

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie

ANALÝZA DEFECTŮ ODLITKŮ Z LKG

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Autor: Vojtěch Beneš

Studijní obor: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Vedoucí práce: Ing. Aleš Herman, Ph.D.

Praha 2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro **Vojtěcha BENEŠE**

Program: Výroba a ekonomika ve strojírenství
Obor: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství
Název: Analýza defektů odlitků z LKG
Název anglicky: Defect analysis on the ductile iron casting

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Litina s kuličkovým grafitem, rozdělení, vlastnosti, metalurgie
3. Vady odlitků z LKG
4. Provedení analýzy příčin defektů na typových odlitcích
5. Návrh a ověření změn v technologických postupech
6. Zhodnocení

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Aleš Herman, Ph.D.

Konzultant:

Datum zadání bakalářské práce: 31. 10. 2014

Termín odevzdání bakalářské práce: 18. 12. 2014

Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé.

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

Zadání bakalářské práce převzal:

Bibliografická citace

BENEŠ, Vojtěch. Analýza defektů odlitků z LKG. Praha, 2014. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Alešovi Hermanovi, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorských zákonů).

V Praze dne

podpis

Poděkování:

Tímto děkuji panu Ing. Aleši Hermanovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě Seco Group a.s., jmenovitě panu Ing. Luboši Splítkovi a panu Marku Češíkovi DiS. za jejich ochotu a čas.

Anotace:

Bakalářská práce je zaměřena na analýzu vad u tří typových odlitků dodaných od firmy Seco Group a.s. Úvodem se práce zabývá litinami, jejich rozdělením, obecným popisem a strukturou. Dále se práce detailněji věnuje litině s kuličkovým grafitem. Zprvu je zmíněn vliv různých prvků na vlastnosti litiny s kuličkovým grafitem, posléze je popsána struktura kovové matrice, modifikace, očkování a samotné dělení tohoto druhu litiny. Dalším bodem práce je rozdělení vad vznikajících při odlévání. Závěrečná část práce je samotná analýza již zmíněných tří typových odlitků.

Abstract:

Bachelor thesis describes the analysis of defects in three types of castings, which were delivered by Seco Group a.s. In the theoretical part I focus on cast-iron, their distribution, general description and structure. The thesis also deals in detail spheroidal graphite cast iron. The thesis first mentions the impact of various elements on the properties of cast iron with spheroidal graphite, subsequently described metal matrix structure, modifications, inoculation and distribution of this type of cast-iron. Next point thesis is distribution of defects that arise during casting. The final part is the analysis of the above-mentioned three type casts.

Klíčová slova:

litina; litina s kuličkovým grafitem; LKG; vady odlitků

Key Words:

cast-iron; spheroidal graphite cast iron; GJS; casting defects

Obsah

1. Úvod	9
2. Litiny	10
2. 1. Rozdělení litin	11
2. 1. 1. Grafické litiny.....	12
2. 2. Definice litin	15
2. 3. Strukturní složky litin	16
2. 3. 1. Grafit.....	16
2. 3. 2. Základní kovová matrice	18
2. 4. Litina s kuličkovým grafitem (LKG) – GJS	21
2. 4. 1. Vliv různých prvků na vlastnosti LKG.....	22
2. 4. 2. Struktura kovové matrice	24
2. 4. 3. Grafit.....	27
2. 4. 4. Modifikace.....	27
2. 4. 5. Očkování.....	28
2. 4. 6. Druhy LKG.....	29
2. 4. 7. ADI.....	30
3. Vady odlitků z LKG	32
4. Analýza příčin vad.....	34
4. 1. Odlitek č. 1	35
4. 2. Odlitek č. 2	37
4. 3. Odlitek č. 3	40
5. Návrh změn pro odstranění defektů.....	43
6. Závěr.....	44
7. Seznam použité literatury	45
8. Přílohy	47

Seznam obrázků

<i>Obrázek 1: Základní rozdělení litin [3]</i>	11
<i>Obrázek 2: Tvar grafitu u LLG [1]</i>	12
<i>Obrázek 3: Vliv tvaru grafitu na koncentraci pnutí [1]</i>	12
<i>Obrázek 4: Tvar grafitu u LVG [1]</i>	14
<i>Obrázek 5: Tvar grafitu u TL [1]</i>	14
<i>Obrázek 6: Rovnovážný diagram Fe-C - - -; Fe-Fe₃C ____ [3]</i>	15
<i>Obrázek 7: Etalony tvaru grafitu (ČSN EN ISO 945) [4]</i>	17
<i>Obrázek 8: Etalony rozložení grafitu (ČSN EN ISO 945) [4]</i>	18
<i>Obrázek 9: Etalony velikosti grafitu (ČSN EN ISO 945) [4]</i>	18
<i>Obrázek 10: Vznik lamelárního perlitu [1]</i>	20
<i>Obrázek 11: Dispersita perlitu [1]</i>	20
<i>Obrázek 12: Hendersův diagram [6]</i>	23
<i>Obrázek 13: Struktury kovové matrice u LKG [7]</i>	24
<i>Obrázek 14: Průběh ochlazování a výsledná feritická struktura [7]</i>	25
<i>Obrázek 15: Průběh ochlazování a výsledná perlitická struktura struktura [7]</i>	26
<i>Obrázek 16: Model grafitického zrna [7]</i>	27
<i>Obrázek 17: Schéma izotermického zušlechťování LKG v IRA diagramu [6]</i>	31
<i>Obrázek 18: Typové odlitky</i>	34
<i>Obrázek 19: Vada odlitku č.1</i>	35
<i>Obrázek 20: Metalografický výbrus odlitku č. 1</i>	36
<i>Obrázek 21: Vtoková soustava odlitku č. 1</i>	37
<i>Obrázek 22: Vada odlitku č. 2</i>	38
<i>Obrázek 23: Metalografický výbrus odlitku č. 2</i>	38
<i>Obrázek 24: Vtoková soustava odlitku č. 2</i>	39
<i>Obrázek 25: Vada odlitku č.3</i>	40
<i>Obrázek 26: metalografický výbrus odlitku č. 3</i>	41
<i>Obrázek 27: Vtoková soustava odlitku č. 3</i>	41

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1: Orientační přehled mechanických vlastností LLG [1]</i>	13
<i>Tabulka 2: Orientační mechanických vlastností TL [1]</i>	15
<i>Tabulka 3: Chemické složení LKG [2]</i>	22
<i>Tabulka 4: Mechanické vlastnosti nelegovaných LKG [1]</i>	30
<i>Tabulka 5: Mechanické vlastnosti ADI [1]</i>	31
<i>Tabulka 6: Roztřídění vad odlitků podle skupin a druhů [11]</i>	32

Seznam vzorců

(1) <i>Výpočet uhlíkového ekvivalentu</i>	23
---	----

1. Úvod

Cílem bakalářské práce bylo:

- obecný popis litin, jejich rozdělení, vlastnosti a metalurgie
- analýza a vyhodnocení příčin vad u 3 typových odlitků dodaných od firmy Seco Group a.s.

V úvodu se práce zabývá rozdělením litin, jejich obecným popisem, mechanickými vlastnostmi a metalurgickým složením. Dále se úzce zaměřuje na litinu s kuličkovým grafitem (dále jen LKG), kde detailněji popisují, jaký vliv mají různé prvky na její vlastnosti, strukturu kovové matrice, očkování, modifikace a její druhy. Poté se zmiňují o izotermicky kalené LKG (ADI), která díky svým dobrým vlastnostem vykazuje velký potenciál a vysokou progresivitu. Poslední teoretická část práce se zaměřuje na vady odlitků z LKG.

Praktická část probíhá ve spolupráci s firmou Seco Group a.s. Firma sídlí ve městě Jičín a zabývá se především výrobou žacích traktorů, které dodává na evropský trh. Za další patří mezi významné slévárny v České republice v oblasti menších a přesnějších odlitků z tvárné litiny zejména pro evropské výrobce osobních a nákladních automobilů, traktorů a stavebních strojů. Mým úkolem bylo zanalyzovat vady odlitků a navrhnout možné příčiny těchto vad. Analýza spočívala v nasimulování licího procesu za pomoci programu Novacast – NovaFlow&Solid CV 4.6 a odhalení možných příčin vad. Dále jsem u jednotlivých odlitků prováděl metalografické výbrusy a vyhodnotil grafit a jejich strukturu. Po vyhodnocení následuje návrh možných řešení pro odstranění vznikajících vad odlitků.

2. Litiny

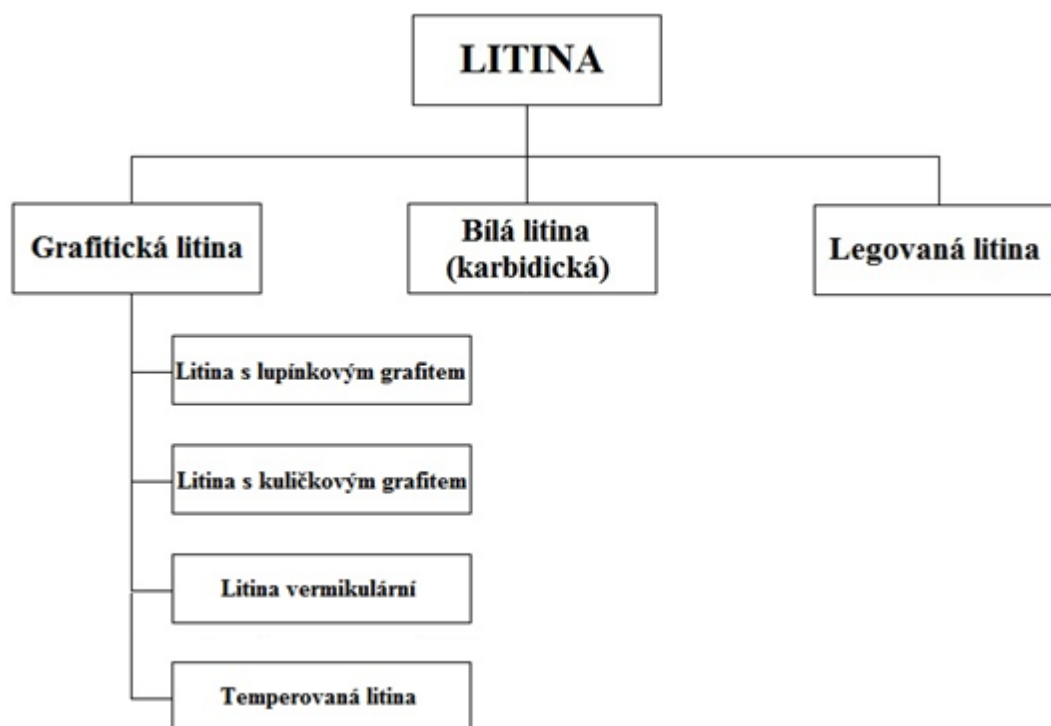
Technologie slévání je tu již řadu let a má své nezpochybnitelné místo v oblasti strojírenství. Slévání se neustále vyvíjí, dají se tak udělat součásti takřka o neomezené hmotnosti, tvaru či velikosti. Materiály, které se používají, jsou především litiny, dále pak ocele, slitiny hliníku, mědi, hořčíku a dalších kovů.

Výhody a nevýhody odlitků nelze jednoznačně specifikovat. Záleží na použití metody a materiálu. Můžeme mít výrobky rozměrově přesné, ale na druhou stranu mají horší mechanické vlastnosti atp. Obecně lze ale říci, že odlitky se používají především pro zkonstruování velmi složitých tvarů, kterých bychom pomocí jiných technologií nedocílili. Výhodou LKG je především její poměrně nízká cena doprovázená dobrými mechanickými vlastnostmi. Má poměrně dobrou pevnost a tvrdost a to při přijatelné tažnosti. Je velká pevnostní škála LKG, kde zvyšující pevnost je na úkor snižující se tažnosti. V dnešní době je tendence nahrazovat oceli na odlitky právě LKG, z důvodu srovnatelných vlastností a to při poměrně výrazně nižší ceně. [1] [2]

Údaje z roku 2012 ukazují, že výroba odlitků předčila 100 mil. tun za rok, což představuje nárůst o 2,3% oproti roku předešlému. Zdaleka největším výrobcem odlitků na světě je Čína, jejíž roční produkce představuje 42,5 mil. tun. Na druhém a třetím místě jsou USA, s objemem výroby 12,8 mil. tun ročně a Indie s 9,3 mil. tun. Pro porovnání, produkce Evropy je 15,4 mil. tun, kde dominuje Německo, s jeho roční produkcí 5,2 mil. tun. Co se týče České republiky, tak ta má roční produkci 424 358 tun, z toho 52 911 tun LKG. Zajímavé je také porovnání počtu činných sléváren, kde je na prvním místě pochopitelně Čína s 30 000 slévárnami, z toho 17 000 jich je na litiny. V České republice je celkový počet sléváren 182, přičemž se 85 věnuje litinám. [17]

LKG se řadí mezi progresivní materiály a poptávka po ní neustále roste, především díky její ceně a dobrým vlastnostem. Zvyšují se však i celkové požadavky na jakost odlitků ze stran zákazníků. Proto je důležité neustále vylepšovat a optimalizovat výrobní postupy, aby byl tento materiál i nadále pro zákazníka minimálně stejně tak zajímavý, jako doposud.

2. 1. Rozdělení litin



Obrázek 1: Základní rozdělení litin [3]

- **Grafitická litina**

Je tvořena základní kovovou maticí a grafitem, grafit a základní kovová matrice mají největší vliv na výsledné vlastnosti litiny. Tyto litiny mají šedý lom a jsou nejpoužívanější. Obsah uhlíku u grafitických litin se pohybuje mezi 2,5 – 3,8 %. [1]

- **Bílá litina (karbidická litina)**

Ve struktuře bílých litin není přítomný volný grafit, uhlík je v těchto litinách vyloučený jako vázaná forma (cementit). Cementit společně se základní kovovou maticí určuje základní vlastnosti bílé litiny. Tyto litiny se vyznačují velkou tvrdostí, křehkostí a špatnou obrobiteľností, to vše především díky cementitu. Bílá litina se používá především na výrobu temperované litiny a to za pomoci tepelného zpracování (temperování). Obsah uhlíku u bílých litin se pohybuje mezi 2,4 – 4,5 %. [1] [3]

- **Legovaná litina**

Legované litiny tvoří samostatnou skupinu litin, výsledné vlastnosti této litiny jsou závislé na množství a charakteru jejich legur. Mohou mít jak šedý, tak i bílý lom, toto je ovlivněno obsahem právě těch legur, které mají vliv na stabilitu cementitu. [1]

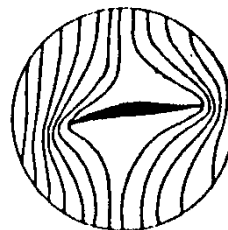
2. 1. 1. Grafické litiny

- **Litina s lupínkovým grafitem (LLG) – GJS**

Dříve označována jako šedá litina. Litina s lupínkovým grafitem je složena z kovové matrice a grafitu. Základními složkami kovové matrice je perlit a ferit a jejich obsah je udáván v určitém poměru, litina však může mít i čistě perlitickou nebo čistě feritickou strukturu. Perlit zvyšuje pevnost a tvrdost. Ferit naopak pevnost a tvrdost snižuje a však zlepšuje plastické vlastnosti litiny. Litina s lupínkovým grafitem obsahuje grafit ve tvaru lupínků (obr. 2), jejichž délka je podstatně větší než jejich tloušťka a konce lupínků jsou ostré. Ostré konce lupínků a jejich nepravidelná orientace zapříčiňuje negativní vrubový účinek grafitu (obr. 3), proto litiny s lupínkovým grafitem není vhodná pro konstrukci cyklicky namáhaných součástí. Na velikosti a tvaru lupínků závisí konečné vlastnosti, čím menší je poloměr zakřivení lupínku a čím je lupínek delší, tím větší koncentrace napětí. Proto mají litiny s lupínkovým grafitem nízkou mez pevnosti v tahu, naopak jejich pevnost v tlaku je vysoká (až 3-krát větší než v tahu), proto jsou vhodné ke konstrukci součástí namáhaných především tlakem. Platí také, že čím jsou lupínky grafitu jemnější, tím vyšší je pevnost materiálu. Litina s lupínkovým grafitem je vyznačuje velice dobrou tepelnou vodivostí. V průmyslu se tato litina používá na výrobu různých součástí strojů, armatur, těles čerpadel, řemenic atd. [1] [2]



Obrázek 2: Tvar grafitu u LLG [1]



Obrázek 3: Vliv tvaru grafitu na koncentraci pnutí [1]

Tabulka 1: Orientační přehled mechanických vlastností LLG [1]

označení materiálu	pevnost v tahu R_m [MPa]	pevnost v tlaku R_d [MPa]	tvrdost [HB]
ČSN EN-GJL 100	100- 200	-	< 180
ČSN EN-GJL 150	150- 250	98-165	< 200
ČSN EN-GJL 200	200- 300	130-195	< 220
ČSN EN-GJL 250	250- 350	165-228	< 240
ČSN EN-GJL 300	300- 400	195-260	< 260
ČSN EN-GJL 350	350- 450	228-285	< 270

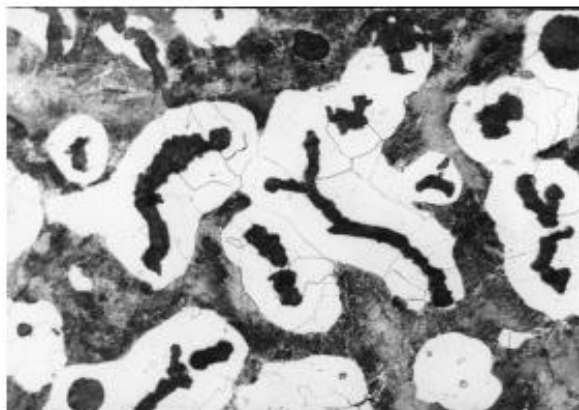
* tažnost LLG je zanedbatelná

- **Litina s kuličkovým grafitem (LKG) – GJS**

Touto litinou se budu zabývat v samostatné kapitole, viz níže.

- **Litina s červíkovitým grafitem (LVG) – GJV**

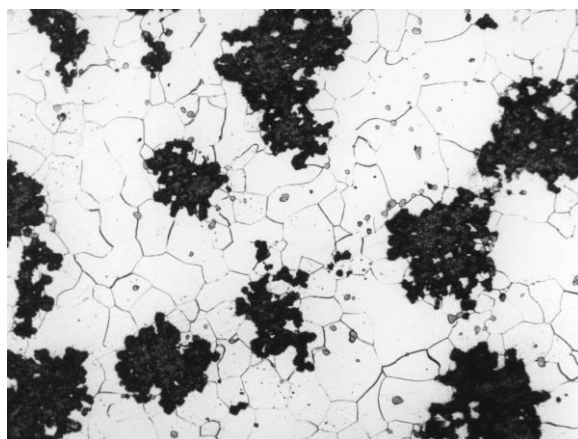
Dříve označována jako litina vermikulární. Litina s červíkovitým grafitem je složena z kovové matrice a grafitu. Kovová matrice je perlitická, feritická nebo jejich kombinace, stejná jako u litiny s lupínkovým grafitem. Tvar grafitu litiny s červíkovitým grafitem má podobnou morfologii jako grafit lupínkový, ale je kratší a tlustší, tento tvar grafitu se nazývá červíkovitý (obr. 4). Ve struktuře této litiny se obvykle objevuje též určité množství grafitu ve tvaru lupínkovitém nebo kuličkovitém, ale to maximálně do 20% z celkového vyloučeného grafitu. Červíkovitý grafit může vznikat jako nežádoucí struktura (nedostatečná modifikace, vysoký obsah síry), nebo jej lze vytvářet záměrně. Vlastnosti litiny s červíkovitým grafitem se pohybují mezi vlastnostmi litiny s kuličkovým a lupínkovým grafitem. Vyznačuje se podobnými, velmi dobrými slévarenskými vlastnostmi, jako litina s lupínkovitým grafitem a zároveň velmi dobrými mechanickými vlastnostmi podobným litinám s kuličkovitým grafitem. Tato litina se používá především u součástek dynamicky namáhaných (např. hlavy a bloky válců). [1] [3]



Obrázek 4: Tvar grafitu u LVG [1]

- **Temperovaná litina (TL) – GJM**

Temperovaná litina se vyrábí tepelným zpracováním bílé litiny (temperováním). Při tomto procesu dochází ke grafítizaci ledeburitického a perlitického cementitu, litina se tím stává měkčí a částečně tvárnější. Grafit má tvar vloček (obr. 5). Podle způsobu tepelného zpracování se mění výsledná struktura, temperované litiny se dělí na litiny s bílým lomem (GJMW) a s černým lomem (GJMB). Litiny s bílým lomem vzniká žíháním v oduhličovací atmosféře za teplot kolem 1000°C, vzniká převážně perlitická struktura. Litiny s černým lomem vznikají žíháním v neutrální atmosféře a podle způsobu zpracování vzniká buď čistě feritická nebo perlitická struktura. Norma ČSN EN 1562 uvádí celou řadu temperovaných litin, které zde detailně neuvádím. Objem výroby této litiny se v posledních letech výrazně snížil, své uplatnění si zachovává u specifických zejména tenkostěnných odlitků. Tato litina je nahrazována především litinou s kuličkovým grafitem. [1] [2]



Obrázek 5: Tvar grafitu u TL [1]

Tabulka 2: Orientační mechanických vlastností TL [1]

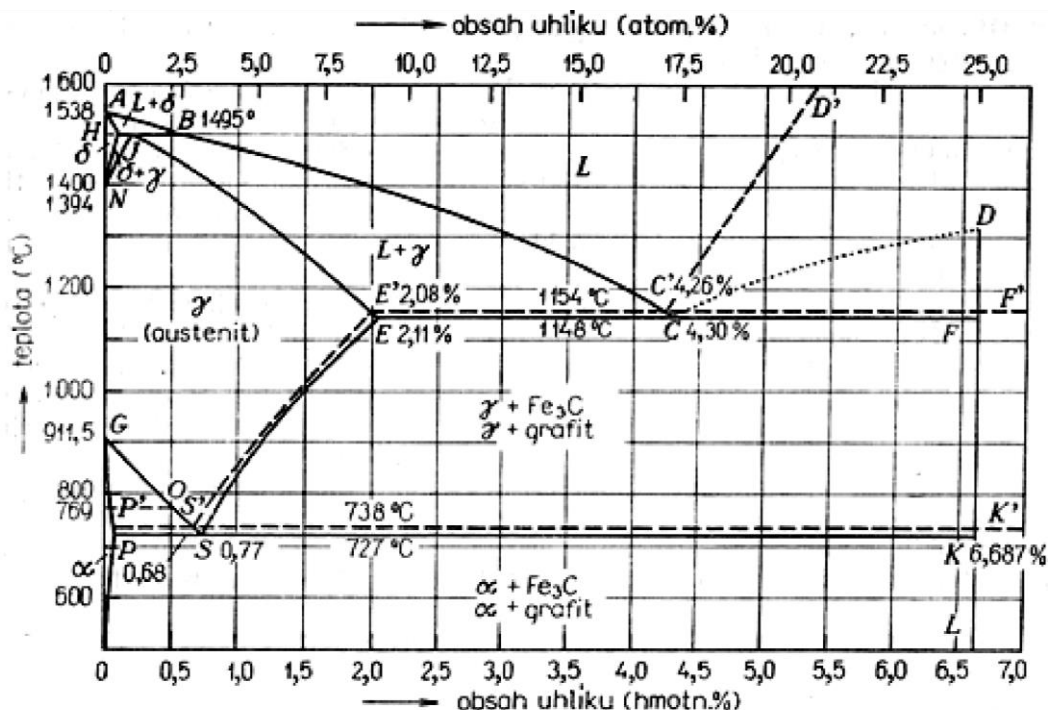
druh litiny	pevnost v tahu R_m [MPa]	tažnost A_3 [%]	tvrdost [HB]
S bílým lomem	350-450	4-10	200-230
S černým lomem			
- feritická	300-350	6-12	> 150
- perlitická	450-700	2-7	150-290

2. 2. Definice litin

Litiny jsou slitiny železa, uhlíku a dalších prvků, v nichž je uhlík vyloučen ve formě grafitu nebo vázán jako karbid Fe_3C , případně karbid jiného prvku. Přičemž obsah uhlíku je vyšší, než jeho rozpustnost v austenitu ($C > 2,08$ % bez vlivu legujících prvků).

Litiny krystalizují podle dvou diagramů:

- Stabilní diagram železo-uhlík (Fe-C)
- Metastabilní diagram železo-karbid železa (Fe- Fe_3C)



Obrázek 6: Rovnovážný diagram Fe-C - - -; Fe- Fe_3C ____ [3]

2. 3. Strukturní složky litin

Struktura litin je tvořena primární fází a eutektikem. Při tuhnutí podle stabilního diagramu vzniká grafické eutektikum (tvořené austenitem a uhlíkem). Uhlík je vyloučen z některých morfologických forem grafitu. Tyto litiny jsou označovány jako grafické. Při tuhnutí podle metastabilního diagramu je eutektikem ledeburit. Ve struktuře není přítomen volný grafit a takovéto litiny jsou označovány jako bílé nebo karbidické. Přechodovým stupněm je tzv. maková litina, která jak grafické i metastabilní eutektikum (tato struktura je považována za nežádoucí). [1]

Struktura litiny je tedy tvořena grafitem a základní kovovou hmotou, v případě bílé litiny pouze základní kovovou hmotou.

2. 3. 1. Grafit

Grafit je krystalická forma uhlíku krystalující v hexagonální soustavě. Grafit má velmi dobrou tepelnou vodivost, ale je měkký, drobný a jeho pevnost a tvárnost jsou nepatrné. Malá pevnost grafitu způsobuje snížení celkové pevnosti materiálu. Za pomoci grafitotvorných prvků (Si, Al, P, Cu, Ni, Co) snížíme rozpustnost uhlíku v litině a tím zvýšíme jeho aktivitu. Naopak prvky karbidotvorné (Zr, Ti, V, Mo, Cr, W, Mn) rozpustnost uhlíku v litině zvyšují a tím jeho aktivitu snižují.

Krystalizace grafitu určuje jeho konečné množství, tvar a velikost. Způsob vyloučení grafitu v litině může být buď přímou cestou, nebo nepřímou. V přímé cestě je zárodkem grafitizace uhlík, který musí být v tavenině v dostatečné koncentraci. Vyšší koncentrace uhlíku zvyšuje aktivitu reakce směrem k zárodkování grafitu (homogenní nukleace). U nepřímé cesty vede krystalizace grafitu přes vznik a rozpad cementitu, čímž vznikají karbidické, oxidické a nitridické zárodky, které podporují vlastní zárodky grafitu (heterogenní nukleace). [1] [3]

Druhy grafitu:

- **Eutektický** (lupínkový, kuličkový, červíkovitý) – vzniká při tuhnutí eutektika. Společně s austenitem tvoří tzv. grafické eutektikum.
- **Primární** – vzniká jako primární fáze při tuhnutí nadeutektických grafických litin. Má lupínkovitý tvar a při pomalém tuhnutí nebo při dlouhém odstátí v pánvi má tendenci vyplouvat na hladinu kovu a tvoří grafický šum. Především u

silnostěnných odlitků může zůstat uzavřen v horních částech odlitku. Primární grafit ve struktuře má nepříznivý vliv na mechanické vlastnosti.

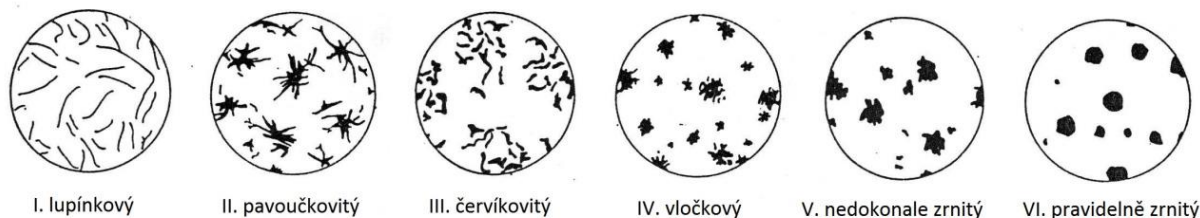
- Grafit, vznikající rozpadem metastabilních složek vlivem tepelného zpracování (temperování, žíhání na odstranění karbidů).

Hodnocení grafitu podle normy ČSN EN ISO 945 (původní norma ČSN 420461)

Množství grafitu a jeho tvar má značný vliv na vlastnosti litiny. Hodnotí se podle tří základních hledisek a to podle tvaru, rozložení a velikosti (metoda A). Hodnocení se provádí na neleptaném výbrusu při stonásobném zvětšení a vyhodnocují se porovnáním s obrázkovými etalony. Tato norma umožňuje ještě druhý způsob hodnocení (metoda B), která hodnotí grafit podle tvaru, rozložení, velikosti a množství. Pro stanovení množství grafitu v litině je určen poměr plochy zaujímaný grafitem k celkové ploše výbrusu (v %).

- **Tvar grafitu**

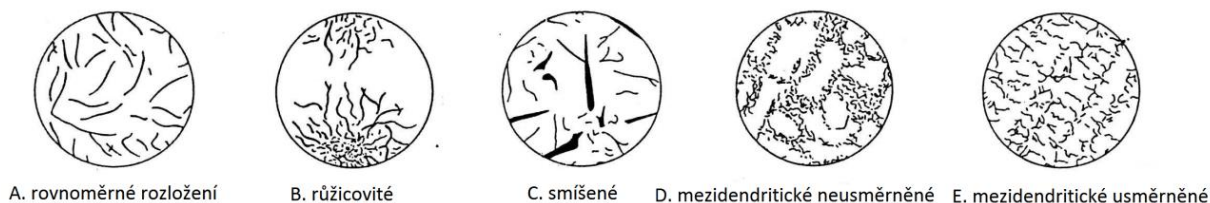
Tvar grafitu se podle normy ČSN EN ISO 945 dělí do šesti tříd (obr. 7). Jednotlivé názvy jsou odvozeny podle tvaru grafitu v litině, který je viditelný na metalografickém výbrusu. [4]



Obrázek 7: Etalony tvaru grafitu (ČSN EN ISO 945) [4]

- **Rozložení grafitu**

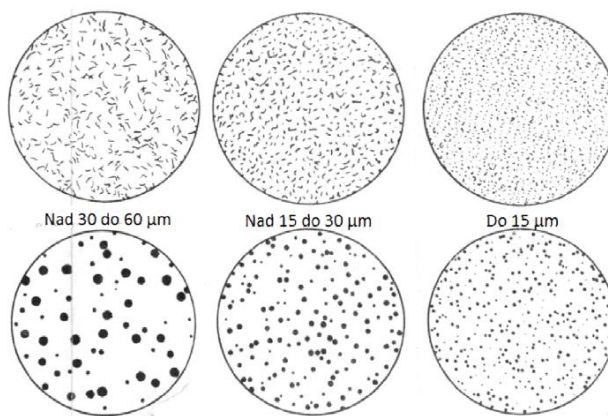
Rozložení grafitu se podle normy ČSN EN ISO 945 dělí do pěti tříd (obr. 8). Rozložení grafitu má vliv na mechanické vlastnosti litiny, v ideálním případě je grafit ve struktuře rozmístěný rovnoměrně ve formě pravidelných, stejnoměrně velikých útvarů (obr. 3A). Nežádoucí jsou nesteroměrně velké útvary grafitu a místní nahromadění (obr. 3B,C), které mají negativní vliv na mechanické vlastnosti.



Obrázek 8: Etalony rozložení grafitu (ČSN EN ISO 945) [4]

- **Velikost grafitu**

Z hlediska velikosti grafitu platí, že čím jemnější zrna grafitu, vyloučených ve formě drobných lupínek nebo kuliček, tím výhodnější mechanické vlastnosti. Hrubé lamely grafitu významně snižují mechanické vlastnosti litiny.



Obrázek 9: Etalony velikosti grafitu (ČSN EN ISO 945) [4]

2. 3. 2. Základní kovová matrice

Ve ztuhlé litině můžeme zjistit řadu strukturních složek, struktura základní kovové matrice závisí na: chemickém složení litiny, rychlosti ochlazování v průběhu tuhnutí a chladnutí, stavu krystalizačních zárodků a na tepelném zpracování. Základní kovová matrice se hodnotí podle tvaru perlitu (lamelární a globulární) a podle poměru obsahu perlitu a feritu.

Základní kovovou matici v nelegovaných litinách tvoří: ferit, perlit a ledeburit. Legováním nebo tepelným zpracováním litin může získat základní kovovou matici, která může obsahovat austenit, martenzit, bainit nebo komplexní karbidy. [1] [2]

- **Ferit**

Intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe Fe_{α} , mřížka kubická prostorově centrovaná. Vzniká při eutektoidní transformaci austenitu podle stabilního diagramu (pomalé ochlazování podporuje vznik feritu). Litiny s větším obsahem feritu ve struktuře vykazují menší pevnost v tahu, menší pevnost a menší odolnost proti opotřebení, než litiny s čistě perlitickou strukturou. Obsah feritu se hodnotí jeho procentním podílem k celkové ploše výbrusu.

Ferit má nízkou pevnost a tvrdost ($R_m = 220\text{MPa}$, 50HB), je dobře tvárný a obrobitelný, v litinách je nositelem houževnatosti. Na vlastnosti feritu mají značný vliv legující prvky, mohou ovlivňovat jeho tvrdost, pevnost a houževnatost. Do teploty 768°C je magnetický, nad touto teplotou se stává paramagnetický. [1] [3]

- **Cementit**

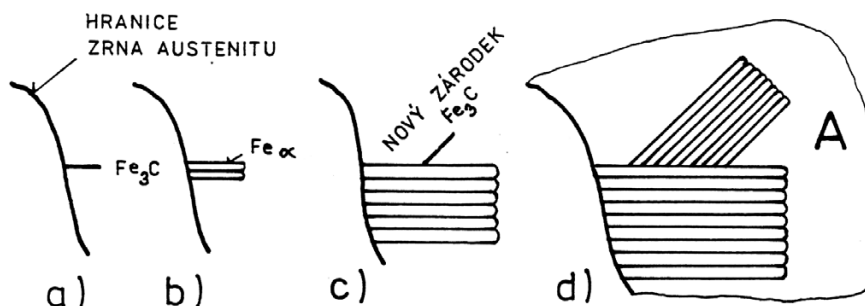
U nelegovaných litin je tvořen karbidem železa Fe_3C , obsahuje 6,67%C. V případě přítomnosti legur (Mn, Cr, W, V, Mo) mohou být atomy nahrazovány komplexními karbidy typu $(Fe,X)_3C$. Cementit je velmi tvrdý (až 850HB, komplexní karbidy i více) a křehký. Jeho přítomnost v litině zvětšuje tvrdost a odolnost proti otěru, ale zhoršuje pevnost a houževnatost. Také se s jeho zvyšujícím obsahem zhoršuje obrobitelnost litiny, může se stát až neobrobitelnou.

Cementit se v litině vyskytuje ve třech formách: primární, eutektický, perlitický. Primární cementit se vyskytuje poměrně zřídka a to u nadeutektických bílých litin ve formě hrubých jehlic. Eutektický cementit je součástí metastabilního eutektika – ledeburitu, způsobuje velkou tvrdost a křehkost litiny. Perlitický cementit je součástí eutektoidu – perlitu, zvyšuje pevnost a snižuje plastické vlastnosti litiny. [1] [3]

- **Perlit**

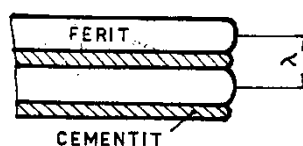
Eutektoid vzniklý rozpadem austenitu podle metastabilního systému. Je to směs feritu a perlitického cementitu. Perlit se vykazuje vysokou pevností, tvrdostí ($R_m = 800\text{MPa}$, 280HB) a odolností proti opotřebení, a však horší obrobitelností a plastickými vlastnostmi. Perlit ve velké míře ovlivňuje mechanické vlastnosti litiny a to především její pevnost a tvrdost, tudíž v litinách je perlit hlavním nositelem pevnosti a tvrdosti.

Perlit se v litině hodnotí podle tří kritérií a to podle množství, hustoty a tvaru. Množství perlitu v litině se může pohybovat od 0% až do 100%. Tvar perlitu závisí na na podmínkách eutektoidní reakce a může být lamelární až globulární. Lamelární perlit je tvořen lamelami feritu a perlitu, které rostou paralelně vedle sebe a to po hranicích zrn austenitu. Většinou na jednom zrně austenitu vzniká hned několik zrn perlitu s rozdílnou orientací lamel (obr. 10).



Obrázek 10: Vznik lamelárního perlitu [1]

Globulární perlit vzniká sbalením lamel perlitu. Dosáhneme toho pomocí sferoidisačního žhání, nebo velmi pomalým ochlazováním. Litiny s globulárním perlitem vykazují lepší obrobiteľnosť, než litiny s lamelárným grafítem. Vlastnosti perlitu výrazně závisí také na jeho hustotě, dané jeho dispersitou (obr. 11). Dispersita perlitu v litině je určena vzájemnou vzdáleností dvou sousedících lamel feritu, čím je perlit hustější, tím vyšší jsou mechanické vlastnosti celé litiny. [1][3]



Obrázek 11: Dispersita perlitu [1]

- **Ledeburit**

Eutektikum v metastabilní soustavě Fe-Fe₃C s obsahem uhlíku 4,3%. Ledeburit je fázová směs tvořená austenitem a ledeburickým cementitem. Ledeburit je velmi křehký a je jednou ze základních složek bílých litin. V grafických litinách se objevuje na místech s rychlým odvodem tepla, toto místo je označováno za tzv. zákalku. [1]

- **Austenit**

Intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe Fe_γ , mřížka kubická plošně centrovaná. Maximální rozpustnost uhlíku v austenitu je 2,08% a to při teplotě 1147°C. Za běžných teplot se vyskytuje pouze jako zbytkový austenit, většinou zapříčiněný předchozím tepelným zpracováním. Také se může vyskytovat u některých legovaných litin, především u litin legovaných niklem. Austenit je měkký, výborně tvárný a odolný proti korozi. [1] [3]

- **Martenzit**

Přesycený tuhý roztok uhlíku v železe Fe_α . Vzniká při kalení nelegovaných i legovaných litin bezdifusním rozpadem austenitu. U některých legovaných litin vzniká přímo litím. Martenzit je velmi tvrdý (<1000HV) a křehký. [1]

- **Bainit**

Také nazývaný ausferit je směs feritu a cementitu, vyznačuje se jehlicovitou mikrostrukturou. Vzniká jako licií struktura legovaných litin, zejména u litin legovaných molybdenem a niklem. U nelegovaných litin vzniká při tepelném zpracování. Litiny s bainitickou strukturou vykazují vysokou pevnost a tvrdost a to při poměrně zachování poměrně příznivých plastických vlastnostech. Proto bainitické litiny (izotermicky kalené litiny) řadíme mezi moderní materiály s vysokou progresivitou. [1] [3]

- **Steadit**

Vzniká v důsledku malé rozpustnosti fosforu v železe jako potrojně eutektikum $Fe-Fe_3C-Fe_3P$. Vzhledem k malé rozpustnosti fosforu v železe se steadit vyskytuje ve struktuře litiny již od obsahu fosforu nad 0,1%. Steadit v litinách zvyšuje jeho zabíhavost, je tvrdý a velmi křehký. U litin s kuličkovým grafitem je nežádoucí. [1]

2. 4. Litina s kuličkovým grafitem (LKG) – GJS

Dříve označována jako tvárná litina. Struktura LKG je tvořena kovovou maticí a grafitem, kovová matrice může být feritická, perlitická nebo jejich kombinace a to v určitém poměru. Chemické složení (viz Tabulka 3.) je jedním z nejdůležitějších faktorů, které ovlivňují konečnou strukturu i vlastnosti LKG. Správné chemické složení a jeho pečlivá kontrola je stěžejním bodem k získání litiny s kuličkovým grafitem a požadovanou strukturou kovové matrice. [1] [2]

Tabulka 3: Chemické složení LKG [2]

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Mg [%]
3,2 – 4,3	1,5 – 4,0	0,15 – 0,8	< 0,1	< 0,02	0,04 – 0,08

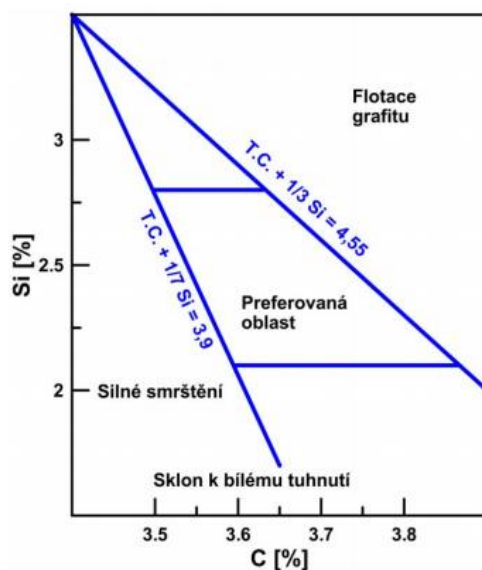
2. 4. 1. Vliv různých prvků na vlastnosti LKG

Strukturu i vlastnosti LKG zle do určité míry ovlivnit. Hlavní prvky, které se v LKG vyskytují, jsou krom železa: uhlík, křemík, mangan, fosfor a síra. Vyjímaje těchto primárních prvků se v LKG vyskytuje mnoho dalších prvků. Očkovací a modifikační přísady, ve většině případů křemík. Dále velké množství možných legur: měď, cín, nikl, molybden, titan, chrom atd. Poslední skupinu tvoří prvky, které se do LKG mohou dostat z výchozích surovin při druhování a jejich přítomnost je většinou nežádoucí. Mezi tyto prvky patří olovo, vizmut, antimon, arsen, bor, hliník, vanad, zirkon, i chrom, cín a titan se považují za nežádoucí prvky, pokud do LKG nejsou přidány úmyslně jako legury. [3] [7]

Primární prvky LKG

- **Uhlík a křemík**

Význam těchto dvou prvků spočívá ve vzájemném ovlivňování v průběhu krystalizace, čím větší koncentrace křemíku, tím vyšší je grafitizace uhlíku a tvorba zárodků v tavenině. Obsah uhlíku a křemíku a jejich vzájemný účinek je znázorněn v Hendersonovým diagramem (obr. 12). Křemík a uhlík jsou jediné prvky podporující bezkarbidickou strukturu. Množství uhlíku je omezeno jeho rozpustností v tekutém stavu. Křemík je nejen grafitotvorný, ale i feritotvorný prvek. Rozpouští se v kovové matici a zapříčiňuje zpevnění feritu, tím zvyšuje pevnost a tvrdost litiny, ale snižuje její tažnost a rázovou houževnatost. Dá se říci, že křemík je prvkem, který nejsilněji ovlivňuje pevnost a tažnost. Se zvyšujícím se obsahem křemíku roste křehkost litiny, snižuje se její tepelná vodivost a je náchylnější k tvoření bublin a pórů. Křemík také podporuje příznivé rozmístění grafitu v litině, zvyšuje počet grafitových buněk a snižuje velikost grafitových buněk. [2][6]



Obrázek 12: Hendersův diagram [6]

Dále je důležité znát hodnotu uhlíkového ekvivalentu (CE), který vychází ze vzájemného vlivu uhlíku a křemíku. Při hodnotě $CE = 4,23$ je litina eutektická, pod touto hranicí je litina podeutektická a nad touto hranicí je litina nadeutektická. [2][6]

$$CE = \%C + 1/3 (\%Si + \%P) \quad (1)$$

- **Mangan**

Tento prvek zvyšuje pevnost, tvrdost a ořezavost litiny. Mangan je silně perlitotvorný a zároveň perlit zjemňuje. Čas potřebný k feritizaci LKG se vzrůstajícím obsahem manganu roste. Mangan patří mezi karbidotvorné prvky, při obsahu $<0,7\%$ (závisí na počtu grafitových zrn a dalších legurách) lze výskyt karbidického síťový očekávat. Jeho karbidotvornost je možné do určité míry neutralizovat křemíkem, možné pouze u tenkostěnných odlitků. Přítomnost manganu v litině je také důležitá z důvodu odsíření litiny (váže se na MnS). [2][7]

- **Fosfor**

Další prvek, který ovlivňuje LKG je fosfor, vyskytuje se podstatě ve všech sázkových surovinách a přísadách nutných při výrobě LKG. Fosfor stabilizuje perlit. Společně se železem tvoří velmi křehký komplexní fosfid železa ($Fe-Fe_3C-Fe_3P$) – steadit. Tento prvek tuhne v tavenině jako poslední a může způsobit snížení houževnatosti a pevnosti a zvýšená náchylnost k pórovitosti. Například při zvýšení obsahu fosforu z $0,03\%$ na $0,06\%$ se

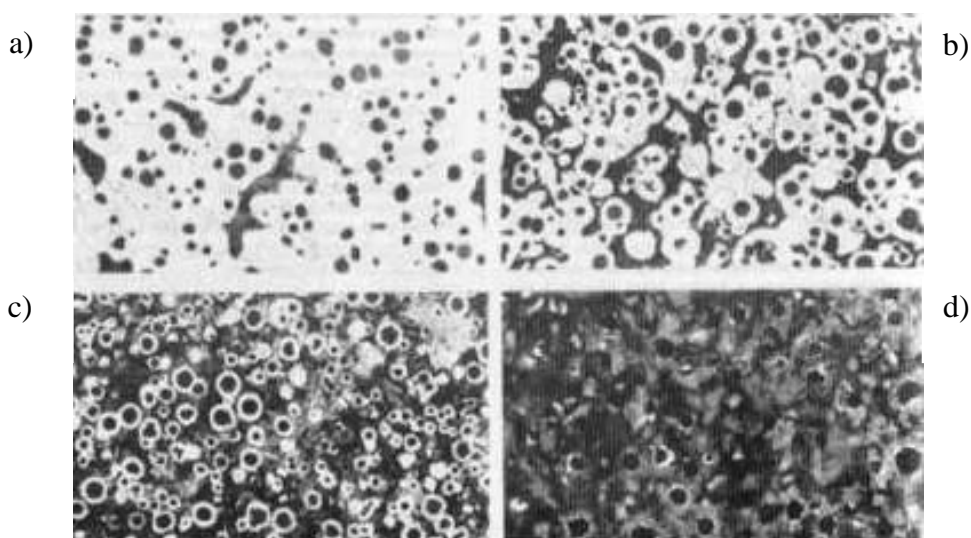
tažnost LKG sníží až o polovinu. Negativní vliv fosforu na pevnost a tažnost lze do určité míry redukovat tepelným zpracováním (žháním), je to však finančně nákladné. Z těchto důvodů je ideální vyrábět litinu s co nejnižším obsahem fosforu. Toho se dá dosáhnout především kvalitní sázkou, protože dále už lze jeho obsah snížit pouze minimálně. [2][7]

- **Síra**

Síra je rovněž nežádoucí prvek v LKG. S jinými prvky tvoří velmi stabilní sulfidy, které zabraňují grafítizaci a způsobují křehkost litiny. Síra navíc ruší účinek některých modifikátorů. Nežádoucí vlastnosti síry v litině lze odstranit hořčíkem, který síru z litiny vyváže (vyváže také téměř všechny kyslík). [2][3]

2. 4. 2. Struktura kovové matrice

Struktura kovové matrice je ovlivněna mnoha faktory, z nichž největší vliv má chemické složení, rychlost ochlazování, modifikace a očkování. Jak už bylo řečeno struktura kovové matrice u LKG může být feritická, feriticko-perlitická, perliticko-feritická a nebo perlitická (obr. 13), lze získat i strukturu martenzitickou nebo austenitickou. Další přechodové struktury (např. bainitickou) se dají získat pomocí tepelného zpracování. Volba struktury LKG, která má primární vliv na její výsledné mechanické vlastnosti, se řídí především podle účelu použití vyráběné součásti. Nežádoucí složkou kovové matrice jsou karbidické fáze, které negativně ovlivňují mechanické vlastnosti litiny. [1] [3] [7]

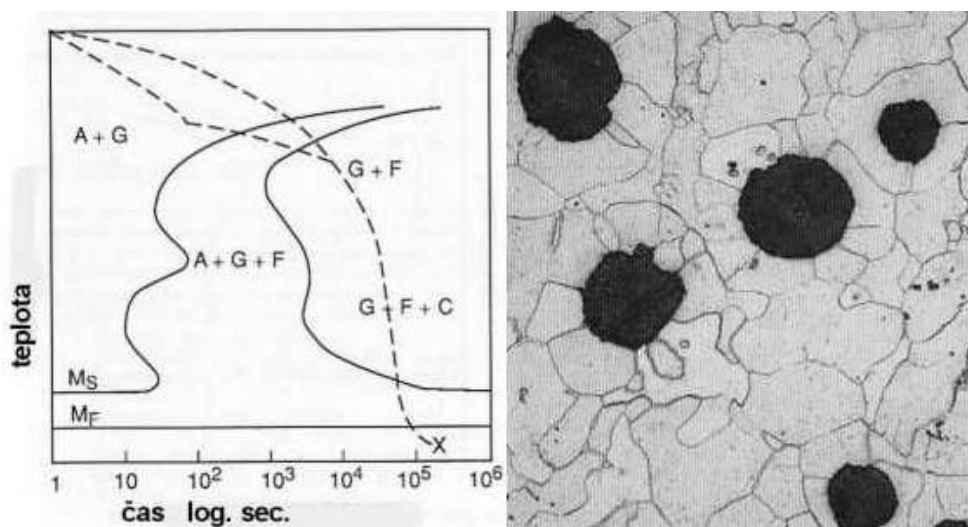


Obrázek 13: Struktury kovové matrice u LKG [7]

- a) feritická b) feriticko-perlitická c) perliticko-feritická d) perlitická

- **Feritická struktura**

Čistě feritická struktura se v LKG dá získat zvýšeným obsahem křemíku (až 4%), nebo tepelným zpracováním. Na obr. 14 můžeme vidět průběh ochlazování a získanou feritickou strukturu. Feritická struktura získaná za pomoci zvýšeného obsahu křemíku vykazuje větší pevnost a tvrdost, než u feritické struktury získané feritizačním žíháním. Obecně platí, že LKG s feritickou strukturou mají velmi dobré plastické a dynamické vlastnosti. Pokud u nich chceme dosáhnout maximální tažnosti a tvárnosti, musí litina obsahovat co nejméně manganu, fosforu a křemíku. [7]



Obrázek 14: Průběh ochlazování a výsledná feritická struktura [7]

- **Feriticko-perlitická struktura**

Struktura feriticko-perlitická (obr. 13b) s převážným obsahem feritu vykazuje větší obsah křemíku (>3,2%) a menší obsah manganu (>0,5%). Mají větší tažnost a menší pevnost, než litina se strukturou čistě perlitickou. Se vzrůstajícím obsahem křemíku a manganu ve struktuře mírně roste pevnost, ale zmenšuje se tažnost a rázová houževnatost, toto platí i naopak. Pro optimální mechanické vlastnosti LKG s feriticko-perlitickou strukturou lze doporučit obsah křemíku kolem 2,8% a obsah manganu <0,3%. Používá se jak na lití, tak i na výrobu čistě feritické LKG za pomoci feritického žíhání. [7]

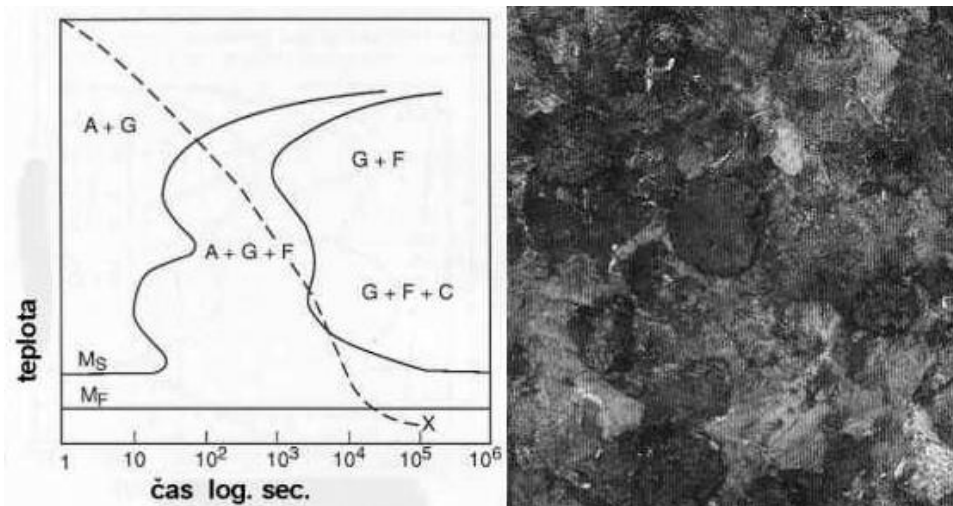
- **Perliticko-feritická struktura**

Struktura perliticko-feritická (obr. 13c) s převážným obsahem perlitu vykazuje menší obsah křemíku (>2,6%) a větší obsah manganu (>0,8%). Tato struktura má velmi

dobré a vyrovnané mechanické vlastnosti. Stejně jako u struktury feriticko-perlitické s zvyšujícím se obsahem křemíku a manganu mírně roste pevnost, ale snižuje se její tažnost a houževnatost, stejně tak naopak. U perliticko-feritické struktury je doporučený obsah křemíku kolem 2,4% a kolem 0,6% manganu. Díky svým vyrovnaným mechanickým vlastnostem je vhodná pro lití, ale používá se i na další tepelné zpracování. [7]

- **Perlitická struktura**

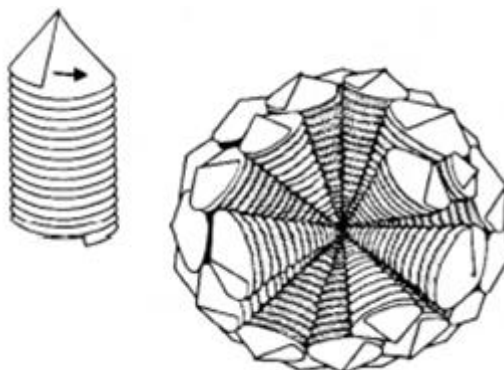
U LKG je běžné, že se kolem grafitu vylučují feritické dvorce, čím je ochlazování pomalejší, tím jsou feritické dvorce větší. Při nízkém obsahu křemíku a vyšším obsahu manganu a dostatečně pomalém ochlazování lze dosáhnout čistě perlitické struktury. Na obr. 15 můžeme vidět průběh ochlazování a získanou perlitickou strukturu. Této struktury se lépe dosahuje u tenkostěnných odlitků, je tu však nebezpečí vzniku karbidů. U silnostěnných odlitků je dosažení perlitické struktury, bez použití některých přísad, prakticky nemožné. Obsah cínu 0,1%, nám zaručí čistě perlitickou strukturu bez feritických dvorců kolem grafitických zrn. Cín je navíc do obsahu 0,15% bezkarbidotvorný. Další přísada, která napomáhá vzniku čistě perlitické struktury je měď. [7]



Obrázek 15: Průběh ochlazování a výsledná perlitická struktura struktura [7]

2. 4. 3. Grafit

Grafit je v LKG vyloučen ve tvaru kuliček, ve skutečnosti jde o složité polykrystaly složené z kuželovitých spirál.



Obrázek 16: Model grafitického zrna [7]

Vlastnosti LKG závisejí nejen na struktuře kovové matice, ale také na množství, velikosti a tvaru vyloučeného grafitu. Pro dosažení kvalitního grafitu se musí zajistit dostatečná grafitizační schopnost taveniny. Grafitizační schopnost se zajistí vhodnou hodnotou uhlíkového ekvivalentu (CE), ta se odvíjí od tloušťky stěny budoucího odlitku. Množství vyloučeného grafitu se určuje podle metalografického výbrusu a udává se počtem grafitových kuliček na mm^2 (cm^2). Velikost grafitických kuliček se určuje podle normalizovaných etalonů a platí, že čím jemnější jsou grafitická zrna, tím lepší mechanické vlastnosti. Velmi důležitý je také tvar vyloučeného grafitu, příznivý tvar grafitu již sám o sobě příznivě ovlivňuje mechanické vlastnosti LKG. Ve struktuře se mohou vyskytovat odchylky od kuličkového grafitu jako: červíkovi grafit, rozpadnutý (explodovaný) grafit, lupínkový grafit a chunky grafit. Červíkový grafit se v LKG může objevit při špatné modifikaci. Explodovaný grafit se vyskytuje u nadeutektoidních litin, nebo se objevuje v místech pomalého chladnutí. Lupínkový grafit se může vyskytovat v místech s vysokou koncentrací prvků podporující jeho tvorbu. [2][7]

2. 4. 4. Modifikace

Modifikace ovlivňuje tvar grafitu při jeho krystalizaci a to tak, že se lupínkový grafit působením modifikátoru mění na kuličkový. Nejčastějším modifikátorem v průmyslové praxi bývá hořčík, případně jeho slitiny. Skoro všechny moderní modifikátory obsahují doplňkové prvky, jako cér, lanthan, nebo jiné kovy vzácných zemin. Tyto kovy vzácných zemin mají lepší afinitu ke kyslíku a k síře než hořčík a proto jsou

schopny tvořit stabilní krystalizační zárodky grafitu (zvyšují počet grafitických zrn), také neutralizují účinek řady škodlivých prvků jako olovo, antimon, titan, arsen atd. Dále umožňují snížit potřebné dávkovací množství hořčíku a podporují rovnoměrnější průběh modifikace.

Modifikace je mimopecní zpracování roztavené slitiny, doprovázené bouřlivou reakcí hořčíku. Princip modifikace spočívá v postupném rozpouštění hořčíku, který ve formě páry probublává skrz modifikovanou litinu, absorbuje se na plochách stávajícího grafitu, čímž mění rychlost a směr růstu krystalických ploch. Je žádoucí, aby dráha hořčíkových par (bublin) byla co možná nejdelší a jejich proudění bylo pomalé a klidné. Proto je nutné, aby byl modifikátor umístěn pod hladinu kovu. Nejčastějšími způsoby přidání modifikátoru do roztavené litiny jsou tyto metody: polévací, ponořovací, konvertorové, kontinuální a plněními profily. Pro získání kuličkového grafitu je nutné, aby byl obsah zbytkového hořčíku mezi 0,03% - 0,06% (v závislosti na tloušťce stěny odlitku).

Hořík podporu je metastabilní tuhnutí, čím vyšší obsah uhlíku, tím větší sklon ke vzniku karbidů a zákalky. Proto vždy po modifikaci musí následovat očkování, buď jednostupňové očkování (očkuje se zároveň s modifikací), nebo dvoustupňové očkování (očkuje se po modifikaci). [1] [5] [15]

2. 4. 5. Očkování

Očkování je velmi složitý proces ovlivněný řadou proměnných faktorů jako: dodržení teploty, chemického složení, typu očkovadla a jeho zrnitost. Při výrobě LKG to je nezbytně nutná metalografická operace, která ovlivňuje základní kovovou matici. Jedná se o způsob mimopecního zpracování litiny. Podstatou očkování je heterogenní nukleace, ta je zapříčiněná přidáním očkovacích látek do roztavené litiny. Očkování zvyšuje počet cizích grafitizačních zárodků, tím maximalizuje počet zrn grafitu a zjemňuje vyloučený grafit. Zabraňuje vzniku volného cementitu a zvýšeného výskytu zákalky. Celkově zlepšuje mechanické vlastnosti litiny a přitom podstatě nemění chemické složení litiny.

Pro očkování LKG se používá převážně očkovadel na bázi křemíku (FeSi) s obsahem křemíku 60-70%, hliníku 0,5-1,25% a vápníku 0,6-1,0%. Očkovadla mohou obsahovat minoritní prvky jako bariem, zirkon, cín atd.

Očkování je proces dočasný, dle praktických zkušeností se uvádí účinnost cca 20 minut od přidání očkovadla do taveniny. Z toho důvodu je snaha očkovat taveninu těsně

před litím a to tekutým očkovačem nebo granulovým (nejčastější). Lze očkovat i přímo ve formě očkovačím tělísky, vkládanými buď do licí jamky, nebo do reakční komůrky ve vtokové soustavě. Objem očkovače se pohybuje od 0,1% do 1,2% na hmotnost tekutého kovu, záleží na specifických podmínkách daného lití. [1] [5] [15]

2. 4. 6. Druhy LKG

Podle normy ČSN EN 1563 dělíme LKG do tří skupin. V normě je 8 značek nelegovaných LKG seřazených podle pevnosti v tahu (Tabulka 4.).

- **První skupina**

V této skupině jsou LKG určeny pro běžné použití a práci za snížených teplot, vhodné na dynamicky namáhané součástky. Doporučená tloušťka stěny odlitku mezi 5-100 mm. Použití na odlitky s požadovanou zárukou mechanických vlastností, především vysoké plasticity při nízkých teplotách. Struktura matrice těchto litin je feritická. Do této skupiny patří EN-GJS-350-22, EN-GJS-400-15 a EN-GJS-400-18.

- **Druhá skupina**

Druhy LKG v této skupině jsou také vhodné pro běžné použití a práci při nižších teplot, vhodné pro dynamicky namáhané odlitky s tloušťkou stěny 5-100 mm. Avšak s vyšší pevností v tahu, řadíme sem EN-GJS-500-7 a EN-GJS-600-3. Tento druh je velmi hojně zastoupen v automobilovém průmyslu. Struktura matrice litin v této skupině je feriticko-perlitická až perliticko-feritická.

- **Třetí skupina**

V této skupině jsou litiny s nejvyšší pevností v tahu a jsou označovány jako vysokopevnostní (jakostní) LKG. Jsou také otěruvzdorné vhodné pro mechanicky i dynamicky namáhané součástky, s doporučenou tloušťkou stěny odlitku 5-35 mm (výjimečně až 75 mm). Tato skupina má největší uplatnění v automobilovém průmyslu. Patří sem EN-GJS-700-2, EN-GJS-800-2 a EN-GJS-900-2, struktura matrice těchto litin je tvořena perlitem a sorbitem.

Tabulka 4: Mechanické vlastnosti nelegovaných LKG [1]

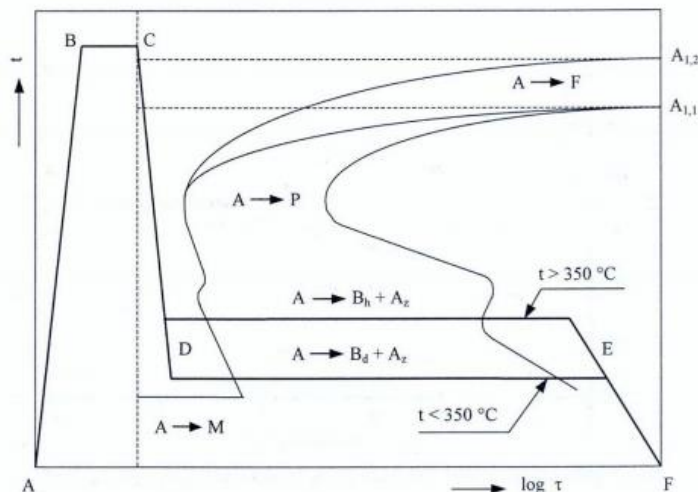
Označení materiálu	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Tažnost A [%]	Tvrдость HB	Struktura matrice
EN-GJS-350-22	350	220	22	< 160	F
EN-GJS-400-18(15)	400	250	18 (15)	130-175	F
EN-GJS-450-10	450	310	10	160-210	F
EN-GJS-500-7	500	320	7	170-230	F + P
EN-GJS-600-3	600	370	3	190-270	P + F
EN-GJS-700-2	700	420	2	225-305	P
EN-GJS-800-2	800	480	2	245-335	P, S
EN-GJS-900-2	900	600	2	270-360	B, S

* Struktura matrice: F-ferit, P-perlit, S-sorbit, B-bainit

2. 4. 7. ADI

Jedná se o izotermicky zušlechťenou LKG a vztahuje se na ni norma ČSN EN 1564, ve světě nese označení ADI (Austempered Ductile Iron). Patří mezi nové konstruktivní materiály a díky svým vlastnostem je předurčena pro náročné komponenty ve strojírenském a automobilovém průmyslu. A to především díky velmi dobré kombinaci mechanických vlastností, vykazuje vysokou pevnost, tvrdost, houževnatost, ořezuvzdornost a dobrou tažnost i obrobiteľnosť.

Izotermické zušlechťování LKG se skládá ze tří za sebou jdoucích kroků a to austenitizace, rychlé ochlazení (na teplotu bainitické oblasti) a dochlazení na pokojovou teplotu (obr. 17). První krok je zahřátí na teplotu 850-1000 °C (nad $A_{1,2}$) a výdrž na austenizační teplotě 1-3 hodiny, přesná teplota i výdrž jsou závislé na výchozí struktuře kovové matrice, chemickém složení, rozložení grafitu, tloušťce stěny odlitku atd. Po dosažení čistě austenitické matrice následuje druhý krok a tím je prudké ochlazení a výdrž na hranici izotermického rozpadu austenitu a bainitické přeměny, to odpovídá teplotě 230-420 °C. Tato teplota je udržována v solné lázni. Čím je tato teplota vyšší, tím měkčí struktury se dosahuje (nižší pevnost, vyšší tažnost). Posledním krokem je ochlazení na pokojovou teplotu, tento krok má nejmenší vliv na výslednou kvalitu ADI, může mít vliv pouze na vnitřní napětí v odlitku. Chladí se na vzduchu nebo ve vodě. [1] [6]



Obrázek 17: Schéma izotermického zušlechťování LKG v IRA diagramu [6]

Izotermicky zušlechtěná (kalená) litina, jinak také nazývaná bainitická litina. Norma ČSN EN 1564 uvádí čtyři druhy těchto litin, rozdělené podle mechanických vlastností (Tabulka 5.).

Tabulka 5: Mechanické vlastnosti ADI [1]

Označení materiálu	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Tažnost A [%]	Tvrdość HB
EN-GJS-800-8	800	500	8	260-320
EN-GJS-1000-5	1000	700	5	300-360
EN-GJS-1200-2	1200	850	2	340-440
EN-GJS-1400-1	1400	1100	1	380-480

3. Vady odlitků z LKG

Správná a rychlá diagnostika vady odlitku je cestou ke snížení nákladů ve slévárně. Po správné identifikaci je důležité stanovit jejich pravděpodobnou příčinu a posléze návrh zásahů na jejich eliminaci. Příčinou vady odlitku může být jak chyba v technologickém postupu, tak i nevhodná konstrukce součásti. Další příčinou vad může být nedůsledná kontrola výrobního procesu, nebo nedodržení technologického postupu. [12]

Vady odlitků jsou sepsány v normě ČSN 42 1240. Dle této normy se vadou odlitku rozumí každá odchylka rozměrů, váhy, vzhledu, makrostruktury nebo nedosažení požadovaných vlastností odlitku. Vady odlitků mohou být zjevné nebo skryté. Zjevnou vadu je možné odhalit na neobrobeném odlitku pouhým okem, nebo jednoduchými pomocnými měřidly. Skrytá vada je odhalitelná až po obrobení odlitku, nebo speciálními laboratorními přístroji nebo zkouškami. Dále se vady dělí na přípustné / nepřípustné a opravitelné / neopravitelné, to do jaké skupiny danou vadu zařadit je věc podmíněná dohodou s odběratelem. [12][14]

Norma ČSN 42 1240 rozděluje vady odlitků do sedmi základních skupin a v příslušných skupinách je dále označuje dvoumístným číslem (Tabulka 6.).

Tabulka 6: Roztřídění vad odlitků podle skupin a druhů [11]

Číslo skupiny vad	Název skupiny vad	Číselné označení vady	Název druhu vady
1	Vady tvaru, rozměrů a váhy	11	Nezaběhnutí
		12	Přesazení
		13	Zatekliny
		14	Vyboulení
		15	Zborcení
		16	Mechanické poškození
		17	Nedodržení rozměrů
		18	Nedodržení váhy

2	Vady povrchu	21	Přípečeniny
		22	Zavaleniny
		23	Zálupy
		24	Nárosty, strupy
		25	Výronky
		26	Výpotky
		27	Ukujení, opálení
		28	Omáčkání, otlučení, pohmoždění
3	Přerušení souvislosti	31	Trhliny
		32	Praskliny
4	Dutiny	41	Bublíny
		42	Bodliny
		43	Staženiny
		44	Řediny
		45	Mikrostaženiny
		46	Mirokobublíny
5	Vměstky	51	Struskovitost
		52	Zadobeniny
		53	Nekovové vměstky
		54	Broky
		55	Kovové vměstky
6	Vady struktury	61	Odmíšení
		62	Nevyhovující lom
		63	Zatvrdlina, zákalka
		64	Obrácená zákalka
		65	Nesprávná struktura
7	Vady chemického složení, nesprávné fyzikální nebo mechanické vlastnosti	71	Nesprávné chemické složení
		72	Nevyhovující mechanické vlastnosti
		73	Nevyhovující fyzikální vlastnosti

4. Analýza příčin vad

Analýza se prováděla u tří typových odlitků (obr. 18) z EN-GJS-600-3 dodaných od firmy Seco Group a.s. Tyto odlitky jsou odlévány technologií gravitačního lití do bentonitových forem, které jsou formovány na automatické lince DISAMATIC 2110 Mk2 s vertikálním dělením s velikostí forem 400 x 500 x 110 - 310 mm. Kov, v tomto případě EN-GJS-600-3, je taven ve dvou středofrekvenčních indukčních pecích - 3t ABB - typ FS, TWIN POWER, tavby jsou monitorovány spektrometry ARL 2460 a MAGELLAN Q8, čímž je zajištěna přesnost chemického složení každé tavby. Mechanické a metalografické vlastnosti EN-GJS-600-3 jsou kontrolovány v laboratořích. Vzhledem k neustálé kontrole chemického složení je prakticky vyloučeno, aby vady byly způsobené výkyvy chemického složení litiny. [16]



Obrázek 18: Typové odlitky

Dále jsou monitorovány parametry, jako teplota lití, která se pohybuje v rozmezí 1370-1410 °C, prodyšnost formy se pohybuje v rozmezí 90-120 n.j.p. a tvrdost formy, která je přibližně 90.

Technologický postup lití je následovný, po natavení a zpětné kontrole chemického složení se tavenina přelije do udržovací pece. Litina se modifikuje polévací metodou do pánve s kapsou (modifikátor je v kapse zakrytý ocelovým šrotem pro zpoždění reakce). Pánev je pak za pomoci vysokozdvizného vozíku přemístěna k lící lince. U lící linky je do pánve hozeno očkavadlo a tavenina je přelita do lící pánve umístěné nad lící linkou.

U všech 3 typových odlitků se provedla simulace lití v programu NovaFlow&Solid CV 4.6. Pro každý odlitek se dělaly dvě simulace, jedna při lící teplotě 1370°C a druhá při lící teplotě 1410°C. Při každé simulaci se hodnotila homogenita plnění formy, tepelný modul a následovně tuhnutí odlitku, vnitřní pomezita a staženiny.

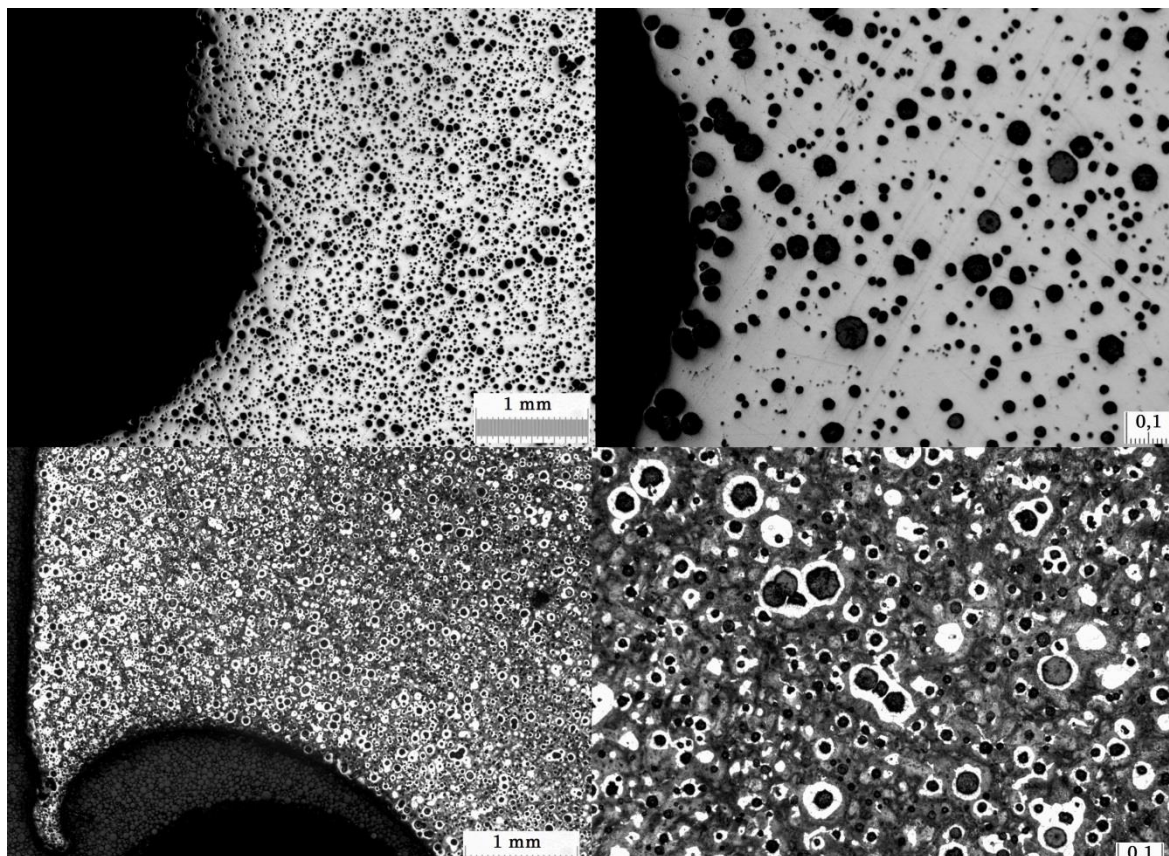
4. 1. Odlitek č. 1

Hmotnost odlitku č. 1 je 1210g a jeho přibližné rozměry jsou 140 x 85 x 35. Vada tohoto odlitku (obr. 19) by byla dle normy ČSN 42 1240 charakterizována jako bublina, povrchová vnitřní dutina vyznačující se hladkým povrchem. Vada se vyskytuje ve vrchní části odlitku (vzhledem k umístění ve formě) a její příčinou je nejspíše plynová kapsa, která také způsobuje hladký vnitřek dutiny.



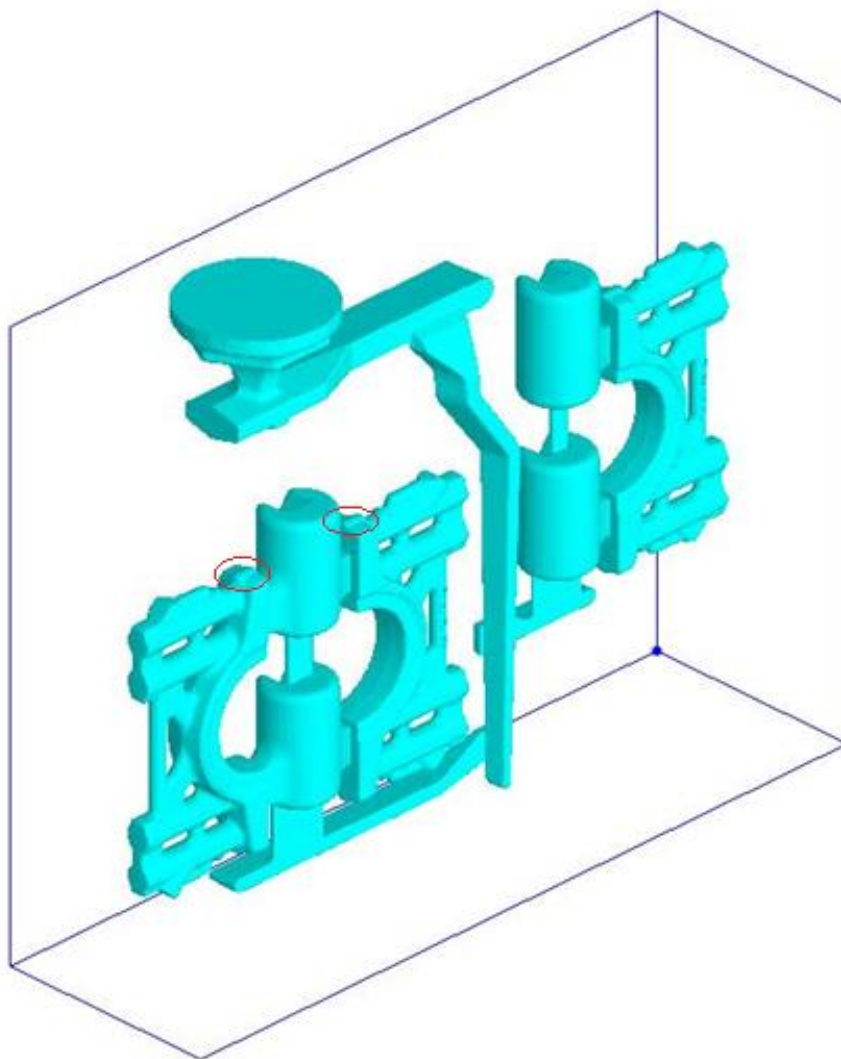
Obrázek 19: Vada odlitku č.1

Na obr. 20 můžeme vidět metalografický výbrus odlitku č. 1, snímky vlevo jsou foceny při dvacetipěti násobném zvětšení a snímky vpravo při sto násobném zvětšení. Na horních snímcích lze vidět rovnoměrně rozmístěný pravidelný globulární grafit. Na dolních naleptaných snímcích vidíme perliticko – feritickou strukturu, která je pro EN-GJS-600-3 charakteristická. Z analýzy struktury můžeme vyvodit, že modifikace i očkování litiny bylo provedeno dobře a tudíž lze vyloučit, že by příčinou vzniku vad byla nesprávná modifikace nebo očkování.



Obrázek 20: Metalografický výbrus odlitku č. 1

Na obr. 21 je vidět vtoková soustava odlitku č. 1, vady se převážně vyskytují u spodních odlitků a to vždy v jejich vrchní části. Místa výskytu vad jsou na obr. 21 červeně zakroužkována. V případě této formy dosahujeme homogenního plnění. Konstrukčním nedostatkem této formy je velikost nálitků, stejný modul nálitku pro jeden odlitek, jako pro dva odlitky. V příloze č. 1 můžeme vidět, že tepelný modul nálitků je vyvážený. Vyváženost tepelných modulů nálitků se potvrzuje rovnoměrným tuhnutím odlitků směrem do nálitků (viz příloha č. 2), posledním tuhoucím místem je náliček. Tuhnutí při lící teplotě 1410°C je obdobné jako při teplotě 1370°C. V příloze č. 3 vidíme výsledky analýzy vnitřní perezity odlitků, z těchto výsledků můžeme vyvodit, že se snižující teplotou se nepatrně zvyšuje vnitřní perezita odlitků.



Obrázek 21: Vtoková soustava odlitku č. 1

V příloze č. 4 je fáze plnění formy, která dokazuje, že místa vzniku vad jsou i zároveň místa vzniku plynových kapes. Vzhledem k tomu, že formy mají poměrně vysokou tvrdost při poměrně nízké prodyšnosti, je možné, že právě tato plynová kapsa je i příčinou vzniku vady.

4. 2. Odlitek č. 2

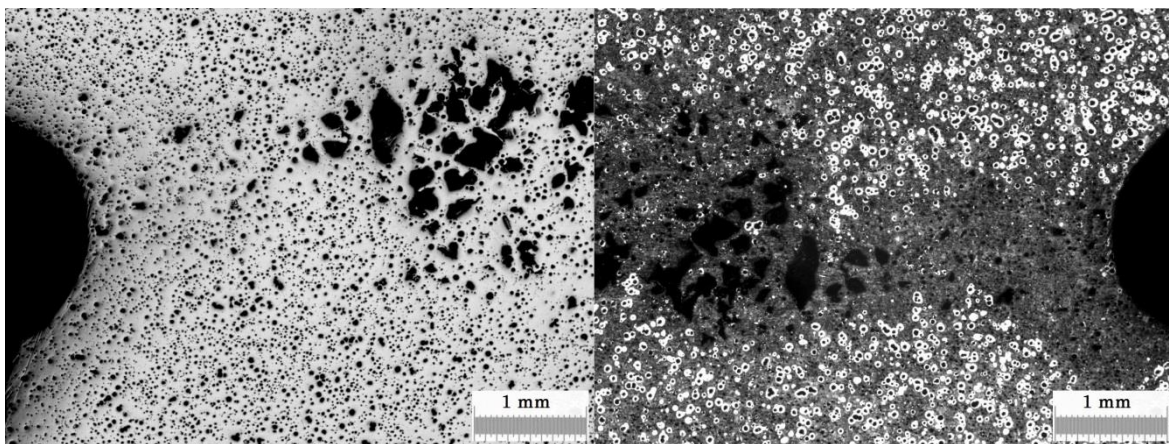
Hmotnost odlitku č. 2 je 420g a jeho přibližné rozměry jsou 100 x 65 x 25. Vada na tomto odlitku (viz obr. 22) by byla dle normy ČSN 42 1240 charakterizována jako staženina. Jedná se o otevřenou staženinu s hrubým krystalickým povrchem, který je pro staženinu charakteristický. Vada u tohoto odlitku se vyskytuje u nálitku, respektive pod

ním. Příčinou této vady může být nedostatečná velikost nálitku, negativní vliv na staženiny má také vysoká teplota lití.



Obrázek 22: Vada odlitku č. 2

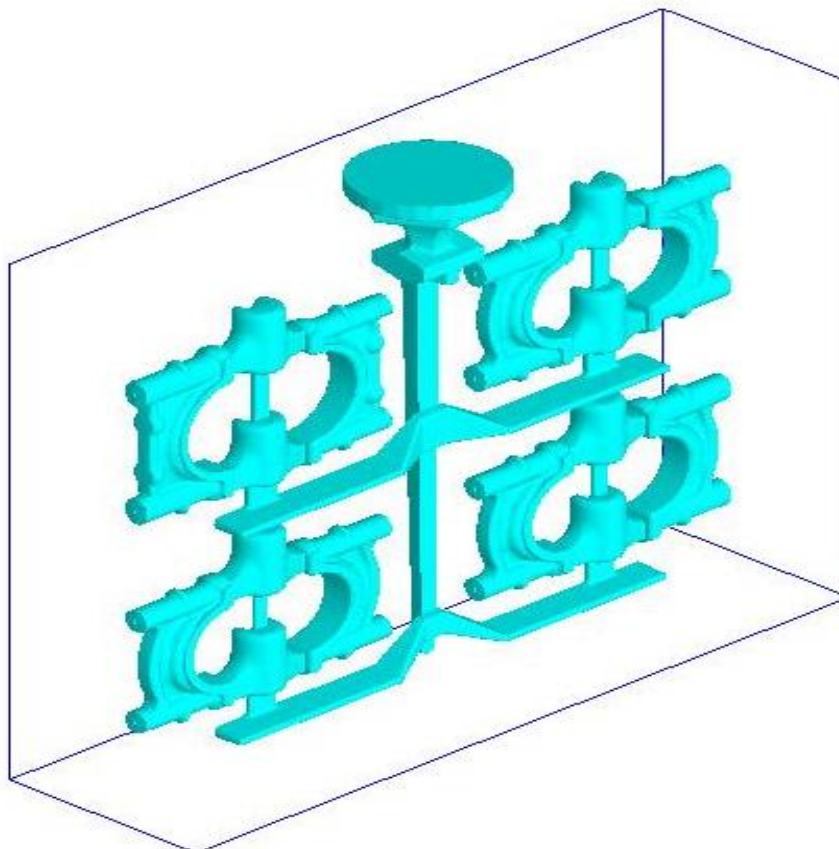
Na obr. 23 je metalografický výbrus odlitku č. 2. Tyto snímky jsou foceny při dvacetipeti násobném zvětšení. Na snímku vlevo vidíme pravidelně rozmístěný grafit, který má příznivý globulární tvar. Na naleptaném snímku vpravo vidíme perliticko – feritickou strukturu, která je pro EN-GJS-600-3 charakteristická. Stejně jako u odlitku č. 1, i zde je možné, vzhledem ke kvalitní struktuře, vyloučit jako příčinu vady chybnou modifikaci nebo očkování.



Obrázek 23: Metalografický výbrus odlitku č. 2

Na obr. 24 je vtoková soustava odlitku č. 2, vada se vyskytuje podstatě u všech odlitků ve formě. Jedním z konstrukčních nedostatků této formy je, že při simulaci lití byla prokázána poměrně značná nehomogenita plnění, kdy se horní část formy plní podstatně

pomaleji, než dolní část formy, viditelné v příloze č. 5. Dalším negativem této formy je velký rozdíl v tepelných modulech nálitků (příloha č. 6), kdy spodní náliťek má podstatně větší tepelný modul, než náliťek horní. Se zvyšující se teplotou rozdíl v tepelných modulech nálitků roste.



Obrázek 24: Vtoková soustava odlitku č. 2

V důsledku nevyváženosti tepelných modulů nálitků dosahujeme nerovnoměrného tuhnutí odlitků, což je viditelné v příloze č. 7-8. Odlitek netuhle správně jak by měl, od středu směrem k oběma nálitkům, ale tuhne směrem k spodnímu nálitku. Horní náliťek je v určité fázi tuhnutí odříznut a přestává plnit funkci nálitku, místo aby náliťek dosazoval do odlitku, může nastat to, že odlitek bude dosazovat do nálitku a v důsledku toho se v tomto místě objeví staženina (příloha č. 7 - druhý snímek). V pozdější fázi tuhnutí se u spodního nálitku tvoří zaškrcení, které oddělení ještě zcela neztuhlou část odlitku od nálitku, tento jev může také zapříčinit vznik staženin, viz třetí snímky příloh č. 7-8. Analýza (příloha č. 9) odhalila možný vznik staženin, procentuální šance vzniku staženin je sice malá, ale vzhledem k průběhu tuhnutí se v těchto místech staženiny dají očekávat. Co se týče vlivu

teploty lití, z celkové analýzy se dá vyvodit, že čím vyšší teplota, tím vyšší je šance vzniku staženin.

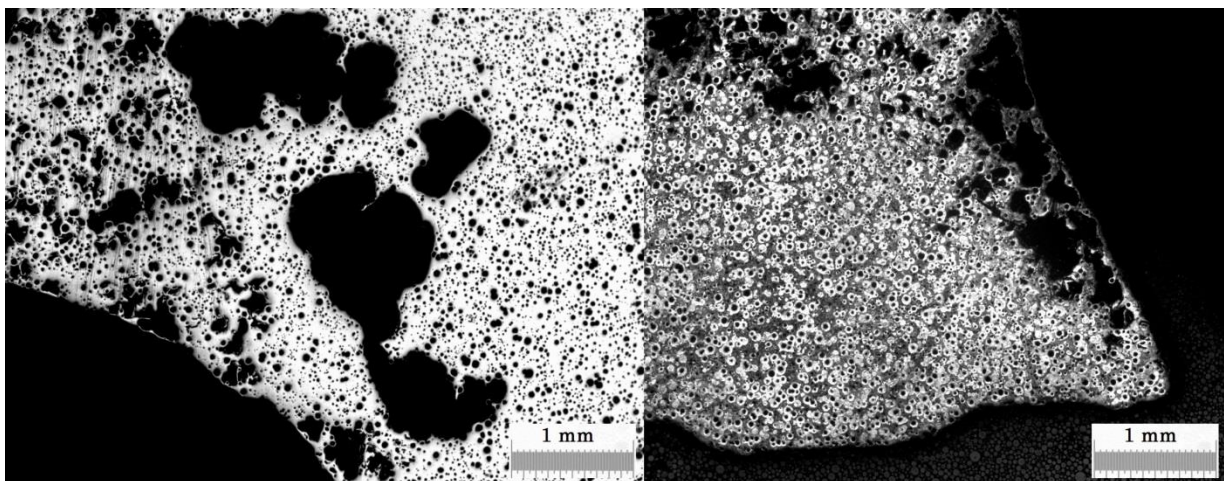
4. 3. Odlitek č. 3

Hmotnost tohoto odlitku je 205g a jeho přibližné rozměry jsou 70 x 35 x 30. Vada u odlitku č. 3 (obr. 25) je dle normy ČSN 42 1240 charakterizována jako staženina. Jedná se také o otevřenou staženinu, jako u odlitku č. 2. Tato staženina se táhne ze spodu nálitku skrz celý odlitek. Příčinou této vady, stejně jako u odlitku č. 2, může být nevhodně zkonstruovaný nálipek, nebo příliš vysoká teplota lití.



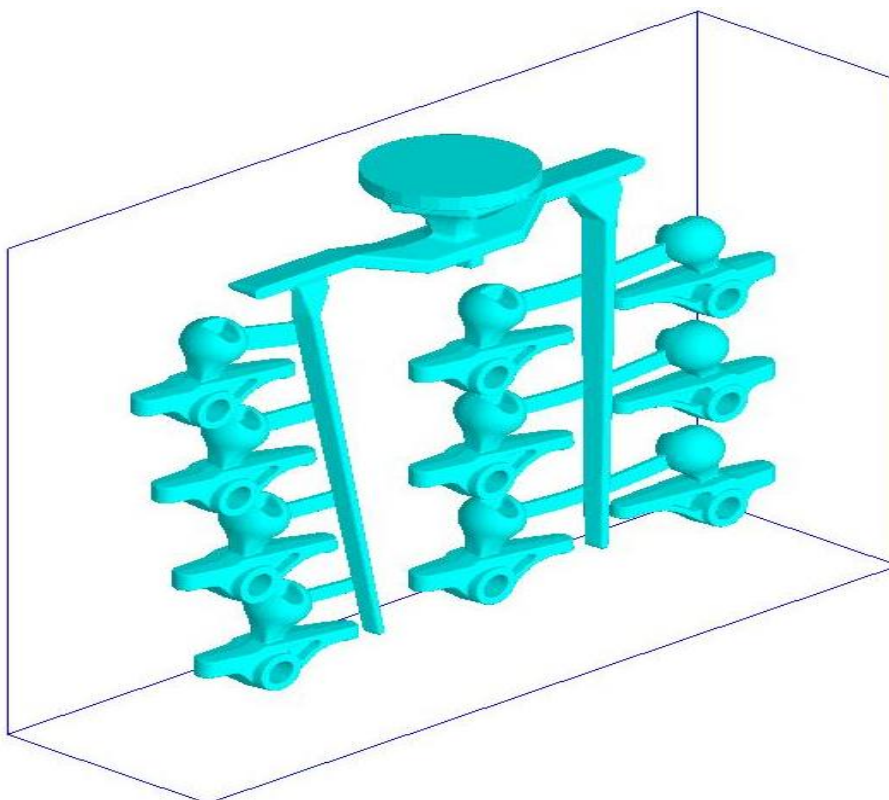
Obrázek 25: Vada odlitku č.3

Na obr. 26 je metalografický výbrus odlitku č. 3. Snímky jsou foceny při dvacetipěti násobném zvětšení a stejně jako v předchozích případech vidíme příznivé rozmístění i tvar grafitu. Struktura je odpovídající materiálu EN-GJS-600-3, tedy perliticko – feritická. Stejně jako v obou předchozích případech, tak i zde můžeme jako příčinu vzniku vady vyloučit nevhodnou modifikaci nebo očkování.



Obrázek 26: metalografický výbrus odlitku č. 3

Na obr. 27 je vtoková soustava pro odlitek č. 3, vada se vyskytuje především u horních odlitků formy. Stejně jako u odlitku č. 2 můžeme pozorovat nehomogenní plnění formy (příloha č. 10). V určité fázi lití jsou spodní odlitky už naplněné a horní se teprve začínají plnit, což je technologického hlediska nežádoucí.



Obrázek 27: Vtoková soustava odlitku č. 3

V příloze č. 11 je analýza tepelného modulu, kde je vidět, že oblast největšího tepelného modulu zasahuje i do odlitku, především u horních odlitků formy. To se projeví při tuhnutí odlitků a to tak, že tyto místa budou tuhnout jako poslední. Průběh tuhnutí viz příloha č. 12, průběh tuhnutí při lící teplotě 1410°C je obdobný. Vzhledem k tomu, že krček mezi nálitkem a odlitkem je poměrně úzký, hrozí nebezpečí zaškrcení dosud neztuhlého kovu v odlitku a následovný vznik staženiny. Analýza neprokázala vliv teploty lití na tvorbu této vady. Příčinou vady u tohoto odlitku by mohla být nevhodná konstrukce nálitku, nebo i samotné spojení nálitku a odlitku (příliš úzký krček).

5. Návrh změn pro odstranění defektů

Příčinou vady u odlitku č. 1 je plynová kapsa, která při plnění formy kovem nestihne uniknout. Vzhledem k tomu, že forma má poměrně vysokou tvrdost při poměrně nízké prodyšnosti, řešením této vady by mohlo být značné navýšení prodyšnosti formy. Další způsob jak zamezit vzniku této vady, by mohlo být zkonstruování přetoku v místě vady, ale následovné odstraňování přetoku by bylo z ekonomického hlediska nevýhodné.

Vadou u odlitku č. 2 je staženina vznikající pod nálitkem. Z analýzy vyplývá, že čím vyšší teplota, tím větší je riziko vzniku staženin, proto by bylo vhodné držet lici teplotu na dolní hranici rozmezí (1370°C). Hlavním nedostatkem je ale celková konstrukce formy, která způsobuje značnou nehomogenitu plnění formy, to zapříčiňuje velký rozdíl v tepelných modulech horních a dolních nálitků. Čemuž pak také odpovídá nerovnoměrné tuhnutí odlitků, tvoří se zaškrcení a následovné oddělení dosud neztuhlého kovu od nálitku, nálitek potom nemůže živit odlitek a vznikají staženiny.

U odlitku č. 3 se objevuje staženina, která se jde od nálitku skrz celý odlitek. Příčinou vzniku této staženiny je nejspíše nevhodná konstrukce nálitku a jeho spojení s odlitkem. Vadu může odstranit pouze rozšíření krčku u nálitku. Další přípustnou variantou řešení by mohlo být úplné odstranění nálitků, vzhledem k velikosti odlitků by tato varianta byla přípustná.

6. Závěr

Cílem bakalářské práce byl obecný popis litin, jejich rozdělení, vlastnosti a metalurgie, se zaměřením na litinu s kuličkovým grafitem. Tento cíl byl splněn v teoretické části této práce. Dalším cílem bakalářské práce byla analýza a odhalení možného příčinu vzniku vad u tří typových odlitků dodaných od firmy Seco Group a.s. Tento cíl byl splněn v praktické části této práce. V první řadě bylo důležité seznámit se s vybavením a technologickými postupy firmy Seco Group a.s. Firma mi poskytla možnost zhotovit a vyhodnotit metalografické výbrusy jednotlivých odlitků v jejich laboratoři. Další analyzování odlitků probíhalo už pouze ve spolupráci s ČVUT fakultou strojní, kde mi byl poskytnut program NovaFlow&Solid CV 4.6 pro nasimulování procesu lití u jednotlivých odlitků.

Po analýze jednotlivých odlitků bylo zjištěno, že struktura a kvalita grafitu každého z odlitků je dobrá a na základě tohoto vyhodnocení bylo vyloučeno, že by příčinou vzniku vad mohla být nesprávná modifikace nebo očkování. Dále jsem pak analyzoval výsledky simulace licího procesu pro každý odlitek. U odlitku č. 1 se jako hlavní nedostatek ukázala nízká prodyšnost formy, vzhledem k její poměrně vysoké tvrdosti. Tato nízká prodyšnost neumožňuje dostatečný únik plynu z formy a to by mohlo být příčinou vzniku vady zapříčiněné plynovou kapsou. U odlitku č. 2 byla stanovena jako příčina vady nevhodná konstrukce vtokové soustavy, která způsobuje nehomogenní plnění formy a velký rozdíl v tepelných modulech nálitků, což vede ke vzniku vady u tohoto odlitku. Příčinou vzniku vady u odlitku č. 3 je nejspíše úzký krček u nálitku, který znemožňuje správnou funkci nálitku při tuhnutí tohoto odlitku.

Vzhledem k tomu, že se vady neobjevují pravidelně, ale jejich výskyt je náhodný, je možné, že příčinou vzniku vad může být i hrubé nedodržení technologických parametrů, zejména pak licí teploty.

Z důvodu časové a ekonomické náročnosti reálného ověřování možných příčin vzniku vad nebyly výsledky této práce prozatím ověřeny. Je možné, že odhalené nedostatky u jednotlivých odlitků nebudou skutečnou příčinou vzniku vad. K ověření zanalyzovaných nedostatků by bylo zapotřebí více času na další analýzy a prostor ke skutečným pokusům.

7. Seznam použité literatury

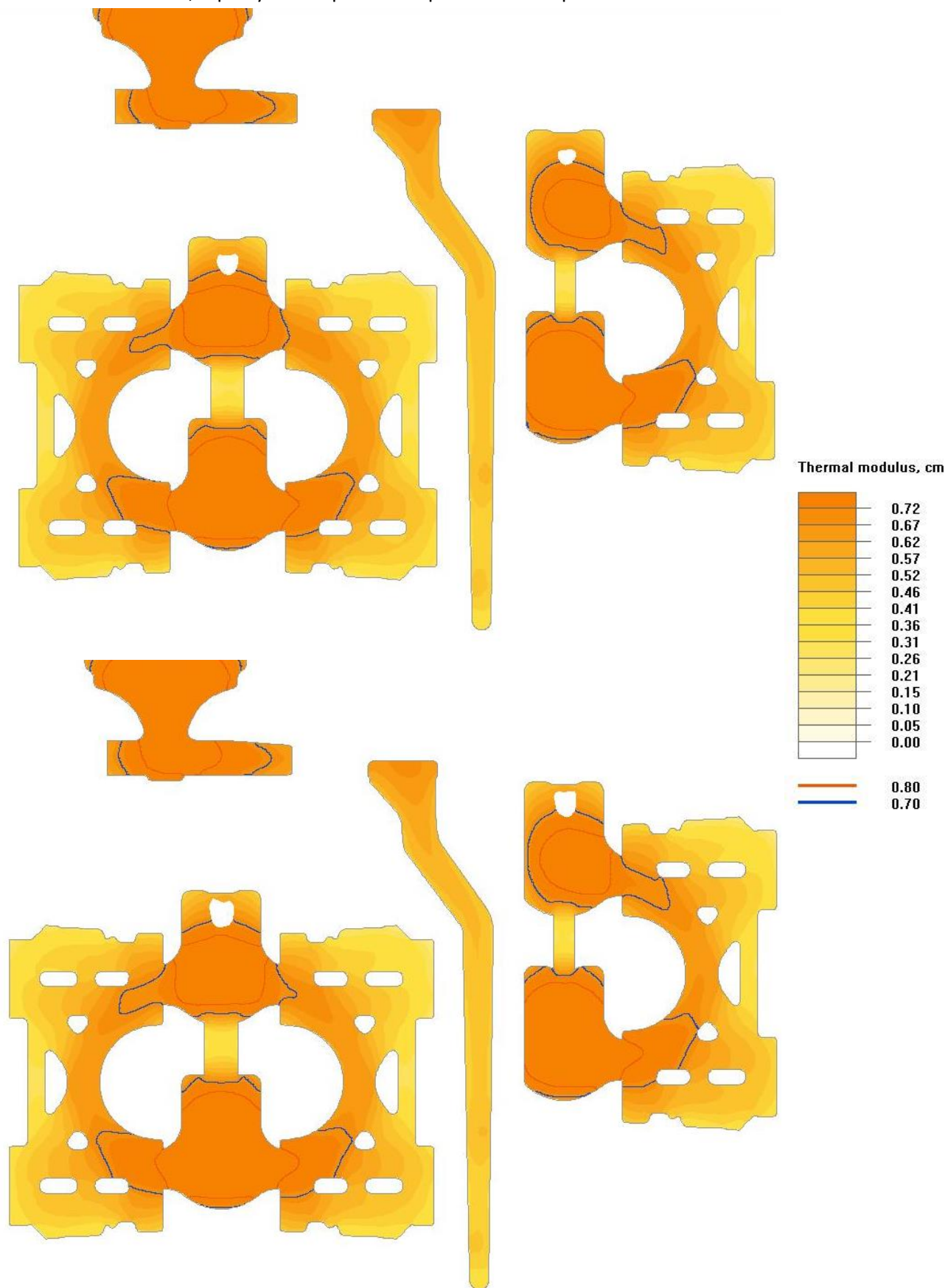
- [1] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie litin*. Brno: PC-DIR, 1. vydání, 1998, 166 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-1263-1.
- [2] SKOČOVSKÝ, Petr; PODRÁBSKÝ, Tomáš. *Grafitické litiny*. 1.vydanie. Ľilina : Edis, 2005. 168 s. ISBN 80-8070-390-6.
- [3] PLUHAŘ, Jaroslav, KORITTA, Josef. *Strojírenské materiály*. 1. vydání, Praha: SNTL, 1966, 560 s. Redakce strojírenské literatury. ISBN 04-254-66.
- [4] Norma ČSN EN ISO 945. *Litina - Určení mikrostruktury grafitu*. Praha: 2003.
- [5] VONDRÁK, Vladimír ; HAMPL, Jiří ; HANUS, Aleš . *Metalurgie litin: Mímopecní zpracování roztavené litiny*. Ostrava : VŠB-TUO, 2005. 136 s.
- [6] PAVLOUŠKOVÁ, Z. *Využití homogenizačního žhání k potlačení segregace křemíku a niklu v LKG* . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 192 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Jiří Švejcar, CSc.
- [7] OTÁHAL, Vlastislav. *Tvárná litina – Litina s kuličkovým grafitem*. Monografie, Metal Casting and Foundry Consult, Otahal Consult Brno, 1. vydání, Brno, 2006.
- [8] DORAZIL, Eduard. *Vysokopevná bainitická tvárná litina*. Praha: ACADEMIA, 1985, 172 s., ISBN 21-075-85.
- [9] Norma ČSN EN 1563. *Slévárství – Litina s kuličkovým grafitem*. Praha: 2012.
- [10] Norma ČSN EN 1564. *Slévárství – Ausferitická litina s kuličkovým grafitem*. Praha: 2012.
- [11] Norma ČSN 42 1240. *Vady odlitků, názvosloví a třídění vad*. Praha: 1964.
- [12] Šanovec, J., & České vysoké učení technické v Praze. Strojní fakulta. (2000). *Technologie I* 1. vyd. Praha: ČVUT.
- [13] *Vady odlitků- Atlas Vad* [online]. OTÁHAL, Vlastislav. Dostupné z: http://otahalconsult.cz/wp-content/pdf/Vady_odlitku_vytah.pdf
- [14] Prof. Ing. Nová, I. *Teorie slévání I*. Liberec 2006. ISBN 80 – 7372 – 149 – X
- [15] Prof. Ing. Nová, I. *Teorie slévání II*. Liberec 2007. ISBN 978 – 80 – 7372 – 185 – 5

- [16] Seco Groupe a.s. [online]. Dostupné z: <http://www.secogroup.cz/>
- [17] Potácel, R. *Slévárenské veletrhy – přehled světové výroby odlitků za rok 2012.*

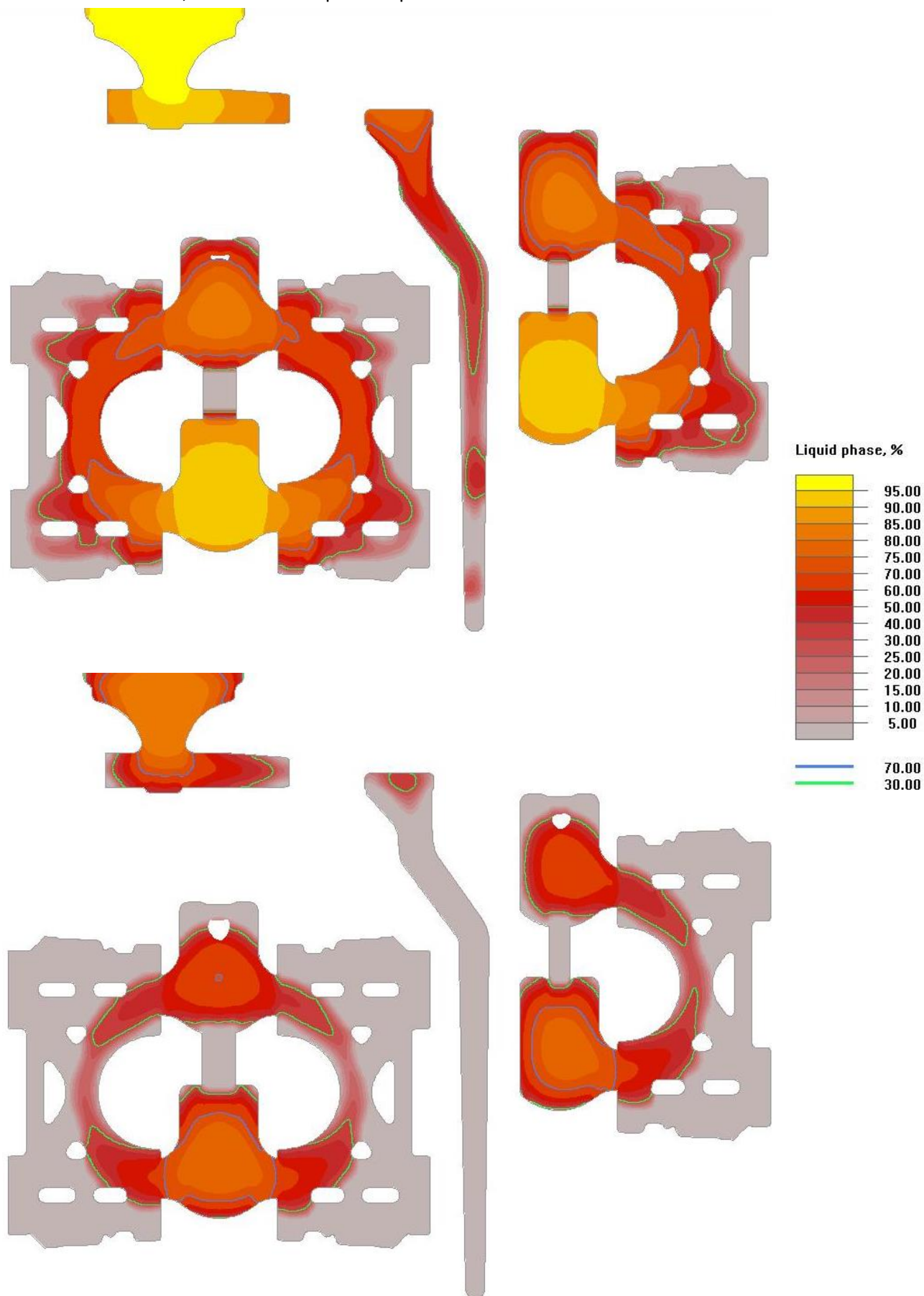
8. Přílohy

- Příloha č. 1: Odlitek č. 1, tepelný modul při licích teplotě 1370°C a při 1410°C
- Příloha č. 2: Odlitek č. 1, tuhnutí odlitků při licí teplotě 1370°C
- Příloha č. 3: Odlitek č. 1, vnitřní porozita odlitku při licí teplotě 1370°C a při 1410°C
- Příloha č. 4: Odlitek č.1, Proudění vzduchu při plnění formy
- Příloha č. 5: Odlitek č. 2, nehomogenita plnění formy
- Příloha č. 6: Odlitek č. 2, tepelný modul při licích teplotě 1370°C a při 1410°C
- Příloha č. 7: Odlitek č. 2, tuhnutí odlitků při licí teplotě 1370°C
- Příloha č. 8: Odlitek č. 2, tuhnutí odlitků při licí teplotě 1410°C
- Příloha č. 9: Odlitek č. 2, staženiny při licí teplotě 1370°C a 1410°C
- Příloha č. 10: Odlitek č. 3, nehomogenita plnění formy
- Příloha č. 11: Odlitek č. 3, tepelný modul při licích teplotě 1370°C a při 1410°C
- Příloha č. 12: Odlitek č. 3, tuhnutí odlitků při licí teplotě 1370°C

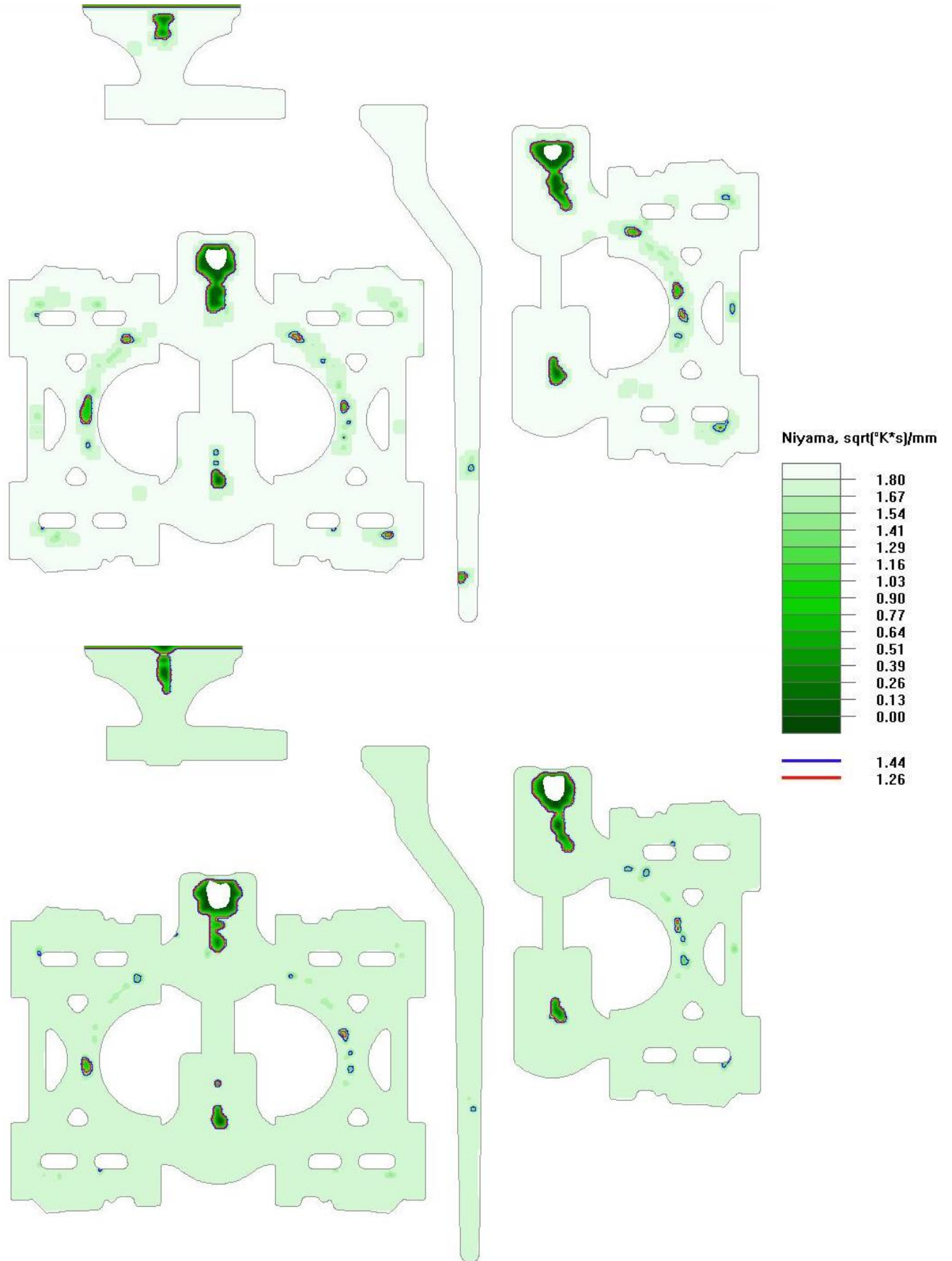
Příloha č. 1: Odlitek č. 1, tepelný modul při licích teplotě 1370°C a při 1410°C



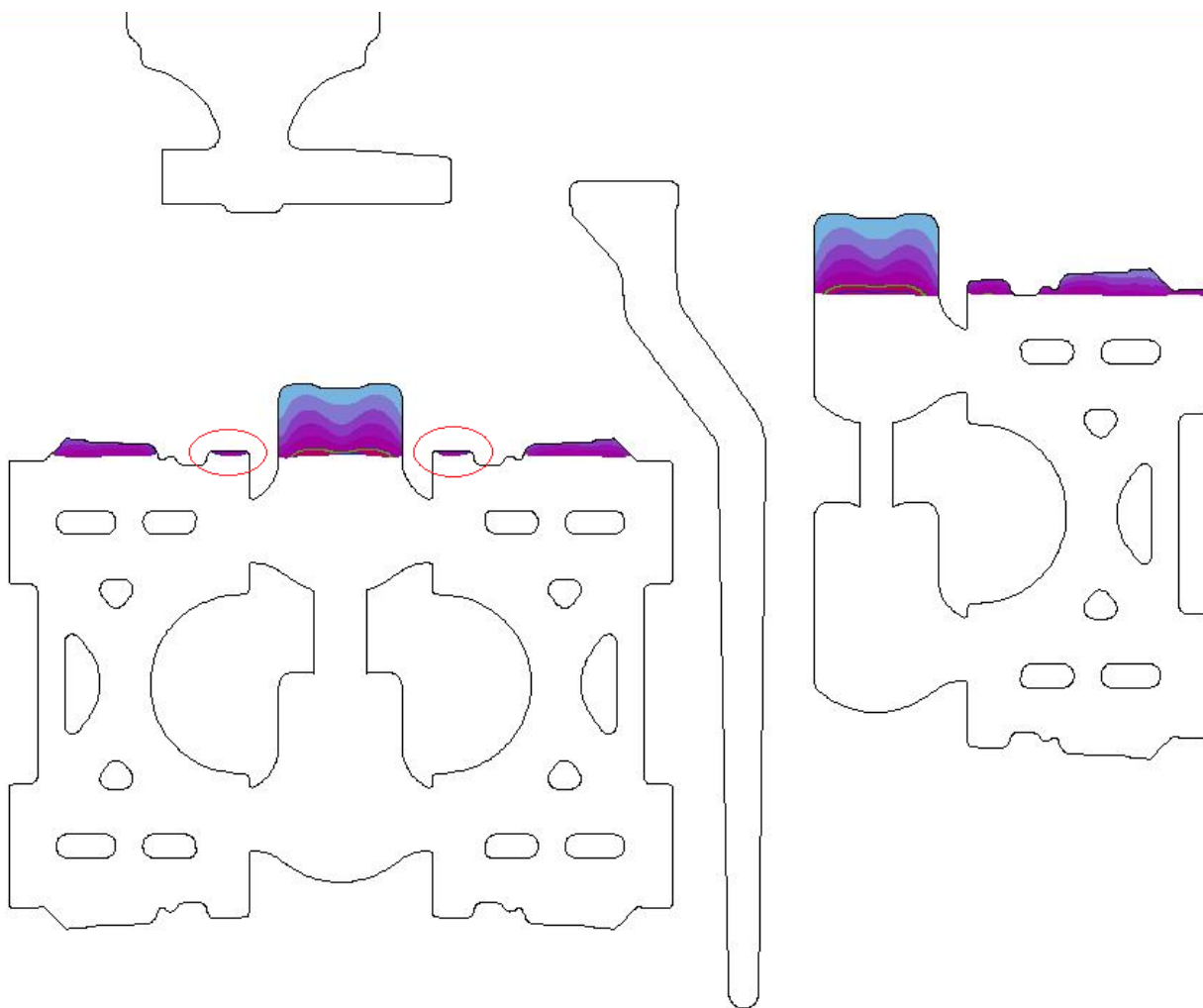
Příloha č. 2: Odlitek č. 1, tuhnutí odlitek při lící teplotě 1370°C



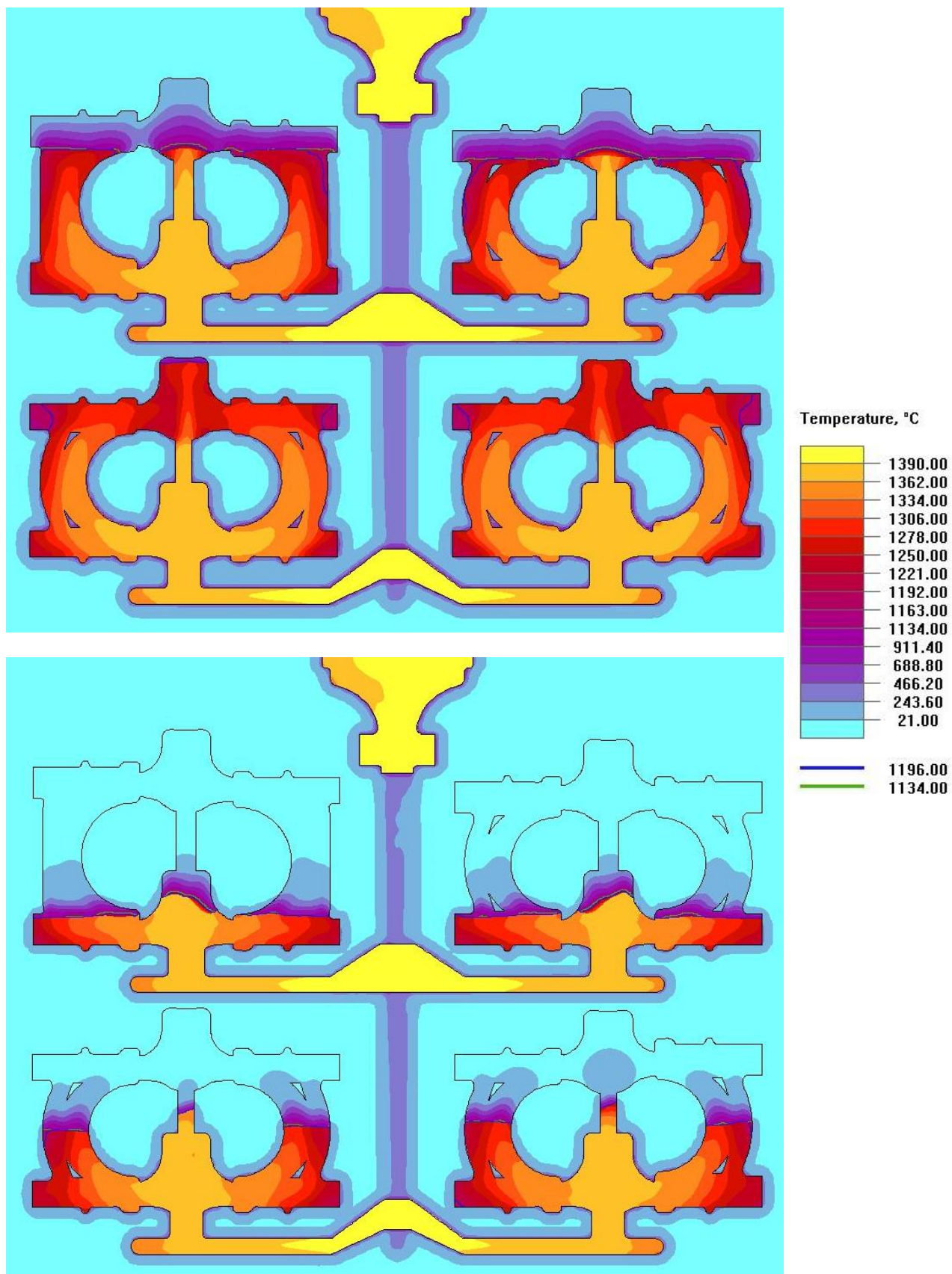
Příloha č. 3: Odlitek č. 1, vnitřní porezita odlitku při licí teplotě 1370°C a při 1410°C



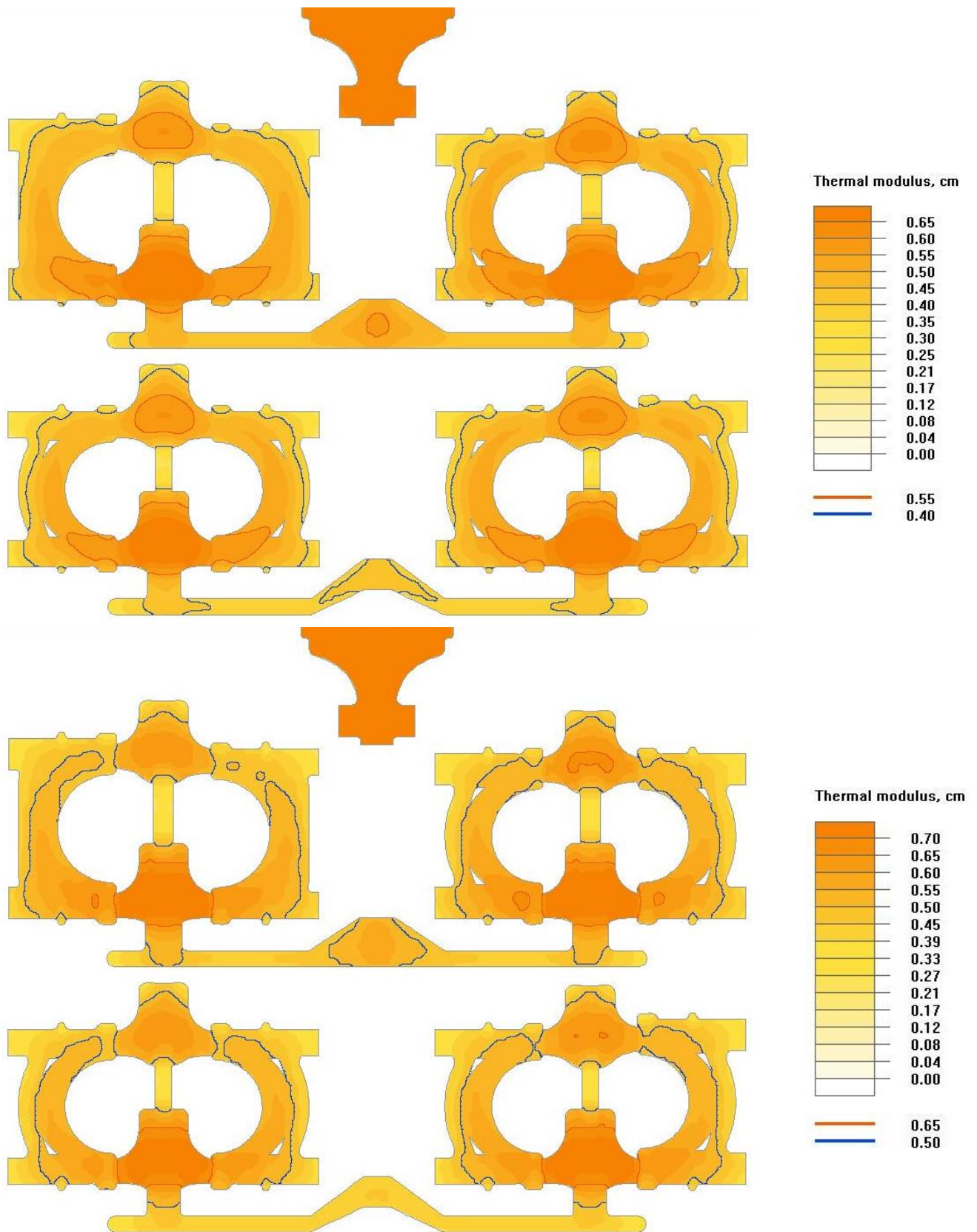
Příloha č. 4: Odlitek č.1, Proudění vzduchu při plnění formy



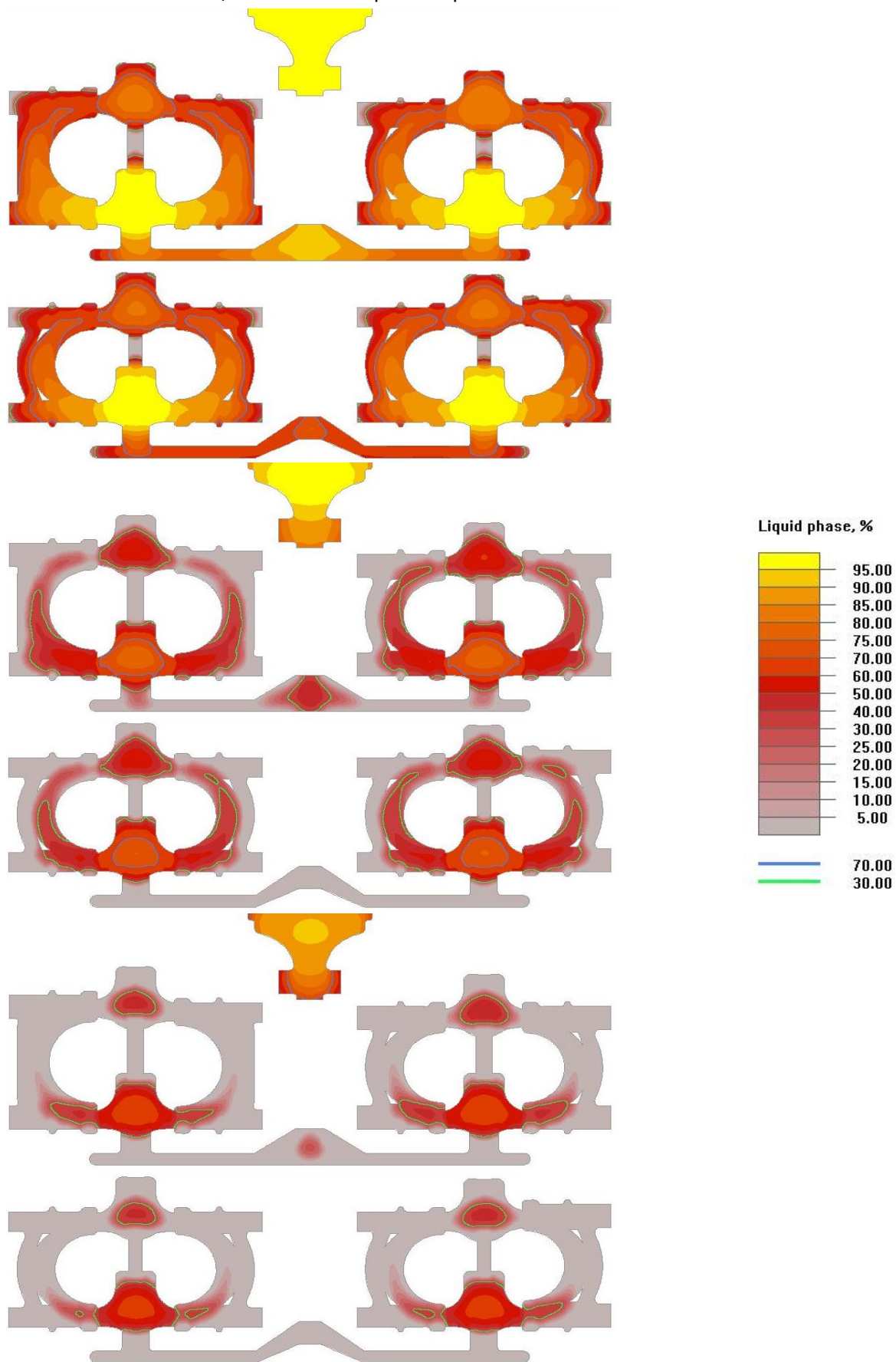
Příloha č. 5: Odlitek č. 2, nehomogenita plnění formy



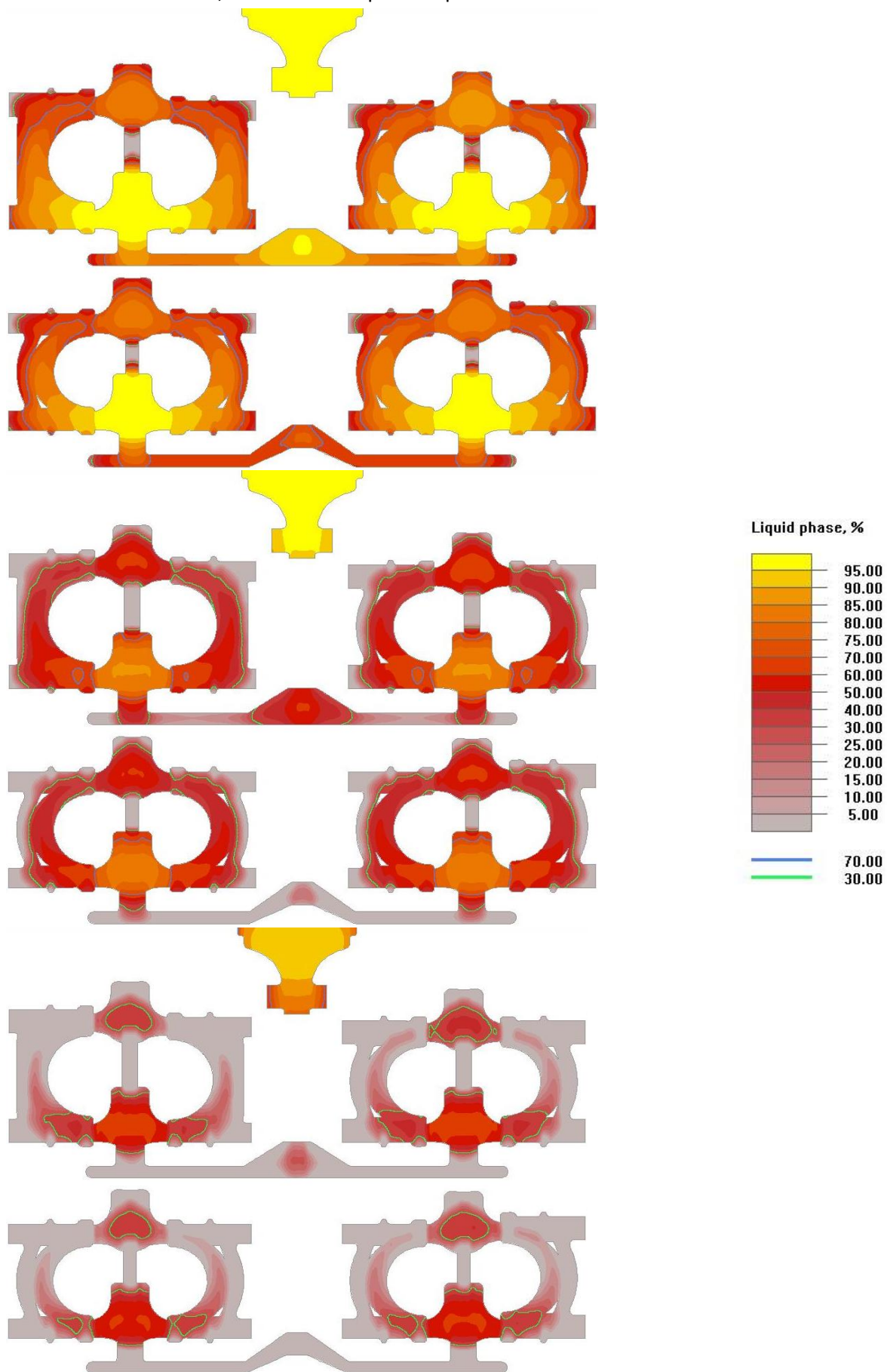
Příloha č. 6: Odlitek č. 2, tepelný modul při licích teplotě 1370°C a při 1410°C



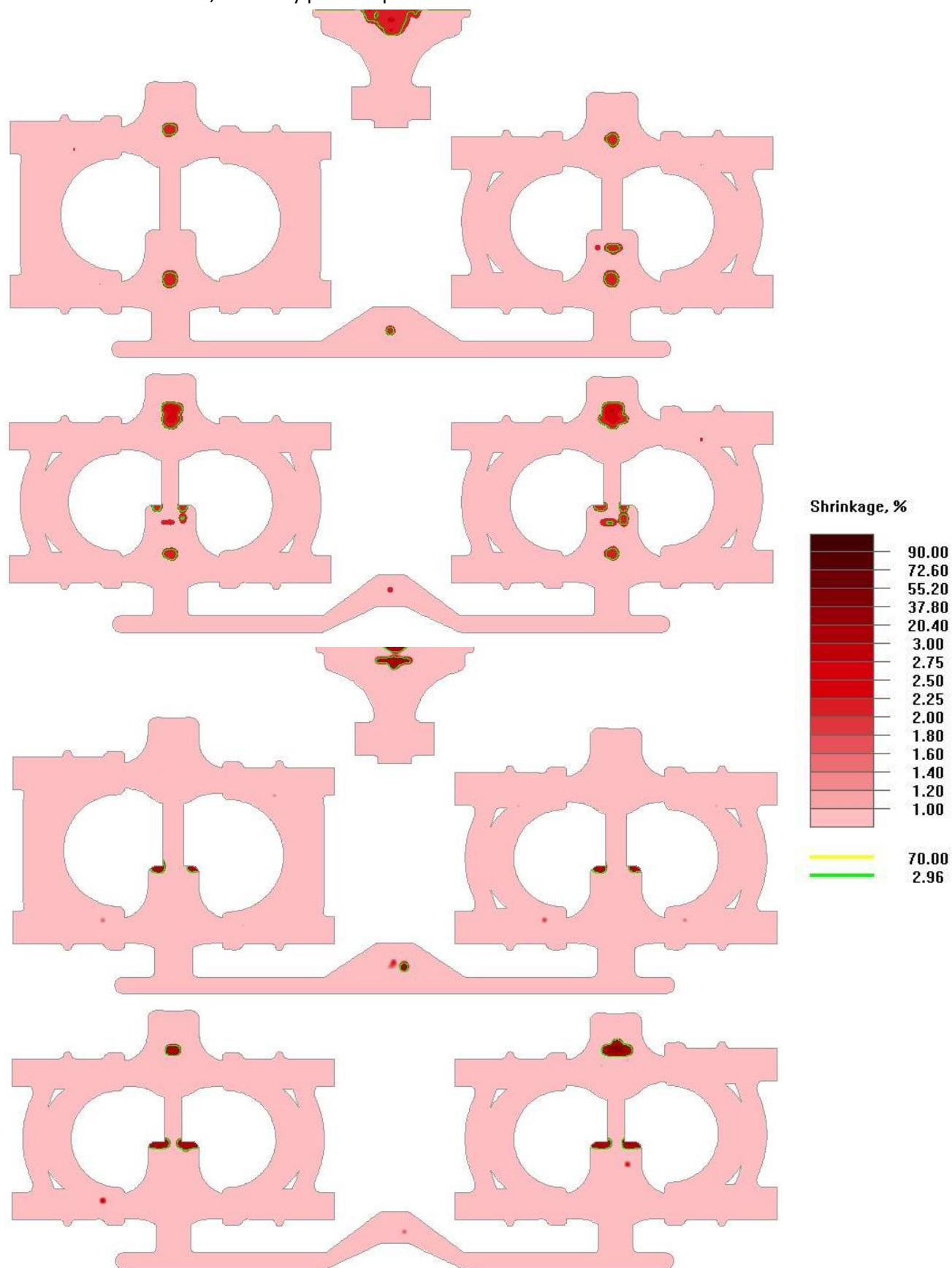
Příloha č. 7: Odlitek č. 2, tuhnutí odlitek při lící teplotě 1370°C



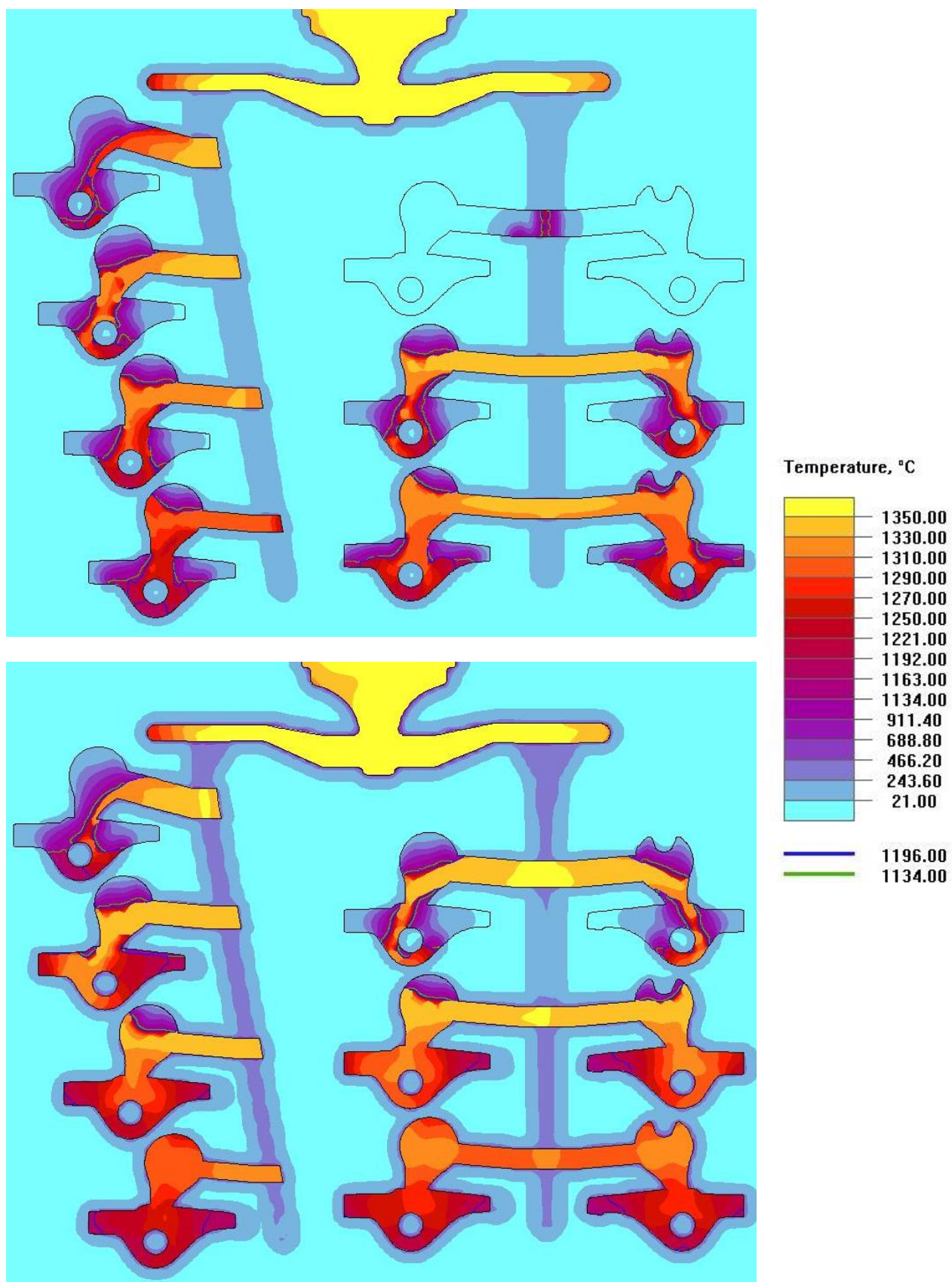
Příloha č. 8: Odlitek č. 2, tuhnutí odlitků při lící teplotě 1410°C



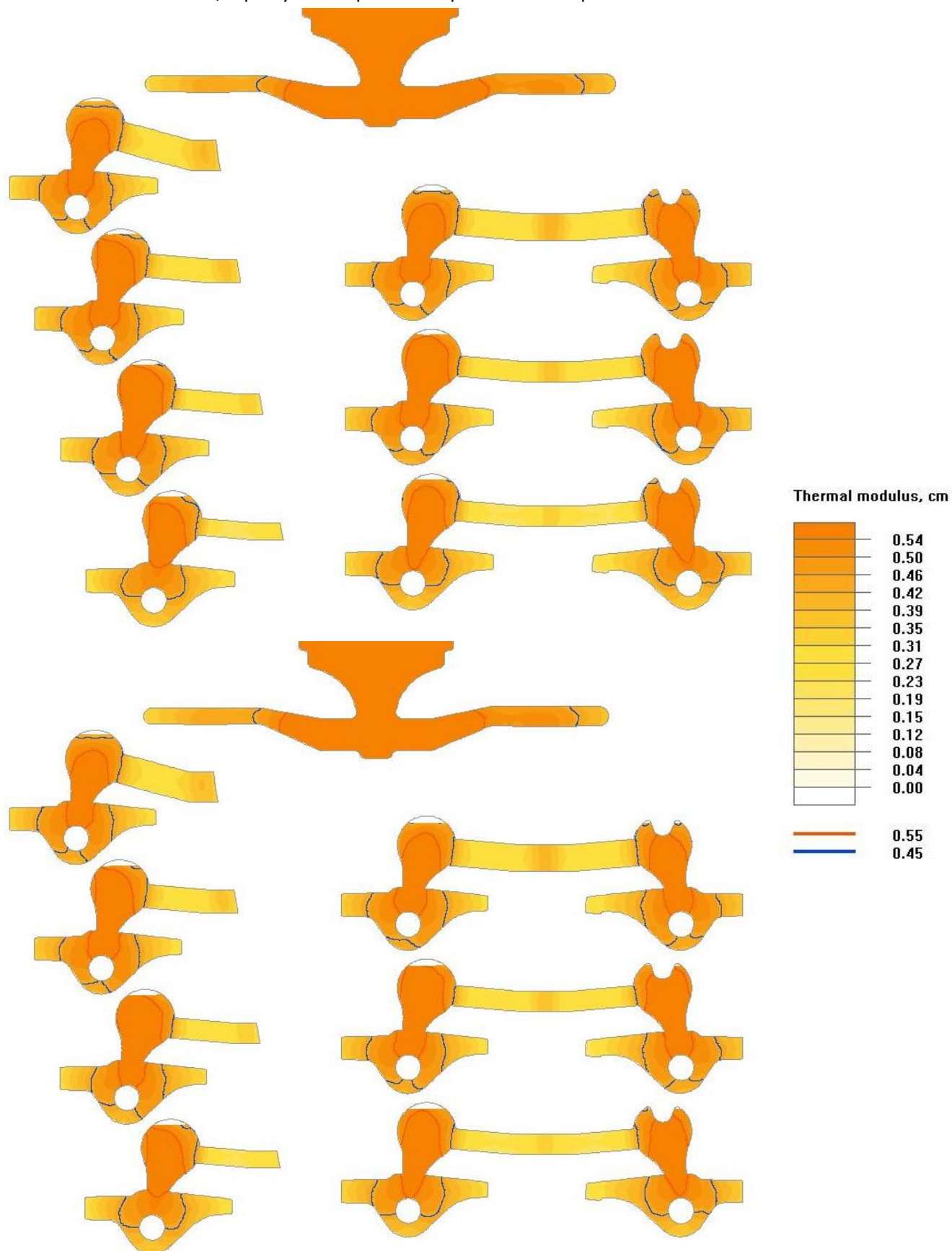
Příloha č. 9: Odlitek č. 2, staženiny při lící teplotě 1370°C a 1410°C



Příloha č. 10: Odlitek č. 3, nehomogenita plnění formy



Příloha č. 11: Odlitek č. 3, tepelný modul při licích teplotě 1370°C a při 1410°C



Příloha č. 12: Odlitek č. 3, tuhnutí odlitků při lící teplotě 1370°C

