

Úvodní strana generovaná ze stagu



Stránka pro originální zadání diplomové práce



Prohlášení generované ze stagu



Anotace

Tato diplomová práce se zabývá simulačními výpočty tuhnutí a chlazení odlitků jako nástroji pro zvýšení kvality výroby pístních kroužků z litiny s lupínkovým grafitem. Práce se skládá ze dvou základních částí (teoretická a experimentální). Teoretická část popisuje základní charakteristiku slévárenských formovacích směsí, příčiny poškozování bentonitu v jednotlivých formovacích směsích a jejich ožívování. Dále se pak práce věnuje použitému materiálu litině a případným vadám odlitků. Experimentální část je zaměřena na navržení variant a provedení simulačních výpočtů pomocí softwaru Magma⁵, týkajících se odlévání pístních kroužků ve slévárně litin Buzuluk a.s.. Současně tato kapitola obsahuje zhodnocení dosažených výsledků simulace celého procesu lití, včetně plnění dutiny formy, tuhnutí, chlazení a následné vyhodnocení degradace bentonitu v použité formovací směsi. Dále práce řeší problematiku porovnání vad zjištěných na základě výsledků simulačního výpočtu a vad nalezených na reálných odlitcích ve slévárně litin Buzuluk, a.s

Klíčová slova

slévárenská formovací směs, degradace a ožívování bentonitové směsi, litina, vady odlitků, simulace, pístní kroužky

Annotation

This thesis deals with Simulation calculations of solidification and cooling of castings as tools for increased quality production of cast iron piston's rings of the flake graphite. The thesis consists of two basic parts (theoretical and experimental). Theoretical parts describes a basic characteristics of a foundry moulding mixtures, causes of damaging bentonite in an individual moulding mixtures and their reviving. The thesis further deals with used material of a cast iron and prospective defects of casts. Experimental part is focused on designing options and performing simulation calculations by Magma⁵ software, concerning casting piston rings in the Buzuluk, a. s. company, Komárov. This chapter concurrently includes evaluation of reached results of fulfilling form's cavity, solidification, cooling and following evaluation of bentonite degradation in the form mixture. The thesis further deals with the issue of comparing defects detected by the results of a simulation calculation, and defects found on real castings in Buzuluk, a. s. foundry.

Key words:

Foundry moulding mixture, degradation and reviving of bentonite mixture, cast iron, casts defects, simulation, piston rings



Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce **Ing. Jiřímu Machutovi, Ph.D.** za odborné vedení, věnovaný čas, cenné rady a připomínky při zpracovávání diplomové práce. Dále také děkuji panu Ing. Františku Mračkovi z firmy Buzuluk, a.s. Komárov za konzultaci a poskytování cenných informací potřebných k vytvoření této práce. Dále pak panu Pavlu Pickovi a firmě KERAMOST, a.s. za poskytnuté podklady k vlastnostem dané formovací směsi. V neposlední řadě pak patří mé poděkování pracovníkům firmy MAGMA Gießereitechnologie GmbH a všem dalším, kteří větším nebo menším dílem přispěli k úspěšnému dokončení této diplomové práce.

Diplomová práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže /SGS 21005/ ze strany Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.



Obsah

OBSAH	6
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	8
1. ÚVOD	9
2. TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE	11
2.1. SLÉVÁRENSKÉ FORMOVACÍ SMĚSI	11
2.2. POŠKOZOVÁNÍ BENTONITU V JEDNOTNÝCH FORMOVACÍCH SMĚSÍCH	14
2.3. OŽIVOVÁNÍ JEDNOTNÝCH BENTONITOVÝCH FORMOVACÍCH SMĚSÍ	15
2.4. LITINY	18
2.4.1. LITINA S LUPÍNKOVÝM GRAFITEM (LLG)	21
2.4.2. LITINA S KULIČKOVÝM GRAFITEM (LKG).....	22
2.5. VADY ODLITKŮ	24
2.5.1. VADY TVARU, ROZMĚRŮ A HMOTNOSTI.....	26
2.5.2. VADY POVRCHU	28
2.5.3. PORUŠENÍ SOUVISLOSTI.....	32
2.5.4. DUTINY	33
2.5.5. MAKROSKOPICKÉ VMĚSTKY A VADY MAKROSTRUKTURY	36
2.5.6. VADY MIKROSTRUKTURY	38
2.5.7. VADY CHEMICKÉHO SLOŽENÍ A VLASTNOSTÍ ODLITKU.....	40
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE	41
3.1. SIMULAČNÍ VÝPOČET LICÍHO PROCESU	42
3.1.1. PŘÍPRAVA PODKLADŮ	42
3.1.2. PŘÍPRAVA A PRŮBĚH SIMULAČNÍHO VÝPOČTU PROCESU LITÍ.....	46
3.2. VYHODNOCENÍ SIMULACE LICÍHO PROCESU.....	50
3.2.1. VÝSLEDKY SIMULAČNÍHO VÝPOČTU PLNĚNÍ FORMY	50
3.2.2. VÝSLEDKY SIMULAČNÍHO VÝPOČTU TUHNUTÍ A CHLADNUTÍ.....	59
3.3. POROVNÁNÍ VAD ZJIŠTĚNÝCH SIMULAČNÍMI VÝPOČTY A VAD NA REÁLNÝCH ODLITCÍCH.....	68
3.4. VYHODNOCENÍ TEPELNÉ DEGRADACE BENTONITU NA ZÁKLADĚ VÝSLEDKŮ SIMULAČNÍHO VÝPOČTU.....	71
4. DISKUSE VÝSLEDKŮ	76
5. ZÁVĚR	79
LITERATURA.....	82



SEZNAM OBRÁZKŮ	84
SEZNAM TABULEK	85
SEZNAM PŘÍLOH	86



Seznam použitých zkratk a symbolů

GJL-150	označení litiny s lupínkovým grafitem (šedá litina) s mezí pevnosti v tahu 150 MPa
GJL-200	označení litiny s lupínkovým grafitem (šedá litina) s mezí pevnosti v tahu 200 MPa
LLG	litina s lupínkovým grafitem
LKG	litina s kuličkovým grafitem
LVG	vermikulární litina
*.sat	formát souboru Standard ACIS Text



1. ÚVOD

Pístní kroužek je velmi důležitou součástí všech pístových strojů, především spalovacích motorů. [1]

Není zcela jisté, kdy se poprvé samopružící pístní kroužek objevil. V roce 1777 používal James Watt k utěsnění pístů kožené manžety, koudel a konopná lana. V roce 1797 se již k těsnění začaly užívat kovové segmenty z litiny, aby prodloužily životnost těchto dílů. Do dnes používaný způsob výroby se zrodil zhruba před 150ti lety, kdy Angličan Ramsbottom přihlásil patent na výrobu těsnících kroužků s konstantním přitlakem na stěnu válce po celém obvodu. A tak výroba pístních kroužků přecházela pomalu od stavitelů spalovacích motorů na speciální výrobní závody, které stále zlepšovaly výrobní postupy tak, jak si to vyžadovala rostoucí výroba. [1]

V Čechách se v roce 1931 pro výrobu pístních kroužků, které do té doby naše automobilky dovážely převážně ze zahraničí (Anglie, Německo, Švýcarsko) rozhodly Komárovské železárny (dnes Buzuluk, a.s., Komárov). Naši dva dosavadní tuzemští výrobci pístních kroužků měli totiž velmi nízkou výrobní kapacitu a ani technická úroveň výroby nebyla příliš vysoká. V Komárovských železárnách byla nejprve zkoušena výroba jednotlivě odlévaných pístních kroužků, ale již v roce 1932 probíhaly zkoušky, jejichž výsledkem bylo formování jednotlivých kroužků do rámečků, skládaných do štosů, resp. etáží, a následně společně odlévaných. Díky velkým zkušenostem metalurgů, slévačů, a také díky postupnému zlepšování technických možností měly pístní kroužky z této slévárny stále rostoucí kvalitu a tím i zajištěn odbyt. [1]

Jelikož má pístní kroužek rozhodující vliv na životnost celého motoru, jeho výkon i ekonomický provoz, je na něm stále co zlepšovat. Vývoj spalovacích motorů není ukončen a na tento důležitý element budou kladeny stále nové požadavky. Je proto velmi obtížné vyrobit takový pístní kroužek, který by měl všechny požadované vlastnosti. Často se stává, že pokud se snažíme zlepšit jednu vlastnost, zhoršujeme jiné parametry. S cílem zlepšit podmínky výroby a následně kvalitu pístních kroužků, byla realizována právě i tato diplomová práce. [1] Jejím cílem je pomocí slévárenského simulačního programu pro odlévání kovů MAGMA⁵, popsat a následně navrhnout zlepšení výroby, resp. technologie výroby pístních kroužků ve slévárně litin Buzuluk, a.s.. Pístní kroužky se vyrábějí technologií gravitačního lití do etážových pískových forem. S ohledem na používané slévárenské materiály ve slévárně litin Buzuluk, a.s., jednotné bentonitové formovací směsi, se práce zaměřuje nejen na kvalitu odlitků a potenciální vznik vad, ale i na samotnou formovací směs, její degradaci a ožívování. V neposlední řadě se práce



zaměřuje na porovnání vad zjištěných na základě výsledků simulačního výpočtu a vad na reálných odlitcích ze slévárny litin Buzuluk, a.s.



2. TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE

2.1. SLÉVÁRENSKÉ FORMOVACÍ SMĚSI

Pískové formovací směsi slouží k výrobě netrvalých (jednorázových) pískových forem. Tento druh forem se používá především pro odlévání litin, případně slitin hliníku a mědi. Pískové formy se uplatňují především v malosériové výrobě a při jednom odlití je možné zhotovit i více odlitků najednou. [2], [3], [4], [5]

Písková formovací směs je polydispersní třífázová soustava, jejíž vlastnosti závisí na vlastnostech a vzájemném působení všech tří fází – pevné, kapalná, plynná. Částice různé velikosti a tvaru, které určují kostru celé soustavy, tvoří tuhou fázi nazývanou ostřivo. V mezerách mezi tuhými částicemi je uzavřená fáze kapalná (pojivo, voda) a plynná (vzduch). Ostřivo a pojivo jsou základní složky formovací směsi, nezbytné jsou také přísady, které zlepšují vlastnosti formovací směsi, a voda, která u určitého druhu směsi působí jako plastifikátor. [2], [3], [4], [5]

Formovací směs lze dělit podle několika různých hledisek. Z hlediska použití lze formovací směsi dělit na směsi pro strojní formování, ruční formování a jádrové směsi. Podle určení můžeme směsi dělit na:

- *Modelovou směs*, která se sype přímo na model a tím vytvoří líc formy. Tato směs musí být velmi kvalitní, jelikož je při odlévání a tuhnutí odlitku ve styku s taveninou. [2], [3], [4], [5]
- *Výplňovou směs*, která vyplňuje zbylý objem rámu. Nemusí být tak kvalitní, nejčastěji se získává z již použitých jader. [2], [3], [4], [5]
- *Jádrovou směs* používanou pro výrobu jader. Tato směs je velmi kvalitní a jsou na ni kladeny ještě větší požadavky než na směs modelovou, jelikož tyto směsi bývají velmi tepelně namáhány a musí odolávat penetraci taveniny mezi póry. [2], [3], [4], [5]
- *Jednotnou směs*, která je používána jak pro výrobu líce formy, tak pro vyplnění zbylého objemu. Je to v podstatě vratná směs, která koluje slévárnou, a je nutné ji mezi jednotlivými cykly oživit. Nejčastěji jsou to jednotné bentonitové směsi pro strojní formování. [2], [3], [4], [5]

Podle obsahu volné vody (tj. vody, kterou lze odstranit sušením na teplotu 100°C) je také možno dělit směsi do různých skupin. A to na *bezvodé směsi* (do 0,1% obsahu vody), *směsi polosuché* (do 3% obsahu vody), *směsi na syrovo* (do 5% obsahu vody) a *směsi na sušení* (6-7% obsahu vody). [2], [3], [4], [5]



Formovací směs má velký vliv na kvalitu odlitků. Při sledování výskytu vad bylo zjištěno, že až polovina zmetkových odlitků je zapříčiněna formovací směsí, nebo jejím špatným používáním. Formovací směs může ovlivnit zabíhavost slévárenských slitin, kvalitu povrchu odlitku i vlastnosti mechanické. [2], [3], [4], [5]

Ostřivo je zrnitý materiál, který tvoří nosnou část formovací směsi, jeho obsah bývá různý podle charakteru směsi. U běžných formovacích směsí ho bývá cca 92%, ale může ho být až 98%. Zrna jsou minimálně o velikosti 0,2 mm, mají různý tvar (kulatá i ostrohranná) a ovlivňují kvalitu povrchu odlitku. U ostřiva je důležitá odolnost proti vysokým teplotám (žáruvzdornost), chemická podstata, hranatost a velikost zrn. Tyto charakteristiky rozhodují o vlastnostech formovací směsi jako je objemová hmotnost, prodyšnost a propustnost, tepelná vodivost a také o pevnosti forem a jader. [2], [3], [4], [5]

Podle původu se ostřiva dělí na přírodní (křemenné písky, zirkon, olivín, atd.) a umělá (korund, magnezit, šamotová drť atd.). Dále se ostřiva dělí podle chemické povahy na kyselá (křemenné písky), neutrální (šamot, korund) a zásaditá (magnezit). [2], [3], [4], [5]

Pro každý odlitek je nutné zvolit vhodné ostřivo. Druh ostřiva se určuje na základě chemické povahy odlévaného kovu, licí teploty a tvarové složitosti. Nejpoužívanějším ostřivem je ostřivo křemenné (chemickou podstatu tvoří SiO_2), které má vhodnou zrnitost a je neekonomičtějším, v přírodě se často vyskytujícím minerálem. Teplota tání křemene je nad 1700°C a proto je vhodný pro výrobu forem k odlévání většiny slévárenských slitin. Křemenné ostřivo je kyselé povahy a nelze ho používat pro výrobu forem určených k odlévání materiálů, které vytváří oxidy zásadité povahy (např.: Hadfieldova ocel). [2], [3], [4], [5]

Pojivo pojí částice ostřiva v kompaktní celek a tím zajišťuje vznik kvalitní formovací směsi. Obsah pojiva bývá 6 až 8%, v závislosti na druhu formovací směsi, a tvoří ho částice menší než 0,02 mm. Vazba mezi ostřivem a pojivem je určována velikostí adhezních sil mezi jejich povrchy a velikostí sil kohezních, které jsou určeny vnitřní pevností daného typu pojiva. Charakter těchto sil je dán stavem povrchu, granulometrickou skladbou povrchu a fyzikálněchemickými vlastnostmi různých druhů pojiv. Pro výrobu forem je důležité, aby adhezní síly byly vyšší než síly kohezní, a naopak při vytloukání odlitku nebo regeneraci ostřiva jsou důležité malé adhezní síly. Spojením ostřiva s pojivem vzniká pevnost formovací směsi – vaznost za syrova, pevnost po vysušení a vytvrzení, pevnost za vysokých teplot i zbytková pevnost směsi (rozpadavost po odlití). [2], [3], [4], [5]



Pojiv je celá řada a dělí se podle různých kritérií, například rozlišujeme pojiva organická (pryskyřice, tuky, oleje, sacharidy) a anorganická (jíly, vodní sklo, sádra atd.). Novější způsob dělení pojiv je do generací:

Pojiva směsí 1. generace jsou pojiva na bázi jílu, která se formují mechanickým způsobem (pěchování, střešení, lisování). Tyto pojiva jsou nejčastěji součástí přírodních směsí. Pro slévárenské účely u nich hodnotíme bobtnavost a žáruvzdornost. Používají se pro formování na syrovo i po vysušení, jsou nositelem vaznosti i pevnosti po vysušení. Pojiví systém jílu je závislý na přítomnosti vody a je vratný. [2], [3], [4], [5]

K nejrozšířenějším jílovým pojivům patří takzvané bentonity, které mají výbornou pojivovou schopnost a umožňují přípravu směsi s minimálním obsahem pojiva. Bentonity nazýváme jíly, jejichž základem je montmorillonit, a je-li jeho obsah vyšší než 75-80% . [2], [3], [4], [5]

Pojiva směsí 2. generace jsou založena na chemické podstatě pojení, což je nevratný proces. Pojení probíhá buď zásahem zvenčí (za tepla i za studena), nebo zevnitř – samotvrdnoucí formovací směsí. [2], [3], [4], [5]

Organická pojiva se nejvíce používají pro výrobu jader a řadí se mezi ně oleje, sacharidy a dnes stále víc používané umělé pryskyřice.

Anorganická pojiva jsou výhodnější z ekologického hlediska, mají nižší plynovost. Patří mezi ně vodní sklo (koloidní roztok silikátů-křemičitanů), sádra, cement a látky pro výrobu forem na vytavitelný model (alkosoly, hydrosoly). [2], [3], [4], [5]

Pojiva směsí 3. generace nejsou pojiva v pravém slova smyslu, jedná se spíše o pojivové systémy, kde využíváme fyzikálních účinků pojení. Výroba forem je realizována například pomocí magnetického pole, zmrazováním, nebo formováním ve vakuu. Tyto metody nejsou v běžné praxi tak rozšířeny. [2], [3], [4], [5]

Pojiva směsí 4. generace jsou na bázi živých organismů (např.: bakterií). Biologická látka ve funkci pojiva se po zaformování rychle rozmnoží a spojí zrna ostřiva. Po ztuhnutí odlitku je organismy nutno usmrtit. Tyto systémy pojení jsou zatím ve fázi výzkumu. [2], [3], [4], [5]

Přísady jsou látky, které zlepšují vlastnosti formovací směsi a tím i vlastnosti formy. Např.: zvyšují prodyšnost, zlepšují rozpadavost, zvyšují odolnost vůči povrchovým vadám odlitku (např. zapečeninám). Typickou přísadou je kamenouhelná moučka (letek), která po nalití taveniny začne hořet a její plyny oddělují líc formy od pronikající taveniny. [2], [3], [4], [5]

Voda ve formovací směsi působí jako plastifikátor, tj. dává směsi vlastnosti nutné k udržení tvaru po formování, a to zejména u směsí jílových a s anorganickými pojivy (cement, sádra). Bývá jí kolem 3-4 hmot. %. [2], [3], [4], [5]

2.2. POŠKOZOVÁNÍ BENTONITU V JEDNOTNÝCH FORMOVACÍCH SMĚSÍCH

V ideálním případě je jednotná bentonitová formovací směs systémem skládajícím se z ostřiva, pojiva (bentonit), přísad a vody, viz kapitola 2.1. Ve skutečnosti však ještě obsahuje nepřeberné množství dalších látek (pojivo a přísady v různém stupni degradace, produkty tepelného a chemického rozkladu přísad, příměsí), které se vytvoří díky oběhům formovací směsi po slévárně a jejím poškozováním. Z toho důvodu je nutné směs hodnotit, kontrolovat a následně poškozený bentonit nahradit novým. [6]

Bentonit ve formovací směsi je při výrobě odlitků poškozován hned několika způsoby – tepelné poškození, chemické poškození, pasivace a ostatní ztráty bentonitu. [7]

Tepelné poškození je v podstatě dominantní degradace bentonitu a nastává při zalití formy a následným přestupem tepla z tekutého kovu. Množství takto poškozeného bentonitu je ovlivněno především licí teplotou kovu a také dobou ponechání odlitku ve formě. Tyto vlivy nelze nijak výrazně měnit. [7]

Chemické poškození nastává v důsledku toho, že chemické látky a jejich ve vodě rozpustné soli, obsažené v některých jádrových pojivech, se váží na krystalickou mřížku bentonitu, a tím znemožňují přístup vody do krystalů bentonitu. Tím se snižuje schopnost aktivace bentonitu. Totéž platí i pro chemicky znečištěnou vodu používanou při mísení. Míru znečištění lze zjistit elektrickou vodivostí výluhu směsi. [7]

Pasivace je omezení přístupu vody. Některé látky vytváří na krystalech bentonitu nesmáčivý povrch a tím zamezí přístupu vody. Je to například hydraulický olej, dále produkty kondenzace uhlíkatých přísad a jádrových pojiv. Tento proces lze jen stěží ovlivnit a omezit. [7]

Ostatní ztráty bentonitu nastávají například při odsávání použitelného (nepoškozeného) bentonitu v různých částech oběhu formovací směsi. Ztráty také nastávají při dopravování formovací směsi po pásových dopravnících a i to je důvod proč je směs nutné oživovat. Tyto ztráty však lze výrazně ovlivnit seřízením odsávání, případně vrácením „bohatých“ odprašků. [7]



2.3. OŽIVOVÁNÍ JEDNOTNÝCH BENTONITOVÝCH FORMOVACÍCH SMĚSÍ

Jednotná formovací směs je vysoce stabilní systém, jehož složení, s výjimkou vlhkosti, nelze skokově změnit. Ke znehodnocení, nebo ztrátě složek formovacích směsí, během jednoho oběhu dochází jen v jednotkách procent z původního množství, což umožňuje pracovat jen s minimálním oživováním, obvykle 1-3% všech surovin. [8] Oživování směsi je v podstatě dávkování nových surovin, abychom nahradili poškozený a ztracený bentonit v použité vratné směsi, a také pro doplnění k novému ostřivu. V praxi se využívá tři hlavních možností jak stanovit potřebné oživování novými surovinami [6]:

1. Zpětné řízení podle výsledků z laboratoře
2. On-line řízení pomocí měřicí a výpočetní techniky
3. Řízení pomocí bilance formovací směsi (někdy také nazývané preventivní řízení oživování)

Zpětné řízení oživování podle výsledků z laboratoře je nejrozšířenější ve většině českých a slovenských sléváren. Jedná se o zpětnou vazbu na výsledky měření, avšak nemůžeme se bezhlavě řídit jen podle jednotlivých výsledků, ale musíme neustále sledovat trend změn měřených vlastností a reagovat dříve, než vlastnosti vybočí z požadovaných hodnot. Podmínkou je grafické vyhodnocování hodnot. Hlavním důvodem pro nutnost sledování trendu, a ne okamžitých hodnot, je rozptyl měřených hodnot. Například u pevností je tento rozptyl způsoben jednak nehomogenitou, ale i nedodržením optimální spěchovatelnosti, případně chybami při provádění zkoušek. [6], [8], [9]

Dávkování ostřiva řídíme podle vyplavitelných látek. Když vyplavitelné látky stoupají, musíme přidat ostřivo. Změny v dávkování bentonitu řídíme podle hodnot vaznosti a dalších pevnostních vlastností. Jestliže tyto hodnoty klesají, zvyšujeme dávkování bentonitu a naopak. Dále dávkování můžeme kontrolovat podle obsahu aktivního jílu. Dávkování přísad řídíme například podle spalitelných látek, obsahu uhlíku nebo podle obsahu lesklého uhlíku. [6], [8], [9]

U **řízení oživování on-line pomocí automatického měření a přímého ovlivňování dávkování** je předpokladem rychlé automatické vyhodnocení vlastností nejlépe ihned za mísičem, včetně základních měření (teplota, vlhkost) před mísičem. Řídicí systémy moderních přípraven písku nejen automaticky vyhodnocují a kontrolují veškerou směs, která je vyrobena pro formování, ale také řídí její dávkování. Oproti řízení podle výsledků z laboratoře má tento systém k dispozici podstatně více údajů, protože automat dokáže



měřit v kratších intervalech. Tím je částečně smazána hlavní nevýhoda řízení podle výsledků a to ta, že musíme čekat, až se něco změní a teprve potom můžeme dělat zásah. [6], [8], [9]

Řízení oživování pomocí bilance formovací směsi – podle skutečného znehodnocení je někdy také nazýváno jako preventivní řízení oživování, u něž zásahy do dávkování nejsou prováděny odhadem, ale systematicky na základě výpočtu podle zatížení formovací směsi. V České republice však byly tyto výpočty užívány většinou jen při rozběhu výroby pro stanovení prvních přísad a dále byly směsi řízeny podle výsledků z laboratoře. V západních zemích se postupně prosadilo provádění bilance směsi a její využívání ke stanovení potřebného oživování. Velký podíl na zavedení této metody má Ing. Hruška, podle kterého se také někdy tato metoda nazývá. [6], [8], [9]

Vlastní řízení je zpracováno formou tabulek v programu Excel s minimálními nároky na obsluhu. Obecná pravidla této metody jsou uvedeny v následujících bodech:

Množství nového ostřiva – nové ostřivo se do směsi dostává několika způsoby a to jako přídavek do mísiče (oživování jednotné směsi), jako písek z rozpadlých jader, popřípadě z modelové směsi (pokud je používána). Na každou tunu odlitého kovu je nutno pro zachování množství vyplavitelných látek a pro udržení celkového znečištění směsi a stupně oolitace přidat 100 až 160 kg nového ostřiva podle tepelného zatížení forem. Čím je vyšší stupeň degradace složek formovací směsi, tím je třeba přidat na jednu tunu tekutého kovu více nového ostřiva. Abychom mohli určit potřebnou dávku nového ostřiva do mísiče, musíme nejdříve zjistit, jaké množství nového písku se do směsi dostane z jader a z modelové desky. [6], [8], [9]

Množství nového bentonitu – bentonit je nutné přidávat ze dvou důvodů. Prvním důvodem je doplnění k novému ostřivu. K novému ostřivu je třeba přidat tolik bentonitu, aby se dodržel požadovaný obsah aktivního bentonitu ve formovací směsi, který obvykle bývá 6 až 9%. Druhým důvodem je náhrada znehodnoceného (tepelně degradovaného) a ztraceného bentonitu ve vratné směsi. Průměrná hodnota znehodnocení bentonitu se pohybuje od 2 do 5%, přičemž rozhodujícím znehodnocením je právě termická destrukce v okolí odlitku a vtokové soustavy. Proto bylo jako kritérium zvoleno množství tekutého kovu. Na tunu odlitého tekutého kovu je tedy nutno doplnit 25 až 40 kg nového bentonitu. Celkové množství nového bentonitu je pak dáno součtem obou hodnot. Pokud používáme bentonit s nosičem lesklého uhlíku (směsný bentonit), pak musíme potřebné množství zvýšit o obsah uhlíkaté složky (viz množství směsného bentonitu). [6], [8], [9]



Množství nového nosiče lesklého uhlíku – zde platí stejné zásady jako pro bentonit, proto potřebné množství stanovíme poměrem k novému bentonitu celkem. Obvykle to bývá 0,2 až 0,5 násobek bentonitu. Volba závisí na tepelném namáhání formy a na kvalitě používaného nosiče. Při používání směsného bentonitu, který mívá 15 až 30%, je poměr dán výrobcem a měl by se přizpůsobit potřebám slévárny. [6], [8], [9]

Množství směsného bentonitu – je dáno součtem bentonitové a uhlíkaté směsi.

Množství ostatních přísad – ostatní přísady, pokud jsou používány, se bez výjimky dávají v poměru k novému bentonitu. V praxi se jedná o tak malé dávky (1-6% bentonitu), že obvyklé dávkovače neumožňují samostatné dávkování a tyto přísady jsou většinou dodávány jako součást směsných bentonitů. [6], [8], [9]

Výše uvedená obecná pravidla pro oživování pomocí bilance je možné uplatnit při dávkování nových surovin dvěma základními způsoby:

Řízením dávkování podle bilance předchozího dne (směny), kdy jsou na začátku nového pracovního dne shromážděny údaje o předchozím dni (směně), mezi které patří hmotnost odlitého tekutého kovu, počet cyklů mísičů a množství písku z jader. Na základě těchto dat a výše uvedených pravidel se vypočte jaké množství surovin pro oživení se mělo do mísiče dávkovat v předchozím dni (směně). Toto dávkování se pak nastaví pro dnešní den (směnu). Je to sice se zpožděním jednoho dne, ale pořad je to mnohem dříve, než se změny stačí projevit na měřitelném složení formovací směsi. Výhodou tohoto řízení je, že systém zahrnuje i suroviny spotřebované na směs jdoucí do vadných forem a do přepadů, dále pak bilance eliminuje případné nepřesnosti v technologických podkladech. [6], [8], [9]

Řízením dávkování podle modelů, kdy se pro každé modelové zařízení zjistí hmotnost tekutého kovu, potřebná hmotnost formovací směsi, a odhadne se přísun písku z jader. Potom se provedou příslušné výpočty a stanoví se požadované oživování pro jednotlivé odlitky. Výstupem je tedy seznam modelů s předepsaným dávkováním do mísiče. Při každé výměně modelu se tak provede změna dávkování. Nezbytné suroviny jsou tedy už ve směsi, ze které se formuje, a při zpracování vratu jsou ve směsi k dispozici. Výsledkem řízení je tedy konstantní složení vratné směsi, nikoli konstantní složení namísené směsi. Výhodou řízení podle modelů je to, že potřebné nové suroviny dáme hned při mísení pro daný model, a protože bentonit se aktivuje až dokonalým promísením, nejlépe pak nahřátím a napařením ve formě, je potřebné množství plně k dispozici ve vratu po odlití. Výhodou je také to, že systém nevyžaduje každodenní zásahy řídicího pracovníka. Nevýhodou je, že nemůže být zahrnuto jiné než průměrné



množství směsi, která je připravena navíc (na vadné formy, na pouštění směsi zpět do zásobníku). [6], [8], [9]

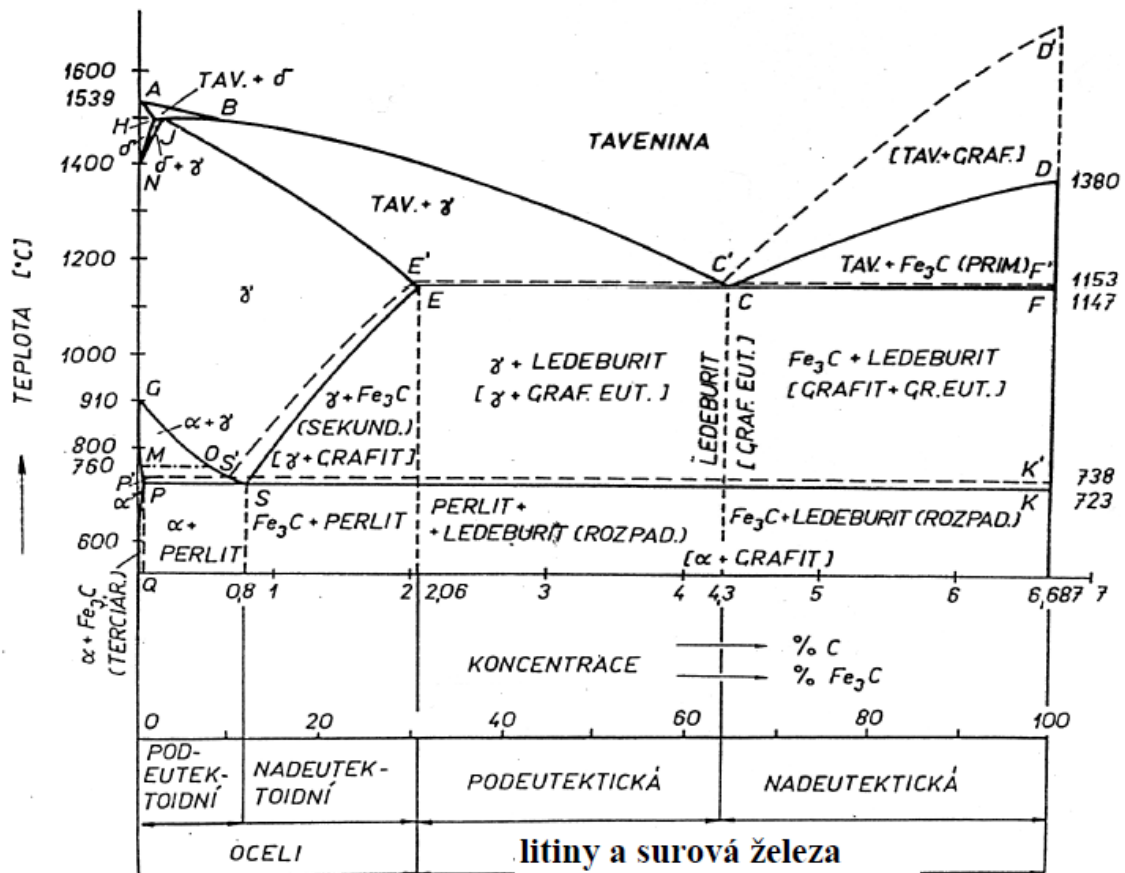
Nový způsob stanovení potřebného oživení formovací směsi bentonitem je pomocí simulačního softwaru. Nejnovější verze simulačního softwaru MAGMA⁵ umožňuje mimo jiné stanovit jaké množství komplexní formovací směsi bude tepelně zasaženo určitou teplotou vlivem přestupu tepla z odlévaného kovu do pískové formy, a následně výpočtem stanovit i množství bentonitu poškozeného působením degradačních teplot. Potřebné množství bentonitu na oživení směsi pak můžeme snadno stanovit přepočtem procent zasažené směsi na hmotnost nového bentonitu do mísiče. [7]

2.4. LITINY

Litiny tvoří největší podíl ze všech slévárenských slitin a až 70% je jich odléváno právě do bentonitových formovacích směsí. V současné době je nejpoužívanější litina s lupínkovým grafitem (LLG), která tvoří až 85% tonáže všech litinových odlitků, méně než 15% tonáže pak tvoří litina s kuličkovým grafitem (LKG), a malé množství zaujímají také odlitky z jiných druhů litin. Litina se používá převážně pro konstrukční účely a spojuje v sobě úměrnou cenu, dobré technologické vlastnosti a vyhovující mechanické vlastnosti. Odlitky z litiny tak často nahrazují dražší ocelové odlitky. [10], [11]

Litina je slitina železa, uhlíku a dalších prvků, v nichž je uhlík vyloučen jako grafit, nebo vázán jako karbid Fe_3C , případně karbid jiného prvku. Obsah uhlíku v litinách přesahuje hodnotu maximální rozpustnosti uhlíku v austenitu, tj. obsah vyšší než 2,11%. Litiny krystalizují podle stabilního, nebo metastabilního diagramu Fe-C, resp. Fe- Fe_3C , případně se v průběhu tuhnutí a chladnutí uplatňují oba systémy, viz Obr. 2. 1. [10], [11]





Obr. 2. 1 Rovnovážný diagram Fe-C (-----), Fe-Fe₃C (—)

Litiny můžeme rozdělovat z různých hledisek, ale především je dělíme podle toho v jaké formě je ve struktuře přítomný uhlík. Struktura litiny je vždy tvořena primární fází a eutektikem. Pokud litina tuhne podle stabilního diagramu Fe-C vzniká grafitické eutektikum, které tvoří austenit a grafit. Tyto litiny se nazývají litiny grafitické a patří mezi ně litina s lupínkovým grafitem (LLG), litina s kuličkovým grafitem (LKG) a vermikulární litina (LVG). Grafitické litiny tvoří drtivou většinu všech odlévaných litin. Pokud litina tuhne podle metastabilního systému je eutektikem ledeburit. Ledeburit je tvořen austenitem a cementitem Fe₃C. Ve struktuře není přítomen žádný volný grafit a tyto litiny se nazývají bílé nebo také karbidické. Karbidické litiny se vyznačují vysokou tvrdostí, křehkostí a díky tomu jsou téměř neobrobitelné. Podle metastabilního systému vzniká také zákalka, která označuje výskyt bílé struktury (ledeburitu) v místech s rychlým odvodem tepla (tenké stěny, rohy atd.) v odlitcích z grafitických litin. Přechodový typ mezi grafitickými a bílými litinami tvoří tzv. maková litina, která obsahuje jak grafitické, tak metastabilní eutektikum. Výskyt zákalky i makové litiny je většinou považován za nežádoucí. Tepelným



zpracováním bílé litiny se vyrábí litina temperovaná. Odlitky z temperované litiny tedy tuhnou jako bílé a grafit vzniká až rozpadem cementitu při žhání. Po temperování je tedy možné řadit ji mezi litiny grafitické, někdy je tato litina také nazývána jako litina s vločkovým grafitem. [10], [11]

Problematika tvorby a ovládní výsledné struktury litin, a tím i jejich mechanických a fyzikálních vlastností, spočívá ve zvládnutí základů, ale i specifik jednotlivých typů litin. Tuhnutí litin probíhá ve dvou následných procesech, krystalizací primární fáze a krystalizací eutektika. V průběhu primární fáze, se vytváří struktura litinových odlitků v rozhodující míře, kdy se už v definitivní podobě vyloučí tvar a rozložení grafitu, zároveň se i určují podmínky pro vznik kvalitní základní hmoty. Krystalizace všech typů litin začíná nukleací a následným růstem primárního austenitu. Austenit je tuhý roztok uhlíku v železe γ . Pro aktivaci zárodků austenitu je potřeba jen relativně malé podchlazení pod rovnovážnou teplotu likvidu, ten pak začne růst na cizích částicích, vměstcích a na stěnách formy. Krystaly austenitu tvoří dendrity, rozvětvení dendritů je podporované vyšším obsahem uhlíku a rychlejším růstem krystalů. Dendrity rostou postupně od stěny odlitku směrem do tepelné osy odlitku, tzv. vrstevné tuhnutí. Mezi dendrity pak vzniká grafitické eutektikum. V místech, kde je pomalé ochlazování, roste tuhá fáze v objemu taveniny před frontou tuhnutí, čímž dochází k tzv. objemovému tuhnutí, při kterém se tavenina postupně „zahušťuje“ až ztrácí tekutost. V prostorách zbývající taveniny mezi zrny tuhé fáze pak vznikají mikrostaženiny. Větší sklon k objemovému tuhnutí má tvárná litina a proto obvykle obsahuje více ředin. Sklon k exogennímu (od stěny) a endogennímu (v objemu) tuhnutí závisí na počtu krystalizačních zárodků a dalších vlivech. Primární austenit je kovovou strukturní složkou neporušovanou grafitem, a proto čím je v litině větší podíl primárního austenitu, tím má litina vyšší pevnost. Druhý proces, krystalizace eutektika, není pokračováním krystalizace primární fáze, nýbrž se jedná o zcela samostatný proces, který je ovšem primární fází ovlivněn (např.: vymezením prostoru pro vznik eutektika, obohacením zbylé taveniny o některé prvky v důsledku segregace z primární fáze atd.). Krystalizace eutektika nastupuje, když při ochlazování dosáhne obsah uhlíku, případně uhlíkový ekvivalent v zbytkové tavenině hodnotu 4,3%. Je známé, že slitiny železa s uhlíkem se mohou vyskytovat jednak v stabilní soustavě „železo-grafit“, jednak v metastabilní soustavě „železo-cementit“. Z těchto důvodů může při eutektické krystalizaci nelegovaných slitin Fe-C dojít buď k tvorbě metastabilního eutektika, tj. ledeburitu (tavenina \rightarrow austenit + cementit), nebo k vytvoření stabilního tzv. grafitického eutektika (tavenina \rightarrow austenit + grafit). Průběh eutektické krystalizace, tj. podle stabilní,



nebo metastabilní soustavy, tak primárně určuje nejen druh vyrobené litiny (LLG, LKG, bílá, přechodová), ale i její výslednou strukturu a mechanické vlastnosti. Na samotný charakter eutektické krystalizace má vliv rychlost ochlazování taveniny, chemické složení taveniny a fyzikálně-chemický stav taveniny. Tuhnutí grafitického eutektika probíhá heterogenní nukleace, kdy vedoucí fází při tuhnutí je grafit. Rozhodující roli při nukleaci grafitu mají zárodky na bázi oxidů, sulfidů nebo karbidů. Grafitizační zárodky musí splňovat několik požadavků, a to, že při teplotě tuhnutí litiny jsou v tuhém stavu a v tavenině jsou nerozpustné, mají mikroskopickou velikost, pokud možno jsou v tavenině velmi rovnoměrně rozložené, a krystalizační účinek působí na žádoucí fáze (grafit, nikoli cementit). V každé litině se tvoří určité množství z běžně přítomných prvků, pokud chceme počet grafitizačních zárodků zvýšit, pak litinu očkovujeme. V běžné litině s lupínkovým grafitem působí jako krystalizační zárodky zejména MnS, Oxidy SiO_2 , z karbidů pak CaC_2 a Al_4C_3 . Tvorba zárodků v litině s kuličkovým grafitem souvisí s přítomností prvků s vysokou afinitou k síře a ke kyslíku. Heterogenními zárodky pro krystalizaci grafitu v tvárné litině jsou velmi stabilní sulfidy MgS, CeS, sulfidy lanthanidů, oxisulfidy a oxidy MgSiO_3 a Al_2O_3 . [10], [11]

Očkováním se rozumí vnášení takových látek do roztavené litiny, které vedou ke vzniku zárodků pro krystalizaci grafitu. Očkování není přímo vnášení zárodků. Zárodky vznikají až vzájemnou interakcí mezi aktivními prvky v očkovaadle a některými prvky, přítomnými v litině. Důsledkem očkování je zmenšení sklonu ke vzniku zákalky, zjemnění grafitu a rovnoměrné vyloučení grafitu v celém odlitku. Čím větší je počet zárodků, tím dokonalejší je grafitizace. Litina s jemnozrnnou strukturou má obvykle lepší mechanické vlastnosti, než litina s hrubou strukturou. Avšak čím vyšší je dispersita grafitu (čím jemnější je grafit), tím více má litina sklon k endogennímu, kašovitému tuhnutí a ke vzniku pórovitosti. Příliš vysoký počet eutektických buněk proto není žádoucí. [10], [11]

2.4.1. Litina s lupínkovým grafitem (LLG)

Litina s lupínkovým grafitem, častěji nazývaná jako šedá litina, je slitina železa s uhlíkem a základními přísadovými prvky jsou křemík, mangan, fosfor a síra. LLG obsahuje také plynné prvky – vodík, kyslík, dusík. Obsah uhlíku v LLG je obvykle 2,5 až 3,5 %. Krystalizuje přibližně podle stabilní soustavy rovnovážného diagramu Fe-C do kovové matrice (feritu, perlitu nebo jejich směsi) s vyloučeným lamelárním grafitem. Skutečný průběh krystalizace je však odlišný, v závislosti na přítomných doprovodných nebo legujících prvcích a rychlosti ochlazování. [10], [11], [12]



Vlastnosti LLG jsou pak určovány objemem vyloučeného grafitu, velikostí a rozložením lupínků grafitu a typem matrice. Obecně se litina s lupínkovým grafitem vyznačuje relativně vysokou pevností v tlaku, avšak ostatní mechanické vlastnosti, zejména tažnost jsou nepříznivě ovlivněny lamelárním tvarem grafitu. Grafitové lamely působí jako vruby v kovové matrici a tím snižují pevnost v tahu na pouhých 100 až 350 MPa. Modul pružnosti se pohybuje v rozpětí 75 až 160 GPa. Naopak, díky lamelární formě grafitu, se zvyšuje tepelná vodivost. LLG je dobře obrobitelná a jen pomalu koroduje. Pokud má litina s lupínkovým grafitem feritickou matrici má velmi nízkou tvrdost i pevnost, a proto není vhodná pro konstrukce. Perlitické litiny s lupínkovým grafitem mají dobrou pevnost a používají se jako konstrukční materiály. Avšak nesmí se ve struktuře objevit volný cementit, neboť litina je potom tvrdá a těžko obrobitelná. Litiny s lupínkovým grafitem a feriticko-perlitickou matricí mají středně vysoké mechanické vlastnosti. Výsledné vlastnosti litin nejvíce ovlivňuje počet, velikost a rozložení grafitových lupínků ve struktuře. Podřadnější litiny mají lupínky hrubé, naopak jakostní litiny musejí být vždy očkovány, aby byly lupínky jemné a rovnoměrně uspořádané a litina díky tomu měla lepší mechanické vlastnosti. Mechanické vlastnosti jsou též závislé na tloušťce stěny odlitku. Se zmenšováním tloušťky stěny roste ochlazovací rychlost, tím se zjemňuje lupínkový grafit a narůstá množství perlitu v základní kovové hmotě. Takto se zvyšuje pevnost v tahu a tvrdost. Odlitky z LLG se obvykle tepelně nezpracovávají. [10], [11], [12]

Šedá litina se používá na odlitky kde nejsou kladeny vysoké nároky na pevnost a houževnatost, ve výrobě strojů, v automobilovém průmyslu, na umělecké odlitky, kanalizační trouby a armatury, odlitky pro stavební průmysl, radiátory ústředního topení ap. Šedá jemnozrnná litina je pak daleko na špici všech materiálů, vhodných pro výrobu pístních kroužků, jelikož splňuje podmínky jako dobrá odolnost proti opotřebení, dobrá tepelná stálost, dobrá obrobitelnost a tepelná vodivost, má dostatečnou antikorozi schopnost i vyhovující parametry pevnosti, které jsou pro pístní kroužky důležité. [10], [11], [12]

2.4.2. Litina s kuličkovým grafitem (LKG)

Litina s kuličkovým grafitem, častěji nazývaná jako tvárná litina, je slitina železa s uhlíkem, křemíkem, manganem a dalšími prvky. LKG může obsahovat též legující prvky. Uhlík se vylučuje ve formě kuličkového grafitu, přičemž kulička je z hlediska vlastností litiny považována za ideální tvar, neboť podstatně méně porušuje základní kovovou hmotu. To vyvolává nejen podstatný nárůst pevnostních vlastností (350 až 900 MPa), ale



litina nabývá i dobré plastické vlastnosti a menší citlivost na tloušťku stěny odlitku. Tyto vlastnosti nabývá už v odlitém stavu, ale můžou být ještě umocněné vhodným tepelným zpracováním. Díky příznivému vyloučení grafitu jsou pak mechanické a jiné vlastnosti LKG určovány především druhem a stavbou základní kovové hmoty. Litiny s feritickou strukturou mají velmi dobré plastické a dynamické vlastnosti, perlit přispívá ke zvýšení pevnosti a tvrdosti litiny. Zvýšení podílu perlitu se dosahuje při vyšším obsahu manganu, nebo pomocí legur, stabilizujících perlit (zejména Cu). Modul pružnosti litin s kuličkovým grafitem je vyšší, než u litiny s lupínkovým grafitem, a pohybuje se v rozmezí přibližně $(1,6 - 1,85) \cdot 10^5$ MPa. [10], [11], [13]

Kuličkového grafitu v litině se dosahuje modifikací. Modifikace se provádí hořčíkem nebo slitinami, které obsahují hořčík. Sferoidizační účinek mají i některé jiné prvky, např. kovy vzácných zemin a jiné, jejich účinek je však nedostatečný a aplikace problematická. Modifikace probíhá tak, že páry hořčíku probublávají ode dna taveninou. Přitom Mg reaguje se sírou a kyslíkem, rozpuštěným v litině a tvoří chemické sloučeniny, často také spolu s křemíkem. Tyto vměstky se nazývají „sekundární struska“. Část hořčíkových par unikne z taveniny a na hladině shoří. Jen ta část, která se při cestě bublin Mg k hladině rozpustí v kovu, vede ke vzniku kuličkového grafitu. [10], [11], [13]

Mimořádně dobré mechanické vlastnosti, ekonomicky výhodná výroba, a dobrá opracovatelnost jsou důvody velkého rozšíření použití tvárné litiny v průmyslu. Přibližně 40–50 % světové výroby je spotřebováno v automobilovém průmyslu. V současných automobilech jsou téměř všechny takzvané bezpečnostní součástky, jako závěsy kol, součásti řízení, dále motorové části, jako klikové hřídele, ojnice, vačkové hřídele atd. vyráběny právě z této litiny. Také těžké, tlustostěnné odlitky, které v minulosti byly naprostou doménou lité oceli, jako turbínové skříně a odlitky o hmotnosti 300 a více tun jsou vyráběny z LKG. Dále je LKG používána ve strojírenském průmyslu, ve výrobě zemědělských strojů atd. Tvárná litina se také nasazuje v případech odlévání pístních kroužků, kdy nestačí šedá litina. Těmito případy jsou pístní kroužky, zejména nejvyšší těsnící pístní kroužek, na které jsou kladeny vysoké nároky vlivem vysokých špičkových tlaků v přeplňovaných naftových motorech a vlivem vysokých otáček moderních benzinových motorů. [10], [11], [13]



2.5. VADY ODLITKŮ

Vada odlitku je každá odchylka vzhledu, tvaru, rozměru, hmotnosti, makrostruktury a laboratorními zkouškami zjištěná odchylka vlastností od příslušných norem nebo technických podmínek. [14], [15]

Při řešení každé slévárenské vady vidíme význam a vliv propojení jednotlivých slévárenských profesí, předvýrobních etap s vlastní výrobou. Dokonalý technologický postup může být zcela znehodnocen nekvalitní prací formíře nebo jádraře, stejně jako vyrobením nekvalitní směsi, přípravou tekutého kovu, způsobu lití atd. Nutná je také spolupráce slévárenských techniků s konstruktéry při posuzování technologičnosti konstrukce, jelikož mnoho příčin vad pramení už z konstrukce odlitku. Je tedy mnoho důležitých faktorů ovlivňujících kvalitu výrobku. Každý druh, či typ odlitku je určen k jiným pracovním účelům. S tím je spjato i ustanovení příslušných norem, nebo technických podmínek, podle kterých může být stejná vada někdy přípustná, jindy nepřípustná, popřípadě opravitelná nebo odstranitelná. [14], [15]

Nepřípustná vada je odchylka od příslušných norem nebo sjednaných technických podmínek, kterou nelze odstranit opravou nebo jejíž oprava je podle dokumentace nepřípustná, protože činí odlitek z funkčního hlediska nepoužitelným.

Přípustná vada je vada, kterou příslušné normy nebo technické podmínky připouštějí, aniž by požadovali její odstranění výrobcem odlitku. [14], [15]

Odstranitelná vada je odchylka na odlitku od příslušných norem nebo technických podmínek, kterou je dovoleno podle těchto předpisů odstranit vhodným způsobem po dohodě s odběratelem odlitku, a to zvláštními úpravami a nepředpokládanými výrobními postupy. [14], [15]

Vady odlitků mohou být dále zjevné a skryté. Zjevná vada odlitku je vada, kterou je možno zjistit při prohlídce neobrobeného odlitku vizuálně, nebo jednoduchými pomocnými měřidly. [14], [15]

Skrytá vada odlitku je vada, kterou je možno zjistit až po obrobení odlitku, prorysováním, nebo pomocí vhodných přístrojů či laboratorními zkouškami. [14], [15]

Při výskytu určité vady odlitku pak sehraje svou významnou roli správné stanovení druhu vady, od kterého pak probíhá další činnost k určení původu vady, ke stanovení příčin a prostředků k zabránění jejího vzniku. Pro kvalifikaci vad byla vydána norma ČSN 42 1240, která je dělí do 7 základních skupin, zde uvedené třídění vad odlitků platí pro všechny druhy a typy slévárenských slitin, bez zřetele ke způsobu výroby a technologii odlévání. Avšak díky novým poznatkům o příčinách a tvorbě vad odlitků, které byly



publikovány od doby vzniku normy, je některými odborníky norma považována za zastaralou a nevyhovující. A jelikož je správné určení vady předpokladem snižování zmetkovitosti odlitků, byla jimi vytvořena nová kvalifikace vad zaměřená na odlitky ze slitin železa, viz Tab. 2. 1. [14], [15]

Tab. 2. 1 Třídění slévárenských vad odlitků

Třída vad	Název třídy vad	Skupina vad	Název skupiny vad
100	Vady tvaru, rozměrů a hmotnosti	110	Chybějící část odlitku bez lomu
		120	Chybějící část odlitku s lomem
		130	Nedodržení rozměrů, nesprávný tvar
		140	Nedodržení hmotnosti odlitku
200	Vady povrchu	210	Přípečeniny
		220	Zálupy
		230	Nárosty
		240	Výronky
		250	Výpotky
		260	Zatekliny
		270	Nepravidelnosti povrchu odlitku
		280	Vady povrchové ochrany odlitku
300	Porušení souvislosti	310	Trhliny
		320	Praskliny
		330	Porušení souvislosti z důvodu mechanického poškození odlitku
		340	Porušení souvislosti z důvodu nespojení kovu
400	Dutiny	410	Bubliny
		420	Bodliny
		430	Odvařeniny
		440	Staženiny
500	Makroskopické vměstky a vady makrostruktury	510	Struskovitost
		520	Nekovové vměstky
		530	Makrosegregace a vycezeniny
		540	Broky
		550	Kovové vměstky
		560	Nevyhovující lom
600	Vady mikrostruktury	610	Mikroskopické dutiny
		620	Vměstky
		630	Nesprávná velikost zrna
		640	Nesprávný obsah strukturních složek
		650	Zatvrdlina, zákalka



		660	Obrácená zákalka
		670	Oduhličení povrchu
		680	Jiné odchytky od mikrostruktury
700	Vady chemického složení a vlastností odlitku	710	Nesprávné chemické složení
		720	Odchytky hodnot mechanických vlastností
		730	Odchytky hodnot fyzikálních vlastností
		740	Nevyhovující homogenita odlitku

Každá vada je zde označena třímístným číselným kódem, kdy první číslo značí třídu slévárenských vad odlitku (100-700), následující číselný znak označuje skupinu slévárenské vady (každá třída má jiný počet skupin), a poslední číslo charakterizuje konkrétní druh vady, ne každá skupina se však dále dělí na konkrétní druhy vad. [14], [15]

Oproti normě, která nabízela pouze 37 možností vyhodnocení vad odlitku, tento návrh umožňuje až 108 možností vyhodnocení vad ve slitinách železa. Tento způsob je tedy mnohem přesnější a díky tomu je možné konkrétnější vyhodnocování vad, a účinnější prevence vzniku vad v odlitcích. [14], [15]

2.5.1. Vady tvaru, rozměrů a hmotnosti

Vady této třídy jsou snadno určitelné vizuálně pozorováním odlitku, jeho porovnáním s etalony, vážením a měřením. Tato třída je rozdělena do čtyř skupin, které celkem obsahují 17 vad. [14], [15]

Ve **skupině 110 – chybějící část odlitku bez lomu** je zahrnuto nejvíce druhů vad a jedná se o v praxi se často vyskytující vady.

Nezaběhnutí je vada způsobená neúplným vyplněním některé části formy, zpravidla v tenkých místech nebo horní části. Nejčastější příčinou bývá nízká teplota při lití, malá rychlost lití, špatně prodyšná forma, špatná konstrukce odlitku a řešení vtokové soustavy, dále pak povrchové napětí a chemické složení taveniny, množství plynů atd. Ve většině případů se odlitek s tímto druhem vady musí vyřadit. Opatření k zabránění vzniku těchto vad vyplývá z příčin vzniku a jsou to tyto opatření - vhodná volba konstrukce odlitku, odlévaného materiálu, formovací směsi, vhodná lící soustava a vhodná poloha odlitku ve formě. [14], [15]

Nedolití je neúplné vytvoření tvaru odlitku v horní části formy, způsobené jeho nedolitím. Příčinou této vady je nedostatek tekutého kovu, většinou způsobený

nesprávným stanovením hmotnosti odlitku a nesprávným stanovením hmotnosti tekutého kovu v pánvi atp. [14], [15]

Vytečený kov může způsobovat neúplné vytvoření odlitku a mohou vznikat výčnělky různého tvaru a velikosti, v důsledku vytečení kovu mimo dutinu formy. Příčinou vytečení bývá nedostatečně zatížená forma, nekvalitně upěchovaná forma, příliš velké nepřesnosti v zámcích formy, netěsnosti v dělicí rovině atd. Aby k těmto vadám nedocházelo je nutno vyžadovat pořádek na pracovišti, kvalitní provedení forem a jader, dobrý stav rámu a podložek pod rámy, správnou licí teplotu. [14], [15]

Špatná oprava formy vede ke vzniku vad, které se projevují dutinami na povrchu odlitku, někdy i velkého rozsahu. Hlavní příčina vady je obsažena v samotném názvu. Jde o poškození formy, při kterém se do dutiny promáčkne určitá část formy, která neodpadne. K takovému poškození může dojít nerovnoměrně naneseným nátěrem na formy a jádra, posunutím stěny při vytahování modelu, položením spodku formy na nerovnoměrnou podložku atd. Vzniku vady lze zabránit pečlivou opravou deformovaných míst, případně zničením formy, kterou nelze opravit. [14], [15]

Další vady patřící do této skupiny jsou způsobeny následným zpracováním odlitku a patří mezi ně přetryskaný odlitek, omačkání, potlučení a pohmoždění odlitku, a nakonec nesprávně upálený, odřezaný a obroušený odlitek. [14], [15]

Skupina 120 – chybějící část odlitku s lomem obsahuje již podstatně méně vad.

Ulomená část odlitku za studena, případně za tepla, je vada vzniklá rozlomením odlitku na dvě nebo více částí. Při ulomení části odlitku za tepla je lom silně zoxidován, zatímco při ulomení za studena má lesklý zrnitý vzhled. K obou těmto vadám dochází mechanickým způsobem a zejména v důsledku nešetrného zacházení s odlitky. Vada je většinou neodstranitelná, ve výjimečných případech je možné ji odstranit navařením poškozené části odlitku. [14], [15]

Vyštípnutí je porušení tvaru nebo rozměru odlitku v místě, kde k němu byli napojeny zářezy, nálitky a výfuky. Projevuje se nepravidelným lomem, zasahujícím dovnitř odlitku. Opět se jedná o mechanické poškození, kterému lze předejít pečlivou a opatrnou prací. [14], [15]

Skupina 130 – nedodržení rozměrů, nesprávný tvar obsahuje čtyři druhy vad.

Špatný model způsobuje tvar odlitku, který úplně nebo částečně neodpovídá výkresu. Příčinami může být chyba ve výkresu, ve výrobě modelu, záměna či natočení volných dílů. Zde je jediným preventivním opatřením proti vzniku vad kontrola postupového



výkresu a vyrobeného modelu. Volné díly pak musí být jednoznačně označeny a zajištěny. [14], [15]

Přesazení je posunutí jedné části tvaru odlitku vůči druhé, nebo přesazení dutin a otvorů v odlitku vzhledem k povrchovému obrysu odlitku. Příčinami mohou být vady modelového zařízení, špatný stav ráků a modelových desek, nebo nesprávné složení formy. Vzniku přesazení lze zabránit především pečlivou údržbou a kontrolou modelového zařízení, bezvadným stavem formovacích ráků a kvalitou zaváděcích kolíků. [14], [15]

Nevyhovující rozměry, tedy zvětšení nebo zmenšení rozměrů odlitku proti údajům na výkrese vznikají překročením dovolených úchylek podle příslušných norem, nebo sjednaných technických podmínek. Tyto vady vyplývají z různých příčin, jimiž jsou například chyby ve stanovení smrštění, bržděné smršťování, nepravidelné smršťování, přílišné rozklepání modelu pro jeho uvolnění před vyjímáním z formy, nerovnoměrné a nedostatečné upěchování formy, atd. Pro většinu uvedených příčin je nejučinnějším způsobem k odstranění vady úprava modelu podle reálného smrštění odlitku nebo s ohledem na dilataci formy a jádra. [14], [15]

Zborcení a deformace je změna tvaru a rozměrů odlitku oproti výkresu v důsledku deformace modelu, formy a odlitku během výroby formy, jejího transportu, při tuhnutí, chladnutí a tepelném zpracování odlitku. [14], [15]

Poslední skupinou této třídy je **skupina 140 – nedodržení hmotnosti odlitku**, která dále neobsahuje rozdělení na konkrétní druhy vad. Nedodržení hmotnosti odlitku vzniká v důsledku nedodržení rozměrů odlitku. [14], [15]

2.5.2. Vady povrchu

Vady povrchu jsou ve většině případů odstranitelné, avšak odstraňování je velmi pracné a nákladné. Tato třída obsahuje nejvíce vad, často jsou to však jen vady vzhledu odlitku, které neovlivňují životnost ani funkčnost součástí, a záleží na odběrateli, zda je ochoten je tolerovat a v jakém rozsahu. [14], [15]

První skupinou této třídy je **skupina 210 – připečeniny**.

Drsný povrch odlitku, způsobený dokonalým smočením líce formy (jádra) kovem do hloubky poloviny průměru zrna ostřiva. Příčina je taková, že tekutý kov kopíruje tvar slévárenské formy, ale i povrch stěn a zvláště grafitizující slitiny se vyznačují vysokou zabíhavostí a tím detailně kopírují nerovnosti povrchu formy. K získání hladkého povrchu odlitku používáme ochranných nátěrů s vysoce žáruvzdornými plnivy, pro grafitizující slitiny na bázi grafitu, mastku, pyrofilitu a dalších látek. K hladkosti povrchu odlitku přispívá i nižší teplota kovu, vysoká tepelná vodivost a tepelně akumuláční schopnost



formy. Drsnost povrchu odlitku můžeme také ovlivnit následným tryskáním odlitku. [14], [15]

Povrchová připečenina je poměrně tenká vrstva písku pevně spojená s povrchem odlitku, často se vyskytující na rovných plochách. Kov penetruje do větší hloubky než je průměr zrna ostřiva. Odstranění připečenin je obtížné a lze ho dosáhnout opakovaným tryskáním a broušením. [14], [15]

Hloubkové připečeniny, neboli zapečeniny, vznikají při pronikání kovu do hloubky, často i několika centimetrů. Mohou být dvojího charakteru – mechanického, kdy vlivem metalostatického tlaku proniká tavenina mezi zrna formovací směsi, nebo chemického charakteru, kdy vlivem kyselých a zásaditých podílů ze směsi a kovu vznikají nízkotavitelné chemické sloučeniny, nejčastěji na bázi křemičitanů. Příčinou zapečenin mohou být nevyhovující tepelné, chemické i mechanické vlastnosti formovací směsi, nevhodný nátěr formy, teplota a druh odlévaného kovu atd. Některé zapečeniny se dají opravit vysekáním a navařením, větší zapečeniny přispívají k vyřazení odlitku. Předcházet zapečeninám můžeme odléváním kovu s minimální teplotou přehřátí, odlévat s co nejmenší metalostatickou výškou, sledovat chemické složení, atd. [14], [15]

Skupina 220 – zálupy jsou vady odlitků, zpravidla odlévaných do syrových bentonitových forem. Hlavní příčinou je napětí z brzdné tepelné dilatace, dále pak vznik kondenzační zóny vody a s tím spojený pokles mechanických vlastností v převlhčené zóně. Mezi opatření k zabránění vzniku těchto vad patří vhodná volba tvaru zrn křemenného písku, křemenné ostřivo nahradit jiným, zvýšit obsah bentonitu, odlévat deskovité odlitky v šikmé poloze atd. [14], [15]

Zálupy na vršku formy jsou mělké prohlubně překryté šupinou kovu, které mohou být vyplněny formovacím materiálem. Tvoří se v místech odlitku, kde byla syrová (písková) slévárenská forma soustavně ohřívána sálavým teplem, tedy na „stropě“ formy. [14], [15]

Zálupy na dně formy jsou též mělké prohlubně překryté šupinou kovu, které mohou být vyplněny formovacím materiálem. Tvoří se na spodní části formy působením tepla nerovnoměrně proudícího a přelévajícího se kovu po dně formy.

Zálupové síťoví vzniká převážně na dně formy. Jde o velice tenké, jemné a rozvětvené nárosty, často se i překrývající útvary. Jejich napojení na povrch odlitku je velmi jemné, takže se dá celé síťoví snadno odstranit. [14], [15]

Skupina 230 – nárosty obsahuje čtyři konkrétní druhy vad.

Vybouleniny jsou nepravidelné místní deformace povrchu odlitku vzniklé následkem velkého metalostatického tlaku taveniny na líc formy. Příčinou je nedostatečně upěchovaná nebo nevhodně volená formovací směs. [14], [15]

Odření, shrnutí je nepravidelný nárost na vertikálních plochách nebo oblínách odlitku ve směru skládání formy nebo zakládání jádra. Jde o mechanické poškození, vzniklé nepřesným skládáním. Vady toho druhu jsou ve většině případů neopravitelné. [14], [15]

Utržení, sesutí se projevuje jako nepravidelný nárost na povrchu odlitku, který má tvar utržené části formy. Na horních plochách se současně objevují zadrobeniny. Hlavní příčinou utržení formy ještě před odlitím je nízká pevnost v tahu dané směsi, popřípadě mikroskopická nebo makroskopická narušení. Zabránit těmto vadám lze pravidelnou kontrolou kvality směsi (především hodnocení pevnosti v tahu), prověřováním kvality modelového zařízení a sledování lepení směsi na model. [14], [15]

Erozi vzniká nepravidelný nárost v blízkosti vtoku nebo ve spodních částech forem ve směru proudění kovu. Často jsou zde zadrobeniny a na horních plochách odlitku pozorujeme také rozplavený písek. Eroze je porušení slévárenské formy, nebo jader během lití a plnění dutiny formy vlivem proudícího kovu, tepelného rozrušení (degradace) pojivového systému, nebo vlivem fyzikálně-chemického porušení. Volbou vhodné vtokové soustavy, zvýšením tvrdosti formy, jemnozrnějšími písky, zvýšením obsahu pojiva atd. můžeme zabraňovat vzniku těchto vad. [14], [15]

Skupina 240 – výronky jsou žebrované nebo žilkovité výstupky na povrchu odlitku, které vznikají zatečením kovu do trhlin povrchu formy nebo jádra, které vznikly v důsledku dilatace formovacího materiálu. Vyskytují se především na válcovitých plochách a zaoblených hranách. [14], [15]

Skupina 250 – výpotky jsou kapkovité útvary na povrchu odlitku a mají odlišné složení od základní slitiny. Vada vzniká nejčastěji u slitin neželezných kovů. U litin se můžeme setkat s vnitřními výpotky, které mohou při obrábění vyvolat značné potíže. Prevencí vady je snížení obsahu plynu a fosforu v litině. [14], [15]

Skupina 260 – zatekliny jsou rozděleny do tří konkrétních druhů.

Zatekliny způsobené netěsností formy jsou výčnělky a výronky různého tvaru, tloušťky a velikosti s hladkým povrchem. Zatekliny způsobené netěsností formy se nejčastěji vyskytují v dělicí rovině formy a podél známek jader. Jsou dobře viditelné, většinou jsou opravitelné, a nejsou příčinou zmetkovitosti. Příčinou bývá nedostatečně zatížená nebo nedostatečně složená forma, přílišné rozklepání modelu při jeho vyjímání z formy, stav



modelového zařízení atd. Zabránit vzniku těchto vad můžeme především pečlivou prací a dostatečným zatížením formy.

Dalšími dvěma důvody vzniku zateklin jsou prasklá jádra a prasklé formy. [14], [15]

Skupina 270 – nepravidelnosti povrchu odlitku je v této třídě nejrozsáhlejší skupinou.

Pomerančová kůra je typickou vadou ocelových odlitků litých do pryskyřičných skořepinových forem. U odlitků z šedé nebo tvárné litiny se vada nevyskytuje. [14], [15]

Zvrásnění povrchu je způsobeno růstem povrchového napětí kovu při plnění formy. Povrch odlitku je hladký, ale nepravidelně vráscitý, často obsahuje hlubší brázdy a má i zavalené hrany. Odstranění vzniku vad je možné ve dvou směrech, v oblasti metalurgie, lící a formovací techniky. [14], [15]

Neštovice mohou být místní nebo čárové a jsou typické pro masivní tlustostěnné ocelové odlitky. Dolíčky na povrchu odlitku připomínají lidskou tvář po onemocnění neštovicemi. Jsou otiskem nárůstů na lici formy. [14], [15]

Okujení, opálení je nadměrná vrstva oxidů na povrchu odlitku. Vzniká při nesprávném tepelném zpracování, použitím příliš vysoké teploty, nebo dlouhé doby žhánání a nesprávně zvolenou atmosférou v peci. Vada se odstraní dostatečným otryskáním nebo mořením odlitku. [14], [15]

Krupičky jsou kovové kuličky, které pokrývají část nebo celý povrch odlitku a jsou s ním pevně spojeny. Příčinou je vniknutí kovu do plynových bublinek. Vzniku krupiček předejdeme tím, že zabráníme vzniku vzduchových bublinek na povrchu modelu. [14], [15]

Dolíčková a kanálková koroze se vyskytuje především u odlitků litých na vytavitelný model. Zabráníme jí litím ve vakuu nebo v ochranné atmosféře, použitím vhodnějšího žáruvzdorného materiálu atd. [14], [15]

Chemická koroze způsobuje malé pŕulkulovité dutiny různé hloubky na části nebo celém povrchu odlitku. Vzniká při chemickém způsobu odstraňování keramiky z přesných odlitků. [14], [15]

Skupina 280 – vady povrchové ochrany odlitků je poslední skupinou v této třídě a už se dále nedělí na konkrétní vady. Vady jsou způsobeny špatnou přilnavostí nátěru, jeho odlupováním, nedostatečnou nebo nadměrnou vrstvou nátěru, poškrábáním vrstvy a nevyhovující korozivní odolností. [14], [15]



2.5.3. Porušení souvislosti

Skupina 310 – trhliny je dále rozdělena na 3 druhy podle jejich místa výskytu i rozdílného mechanismu vzniku.

Povrchové (otevřené) trhliny jsou pouhým okem viditelná natržení nebo roztržení odlitku, které jsou charakteristické svým křivolakým průběhem a zoxidovaným povrchem. Trhlina probíhá po hranicích zrn při vysokých teplotách v blízkosti solidu. Otevřené trhliny nejčastěji vznikají v tepelných uzlech odlitku a patří mezi nejnebezpečnější vady. Vznik trhliny je ovlivněn vznikem napětí v odlitku, které vyvolá tahové, případně smykové síly, a schopností materiálu odlitku tomuto napětí odolávat. Pokud chceme mít odlitky bez trhlín, musíme snížit všechny odpory formy a jádra proti volnému smršťování odlitků, omezit všechny tepelná pnutí, stejně jako musíme zvýšit pevnost a tažnost litého kovu. [14], [15]

Podpovrchové trhliny nejsou okem viditelné a vadu většinou zjistíme až pomocí příslušné zkoušky. Trhlina je většinou pod jemně vykrystalizovanou povrchovou kůrou odlitku a je často doprovázena povrchovým výronkem. Podpovrchové trhliny vznikají zejména v raném stádiu krystalizace odlitku. Aby k těmto trhlinám nedocházelo jsou dvě oblasti, které musíme ovlivnit, a to síly působící na kovovou vrstvu a rychlý růst její pevnosti. V oblasti formování pak musíme klást důraz na tuhost celého pískového balu, který tvoří formu. [14], [15]

Vnitřní trhliny vznikají především u masivních těžkých odlitků. K vadě může dojít v různých fázích výroby, např. při chladnutí z vysokých teplot, nebo dochází k porušení při nižších teplotách (při tepelném zpracování). Trhliny vzniklé při nižších teplotách mívají většinou daleko větší rozsah a mohou prostupovat celým průřezem odlitku. Hlavní příčinou jsou velké teplotní gradienty v průřezu odlitku a rychlé změny teplot, a z toho vyvíjející se pnutí (tahové pnutí, tepelné a fázové pnutí). Proto je k zabránění vzniku vnitřních trhlín důležité snížit teplotní rozdíly v oblasti teplot přechodu materiálu do pružných deformací a zajištění pomalých změn teplot v celé fázi výroby. [14], [15]

Skupina 320 – praskliny se dále již nedělí. Praskliny jsou rovné, nebo mírně zakřivené roztržení stěny odlitku, vzniklé při nízkých teplotách, při nichž má slitina pružné deformace. Mohou vznikat i po úplném vychladnutí odlitku ve formě, při vytloukání, po předčasném vyjmutí z formy nebo při tepelném zpracování. Povrch praskliny je zpravidla zrnitý a čistý, někdy až zřetelně zoxidovaný. Praskliny vznikají pod účinkem napětí v odlitku, která jsou důsledkem velkých rozdílů teplot jednotlivých částí odlitku při chladnutí, nebo časově posunutých strukturních přeměn v různých částech odlitku. Mohou také vzniknout chladne-li odlitek v příliš tuhé formě, která mu brání ve smršťování. Sklon



k trhlinám je také podporován velkými rozdíly v tloušťkách stěn. Opatření jak předcházet prasklinám je třeba směřovat ke konstrukci odlitku, konstrukci a výrobě slévárenské formy, a též do oblasti metalurgie. [14], [15]

Skupina 330 – porušení souvislosti z důvodu mechanického poškození odlitku obsahuje lomy za tepla a za studena. Lom se liší od praskliny tím, že je sevřený a často stěží viditelný. Rozlišení, zda jde o lom za tepla, nebo za studena, je možné jen po dolomení odlitku z lomové plochy. Lom za tepla má silně zoxidovaný povrch, zatímco lom za studena je čistý a zrnitý. K lomům za tepla dochází zejména hrubým zacházením při předčasném vyjmutí odlitku z formy. K lomům za studena dochází při dopravě, manipulaci a čištění odlitku. Především lomům se tedy dá šetrným zacházením, u lomů za tepla prodloužením doby vyjímání odlitku z formy. [14], [15]

Skupina 340 – porušení souvislosti z důvodu nespojení kovu.

Zavaleniny jsou rýhy, prohlubně, nebo zvrásnění se zaoblenými okraji na povrchu odlitku. Někdy se tyto vady nazývají také studené spoje a vznikají v případě, kdy se při plnění formy setkají proudy již tuhajícího kovu. Příčinou bývá nízká teplota kovu při lití, malá zabíhavost taveniny, nebo nevhodná vtoková soustava. Závaly vznikají nejčastěji u kovových forem a proto je nutné kokily před litím předehřívát na pracovní teplotu. [14], [15]

Nedokonalý svar vzniká při opravě vadných odlitků, nejedná se tedy přímo o slévárenský problém. [14], [15]

2.5.4. Dutiny

Dutiny jsou způsobovány přítomností plynů v kovech, ve formě a objemovými změnami při tuhnutí. Pro pochopení mechanismu jejich vzniku je zapotřebí dokonalá znalost slévárenských pochodů, metalurgie tavení a úpravy tekutého kovu, jakož i technologie formovacích materiálů. Dutiny jsou poměrně snadno zjištělné prohlídkou odlitku nebo nedestruktivními zkouškami. Odlitky s těmito vadami jsou většinou neopravitelné. [14], [15]

Skupina 410 – bubliny obsahuje pět druhů vad, přičemž první tři vady jsou bubliny, které se dělí podle příčiny vzniku na bubliny způsobené kyslíkem, vodíkem nebo dusíkem. [14], [15]

Bubliny jsou uzavřené nebo otevřené dutiny v odlitku. Tvar bublin je velice rozmanitý, vyskytují se bubliny jak kulového až elipsoidního tvaru, tak i bubliny nepravidelného, protáhlého tvaru. Podle původu mohou být endogenní a exogenní. U endogenních bublin



je příčina v tavenině (nedostatečné odplynění). U exogenních bublin se plyny do taveniny dostávají zvnějšku. Na začátku uvedené typy bublin mají společnou základní příčinu spočívající v tom, že během odlévání a chladnutí kovu se následkem poklesu teploty snižuje rozpustnost plynů v kovu a při překročení mezní rozpustnosti se tyto plyny (kyslík, vodík, dusík) vyloučí ve formě bublin. Pokud chceme zabránit vzniku bublin, je nutné věnovat pozornost zejména tavení a odlévání příslušného materiálu, a slévárenské technologii (konstrukci slévárenských forem, jejich složení a skladování). [14], [15]

Zahlcený plyn způsobuje dutiny s hladkými zaoblenými stěnami ve tvaru zploštělých rozměrných bublin. Nejčastěji se vyskytují na povrchu odlitku (většinou jsou otevřené), buď izolovaně, nebo ve shlucích. Příčinou zahlceného vzduchu bývá nevhodná konstrukce formy, zejména špatné odvzdušnění. Pro odstranění je tedy nutná co nejlepší prodyšnost formy a správné provedení a uspořádání systému výfuků, nálitků a průduchů, které odvedou plyny před postupujícím odlévaným kovem do vnější atmosféry, aby nedocházelo k jeho zahlcení. [14], [15]

Sítkovité bubliny jsou malé povrchové dutiny kulovitého tvaru, které se vyskytují pouze v lici kůže odlitku. Povrch odlitku má tak charakter jemné sítky. Velký vliv na vznik této vady má vypařování vody v syrových nebo nedostatečně vysušených formách. Vzniku sítkovitých bublin předcházíme dodržením předepsané vlhkosti formy, optimálním zhuštěním a prodyšností formy. [14], [15]

Skupina 420 – bodliny se dále již nedělí. Bodliny jsou malé podlouhlé dutiny těsně pod povrchem odlitku, které mají směr shodující se se směrem odvodu tepla a tím i se směrem nárůstu krystalů. Vyúsťují na povrch malými, jakoby kapilárními otvory, a zviditelní se tepelným zpracováním a otryskáním odlitku. Bodliny jsou typickou chybou ocelových odlitků odlévaných do syrových forem. [14], [15]

Skupina 430 – odvařeniny.

Odvařeniny od formy (jádra) tvoří většinou otevřené, hladké dutiny na povrchu odlitku, nejčastěji se zoxidovaným povrchem. Velice často se vyskytují v různých koutech odlitku, kde je písek oblitý kovem a navíc bývá toto místo méně upěchované. Mohou se vyskytovat i na kterékoli jiné ploše odlitku a vyznačují se plochým, dolíčkovým tvarem. Příčinou vzniku odvařenin je vznik velkého množství plynů a par při nalití tekutého kovu do dutiny formy. Při řešení vzniku odvařenin musíme především dbát na kontrolu prodyšnosti směsi, případně na postupy odvzdušnění formy v nebezpečných místech. [14], [15]



Odvařeniny od chladítek jsou povrchové nebo uzavřené dutiny. Povrchové odvařeniny od vnějšího chladítka vytváří na povrchu odlitku hladké dolíčky, které většinou nejsou na závadu, pouze zhoršují vzhled odlitku. Příčinou jsou opět vzniklé plyny a páry, které nemají kam uniknout. Důležité je také udržovat chladítka čistá a dobře je skladovat. [14], [15]

Odvařeniny od vměstků mají stejný vzhled jako bubliny nebo ostatní druhy odvařenin, avšak vždy jsou doprovázeny exogenní nebo sekundární struskou nebo zadrobeninami. Spolehlivou prevencí této vady je použití všech opatření, které působí proti naplynění kovu, proti struskovitosti a zadrobeninám. [14], [15]

Skupina 440 – staženiny.

Otevřené staženiny jsou dutiny, zpravidla s hrubě krystalickým, zoxidovaným povrchem, zasahující do určité hloubky odlitku. Objevují se pod nálitkem po jeho odstranění, nebo v místě tepelného uzlu, který nebyl nálitkován. Staženina je výsledkem fyzikálního zmenšení objemu kovu při jeho tuhnutí. Příčinou je tedy nedostatečné objemové doplnění taveniny do tuhajícího odlitku a dá se tomu předejít správným výpočtem velikosti nálitku. [14], [15]

Vnitřní uzavřené staženiny jsou dutiny uvnitř odlitku, nacházející se v místě tepelného centra. Mají nepravidelný tvar, ovlivněný rozdílnou intenzitou odvodu tepla. Staženiny v odlitku vznikají, stejně jako v předchozím případě, zmenšováním objemu kovu při tuhnutí. Zamezení vzniku těchto vad spočívá v dodržení zásad usměrněného tuhnutí odlitku. [14], [15]

Řediny lze charakterizovat jako nahromaděné drobné a mikroskopické staženiny projevující se řídkou strukturou kovu. Vyskytují se v tepelném centru konečné fáze tuhnutí. Příčinou je opět nedostatečné dosazování kovu do těchto míst během tuhnutí odlitku. [14], [15]

Staženiny od jader nebo hran formy jsou vnitřní uzavřené staženiny nebo řediny způsobené smršťováním kovu při tuhnutí, specifikované do oblasti tepelného uzlu, vyvolaného prohřátým jádrem nebo ostrou hranou formy. Vznik se řídí velikostí zalitého jádra, jeho schopností odvádět teplo a stupněm vlastního prohřátí. [14], [15]

Povrchové propadliny se vyskytují na horní ploše tepelně exponovaného místa, zpravidla v tlusté nenálitkované části stěny nebo nad tepelným centrem uzlu několika stěn. Pod propadlinou bývá zpravidla uzavřená staženina. Účinným opatřením proti vzniku této vady je dostatečné nálitkování a chlazení odlitku. [14], [15]



Plynové staženiny jsou dutiny v odlitku, vyúsťující až na jeho povrch, přičemž okraje dutin jsou vlivem průchodu plynu hladké. Vyskytují se v místech vysoce prohřátých tenkých jader, ostrých hran, kde je doba tuhnutí odlitku delší. [14], [15]

2.5.5. Makroskopické vměstky a vady makrostruktury

Vady tohoto typu jsou nejobtížněji identifikovatelné. Největší část z toho tvoří zadrobeniny, které jsou nejčastější vadou vůbec. [14], [15]

Skupina 510 – struskovitost.

Struskovitost exogenní jsou povrchové (otevřené), nebo uzavřené (vnitřní) dutiny ve stěně odlitku, které jsou úplně nebo částečně vyplněny struskou. Jedná se o strusku exogenní, která vznikla při metalurgickém procesu v tavící peci a do odlitku se dostala z lící pánve. Protože struska má menší specifickou hmotnost než tekutý kov, má tendenci vyplavat k povrchu, nebo se přilepovat ke stěně formy. Struska není do odlitku zapečena a po otryskání nebo jiném očištění odlitku je povrch hladký. Příčinou bývá nesprávná vtoková soustava nebo špatně zbavená tavenina od strusky. [14], [15]

Sekundární struskovitost se vyznačuje otevřenými povrchovými dutinami, nejčastěji na horních plochách odlitku, které jsou vyplněny struskou. Tato struska je obvykle silně heterogenní a je doprovázena bublinami. Sekundární struska je produkt reoxidačních pochodů, které probíhají mezi proudem tekutého kovu, atmosférou v dutině formy a formovacím materiálem. [14], [15]

Skupina 520 – nekovové vměstky.

Zadrobeniny jsou povrchové nebo vnitřní dutiny ve stěně odlitku, úplně nebo částečně vyplněné formovací směsí. Zadrobeniny vznikají drobením formovacího materiálu. Příčin může být mnoho, například nekvalitní formovací směs, nedostatečné vyztužení forem a jader, nesprávně vysušená forma nebo jádro, vysoká lící teplota kovu, prudký náraz kovu do formy, špatná konstrukce odlitku, atd. Zadrobeninám se může předcházet dodržováním technologických předpisů na všech úsecích výroby. Podle množství, rozsahu a polohy vady mohou být zadrobeniny příčinou vyřazení odlitku. [14], [15]

Rozplavený písek je vada způsobená velkým otěrem formy nebo jádra, erozí ve vtokové soustavě po vstupu kovu do formy a při jeho proudění v ní. Příčiny vzniku jsou obdobné jako u zadrobenin. Významným předpokladem k zabránění vzniku rozplaveného písku je rovnoměrné plnění formy. [14], [15]



Odpadnutý nátěr tvoří dutiny ve stěně odlitku zcela, nebo částečně vyplněné nátěrovou hmotou. Někdy se odpadnutý nátěr může projevit nárstem na povrchu odlitku. K nanášení ochranné vrstvy by se měly používat jen kvalitní nátěry, aby nedocházelo k jejich odlupování a tím i vadám na odlitku. [14], [15]

Oxidické pleny jsou plošné, tenké filmy oxidů vznikající na volném povrchu taveniny během odlévání a vlivem turbulence odlévaného kovu jsou zalaty v povrchových vrstvách i uvnitř odlitku. Významně zhoršují povrchovou i vnitřní jakost odlitku. Vznikají následkem procesů sekundární oxidace. Pro svou vysokou viskozitu a převládající plošný tvar vytvářejí často shluky na povrchu i pod povrchem odlitku. Chceme-li zabránit vzniku oxidických plen, je třeba zabránit oxidaci proudu odlévaného kovu, odlévat pokud možno bez tlaku a plynule, používat dlouhé a ploché kanálky a zářezy, minimalizovat turbulenci odlévané slitiny. [14], [15]

Uhlíkové pleny jsou tenké, lesklé, zřetelně ohraničené, a nacházejí se ve stěnách odlitku. Zpravidla jsou vidět jen na lomu nebo metalografickém výbrusu, připraveném napříč vadou. Vady mohou být způsobeny uhlovodíky přítomnými v přísadách formovacích směsí a jader, je tedy možné je odstranit snížením přísad schopných vytvářet uhlíkový povlak. Nebo mohou vznikat na primárně vzniklých oxidických plenách, pak je zapotřebí zabránit nejprve vzniku těchto plen. [14], [15]

Černé skvrny jsou skvrny nepravidelného tvaru o velikosti několika mm až několika cm. Vyskytují se zejména u odlitků z tvárné litiny a v místě vady jsou velmi špatné mechanické vlastnosti. Černé skvrny jsou v mikroskopickém měřítku tvořeny shluky oxidických a sulfidických vměstků, které jsou vyloučeny spolu s nedokonale zrnitými, lupínkovými a jinými částečně degenerovanými tvary grafitu. K hlavním opatřením proti vzniku těchto vad je důkladné odsíření a odkysličení tekutého kovu. Z technologických opatření pak co možná nejvyšší teplota lití, snížení turbulence během transportu a odlévání kovu zpracovaného hořčíkem atd. [14], [15]

Skupina 530 – makrosegregace a vycezeniny.

Gravitační odmíšení vzniká u odlitků odlévaných ze dvou slitin odlišného složení, které jsou navzájem zcela nebo částečně nemísitelné v tuhém stavu. Projevuje se jako zřetelné oddělení dvou slitin. K úplnému, nebo částečnému, potlačení gravitačního odmíšení lze přispět správnou volbou chemického složení a konstrukcí odlitku. [14], [15]

Makroodmíšení, neboli segregace je výsledkem fyzikálního děje v důsledku krystalizace. V průřezu odlitku dojde tak k chemické nestejnorodosti, v tomto případě



v oblasti pásma. Proto o makrosegregaci mluvíme taky jako o pásmovém odmíšení. Výrazně vzniká pouze u masivních odlitků a ingotů. [14], [15]

Stvolové vycezeniny jsou shluky ztuhlé matečné taveniny obohacené mezi dendrity příměsemi-odmíšeninami, tvořící v odlitku charakteristické pásy ve tvaru písmene A. Opatření k úplnému zabránění vzniku těchto vad neexistuje. [14], [15]

Mezerové vycezeniny jsou takové vycezeniny, kde nečistoty a shluky odmíšenin příměsí vyplnily při tuhnutí mezery a větší dutiny v odlitku, vzniklé jakoukoli příčinou. Charakteristické pro tyto vady jsou tzv. „V“ vycezeniny, jež se nacházejí pravidelně v osových částech ingotů a masivních odlitků. Původ spočívá především v poklesu tuhnoucí taveniny gravitací a tím se vytvoří trhliny. [14], [15]

Skupina 540 – broky. Broky jsou malé zoxidované kovové kuličky (vměstky), jejich složení odpovídá složení slitiny. Příčinou je rozstříkávání tekutého kovu při odlévání do slévárenské formy. Kapky kovu se usazují v různých místech formy a ochlazují se zde, zvláště pokud se do těchto míst nedostane tekutý kov ihned. Ochlazené kapky se pak již s proudem kovu nespojí. Broky se v mnoha případech nacházejí v plynových bublinách, které mohou být uzavřeny uvnitř odlitku, nebo jako otevřené na povrchu. Předcházení vzniku broků docílíme správnou konstrukcí a provedením vtokové soustavy (zabránění rozstříku kovu), klidným plněním dutiny formy, snížením ochlazovacího účinku formy, a pokud je to možné snížením licí teploty. [14], [15]

Skupina 550 – kovové vměstky zahrnuje kovové cizorodé částice různé velikosti, zřetelně odlišné od základního kovu. Zpravidla jsou to neroztavené přísady, feroslitiny, chladítka, podpěrky atd. Základním opatřením proti vzniku této vady je péče o čistotu vsázky, kovových chladítek a jádrových podpěrek. [14], [15]

Skupina 560 – nevyhovující lom obsahuje odchylky vzhledu lomu vybraného či zkušebního odlitku od normou stanoveného normálu. Příčinou bývá přehřátí taveniny, vysoká teplota lití, nevhodná teplota formy při lití do kovových forem, nesprávné tepelné zpracování odlitku. [14], [15]

2.5.6. Vady mikrostruktury

Mikroskopické dutiny, oduhličení povrchu, vměstky a jiné vady jsou průvodním znakem litého stavu a proto se jedná spíše o odchylky od norem a technických podmínek, a nikoli o vady v pravém slova smyslu. Nejvíce se tyto vady vyskytují ve slévárnách šedé litiny. Většina skupin v této třídě, až na tu první, se dále nedělí. [14], [15]



Skupina 610 – mikroskopické dutiny obsahuje vnitrokrystalové a mezikrystalové, pouhým okem neviditelné dutiny, a porušení souvislosti. Pro zabránění vzniku těchto vad je nutné zajistit usměrněné tuhnutí, optimalizovat přívod kovu do formy, vhodně umístit náličky a chladítka, upravit složení formovací směsi, její vlhkost atd. [14], [15]

Mikrostaženiny mají převážně mezikrystalový charakter a vznikají při tuhnutí v místech styku rostoucích dendritů, nebo zrn tuhnoucí slitiny. Nejčastěji se tvoří v místech odlitku s omezeným dosazováním kovu. [14], [15]

Mikroublíny jsou tečkovité, drobné dutiny, vznikající při tuhnutí v patách již dříve ztuhlých dendritů. Vznikají následkem přesycení taveniny rozpuštěnými plyny.

Mikrotrhlíny představují porušení souvislosti, tvořící se převážně po hranicích dendritů, popřípadě zrn. Mikrotrhlíny se často vyskytují v kombinaci s mikrostaženinami. [14], [15]

Skupina 620 – vměstky. Patří sem mikročistota, která neodpovídá požadavkům norem. Mikročistota zahrnuje vyjádření množství, počtu, velikosti, tvaru a rozložení vměstků různého chemického složení. Hodnotí se převážně u ocelí. [14], [15]

Skupina 630 – nesprávná velikost zrna. Zpravidla se jedná o příliš hrubé zrno, popřípadě o nerovnoměrnou velikost zrna s tendencí k hrubozrnosti. [14], [15]

Skupina 640 – nesprávný obsah strukturních složek. Jedná se o odchylku v druhu, množství, velikosti, tvaru nebo rozložení strukturních složek od ustanovení norem. Příčiny vzniku je nutno odvodit na základě analýz konkrétních problémů. Opatření proti vzniku nesprávného obsahu strukturních složek pak můžeme směřovat do oblasti metalurgie, krystalizace a chladnutí odlitku, případně tepelného zpracování. [14], [15]

Skupina 650 – zatvrdlina, zákalka. Zatvrdliny jsou tvrdá neobrobitelná místa na povrchu odlitku vzniklá přítomností tvrdých strukturních složek (volného cementitu, ledeburitu nebo jiných karbidů). Všeobecně platí, že zákalka se vytváří v místech, která rychle chladnou. U litin je tato vada způsobena nesprávným chemickým složením vzhledem k tloušťce stěn odlitku. [14], [15]

Skupina 660 – obrácená zákalka se vyskytuje pouze u litiny s lupínkovým grafitem. Projevuje se výskytem ledeburitické struktury ve vnitřních částech odlitku. Příčinou je buď nesprávné chemické složení příslušné části odlitku, nebo rychlé ochlazení odlitku, kdy ve středních částech byla ještě tavenina. [14], [15]

Skupina 670 – oduhličení povrchu zahrnuje nežádoucí změnu struktury povrchu, která může mít za následek i nevyhovující mechanické, případně fyzikální a chemické vlastnosti odlitku. Pokud odlitek tuhne a chladne v oxidačním prostředí, bývá povrch



odlitku oduhličen do malé hloubky, což vlastnosti odlitku neovlivní. K nebezpečnému oduhličení povrchu odlitku může dojít v průběhu tepelného zpracování. [14], [15]

Skupina 680 – jiné vady mikrostruktury. Mohou zde být anomální tvary nebo neobvyklá vyloučení strukturních složek (grafitová hnízda, primární grafit, Chunky grafit atd.). Příčiny vzniku mohou být velice rozmanité a spočívají ve společném účinku činitelů metalurgických, slévárenské technologie a tepelného zpracování. Pro odstranění této vady nelze podat všeobecně platná doporučení. [14], [15]

2.5.7. Vady chemického složení a vlastností odlitku

Tato třída obsahuje jen čtyři skupiny, které jsou zároveň jednotlivými vadami, jelikož se už dále nedělí. Jsou to výhradně odchylky od norem a technických přejímacích podmínek. Tyto vady jsou až na posledním místě v podílu na celkové zmetkovitosti a nezpůsobují slévárnám velké ztráty. [14], [15]

Skupina 710 – nesprávné chemické složení. Příčinou nesprávného chemického složení bývá nesprávný výpočet, a průběh tavby, nebo nesprávné složení vsázky. A proto zabráníme vzniku těchto vad řádným tříděním vsázkových surovin a šrotu podle chemického složení, správným výpočtem složení vsázky a řádným vedením tavicího procesu. [14], [15]

Skupina 720 – odchylky hodnot mechanických vlastností. Nevyhovující hodnoty mechanických vlastností mohou mít řadu příčin. Jednou z hlavních je neodpovídající chemické složení kovu, dále pak nevhodné provedení tavby nebo nesprávné tepelné zpracování. [14], [15]

Skupina 730 – odchylky hodnot fyzikálních vlastností. Vyskytují se především u odlitků se specifickými vlastnostmi pro chemický, elektrotechnický a strojírenský průmysl. Příčiny odchylek fyzikálních vlastností jsou různé a je nutné je vztahovat na každou specifickou vlastnost odlitku zvlášť. Obecně je však lze shrnout jako nedodržení chemického složení, rychlosti tuhnutí a režimu tepelného zpracování. [14], [15]

Skupina 740 – nevyhovující homogenita odlitku. Vadou nehomogenity rozumíme, nikoli rozdíl v chemickém složení, nýbrž shluky vysoké koncentrace vycezenin, sulfidů, či ostatních vměstků, hrubé primární struktury, nízkou hmotnost materiálu, tedy porositu, řediny, staženiny nebo ostatní vnitřní poruchy. Příčiny vzniku jsou různé, podle toho jaká vada nehomogenitu způsobuje. Stejně tak jsou různá opatření proti vzniku těchto vad. [14], [15]



3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

Účelem experimentální části bylo navržení výpočetních variant reálného procesu odlévání písních kroužků ve slévárně litin Buzuluk, a.s., a provedení simulačních výpočtů u těchto navržených variant. Výroba písních kroužků je složitá, vzhledem k velmi malým rozměrům těchto odlitků a také vzhledem ke způsobu odlévání (technologie etážového lití do pískové formy). Forma je písková a je složena ze 17 rámečků, o výšce 35 mm, naskládaných na sebe. V každém rámečku je zaformováno 6 odlitků písních kroužků o průměru 85 mm. Ve slévárně pak odlévají z jedné licí pánve několik forem, tavenina v licí pánvi tedy postupně chladne, a díky tomu jsou u odlévaných forem rozdílné teploty lití. Při navrhování výpočetních variant byl tedy brán ohled na tento fakt a navržené výpočetní varianty se proto liší teplotou lití.

Dále bylo účelem práce zhodnocení dosažených výsledků simulačních výpočtů, týkajících se predikce vad u konkrétních odlitků a degradace použité jednotné bentonitové formovací směsi. Poté pak bylo účelem porovnat vady zjištěné na základě simulačních výpočtů s vadami na reálných odlitcích.



Obr. 3. 1 Odlitý písní kroužek ze slévárny litin Buzuluk, a.s.

3.1. SIMULAČNÍ VÝPOČET LICÍHO PROCESU

Úkolem simulačních softwarů je matematické modelování a optimalizace zadaných procesů a dějů s využitím vysoce výkonných počítačů. Softwarová simulace odlití tedy umožňuje virtuální prověření a vyhodnocení celého procesu lití, ještě před zavedením do výroby, nebo optimalizaci a zlepšení již zavedeného procesu.

V této práci bylo využito softwaru Magma⁵, který je založen na metodě konečných diferencí. Metoda konečných diferencí - mezinárodně označovaná FDM (Finite Differences Method), někdy též označována jako metoda sítí, je založena na aproximaci základní diferenciální rovnice s příslušnými okrajovými podmínkami odpovídající diferenční rovnici, jež má tvar algebraických rovnic. Dokonalost aproximace spočívá v nahrazování derivace přesnějšími výrazy. Náhrada se provádí v diskrétních místech tvořených uzly sítě, které zahrnují zkoumanou oblast. Modelované těleso se pak skládá ze základních elementů ve tvaru krychle, případně kvádru, a čím více je použito elementů, tím detailnější je popis. [16]

Celý simulační výpočet procesu lití zahrnuje plnění formy, tuhnutí a chladnutí odlitku, vznik struktury a utváření vlastností odlitku. Správné odlití a kvalitu výsledného odlitku ovlivňuje mnoho parametrů jako je geometrie formy, rozmístění náliťků, materiál formy, odlévaný materiál a jeho licí teplota, temperace formy atd. Všechny tyto parametry a mnoho dalších lze v softwaru Magma⁵ modifikovat, a tak docílit optimálních výsledků a požadovaného zlepšení ve výrobě.

3.1.1. Příprava podkladů

Pro simulační výpočet licího procesu je velmi důležitá příprava podkladů, které se týkají geometrie odlitku, materiálů (formy, odlévaného materiálu) a samotných podmínek lití. Co se týká geometrie odlitku slévárna litin Buzuluk, a.s., poskytla 3D model sestavy odlitků s vtokovou soustavou, viz Obr. 3. 2, tudíž nebyla potřeba výkresová dokumentace. Pro následné použití bylo pouze nutné zkontrolovat, zda je model rozdělen na jednotlivé odlitky a vtokovou soustavu. Poté bylo nutné převést 3D model do správného formátu, kterým pro nás byl *.sat.





Obr. 3. 2 Model sestavy odlitků s vtokovou soustavou

Forma pro odlévání pístních kroužků je písková a je tvořena ze 17 obdélníkových rámečků naskládaných na sebe do sloupce. Díky své jednoduchosti, nebyla potřeba žádná speciální příprava a forma se vytvářela až následně přímo v softwaru Magma⁵. Reálně používaná forma neobsahuje ani licí jamku, ta je zde nahrazována speciálním přípravkem pokládaným na vrchní část formy, a proto bylo nutné tento přípravek vymodelovat. Na požádání byl poskytnut výkres, viz Obr. 3. 3, a podle něj byl přípravek vymodelován v programu Autodesk Inventor Fusion 2013. Model musel být opět uložen v požadovaném formátu *.sat, aby jej bylo později možné naimportovat do softwaru Magma⁵.

Tab. 3. 1 Základní potřebná data pro simulační výpočty plnění a tuhnutí litin

Firma		BUZULUK a.s.	
Název odlitku		pístní kroužek	
Materiál odlitku		šedá litina	
Materiál formy	<i>pro JBS vlhkost směsi</i>	Jednotná bentonitová směs 2,9 - 3,1%	
Materiál jader			
Materiál chladičů			
Filtry	<i>výrobce, typ, ppi</i>		
	<i>rozměry</i>		[mm]
Rozměry formovacích ráků		390x340x35	[mm]
Rozměry formy	<i>bezrámové formování</i>		[mm]
Obklady nálitků	<i>výrobce, typ, exo/izo</i>		
	<i>tloušťka vrstvy</i>		[mm]
Zásyp nálitků	<i>výrobce, typ, exo/izo</i>		
Lící teplota	<i>předpis</i>	1400 - 1470	[°C]
	<i>reálný rozptyl od - do</i>	1420 - 1470	[°C]
Teplota formy		cca 30	[°C]
Teplota jader			[°C]
Očkování	<i>způsob</i>	do lící pánve na dno	
		na bázi FeSi (SUPERSEED)	
	<i>množství očkovadla</i>	0,5 - 1,0% dle velikosti odlitku	
	<i>prodleva očkování - lití</i>	max. 2min	
Modifikace	<i>způsob</i>		
	<i>typ modifikátoru</i>		
	<i>množství modifikátoru</i>		
	<i>prodleva modifikace - lití</i>		
Doba lití	<i>předpis</i>	není předepsáno	[s]
	<i>reálný rozptyl od - do</i>	15 - 20s sloupec	[s]
Výška kovu v jamce		1,5 - 2	[cm]
Výška proudu kovu nad vtokem		max.15	[cm]
Vytluokání z formy	<i>čas nebo teplota</i>	za cca 10min	

Chemické složení (průměr z reality)	C	3,7	[%]
	Ce		[%]
	Cr	0,1	[%]
	Cu	0,1	[%]
	Mg		[%]
	Mn	0,6	[%]
	Mo	0,01	[%]
	N	25	[ppm]
	Ni	0,03	[%]
	P	0,5	[%]
	S	0,05	[%]
	Sb	0,003	[%]
	Si	2,6	[%]
Sn	0,005	[%]	



3.1.2. Příprava a průběh simulačního výpočtu procesu lití

Pro simulační výpočty byly navrženy dvě varianty, první varianta s licí teplotou 1470°C (dále jen varianta 1), druhá varianta s licí teplotou 1420°C (dále jen varianta 2), ostatní parametry byly u obou variant stejné. Důvodem volby těchto dvou variant byl fakt, že ve slévárně Buzuluk, a.s., odlévají z jedné licí pánve několik forem a tudíž se u jednotlivých odlévaných forem liší teplota lití. V úvahu se tedy vzala nejvyšší a nejnižší reálná licí teplota.

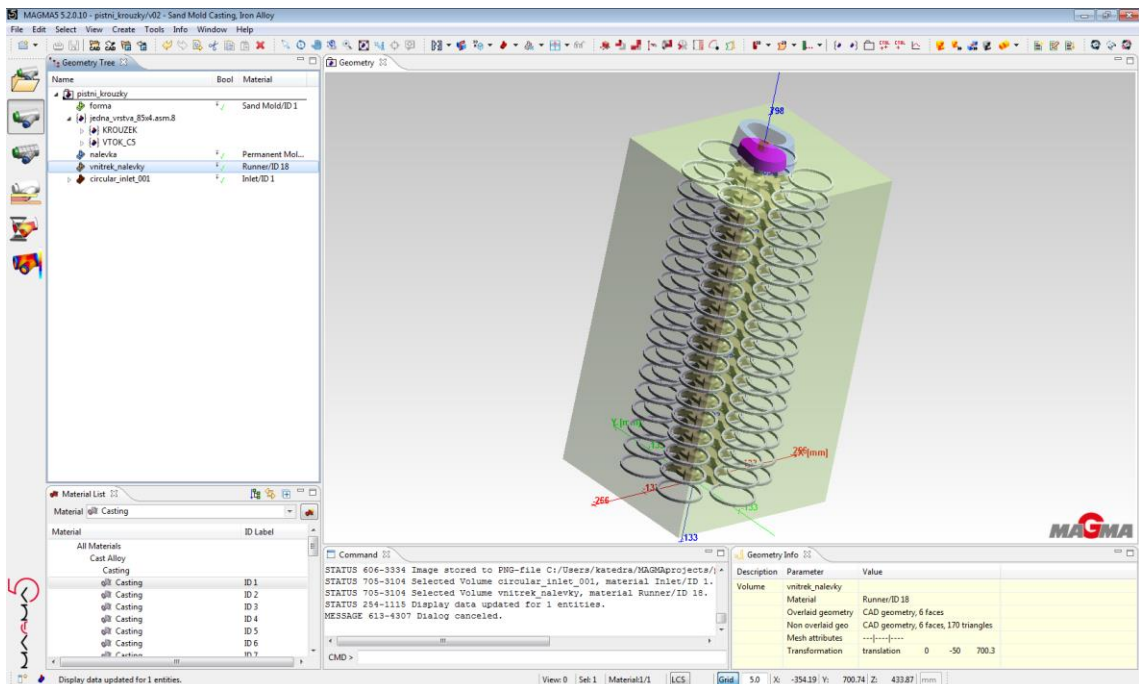
V rámci přípravy první fáze simulačního výpočtu bylo nutné založit si v programu Magma⁵ nový projekt, který byl nazván pístití kroužky, a v němž byly následně simulační výpočty prováděny. Aby byl daný projekt vytvořen, bylo třeba specifikovat typ procesu a typ slitiny, zde se jednalo o proces lití do pískové formy a typem slitiny byla litina. Dále probíhalo definování simulace v jednotlivých částech tzv. perspektivách resp. modulech.

Perspektiva geometrie

Do nově založeného projektu byly importovány CAD data (vtoková soustava, odlitky, nálevka) připravená v externích 3D modelářích v již zmiňovaném formátu *.sat. Po importu bylo nezbytně nutné zkontrolovat dodržení hlavní zásady, a to té, že osa Z reprezentuje směr působení gravitace. Směr gravitace je opačný než kladný směr osy Z. Pokud toto vytvořený model nespĺňuje, je možné přímo v této perspektivě model dodatečně natočit do požadované polohy, což bylo nutno provést i v tomto případě. Následovalo vytvoření formy přímo v modeláři Magmy⁵, kde je více možností jak formu vytvořit. Pro tento případ byla zvolena funkce nazvaná kostka – „Cube“.

Jednotlivým naimportovaným a vytvořeným geometrickým prvkům pak bylo nutné přiřadit jejich materiálovou skupinu. Poslední velice důležitou věcí v této perspektivě bylo nadefinování tzv. inletu, který virtuálně charakterizuje proud kovu, který vstupuje do formy nebo kokily z pánve či výlevky. Nevhodné stanovení inletu dokáže naprosto zničit výsledky celé simulace a snížit tak její kvalitu. Při vytváření inletu byly také nadefinovány trasovací částice, které umožňují sledování a vyhodnocování charakteru plnění. V tomto případě bylo použito 36 trasovacích bodů v rozložení nazývaném rectangular. Tím bylo vytvořeno a zadáno vše potřebné v části nazývané Geometry Perspective, jejíž prostředí je možné vidět na Obr. 3. 4.

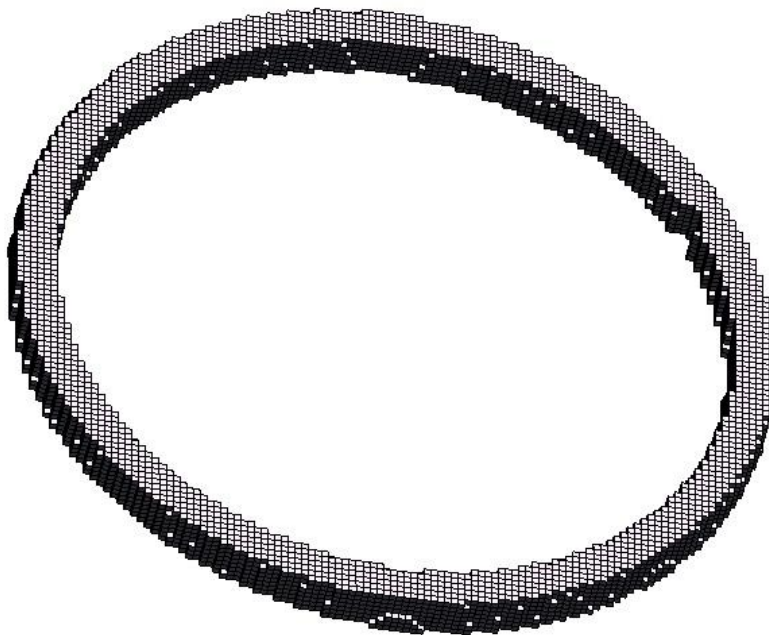




Obr. 3. 4 Perspektiva geometrie

Perspektiva výpočtová síť

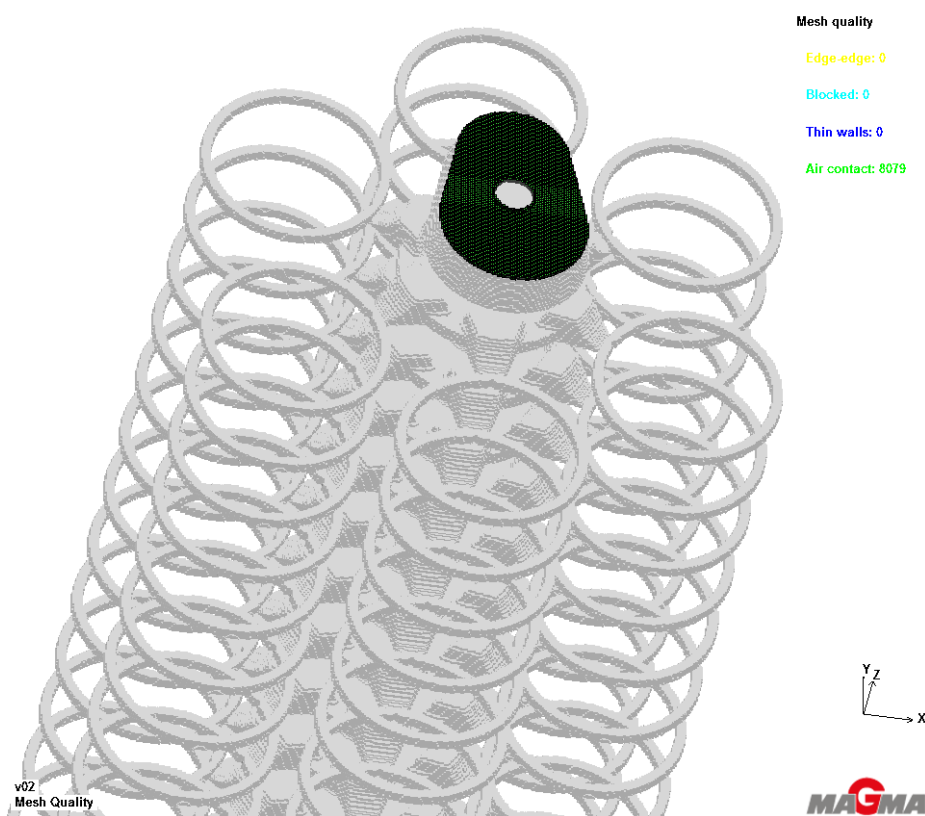
Dalším krokem bylo vytvoření výpočtové sítě, viz ukázka jednoho nasíťovaného pístitního kroužku na Obr. 3. 5, dle které proběhl simulační výpočet licího procesu.



Obr. 3. 5 Model pístitního kroužku s vytvořenou sítí



Hustota sítě ovlivňuje detailnost výsledků a také dobu výpočtu. Proto je dobré nadefinovat, dle potřeby, jednotlivé prvky geometrie různými hustotami výpočtové sítě. Prvkům geometrie s nižší prioritou síť hrubší, a naopak problematickým prvkům geometrie a částem, které nás více zajímají nastavit síťování jemnější. Z tohoto důvodu zde byla použita metoda tvorby sítě pomocí skupin parametrů. Byly vytvořeny dvě skupiny, první skupina s hrubší sítí nazvaná standard, kam byla zařazena forma a vtoková soustava. Druhá skupina s jemnější sítí nazvaná odlitky, do které byly zařazeny odlitky. Samotné zasíťování pro jednotlivé části pak bylo provedeno metodou ekvidistantní buňky, která je založena na pokročilých síťovacích kritériích a umožňuje vytvořit síť s elementy stejné velikosti. Bylo pouze nutné zadat velikosti elementů pro jednotlivé směry souřadného systému. Pro skupinu standard bylo nastaveno $X = 1$, $Y = 1$, $Z = 1,5$, pro skupinu odlitky $X = 0,8$, $Y = 0,8$, $Z = 0,7$. Po vytvoření sítě bylo třeba ověřit její kvalitu, pomocí funkce nazvané kvalita sítě – „Mesh Quality“, viz Obr. 3. 6. Výsledek této funkce specifikuje, kde a kolik elementů v síti není nasíťováno ideálně. Zde se žádné špatně nasíťované elementy nevyskytují.



Obr. 3. 6 Kvalita výpočtové sítě

Posledním krokem v části týkající se výpočtové sítě, bylo zapnutí funkce Solver 5, díky níž je ve výpočtu plnění dutiny formy uvažováno povrchové napětí proudící taveniny.

Perspektiva nastavení simulace

V této perspektivě bylo nutné zadání všech nezbytných procesních parametrů, jako jsou již konkrétní materiály pro formu, pro odlitek, koeficienty přestupu tepla, proces lití atd.

Materiály je zde možné vybírat přímo z databáze, a případně si je upravit dle potřeby, nebo má uživatel možnost vytvořit si svůj vlastní materiál. Pro odlitky zde byla z databáze zvolena šedá litina GJL – 150, avšak bylo upraveno její chemické složení tak, aby odpovídalo reálným hodnotám uvedeným v

Tab. 3. 1. Spolu s materiálem zde byla definována počáteční lící teplota, která byla pro variantu 1 nastavena na 1470°C, pro variantu 2 na 1420°C. Pro formu byla z databáze vybrána jednotná bentonitová formovací směs Green sand, u které byly opět upraveny její vlastnosti (vlhkost, prodyšnost atd.), podle reálných hodnot, které byly stanoveny průměrem z několika měření, viz Příloha č. 1. Teplota formy pak byla nastavena na 30°C. Posledním voleným materiálem byl materiál nálevky, který byl vybrán přímo z databáze, a byla jím šedá litina GJL - 200.

Po nadefinování materiálů, následovalo stanovení koeficientů přestupu tepla, které byly již automaticky Magmou⁵ předdefinovány a nebylo nutné je měnit.

Dalším krokem bylo nastavení samotného procesu lití. Jako první se charakterizovalo chování litiny a to jak je litina očkovaná, zde byla zvolena možnost good. Poté bylo nutno nadefinovat plnění formy a to pomocí doby lití, která byla nastavena na 20s, je však možné plnění zadat i jinými způsoby. Tuhnutí pak bylo zadáno tak, že skončí, až proběhnou všechny přeměny. Též bylo nutné nastavit, že odlitek byl vytloukán z formy po 10 minutách po odlití, k čemuž nám posloužila funkce nazvaná Shake out.

Tím byl nastaven celý proces lití a zbývalo pouze nadefinování požadovaných výsledků. Některé výsledky software poskytuje pokaždé, jiné si musí uživatel vybrat sám zaškrtnutím daného okénka. Zde byly zvoleny všechny dostupné výsledky.

Perspektiva simulace

Posledním krokem bylo samotné spuštění simulačního výpočtu. Zde se nadefinoval počet výpočetních jader procesoru počítače, které byli vyčleněny k samotnému výpočtu. Využití počtu výpočetních jader souvisí s variantou licence tohoto softwaru. Katedra strojírenské technologie při TU v Liberci má v tuto chvíli k dispozici licenci na 4 výpočtová jádra. Pak už se pouze pomocí tlačítka Start spustil výpočet varianty 1, který trval cca 14 dní. To stejné následovalo i pro variantu 2. Nutno podotknout, že délku výpočtu ovlivnila

zejména velká jemnost sítě. Ta však byla nutná z důvodů správného nasítování odlitků a zářezů, které jsou velmi tenké.

3.2. VYHODNOCENÍ SIMULACE LICÍHO PROCESU

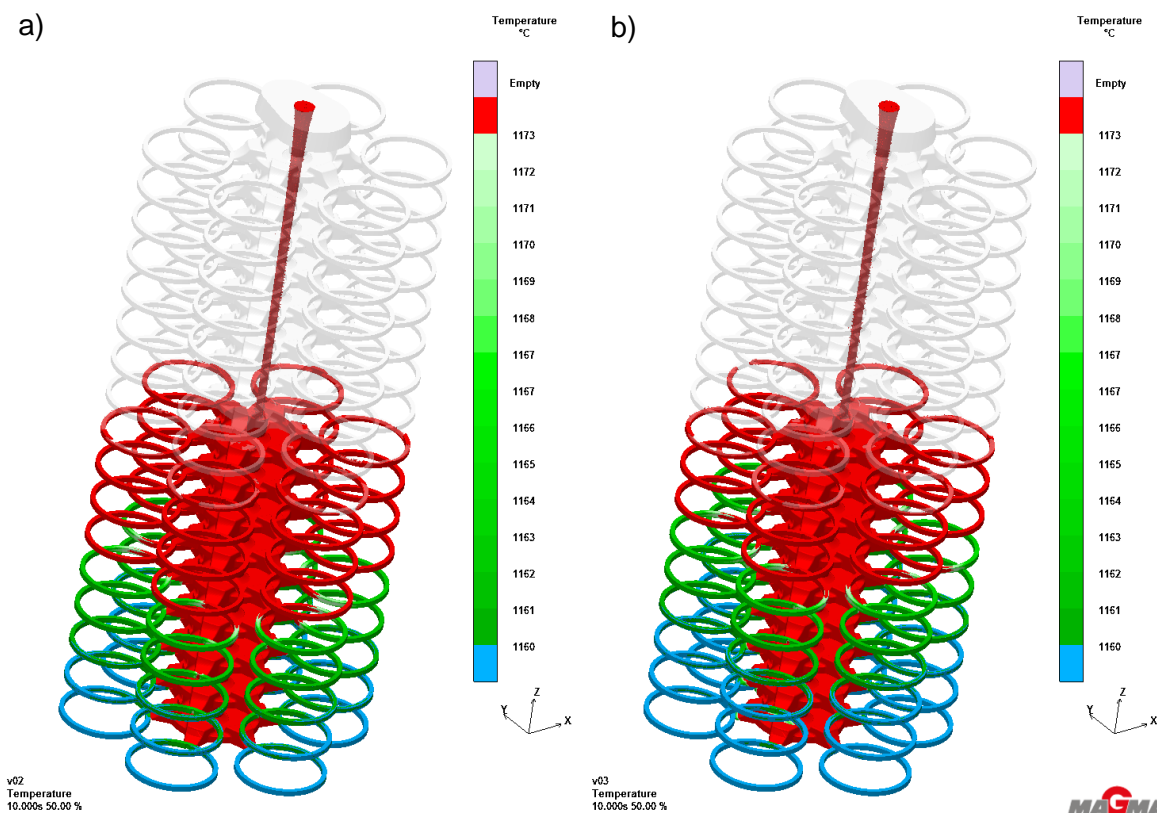
Po dokončení simulačního výpočtu byla otevřena perspektiva pro vyhodnocování výsledků nazývaná "Result Perspective". Celkový seznam všech výsledků simulačního výpočtu je rozdělen do tří hlavních skupin, kterými jsou výsledky plnění, výsledky tuhnutí a chladnutí a procesní křivky. Pro správnou interpretaci výsledků simulačního výpočtu je pak důležité sladit dohromady nastavení barevné stupnice a funkce rentgenu (Xray), který nám umožňuje pohled i do nitra odlitku.

3.2.1. Výsledky simulačního výpočtu plnění formy

Počet zobrazených výsledků záleží na tom, jak byl daný projekt nadefinován, jaké výsledky a kritéria byla předem určena k počítání a zobrazení. Jak již bylo zmíněno, zde byly zvoleny všechny dostupné výsledky a kritéria. Mezi výsledky plnění patří teplotní pole, rychlostní pole, tlaky, uzavřený vzduch, přetlak vzduchu a trasovací částice. Kritéria pak zahrnují kontakt se vzduchem, dráhu, kterou tavenina urazila během plnění, stáří kovu, styk kovu se stěnou formy, čas plnění, eroze pískové formy atd. [18]

Všechny výsledky a kritéria byly prostudovány a následuje jejich výčet. Vyhodnocení je pak provedeno u těch kritérií, která byla pro tuto práci přínosná. Pro připomenutí varianta 1 je s vyšší teplotou lití a to 1470°C, varianta 2 je pak s nižší teplotou lití a to 1420°C.

Teplotní pole – v softwaru označené názvem "Temperature" popisuje teplotní pole uvnitř vybrané materiálové skupiny v každém časovém intervalu během plnění. [18] Toto kritérium je vhodné například ke zjištění, zda teplota během plnění neklesá pod teplotu likvidu, což je nežádoucí. Teplotní pole jsou zobrazovány na barevné stupnici v °C. Na Obr. 3. 7 můžeme vidět teplotní pole v čase 10 s, tedy v polovině celkového času plnění. Zde je dobře vidět vliv etážového lití, kdy kroužky označené červenou barvou mají ještě dostatečně vysokou teplotu a kov je zde tekutý. U zeleně označených kroužků pak teplota padá pod teplotou likvidu (1173°C) a kroužky začínají natuhávat. Spodní kroužky označené modrou barvou jsou pak dokonce pod teplotou solidu (1160°C), což znamená, že jsou již ztuhlé.



Obr. 3. 7 Teplotní pole v čase 10 s

a) varianta 1; b) varianta 2

Rychlostní pole – v softwaru označené názvem **“Velocity”** popisuje rychlosti, kterými se pohybuje proudící tavenina v jednotlivých časových intervalech během plnění. [18] Na základě toho kritéria je možné například určit kde je rychlost taveniny příliš vysoká, a tím může docházet k vymílání formy, nebo kde vlivem velké rychlosti dochází k rozstříku taveniny. Rychlostní pole jsou zobrazovány na barevné stupnici v m/s.

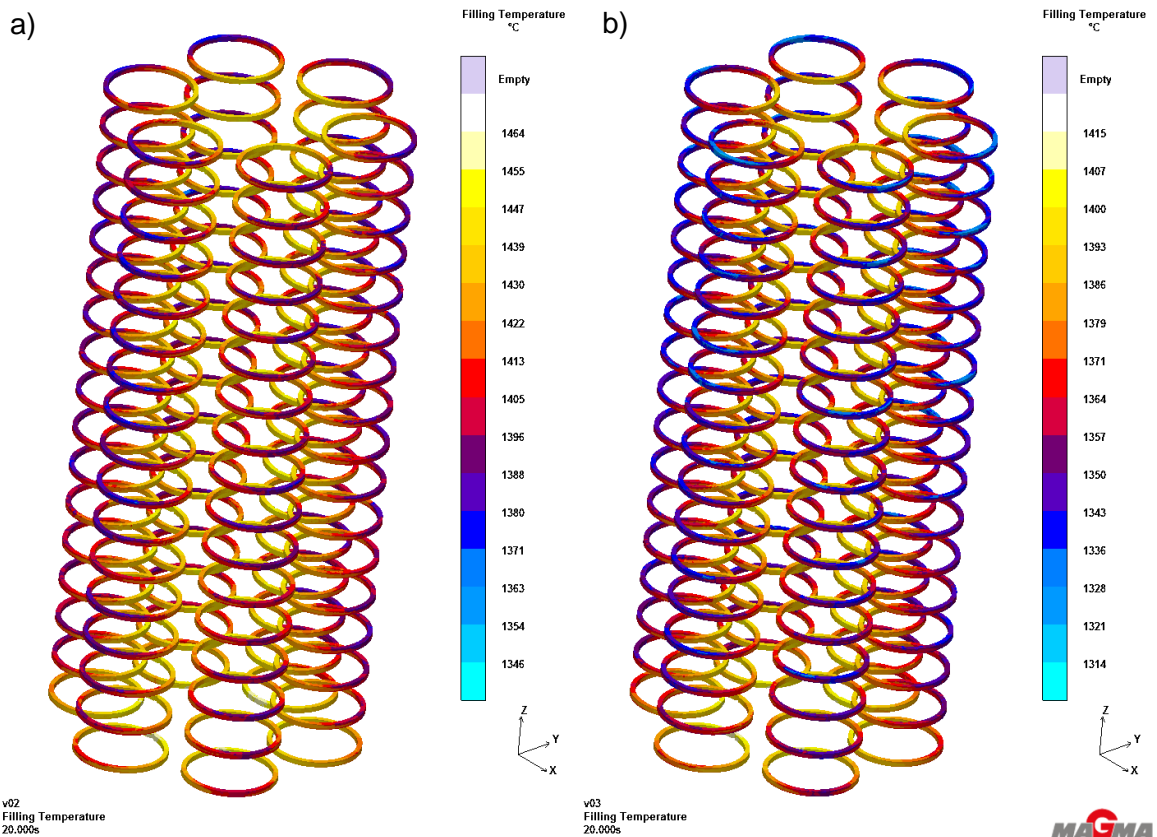
Tlak – v softwaru označený názvem **“Pressure”** zobrazuje rozložení tlakových polí během plnění v různých časových intervalech. [18] Tlak je zobrazován na barevné stupnici v mbar.

Trasovací částice – v softwaru označené názvem **“Tracer”** jsou zobrazovány jako animace. Je jimi možno monitorovat pohyb simulovaných částic uvnitř taveniny. Trasovací částice se pohybují uvnitř taveniny v závislosti na jejich nastavených hmotnostních parametrech. Díky tomu je možno zachytit vlastnosti a chování taveniny nejen na povrchu, ale také v již zaplněných oblastech formy. [18] Je tedy možné zjistit, kde může docházet k turbulenci a jiným problémům.

V adresáři **obecná kritéria** - v softwaru označená názvem **“General Criteria”** jsou uložena následující čtyři kritéria:



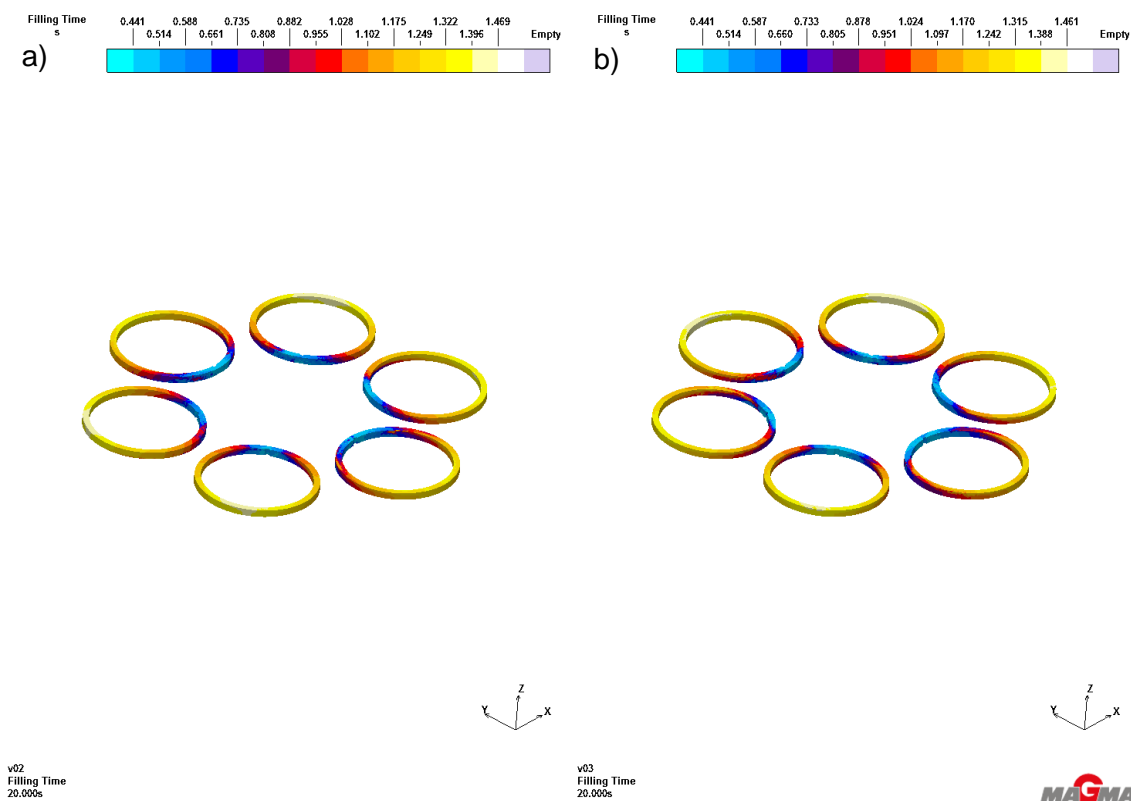
Teplota při plnění – v softwaru označená názvem “Filling Temperature“ zobrazuje teplotu, kterou měla tavenina kovu, když poprvé smočila formu. Teplota při plnění je zobrazována na barevné stupnici v °C. Tato teplota by neměla klesnout pod teplotu likvidu. Teplota likvidu je v tomto případě 1173 °C.



Obr. 3. 8 Teplota při plnění
a) varianta 1; b) varianta 2

Z Obr. 3. 8 je patrné, že u varianty 1 má teplota při plnění minimální hodnotu 1346°C, u varianty 2 je to pak 1314°C. Obě tyto minimální teploty jsou tedy poměrně vysoko nad teplotou likvidu. V příloze č.2 je pak možné porovnat tyto teploty v prvním a posledním patře formy.

Čas plnění – v softwaru označený názvem “Filling Time“ zobrazuje čas plnění jednotlivých oblastí formy a je na barevné stupnici zobrazován v s. Z výsledků tohoto kritéria vyplývá, že jedno patro odlévaných pístních kroužků se u obou variant plní v průměru 0,94 s. Nejdéle potom trvá plnění spodního patra, u varianty 1 je to 1,028 s, u varianty 2 je to 1,02s, viz Obr. 3. 9.



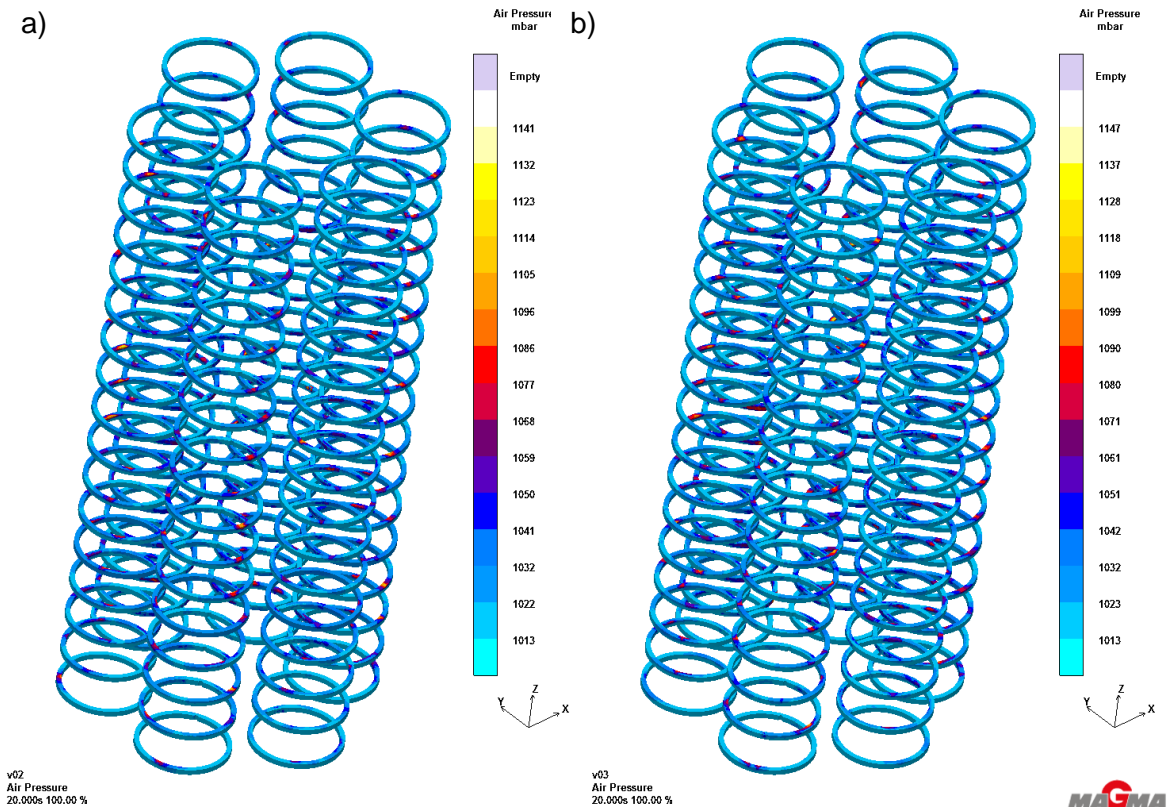
Obr. 3. 9 Čas plnění spodního patra

a) varianta 1; b) varianta 2

Rychlost při plnění – v softwaru označená názvem “Filling Velocity” zobrazuje rychlost proudu taveniny, když přišel do formy. Rychlost při plnění je zobrazována na barevné stupnici v m/s.

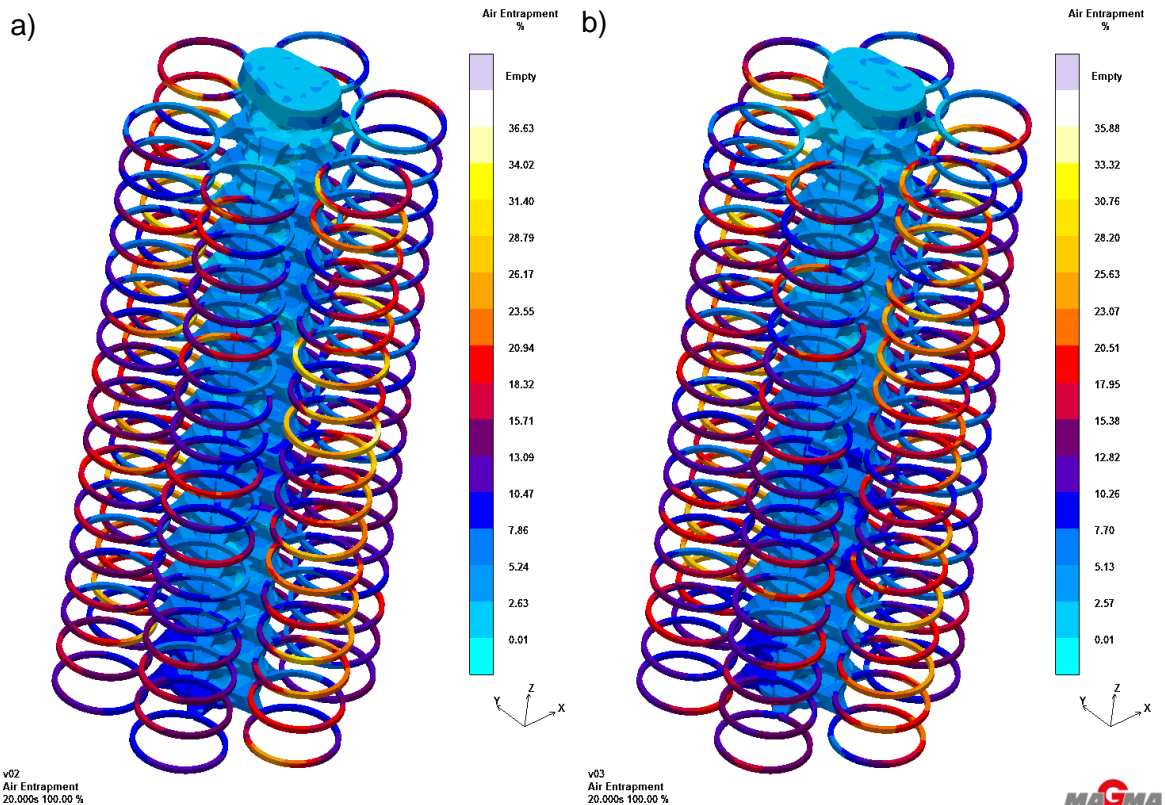
Rozložení pískových vměstků – v softwaru označené názvem “Sand Inclusion Area Fraction” je zobrazeno pouze na povrchu odlitku a ukazuje oblasti, kde je možné očekávat usazení vyplavených pískových nečistot. [18] Rozložení pískových vměstků je zobrazováno na barevné stupnici v %. Zde žádné takové oblasti nebyly predikovány.

Přetlak vzduchu – v softwaru označený názvem “Air Pressure“ měří a zobrazuje maximální tlak vzduchu, který se v jednotlivých časových intervalech nacházel ve výpočetních elementech. [18] Jelikož je toto kritérium součtové, je nutné dát si pozor na to, že kritérium ukazuje tlak, jakmile vznikne, ale ukazuje ho i na konci, kdy už tam nemusí být. Přetlak vzduchu je zobrazován na barevné stupnici v mbar. Z Obr. 3. 10 je patrné, že zde nejsou tlaky nijak extrémní. Pouze v místech nárazu dvou proudů taveniny jsou tlaky vyšší a v těchto místech je tedy zvýšené riziko vzniku bublin.



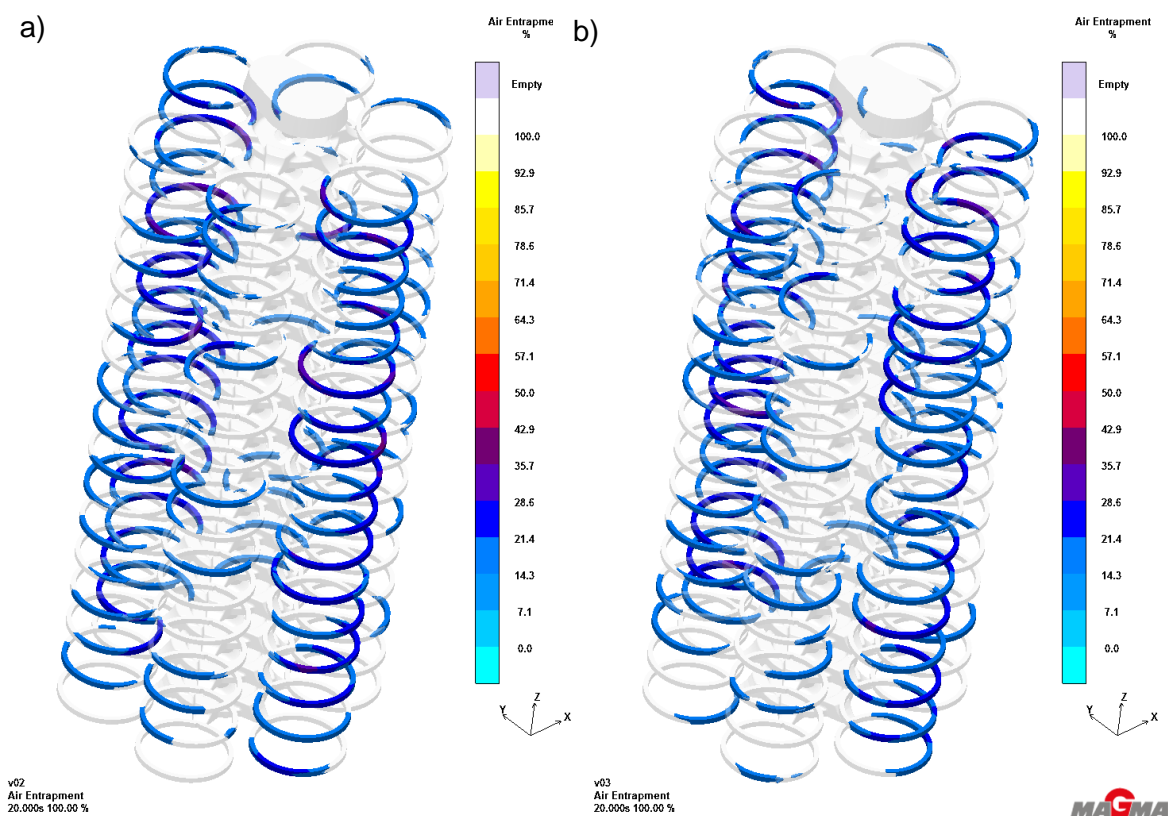
Obr. 3. 10 Přetlak vzduchu
a) varianta 1; b) varianta 2

Zahlcený vzduch – v softwaru označený názvem “Air Entrapment” je kritérium pro vzduchové bubliny. Počítá a zjišťuje koncentraci plynu v tavenině díky uzavírání vzduchu, ke kterému dochází během plnění vlivem turbulence. Toto kritérium primárně slouží k vyhodnocení odvzdušnění forem. Vzduchové bubliny jsou na barevné stupnici zobrazovány v %. [18] Zahlcený vzduch může být problémový a vést ke vzniku bublin při koncentraci vyšší než je 15%. Obr. 3. 11 znázorňuje koncentraci uzavřeného vzduchu v čase 20 s, tedy hned po odlití.



Obr. 3. 11 Zahlcený vzduch
a) varianta 1; b) varianta 2

Obr. 3. 12 pak znázorňuje právě oblasti s množstvím zahlceného vzduchu vyšším než je 15%. V některých oblastech zahlcený vzduch stoupá dokonce až nad 25%, což je hraniční hodnota, za kterou by se zahlcený vzduch neměl dostat. Místa s takto vysokou koncentrací zahlceného vzduchu jsou tedy místa nejpravděpodobnějšího výskytu vzduchových bublin. V příloze č.3 je pak možné vidět zahlcený vzduch, a tedy i možná místa vzniku bublin, ve vybraných patrech formy.



Obr. 3. 12 Zahlcený vzduch v koncentraci 15% a vyšší
a) varianta 1; b) varianta 2

Kontakt se vzduchem – v softwaru označený názvem “Air Contact” počítá průměrnou dobu, kdy byl povrch taveniny během plnění v přímém kontaktu se vzduchem. Jednotlivé elementy s vysokými hodnotami tohoto kritéria jsou ty, ve kterých mají oxidické blány nejdelší čas a nejlepší podmínky pro svůj růst. [18] Kontakt se vzduchem je na barevné stupnici zobrazován v s. Toto kritérium se řeší spíše u tvárné litiny.

Stáří kovu – v softwaru označené názvem “Material Age” určuje průměrný věk taveniny v každém zaplněném elementu. Při vstupu taveniny do vtokového kúlu je stáří kovu nula. Promíchávání uvnitř a na povrchu taveniny ovlivňuje hodnotu tohoto kritéria pro jednotlivé výpočetní elementy. Elementy s nízkou hodnotou tohoto kritéria jsou mladší než ty s vyšší hodnotou. [18] Stáří kovu je na barevné stupnici zobrazováno v s.

Dráha kovu od vstupu do formy – v softwaru označená názvem “Flow Length” zobrazuje vzdálenost, kterou urazí tavenina od svého vstupu do vtokového kúlu. Tyto výpočty jsou provedeny integrováním rychlostních polí za čas v každém časovém kroku. Tato informace je následně předána dál, což znamená, že promíchávání v tavenině

ovlivní hodnotu tohoto kritéria pro každý výpočetní element. [18] Dráha kovu od vstupu do formy je zobrazována na barevné stupnici v mm.

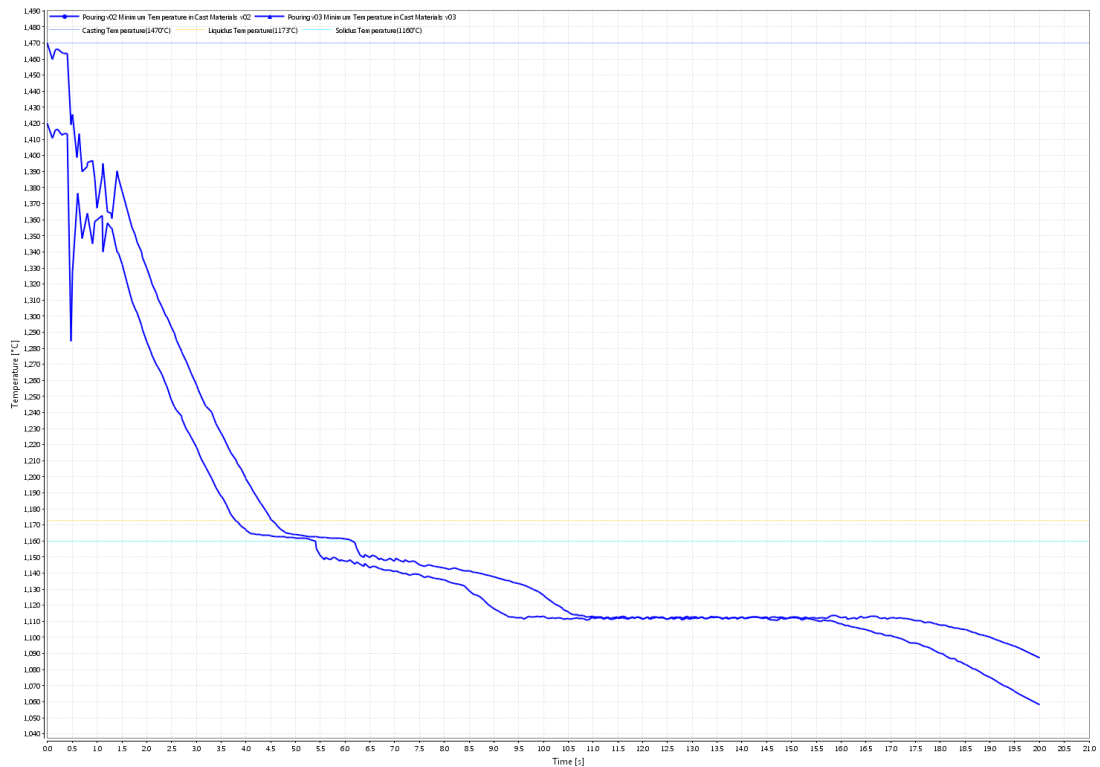
Kontakt taveniny se stěnou formy – v softwaru označený názvem “Wall Contact” vypočítává dobu, po kterou byla tavenina ve styku se stěnou formy. Promíchávání uvnitř a na povrchu taveniny ovlivňuje hodnotu tohoto kritéria pro jednotlivé výpočetní elementy. Tavenina, která byla po určitou dobu v kontaktu se stěnou, může být zanesena do hlavní části odlitku a zde zvyšovat hodnoty místní taveniny. [18] Kontakt taveniny se stěnou formy je na barevné stupnici zobrazován v s.

Eroze pískové formy – v softwaru označená názvem “Mold Erosion” predikuje erozi povrchu pískové formy (pískových jader) díky příliš vysoké rychlosti taveniny, která na danou pískovou stěnu naráží po určitou dobu. [18]

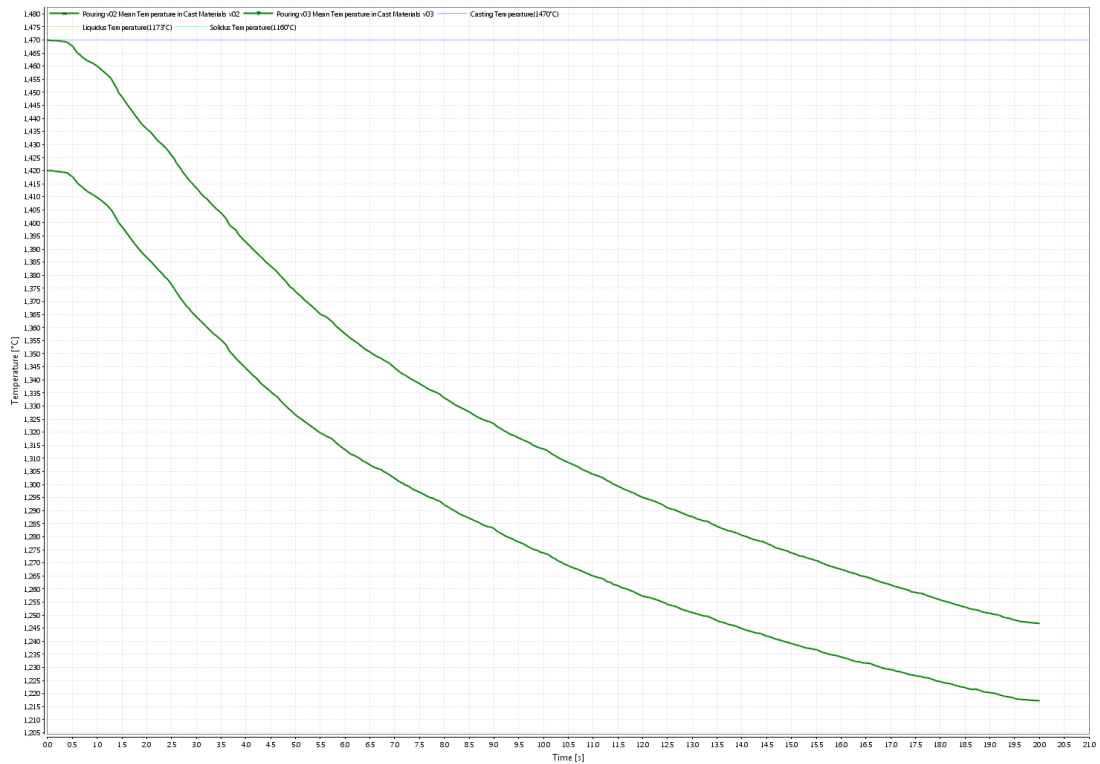
Výsledky simulačního výpočtu plnění formy obsahují, kromě výše uvedených kritérií, i několik procesních křivek, které je možné najít v adresáři nazvaném křivky – „Curves“. Mezi tyto křivky patří křivka zaplnění („Percent Filled“), křivka vývinu tlaku („Air Pressure“) a křivky minimální, střední a maximální teploty v odlévaném materiálu („Minimum, Mean, Maximum Temperature in Cast Materials“).

Na Obr. 3. 13 jsou znázorněny křivky minimálních teplot v odlévaném materiálu pro obě varianty. V ideálním případě by křivky neměly klesnout pod teplotu likvidu, zde však pod tuto teplotu klesají vlivem natuhávání spodních vrstev odlitků. K natuhávání spodních vrstev odlitků dochází díky etážovému lití, kdy je v tomto případě forma poměrně vysoká a odlitky, které jsou malých rozměrů, tak tuhnou ještě před odlitím celého objemu formy. Toto je pro odlévání písních kroužků specifické.

Na Obr. 3. 14 jsou znázorněny křivky středních teplot v odlévaném materiálu pro obě varianty. Zde by opět neměly křivky klesnout pod teplotu likvidu, což je zde splněno.



Obr. 3. 13 Křivky minimálních teplot v odlévaném materiálu



Obr. 3. 14 Křivky středních teplot v odlévaném materiálu

3.2.2. Výsledky simulačního výpočtu tuhnutí a chladnutí

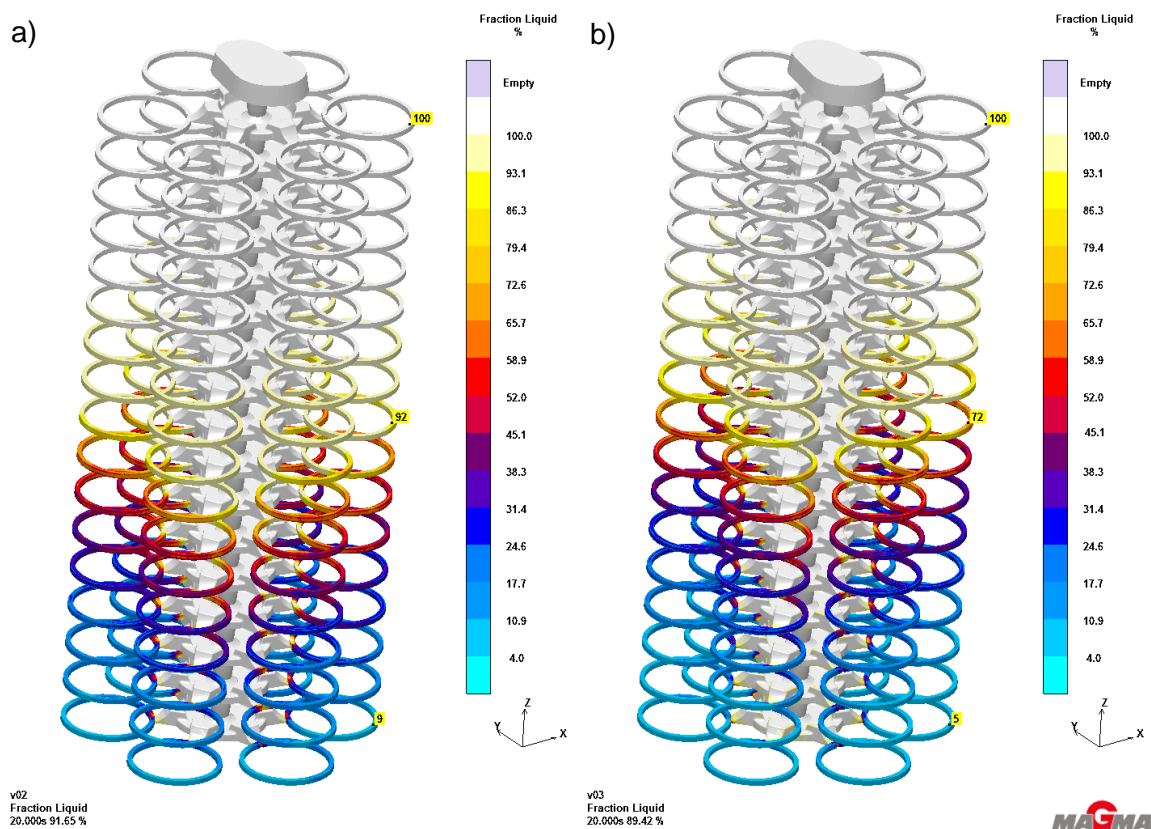
Počet zobrazených výsledků tuhnutí a chladnutí též záleží na tom, jak byl daný projekt nadefinován. Zde byly opět pro výpočet a vyhodnocení vybrány všechny dostupné výsledky a kritéria. Mezi výsledky tuhnutí a chladnutí patří teplotní pole, podíl tekuté a tuhé fáze, mikrostruktura, materiálové vlastnosti a informace o dosazovací schopnosti. Do jednotlivých kritérií, nacházejících se ve složce obecná kritéria, patří například vnitřní zdravotnost odlitku, objemové staženiny, teplotní moduly, teplotní uzly, čas kdy odlitek přestává dosazovat objemově atd. [18]

Všechny výsledky a kritéria byly prostudovány a následuje jejich výčet. Vyhodnocení je pak provedeno u těch kritérií, která byla pro tuto práci přínosná. Pro připomenutí varianta 1 je s vyšší teplotou lití a to 1470°C, varianta 2 je pak s nižší teplotou lití a to 1420°C.

Teplotní pole – v softwaru označené názvem “Temperature“ popisuje rozložení teplotních polí ve všech oblastech vybraných materiálových skupin v každém časovém intervalu během tuhnutí odlitku. Teplotní pole jsou zobrazovány na barevné stupnici v °C. [18] V této práci bylo toto kritérium využito k zobrazení degradované formovací směsi, viz kapitola 3.4.

Tekutá fáze – v softwaru označená názvem “Fraction Liquid“ ukazuje místní podíl tekuté fáze ve všech časových krocích během tuhnutí odlitku. [18] Barevná stupnice ukazuje v jakých místech odlitku je kolik procent tekuté fáze. Na Obr. 3. 15 můžeme vidět porovnání obou variant v čase 20 s, tedy v okamžiku kdy bylo skončeno plnění. V tomto čase je u varianty 1 podíl tekuté fáze 91,65% a u varianty 2 je podíl tekuté fáze 89,42%. K dosažení 0% tekuté fáze ve všech místech odlitku, tedy k jeho ztuhnutí, došlo u varianty 1 v čase 183,070 s, u varianty 2 v čase 172,502 s.

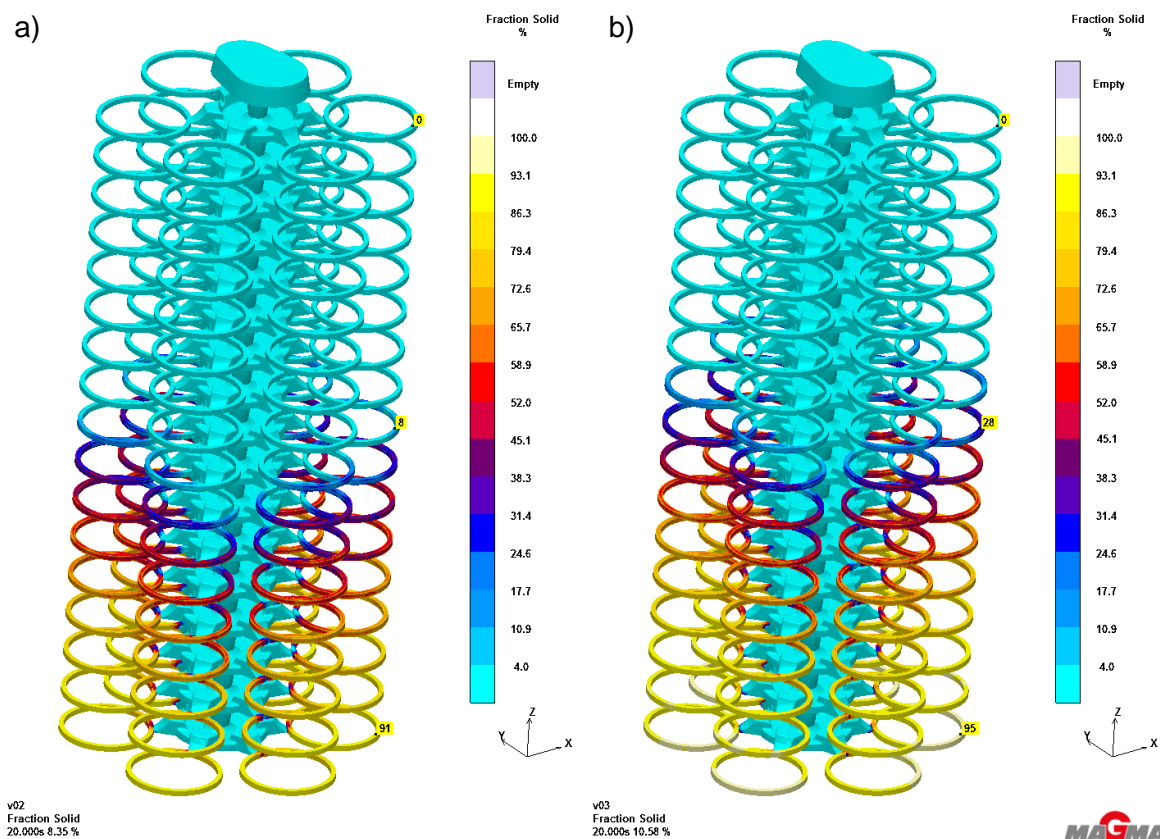




Obr. 3. 15 Podíl tekuté fáze v čase 20 s

a) varianta 1; b) varianta 2

Tuhá fáze – v softwaru označená názvem “Fraction Solid“ ukazuje místní podíl tuhé fáze ve všech časových krocích během tuhnutí odlitku. [18] Podíl tuhé fáze je na barevné stupnici zobrazován v %. Je to v podstatě opak předchozího kritéria, což je patrné i z následujících výsledků. V čase 20 s byl zjištěn podíl tuhé fáze u varianty 1 - 8,35% a u varianty 2 - 10,58%, viz Obr. 3. 16. Ke ztuhnutí odlitku, tedy dosažení 100% tuhé fáze, pak došlo v časech 183,070 s (varianta 1) a 172,502 s (varianta 2), které jsou logicky stejné jako v předchozím kritériu.



Obr. 3. 16 Podíl tuhé fáze v čase 20 s

a) varianta 1; b) varianta 2

Vnitřní zdravotnost odlitku – v softwaru označené názvem **“Soundness”** patří do skupiny obecných kritérií – **“General Criteria”**. Zobrazuje místní podíl taveniny na konci tuhnutí, a tudíž lze posoudit kvalitu dosazování uvnitř odlitku. Vnitřní zdravotnost odlitku je na barevné stupnici zobrazována v %. 100% zdravotnosti odlitku odpovídá 0% staženin a naopak. [18]

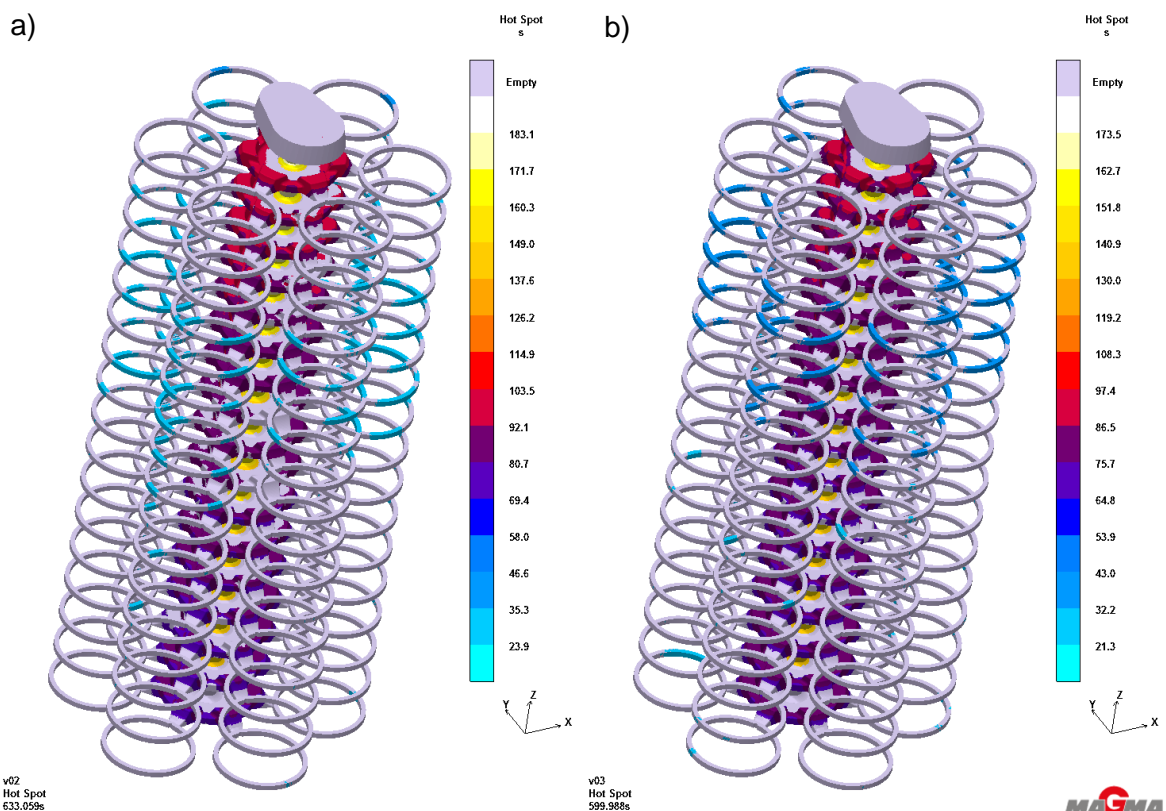
Niyamovo kritérium – v softwaru označená názvem **“Niyama Criterion”** slouží pro posouzení vzniku a přítomnosti ředin a staženin v teplotních osách ocelových odlitků. [18] Pro hodnocení litiny se tedy nepoužívá a tudíž ani zde nebylo hodnoceno.

Teplotní modul – v softwaru označený názvem **“Feedmod”** pomůže stanovit teplotní podmínky uvnitř odlitku a vhodně umístit a nadimenzovat nálitky. Zároveň díky tomuto kritériu lze ověřit míru usměrněného tuhnutí v odlitku. [18] Teplotní modul je na barevné stupnici zobrazován v cm. Kritérium opět patří do skupiny obecných kritérií – **“General Criteria”**.

Doba tuhnutí – v softwaru označená názvem “Solidifaciton Time“ zobrazuje, jak dlouho tuhla jednotlivá místa v odlitku. Doba tuhnutí je zobrazována na barevné stupnici v s. Toto kritérium opět patří do skupiny obecných kritérií – “General Criteria“.

Solidus – Likvidus – v softwaru označený názvem “Liquidus to Solidus“ znázorňuje dobu, za kterou se kov v dutině formy dostal z teploty Likvidu na teplotu Solidu. Toto kritérium je zobrazováno na barevné stupnici v s, a též patří do skupiny obecných kritérií – “General Criteria“.

Teplotní uzel – v softwaru označený názvem “Hot Spot“ je opět jedno z kritérií patřících do skupiny obecných kritérií – “General Criteria“. Toto kritérium zobrazuje oblasti, jejichž časy tuhnutí jsou značně odlišné od jejich okolí. Jinými slovy s pomocí teplotních uzlů jsou odhaleny oblasti, kde je zbytková tavenina plně obklopena chladnějším materiálem. V těchto místech pak hrozí vznik objemových staženin díky nedostatečnému dosazení tekutým kovem. [18] Teplotní uzly jsou zobrazovány na barevné stupnici v s. Modré plochy v odlitcích, viz Obr. 3. 17, znázorňují místa možného vzniku objemových staženin.



Obr. 3. 17 Teplotní uzly
a) varianta 1; b) varianta 2

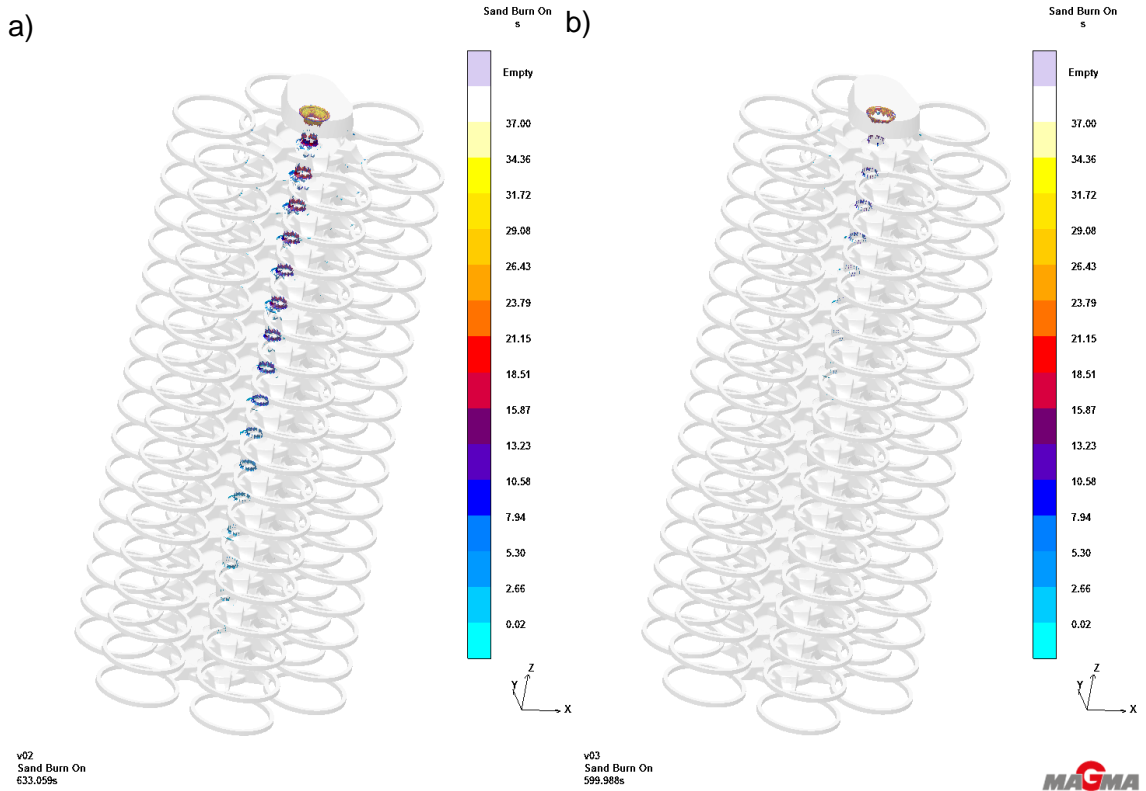
Čas, kdy odlitek přestává dosazovat objemově – v softwaru označený názvem “FSTime” patří též do skupiny obecných kritérií – “General Criteria“. Toto kritérium indikuje čas, který odlitek potřebuje pro dosažení kritického poměru tuhé fáze, aby bylo objemově dosazování zastaveno. Jinými slovy, v tento daný moment přestává odlitek dosazovat objemově a pokračuje v dosazování pouze mezi dendrity tuhé fáze. Toto kritérium je na barevné stupnici zobrazováno v s. Důležitým parametrem pro tuto predikci je dosazovací schopnost, “Feeding Effectivity“. Tato hodnota v % je závislá na typu slitiny a její morfologii a vyjadřuje schopnost odlitku objemově dosazovat pouze do dosažení určitého % tuhé fáze. Potom odlitek již není schopen dobře dosazovat a v izolovaných “ostrůvcích“ zbytkové taveniny se začnou tvořit staženiny. [18]

Gradient – v softwaru označený též názvem “Gradient” zobrazuje rychlost přenosu tepla přes objemovou jednotku. Gradient je zobrazován na barevné stupnici v °C/mm. Toto kritérium opět patří do skupiny obecných kritérií – “General Criteria“.

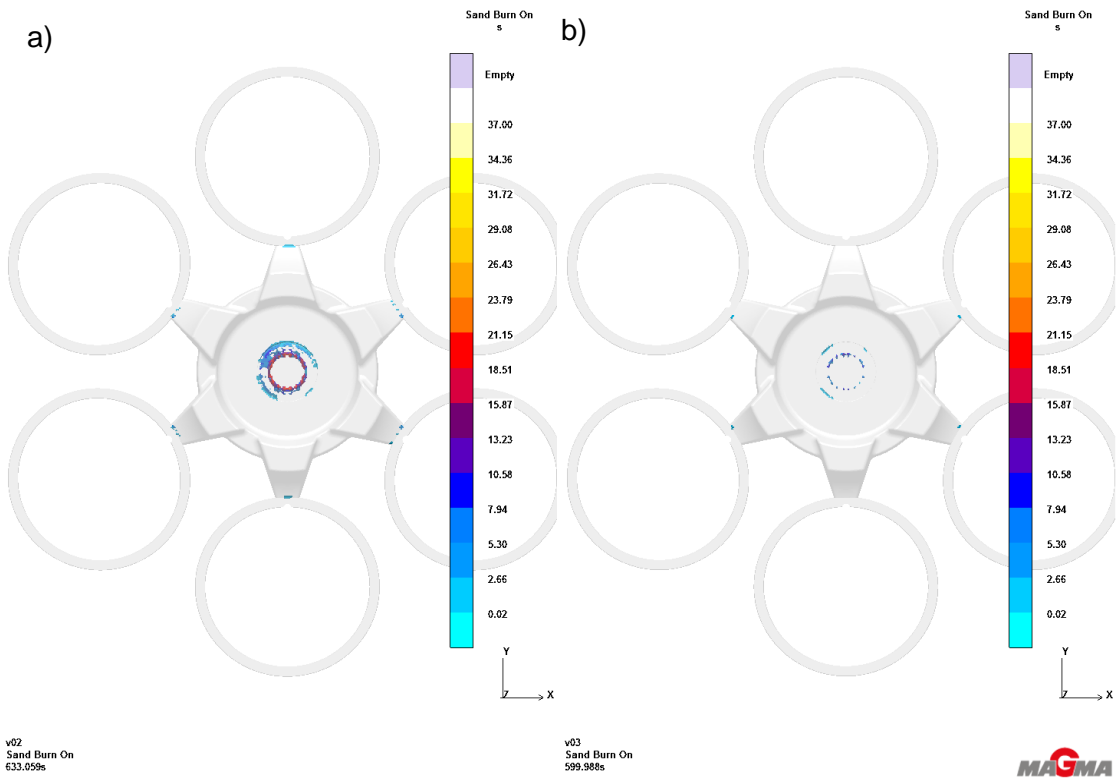
Rychlost ochlazování – v softwaru označená názvem “Cooling Rate” spadá do skupiny obecných kritérií – “General Criteria“ a zobrazuje rychlost ochlazování v jednotlivých částech formy. Rychlost ochlazování je na barevné stupnici zobrazována v °C/s.

Přípečeniny – v softwaru označené názvem “Sand Burn On” patří do skupiny obecných kritérií – “General Criteria“ a zobrazují místa, ve kterých se mohou přípečeniny vyskytovat. Přípečeniny jsou zobrazovány na barevné stupnici v s. Přípečeniny lze dobře pozorovat díky funkci rentgenu (Xray). V tomto případě je predikován výskyt přípečenin převážně ve vtokové soustavě u licího kúlu, viz Obr. 3. 18, což nijak neovlivňuje kvalitu odlitků. V horní části formy se pak mohou drobné přípečeniny vyskytnout i v místě zářezu, viz Obr. 3. 19.





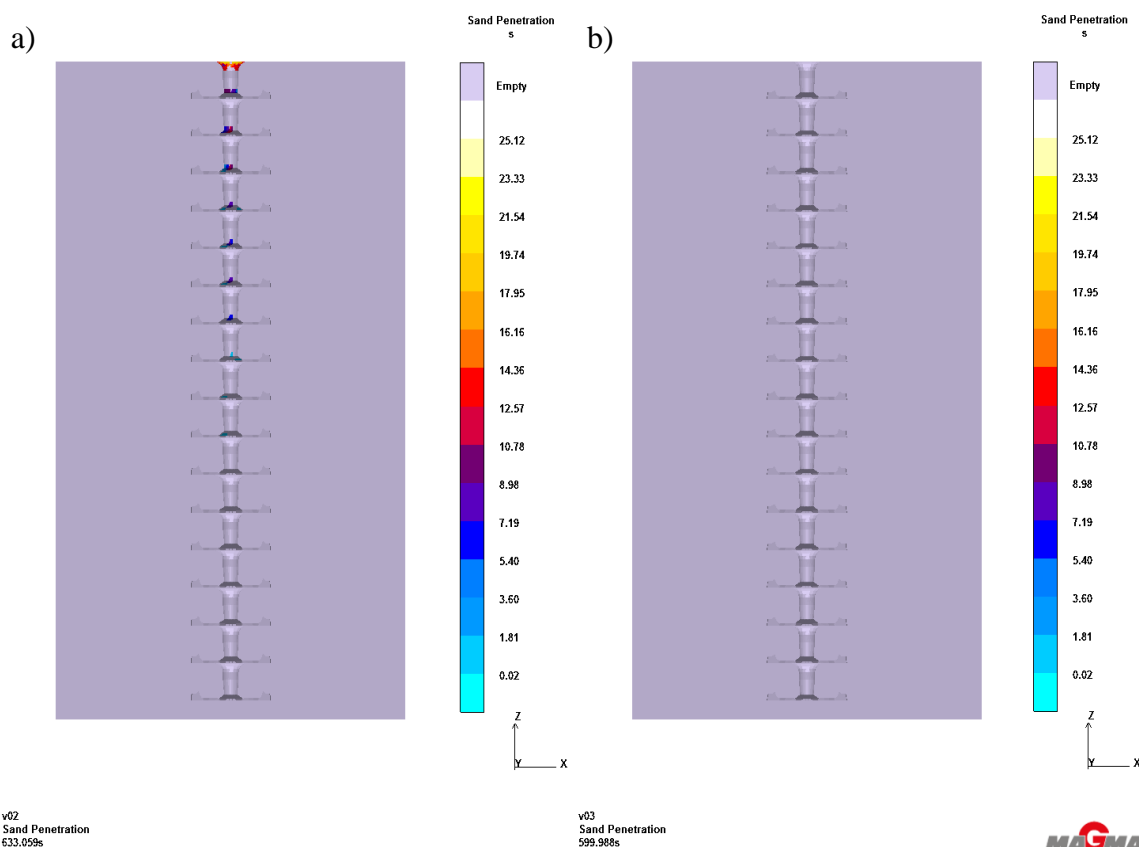
Obr. 3. 18 Připečeniny
a) varianta 1; b) varianta 2



Obr. 3. 19 Připečeniny - druhé patro
a) varianta 1; b) varianta 2



Penetrace taveniny do pískové formy – v softwaru označená názvem “Sand Penetration” zobrazuje místa, ve kterých tavenina proniká mezi zrna formovací směsi. A opět patří do skupiny obecných kritérií – “General Criteria“. Penetrace je zobrazována na barevné stupnici v s. K penetraci taveniny do pískové formy dochází pouze v horní části formy v oblasti licího kůlu u varianty 1, viz Obr. 3. 20, což nijak neovlivňuje výslednou kvalitu odlitků.



Obr. 3. 20 Penetrace taveniny do pískové formy
a) varianta 1; b) varianta 2

Rychlost tuhnutí – v softwaru označená názvem “Solidifaciton Rate” je posledním kritériem skupiny obecných kritérií – “General Criteria“. Toto kritérium zobrazuje rychlosti tuhnutí v jednotlivých místech odlitku. Rychlost tuhnutí je zobrazována na barevné stupnici v °C/s.

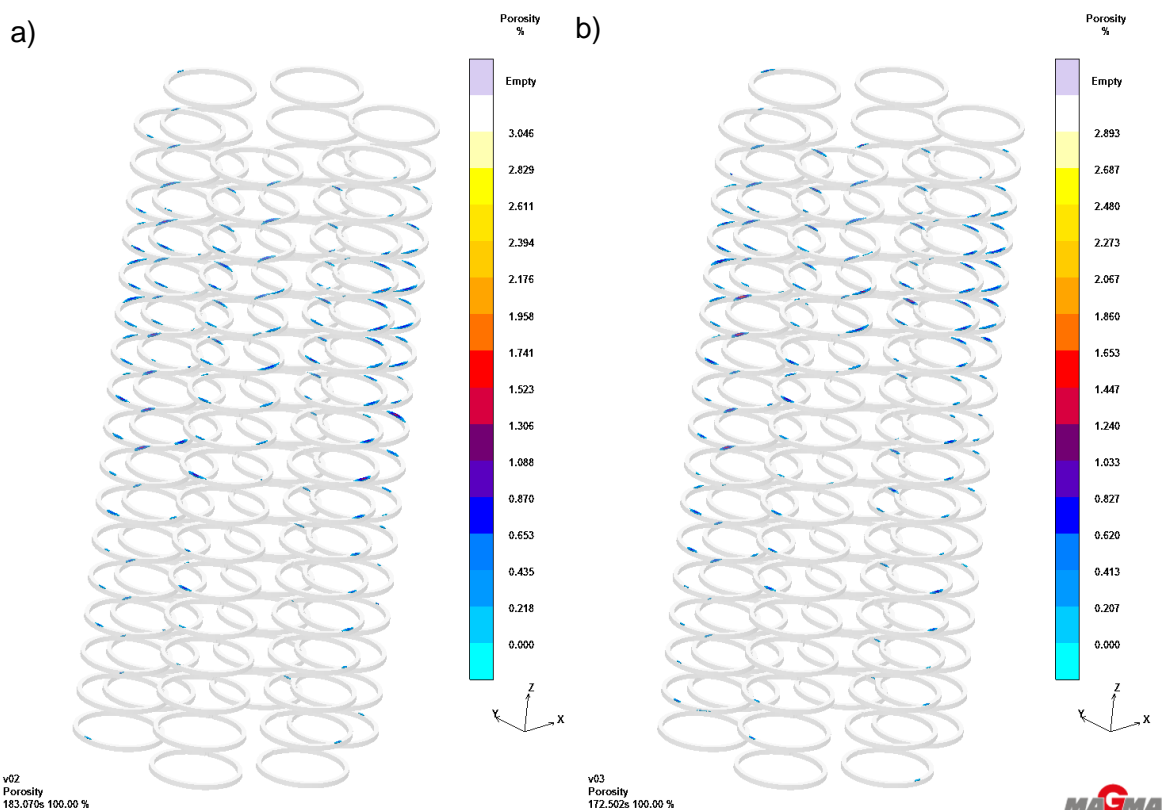
Objemové stažení – v softwaru označené názvem “Porosity” zobrazují objemové stažení uvnitř odlitku po ukončení fáze tuhnutí. Na barevné stupnici je toto kritérium v %. 0% = naprosto zdravý odlitek, 100% = zcela porézní odlitek. Modré plochy znázorňují místa možného vzniku pórů, nejvíce se objevují v odlitcích ve vrchní polovině formy, viz Obr. 3. 21. Hodnoty porozity byly shrnuty do Tab. 3. 2, ze které je patrné, že



porozita je o něco vyšší u varianty 2, i tak ale její hodnoty nejsou nijak vysoké. V příloze č.4 je pak možné vidět porozitu ve vybraných patrech formy.

Tab. 3. 2 Hodnoty porozity v jednotlivých patrech

Porozita [%]									
Patro č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Varianta 1	0,420	0,889	1,584	3,046	2,590	1,853	1,733	2,431	2,026
Varianta 2	1,051	1,398	2,023	2,068	2,338	2,222	1,854	2,893	2,684
Patro č.	10	11	12	13	14	15	16	17	
Varianta 1	1,816	2,045	1,648	1,258	1,872	1,394	1,431	0,973	
Varianta 2	2,294	2,231	1,943	1,182	1,965	1,849	1,596	1,200	



Obr. 3. 21 Porozita

a) varianta 1; b) varianta 2

Mikrostruktura – v softwaru označená názvem “Microstructure“ je adresář obsahující několik kritérií týkajících se mikrostruktury. Patří sem velikost eutektických buněk (“Eutectic Cell Size“), podíl podchlazeného grafitu (“Undercooled Graphite“), podíl austenitu (“Fraction of Austenite“), podíl eutektické fáze (“Fraction of Eutectic Phase“), vzdálenost lamel (“Lamellar Spacing“) a zákalka (“White Solidification“). Výsledky těchto kritérií jsou uvedeny v příloze č.5.



Materiálové vlastnosti – v softwaru označené názvem “Material Properties“ je název adresáře obsahujícího tři kritéria, která znázorňují hodnoty materiálových vlastností v různých místech odlitků. Prvním kritériem je minimální pevnost v tahu (“Minimum Tensile Strength”), druhým je Youngův modul (“Young’s Modulus”) a třetím je tvrdost (“Hardness Pearlitic”). Výsledky těchto kritérií jsou uvedeny v příloze č. 6.

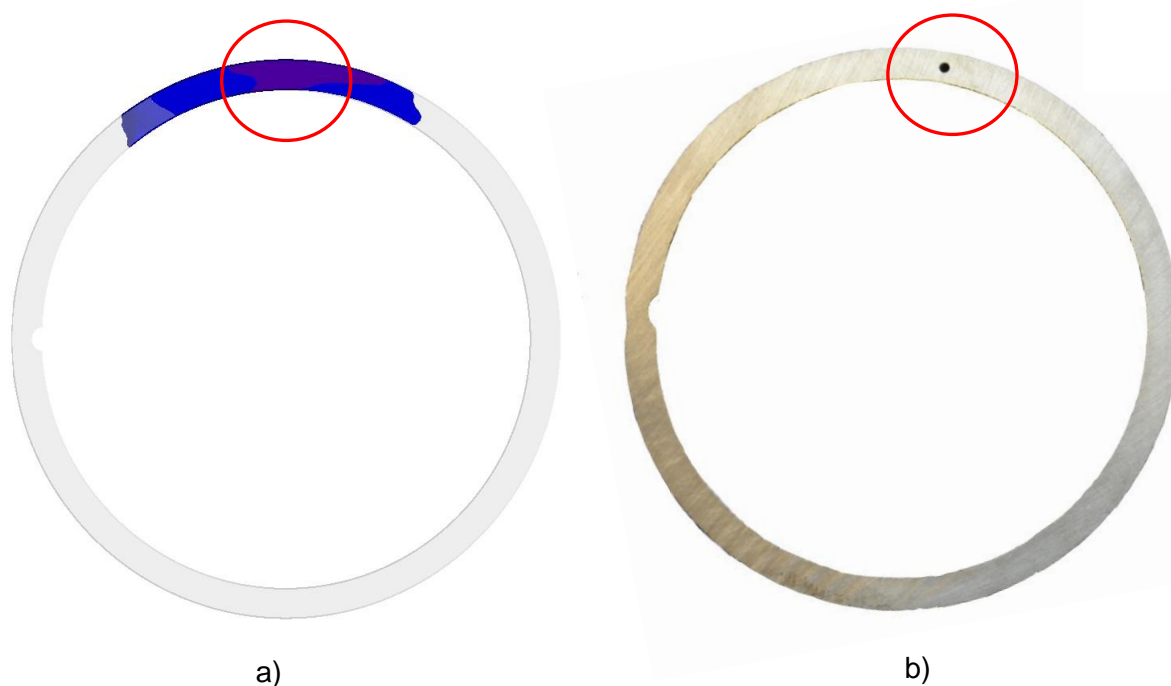
U výsledků simulačního výpočtu tuhnutí a chladnutí, jsou též k dispozici kromě výše uvedených kritérií, i procesní křivky, které je možné najít v adresáři nazvaném křivky – „Curves“. Mezi tyto křivky patří křivky minimální, střední a maximální teploty v odlévaném materiálu („Minimum, Mean, Maximum Temperature in Cast Materials“) a křivka eutektické teploty („Eutectic Temperature“).



3.3. POROVNÁNÍ VAD ZJIŠTĚNÝCH SIMULAČNÍMI VÝPOČTY A VAD NA REÁLNÝCH ODLITCÍCH

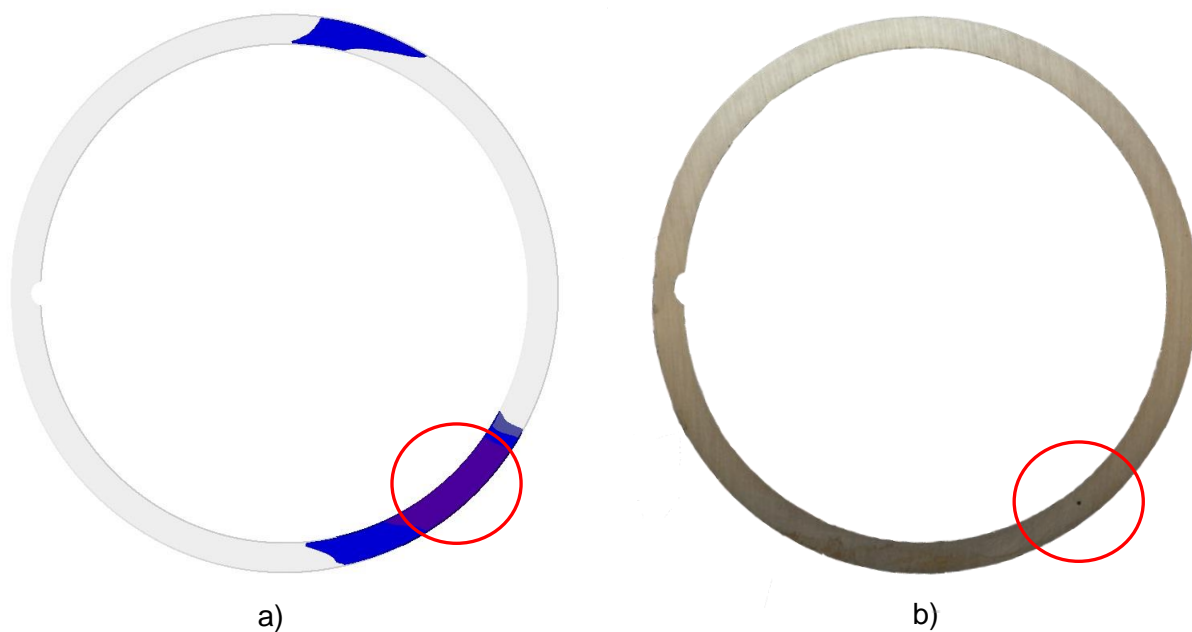
Následující kapitola sleduje oblasti možného vzniku vad, zjištěné na základě simulačního výpočtu, v porovnání s vadami zjištěnými na reálných odlitcích. Největší problémy při odlévání pístních kroužků ve slévárně litin Buzuluk, a.s., zjištěné na základě simulačních výpočtů, jsou spojené se vznikem bublin. Vznik bublin v tomto typu odlitků je zapříčiněn především zahlcením vzduchu, ke kterému dochází vlivem špatné prodyšnosti formy. Dále jsou pak některé vady typu bublin zapříčiněny plyny uvolněnými z formovací směsi, tedy tzv. zvýšenou plynotvorností slévárenské formovací směsi.

Tmavě modrá až fialová místa na obrázcích ze simulačního výpočtu označují místa předpokládaného vzniku bublin. Z následujících obrázků (Obr. 3. 22, Obr. 3. 23, Obr. 3. 24, Obr. 3. 25) je pak patrné, že vady odlitků pístních kroužků predikované simulačními výpočty se shodují s vadami na reálných odlitcích.



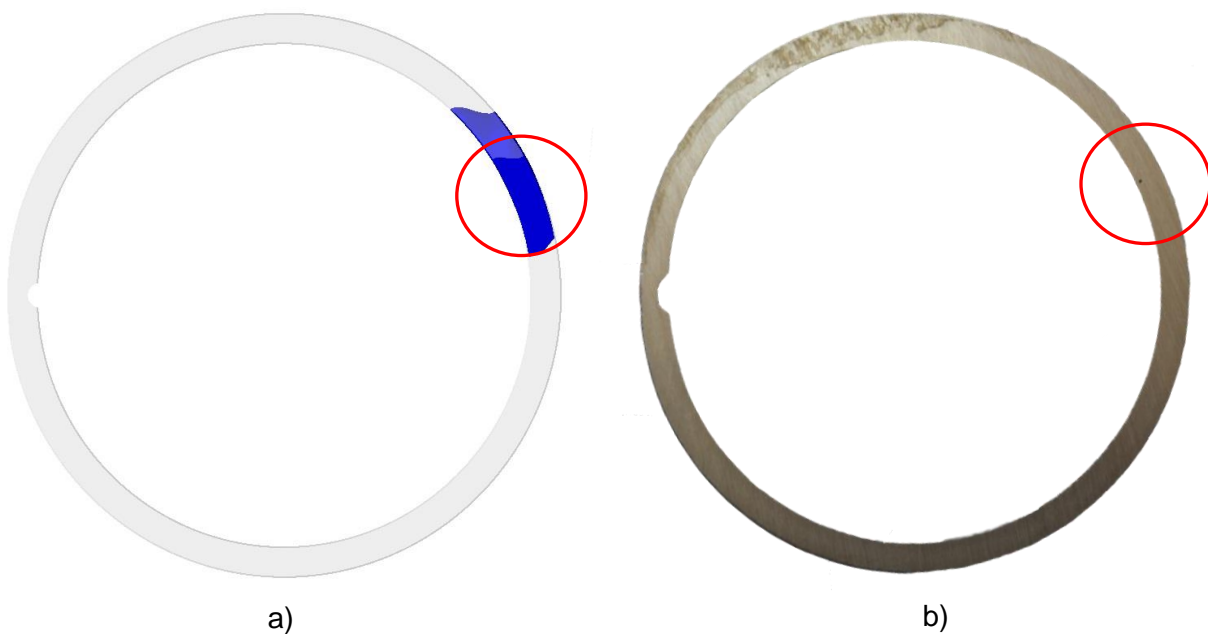
Obr. 3. 22 Vady odlitků 1

a) vada predikovaná simulačním výpočtem; b) vada na reálném odlitku



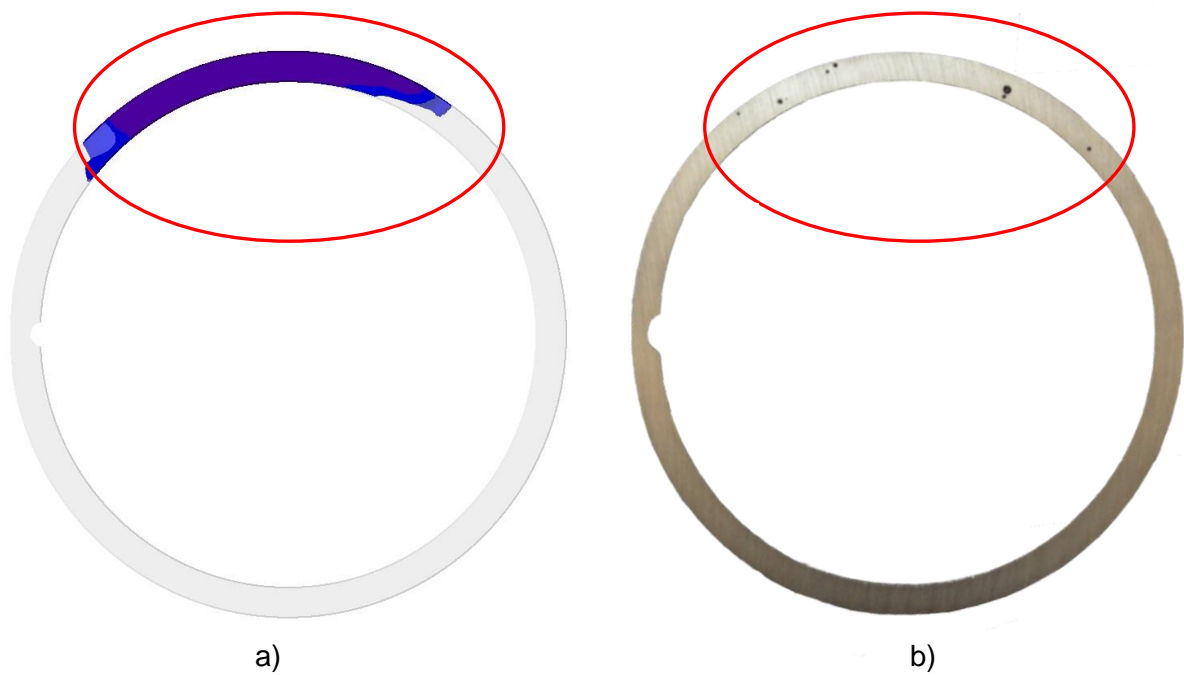
Obr. 3. 23 Vady odlitků 2

a) vada predikovaná simulačním výpočtem; b) vada na reálném odlitku



Obr. 3. 24 Vady odlitků 3

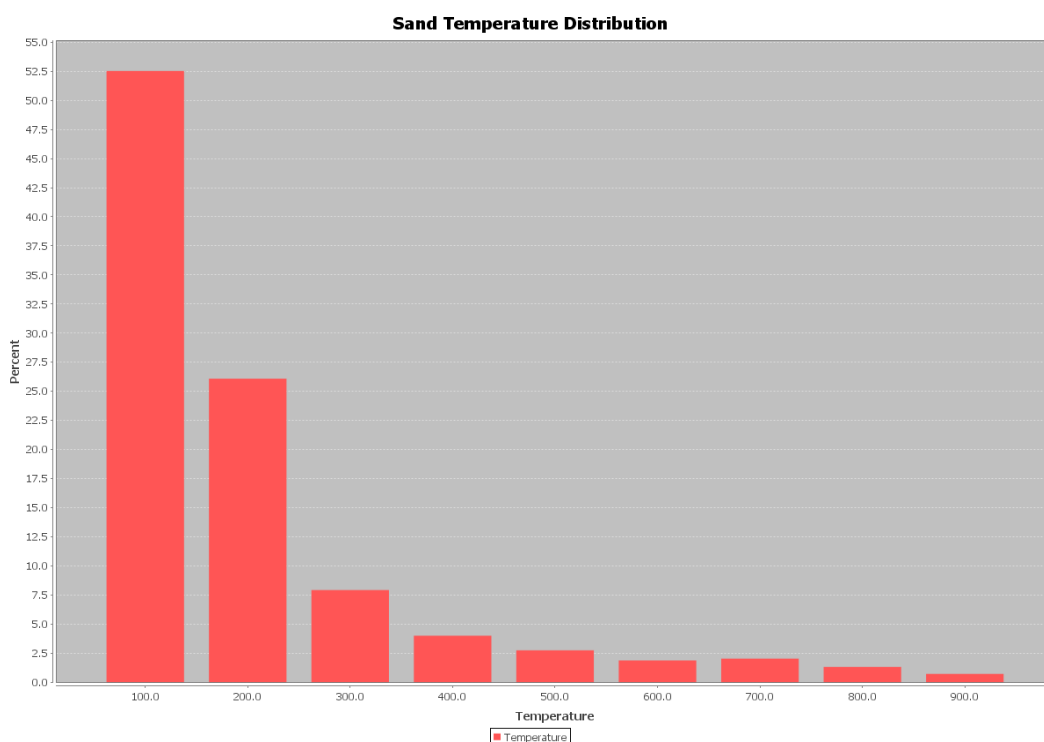
a) vada predikovaná simulačním výpočtem; b) vada na reálném odlitku



Obr. 3. 25 Vady odlitků 4
a) vada predikovaná simulačním výpočtem; b) vada na reálném odlitku

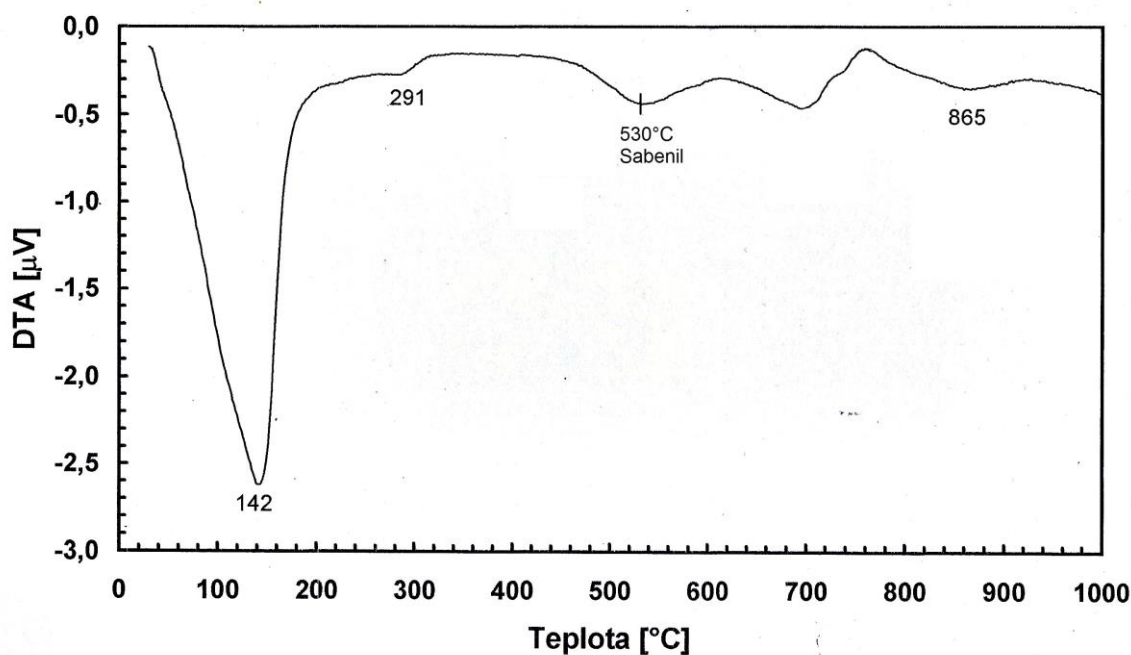
3.4. VYHODNOCENÍ TEPELNÉ DEGRADACE BENTONITU NA ZÁKLADĚ VÝSLEDKŮ SIMULAČNÍHO VÝPOČTU

Tepelná degradace byla hodnocena na dvou již zmíněných variantách simulačního výpočtu, které se liší teplotou lití, která má na tyto výsledky podstatný vliv. Vliv na tepelnou degradaci má nejen již zmíněná teplota lití, ale také složení a vlastnosti formovací směsi a druh odlévaného materiálu. Na základě těchto parametrů Magma⁵ stanovila, jaké množství komplexní formovací směsi bylo tepelně zasaženo určitou teplotou vlivem přestupu tepla z odlévaného kovu do pískové formy. Výstupem obou hodnocených variant byl obdobný graf, jako je graf na Obr. 3. 26.



Obr. 3. 26 Výstupní graf hodnot z výpočtu Magma⁵

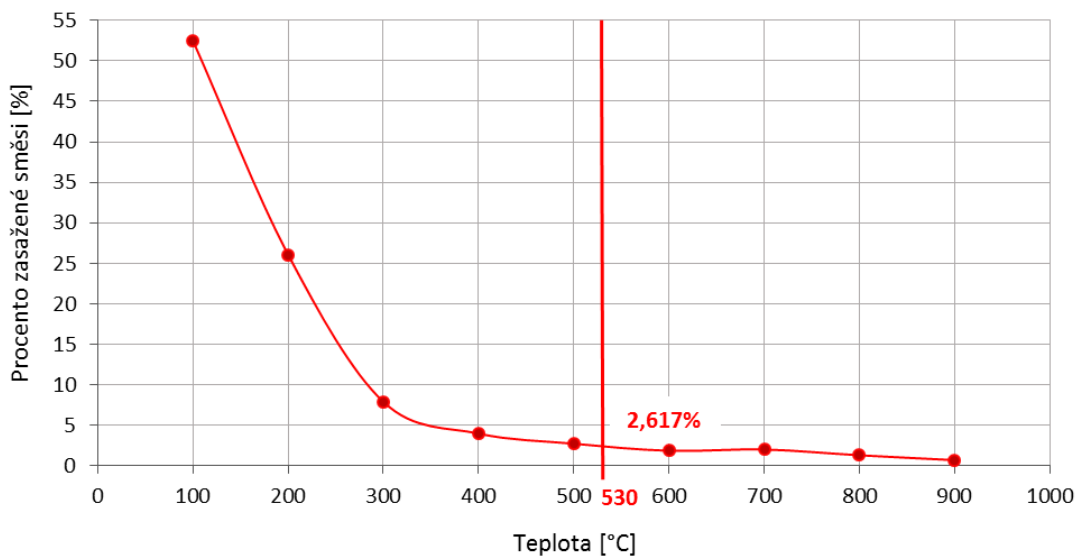
Kromě výsledků získaných ze softwaru Magmou⁵, bylo pro výpočet tepelné degradace ještě nutné zjistit, při jaké teplotě dochází k degradaci bentonitu. Forma pro odlévání písních kroužků je vytvořena z jednotné bentonitové formovací směsi. Do směsi je používáno bentonitové pojivo Sabenil + Sabenil K. Diferenční termickou analýzou Sabenilu, viz Obr. 3. 27, která byla poskytnuta firmou KERAMOST, a.s., bylo zjištěno, při které teplotě dojde u tohoto materiálu ke ztrátě chemicky vázané vody (OH skupiny). Analýzou byla zjištěna teplota 530°C a ta je tedy rozhodující pro degradaci bentonitu Sabenil.



Obr. 3. 27 Diferenční termická analýza Sabenilu

Kvůli zpřesnění výsledků byli ještě výstupní grafy hodnot z výpočtu softwaru Magma⁵ (Obr. 3. 26) upraveny pomocí tabulkového procesoru Microsoft Excel (Obr. 3. 28., Obr. 3. 29). Grafy ukazují, kolik procent formovací směsi v celém objemu formy bylo zasaženo konkrétní teplotou.

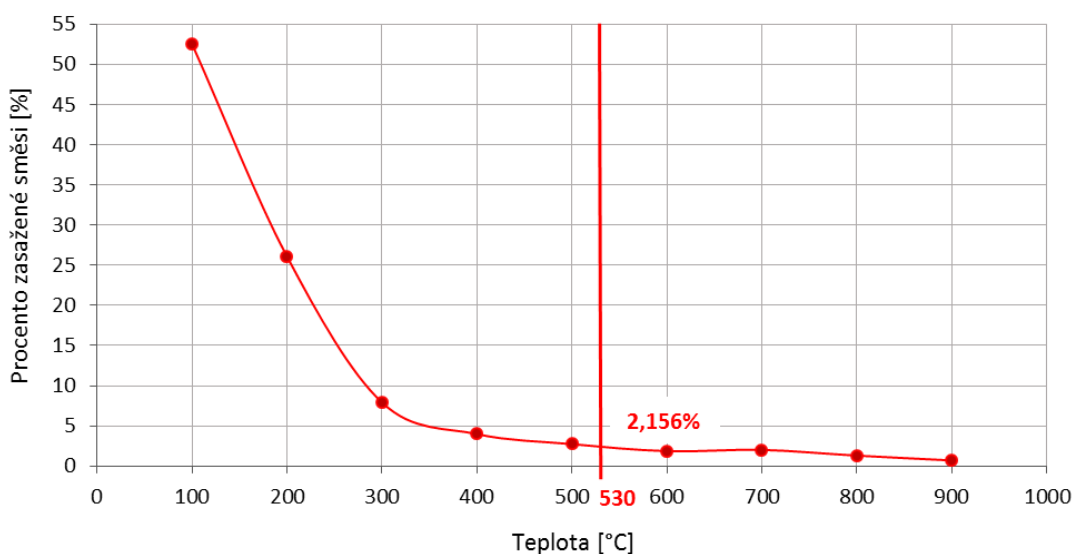
Rozložení teplot ve formovací směsi



Obr. 3. 28 Upravený graf výstupních hodnot z výpočtu Magma⁵ pro variantu 1

U varianty 1 (teplota lití 1470°C) bylo teplotou 530°C a vyšší zasaženo 2,617% jednotné bentonitové formovací směsi z celkového objemu formy. Z výsledků softwaru Magma⁵ pak bylo zjištěno, že celková hmotnost formovací směsi ve formě je 49,66 kg. Z těchto dvou hodnot byla jednoduchým přepočtem stanovena hmotnost tepelně degradované směsi, která činí 1,3 kg. Dále byla, jednoduchým přepočtem z celkového množství bentonitu ve směsi (8,89%), stanovena hmotnost tepelně degradovaného bentonitu, která činí 0,116 kg. Tyto výpočty jsou detailněji popsány v příloze č. 7.

Rozložení teplot ve formovací směsi



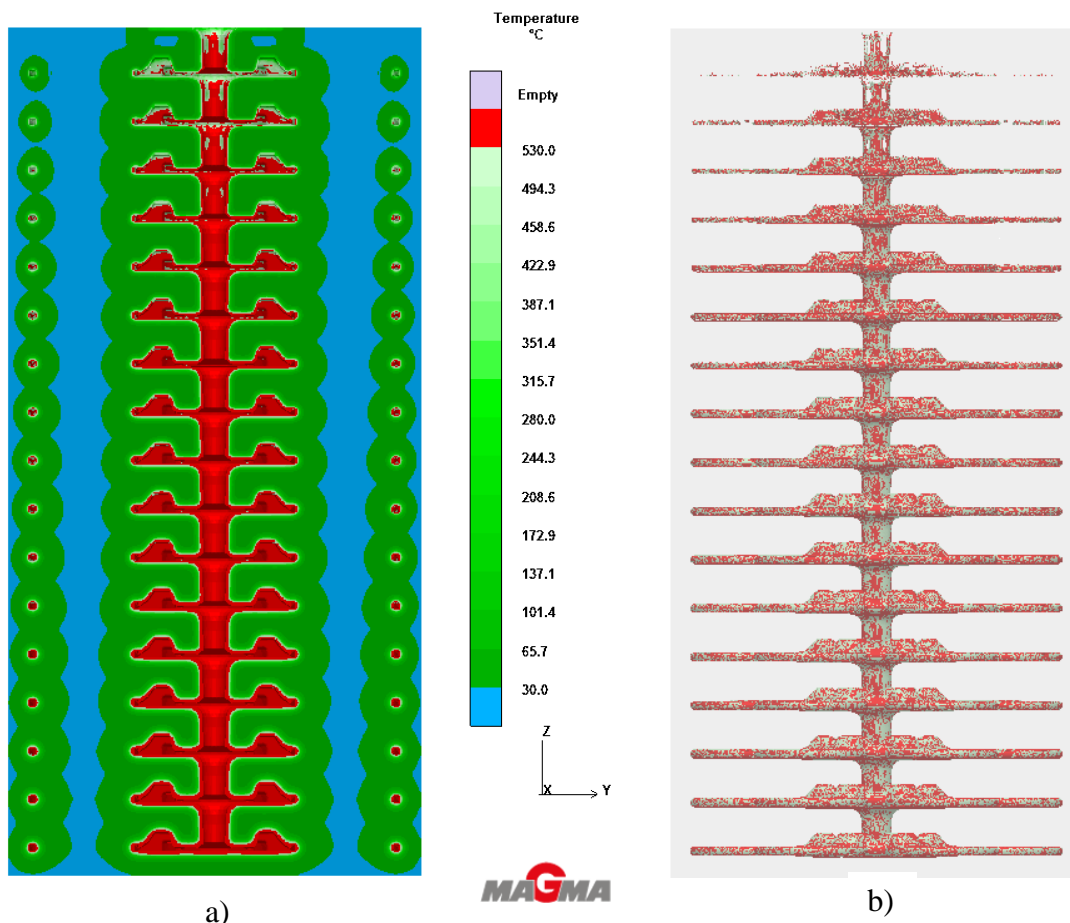
Obr. 3. 29 Upravený graf výstupních hodnot z výpočtu Magma⁵ pro variantu 2

U varianty 2 (teplota lití 1420°C) bylo teplotou 530°C, a vyšší, zasaženo 2,156%. Stejným způsobem jako v předešlém případě byla stanovena hmotnost tepelně degradované směsi, která činí 1,071 kg a hmotnost tepelně degradovaného bentonitu, která je 0,095 kg. Výpočty jsou opět detailněji popsány v příloze č. 7.

Tab. 3. 3 Výsledné hodnoty degradované směsi a bentonitu

	Množství tepelně degradované směsi ve formě v %	Hmotnost tepelně degradované směsi ve formě v kg	Hmotnost tepelně degradovaného bentonitu ve formě v kg
Varianta 1	2,617	1,300	0,116
Varianta 2	2,156	1,071	0,095

V Tab. 3. 3 jsou shrnuty výsledky simulačního výpočtu degradace směsi. Na Obr. 3. 30 jsou pak červeně znázorněna místa s teplotou 530°C a vyšší, což odpovídá místům s tepelně degradovanou směsí.



Obr. 3. 30 Zobrazení degradace formovací směsi

a) znázornění teplot v řezu formy; b) znázornění degradované směsi

Na základě získaných hodnot degradace bentonitu bylo dále stanoveno množství bentonitu potřebného k oživení jednotné bentonitové formovací směsi v jedné dávce mísiče. Jedna dávka do mísiče, dle údajů ze slévárny, obsahuje cca 1300 kg směsi. Z toho je 1269 kg vratné směsi a 31 kg tvoří nové suroviny. Nové suroviny tvoří cca 25 kg ostřiva, 1,5 kg černouhelné moučky a 4,5 kg bentonitu.

Bentonit je nutné do směsi přidávat ze dvou důvodů. Prvním důvodem je nahrazení degradovaného bentonitu ve vratné směsi. Druhým důvodem je doplnění bentonitu na nové ostřivo. Na základě výpočtu softwaru Magma⁵, byly stanoveny hodnoty pro doplnění degradovaného bentonitu ve vratné směsi. Z hmotnosti vratné směsi v jedné dávce mísiče, podělené hmotností směsi potřebné pro vytvoření jedné formy, bylo zjištěno, kolik



forem bylo z tohoto množství směsi vyrobeno. Počet forem pak byl vynásoben hmotností tepelně degradovaného bentonitu v jedné formě (viz. Tab. 3. 3). Tím jsme získali požadované množství nového bentonitu potřebného k oživení z důvodu tepelné degradace. Bentonit na vratnou směs by měl ještě obsahovat jinak poškozený a ztracený bentonit, ten se však nedá nijak přesně určit a proto zde není uvažován. Celkové množství bentonitu pak bylo stanoveno sečtením množství bentonitu potřebného na doplnění k novému ostřívu a množství bentonitu potřebného na doplnění k vratné směsi. Výsledky dávkování nového bentonitu jsou uvedeny v Tab. 3. 4. Výpočty jsou pak detailněji popsány v příloze č. 7.

Tab. 3. 4 Oživení směsi v mísiči dle slévárny a dle softwaru Magma⁵

	Dávkování dle slévárny	Dávkování dle výpočtu Magma ⁵ (Varianta 1)	Dávkování dle výpočtu Magma ⁵ (Varianta 2)
Dávka celkem v kg	1300	1300	1300
Vratná směs v kg	1269	1269	1269
Nové ostřívo v kg	25	25	25
Nová černouhelná moučka v kg	1,5	1,5	1,5
Nový bentonit v kg	4,5	5,19	4,65
z toho:			
bentonit na nové ostřívo v kg	2,22	2,22	2,22
bentonit na vratnou směs v kg	2,28	2,96	2,43



4. DISKUSE VÝSLEDKŮ

Výsledky obsažené v této práci obsahují dílčí informace o predikci vad písních kroužků odlévaných ve slévárně litin Buzuluk, a.s.. Tato predikce byla provedena na základě numerického simulačního výpočtu programu Magma⁵. Dále pak práce obsahuje informace o porovnání vad zjištěných na základě simulačních výpočtů a vad zjištěných na reálných odlitcích. Odhalením příčin vzniku těchto vad, právě za pomoci simulačních výpočtů, je možné zlepšit kvalitu výroby písních kroužků. Výsledky také obsahují informace o degradaci bentonitu ve formovací směsi a následném oživení směsi bentonitem. Pro získání všech potřebných výsledků byly navrženy dvě varianty simulačních výpočtů. Původně uvažovanou variantu úpravy vtokové soustavy nebylo možné použít z důvodu složité změny modelového zařízení, kterou by bylo nutné následně ve slévárně provést. Proto tedy bylo přistoupeno na úpravy technologických parametrů samotného procesu lití a navržené varianty mají rozdílnou teplotou lití.

Výsledky simulačních výpočtů ukázaly, že mezi zvolenými variantami nejsou výrazné rozdíly, co se týká výskytu vad. V obou případech se jako největší problém ukázal vznik bublin. Na to poukazují zejména výsledky simulačního výpočtu u kritéria znázorňujícího množství zahlceného vzduchu ve formě. Ve výsledcích simulačních výpočtů se bere jako potenciálně problémový zahlcený vzduch ten, jehož koncentrace je vyšší než 15%. Hraniční hodnota koncentrace zahlceného vzduchu v odlitku, za kterou by se pak zahlcený vzduch neměl vůbec dostat je 25%. Zde jsou však oblasti, kde zahlcený vzduch stoupá až k hodnotám 35%. V těchto místech odlitku tedy můžeme očekávat vznik bublin. Příčinou těchto problémů bývá špatná prodyšnost formy. K jejich odstranění by tedy bylo vhodné zlepšit prodyšnost formy, případně do míst s největším množstvím zahlceného vzduchu přidat drobné výfuky. Riziko vzniku bublin potvrzuje i kritérium přetlaku vzduchu, kde můžeme vidět, že v místech nárazu dvou proudů taveniny v dutině formy dochází ke zvýšení tlaku a tyto místa jsou tedy náchylnější ke vzniku bublin. Toto kritérium je také součástí simulačního výpočtového programu Magma⁵. Místa vzniku bublin predikovaná těmito kritérii simulačního výpočtu jsou shodná s vadami na reálných odlitcích, viz kapitola 3.3.

Další možnou příčinou vzniku bublin v písních kroužcích jsou uvolněné plyny z pískové formovací směsi. Důvodem může být vyšší plynotvornost směsi, to však nebylo možné v našich podmínkách ověřit. Katedra strojírenské technologie při TU v Liberci totiž nevládní zařízení, které by umožnilo měřit danou směs při tak vysoké teplotě. Maximální



teplota, při které je na našem pracovišti v tuto chvíli možné měřit plynotvornost těchto materiálů je 1200°C.

Co se týká hodnocení výsledků porozity v rámci provedeného simulačního výpočtu, byla její maximální hodnota zjištěna ve čtvrtém patře odlitků u varianty 1 a její hodnota činí 3,046%. Při celkovém zhodnocení je pak výskyt porozity o něco vyšší u varianty 2, i tak je ale pravděpodobnost jejího vzniku minimální. U reálných odlitků též nebyly zjištěny žádné problémy se vznikem porozity. Avšak vzhledem k místům výskytu porozity, které odpovídají místům vad na reálných odlitcích, je možné, že některé bubliny jsou součtovou vadou vzniklou jak zahlceným vzduchem, tak právě porozitou.

Penetrace taveniny do formy a připečeniny, na které má výrazný vliv teplota lití, se vyskytují pouze v oblasti licího kúlu, případně v oblasti zářezů, což tedy nijak neovlivňuje kvalitu odlitků.

Při posuzování výsledků degradovaného bentonitu ve formovací směsi byl na základě simulačních výpočtů potvrzen předpoklad, že s vyšší teplotou lití roste i podíl degradovaného bentonitu ve formovací směsi. To je způsobeno tím, že s vyšší teplotou lití se forma více prohřívá a tudíž je větší množství směsi zasaženo degradační teplotou. U varianty 1, s teplotou lití 1470°C, bylo stanoveno množství tepelně degradované směsi na 1,3 kg, a z toho 0,116 kg činí degradovaný bentonit. U varianty 2, s teplotou lití 1420°C, byly hodnoty o něco nižší, množství tepelně degradované směsi činí 1,071 kg a z toho je 0,095 kg degradovaného bentonitu.

Na základě získaných výsledků degradovaného bentonitu bylo dále stanoveno množství bentonitu potřebného pro oživení formovací směsi v jedné dávce mísiče. Toto množství se skládá ze dvou hodnot, z bentonitu potřebného na doplnění k novému ostřívu a z bentonitu potřebného na doplnění k vratné směsi. První hodnota je u obou variant stejná, jelikož se do mísené dávky přidává vždy stejné množství nového ostříva. Druhá hodnota byla stanovena právě z množství degradovaného bentonitu získaného na základě simulačního výpočtu. Sečtením obou hodnot bylo získáno množství nového bentonitu potřebného pro oživení formovací směsi, které pro variantu 1 činí 5,19 kg a pro variantu 2 činí 4,65 kg. Při porovnání těchto výsledných hodnot (obou variant), s reálnou hodnotou množství nového bentonitu, používaného ve slévárně k oživení formovací směsi, které činí 4,5 kg, bylo zjištěno, že dávkování slévárny je lehce poddimenzované. Průměrně by tedy bylo vhodné přidat na každou oživovanou dávku cca 0,5 kg nového bentonitu navíc.



Výsledky simulačních výpočtů také ukázaly, že minimální teplota, kterou má tavenina kovu, když poprvé smočí danou část formy je u varianty 1 - 1346°C a u varianty 2 - 1314°C. Obě tyto teploty jsou poměrně vysoko nad teplotou likvidu, která je zde 1173°C. V úvahu by tedy přicházelo snížit lící teplotu, což by mělo pozitivní vliv na snížení množství degradované formovací směsi. Avšak bylo by nutné simulačním výpočtem ověřit, zda vlivem nižší teploty lití nedochází např. ke vzniku studených spojů a k nárůstu porozity odlitků, případně ke vzniku jiných vad. Vyhodnocením výsledků simulačního výpočtu odlitků písních kroužků se zaměřením na porozitu totiž bylo zjištěno, že s nižší teplotou lití hodnota porozity stoupá.



5. ZÁVĚR

Tato diplomová práce byla zaměřena na simulační výpočty tuhnutí a chladnutí odlitků použité jako nástroje pro zvýšení kvality výroby písních kroužků z litiny s lupinkovým grafitem ve slévárně litin Buzuluk, a.s.. Práce je rozdělena do dvou hlavních částí (teoretická a experimentální).

V teoretické části práce je popsána písková formovací směs, její jednotlivé složky, příčiny poškozování bentonitu ve formovacích směsích, a jejich možnosti oživování. Dále se pak práce věnovala litině, jako použitému materiálu a potenciálním vadám odlitků.

Experimentální (hlavní) část práce, byla zaměřena na vhodné navržení výpočetních variant odlévání písních kroužků a provedení jejich simulačních výpočtů pomocí softwaru Magma⁵. Současně se tato část práce zabývala zhodnocením dosažených výsledků simulačního výpočtu procesu lití písních kroužků ve slévárně litin Buzuluk, a.s., včetně plnění dutiny formy, tuhnutí a chladnutí odlitků a vyhodnocení degradace bentonitu ve formovací směsi. Na základě výsledků hodnot degradovaného bentonitu byla také provedena optimalizace oživování degradované směsi novým bentonitem. Dále se práce zabývala porovnáním vad zjištěných na základě výsledků simulačního výpočtu s vadami na reálných odlitcích.

Z výsledků a poznatků této diplomové práce je možno formulovat tyto dílčí závěry:

1. Výroba písních kroužků je složitá, nejen vzhledem k tomu že se odlévá do pískových formovacích směsí, které nejsou mnohdy homogenní v celém objemu formy, ale především vzhledem k velmi malým rozměrům těchto odlitků, k celkové výšce formy a k způsobu odlévání (technologie etážového lití). Pro odlitek řešený v rámci této diplomové práce bylo na formu použito 17 rámečků o tloušťce 35 mm umístěných nad sebou. V každém rámečku bylo zaformováno 6 odlitků písních kroužků o průměru 85 mm. Při odlévání pak dochází k natuhnutí spodních vrstev kroužků, ještě před dolitím celého objemu formy, což je specifické právě pro etážové lití písních kroužků.
2. Největší problémy při odlévání písních kroužků ve slévárně litin Buzuluk, a.s., zjištěné na základě simulačních výpočtů, jsou se vznikem bublin.
3. Vznik bublin v odlitku je především zapříčiněn zahlcením vzduchu vlivem špatné prodyšnosti formy. Bylo by tedy vhodné zlepšit prodyšnost formy, případně do problémových míst určených simulačními výpočty umístit drobné výfuky. Dále pak jsou některé bubliny zapříčiněny plyny uvolněnými



z formovací směsi, tedy tzv. zvýšenou plynotvorností slévárenské formovací směsi.

4. Vady odlitků pístitních kroužků, predikované simulačními výpočty řešenými v rámci této diplomové práce, se shodují s vadami na reálných odlitcích slévárny litin Buzuluk, a.s., viz kapitola 3.3.
5. Množství degradovaného bentonitu u varianty 1, tedy varianty lité z teploty 1470°C, činí 0,116 kg, u varianty 2, která byla lita z teploty 1420°C, činí 0,095 kg. Tyto výsledky potvrzují předpoklad, že množství degradovaného bentonitu roste s vyšší teplotou lití.
6. Množství nového bentonitu potřebného pro oživení jedné dávky formovací směsi činí u varianty 1 - 5,19 kg a u varianty 2 - 4,65 kg. Množství nového bentonitu používaného na oživení jedné dávky směsi ve slévárně Buzuluk, a.s., činí 4,5 kg. Dle výsledků vypočtených na základě simulačního výpočtu je tedy dávkování ve slévárně lehce poddimenzované. Průměrně by bylo tedy vhodné přidat na každou oživovanou dávku formovací směsi cca 0,5 kg nového bentonitu navíc.
7. Dle dosažených výsledků simulačních výpočtů by bylo také vhodné snížit používanou teplotu lití, která se nyní pohybuje v rozmezí 1470°C až 1420°C. Toto rozmezí je způsobeno tím, že z jedné licí pánve je odléváno několik forem, první forma je tedy odlévána s teplotou 1470°C, tavenina v licí pánvi pak postupně chladne a u poslední odlévané formy je licí teplota 1420°C. Při navrhování nižší teploty lití by tedy musel být na tento fakt brán ohled. Podnětem pro další experimentální práce tedy může být zjištění těchto hraničních hodnot teplot lití, kdy by muselo být simulačním výpočtem ověřeno, zda při nově navržených teplotách lití, neklesá teplota při odlévání poslední formy pod teplotu likvidu, a že nedochází ke vzniku většímu množství vad. V této práci toto nebylo řešeno s ohledem na již značnou časovou náročnost simulačních výpočtů.
8. Jelikož má pístitní kroužek rozhodující vliv na životnost celého motoru automobilu, jeho výkon i ekonomický provoz, je na něm stále co zlepšovat. Vývoj spalovacích motorů není ukončen a na tento důležitý element tedy budou kladeny stále nové požadavky.



9. Ekonomické hodnocení dosažených výsledků nebylo vzhledem k rozsahu této diplomové práce řešeno.



Literatura

- [1] HRABÁK, V. *Pístní kroužky: Konstrukce, výroba, provoz*. Hořovice: Reprografické studio CHARLIE s.r.o.
- [2] NOVÁ, I. 1997. *Slévárenské formy (Vybraní statě přednášek)*. Liberec. Interní výuková pomůcka.
- [3] NOVÁ, Iva, Iva NOVÁKOVÁ a Jiří BRADÁČ. 2006. *Technologie I.: slévání, svařování*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 169 s. ISBN 80-737-2052-3.
- [4] KAISR, J. 2012. *Sledování základních vlastností slévárenských ostrživ*. Liberec. Bakalářská práce. TU v Liberci.
- [5] RUSÍN, K. 1987. *Disperzní formovací materiály: Návod ke cvičení*. Vyd. 1. Praha: Nakladatelství techn. Lit, 103 s.
- [6] NEUDERT, A.: Řízení jakosti jednotné formovací směsi. *Slévárství*. 2000, č.2-3, str.90-99.
- [7] PICEK, P a J MACHUTA.: Praktické použití progresivního způsobu oživování bentonitové formovací směsi novým bentonitem. In: *Sborník přednášek: XVIII. prezentace výrobků a služeb pro slévárství*. Beroun: KERAMOST akciová společnost, 2014, str. 29-35.
- [8] NEUDERT, A.: Řízení oživování jednotné formovací směsi. *Slévárství*. 2012, č.3-4, str. 79-84.
- [9] NEUDERT, A.: Řízení vlastností jednotných formovacích směsí pro litinové odlitky. *Slévárství*. 2007, č.11-12, str. 523-528.
- [10] ROUČKA, J. 1998. *Metalurgie litin*. Vyd. 1. Brno: PC-DIR, 166 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-1263-1.
- [11] GEDEONOVÁ, Zora. 2000. *Metalurgia liatin*. 1. vyd. Košice: Hutnícka fakulta Technickej univerzity, 288 s. ISBN 80-709-9516-5.
- [12] Šedá litina. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. 26. 3. 2015 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%A0ed%C3%A1_litina
- [13] Tvárná litina. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. 17. 5. 2013 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Tv%C3%A1rn%C3%A1_litina
- [14] ELBEL, T. 1992. *Vady odlitků ze slitin železa: Klasifikace, příčiny a prevence*. Brno: Matecs.
- [15] OTÁHAL, V. 2008. *Vady odlitků - Atlas Vad Železné a neželezné slitiny*. Brno: MCFC/TEP.
- [16] Slévárenské simulační programy. 2005. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/slevarenske-simulacni-programy.html>
- [17] Simulační program Magma. In: *Archives of foundry engineering* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://www.afe.polsl.pl/index.php/en/3081/simulacni-program-magma.pdf>
- [18] KOTAS P. a ŠPAČEK M. 2013. *Magma academy: Základní školení – Gravitační lití*. Pardubice. MAGMA Gießereitechnologie GmbH.



- [19] NOVÁ, Iva, Jiří MACHUTA a Iva NOVÁKOVÁ. 2012. *Castings processing*. Vyd. 1. Liberec: Technical University of Liberec, 154 s. ISBN 978-80-7372-822-9.
- [20] MACHUTA, Jiří, Iva NOVÁ a Iva NOVÁKOVÁ. 2014. *Slévárenské formy*. Vyd. 1. V Liberci: Technická univerzita, 165 s. ISBN 978-80-7494-083-5.



Seznam obrázků

Obr. 2. 1 Rovnovážný diagram Fe-C, Fe-Fe ₃ C	19
Obr. 3. 1 Odlitý písní kroužek ze slévárny litin Buzuluk, a.s.	41
Obr. 3. 2 Model sestavy odlitků s vtokovou soustavou	43
Obr. 3. 3 Výkres přípravku nahrazujícího licí jamku.....	44
Obr. 3. 4 Perspektiva geometrie	47
Obr. 3. 5 Model písního kroužku s vytvořenou sítí	47
Obr. 3. 6 Kvalita výpočtové sítě	48
Obr. 3. 7 Teplotní pole v čase 10 s	51
Obr. 3. 8 Teplota při plnění	52
Obr. 3. 9 Čas plnění spodního patra.....	53
Obr. 3. 10 Přetlak vzduchu	54
Obr. 3. 11 Zahlcený vzduch.....	55
Obr. 3. 12 Zahlcený vzduch v koncentraci 15% a vyšší	56
Obr. 3. 13 Křivky minimálních teplot v odlévaném materiálu.....	58
Obr. 3. 14 Křivky středních teplot v odlévaném materiálu	58
Obr. 3. 15 Podíl tekuté fáze v čase 20 s	60
Obr. 3. 16 Podíl tuhé fáze v čase 20 s.....	61
Obr. 3. 17 Teplotní uzly	62
Obr. 3. 18 Připečeníny.....	64
Obr. 3. 19 Připečeníny - druhé patro	64
Obr. 3. 20 Penetrace taveniny do pískové formy	65
Obr. 3. 21 Porozita	66
Obr. 3. 22 Vady odlitků 1	68
Obr. 3. 23 Vady odlitků 2	69
Obr. 3. 24 Vady odlitků 3	69
Obr. 3. 25 Vady odlitků 4	70
Obr. 3. 26 Výstupní graf hodnot z výpočtu Magma ⁵	71
Obr. 3. 27 Diferenční termická analýza Sabenilu	72
Obr. 3. 28 Upravený graf výstupních hodnot z výpočtu Magma ⁵ pro variantu 1	72
Obr. 3. 29 Upravený graf výstupních hodnot z výpočtu Magma ⁵ pro variantu 2.....	73
Obr. 3. 30 Zobrazení degradace formovací směsi.....	74



Seznam tabulek

Tab. 2. 1 Třídění slévárenských vad odlitků	25
Tab. 3. 1 Základní potřebná data pro simulační výpočty plnění a tuhnutí litin	45
Tab. 3. 2 Výsledky porozity v jednotlivých patrech	66
Tab. 3. 3 Výsledné hodnoty degradované směsi a bentonitu.....	73
Tab. 3. 4 Oživení směsi v mísiči dle slévárny a dle softwaru Magma ⁵	75



Seznam příloh

- Příloha č. 1 Složení a vlastnosti použité formovací směsi
- Příloha č. 2 Teplota při plnění - "Filling Temperature"
- Příloha č. 3 Zahlcený vzduch v koncentraci 15% a vyšší
- Příloha č. 4 Porozita
- Příloha č. 5 Mikrostruktura
- Příloha č. 6 Materiálové vlastnosti
- Příloha č. 7 Výpočet degradované směsi, degradovaného bentonitu a oživení formovací směsi



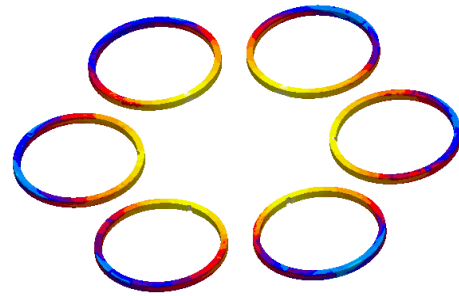
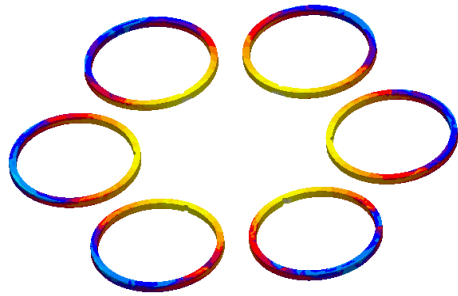
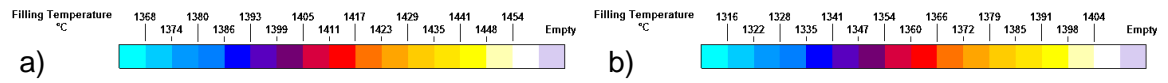
PŘÍLOHY

Příloha č. 1 Složení a vlastnosti použité formovací směsi

č. zk.	Vlastnost	č. vzorku	101.	352.	459.	596.	708.	846.	935.	26.	125.	228.	334.	443.	623.	753.	Průměr
		označení	JFS														
		datum odb.	5.2.13	17.4.13	20.5.13	1.7.13	15.8.13	24.9.13	29.10.13	10.1.14	13.2.14	19.3.14	10.4.14	15.5.14	9.7.14	27.8.14	
1	vlhkost směsi	%	3,12	3,05	3,10	3,0	3,25	3,17	2,97	3,96	3,83	3,47	3,64	3,32	2,94	3,26	3,29
2	spěchovatelnost	%	36	40	40	42	42,5	38,5	38	37	35	38	36	36	35	37,5	37,96
4	prodyšnost	n.j.p.	60	65	70	60	80	70	80	65	60	70	50	50	60	65	64,64
5	vaznost	kPa	133,7	138,5	155,7	160,2	157,5	139,4	152,2	181,9	151,2	159,8	178,6	127,6	176,5	146,7	154,25
6	pevnost ve štěpu	kPa	29	27	29	31	31	29	28	35	29	37	37	29	32	38	31,50
7	poměr štěp/vaznost		0,217	0,195	0,186	0,194	0,197	0,208	0,184	0,192	0,192	0,231	0,207	0,227	0,181	0,259	0,21
9	pevnost v tahu v kondenzační zóně	kPa	2,2	1,8	2,3	2	2,9	2,6	2,4	2,8	3	3,3	3,3	2,8	2,6	2,8	2,63
10	hmotnost zkušebního válečku	g	148,8	148,8	148,6	148	148,5	147,5	148,8	149,8	151	148,3	150	150,7	149	150,8	149,19
11	obsah vyplavitelných látek	%	11,64	12,04	10,62	12,8	11,16	11,44	10,58	12,92	12,68	11,92	13,3	11,76	11,6	11,42	11,85
13	podíl zrn pod 0,125 mm	%	23,15	19,55	19,72	22,27	15,14	18,38	16,95	17,8	14,93	16,3	22,15	20,56	19,21	18,68	18,91
14	adsorpce MM	mg/g směsi	28,43	23,93	25,12	24,33	30	27,13	26,34	31,94	32,88	29,11	37,1	31,77	26,29	29,41	28,84
15	používaná známka bentonitu		Sabenil + Sabenil K														
16	adsorpce MM u nového bentonitu	mg/g bent.	337,26	321,21	332,61	309	333,52	323	341,62	319	339	312,55	315	316,64	320,91	325,33	324,76
17	obsah aktivního bentonitu (MM)	%	8,43	7,45	7,55	7,87	8,99	8,40	7,71	10,01	9,70	9,31	11,78	10,03	8,19	9,04	8,89
18	bentonit účinný	%															0,00
19	ztráta žiháním	%	4,09	3,78	4,26	4,48	3,77	4,28	3,62	4,06	3,7	3,5	3,9	4,23	4,16	3,85	3,98
20	obsah těkavých látek	%	1,64	1,61	1,74	2,14	1,98	2,11	1,73	2,04	1,76	1,84	2,18	2,21	2,2	2,22	1,96
21	obsah lesklého C (orientačně)	%	0,06	0,08	0,06	0,09	0,04	0,05	0,03	0,07	0,04	0,05	0,04	0,11	0,08	0,03	0,06
22	obsah C zbytku	%	2,45	2,17	2,52	2,34	1,79	2,17	1,89	2,02	1,94	1,66	1,72	2,02	1,96	1,63	2,02
26	elektrická vodivost směsi	μS/cm	241	264	263	272	272	266	264	324	368	358	392	357	349	335	308,93
27	střední zrno ostřiva d ₅₀ po výplavě	mm	0,167	0,172	0,174	0,173	0,186	0,179	0,187	0,171	0,184	0,172	0,164	0,171	0,175	0,178	0,18
28	pravidelnost zrnitosti ostřiva		54,4	55,5	54,7	52,9	55,8	55,6	54,9	58,1	56	58,3	57,8	55,4	55	55,6	55,71

Příloha č. 2 Teplota při plnění - "Filling Temperature"

První patro odlitků ve formě - a) varianta 1; b) varianta 2

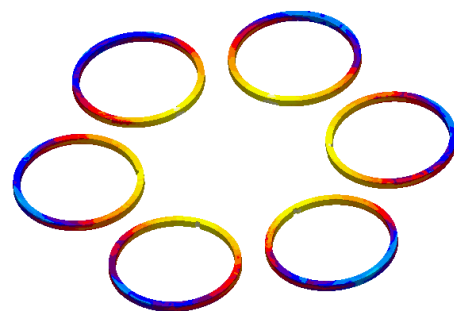
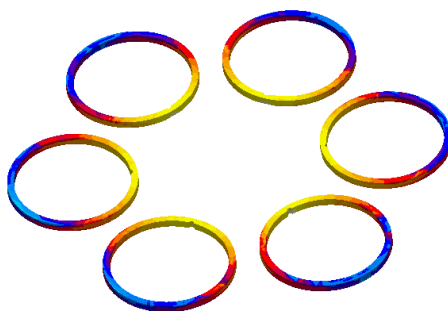
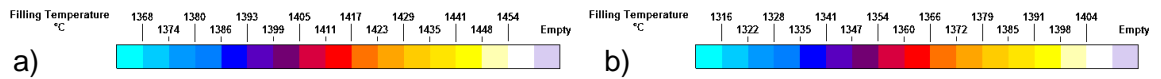


v02
Filling Temperature
20.000s

v03
Filling Temperature
20.000s



Poslední patro odlitků ve formě - a) varianta 1; b) varianta 2



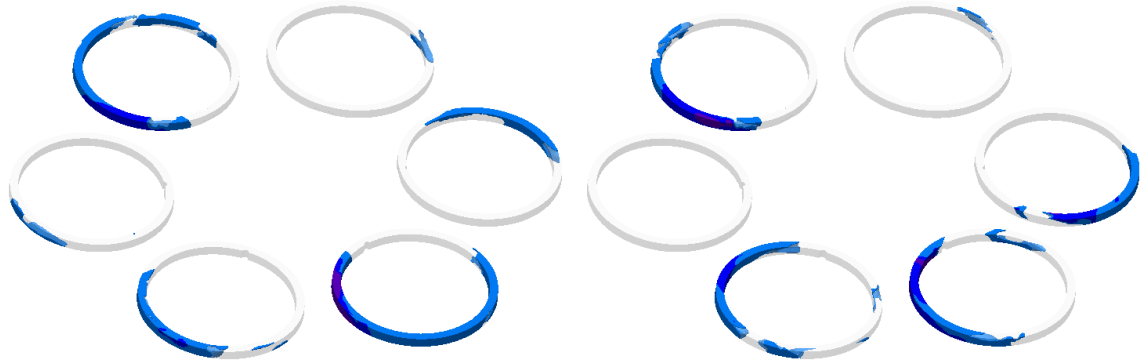
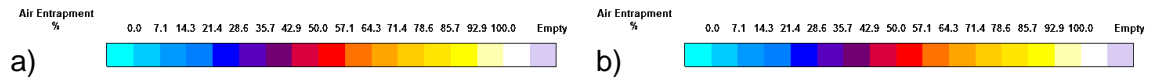
v02
Filling Temperature
20.000s

v03
Filling Temperature
20.000s



Příloha č. 3 Zahlcený vzduch v koncentraci 15% a vyšší

První patro odlitků ve formě - a) varianta 1; b) varianta 2

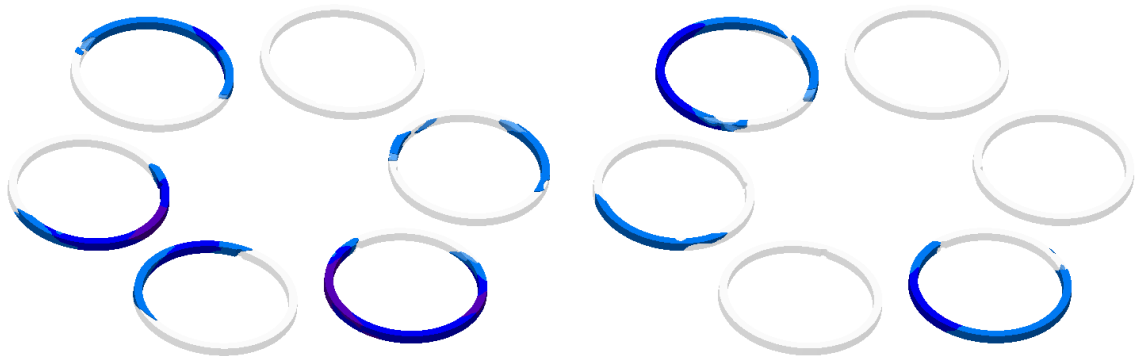
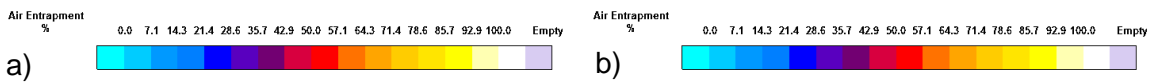


v02
Air Entrapment
20.000% 100.00 %

v03
Air Entrapment
20.000% 100.00 %



Šesté patro odlitků ve formě - a) varianta 1; b) varianta 2

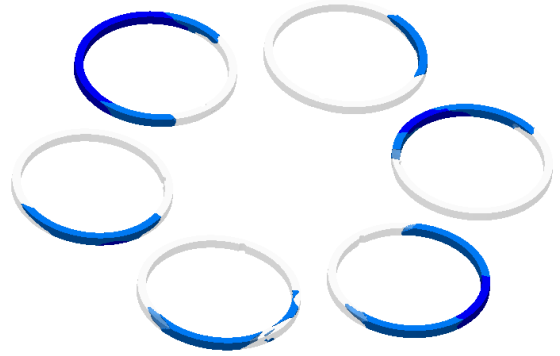
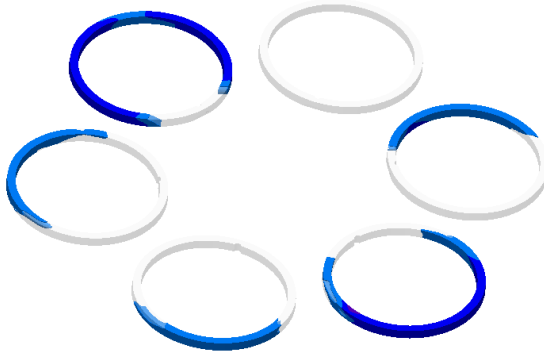
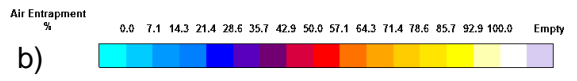
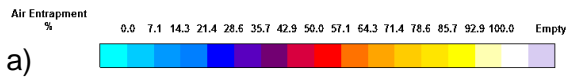


v02
Air Entrapment
20.000% 100.00 %

v03
Air Entrapment
20.000% 100.00 %



Jedenácté patro odlitků ve formě - a) varianta 1; b) varianta 2

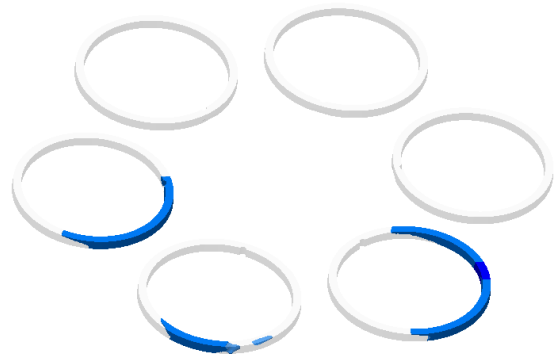
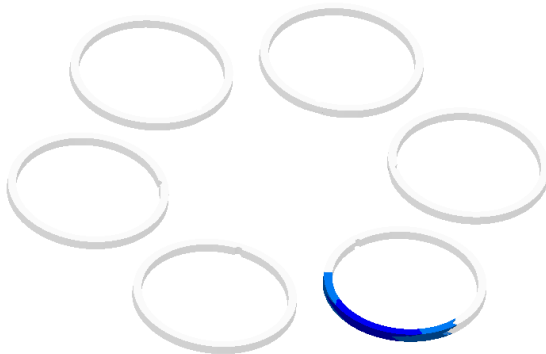
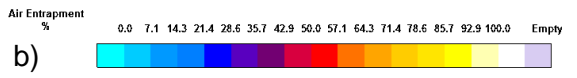
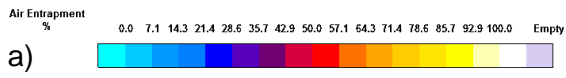


v02
Air Entrapment
20.000s 100.00 %

v03
Air Entrapment
20.000s 100.00 %



Poslední patro odlitků ve formě - a) varianta 1; b) varianta 2



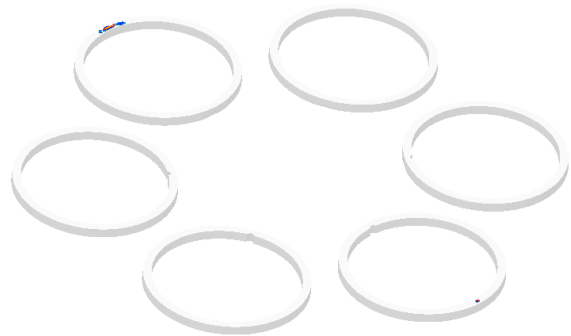
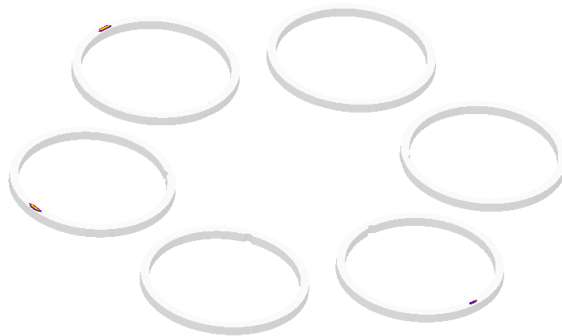
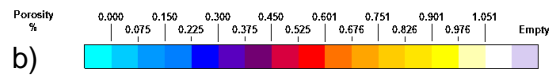
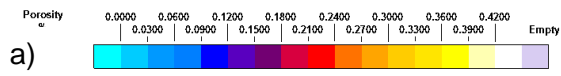
v02
Air Entrapment
20.000s 100.00 %

v03
Air Entrapment
20.000s 100.00 %



Příloha č. 4 Porozita

První patro odlitků ve formě - a) varianta 1; b) varianta 2

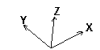
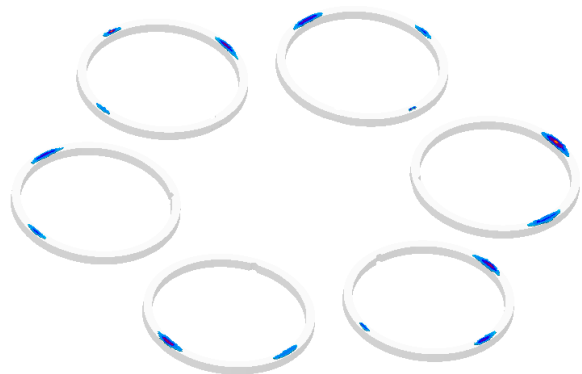
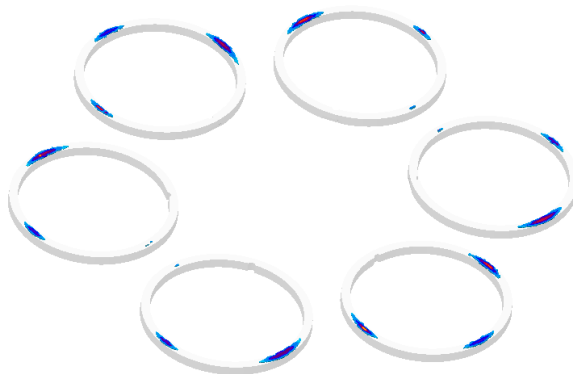
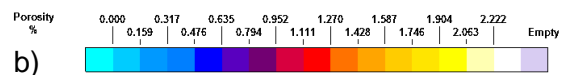
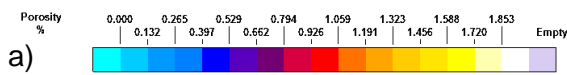


v02
Porosity
183.070s 100.00 %

v03
Porosity
172.502s 100.00 %



Šesté patro odlitků ve formě - a) varianta 1; b) varianta 2

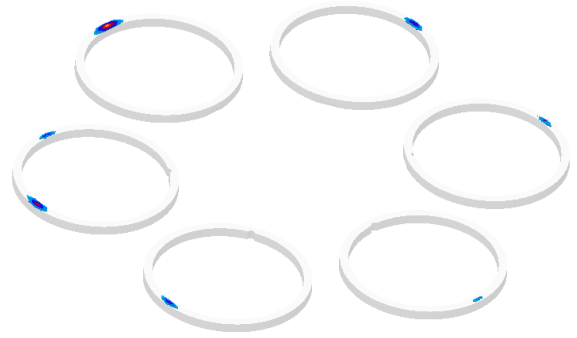
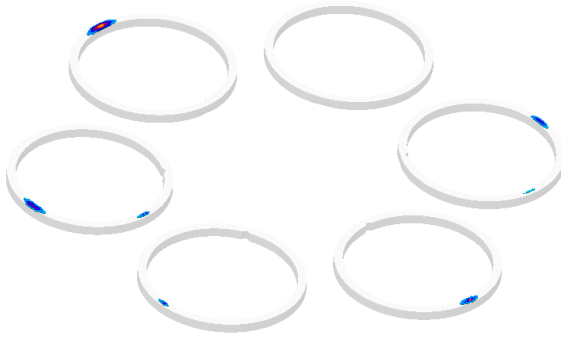
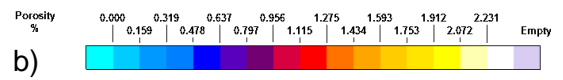
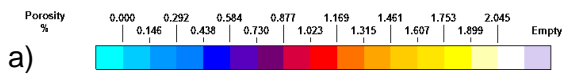


v02
Porosity
183.070s 100.00 %

v03
Porosity
172.502s 100.00 %



Jedenácté patro odlitků ve formě - a) varianta 1; b) varianta 2

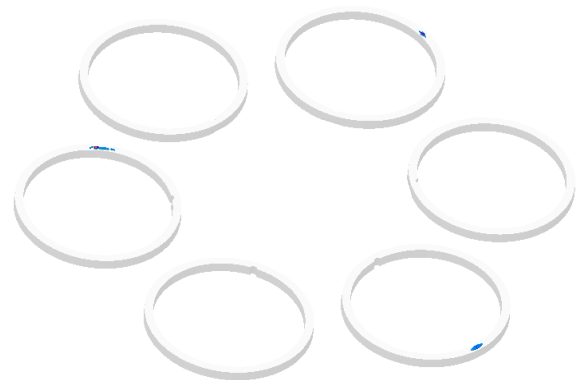
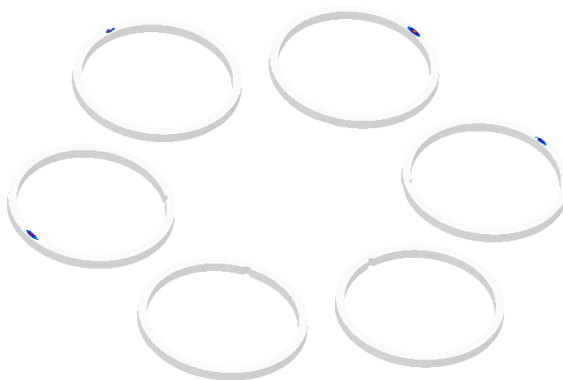
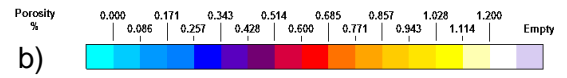
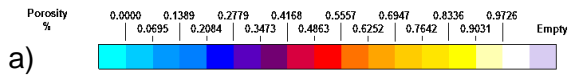


v02
Porosity
183.070s 100.00 %

v03
Porosity
172.502s 100.00 %



Poslední patro odlitků ve formě - a) varianta 1; b) varianta 2



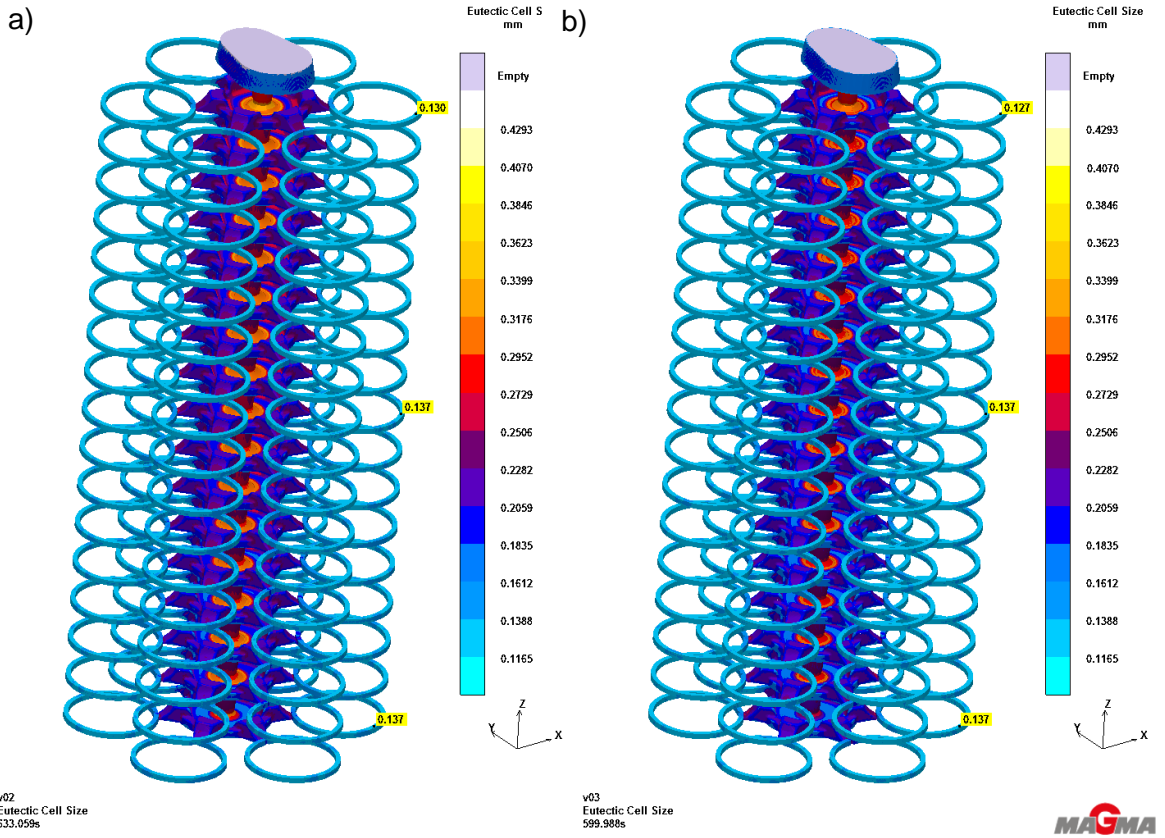
v02
Porosity
183.070s 100.00 %

v03
Porosity
172.502s 100.00 %

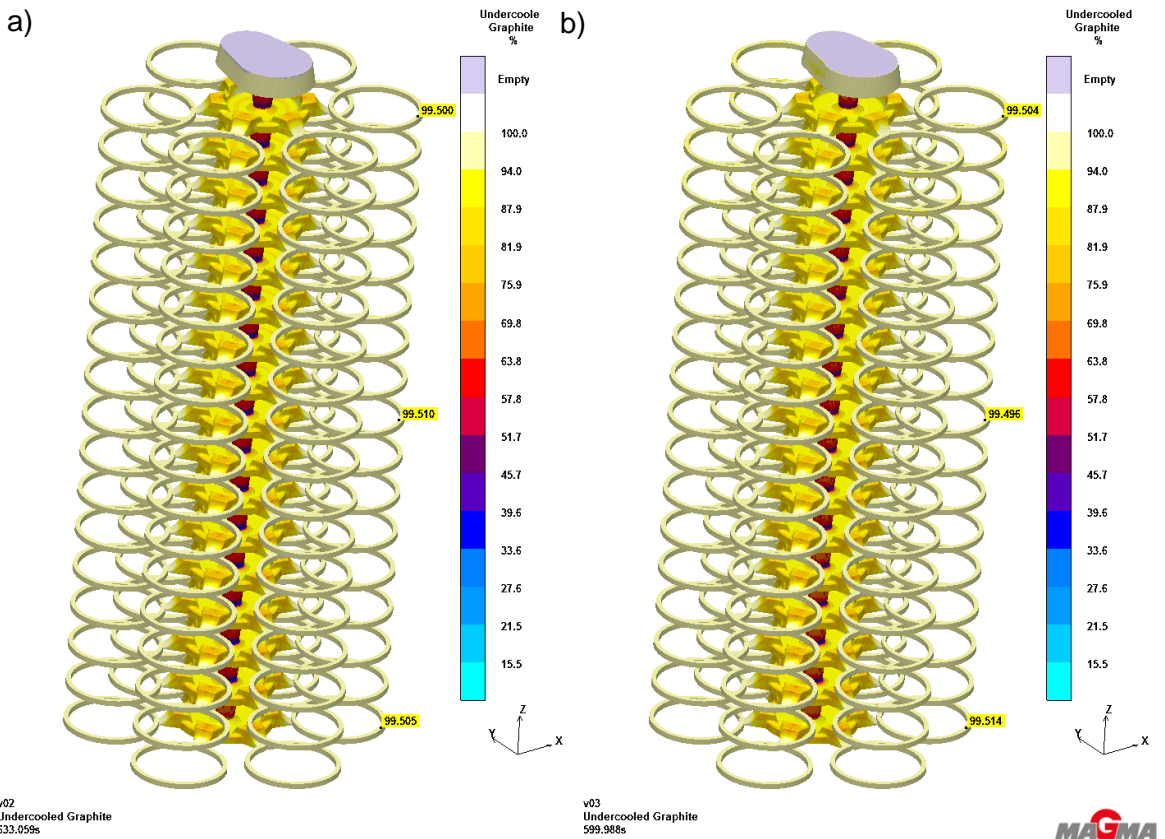


Příloha č. 5 Mikrostruktura

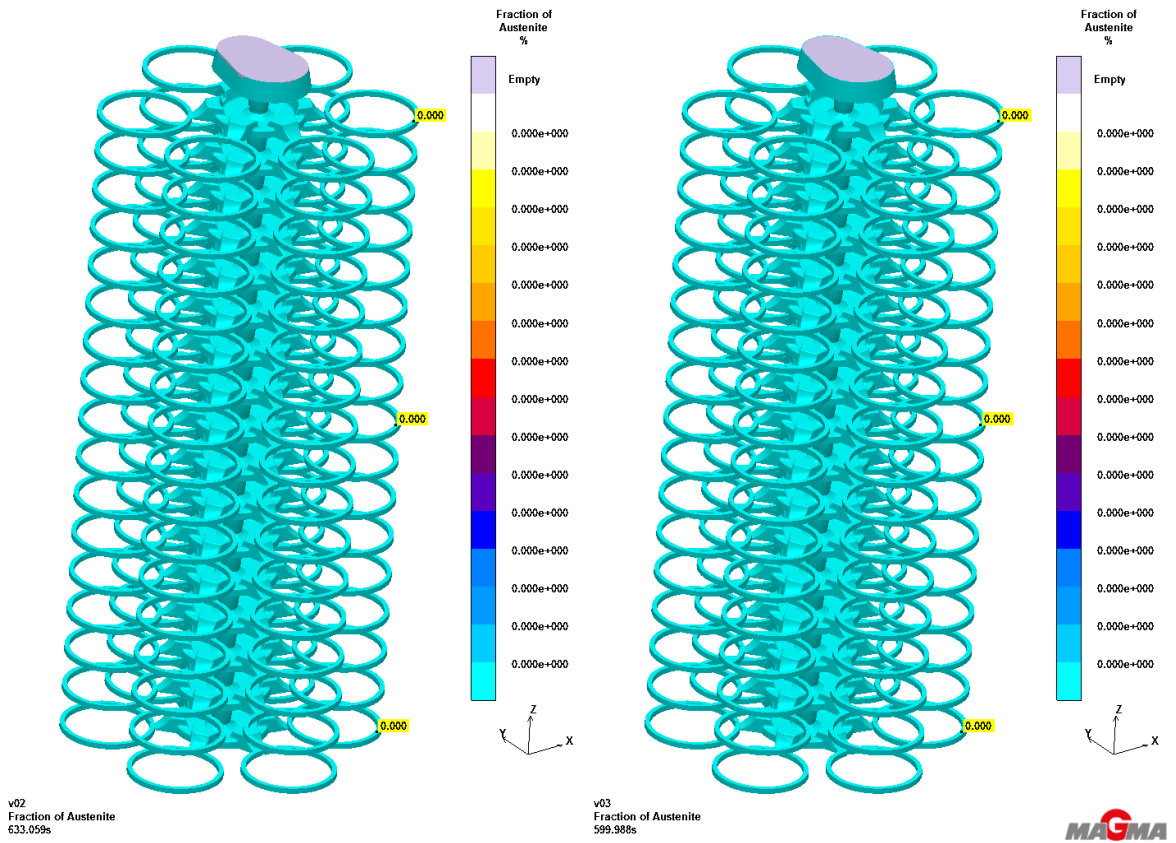
Velikost eutektických buněk – “Eutectic Cell Size” - a) varianta 1; b) varianta 2



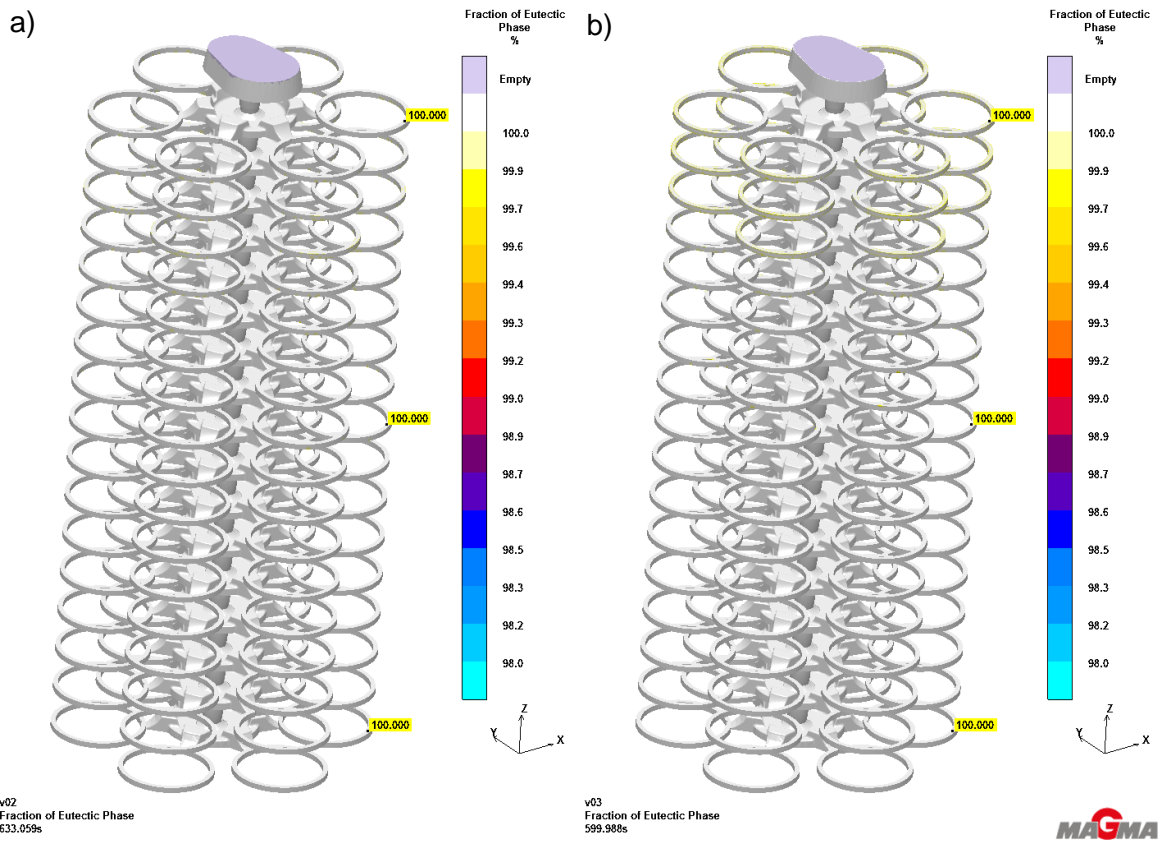
Podíl podchlazeného grafitu – “Undercooled Graphite” - a) varianta 1; b) varianta 2



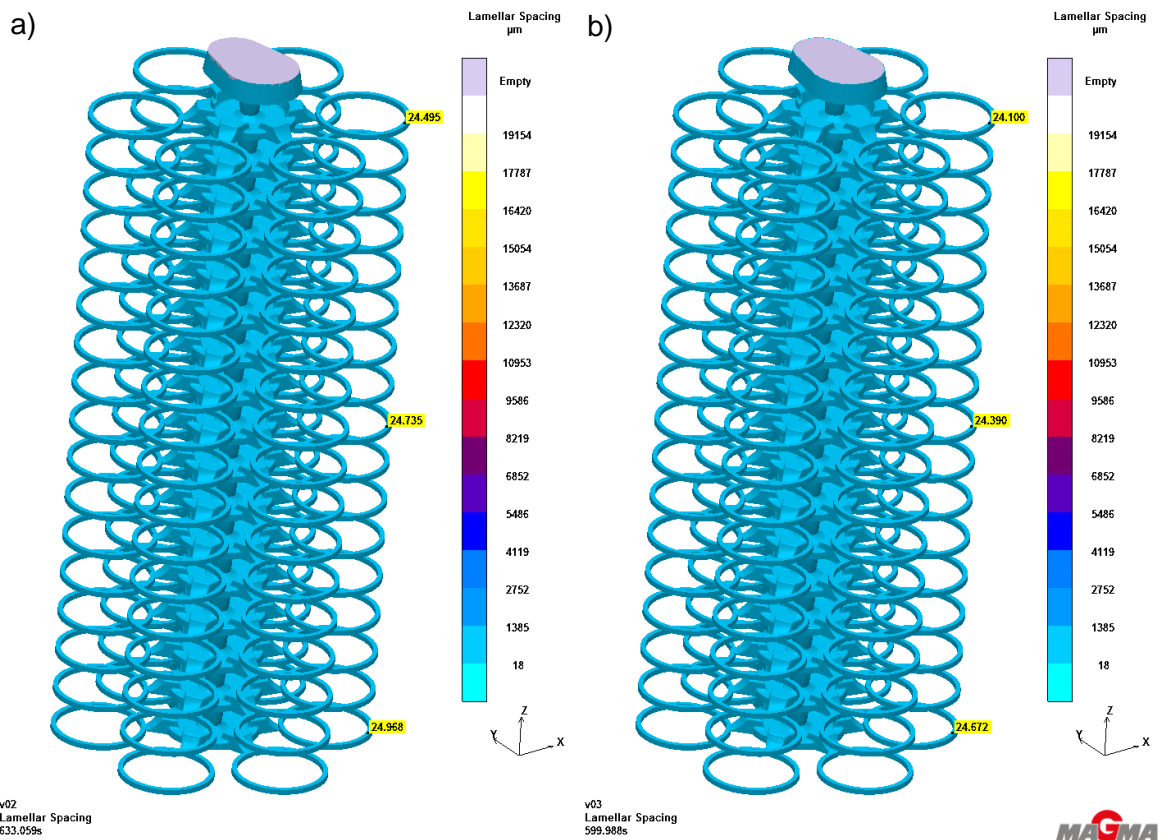
Podíl austenitu – “Fraction of Austenite“ - a) varianta 1; b) varianta 2



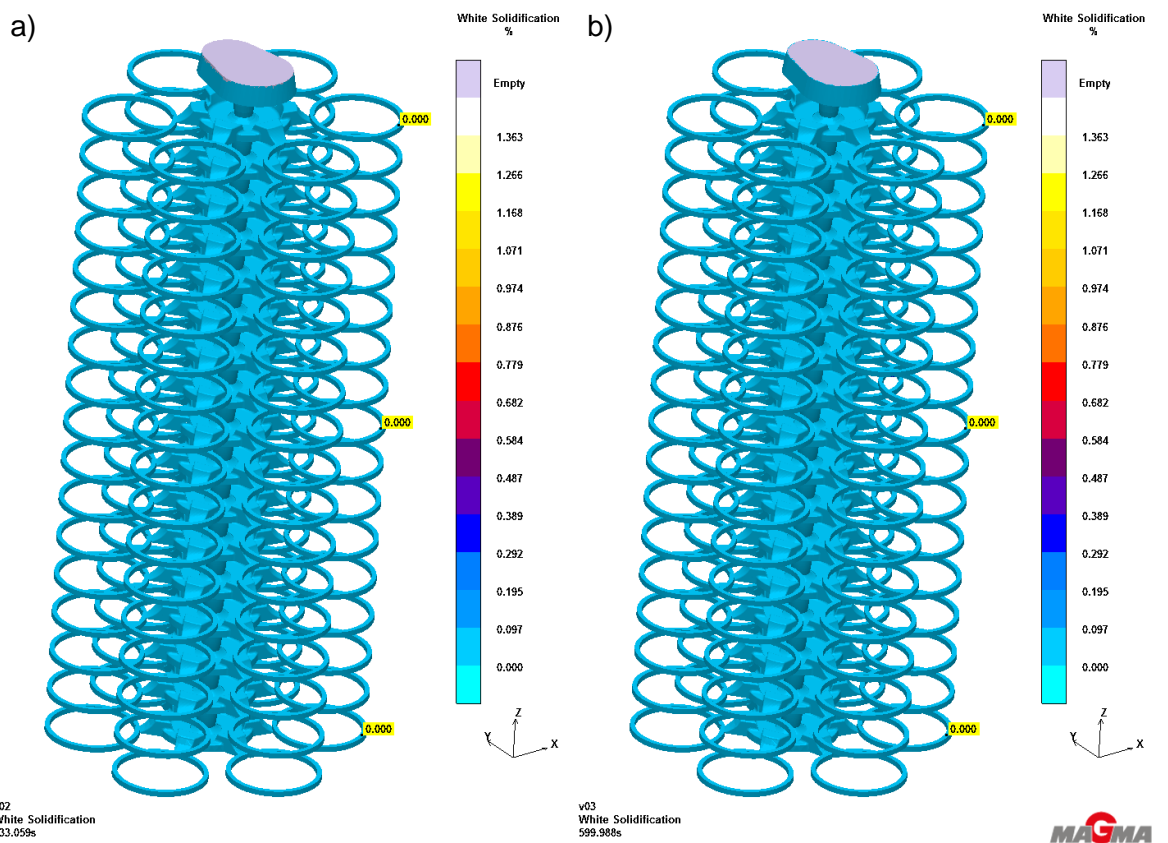
Podíl eutectické fáze – “Fraction of Eutectic Phase“ - a) varianta 1; b) varianta 2



Vzdálenost lamel – “Lamellar Spacing“ - a) varianta 1; b) varianta 2

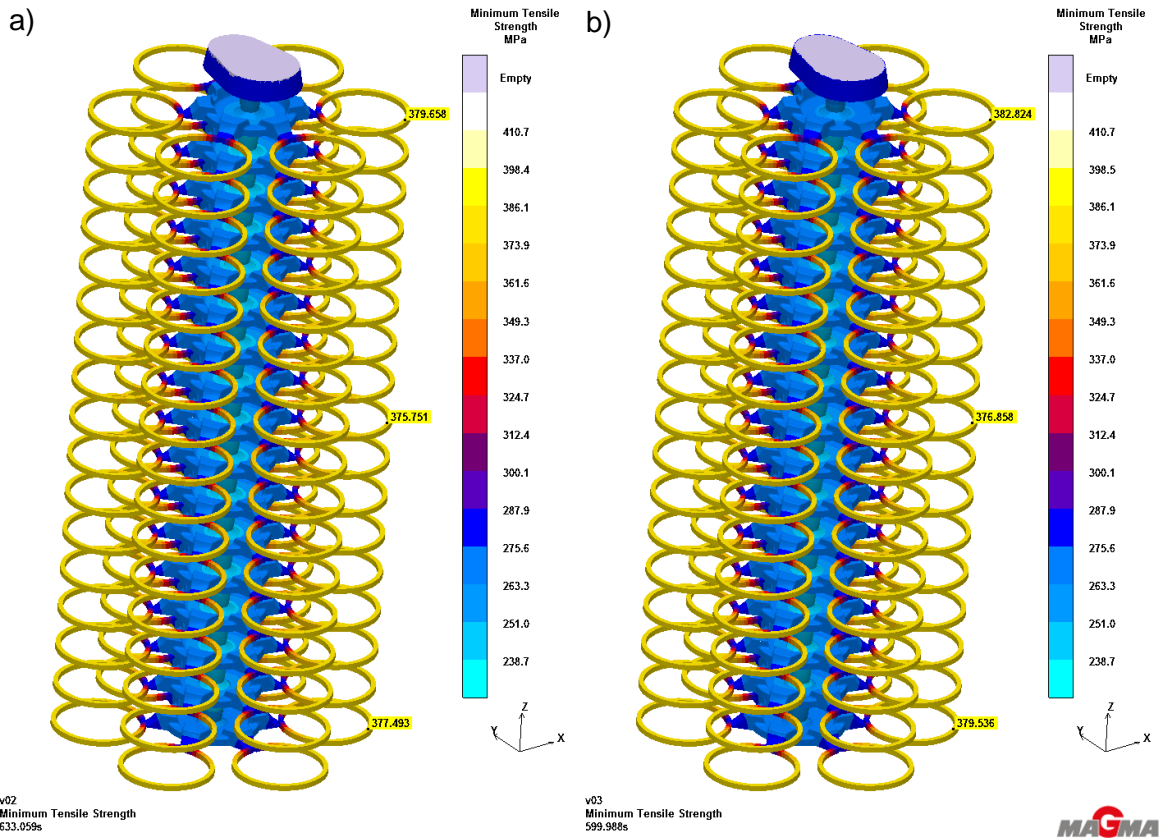


Zákalka – “White Solidification“ - a) varianta 1; b) varianta 2

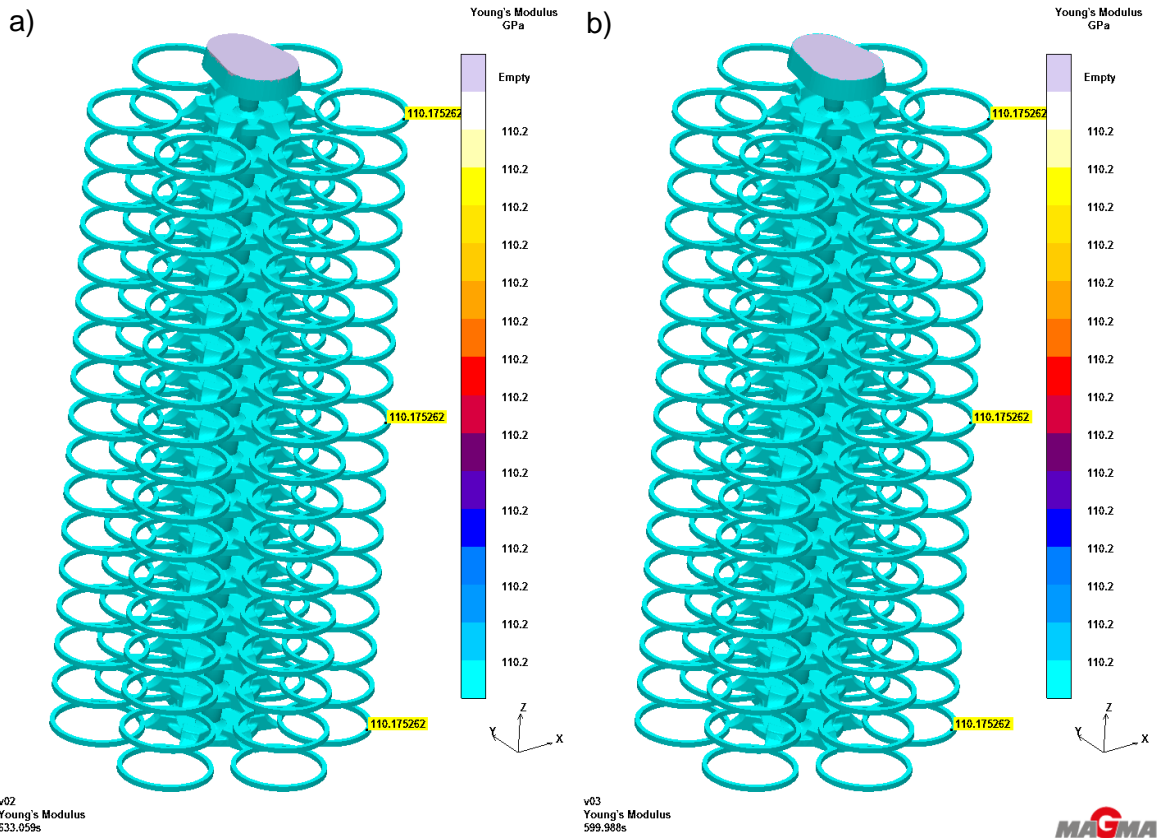


Příloha č. 6 Materiálové vlastnosti

Minimální pevnost v tahu – “Minimum Tensile Strength“ - a) varianta 1; b) varianta 2

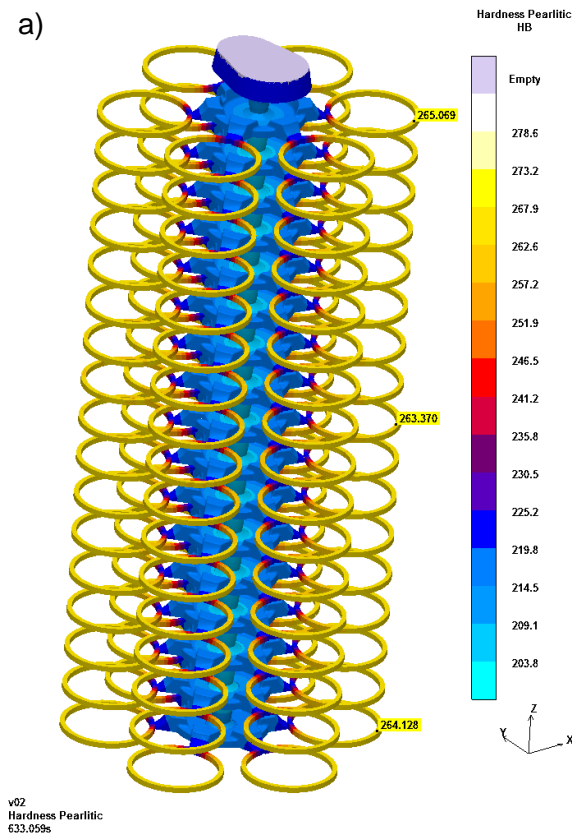


Youngův modul – “Young’s Modulus“ - a) varianta 1; b) varianta 2

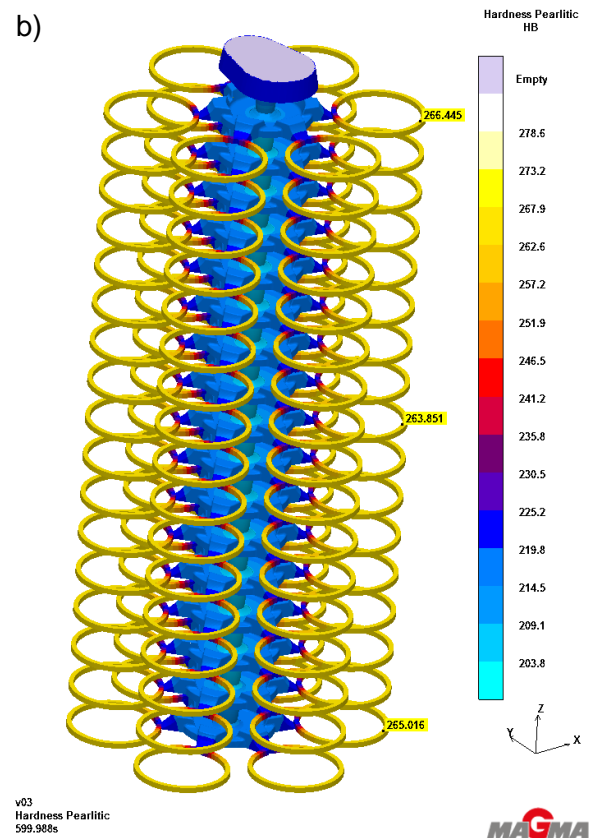


Tvrđost – “Hardness Pearlitic” - a) varianta 1; b) varianta 2

a)



b)



Příloha č. 7 Výpočet degradované směsi, degradovaného bentonitu a oživení formovací směsi

Hmotnost směsi potřebné na jednu formu 49,66 kg

Množství bentonitu ve směsi 8,89%

Množství degradované směsi u varianty 1 2,617%

Množství degradované směsi u varianty 2 2,156%

Varianta 1

Varianta 2

Množství degradované směsi v kg

Množství degradované směsi v kg

100%..... 49,66 kg

100%..... 49,66 kg

2,617%..... x

2,156%..... x

$$\left(\frac{2,617}{100}\right) = \left(\frac{x}{49,66}\right)$$

$$\left(\frac{2,156}{100}\right) = \left(\frac{x}{49,66}\right)$$

$$x = \frac{2,617}{100} \cdot 49,66 = 1,300 \text{ kg}$$

$$x = \frac{2,156}{100} \cdot 49,66 = 1,071 \text{ kg}$$

Množství degradovaného bentonitu v kg

Množství degradovaného bentonitu v kg

100%..... 1,300 kg

100%..... 1,071 kg

8,89%..... x

8,89%..... x

$$\left(\frac{8,89}{100}\right) = \left(\frac{x}{1,300}\right)$$

$$\left(\frac{8,89}{100}\right) = \left(\frac{x}{1,071}\right)$$

$$x = \frac{8,89}{100} \cdot 1,300 = 0,116 \text{ kg}$$

$$x = \frac{8,89}{100} \cdot 1,071 = 0,095 \text{ kg}$$

Hmotnost vratné směsi

1269 kg

Hmotnost nového ostřiva

25 kg

Množství bentonitu potřebného na oživení vratné směsi

$$\frac{1269}{49,66} = 25,554 \text{ forem}$$

Varianta 1

Varianta 2

$$25,554 \cdot 0,116 = 2,96 \text{ kg}$$

$$25,554 \cdot 0,095 = 2,43 \text{ kg}$$

Množství bentonitu potřebného na oživení k novému ostřivu

$$\frac{25 \cdot 8,89}{100} = 2,22 \text{ kg}$$