

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VYUŽITÍ SIMULACE PRO PREDIKCI VAD A HODNOCENÍ ODLITKŮ Z AI SLITIN

TITLE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR ŠOLC

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. JAROSLAV ČECH, CSc.

BRNO 2008

ABSTRAKT

Cílem práce je srovnání použití tří slévárenských simulačních programů pro predikci vzniku porezity a parametru DAS v tlakově litém hliníkovém odlitku. Vzájemným porovnáním výsledků simulací a experimentálně naměřených hodnot ze vzorků odebraných z odlitku byla zjištěna dobrá schopnost programů v odhadu parametru DAS. Simulační softwary se shodují i v polohách míst s předpokládaným výskytem porezity, avšak velikost této porezity nebyla experimentálně ověřena, protože by bylo nutné mít vzorky přesně z míst dle simulací.

Klíčová slova

simulační software, MAGMAsoft, ProCAST, SIMTEC, porezita, DAS – Dendrite Arm Spacing

ABSTRACT

The aim of this work is comparing three casting process simulation programs for porosity and microstructure prediction capabilities for die-casting. After confronting these results with experimentally measured data taken from real castings it could be said that simulation is pretty accurate for DAS microstructure prediction and hot-spot areas. Amount of measured porosity could not be compared with predicted values because specimens were not taken from the exact hot-spot areas.

Key words

casting simulation software, MAGMAsoft, ProCAST, SIMTEC, porosity, microstructure, DAS - Dendrite Arm Spacing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠOLC, P. *Využití simulace pro predikci vad a hodnocení odlitků z Al slitin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 60 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jaroslav Čech, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Využití simulace pro predikci vad a hodnocení odlitků z Al slitin* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

.....
Jméno a příjmení diplomanta

Poděkování

Děkuji tímto Prof. Ing. Jaroslavu Čechovi CSc. za cenné rady a připomínky při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Dagmar Bařinové Ph.D., Ing. Jiřímu Šilhanovi a Ing. Vladimíru Krutišovi Ph.D. za vypracování simulací a konzultace jejich výsledků. Zvláštní poděkování věnuji své rodině za velkou podporu po celou dobu mého studia a všem, kteří se jakkoliv podíleli na zpracování diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	7
Úvod.....	9
1 Simulační software ve slévárenství	10
1.1 Simulační software obecně	10
1.2 Numerické metody.....	10
1.2.1 Metoda konečných prvků – Finite Element Method - FEM.....	10
1.2.2 Metoda konečných diferencí – Finite Differences Method - FDM.....	11
1.2.3 Srovnání FEM a FDM.....	12
1.3 Popis konkrétních simulačních programů.....	12
1.3.1 SIMTEC / WinCAST	12
1.3.2 ProCAST	13
1.3.3 MAGMASoft.....	13
1.4 Potřebné údaje před zahájením simulace	14
1.4.1 Materiálové parametry.....	14
1.4.2 Okrajové podmínky	16
2 Technologie tlakového lití hliníku	17
2.1 Princip technologie	17
2.1.1 Licí stroj se studenou komorou	17
2.1.2 Moderní trendy tlakového lití	18
2.2 Porezita v tlakově litých odlitcích.....	19
2.2.1 Vliv parametrů procesu	19
2.2.2 Naplynění kovu	22
2.2.3 Puchýřování	23
2.2.4 Vliv parametrů formy	25
2.2.5 Snižování porezity v kostce.....	26
2.3 Slitina.....	26
2.3.1 Slitiny Al-Si-Cu	26
2.3.2 AlSi9Cu3(Fe).....	27
2.3.3 Metody zkoušení	28
2.3.4 Nejčastější vady	29
2.4 Parametr DAS (Dendrite Arm Spacing)	30
2.4.1 Vliv DAS na mechanické vlastnosti	30
3 Experimentální část.....	32
3.1 Příprava vzorků	32
3.1.1 Volba místa pro odběr vzorků	32
3.1.2 Zkouška tahem.....	33
3.1.3 Postup přípravy vzorků.....	33

3.2 Sběr dat.....	34
3.2.1 Měření DAS.....	34
3.2.2 Predikce DAS v simulačních programech	35
3.2.3 Porezita - tvarové hodnocení	36
3.2.4 Porezita - procentuální výskyt	37
3.2.5 Predikce porezity v simulačních programech.....	38
3.3 Výsledky měření	40
3.3.1 DAS.....	40
3.3.2 Porezita	41
3.4 Výroba odlitku.....	42
3.4.1 Technologie.....	42
3.4.2 Základní parametry liti a stroje	43
3.5 Charakteristická data simulací.....	44
4 Srovnání výsledků ve zkoumaných místech	45
4.1 Místo A	45
4.1.1 Popis oblasti.....	45
4.1.2 Zhodnocení výsledků	47
4.2 Místo B	47
4.2.1 Popis oblasti.....	47
4.2.2 Zhodnocení výsledků	48
4.3 Místo C	48
4.3.1 Popis oblasti.....	49
4.3.2 Zhodnocení výsledků	50
4.4 Místo D	51
4.4.1 Popis oblasti.....	51
4.4.2 Zhodnocení výsledků	52
4.5 Místo E	53
4.5.1 Popis oblasti.....	54
4.5.2 Zhodnocení výsledků	56
4.6 Shrnutí výsledků míry porezity.....	56
4.7 Vyhodnocení DAS ve všech místech odlitku	56
Závěr	58
Seznam použité literatury	59

ÚVOD

Ani slévárenská technologie jako jedno z tradičních odvětví strojírenství se v posledních desetiletí nevyhnulo nástupu výpočetní techniky pro řízení, předvídání a hodnocení procesu výroby. Naopak vznikla celá řada programů specializovaných přímo na problémy slévárenství, mezi které patří předně simulační programy, které pomáhají slévačům k dosažení kvalitnějších odlitků, menší zmetkovitosti a optimalizaci technologie. Simulace lití se celosvětově vyvinula na velmi důležitý nástroj ve slévárenství a dosáhla vysoké úrovně. S její pomocí je možno numericky spočítat proces např. proudění a tuhnutí taveniny, výslednou makrostrukturu, deformace a napětí v objemu odlitku a formy. Výhodou simulace je možnost odladit celý proces a najít nejideálnější parametry ještě před začátkem výroby a tím ušetřit mnoho nákladů spojených s hledáním vhodných parametrů během výroby metodou pokus-omyl.

Předmětem použitým pro srovnávání v této práci je hliníkový odlitek litý pod tlakem. Vysokotlaké lití je velmi atraktivní technologie díky její vysoké produktivitě a výslednými odlitky téměř konečného tvaru (near net-shape). Je ovšem nutné počítat s možným výskytem několika typů vad – jednou z nejdůležitějších je porezita. Podle příčiny vzniku se v tlakově litých odlitcích může objevit několik typů porezity, výsledná míra porezity v odlitku bývá jejich kombinací. Snížení porezity lze dosáhnout řízením parametrů procesu jako je rychlost plnění, intenzita chlazení, množství a typ postřiku formy nebo odvodu vzduchu formy. Nastavení těchto parametrů se dá odzkoušet právě v některém ze simulačních programů.

Cílem této práce je porovnat výsledky predikce míry a výskytu porezity a parametru DAS ve třech simulačních softwarech – MAGMASoft od firmy MAGMA GmbH, SIMTEC od firmy RWP a ProCAST od firmy ESI Group. Pro porovnávání byl zvolen tlakově litý odlitek, jehož geometrie i parametry lití jsou známy a byly použity pro všechny softwary. Z několika kusů odlitků byly odebrány vzorky pro metalurgické výbrusy, na kterých byla stanovena míra porezity a parametr DAS – vzdálenost sekundárních os dendritů. Tyto hodnoty také sloužily pro posouzení věrohodnosti simulací.

1 SIMULAČNÍ SOFTWARE VE SLÉVÁRENSTVÍ

1.1 Simulační software obecně

Simulací rozumíme chování fyzikálního nebo abstraktního systému, který zjednodušuje prováděnou studii. Úkolem simulačních softwarů je matematické modelování a optimalizace zadaných procesů a dějů s využitím vysoce výkonných počítačů. V případě slévárenských simulačních programů se jedná o tyto procesy:

- plnění formy
- tuhnutí a chladnutí odlitků (ve formě i po vyjmutí z formy)
- vznik struktury a utváření vlastností odlitku
- vznik vnitřních pnutí a deformací, popř. sledování struktury

Kroky simulace:

1. **preprocessing** – tvorba či import geometrie, vstupní podmínky, materiál, parametry stroje a procesu
2. **processing** – výpočet dle zadaných hodnot
3. **postprocessing** – zobrazení výsledků

1.2 Numerické metody

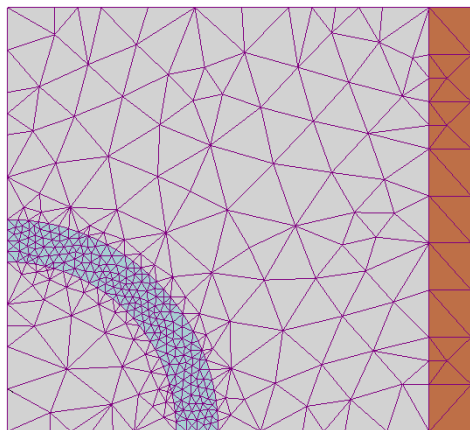
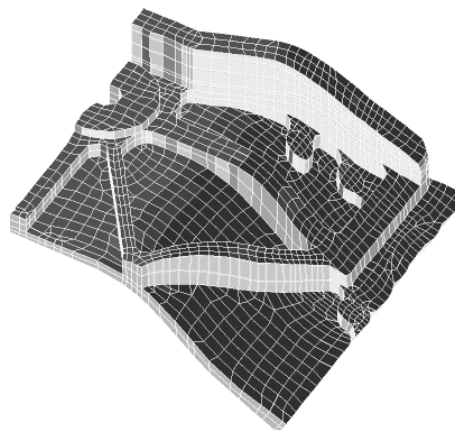
Řešení tepelných úloh v systémech s rozloženými parametry lze provést analyticky, numericky nebo experimentálně. V počítačových simulačních výpočtech tepelných dějů mezi odlitkem a slévárenskou formou mají uplatnění numerické metody. Jejich podstata závisí na diskretizaci proměnných, k čemuž přispívá typická opakovatelnost jednoduchých algebraických operací určitého typu - to odpovídá operačním vlastnostem číslicových počítačů. [3]

Numerické metody nám umožňují získat řešení dané tepelné úlohy v konečném počtu diskrétních míst, a to jak v celé oblasti, tak i pouze v povrchové části. K řešení úloh se používá jedna ze dvou numerických metod – metoda konečných prvků nebo metoda konečných diferencí.

1.2.1 Metoda konečných prvků – Finite Element Method - FEM

Z hlediska matematiky představuje metoda konečných prvků (dále jen FEM) numerickou metodu řešení (parciálních) diferenciálních rovnic v kontinuu. FEM provádí prostorovou diskretizaci většinou tzv. triangulací řešené oblasti, nad kterou se hledá po částech spojitá funkce $t(x,y,z)$. Tím je hranice řešené oblasti nahrazena polynomy. Rozložení této funkce na každém jednotlivém elementu řešené oblasti může být předpokládáno různě, např. ve tvaru lineární funkce (nejčastěji), nebo kvadratického polynomu. [1]

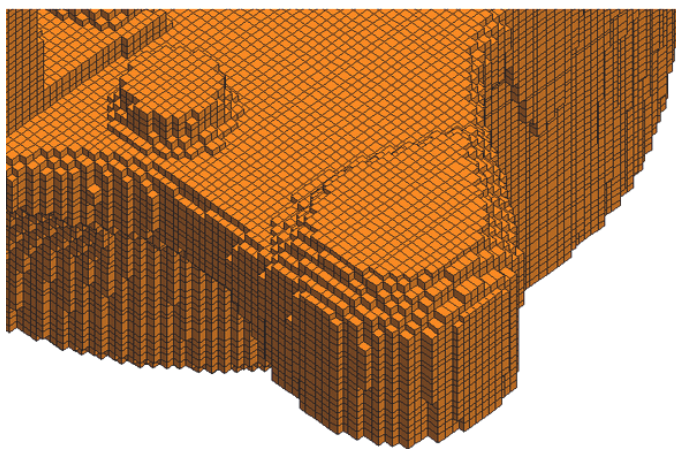
Základní elementy popisující plochu jsou plošky ve tvaru trojúhelníka nebo čtyřúhelníka, ve 3D potom čtyřstěny, hranoly či pyramidy. Ve speciálních aplikacích mohou mít definovány i nepolynomialy tvar (elipsa, kružnice).

**Obr. 1.1:** FEM 2D síť**Obr. 1.2:** FEM 3D síť

V technické praxi se ukázalo, že FEM je velmi silná při řešení právě úloh mechaniky poddajných těles. Od 70. let 20. století se používá jednak v mnoha čistě analytických aplikacích (ADINA, ANSYS...), tak i v CAD systémech jako prostředek pro rychlé návrhové výpočty (Pro-Engineer) a ve specializovaných technických programech, např. pro simulace havárií (PAM-Crash) nebo technologických procesů, mezi které patří i slévárenský simulační program Simtec od německé firmy RWP, který bude použit v této práci a o kterém bude zmíněno v kapitole 1.3.

1.2.2 Metoda konečných diferencí – Finite Differences Method - FDM

Podstatou metody konečných diferencí (dále jen FDM) je pokrytí oblasti, v níž hledáme řešení diferenciální rovnice, sítí, která se skládá z konečného počtu uzlových bodů. V každém bodě sítě se nahradí derivace v těchto uzlových bodech příslušnými diferencemi, tj. lineárními kombinacemi funkčních hodnot v okolních bodech. Po záměně derivací diferencemi ve všech uzlových bodech dostáváme soustavu lineárních algebraických rovnic s neznámými hodnotami posunů v těchto uzlových bodech.

**Obr. 1.3:** 3D model metodou FDM

Modelované těleso se skládá ze základních elementů ve tvarů krychle, čím více elementů je použito, tím detailnější je popis tělesa.

Na tvorbě sítě objemových elementů dle metody FDM je založen simulační program MAGMASoft od firmy Magma GmbH (viz. kapitola 1.3) a dále například program QuikCAST od společnosti ESI Group.

1.2.3 Srovnání FEM a FDM

I když obě metody (FEM a FDM) jsou založeny na jisté diskretizaci kontinua, má FEM ve srovnání s FDM určité výhody. Dovoluje lepší geometrický popis a vystižení okrajových podmínek při složitých tvarech integrační oblasti. Využívá místně zjemněné diskretizace ve významných částech řešené oblasti bez zvláštních úprav výpočtového programu. Umožňuje jednodušší použití vyšších typů aproximace hledané funkce s cílem zvýšení přesnosti řešení. [3]

Metoda FDM používá pouze elementy tvaru krychle, což vede ke špatné aproximaci tvarů modelovaného tělesa, jelikož většina předmětů nemá pravouhlé tvary. Toto se může zdát pouze jako optický problém, ale jde o mnohem více – např. při modelování dutého tenkostěnného válce nelze dosáhnout konstantní tloušťky stěny válce a proto při simulaci tuhnutí není dosaženo homogenního teplotního přestupu.

Je-li potřeba přesněji definovat část modelu, FEM tohoto může dosáhnout pomocí lokálního zjemnění, zatímco místa s jednoduchou geometrií mohou být popsány hrubší sítí. Naproti tomu ke zpřesnění u metody FDM je nutné zvýšit počet elementů v celém objemu modelu. Z toho vyplývá vyšší potřebný výpočetní výkon při stejné přesnosti jako u FEM. [4]

Mezi další výhody FEM patří možnost z jednoho geometrického modelu simulovat různé druhy chování materiálu, jako např.:

- zbytkové napětí
- deformace
- pevnostní výpočet

Přesný popis tvaru odlitku, formy a jádra metodou FEM je též možné použít při Rapid prototypingu.

1.3 Popis konkrétních simulačních programů

1.3.1 SIMTEC / WinCAST

Německá firma RWP, stojící za vývojem slévárenského simulačního programu SIMTEC, byla založena v roce 1984 a od té doby se stala jednou z předních na poli FEM simulací. Vedoucí projektu Dr. Ing. Konrad Weiss a jeho tým začal s vývojem numerické simulace na slévárenském institutu při Technické univerzitě v Cáchách již v roce 1979. Za posledních 20 let našel program SIMTEC uplatnění u více než 350 zákazníků, mezi které patří i většina předních automobilních výrobců v Evropě.

SIMTEC lze používat na jakémkoliv počítači s platformou UNIX, pro operační systémy Windows (NT, 2000/XP) je k dispozici verze programu s názvem WinCAST.

Program poskytuje celé spektrum slévárenských simulací plnění formy a tuhnutí pro tyto způsoby odlévání:

- lití do pískových forem
- vysokotlaké lití
- nízkotlaké lití
- lití na vypařitelný model
- trvalé formy
- přesné lití

Dále je možno simulovat i následující speciální procesy:

- kontinuální lití
- odstředivé lití
- Squeeze casting
- lití v polotuhém stavu

Výsledky simulace

Z programu SIMTEC lze získat tyto výsledky:

Plnění formy – fronta tekutého kovu, chování tekutého kovu, teplotní změny

Tuhnutí – čas a rychlost tuhnutí, teplotní pole, isotermy, teplotní gradienty, defekty a porozitu, oblasti neztuhlého kovu, chladnutí ztuhlého kovu, makroskopická mikrostruktura zrna, DAS

Teplotní pnutí a deformace – teplotní napětí, tlaková a tahová napětí, deformace

Řízení procesu lití – objem, hmotnost, termofyzikální data, termomechanická data, teploty a časy procesů

1.3.2 ProCAST [15]

Software ProCAST od francouzské firmy ESI Group patří k lídrům na trhu simulací metodou konečných prvků. Poskytuje efektivní a přesná řešení problémů ve slévárenství, umožňuje předvídat chování celého procesu od plnění formy, tuhnutí, odhad výsledné mikrostruktury a termomechanické simulace. Vizualizuje chování materiálu ve formě a poté lze upravovat jednotlivé parametry již v prvotní fázi výrobního procesu.

ProCAST pokrývá široké spektrum slévárenských technologií, mezi které patří:

- nízkotlaké a vysokotlaké lití
- lití do pískových forem, gravitační lití do kokil, sklopné lití
- přesné lití, lití do skořepinových forem
- lití na vypařitelný model, odstředivé lití

1.3.3 MAGMAsoft

MAGMAsoft (dále jen „MAGMA“) je simulační program založený na simulaci tepelného toku, dynamiky tečení, napětí materiálu, změn struktury v průběhu tuhnutí při uvažování reálných technologických podmínek odlévání. Rozsah analýzy umožňuje řešení jak masivních ocelových odlitků odlévaných gravitační metodou do písku, přes odlévání hořčíku a slitin mědi, tak i tlakové

lití drobných odlitků ze slitin hliníku. Systém pochopitelně umožňuje použití chladítek, exotermických obkladů a zásypů a dolévání nálitků.[5]

Tento software používá celosvětově desítky velkých slévárenských podniků, např. BMW AG (Něm.), Hyundai (Korea), Voest Alpine (Švýc.) a John Deere (USA).

K řešení simulací různých metod lití a procesů slouží v programu MAGMAsoft řada doplňkových modulů, které dovolují přesné nastavení všech parametrů daného procesu.

MAGMAsteel – výpočty konvekce při tuhnutí ocelových odlitků, předpověď segregace hlavních legujících prvků, simulace tepelného zpracování ocelových odlitků

MAGMAhpc – modul pro vysokotlaké lití

MAGMAlpc – modul pro nízkotlaké lití

MAGMAlostfoam – simulace pro lití na vypařitelný polystyrénový model

MAGMAdisa – efektivní nástroj pro optimalizaci procesu na strojích DISAMATIC

MAGMAthixo – provádí simulaci vysokotlakého lití za použití speciálních podmínek tečení, daných thixotropním litím

1.4 Potřebné údaje před zahájením simulace

Před každou simulací plnění formy a tuhnutí kovu je třeba znát některé údaje o litém materiálu, ale také materiálu formy a jejich vzájemné interakci. Nyní krátce popíši jednotlivé parametry a jejich vliv.

1.4.1 Materiálové parametry

Měrná hmotnost

Měrná hmotnost slitin lehkých kovů se většinou udává v závislosti na teplotě. Pro čistý hliník a pro srovnání i pro některé další kovy jsou tyto teploty uvedeny v tabulce 1.1.

Vliv malé odchylky měrné hmotnosti na výsledek simulace plnění a tuhnutí je spíše malý.[8]

Tab. 1.1: Měrné hmotnosti vybraných kovů [8]

	hliník	hořčík	zinek
Měrná hmotnost – tuhý stav 20°C (kg/m ³)	2700	1740	7140
Měrná hmotnost – tekutý stav (kg/m ³)	2385	1590	6560

Specifické teplo

Specifické teplo (měrná tepelná kapacita) udává množství tepla (v Joulech) potřebného k ohřátí 1 kilogramu látky o 1 Kelvin.

U konkrétní hliníkové slitiny a ochlazení taveniny během plnění formy o 50K se získá tepelné množství 50kJ. Oproti tomu tavné teplo na kilogram hliníku činí 397kJ, tedy přibližně osminásobek. Při předpokládané teplotě vyjmutí z formy 450°C, tedy teplotní rozdíl 200K, se předá na formu 200kJ

tepla. Přesto má teplo taveniny stále ještě dvakrát tak velký vliv. Malé odchylky hodnot specifického tepla nemají zaznamenanatelný vliv na výsledek simulace.[8]

Skupenské teplo

Skupenské teplo vyjadřuje množství tepla potřebné ke změně skupenství. V případě tavení je nutné toto teplo dodat, naopak při tuhnutí ho odvést.

Se zvyšujícím se podílem křemíku ve slitině hliníku se analogicky zvyšuje i skupenské teplo.

Tab. 1.2: Skupenská tepla dle [8] a použitá v simulačních programech

	hliník	AlSi9Cu3	MAGMA	ProCAST	SIMTEC
Skupenské teplo na hmotnost (kJ/kg)	397	463	479	417	-
Skupenské teplo na objem (kJ/dm ³)	940	1120	-	-	1080

Teplota likvidu a solidu

Slitiny tuhnou na rozdíl od čistých kovů v intervalu tuhnutí, v němž se uskutečňuje změna fáze. Tento interval je ohraničen teplotou likvidu, na které slitina začíná tuhnout a teplotou solidu, kdy je tuhnutí dokončeno. Během fázové přeměny se předává skupenské teplo (tab. 1.2). Při tuhnutí dochází ke smršťování, které při nedostatečném přísunu tekutého kovu může vést ke vzniku dutin.

Simulační modely, které berou předávání tepla v intervalu tuhnutí variabilně, vyžadují co možná nejpřesnější údaje o intervalu tuhnutí.

Tab.1.3: Teploty likvidu a solidu v simulačních programech

	AlSi9Cu3(Fe) - DIN	MAGMA	ProCAST	SIMTEC
Teplota likvidu (°C)	600	578	585	600
Teplota solidu (°C)	490	479	504	490

Tepelná vodivost

Kvůli velmi krátkým plnicím časům se neprojeví malé odchylky tepelné vodivosti licího materiálu během licího procesu. Během tuhnutí, které se u tlakového lití odehrává v rozmezí několika sekund, se dobrá tepelná vodivost slitin omezí relativně špatnou tepelnou vodivostí materiálu formy.

Pozn: Údaje z programu MAGMA nebyly dostupné.

Tab. 1.4: Tepelná vodivost [W/(K.m)] v závislosti na teplotě [8,12]

Teplota	hliník	AlSi9Cu3	ProCAST	SIMTEC
20 °C	238	110-120	116	155
300 °C	-	-	153	185
500 °C	-	-	165	200
700 °C	95	-	80	120

Viskozita – kinematická / dynamická

Změna viskozity během ochlazování hraje velmi důležitou roli. Ochlazování tekutého kovu při plnění formy má za následek silný vzrůst viskozity, u tenkostěnných odlitků může dojít i ke ztuhnutí kovu před zaplněním dutiny formy. Proto se obvykle volí doba plnění formy co nejkratší, aby se tomuto nedolití zabránilo.

Změna viskozity se může v simulačních programech uvádět jako funkce teploty nebo tekutých eventuálně pevných podílů taveniny.

1.4.2 Okrajové podmínky

Teplota formy

Provozní teploty forem pro tlakové lití se pohybují obvykle mezi 100°C až 300°C, v případě hliníkových slitin kolem 200°C. Vyšší teploty formy prodlužují dobu tuhnutí a také licí dráhu, jsou tedy výhodnější pro tenkostěnné odlitky.

Při porovnání s výše uvedenými parametry je možnost ovlivňování při lití prostřednictvím teploty spíše malá.[8]

Licí teplota

Licí teplota je důležitým parametrem pro simulaci. Tato teplota zcela neodpovídá teplotě v peci, je třeba určit ztráty ve vtokové soustavě mezi licí komorou a okrajem dutiny formy vlastního odlitku. Tavenina předává teplo na díly licího stroje a kokilu. Tento pokles teploty platí pro stroje s teplou komorou i pro stroje se studenou komorou.

Rychlost taveniny

Rychlost taveniny se udává na okraji modelu. Může se vypočítat prostřednictvím poměrů ploch mezi průřezem licího pístu a průřezem zářezu ze známé rychlosti pohybu pístu. Mezi dosud uvedenými parametry má rychlost taveniny v zářezu a z ní vyplývající doba plnění ten největší význam.

Koeficient přestupu tepla

Při tlakovém lití rozlišujeme dva různé stavy přestupu tepla. Nejprve při plnění formy je tento koeficient závislý na rychlosti plnění, bývá vyjádřen jednou hodnotou. Po ukončení plnění formy a započatém tuhnutí odlitku nastávají zcela jiné podmínky. Tepelný přestup závisí na geometrii odlitku, při tuhnutí a smršťování je třeba počítat s vytvořením spáry a tedy velmi výraznou změnou velikosti přestupu tepla. Pro správný výpočet je nutné znát co nejlépe kontaktní podmínky v různých úsecích formy.

Drsnost povrchu

Drsnost povrchu formy má dvojitý význam při lití. Při plnění formy drsnější povrch zpomaluje proudění taveniny u stěn formy a ve středu proudu je poté rychlost vyšší. Oproti tomu u forem s relativně hladkým povrchem proudí tavenina s více rovnoměrným rozložením rychlosti v průřezu kanálu.

Při tuhnutí odvádí drsnější povrch více tepla oproti hladšímu díky své větší ploše.

2 TECHNOLOGIE TLAKOVÉHO LITÍ HLINÍKU

Jde o specifickou metodu výroby odlitků vhodnou pro výrobu velkých sérií rozměrově i hmotnostně menších tenkostěnných konstrukčně složitých odlitků, s přesnými rozměry, s velmi hladkými povrchy. Tlakové lití (lití pod tlakem) je průmyslová metoda produkce odlitků především pro automobilový, motocyklový a letecký průmysl, ale také pro další průmyslová odvětví, která potřebují velká množství odlitků jednoho druhu, především ze slitin hliníku, hořčíku, zinku a případně dalších nízkotavitelných slitin.[7]

Technologie používaná slévárnami pro tlakové lití tvoří samostatný obor v celém slévárenství, neboť se výrazně odlišuje od klasické výroby odlitků do pískových slévárenských forem.

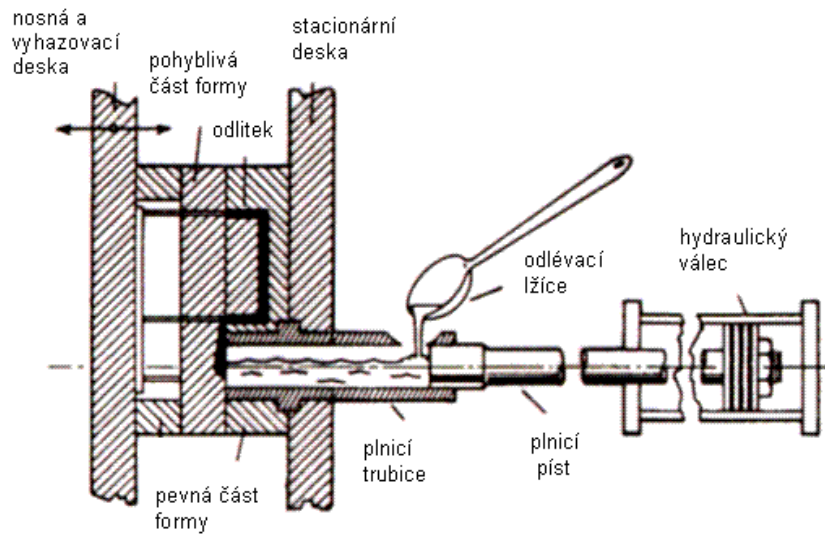
Podmínkou pro použití této technologie je vysoký požadovaný počet kusů odlitků jednoho typu – desetitisícové až statisícové série. Výrobky musí být navrhovány speciálně pro technologické požadavky tohoto procesu a vyrobitelnost dostupnými zařízeními. Mezi hlavní zařízení každé slévárny pro tlakové lití patří tavící pece, udržovací pece a tlakové licí stroje. Součástí slévárny bývají i další zařízení, která umožňují komplexní dokončovací úpravy odlitků.

2.1 Princip technologie

Tlakové lití se dělí na dva hlavní směry podle použitého zařízení – lití na stojích s teplou komorou nebo na strojích se studenou komorou. Prvně jmenované (s teplou komorou) se na lití hliníku nepoužívají, neboť roztavený hliník naleptává kovové části licího stroje, proto jim dále v této práci nebude věnována pozornost.

2.1.1 Licí stroj se studenou komorou

Většina moderních tlakových strojů pro slitiny hliníku jsou zařízení se studenou horizontální komorou (**obr 2.1**). Do této komory se nalije pomocí nalévací lžice nebo automatickým pneumatickým dávkovacím zařízením z udržovací nebo dávkovací pece. Po krátkém zklidnění začne píst stlačovat taveninu a hnát ji do kovové formy. Plnění formy probíhá za podstatně vyšších rychlostí než u klasického gravitačního lití, tradičně se udávají dvě rychlosti plnění – první rychlostí se naplní vtoková soustava až k zářezu, druhou rychlostí se pak plní dutina formy samotného odlitku. U moderních strojů se používá více plnicích rychlostí a plynulé akcelerace taveniny ke klidnějšímu plnění bez vzniku vln. Doby plnění jsou udávány v milisekundách.



Obr. 2.1: Schéma stroje se studenou komorou [16]

Po ukončení plnění je kov zatížen vysokým statickým tlakem v řádu desítek až stovek MPa, který umožňuje zatečení kovu do nejužších dutin formy, zlepšuje reprodukci tvaru formy a pomáhá v dosazování kovu při smršťování. Po nezbytném zchladnutí odlitku se forma otevře, odlitek je spolu s vtoky, přetoky a tabletou (zbytek kovu v pístu) vytažen, dutina formy je ošetřena a připravena k dalšímu cyklu.

Díky vysokým rychlostem proudění a následujícího tlaku je možné vyrábět tenkostěnné (od 1mm), rozměrově přesné (0,3 – 0,5%) odlitky s vysokou kvalitou povrchu [16].

2.1.2 Moderní trendy tlakového lití

Pro vysokou integritu dílů, menší výskyt vad a zlepšení mechanických vlastností tlakově litých odlitků je možné použít několik moderních technologií.

Vacuum Die Casting – vakuovaná forma

Tato metoda je charakterizována použitím řízeného vakua, kterým jsou odsávány plyny z dutiny formy, vtoků i komory nástroje. Tento proces se v současné rozšiřuje na úkor klasického tlakového lití.

Běžně se podaří odstranit z formy 95% plynů [9]. Odsávání zajišťují vakuovací ventily, jejich poloha ve formě může být variabilní, ale měly by být umístěny v místě, kam se kov dostane až na konci plnění formy. Vakuum vyrábí vakuová pumpa, dá se připojit k běžnému tlakovému licímu stroji. Pro zabránění vniknutí kovu do vakuové pumpy se používají uzavírací ventily – rozlišujeme statické a dynamické.

Vakuování není příliš nákladná metoda vylepšení klasického tlakového lití, používá se při problémech s uzavřeným plynem v odlitku nebo když si nevíme rady s poretitou odlitku.

Squeeze Casting – lití s dolisováním

Základem metody Squeeze castingu (SC) je vtlačování pístu do pomocného nálitku při tuhnutí tuhnoucí hmoty odlitku. Tím se potlačuje vznik staženin nebo jsou rozptylovány do menších útvarů [6]. Metoda je vhodná zvláště pro odlitky s různými tloušťkami stěn nebo tepelnými uzly, u kterých jsou vyžadovány vysoké mechanické hodnoty. Rozlišujeme celkový SC, kdy tlak působí na celou hmotu odlitku, nebo lokální SC v místech s vyšším nebezpečím vzniku slévárenských vad.

Formy pro SC jsou charakteristické velkými plochami nařiznutí a laminárním plnění dutiny formy. Je minimalizován výskyt porezity, staženin a uzavřených plynových bublin.

2.2 Porezita v tlakově litých odlitcích

V tlakovém lití rozlišujeme dva typy porezity – smršťovací a plynovou. Většinou se objevují oba typy zároveň a póry mohou vzniknout kombinací obou příčin. Smršťovací porezita vzniká v důsledku smršťování vlivem nedostatečného doplňování tekutého kovu mezi teplotami likvidu a solidu. Vyskytuje se především v tlustých stěnách odlitku izolovaných od zásobníků tekutého kovu. Slitiny hliníku mění svůj objem v rozsahu 4-6% [13]. Na metalografických výbrusech se jeví jako hranaté dutiny s hrubým povrchem a přítomností dendritů na hranicích dutiny. Plynová porezita je způsobena zamícháním vzduchu do rychle proudící taveniny při plnění formy. Zachycený vzduch v kovu nemá šanci uniknout odvdzušením formy. Tvoří malé dutiny kulovitého tvaru s hladkým vnitřním povrchem. Tato charakteristická vada při tlakovém lití je ovlivnitelná vstupními podmínkami procesu lití.

Autor článku [10] tvrdí, že: „Porezita je problém, pouze když ji zákazník najde. Pokud odlitek slouží svému účelu, může být tolerován výskyt porezity do určité míry.“ Někdy bývá odhalena při obrábění, průzkum ukázal, že 58% objevených povrchových vad je právě porezita [10]. Mnoho odlitků vyžaduje těsnost – nepropustnost pro provozní kapaliny, která klesá s přibývajícím porezitou. Ta je také určující pro mechanické vlastnosti odlitku, silně klesá pevnost i tažnost porézních odlitků. Plynová porezita také může znemožnit tepelnou úpravu a svařování a ztížit lakování dílů.

2.2.1 Vliv parametrů procesu

Pracovní tlak

Tlak vyvozený dorazem pístu doplňuje kov při smršťování a stlačuje bubliny plynové porezity. Lití za vysokých tlaků redukuje výskyt porezity, ale tato závislost není lineární – se stoupajícím tlakem se sice dutiny zmenšují, ale plyn je v tuhoucím odlitku stále.

Doba plnění, rychlost v zářezu

Pokud je doba plnění konstantní a mění se pouze rychlost taveniny v zářezu, celkový obsah porezity je přibližně stejný při různých rychlostech v zářezu (tab. 2.1). Tato rychlost pouze ovlivňuje individuální velikost póru, ne jejich celkový obsah. Při vyšších rychlostech přibývá počet pórů, ty ale mají

menší velikost. Zkracování plnicího času zvyšuje pórovitost, jelikož vzduch nemá dostatek času uniknout z dutiny. Na druhou stranu, při prodlužování času plnění formy se zhoršuje kvalita povrchu a může dojít i k nezaběhnutí.

Tab. 2.1: Závislost porezity na rychlosti v zářezu [10]

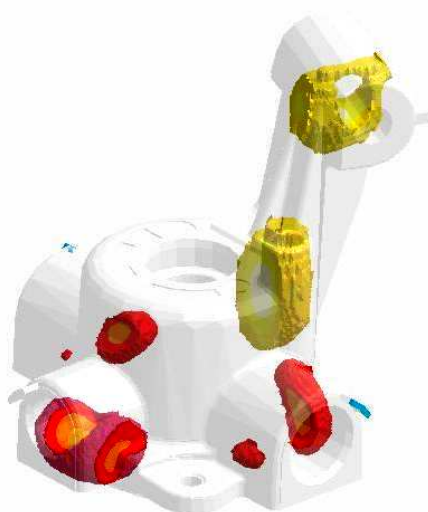
Rychlost v zářezu (m/s)	Porezita (%)	Doba plnění (ms)
11	4,9	65
12	4,3	63
43	4,1	63
49	5,0	56

Ošetření dutiny

Rozbory plynů uzavřených v pórech ukazují výskyt vodíku a uhlíku. To znamená, že mnoho plynů uzavřených v kovu je tvořeno rozloženým nástřikem dutiny. Vyšší množství těchto nástřiků zvyšuje i množství porezity. Tento problém je výraznější u forem s mnoha dutinami, kde se mohou tvořit malé kaluže stečeného postřiku. Jeden krychlový milimetr kapaliny se přemění na 15 milimetrů krychlových páry. Během několika pokusů, kdy bylo odléváno střídavě do ošetřené a neošetřené dutiny, bylo prokázáno snížení porezity přibližně o 40% v neošetřené dutině. Používání práškových látek nebo jiných moderních metod může snížit výskyt porezity [10].

Vznik tepelných uzlů

Smrštění materiálu je ve všech místech stejné, ale smršťovací porezita se vyskytuje pouze v tlustých stěnách odlitku, tj. v místech, které tuhnou jako poslední. Jednou možností redukce této vady je řízené chlazení a kontrola teploty formy. Porezita není odstraněna, pouze se přemístí nebo rozloží do větší oblasti. Řídit proces lze postřikem formy, použitím chladících či ohřívacích jednotek, úpravou času mezi licími cykly nebo kombinací těchto postupů.



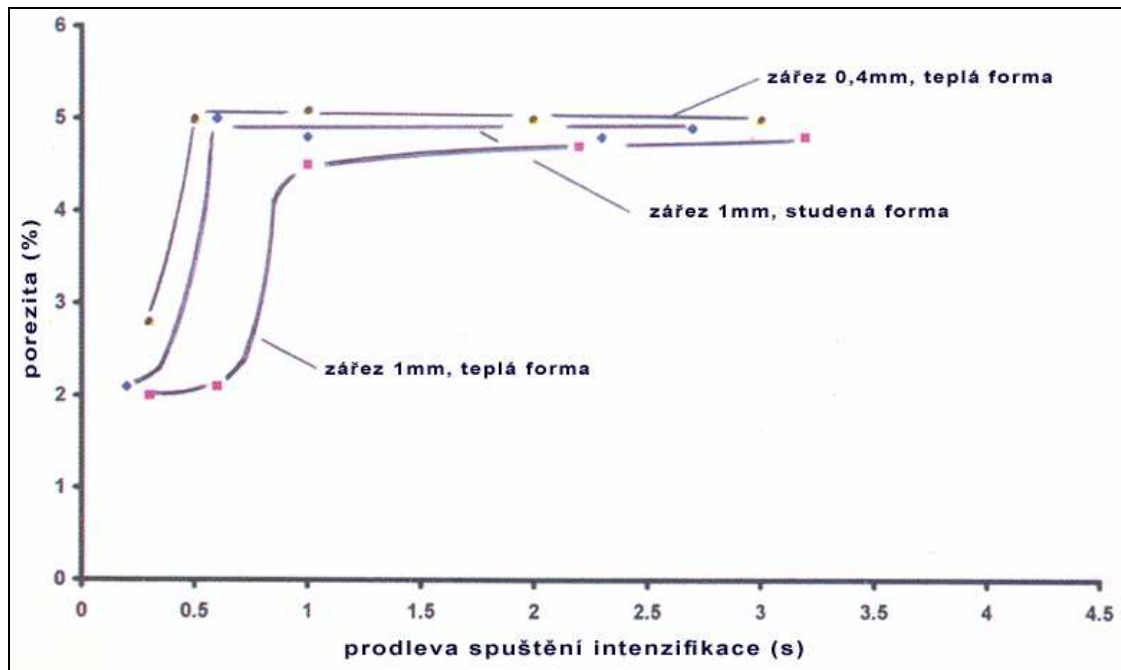
Obr. 2.2: Tepelné uzly - výsledek simulace v programu MAGMA

Působení tlaku

Pro minimalizaci smršťovací a plynové porezity musí být tlak pístu vstřelovací komory převeden na tuhnoucí odlitek. Toto platí u strojů se horkou i studenou komorou, ale u druhé jmenované technologie (tzn. se studenou komorou) způsobuje mnohem větší potíže.

Jakmile je tavenina přelita z pece do komory licího stroje, okamžitě začíná na stěnách tuhnout. Část energie pístu při jeho pohybu se ztrácí na odstranění tohoto filmu ze stěn. Čím menší je naplnění komory, tím větší je tento nežádoucí efekt. Výsledkem toho je zvýšená porezita u odlitků litých na stroji s krátkou dráhou pístu. Obecně by dráha pístu neměla být menší než 20mm [10]. Také dochází k většímu výskytu předčasně ztuhlého kovu, který při proudění do dutiny formy může blokovat vtok a snižovat tak tlak v dutině a také tvoří v částech odlitku místa s nevhodnou strukturou, která může být místem zhoršených mechanických vlastností.

Intenzifikace tlaku po vtažení kovu do formy je nutná k redukci smršťovací porezity, a její načasování je kritické, protože porezita se nevyskytuje když je kov tekutý, naopak po jeho ztuhnutí je tlak už neúčinný [13]. Předčasně ztuhlý kov v zářezu zabrání tlaku v dosazování do staženin. Vysoké teploty formy a kovu prodlužují účinek intenzifikace, testy ukázaly, že i tenký zářez zůstal aktivní (neztuhlý) po dostatečně dlouhou dobu (graf 2.1) [10].



Graf 2.1: Vliv některých parametrů na prodlevu intenzifikace [10]

Důležité je, aby píst dotlačoval taveninu dokud odlitek ve formě neztuhne, obzvláště u strojů s horkou komorou. Příliš krátký čas může způsobit zvýšenou porezitu, v krajním případě může být dokonce neztuhlý kov nasát pístem zpět do komory.

2.2.2 Naplynění kovu

a) v komoře

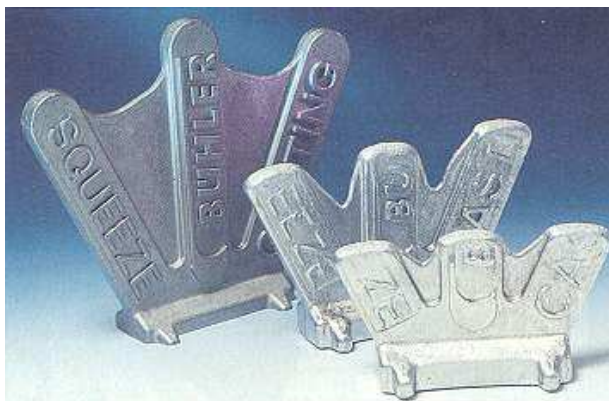
Snížením obsahu vzduchu v dutině formy před litím nebo jeho účinné odstranění během plnění má zásadní vliv na porezitu v odlitku. Vzduch není ale uzavřen pouze v dutině, nýbrž také v komoře stroje a ve vtokové soustavě. Maximální dráhou pohybu pístu nízkou rychlostí je tento vzduch vytlačován do dutiny, kde může unikát [13].

Je-li studená komora stroje naplněna méně z 50%, tvoří se v komoře vlna, která se přesouvá v podélném směru komorou. Pokud se nejde z důvodů zachování rychlostí a plnicích tlaků vyhnout méně než polovičnímu naplnění komory, je nutné nastavit rychlost pístu tak, aby se vlna vytvořená jeho pohybem nesetkala s původní vlnou uprostřed komory, kde by mohly způsobit uzavření plynu v kovu. Možná řešení jsou buďto nastavit prodlevu spuštění pístu tak dlouhou, aby se kov v komoře uklidnil, nebo spustit píst v okamžiku, kdy se vlna odrazila od čela pístu a pak je směr pohybu vlny i pístu shodný.

Dalším kritickým parametrem je náběh rychlosti pístu k první plnicí rychlosti. Při velké akceleraci hrozí přetočení vlny na čele pístu a tudíž uzavření vzduchu. Nedostatečná akcelerace vytvoří vlnu, která se odrazí od formy a narazí do pístu, při čemž je velké nebezpečí uzavření velkých plynových bublin. Ideálním řešením je plynulá akcelerace pístu z klidové polohy až do kritické rychlosti první fáze. Z výpočtů vyplývá, že při typickém procesu tlakového lití vzniká vlna při rychlosti nad 0,2m/s [10]. Tato technologie plynulé akcelerace byla u firmy BÜHLER pojmenována *Parashot* [13].

b) ve vtokové soustavě

Vtoková soustava je dalším prostorem, kde se může dostat vzduch do tekutého kovu při plnění. V místech s prudkou změnou směru kanálu se může vytvořit vzduchová kapsa, která posléze dodává vzduch do proudu kovu. Řešením je samozřejmě změna konstrukce vtoků, aby tyto náhlé změny neobsahovaly. Správnou rychlostí proudu je možné se vyhnout jakémukoliv naplynění ve vtoku. Důležité je načasování přechodu na druhou plnicí rychlost – v okamžiku kdy je kov dotlačen k zářezu. Variabilita nastavení parametru plnění spolu testem naplnění (několik zkušebních odlití, kdy je píst zastaven na různých místech během plnění dutiny formy – obr. 2.3) umožňují najít optimální nastavení.



Obr. 2.3: Fill test – vzorky z testu naplnění [13]

c) v dutině formy

Ke dvou největším zdrojům porezity v odlitku patří vedle plynů z postřiku formy plyny (vzduch) uzavřený v dutině formy při jejím plnění. Je možné spočítat jaké množství vzduchu zůstane v dutině, při utěsněné dělicí rovině, kdy už žádný plyn nemůže unikat. Pokud uvažujeme tlak plynů v tento okamžik 0,3MPa, potom 20-40% objemu dutiny připadá na plyn **[10]**. Podobný výsledek vychází i z výpočtů na komerčně vyráběných odlitcích, a to 10-30% objemu dutiny. Zkoušky plnění dutiny vodou udávají přibližně 25% objemu obsahující uzavřený vzduch.

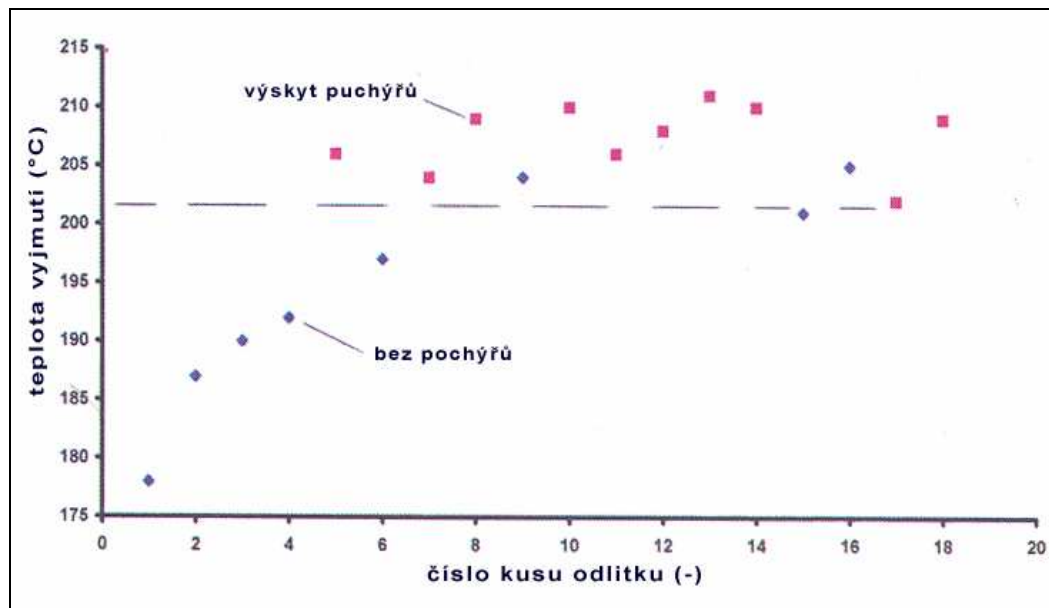
Při naplnění dutiny kovem přibližně 75% již žádný vzduch nemůže unikat. Dojde ke stlačování vzduchu na tlak kolem 20MPa, kdy tento vzduch zabírá 2% objemu dutiny, což je typická porezita v tlakově litém odlitku. Dalo by se očekávat, že rostoucí tlak plynu v dutině bude působit proti tlaku plnění formy, ale jakmile je objem plynů kolem 5%, kdy se tlak plynu blíží tlaku kovu, efekt na plnění čas je sotva zaznamatelný. Avšak některé experimenty dokazují, že v místech zvýšeného výskytu porezity byla menší rychlost proudění kovu.

2.2.3 Puchýřování

Právě vysoký tlak v pórech způsobuje puchýřování, buďto při vyjímání nebo během následných operací jako vypalování laku, tepelná zpracování nebo svařování. Když je vrstva kovu okolo póru oslabena (příliš tenká, snížená pevnost materiálu za vyšší teploty), potom tlak v póru může způsobit jeho prudkou expanzi. Efekt teploty vyjmutí zinkových odlitků na puchýřování je na **grafu 2.2**. Pod 200°C nemá zinek dostatečnou pevnost na udržení pórů. Výzkumy ukázaly, že maximální teplota pro vyjmutí odlitků je přibližně 70% z teploty tavení slitiny **[10]**.

Tab. 2.2: Teploty pro vyjmutí odlitku z formy **[10]**

Materiál	Průměrná teplota		Maximální teplota	
	(°C)	(%) teploty tavení	(°C)	(%) teploty tavení
Slitiny hliníku	310	0,62	360	0,68
Slitiny zinku	200	0,68	250	0,75
Slitiny mědi	600	0,64	630	0,66



Graf 2.2: Výskyt puchýřů v sérii odlitků ze slitiny zinku [10]

Puchýřování (obr. 2.4) lze redukovat tím, že je dosaženo rozdělení porezity do mnoha malých pórů namísto několika větších. Silnější stěny okolo pórů lépe odolávají působícímu tlaku. Analýzy napětí ukazují, že kolem menších pórů je také menší napětí než u pórů větších, při stejném tlaku uvnitř pórů [10]. Z výpočtů též vyplývá, že při zvyšování tlaku kovu se zvyšuje i sklon k puchýřování, což musí být reflektováno pozdějším vyjmutím z formy. Při pracovním tlaku 40 MPa lze vyjmout odlitek při teplotě 310°C, je-li tlak 60 MPa pak lze vyjmout až při teplotě 280°C [14].



Obr. 2.4: Řez puchýřem [13]

Porezita je také příčinou toho, že na tlakově litých hliníkových dílech nejde úspěšně provádět HIPování (HIP – lisování velkými tlaky), protože by lisovací tlak musel být podstatně vyšší než je tlak v pórech.

2.2.4 Vliv parametrů formy

Použití odvzdušnění a vakua

Uzavřené plyny mohou být odvedeny systémem odvzdušnění, například vodou chlazenými systémy vlnitých dutin („valchy“). Jejich použití snižuje výskyt plynu v odlitcích na 30-50% obsahu v neodvzdušněných formách.

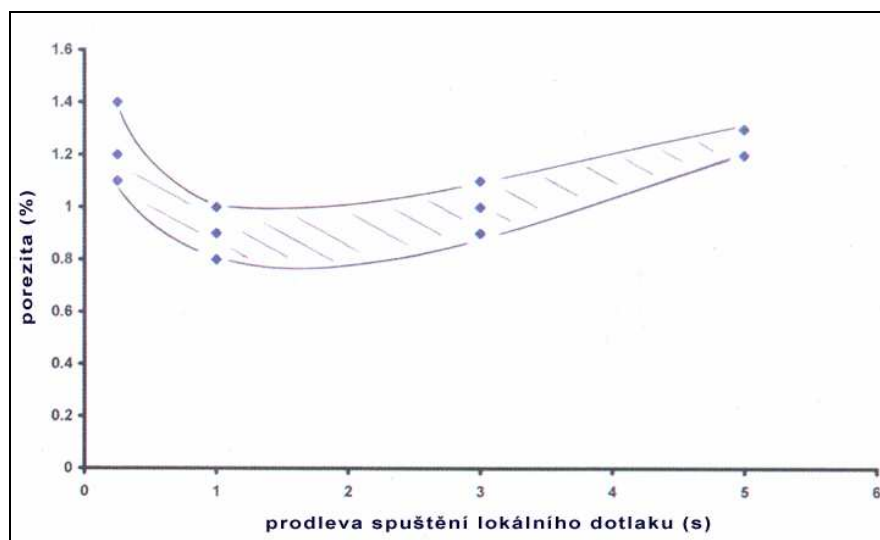
Vakuování dutiny před litím umožňuje odstranit plynovou poretitu až na úroveň 10% poretity neodvětraných forem. Po tomto procesu je odlitky možné i tepelně zpracovávat a svařovat. Testy ukázaly, že dobré odlitky se získají při tlaku v dutině pod 0,02MPa. Používání vakua dovoluje používat menší plnicí tlaky pro dosažení podobného obsahu poretity, tudíž mohou být odlévány větší kusy, nebo použit menší licí stroj. Důležité je si uvědomit, že vakuování neodstraňuje smršťovací poretitu, naopak chybějící plynová poretita, která pomáhá při dosazování uvnitř odlitku, může úroveň smršťovací poretity ještě zvýšit.

Chlazení

U odlitků s různými tloušťkami stěn se může stát, že rychle ztuhlá tenká stěna zabrání dosazování do teprve tuhnoucí tlusté stěny, ve které pak může vzniknout smršťovací poretita. Řízeným ochlazováním některých částí formy lze dosáhnout dostačujícího teplotního gradientu, například k ochlazení tlustého průřezu. Tvrdí se, že u rozdílu průřezů nad 2:3 nelze již rychlosti tuhnutí kompenzovat [10].

Lokální dotlak

Poretita v oddělených objemnějších sekcích odlitku, kde není potřebný tlak k dosazování, může být redukována tlakovými písty, které působí lokálně na určitou sekci, zamezují smršťování a stlačují póry. Účinnost dotlaku je patrná na **grafu 2.3**. Velmi důležité je správné načasování, začne-li působit tlak příliš brzy, kdy je kov ještě tekutý, nemá dotlak žádný efekt. Při pozdním použití může být už kov ztuhlý a opět by nedošlo k žádanému účinku.



Graf 2.3: Načasování lokálního dotlaku [10]

2.2.5 Snižování porezity v kostce

Závěry publikované v práci [10]:

- efektivní naplnění komory pístu, pomalý nástup rychlosti pístu
- dostatečné odvětrání dutiny a maximální možný čas plnění
- maximální možný tlak dokud je kov tekutý (může ale zvýšit výskyt puchýřování)
- minimalizace postřiku dutiny formy

Puchýřování může být redukováno:

- zvýšením rychlosti v zářezu
- snížením teploty formy, prodloužením doby do otevření formy

2.3 Slitina

2.3.1 Slitiny Al-Si-Cu

Tato skupina je nejvíce používaným typem slitin hliníku. Tvoří asi polovinu celkové produkce hliníkových odlitků a je dominantním typem ve výrobě automobilových odlitků. Jedná se o podeutektické (výjimečně až eutektické) slitiny. Typickým představitelem je slitina typu AlSi9Cu3. Díky mědi má slitina dobré mechanické vlastnosti a výbornou obrobitelnost. Měď snižuje odolnost proti korozi. Slitina má malý sklon ke vzniku trhlin a vzniku staženin. Pro tyto vlastnosti je výhodné udržování obsahu křemíku v horním pásmu tolerance pro danou slitinu. U slitin s vyšším obsahem křemíku se zvyšuje zabíhavost. Pro zlepšení vlastností se doporučuje provádět zjemnění primárního zrna očkovaním.

Odlitky ze slitin Al-Si-Cu se používají v tepelně nezpracovaném stavu. Díky přítomnosti mědi a případně i zinku však dochází k určitému stupni samovolného vytvrzování odlitků. Efekt samovolného vytvrzení je tím silnější, čím rychleji se odlitek ochlazoval při tuhnutí a tím vznikl přesycený tuhý roztok $\alpha(\text{Al})$.

Slitiny Al-Si-Cu jsou vhodné pro výrobu složitých odlitků gravitačním odléváním do kovových forem a zejména pro lití pod tlakem.

Rovněž nadeutektické slitiny, používané zejména pro odlévání pístů spalovacích motorů a bloků motorů patří do typu Al-Si-Cu, obvykle obsahují kolem 14-17%Si, 4%Cu a dále asi 0,5%Mg, případně do 2%Ni.

Vlastnosti slitin Al-Si-Cu

Slévárenské vlastnosti – přísada mědi ve slitinách Al-Si poněkud zmenšuje stahování kovu při tuhnutí a zlepšuje nepropustnost odlitků. Uvádí se rovněž, že se mírně zmenšuje naplynění taveniny. Měď tvoří ve slitině ternární eutektikum, které tuhne až v závěru tuhnutí. Za přítomnosti mědi a hořčíku vznikají různá vícesložková eutektika s teplotami tuhnutí až pod 500°C.

Mechanické vlastnosti – přísada mědi vždy významně zvyšuje pevnost a tvrdost slitin Al-Si v litém stavu, snižují se však plastické vlastnosti. Tento vliv se dále zvětšuje za přítomnosti hořčíku a zinku. Vlivem samovolného

vytvrzování odlitky získávají svoje konečné mechanické vlastnosti až po několika dnech.

Obrobitelnost – se přísadou mědi velmi významně zlepšuje. Třísky jsou dobře lámavé a dosahuje se kvalitního povrchu.

Odolnost proti korozi – měď má negativní vliv na odolnost proti korozi v kyselinách, alkalických roztocích a v mořské vodě. V množství několika desetin procenta se korozní odolnost v atmosférických podmínkách ještě příliš nezhoršuje, při obsahu nad asi 2% Cu je již poměrně špatná a doporučuje se používat nějaký způsob povrchové ochrany, např. nátěry. Pro většinu automobilních odlitků však korozní odolnost těchto slitin vyhovuje.

Povrchová úprava – vlivem mědi se zlepšuje kvalita povrchu po broušení a leštění. Při obsahu nad 0,5% měď zhoršuje možnost anodické oxidace, neboť se zmenšuje tloušťka a hutnost ochranné vrstvy. Povrch je matný a má nestejněměrný vzhled. Pro účely zvýšení odolnosti proti otěru je však anodickou oxidací možno použít.

2.3.2 AlSi9Cu3(Fe)

Značení

číslo slitiny:	226 (norma DIN EN 1706)
označení chemicky:	AC-AlSi9Cu3(Fe)
číslo materiálu:	AC-46000

Všeobecný popis

Univerzální slitina s velmi dobrou slévatelností, zvláště vhodná pro tlakové lití. Malá tendence k vytváření povrchových defektů a ke vzniku vnitřních staženin při tuhnutí. Dobrá obrobitelnost.

Použití

Slitina pro široké využití. Rovněž pro složité a tenkostěnné odlitky. Zvláště vhodné pro tlakové odlitky s vysokými nároky.

Materiálové vlastnosti [11,12]

pevnost v tahu	$R_m = 160-200 \text{ MPa}$
mez kluzu	$R_{p0,2} = 100-150 \text{ MPa}$
mezní protažení	$A_{50} = 1 - 3\%$
tvrdost	65-90 HBS _{5/250-30}
elektrická vodivost	13-27 MS/m
tepelná vodivost	110-120 W/m.°K
obrobitelnost	dobrá
svařitelnost	špatná
odolnost proti korozi	špatná
leštitelnost	uspokojivá
dekorativní anodizace	nedoporučuje se

Měrná hmotnost [14]

Výpočtem měrné hmotnosti podle chemického složení slitiny dle normy lze získat hodnoty uvedené v tabulce 2.3.

Tab. 2.3: Měrná hmotnost v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ při teplotě 20°C [14]

bez porezity			s porezitou
minimální	střední	maximální	střední
2751	2782	2813	2713

Chemické složení**Tab. 2.4:** Základní prvky (objemová %), předepsané složení dle normy

Si	Cu	Mg	Mn
8,0 - 11,0	2,0 – 4,0	0,15 - 0,55	0,55

Tab. 2.5: Doplnkové prvky (max.%)

Fe	Ni	Pb	Sn	Ti	Zn	Cr
0,6 – 1,1*	0,55	0,35	0,25	0,20	1.2	0,15

Obsah dalších legur jednotlivě max 0,05%, celkem 0,25%

*) používá se obsah až do 1,3% Fe [11]

Teploty

Teplota lití – 650-700°C

Interval tuhnutí – 600-490°C

Tepelné zpracování materiálu

Materiál AISi9Cu3(Fe) se většinou tepelně nevytvzuje.

2.3.3 Metody zkoušení

Zjišťování trhlin a pórů – zjišťují se zviditelněním pomocí zbarvení (barva+vývojka), nebo fluorescencí (nanese se vývojka a ta se zviditelní po osvětlení).

Zkoušky rentgenovým zářením – zjišťují se tak vnitřní vady (pórovitost, podélné trhliny). Slitiny Al pohlcují RTG záření jen málo, proto stačí 80kV pro materiál do tl.40mm, 110kV do 100mm a 160kV do 250mm. Materiály o tl. 30-40 mm se dají pozorovat přímo. Pro větší tl. se zhotovuje snímek.

Zkoušky radioaktivními izotopy – pro slitiny Al se používá zřídka.

Zkoušky struktury rentgenovým zářením - využívá se toho, že RTG paprsky při průchodu krystalickou mřížkou interferují. Z interferenčního obrazu se pak dá

stanovit, zda je materiál žíhaný, tvářený, stupeň rekrystalizace, velikost zrna, apod.

Zkoušky ultrazvukem – určují se vnitřní vady (nejvíc trhliny, staženiny, velké oxidické vměstky). Jsou dvojího druhu - pomocí dvou sond (vysílač, přijímač), nebo jedné (vysílač i přijímač).

Zkoušky magnetoinдуктивní – využívá vzniku vířivých proudů. Je vhodná pro zjišťování trhlín, vměstků, pórovitosti.

2.3.4 Nejčastější vady

Smršťování – je to rozměrová změna, ke které dochází při chladnutí odlitku ve formě pod teplotou solidem.

Stahování – Vznikají staženiny (otevřené, nebo uzavřené dutiny ve stěně a na povrchu).

Bubliny – otevřené, nebo uzavřené dutiny ve stěně odlitku. Povrch je zpravidla čistý, hladký a okysličený. Většinou vznikají přebytkem vzduchu a vodíku v tavenině.

Zatekliny – výčnělky různých tvarů a velikostí na odlitku v mezerách mezi jednotlivými částmi formy.

Výronky – vystouplé žebrované nebo žilkovité výrůstky na povrchu odlitku vzniklé tím, že kov zatekl do trhlín v povrchu formy nebo jádra.

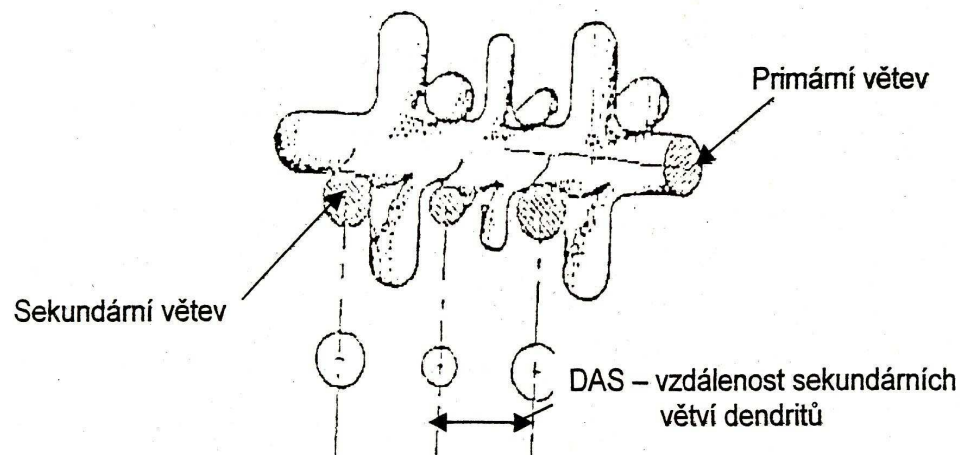
Řediny – místní nahromadění malých staženin projevujících se zřetelně hrubozrnnou a řídkou strukturou kovu.

Vměstky – otevřené, nebo uzavřené dutiny ve stěně odlitků nebo na povrchu, vyplněné úplně nebo částečně kovovým, nebo nekovovým materiálem. Mohou to být zbytky formovací směsi, nebo oxidy vzniklé při lití.

2.4 Parametr DAS (Dendrite Arm Spacing) [17]

Pro strukturní popis hliníkových slitin je důležitým kriteriem vzdálenost sekundárních os dendritů, označovaná jako DAS (Dendrite Arm Spacing). Základní představa podpořená množstvím experimentů spočívá v tvrzení, že mechanické vlastnosti slitiny jsou tím lepší, čím menší je vzdálenost sekundárních větví dendritů.

Hodnota DAS je ovlivněna rychlostí ochlazování, čím kratší je doba tuhnutí, tím menší je DAS. DAS nezávisí na stavu krystalizačních zárodků, vlivu očkování, vlivu velikosti primárních zrn.



Obr. 2.5: Model dendritu [17]

Vzdálenost sekundárních větví dendritů DAS u odlitků se pohybuje v intervalu 10-100 μm . Je-li vzdálenost větví větší, roste také pravděpodobnost výskytu pórovitosti a staženin. Proto je snaha, aby vzdálenost byla co nejmenší.

Místní doba tuhnutí je definována jako čas, v němž teplota v daném místě klesne z teploty likvidu na teplotu solidu. Lze ji snadno zjistit z křivek ochlazování při termické analýze nebo simulací tuhnutí.

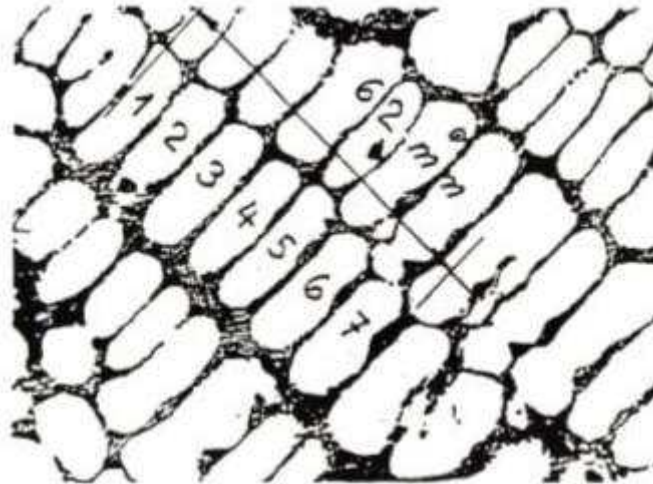
Z uvedeného vyplývá, že čím menší je velikost primárních zrn a vzdálenost sekundárních os (DAS), tím lepší je chemická a strukturní homogenita slitiny a tím lepších mechanických vlastností dosahuje.

2.4.1 Vliv DAS na mechanické vlastnosti [17]

S velikostí DAS souvisí i řada dalších strukturních jevů. Výskyt jemnější struktury (tj. s menší hodnotou DAS) je spojen s menšími jsou segregacími vzdálenostmi a při menším rozsahu segregací proto vznikají menší částice intermetalických vměstků. Nečistoty se vylučují jako oddělené částice v mezidendritických prostorech a netvoří síťoví, chemické složení slitiny je více homogenní, příznivěji je rozložena mikroporozita. Proto čím menší je hodnota DAS, tím vyšší jsou mechanické vlastnosti odlitku.

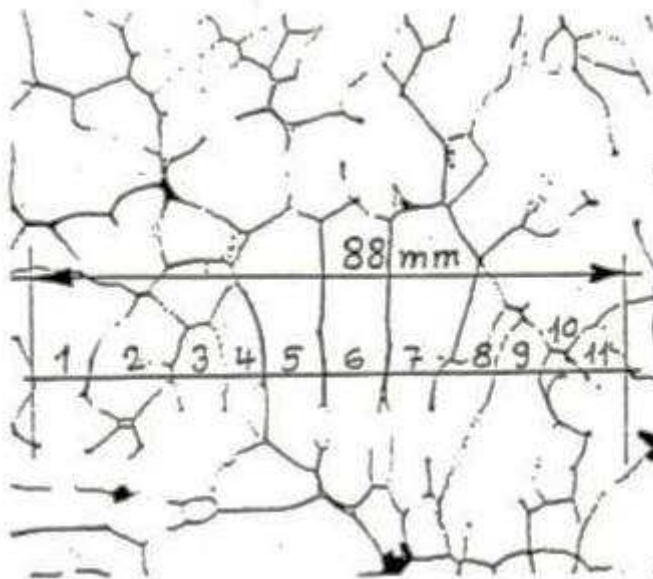
Podle čitelnosti struktury vzorku rozlišujeme strukturu silně-dendritickou a slabě-dendritickou. Strukturu považujeme za silně-dendritickou jsou-li jednotlivé větve zřetelné, nekříží se, lamely křemíku krystalizovaly

v mezidendritických prostorech a tím oddělily dendrity α -Al fáze, ty pak mají kolumnární charakter. Příklad silně-dendritické struktury je na obr. 2.6.



Obr. 2.6: Silně dendritická struktura [17]

Slabě-dendritická struktura je tvořena polyedrickými zrny, jehlice křemíku krystalizovaly v objemu, proto nejsou dendrity α -Al fáze tak dobře čitelné a je poměrně náročné přesně určit počet dendritů ve zvoleném směru a vzdálenosti. Příklad slabě-dendritické struktury je na obr. 2.7.



Obr. 2.7: Slabě dendritická struktura [17]

Z uvedených obrázků je patrné, že u silně-dendritické struktury není problém strukturu vzorku pozorovat, s přehledem hodnotit počty a vzdálenosti dendritických větví a s dostatečnou přesností stanovovat hodnoty DAS. Oproti tomu na vzorcích slitin se slabě dendritickou strukturou může být problém s nalezením reprezentativního počtu dendritických stroměčků, tato měření vyžadují zručnost a bývají časově náročná. Základním principem měření DAS je získání co možná největšího počtu hodnot, ze kterých pak budou vypočítány průměrné hodnoty.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

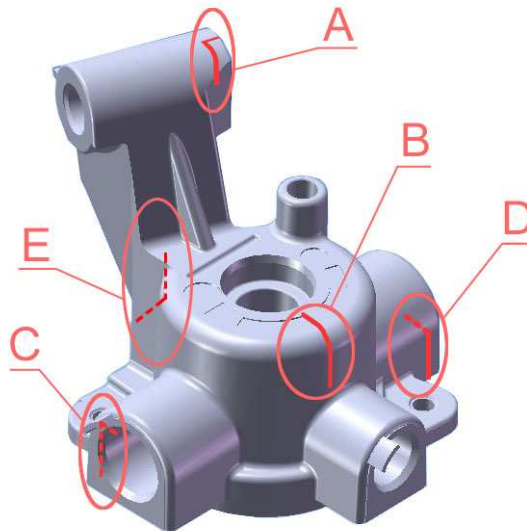
3.1 Příprava vzorků

3.1.1 Volba místa pro odběr vzorků

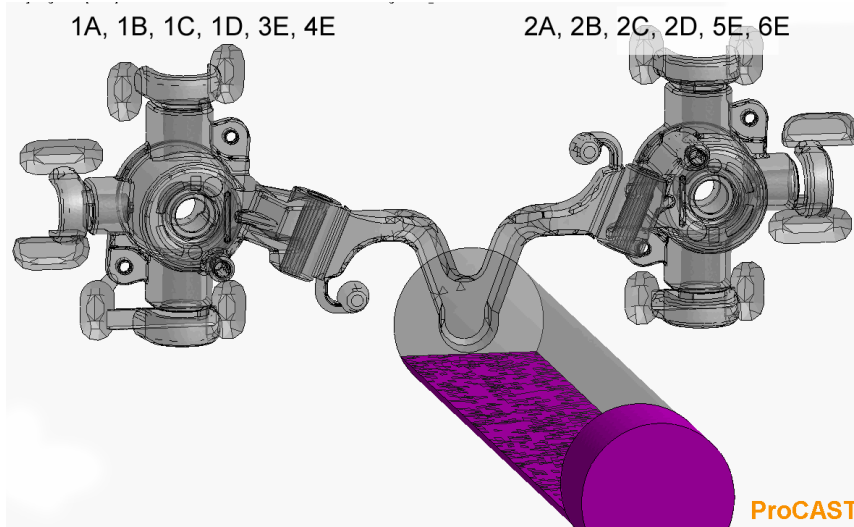
K odběru vzorků bylo použito celkem 6 kusů odlitků. Čtyři kusy byly neobroběny, z těchto se vyřízly tyčky, na kterých byla provedena zkouška pevnosti v tahu a poté se z každé tyčky odebrala jedna část na zhotovení metalografických výbrusů. Tyto byly označeny 3E, 4E, 5E, 6E.

Na dalších dvou odlitcích byly zvoleny 4 místa (A, B, C, D – obr. 3.1) s předpokládaným výskytem porezity, jde o vzorky 1A, 1B, 1C, 1D, 2A, 2B, 2C, 2D.

Vzorky začínající číslem 1 a vzorky 3E a 4E byly odebrány z odlitku nacházejícího se ve formě na levé straně (z pohledu směru pohybu pístu), vzorky začínající číslem 2, vzorky 5E a 6E z pravé poloviny (obr. 3.2).



Obr. 3.1: Místa odběru vzorků na odlitku



Obr. 3.2: Místa vzorků dle polohy ve formě

3.1.2 Zkouška tahem

Zkouška byla provedena na Ústavu materiálových věd a inženýrství FSI VUT Brno. Použitý stroj TIRA test 2300, 100kN, rychlost zatěžování 2 mm/min.

Tab. 3.1: Výsledky tahové zkoušky

Vzorek č.	Fmax (N)	Rm (MPa)	A20 (%)
3E	8337	143	0,2
4E	8563	148	0,2
5E	8932	153	0,2
6E	9019	158	0,2



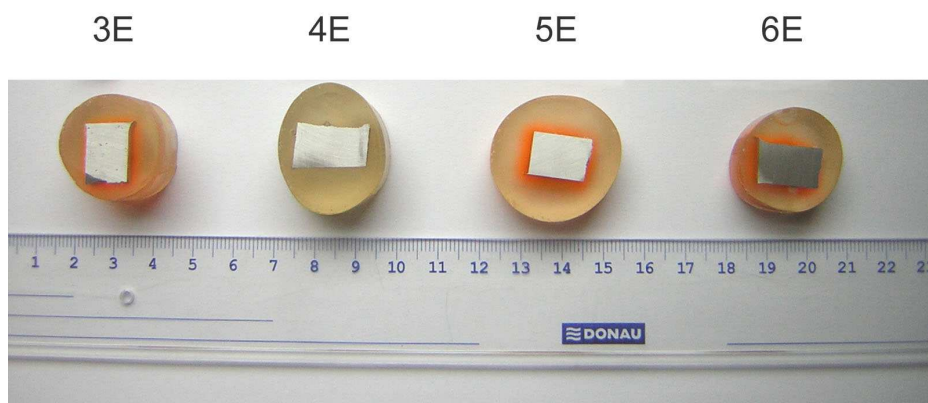
Obr. 3.3: Vzorky po zkoušce tahem



Obr. 3.4: Lomová plocha

3.1.3 Postup přípravy vzorků

Každý vzorek byl pro metalografickou analýzu ručně připraven. V případě vzorků po tahové zkoušce (3E, 4E, 5E, 6E) byla vybrána vždy část mezi lomovou plochou a plochou, ve které byl vzorek uchopen v kleštinách testovacího stroje. Všechny vzorky byly vyřezány kotoučovou bruskou a upraveny na vhodnou velikost. Následně byly zality do čirého dentakrylu (obr. 3.5).



Obr. 3.5: Vzorky po zalití do dentakrylu

Po zatuhnutí dentakrylu byly vzorky broušeny pod vodou smirkovými papíry o zrnitosti (postupně) 100, 200, 400, 800. Následovalo leštění na sametových kotoučích brusnými diamantovými pastami o drsnosti D3, D2 a D0,7.

Dokonale hladký povrch bez rýh a škrábanců je důležitý pro automatické vyhodnocování porezity v programu AnalySIS, jelikož by tmavá barva škrábanců mohla být považována za pór.

3.2 Sběr dat

3.2.1 Měření DAS

Pro počítačové vyhodnocení výbrusů bylo nutné vzorky nafotit na světelném mikroskopu. Použit byl mikroskop od firmy Olympus se zabudovaným digitálním fotoaparátem téže značky, fotografie byly ukládány na flash paměť a poté zkopírovány do PC. Celkově bylo nafoceno 240 snímků, ve formátu *jpeg*, rozlišení 1712x1368 px. Použité zvětšení na mikroskopu bylo 100x.

Na každém vzorku bylo pořízeno 10 snímků s nalezenou dendritickou strukturou (**obr. 3.6**). Měření je prováděno ručně pomocí myši, přímo k tomuto účelu určeným nástrojem – úsečkou. Myši se označují středy zrn v dendritických útvarech a program po ukončení označování vyhodnotí tyto vzdálenosti. Je doporučeno provést na každém snímku alespoň 20 měření kvůli statistické reprodukovatelnosti, nicméně mé vzorky z odlitku mají slabě dendritickou strukturu, proto nebylo možné vždy provést 20 měření na snímku.

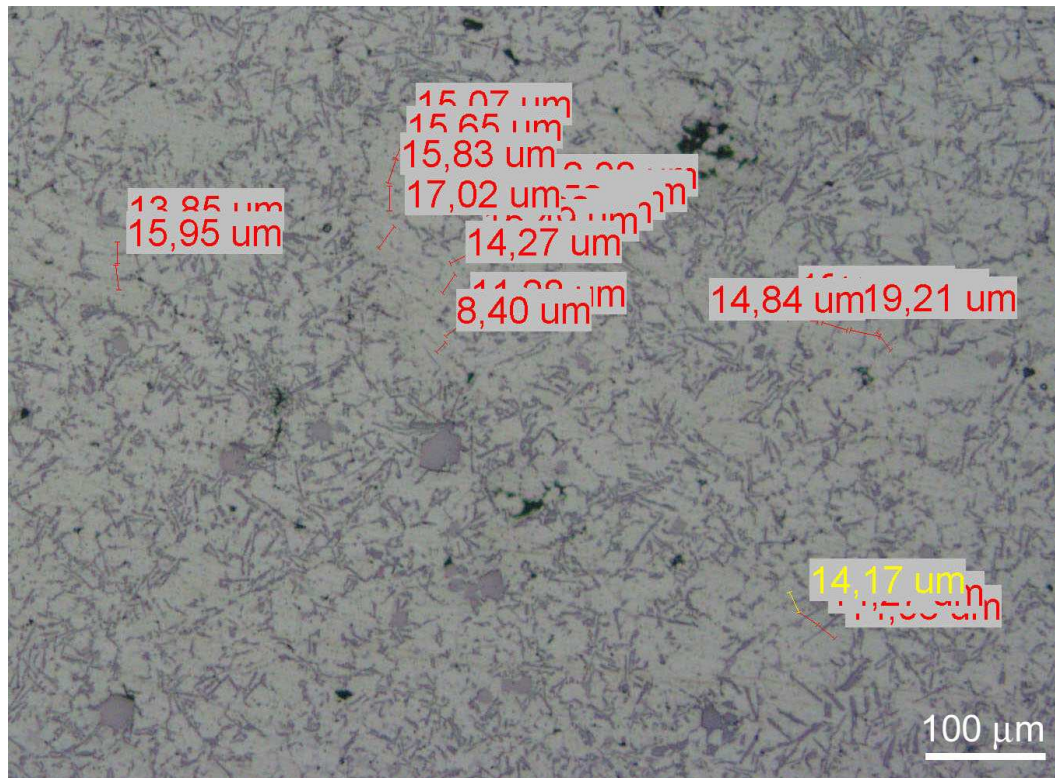
Program AnalySIS generuje tabulky s výsledky ve formátu Microsoft Excel **.xls*.

Výstupem měření DAS jsou dvě tabulky, první obsahuje tyto data:

- označení snímku (jméno souboru)
- číslo měření
- délka úsečky

Druhá tabulka obsahuje statistická data snímku:

- průměrnou délku úsečky
- minimální délku úsečky
- maximální délku úsečky
- směrodatnou odchylku



Obr. 3.6: Měření DAS programem AnalySIS

3.2.2 Predikce DAS v simulačních programech

V programech SIMTEC a ProCAST bylo možné zobrazit predikci parametru DAS. MAGMA v době vypracování této práce nenabízela tuto funkci.

ProCAST i SIMTEC používá pro výpočet DAS vztah (1) založený na místní době tuhnutí. Před spuštěním výpočtu je nutné ručně zadat hodnoty konstant α a β .

$$DAS = \alpha t_{TUH}^{\frac{1}{\beta}} \quad [\mu m] \quad (1)$$

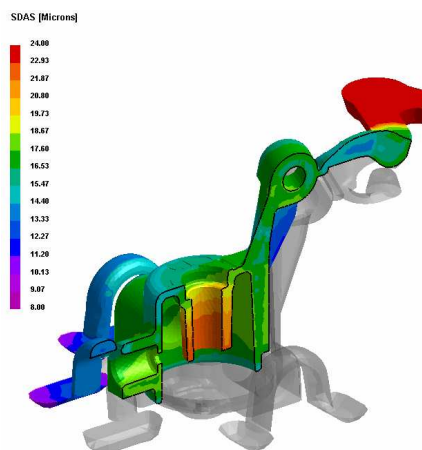
kde: α ...konstanta závislá na složení slitiny

β ...konstanta závislá na slitině

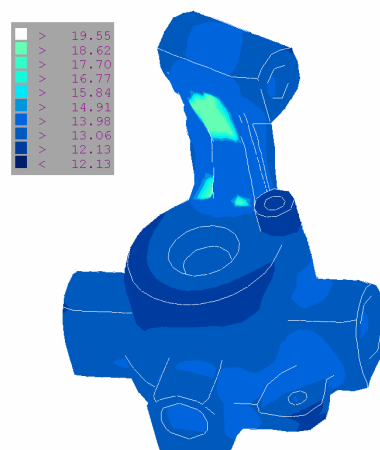
t_{TUH} ...místní doba tuhnutí [s]

V obou programech byly zadány stejné hodnoty parametru, a to: $\alpha = 6$
 $\beta = 3$

Hodnoty se zobrazují barevnou paletou v objemovém modelu (obr. 3.7, obr. 3.8).



Obr. 3.7: Predikce DAS programem ProCAST



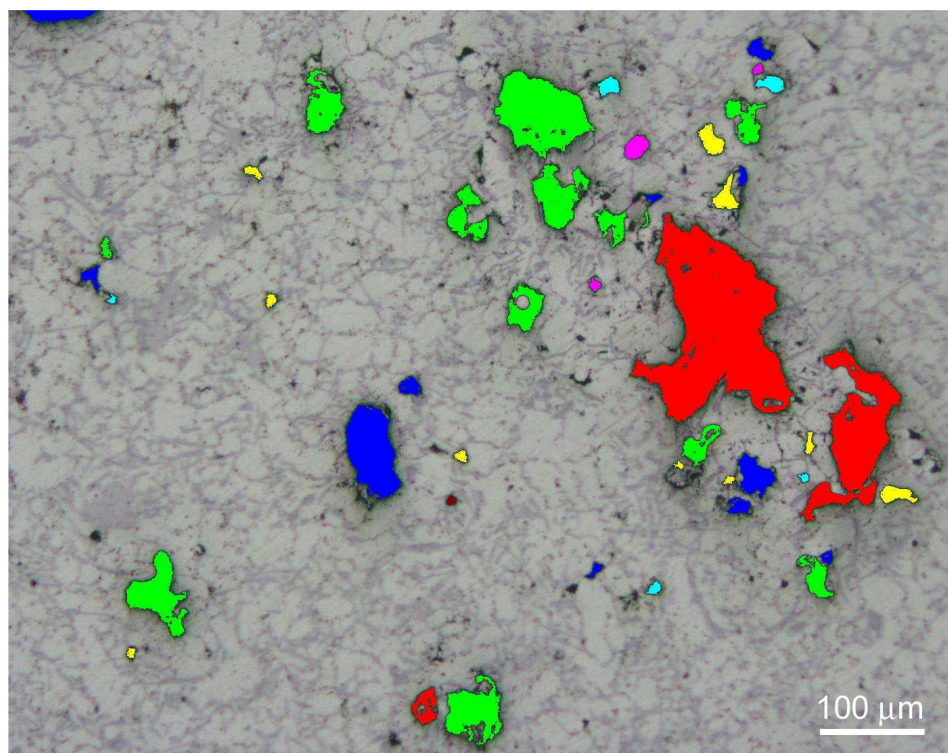
Obr. 3.8: Predikce DAS programem SIMTEC

3.2.3 Porezita - tvarové hodnocení

Stejně jako v případě měření vzdáleností sekundárních os dendritů, bylo i pro měření porezity pořízeno deset snímků z každého vzorku. Samotné měření probíhá automaticky, uživatel pouze koriguje pomocí sytosti barev velikost označené plochy póru. Toto je nutné zvláště u snímků s nižší ostroší. Program poté rozdělí a klasifikuje póry, jednotlivé třídy jsou označeny různými barvami (obr. 3.9). Tyto třídy nemají pro další vyhodnocování význam.

Výsledky jsou opět ve formátu *.xls a obsahují tyto údaje:

- číslo útvaru (póru)
- třída útvaru
- maximální průměr
- střední průměr
- minimální průměr
- tvarový faktor
- poměr stran
- prodloužení
- ovalita
- plocha póru



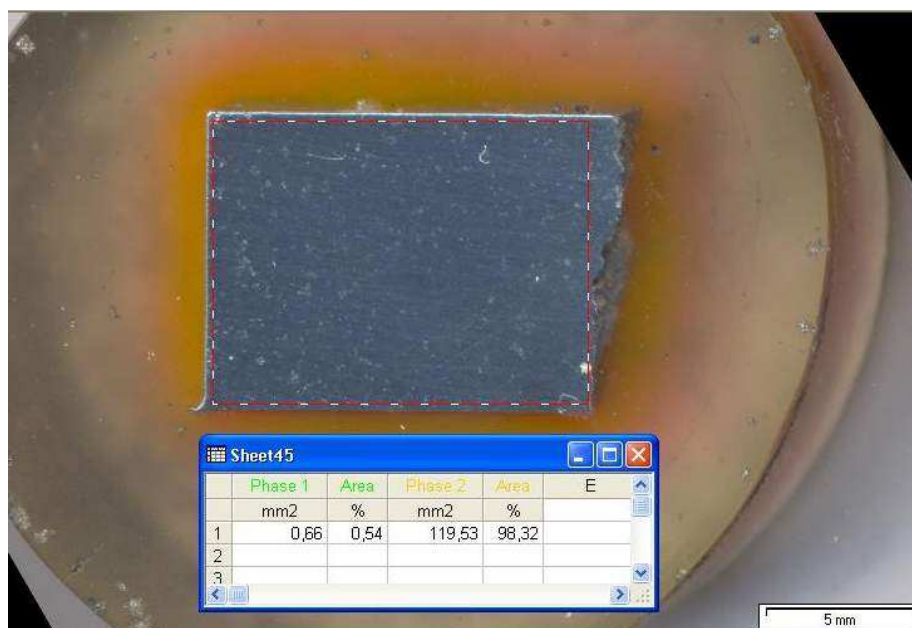
Obr. 3.9: Vyhodnocení poretity programem AnalySIS

3.2.4 Poretita - procentuální výskyt

Pro zjištění procentuálního výskytu (míry) poretity bylo potřeba provést obrazovou analýzu celých vzorků. Všechny vzorky byly naskenovány na běžném kancelářském scanneru, aby se získal detailní obraz celé plochy, a tyto obrazy byly upraveny v grafickém programu. Pro potřeby programu AnalySIS bylo nutné obrazy pootočit, ořezat a zdůraznit kontrast (obr. 3.10).

Analýza probíhá pomocí grafických filtrů – program si automaticky převede obrázek do kombinace barev modré a žlutá, čímž se dále zvýrazní póry. provede se korekce nastavení barev tak, aby se barevná pásma nepřekrývala ani nevynechala žádnou část přechodu mezi barvami. Kontrolou správného nastavení je, pokud vyjde součet obou barevných pásem 100%.

Na jednom vzorku je možné provést několik měření a výsledky zprůměrovat. Tím se dá vyhnout špatně připraveným výbrusům, například rýhám a nečistotám, které by mohly být brány za pór a způsobit chybu měření. Nevýhodou je to, že oblast k vyhodnocování lze zvolit pouze obdélníkovou, tudíž na tvarově složitějších výbrusech dochází k chybě, jelikož nejde označit k vyhodnocení celá plocha.



Obr. 3.10: Vyhodnocení výskytu porezity programem AnalySIS

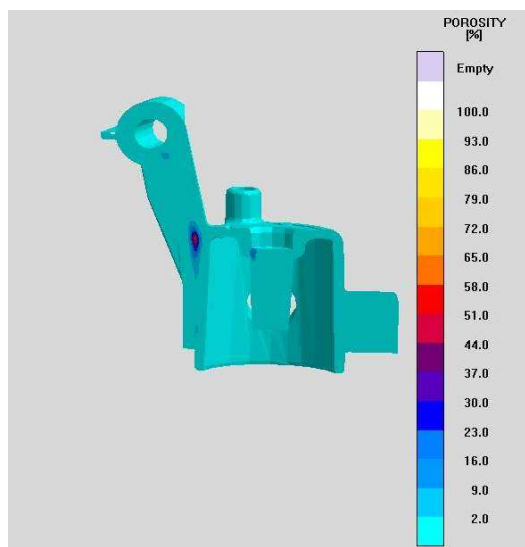
3.2.5 Predikce porezity v simulačních programech

Byly provedeny simulace lití ve třech simulačních programech – MAGMA, SIMTEC a ProCAST. Pro porozumění pochodů během lití byly vždy provedeny simulace plnění formy a tuhnutí odlitku, z nich jsem získal grafický výstup v podobě sekvence obrázků. Dále byl zobrazen vznik tepelných uzlů, na který se váže predikce smršťovací porezity, zobrazené graficky v řezech odlitkem nebo rentgenovém pohledu.

Výpočty porezity v simulačních programech vychází ze smršťování kovů v místech posledního tuhnutí kovu (tepelné uzly). Tyto uzly vznikají v silnějších stěnách odlitku, v místech spojů několika stěn nebo v místech kde probíhá ochlazování pomaleji – jedná se o části odlitku, kde je lokálně ještě tekutý kov, ale okolní kov je již ztuhlý a brání tak dosazování do tepelného uzlu. Vlivem smrštění může dojít ke vzniku dutin. V programech MAGMA a ProCAST jsou výsledky zobrazeny pro oba odlitky ve formě, SIMTEC pracuje pouze s jedním odlitkem (polovinou formy).

MAGMA

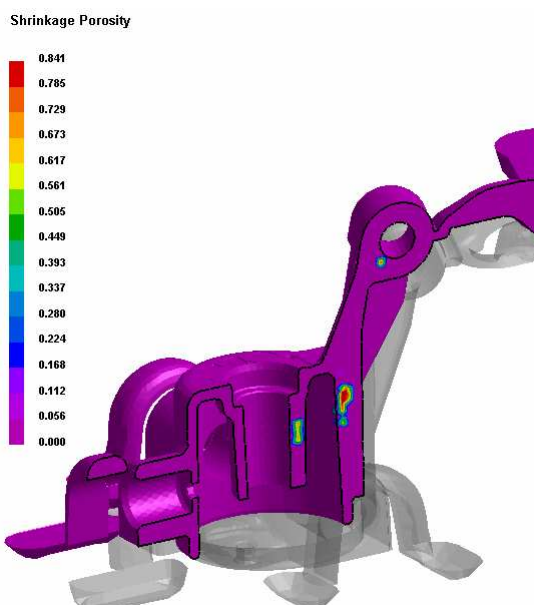
Porezita je zobrazena graficky v objemovém modelu, barevně jsou odlišena místa s přepokládanou porezitou – procentuální podíl lokálně chybějícího kovu. Kromě smršťovací porezity se může na výsledcích objevit i porezita vzniklá uzavřením plynu v dutině formy.



Obr. 3.11: Predikce perezity programem MAGMA

ProCAST

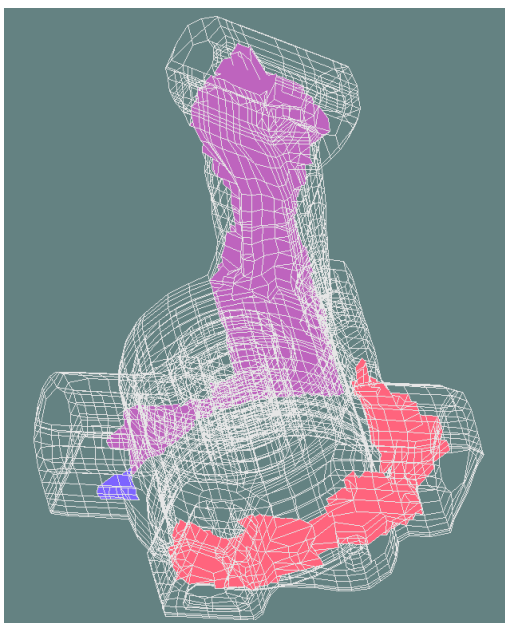
Vyhodnocení perezity je prakticky shodné s programem MAGMA, na objemovém modelu je znázorněn podíl chybějícího kovu v tepelných uzlech. Analyzována je pouze smršťovací perezita.



Obr. 3.12: Predikce perezity programem ProCAST

SIMTEC

V SIMTECu je perezita predikována jiným způsobem než v předchozích dvou softwarech. Na základě kritické teploty, které se nachází přibližně v polovině mezi teplotami likvidu a solidu, dochází v odlitku k dělení na postupně tuhnoucí objemy, které se s časem zmenšují a trhají až na místa posledního tuhnutí. Každý objem má své číslo a je znázorněn na modelu jinou barvou. Z celého průběhu a všech objemů se vypíše protokol, který obsahuje výpočet velikosti daného objemu a výpočet chybějícího objemu po smrštění.



Obr. 3.13: Objemy tuhnuícího kovu – SIMTEC

3.3 Výsledky měření

3.3.1 DAS

Tab. 3.2: Výsledky měření DAS

Označení vzorku	DAS (μm)	Směrodatná odchylka
1A	9,26	3,30
1B	9,98	3,19
1C	11,75	2,95
1D	11,30	2,36
2A	10,77	2,13
2B	9,94	2,82
2C	10,63	2,95
2D	11,90	2,48
3E	14,43	2,07
4E	13,54	2,88
5E	13,96	2,54
6E	14,40	2,78

Vzorky 1A a 2A byly vybrány na odlitcích ze stejného místa, pro další použití potřebujeme jednu hodnotu. To samé i pro vzorky 1B a 2B, 1C a 2C, 1D a 2D. Stejnětak zprůměrujeme i hodnoty naměřené na vzorcích 3E, 4E, 5E, 6E.

Tab. 3.3: DAS v zkoumaných místech

Místo na odlitku	DAS (μm)	Směrodatná odchylka
A	10,02	1,93
B	9,96	1,91
C	11,19	2,15
D	11,60	1,88
E	14,09	1,78

3.3.2 Porezita

Tab. 3.4: Výsledky obrazové analýzy výskytu porezity

Označení vzorku	Průměrná hodnota tmavé barevné části (kov) [%]	Průměrná hodnota světlé barevné části (póry) [%]
1A	35,82*	2,38
1B	97,99	1,05
1C	89,06	6,13
1D	95,19	3,58
2A	99,17	0,32
2B	98,92	0,50
2C	95,20	2,08
2D	89,93	4,84
3E	95,65	1,47
4E	96,18	1,27
5E	96,18	1,72
6E	97,08	1,82

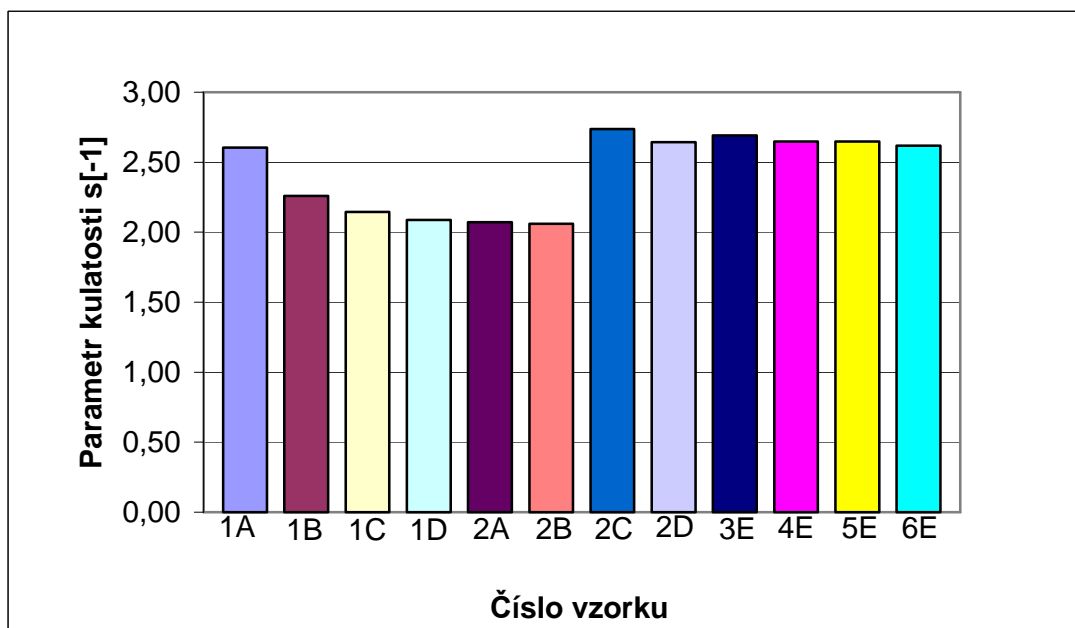
*) vzhledem ke složitosti tvaru vzorku proběhlo měření pouze na jeho části

Tab. 3.5: Výsledky výskytu porezity ve zkoumaných místech

Místo na odlitku	Porezita (%)
A	1,35
B	0,77
C	4,11
D	4,21
E	1,57
průměr v celém odlitku	2,26

Tab. 3.6: Výsledky tvarového hodnocení porezity

ČÍSLO VZORKU	MAXIMÁLNÍ PRŮMĚR [um]	STŘEDNÍ PRŮMĚR [um]	TVAROVÝ FAKTOR	POMĚR STRAN [um]	OVALITA	PARAMETR KULATOSTI
1A	147,99	19,76	0,38	1,77	0,38	2,60
1B	212,06	18,63	0,44	1,79	0,35	2,26
1C	310,97	18,28	0,47	1,73	0,37	2,14
1D	208,63	18,79	0,48	1,74	0,37	2,09
2A	149,09	19,61	0,48	1,73	0,38	2,07
2B	415,98	19,99	0,49	1,73	0,36	2,06
2C	88,98	20,48	0,37	1,64	0,37	2,74
2D	110,72	20,37	0,38	1,66	0,37	2,64
3E	376,16	30,49	0,37	1,64	0,39	2,69
4E	134,44	21,35	0,38	1,70	0,35	2,65
5E	70,21	15,37	0,39	1,68	0,35	2,54
6E	154,29	19,74	0,38	1,76	0,34	2,62

**Graf 3.1:** Parametr kulatosti pro jednotlivé vzorky

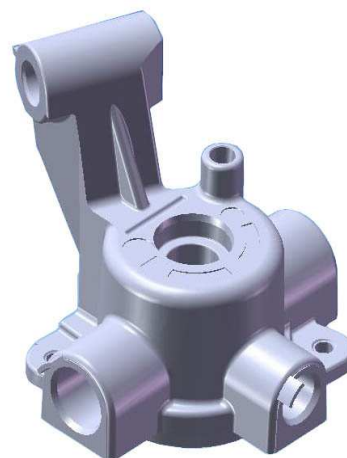
3.4 Výroba odlitku

3.4.1 Technologie

Pro porovnání predikce vad pomocí simulačních softwarů srovnáním s reálným odlitkem byl vybrán odlitek vyráběný ve slévárně tlakového lítí *Kovolit a.s* Modřice pro automobilku *Škoda Auto a.s*. Mladá Boleslav. Jedná se o tlakově lité díl na převodovku z hliníkové slitiny $AlSi9Cu3(Fe)$ o celkových rozměrech hotového odlitku cca 100x100x120mm a hmotnosti cca 250g.



Obr. 3.14: Odlitek

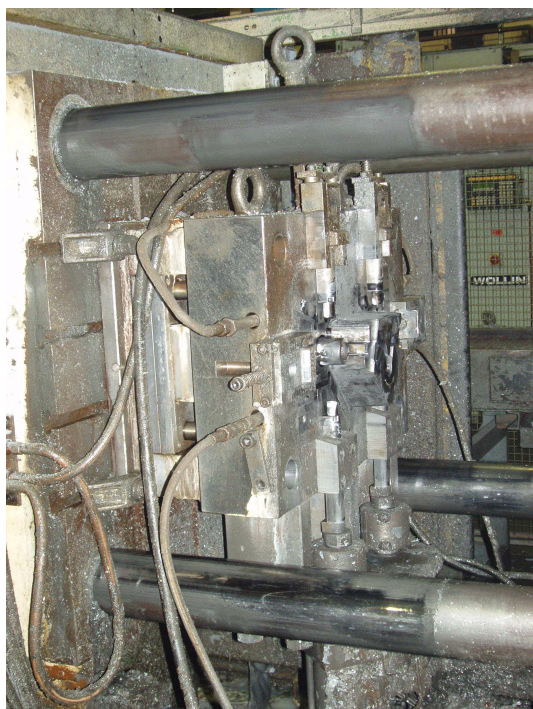


Obr. 3.15: 3D model

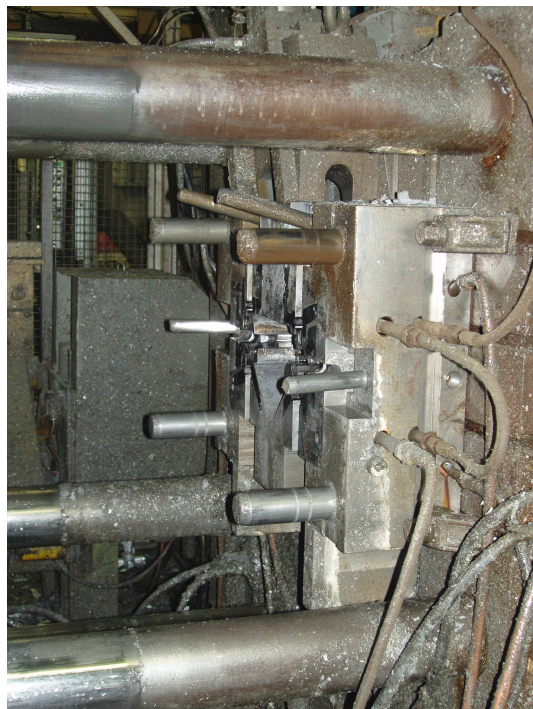
Odlitek je vyráběn na licím stroji od firmy Bühler H 400 s maximální uzavírací silou 4000kN. Forma je dvoudílná, kovová - materiál ORVAR SUPREME švédské firmy UDDEHOLM. Je navržena pro dva kusy odlitků.

3.4.2 Základní parametry lití a stroje

Vstupní teplota licího kovu:	707 °C
Vstupní teplota tlakově licí formy	pohyblivá: 230°C pevná: 195
Uzavírací síla tlakově licího stroje:	4000kN
Pracovní tlak:	21MPa
Délka komory:	370mm
Velikost 1. vstřikovací rychlosti:	Parashot (kap. 2.2.2)
Velikost 2. vstřikovací rychlosti:	2.3m/s
Celková doba licího cyklu:	53±5 s



Obr. 3.16: Pohyblivá polovina



Obr. 3.17: Pevná polovina

3.5 Charakteristická data simulací

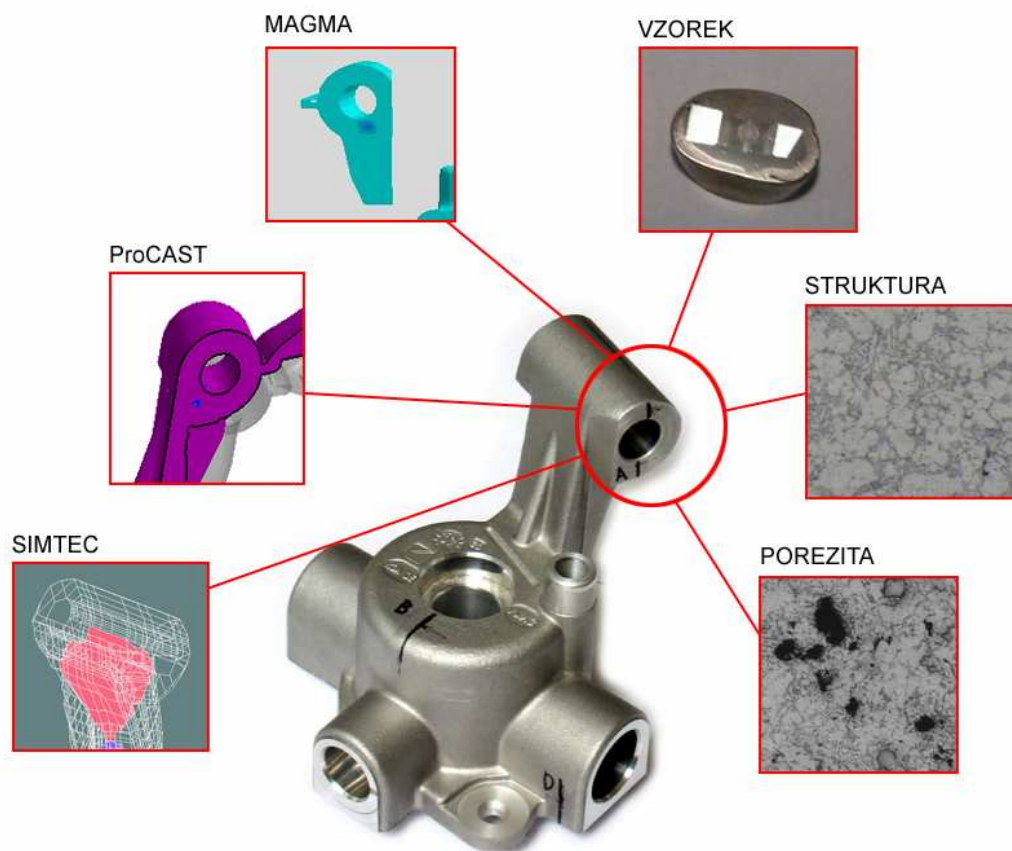
Tab. 3.7: Srovnání simulací z hlediska výkonu a komplexity

	MAGMA	ProCAST	SIMTEC
Počet elementů – celkem	9 800 000	2 124 337	412 000
Počet elementů – odlitek	370 000	-	16 000
Doba výpočtu	10 hod	8,5 hod	< 1 hod
Hardware	1 procesor	2 procesory	běžné PC

Program SIMTEC na rozdíl od MAGMy a ProCASTu je založen na numerické metodě FEM, k popisu stačí méně elementů a i výpočetní časy jsou nižší. Čas uvedený v tabulce odpovídá době výpočtu pro jednu polovinu formy, také samotná citlivost modelu byla oproti dvou použitým FDM programům viditelně nižší.

4 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ VE ZKOUMANÝCH MÍSTECH

4.1 Místo A



Obr. 4.1: Místo A

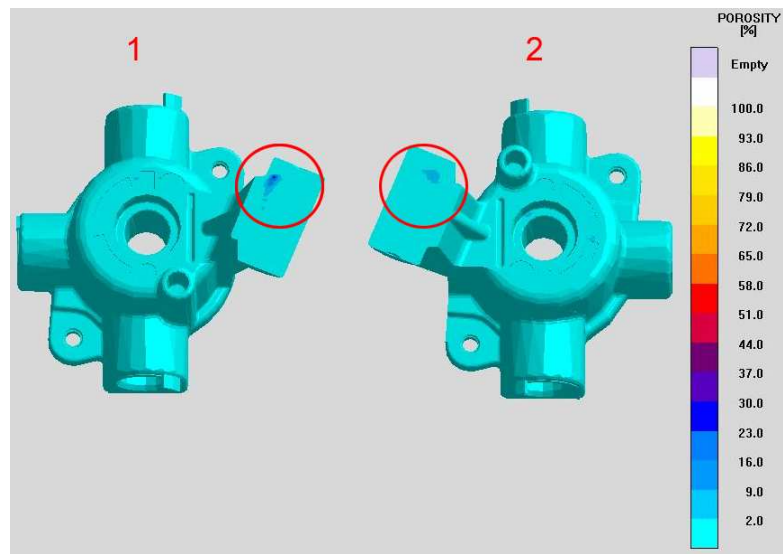
4.1.1 Popis oblasti

Pro první vzorek bylo zvoleno místo ve vrchní části odlitku, skrz kterou dochází k plnění formy. Vzorek byl odebrán přibližně 5mm od čela válcové části, zkoumaná plocha byla vytvořena svislým řezem v ose díry, jak je naznačeno na obrázku 4.1.

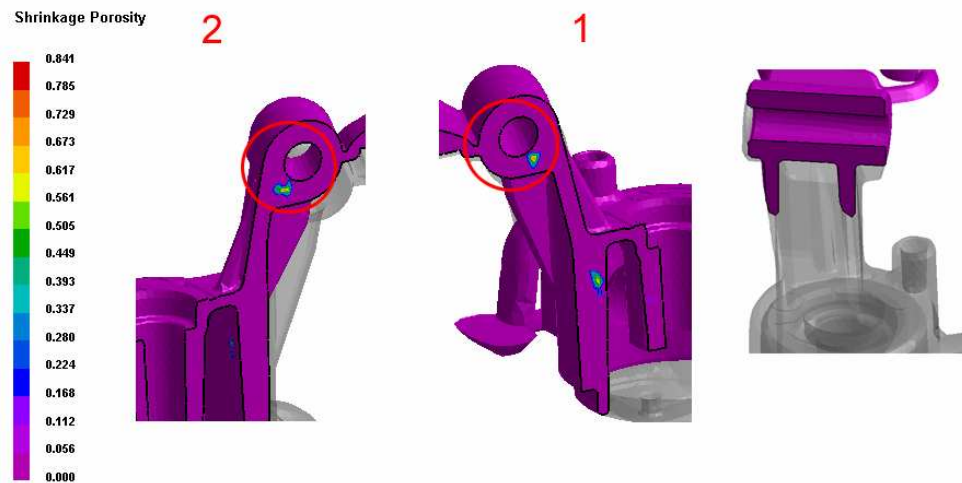
Simulační program MAGMA předpovídá v této oblasti zvýšený výskyt smršťovací poretity do velikosti přibližně 30%, na obou modelech odlitku ve formě ji lze nalézt na vzdálenější straně od vtoku (obr. 4.2).

Dle programu ProCAST se poretita nachází pouze uprostřed ve válcové části odlitku a svou polohou by neměla ovlivňovat plochu použitou pro odběr vzorku. V řezu modelem zobrazující plochu na které byla prováděna analýza se žádná poretita nenachází (obr. 4.3).

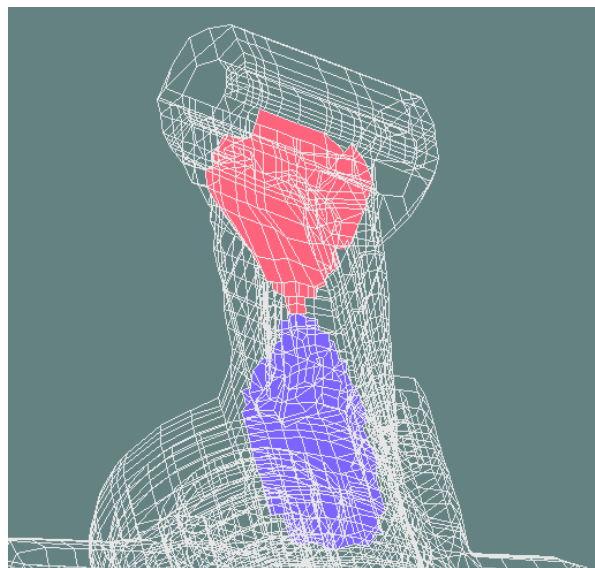
SIMTEC zobrazuje jako poslední tuhnoucí objem uprostřed spodní části (obr. 4.4, označen červeně), jeho okraj je vzdálen pouze několik milimetrů od místa, kde byl odebrán vzorek. Objem této oblasti v čase 3,6 s je 4,2 cm³, podíl chybějícího kovu je v této části 6,57%.



Obr. 4.2: Poloha porezity - MAGMA.



Obr. 4.3: Poloha porezity - ProCAST



Obr. 4.4: Poloha porezity – SIMTEC

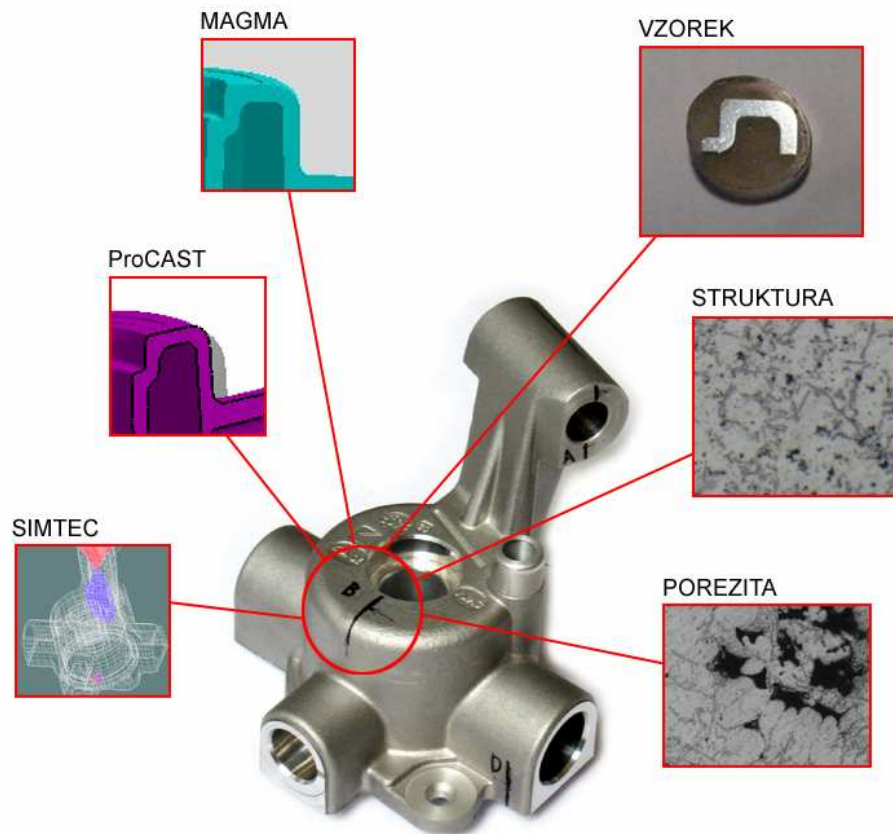
4.1.2 Zhodnocení výsledků

Vzhledem k velikosti naměřené porezity na vzorcích, která je v obou případech pod 3%, což je běžné objemové smršťování siluminů tohoto typu, a kterou simulační softwary neberou v úvahu, lze vzájemně porovnávat pouze výsledky simulačních programů.

Programy ProCAST a SIMTEC shodně předpokládají vznik smršťovací porezity ve střední části pod průchozí dírou, tedy v nejsilnějším místě kde vznikne teplotní uzol. I MAGMA předikuje teplotní uzol, ale porezitu nemá umístěnou ve středu uzlu, nýbrž posunutou ke kraji vrchní části.

Teploty solidu dosáhne toto místo přibližně za 10s podle všech použitých programů.

4.2 Místo B



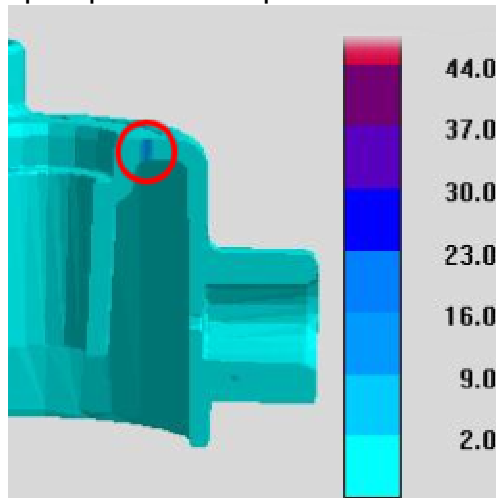
Obr. 4.5: Místo B

4.2.1 Popis oblasti

Vzorek z místa označeného B byl odebrán z vrchní části těla odlitku, rovina řezu která je zároveň i vyhodnocovanou plochou je naznačena na obrázku 4.5.

Tato část má velmi tenkou stěnu a nenachází se v blízkosti žádného tepelného uzlu. Díky tloušťce stěny probíhá ochlazování velmi rychle a není předpokládán vznik defektů typu smršťovací porezity. Jak je vidět již na obrázku 4.5, toto místo je prostě jakýchkoliv vad.

Pouze program MAGMA ukazuje na malou oblast (obr. 4.6) nedaleko místa odběru vzorku s předpokládanou poretitou okolo 15%.



Obr. 4.6: Poloha poretity – Magma

4.2.2 Zhodnocení výsledků

Poretita naměřená experimentálně je 0,5% na prvním vzorku a 1,05% na druhém, což odpovídá předpokladům chování materiálu z jeho geometrie v tomto místě. Výsledky simulace souhlasí s naměřenými hodnotami.

4.3 Místo C



Obr. 4.7: Místo C

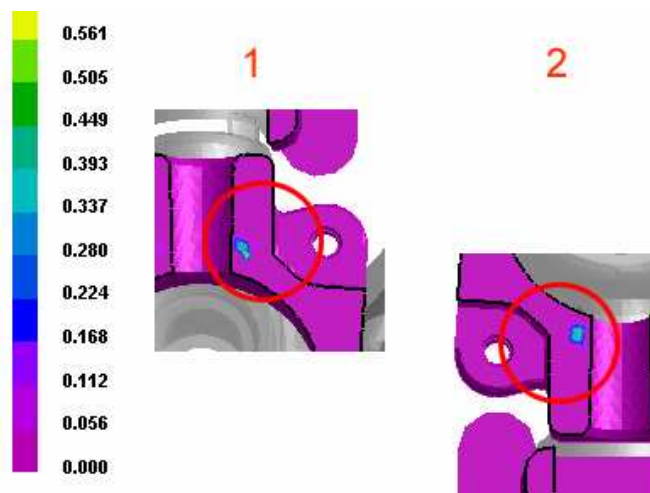
4.3.1 Popis oblasti

Místo pro odběr třetího vzorku bylo zvoleno ve spodní části odlitku, mezi jedním z bočních otvorů a patkou s dosedací plochou pro šroub, přibližně 15mm od čela tohoto otvoru. Právě přítomnost této patky zvyšuje v tomto místě riziko vzniku teplotního uzlu a případných staženin.

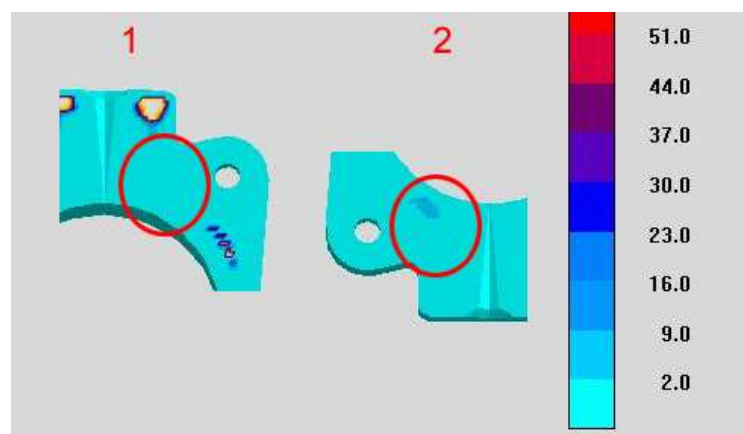
Všechny simulační programy shodně předpovídají vznik tohoto teplotního uzlu a staženin na stejném místě. ProCAST vyhodnotil přibližně 40% chybějícího objemu kovu (obr. 4.8) symetricky v obou odlitcích ve formě.

Oproti tomu MAGMA dává rozdílné výskyty porezit pro pravou a levou polovinu (obr. 4.9). Na polovině, ze které byl brány vzorky označené 1C, je porezita rozptýlena v okolí místa odběru vzorku, kde dosahuje hodnot kolem 30%. Nedaleko místa odlitku, ze kterého byl brán vzorek 2C, je malá oblast předpokládané porezity o maximální velikosti kolem 10%.

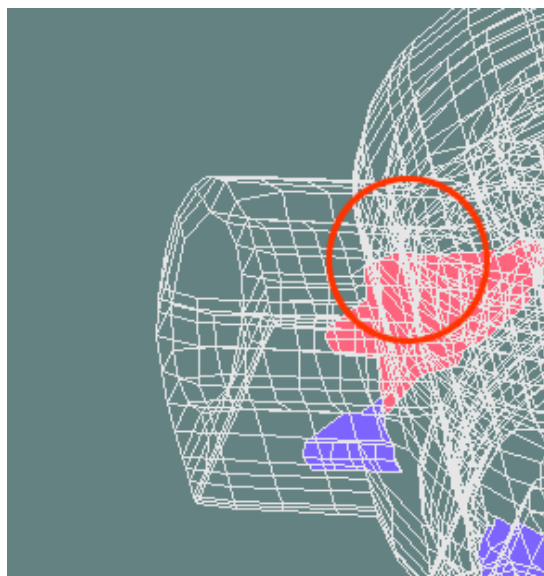
V programu SIMTEC je místě odběru vzorku v čase 3,1 s velká oblast neztuhlého kovu o objem 19,6 cm³, kde je předpokládané smrštění 6,4 % (obr. 4.10, označen červeně).



Obr. 4.8: Poloha porezity - ProCAST



Obr. 4.9: Poloha porezity – MAGMA



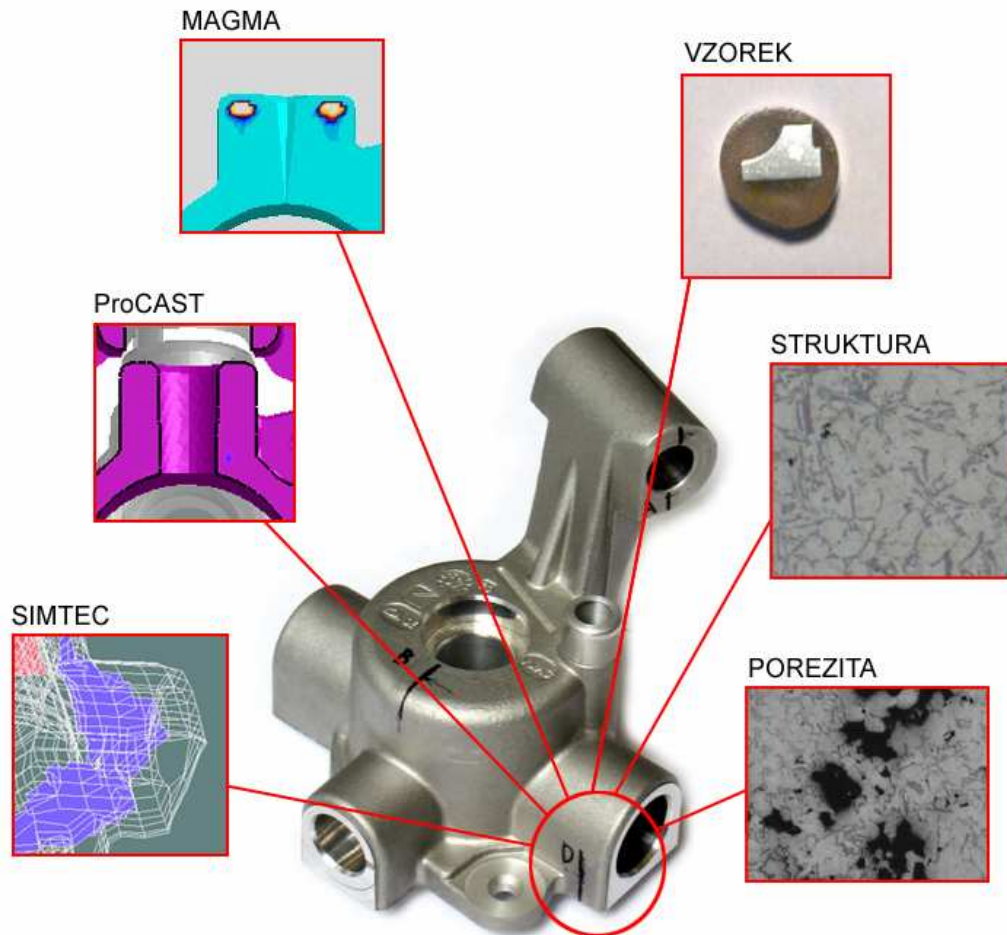
Obr. 4.10: Poloha naposledy tuhnoucího objemu – SIMTEC

4.3.2 Zhodnocení výsledků

Z výsledků simulace by se dalo předpokládat, že se bude na obou výbrusech z tohoto místa vyskytovat zvýšené množství porezity. Tento předpoklad se částečně potvrdil, neboť na vzorku 1C byla naměřena porezita 6,13%, což je dvojnásobně vyšší hodnota než je smrštění této slitiny a také největší naměřená hodnota ze všech vzorků. Hodnota porezity vzorku 2C je 2,08%, což je hodnota ze všech měření podprůměrná. Bylo by nutné odebrat více vzorků z většího počtu odlitků, aby bylo možné říci, zda se v odlitku z jedné poloviny formy tvoří tepelné uzly odlišných místech než v odlitku z druhé poloviny, tak jak predikuje MAGMA.

Doba tuhnutí tohoto tepelného uzlu uváděná v použitých simulačních programech se pohybuje v rozmezí 8-10 sekund od zaplnění dutiny formy.

4.4 Místo D



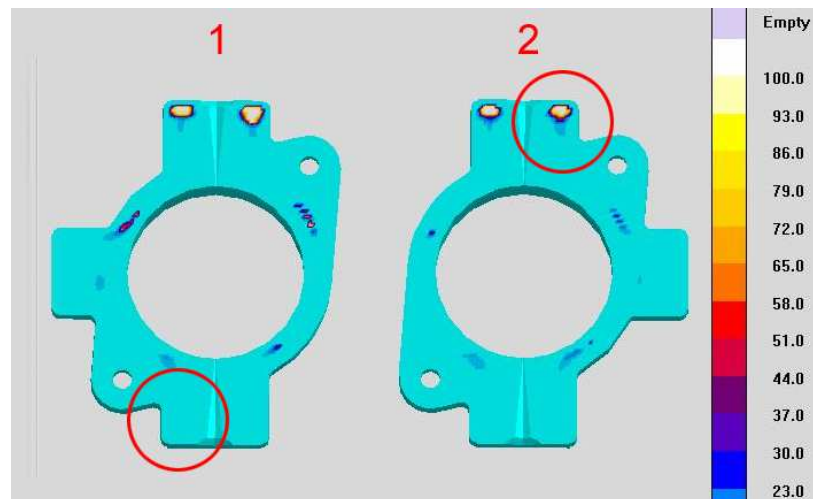
Obr. 4.11: Místo D

4.4.1 Popis oblasti

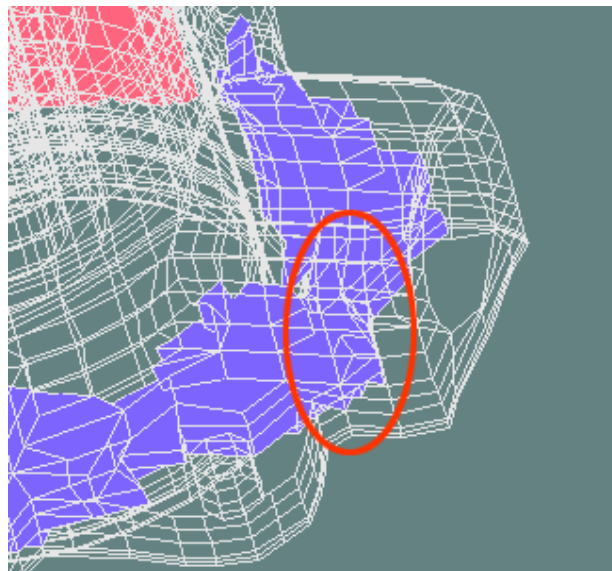
Toto místo se nachází na protější straně odlitku než místo C, ale vzorek byl odebrán blíže ke kraji, tedy dál od patky na uchycení odlitku v sestavě. Vzdálenost zkoumané plochy od čela otvoru je 6mm. Právě poloha na kraji odlitku by měla zajistit rychlé tuhnutí bez vzniku vad typu staženina.

V simulačním programu MAGMA se v tomto místě objevuje výrazná staženina na obou stranách otvoru, ale ne symetricky v obou odlitcích, nýbrž pouze v části odlitku, která je ve formě nahoře (obr. 4.12). Strana protější, která je ve formě vespod, předpokládá tuhnutí bez vzniku poretity. Znamenalo by to, že v experimentu získám odlišné výsledky poretity na vzorku 1D a 2D (místa vzorků jsou na obr. 4.12 zakroužkovány).

Programy ProCAST ani SIMTEC žádnou poretitu v místě odpovídajícím místě odběru vzorku nepředpokládají, jak je vidět na obrázku 4.11. V programu SIMTEC je v čase 3 s nedaleko místa odběru vzorku velké oblasti objemu (obr. 4.13, označena modře) naposledy tuhnucího kovu. Velikost objemu je $9,8 \text{ cm}^3$, předpokládaná poretita v důsledku smrštění v tomto objemu 6,4%.



Obr. 4.12: Poloha poretity - MAGMA



Obr. 4.13: Poloha naposledy tuhnucího objemu – SIMTEC

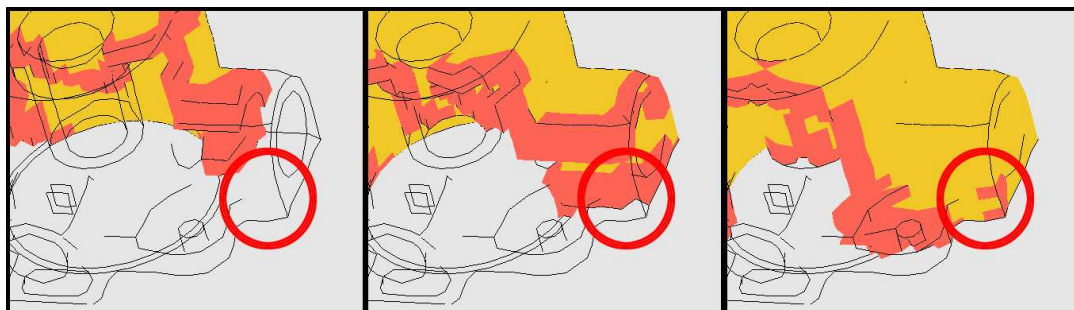
4.4.2 Zhodnocení výsledků

V místě 1D byla naměřena poretita o hodnotě 3,58%, tedy nadprůměrná (průměr poretity naměřený na všech vzorcích v odlitku je 2,26%), a v místě 2D byla naměřena dokonce 4,84%. Výsledky tedy napovídají, že se v tomto místě zvýšená poretita vyskytuje, ačkoli se neobjevuje s simulačních programech, pouze v programu MAGMA, kde je ale predikována pouze na jednom odlitku ve formě.

Tyto vady, jež ukázala MAGMA, jsou s největší pravděpodobností způsobeny uzavřenými plyny v dutině formy. Vady predikované v horních částech odlitku (vzhledem k osazení ve formě) mohou vzniknout rozdílným tlakovým a rychlostním polem během plnění odlitku

Vzhledem k poloze místa – na okraji odlitku dále od patky, by se na tomto místě neměly vyskytovat staženiny. Poretita by v tomto místě mohla být způsobena uzavřením vzduchu, který nestihl uniknout při plnění, jelikož se odvzdušnění nachází na druhé straně otvoru. Na simulacích plnění

v programech ProCAST a MAGMA není patrný žádný uzavřený vzduch, v obou jde první vlna kovu po dně a poté stoupá kolem jádra otvoru nahoru. Simulace plnění programem SIMTEC není sice tak detailní, ale probíhá jiným způsobem a ve zkoumaném místě naznačuje uzavření vzduchu (obr. 4.14).

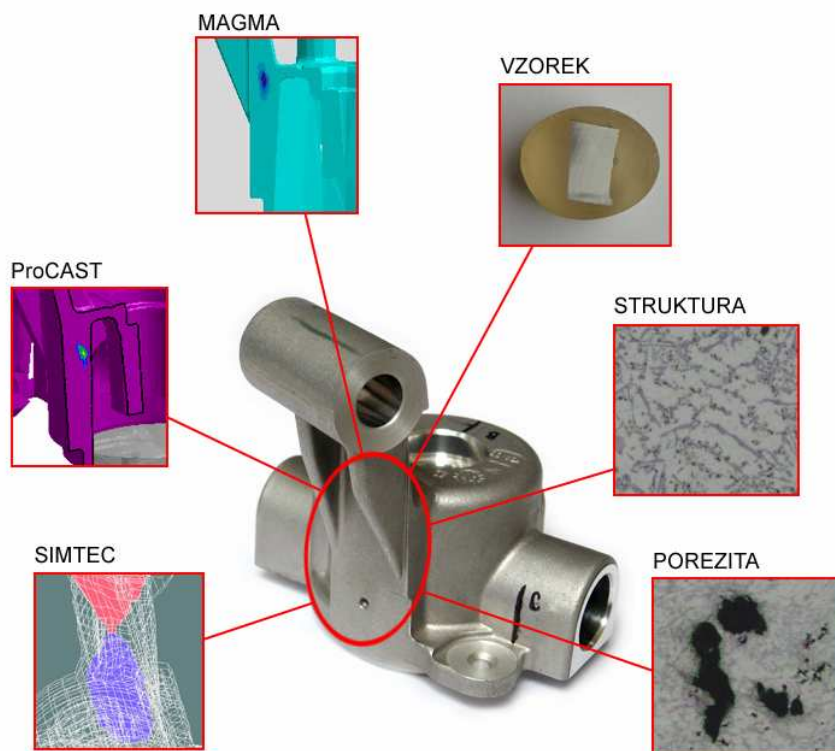


Obr. 4.14: Plnění místa D – SIMTEC

Jinou příčinou vzniku porezity v tomto místě by mohlo být z postřiku formy, kde zvláště na spodní straně forem může nastat stékání postřiku a tvorba louží.

Nicméně pokud by se jednalo opravdu o porezitu způsobenou jiným vlivem než smršťováním kovu, pak by tyto póry měly jiný tvar. Výsledky tvarového popisu porezity vzorků 1D a 2D ale nenaznačují odchylku od hodnot z jiných míst na odlitku (viz kap. 3.3.2). Nelze proto jasně určit původ této porezity.

4.5 Místo E



Obr. 4.15: Místo E

4.5.1 Popis oblasti

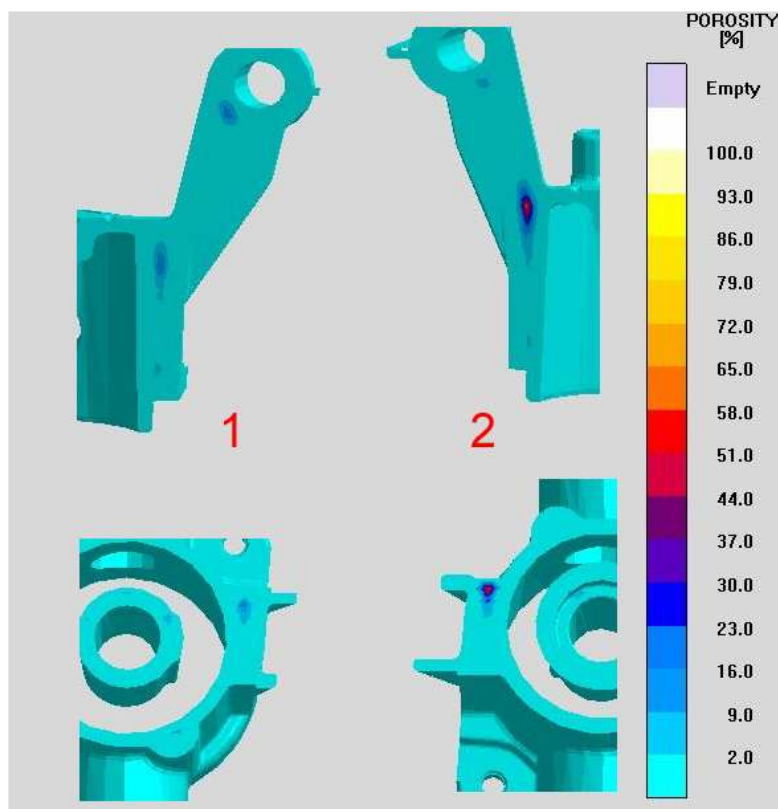
Vzorky z místa E byly odebrány primárně pro zkoušku tahem, je to jediné místo na odlitku, ze kterého lze odebrat vzorek potřebné délky. Po této zkoušce byly vzorky upraveny na menší plochy a připraveny na metalografický výbrus. Délka tyčky byla 42 mm, použité vzorky jsou přibližně z poloviny této délky.

Jedná se o nejmohutnější část odlitku, kde lze očekávat vznik tepelného uzlu. Přibližně z poloviny vybíhají po obou stranách dílu dvě výztužná žebra pro horní uložení, která slouží i jako chladicí žebra. Z druhé strany stojny je v jejím středu ještě jedno výztužné žebro.

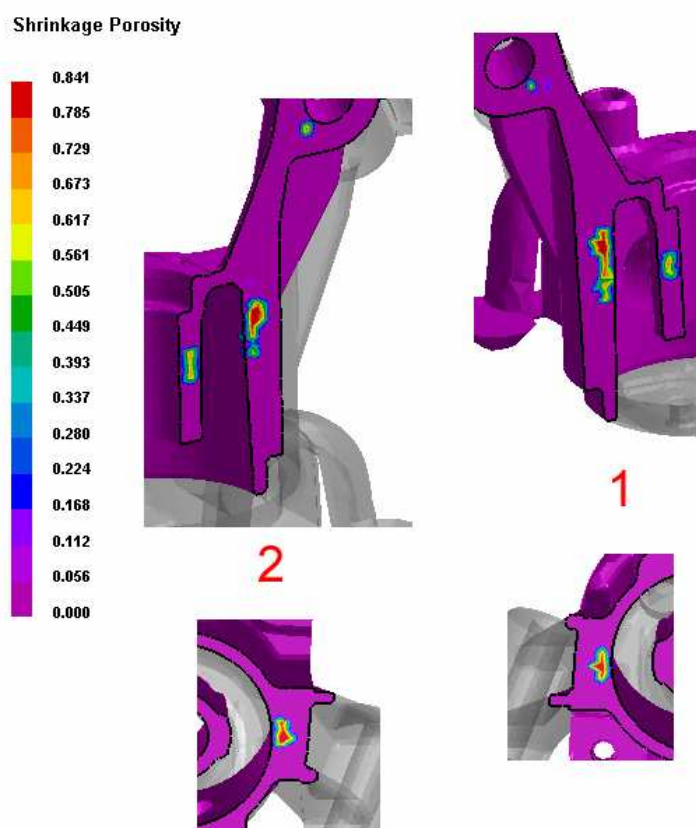
Vznik tepelného uzlu se potvrdil ve všech simulačních programech, a to ve stejném místě v horní části, v prostoru mezi žebry, v místě paty středního žebra. MAGMA odhaduje vznik porezity o maximální míře do 50%, jako v předchozích případech není tato vada symetricky v obou odlitcích, ale posunuta k horní části formy (obr. 4.16).

ProCAST vyznačuje porezitu uprostřed horní části stojny a to ve stejné míře v obou odlitcích. Předpokládá objemné stažení až do hodnoty 80% chybějícího materiálu (obr. 4.17).

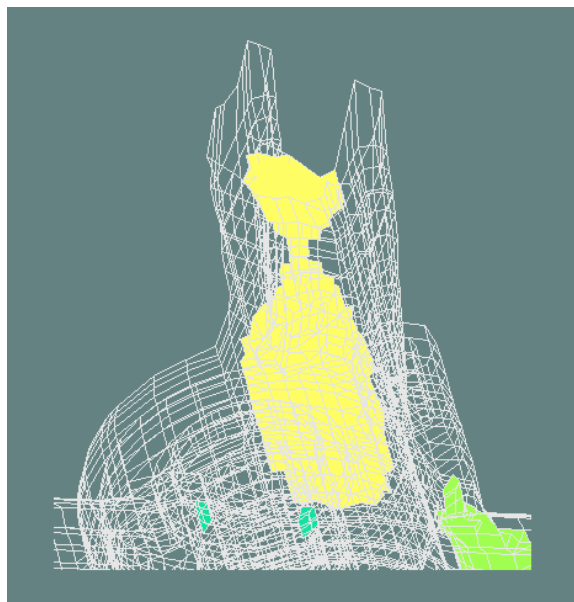
Tepelný uzel podle programu SIMTEC začíná v místech, kde začínají vystupovat dvě žebra na zadní stěně, a stoupá nahoru, kde končí zároveň se středním žebrem na protější straně (obr. 4.18). Střed tohoto uzlu (a místo největších vad) je tedy v místě shodném s programy MAGMA a ProCAST. Velikost objemu v čase 3,6 s je 6 cm³, předpokládaný podíl chybějícího kovu podle programu SIMTEC 6%.



Obr. 4.16: Poloha porezity - MAGMA



Obr. 4.17: Poloha porezity - ProCAST



Obr. 4.18: Poloha porezity – SIMTEC

4.5.2 Zhodnocení výsledků

Naměřená poretita na vzorcích z tohoto místa je v průměru 1,57%. Tato nízká hodnota odpovídá tomu, že měření bylo prováděno v místě vzdáleném 10-20 mm od středu tepelného uzlu podle simulačních programů. Pro ověření výsledku simulace by bylo nutné odebrat vzorky z místa, které v tomto případě odpovídá konci vzorků pro zkoušku tahem – tyto konce byly při této zkoušce deformovány čelistmi tahového stroje.

4.6 Shrnutí výsledků míry poretity

Není možné absolutní porovnání experimentálně naměřené poretity s výsledky predikovanými simulačními softwary, protože MAGMA a ProCAST vyjadřují míru poretity jako koncentrovanou staženinu. SIMTEC udává smrštění v objemu kovu, do kterého již není možné dosazovat, obsáhne tedy větší objem s menší mírou poretity (bližší realitě).

V následující tabulce 4.1 je přibližné srovnání velikosti maximální poretity, která se vyskytuje v místě nejbližším k místu analyzované plochy na vzorku. Tato vzdálenost je ve sloupci *L* (mm) a jedná se pouze o přibližný údaj. Je-li *L*=0, znamená to, že plocha vzorku je v místě predikované vady.

Tab. 4.1: Shrnutí výsledků poretity v závislosti na vzdálenosti od tep. uzlu

Poretita	Místo A		Místo B		Místo C		Místo D		Místo E	
Vzorek 1	2,38 %		1,05 %		6,13 %		3,58 %		1,57 %*	
Vzorek 2	0,32 %		0,50 %		2,08 %		4,84 %			
	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P
MAGMA	8	30%	0	15%	10	15%	20	15%	15	50%
ProCAST	10	50%	-	-	5	40%	15	25%		75%
SIMTEC	5	6,6%	-	-	0	6,4%	10	6,4%	0	6,0%

*) průměrná hodnota ze čtyř měření

Legenda: **L**...vzdálenost od tepelného uzlu (mm)

P...max. míra poretity v místě staženiny nebo v objemu naposledy tuhajícího kovu (%)

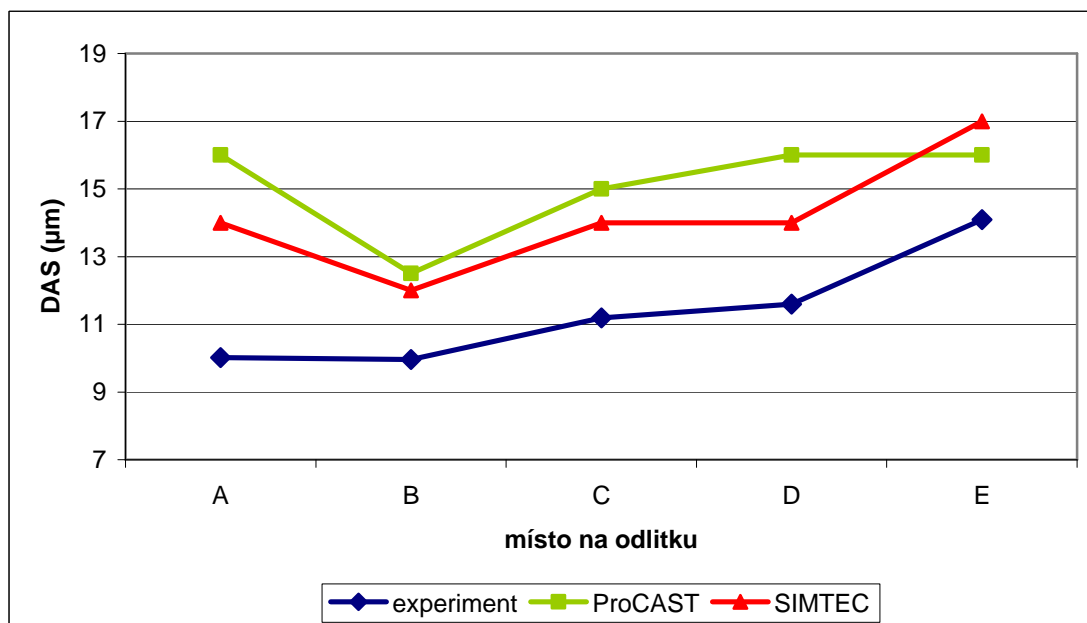
-...v okolí zkoumaného místa se tepelný uzel nenachází

4.7 Vyhodnocení DAS ve všech místech odlitku

Tab. 4.2: Vyhodnocení DAS

	Experiment	ProCAST	SIMTEC
Místo A	10,02 ± 1,93	16	14
Místo B	9,96 ± 1,91	12,5	12
Místo C	11,19 ± 2,15	15	14
Místo D	11,60 ± 1,88	16	14
Místo E	14,09 ± 1,78	16	17

Určení parametru DAS je v obou programech na dobré úrovni, rozdíl predikované a experimentálně naměřené hodnoty není vzhledem k povaze parametru a množství vlivů jej ovlivňujících významný. Na následujícím grafu 4.1 jsou vidět odchylky simulací vůči experimentu, přesnost je silně ovlivněna odhadem velikosti parametru z barevného pole na modelu odlitku.



Graf 4.1: Porovnání Parametru DAS v experimentu a simulacích

ZÁVĚR

Cílem práce bylo zhodnotit schopnosti simulačních softwarů pro predikci vnitřních vad a mikrostruktury tlakově litých hliníkových odlitků. Ze všech programů jsem získal jsem výsledky simulace plnění formy, tuhnutí odlitku a predikci porezity. V programech které toto umožňovaly byla provedena předpověď výsledné makrostruktury – parametru DAS, rychlostního pole při plnění a vznik tepelných uzlů.

Před začátkem simulací byly z odlitku odebrány tyčky pro zkoušku tahem, z těchto tyček a dalších 4 vytipovaných míst byly následně odebrány vzorky pro metalografické výbrusy. Na vzorcích se měřila porezita, a to jak tvarové hodnocení, tak i orientační měření míry výskytu porezity. Souběžně byla změřena hodnota parametru DAS – vzdálenosti sekundárních os dendritů.

Simulační softwary ProCAST a SIMTEC prokázaly velmi dobré výsledky v predikci makrostruktury v odlitku, odchylka absolutní hodnoty naměřené na vzorcích se pohybovala okolo 5 μ m od údaje naměřeného na vzorcích z odlitku. Tyto programy lze doporučit slévárenským technologům jako nástroj pro odhad parametru DAS v budoucím odlitku.

Ze vzájemného porovnání simulačních softwarů vyplývá, že všechny tři programy se shodují v poloze míst kritických pro vznik vad typu smršťovacích staženin a s ní související porezity. Programy MAGMA a ProCAST vyhodnocují porezitu jako koncentrovanou staženinu do malého objemu materiálu a tedy o velikosti v desítkách procent. U tlakového lití tohoto typu odlitku malé velikosti se ale porezita vyskytuje spíše rozptýleně ve větším prostoru, vlivem dotlaku při tuhnutí odlitku. Tomuto chování nejlépe odpovídá model použitý v programu SIMTEC. Ten používá pro predikci porezity zbývající objemy, které mají vyšší teplotu než je okolní teplota. Při teplotě kritické již neprobíhá dosazování, a z těchto podmínek vypočítá v daném objemu míru smršťení a tedy i porezity.

Slabinou této práce byla volba míst pro odběr vzorků, které se často nacházely v prostoru, ve kterém simulační programy nepředpokládaly výskyt vady. V budoucím zkoumání pro zpřesnění výsledků by bylo nutné odebrat vzorky až po provedení simulací přesně v místech, kde byla vada predikována. Dále by bylo nutné zvolit jinou metodu měření míry porezity ve vzorcích, neboť metoda použitá v této práci je spíše pro orientační výsledky a je zatížena velkou chybou vlivem manuální kompenzace vyvážení odstínů. Popřípadě by bylo nutné získat větší množství vzorků z jednoho místa v odlitku (nejlépe obdélníkového tvaru) a také na nich provést opakovaná měření.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] Krutiš, L.: Přednášky z předmětu Matematické modelování

[2] Spaniel, M.: Modelování v technice - Metoda konečných prvků, přednášky [online], aktualizováno 26.3.2003, cit. 3.2.2008, dostupné na adrese <http://mechanika.fsid.cvut.cz/sources_old/mmkp/node4.html>

[3] Nová, I., Kosek, P., Šmrha, J.: Slévárenské simulační programy, MM Průmyslové spektrum 2005/11, online verze dostupná adrese <<http://www.mmspektrum.com/clanek/slevarenske-simulacni-programy>>

[4] SIMTEC, webová prezentace firmy, cit. 10.2.2008, <<http://www.simtec-inc.com>>

[5] MAGMAsoft, webová prezentace firmy, cit. 11.2.2008, <<http://www.axiomtech.cz/magma.htm>>

[6] Nová, I., Hošek, Z. Nováková, I.: Rozvoj tlakového lití, MM Průmyslové spektrum 2004/05, online verze dostupná na adrese <<http://www.mmspektrum.com/clanek/rozvoj-tlakoveho-liti>>

[7] Michna, Š., Lukáč, I., Očenášek, V. a kol.: Encyklopedie hliníku, Adin s.r.o. Prešov, 2005

[8] Heckel, T., Klein, F.: Formfüllung und Erstarrung beim Druckgießen – ein Vergleich zwischen Versich und Simulation (Plnění forem při odlévání pod tlakem – porovnání mezi zkouškou a simulací), Druckguss-Praxis, 2003, č.2, str. 77-86

[9] Němec, M.: Modifikace tlakového lití, Metody přesného lití, ČVUT Praha [online], cit. 17.3.2008, dostupné na adrese <http://u12123.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/modifikace_tlakoveho_liti.pdf>

[10] Birch, J.: Porosity in pressure diecastings (Porezita u tlakového lití), Diecasting World, 1999, č.3, str. 14-20

[11] Sperlich Giesserei, materiálová specifikace [online], cit. 26.4.2008, dostupné na adrese <<http://www.sperlich.de/000001985c0a4f46e/000001985c0a51d72/03c198990b1295224.html>>

[12] Trimet Praha, materiálová specifikace [online], cit. 26.4.2008, dostupné na adrese <http://www.trimet.cz/cz/sv_EN_AB-46000.php>

[13] firma Bühler: Correcting porosity using the diecasting machine (Snižování porezity na tlakových strojích), Diecasting World, 1999, č.3, str. 26-29

[14] Nogowizin, B.: Porosität in Druckgussteilen (Porezita v tlakově litých odlitcích), Druckguss-Praxis, 2004, č.5, str.192-200

[15] ESI Group, webová prezentace firmy, cit. 24.4.2008, <<http://www.esi-group.com>>

[16] Roučka, J.: Metalurgie neželezných kovů, CERM, Brno, 2005, str.101-102

[17] Jirků, L.: Hodnocení porezity u tlakově litých odlitků z Al slitiny, Brno, 2007

[18] Physics Lab: Specific and Latent Heat, cit. 11.5..2008, <<http://phoenix.phys.clemson.edu/labs/223/spheat/index.html>>