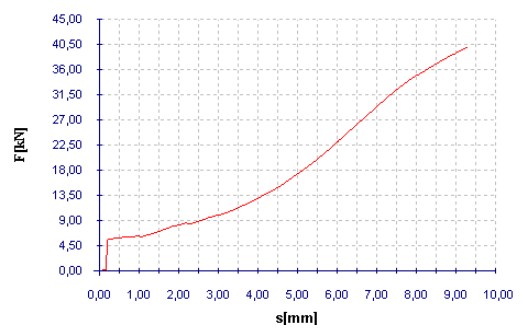
*tloušťka 11,5mm*



*tloušťka 12mm*



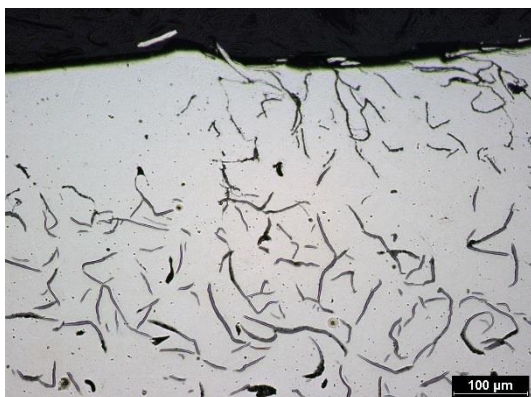
*tloušťka 12,5mm*



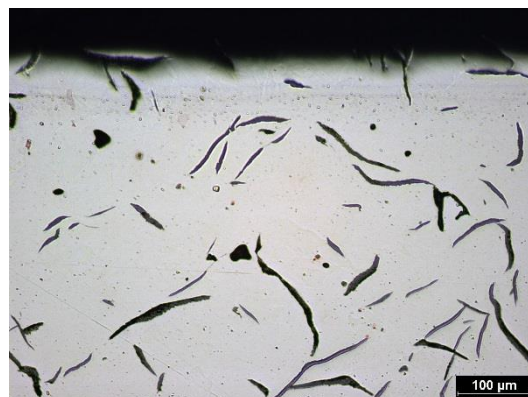
*tloušťka 12,5mm*

## Přehled snímků mikrostruktury:

### Neleptané vzorky



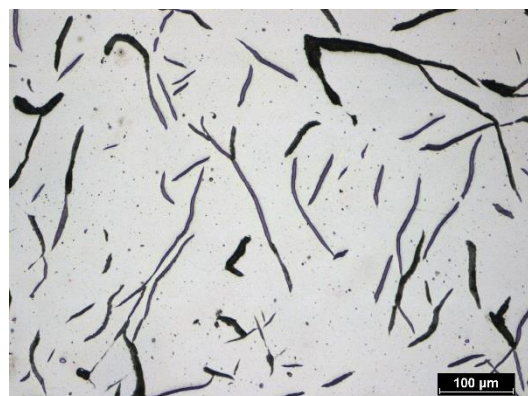
Obr. 47 Vzorek 2-1 struktura povrchu



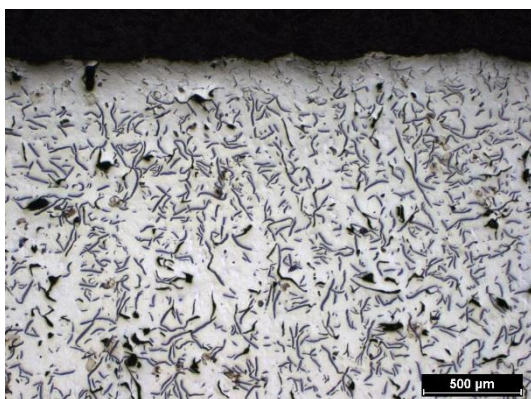
Obr. 48 Vzorek 5-1 struktura povrchu



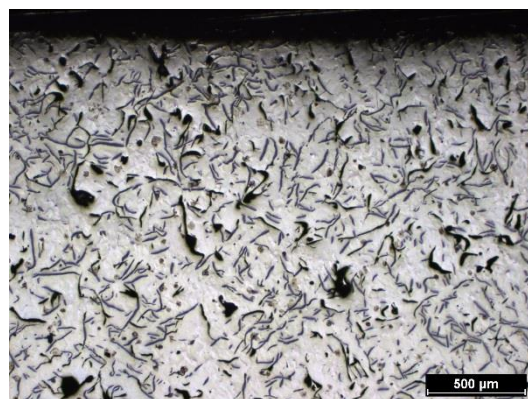
Obr. 49 Vzorek 2-1 struktura jádra



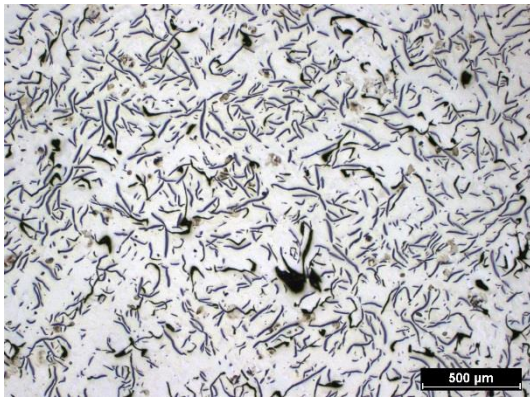
Obr. 50 Vzorek 5-1 struktura jádra



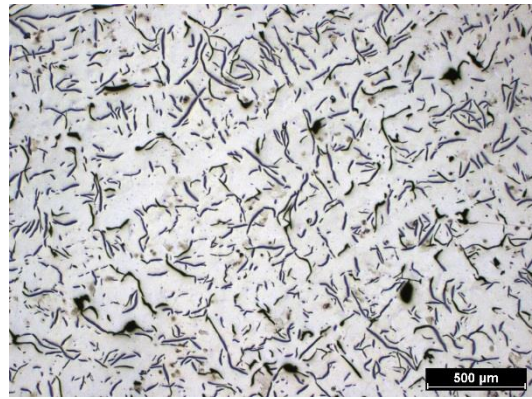
Obr. 51 Vzorek 2-2 struktura povrchu



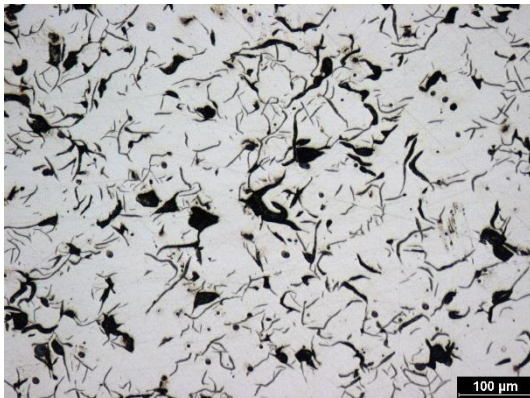
Obr. 52 Vzorek 5-2 struktura povrchu



*Obr. 53 Vzorek 2-2 struktura jádra*



*Obr. 54 Vzorek 5-2 struktura jádra*



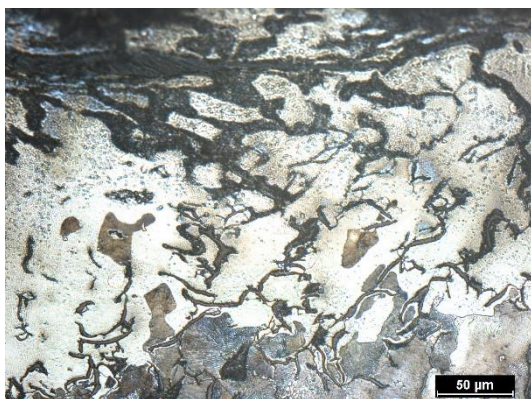
*Obr. 55 Vzorek 2-2 struktura jádra*



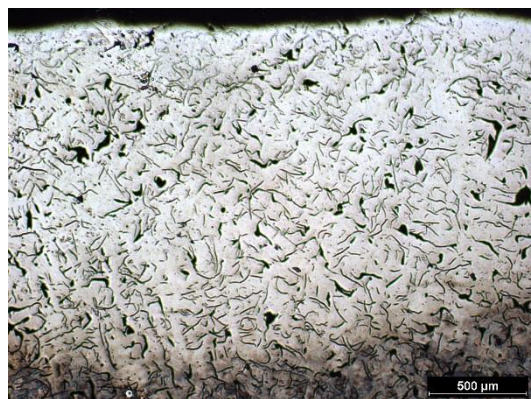
*Obr. 56 Vzorek 5-2 struktura jádra v detailu*



## Leptané vzorky



**Obr. 57** Vzorek 2-1 leptaná struktura povrchu, Nital 5%



**Obr. 58** Vzorek 5-1 leptaná struktura povrchu, Nital 5%



**Obr. 59** Vzorek 2-1 leptaná struktura jádra, Nital 5%



**Obr. 60** Vzorek 5-1 leptaná struktura jádra, Nital 5%



**Obr. 61** Vzorek 2-1 leptaná struktura jádra v detailu, Nital 5%



**Obr. 62** Vzorek 5-1 leptaná struktura jádra, Nital 5%