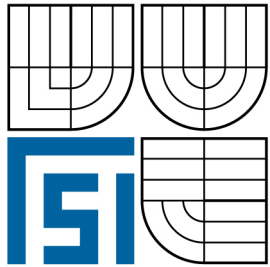


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**VYUŽITÍ SIMULAČNÍHO SOFTWARE KE SNÍŽENÍ
PRODUKCE NESHODNÝCH ODLITKŮ Z AL SLITIN**
UTILIZATION OF NUMERICAL SIMULATION TO REDUCE A SCRAP OF AL CASTINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR DOLEŽAL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. VLADIMÍR KRUTIŠ, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Petr Doležal

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Využití simulačního softwaru ke snížení produkce neshodných odlitků z Al slitin

v anglickém jazyce:

Use of numerical simulation for reduction of scrap from Al alloys

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Numerická simulace je sofistikovaným nástrojem pro predikci a eliminaci slévárenských vad. Nároky na odlitky z Al slitin se neustále zvyšují, přičemž numerická simulace může být významným pomocníkem při návrhu vtokových soustav a nálitků, při predikci struktury a mechanických vlastností po odlití a po tepelném zpracování. Všechny tyto možnosti budou rozebrány na konkrétním odlitku.

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem práce je přehledné zpracování možností numerické simulace v oblasti lití Al slitin. Budou rozebrány možnosti simulace v oblasti proudění kovu, tuhnutí a chladnutí odlitku, výpočtů napětí a deformací a následně tepelného zpracování.

Seznam odborné literatury:

1. ROUČKA, J. Metalurgie neželezných kovů. Skripta VUT. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
2. Aluminium Castings Technology Handbook. Edited by DL Zalensas. 2th ed. Des Plaines: AFS, 1993. 350 p. ISBN 0-87433-157-9.
3. BONOLLO, F., ODORIZZI, S. Numerical Simulation of Foundry Processes. Padova: S.G.E., 2001. 264 p. ISBN 88-86281-63-3.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 11.11.2011

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá možnostmi současných simulačních softwarů a jejich uplatnění v technické praxi. Cílem práce je popsat pracovní postup simulace, shrnout potřebné vstupní parametry odlitku pro dosažení věrohodnosti simulace a možnosti simulačních softwarů v oblasti predikce slévárenských vad. Tento teoretický rozbor je aplikován na konkrétní odlitek, ten je předmětem simulace, která řeší ideální vtokovou soustavu a predikci vzniku případných vad. Přesnost simulace se ověří analýzou reálně odlitého výrobku.

Klíčová slova

Slévárství, simulace, neshody, 3D model

ABSTRACT

This thesis deals with the possibilities of current simulation software and their use in technical practice. The aim of the thesis is to describe the process of the simulation; summarise the required initial parameters of the cast in order to achieve a credible simulation, and to describe the possibilities of the use of simulation software in the area of casting defect prediction. This theoretical analysis is applied on a specific cast, which is subject to a simulation trying to find an ideal inflow system, as well as predicting the formation of possible defects. The accuracy of this simulation will be proved by analysing an actual cast product.

Key words

Casting, simulation, defects, 3D model

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DOLEŽAL, P. *Využití simulačního softwaru ke snížení produkce neshodných odlitků z Al slitiny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. XY s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Využití simulačního softwaru ke snížení produkce neshodných odlitků z Al slitin“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

20.5.2012

.....
Petr Doležal

Poděkování

Děkuji tímto panu Ing. Vladimíru Krutišovi Ph.D. a odborným pracovníkům slévárny Slévárna a modelárna Nové Ransko s.r.o. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce a rodičům za podporu při studiu.

OBSAH

Abstrakt	3
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah	6
CAE VE SLÉVÁRENSKÉ PRAXI	7
1 simulační softwary	8
1.1 Metody simulace	8
1.1.1 Analytická metoda	8
1.1.2 Numerická metoda	8
1.2 Možnosti predikce slévárenských vad	9
1.2.1 Plnění formy	9
1.2.2 Tuhnutí odlitku	12
1.2.3 Chladnutí odlitku	14
2 postup přípravy před simulací	16
2.1 Popis zadaného odlitku	16
2.2 Tvorba elektronického modelu odlitku	17
2.3 Import do simulačního SW	17
2.4 Přiřazení materiálů	18
2.5 Tvorba 3D sítě – meshing	19
2.6 Zadání počátečních podmínek	20
3 možnosti simulace aL odlitků v oblasti plnění formy	21
3.1 Průběh plnění	21
3.2 Rozložení teplotního pole	22
3.3 Tlak plynu	23
3.4 Čas naplnění	23
4 Simulace tuhnutí a chladnutí odlitku z aL slitin	24
4.1 Podíl tekuté a tuhé fáze kovu	24
4.2 Čas tuhnutí	25
4.3 Porezita	25
5 možnosti simulace dalších technologických procesů u aL slitin	26
5.1 Rychlost proudění tekutého kovu	26
5.2 Další možnosti simulačních softwarů	27
Závěr	28
Seznam použitých zdrojů	29

CAE VE SLÉVÁRENSKÉ PRAXI

Hlavním trendem vývoje ve slévárenství a v průmyslové praxi všeobecně je zvyšování kvality a naproti tomu snižování ceny. Protože v současné době není příliš prostoru pro vyvíjení a zavádění nových technologií, je třeba se snažit upravit ty současné a právě tímto způsobem zefektivnit a zkvalitnit naši produkci.

Ve slévárenské praxi nám v tomto mohou značně pomoci Computer Aided Engineering (dále CAE) technologie. Při vývoji finálního výrobku (odlitku) je kvalita a technologická správnost závislá pouze na schopnostech a kvalitách pověřeného technologa. Ten volí technologický postup na základě znalostí a zkušeností, konečná podoba odlitku je získána experimentální metodou, kdy je odlitek třeba i několikrát zkušebně odlit, z důvodu analýzy správnosti postupu. Zákonitě tedy dochází ke ztrátám na materiálu, energii a času. Při použití simulačních SW je samozřejmě technolog stále nepostradatelný, dostává však do rukou spoustu nástrojů, s nimiž může zlepšit využití tekutého kovu, práci ulehčit a zároveň zkvalitnit, navíc jsou ušetřeny obvyklé náklady, které je nutno vynaložit při vzorkovém řízení a při realizaci nápravných opatření (úprava modelového zařízení).

Pomocí těchto nástrojů si tak technolog může například simulovat tuhnutí taveniny v odlitku a pozorovat vznik případných staženin, tepelných uzlů a dalších vad, které při odlévání vznikají. Dále může zkoumat deformace a vzniklá vnitřní napětí a tak ještě před odlitím zjistit případné konstrukční chyby a tím vylepšit v dnešní době čím dál víc nutnou komunikaci mezi technologem a konstruktérem. Některé simulační programy jsou už natolik sofistikované, že dokážou sami vyhodnotit konstrukční chybu a dokonce technologovi ukázat příklad lepšího řešení. [1]

Pokud bychom velmi hrubě chtěli rozčlenit práci s CAE technologiemi, můžeme je rozdělit do tří kroků. Prvním z nich je preprocessing, v této fázi tvoříme geometrii/model odlitku, nejčastěji v CAD (Computer Aided Drawing) programech a tato je ve standardním 3D formátu (např. STL, STEP) převedena do simulačního SW. Dalším krokem je mainprocessing, v němž probíhá samotný výpočet plnění formy, postupu teplotního pole, deformace, případně napětí. Poslední fází je postprocessing, ve kterém máme k dispozici výstupy na obrazovce, z nichž můžeme provádět analýzu výsledků. [2]

1 SIMULAČNÍ SOFTWARE

1.1 Metody simulace

Samotná simulace pracuje na několika principech, máme tedy na výběr z několika metod. Každá má samozřejmě své klady a zápory, právě proto je i při inteligenci simulačních softwarů stále důležitý technolog, který svým úsudkem zhodnotí, zda je metoda pro daný problém vhodná a poskytne nám relevantní výsledky.

1.1.1 Analytická metoda

Analytická metoda je jednoduchá, má však natolik zásadní omezení použitelnosti, že je v praxi využívána především k ověřování jednoduchých modelů. Hlavním nedostatkem je její použitelnost, dá se aplikovat pouze na jednoduché matematické modely, což je při složitosti dnešních odlitků nedostačující. Proto je v drtivé většině použita metoda numerická.

1.1.2 Numerická metoda

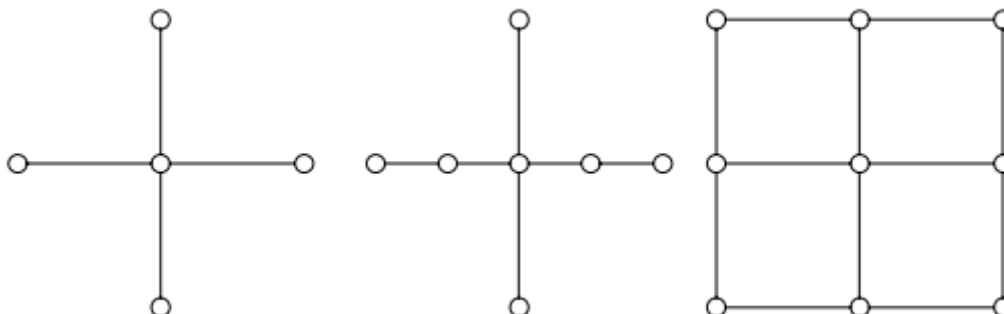
Numerická metoda je na základě principu výpočtů dále rozdělena na několik metod, nejrozšířenější jsou:

- Metoda konečných diferencí - FDM
- Metoda konečných prvků - FEM
- Další metody

Metoda konečných diferencí

Metoda konečných diferencí je ve své podstatě jednoduchá. Počítaná oblast je rozdělena na podoblasti (mohou být 1D, 2D i 3D). V těchto oblastech je pomocí diferenční rovnice popsáno časově závislé rozdělení teplot. Síť (plocha, či objem rozdělená na útvary-podoblasti je nahrazena sítí) může být tvořena různými elementy, ve 2D například čtverci, trojúhelníky či obdélníky, ve 3D pak krychlemi, nebo čtyřstěny. Hustota, velikost i tvar těchto elementů ovlivňují přesnost simulace.

Z výše zmíněného můžeme snadno odhadnout výhody i nevýhody metody. Na jednu stranu je metoda jednoduchá a nenáročná na programování, na stranu druhou je analytické řešení možné pouze pro kouli, nebo nekonečnou plochu, takže se musíme uchýlit k aproximaci.



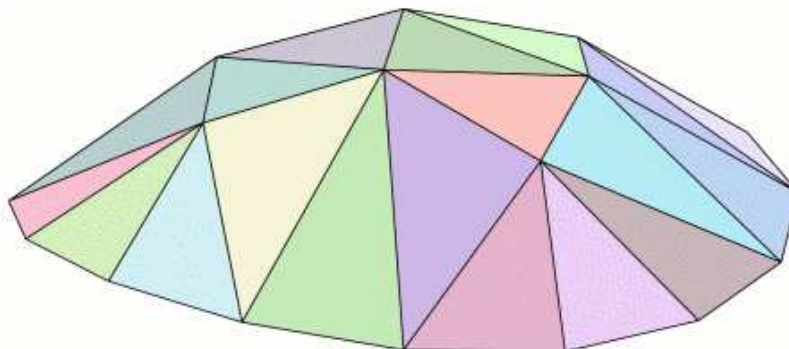
Obr. 1 Síť je tvořena uzly, které oddělují vnitřní a hraniční uzly [2]

Pomocí této metody je řešena praktická část práce.

Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (známá i pod zkratkou MKP) je dnes stále populárnější.[2] Spočívá v rozdělení kontinua na konečný počet prvků. Z uzlových bodů těchto prvků jsou následně počítány zjišťované parametry.

Její hlavní výhodou je numerická stabilita (chyby se neakumulují), tím pádem je dosaženo přesnějších výsledků, dále potom snadná implementace a schopnost řešit i složité geometrie.[3]



Obr. 2 Rozdělení tvarově složité plochy na jednotlivé elementy [3]

Další metody

- Metoda rozložení
- Metoda hraničních elementů
- Metoda upravených objemů

Hlubší náhled na problematiku numerických metod může poskytnout například publikace Numerical Simulation of Foundry Processes. [7]

1.2 Možnosti predikce slévarenských vad

Proces odlévání je velmi složitý. Hraje v něm roli velké množství významných vlivů, parametrů a okrajových podmínek. Pokud některé z nich špatně vyhodnotíme, nevezmeme v úvahu, nebo zvolíme špatné konstrukční řešení, mohou se ve finálním výrobku vyskytnout neshody. V tomto bodě práce jsou stručně popsány ty neshody, které dokáže simulační SW objevit.

Simulací se dají popsat téměř všechny procesy provázející vznik hotového odlitku, od plnění formy, přes tuhnutí a chladnutí až po analýzy vlastností odlitku.

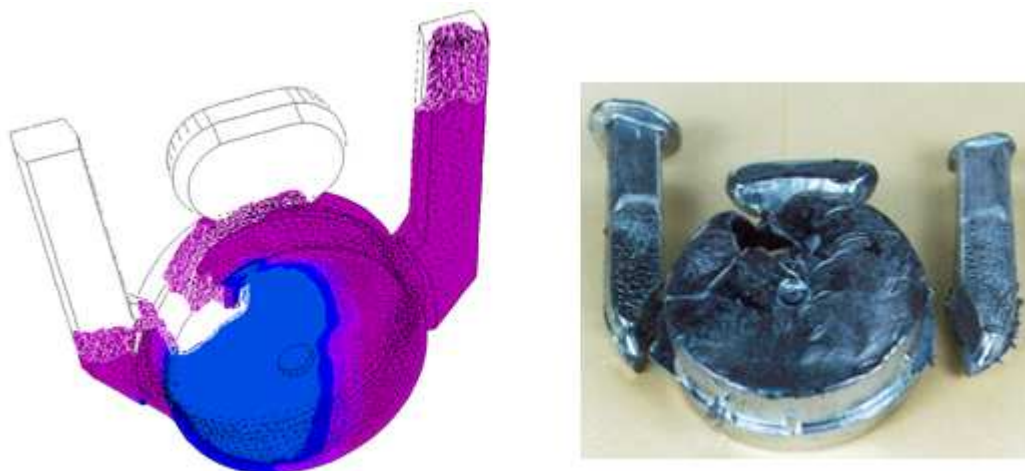
1.2.1 Plnění formy

Nezaběhnutí a nedolití

K nezaběhnutí může dojít z několika důvodů, jednak to může být příliš rychlým odvodem tepla z formy a tím způsobeného předčasného ztuhnutí kovu, dále nedostatečným odvzdušněním formy, nebo z důvodu příliš velkého vývinu zplodin vzniklých kontaktem tekutého kovu s jádrem, nebo formovací směsí.

Projevuje se tím, že se tekutý kov nedostane do periferních, nebo příliš tenkých částí odlitku – nedoběhne.

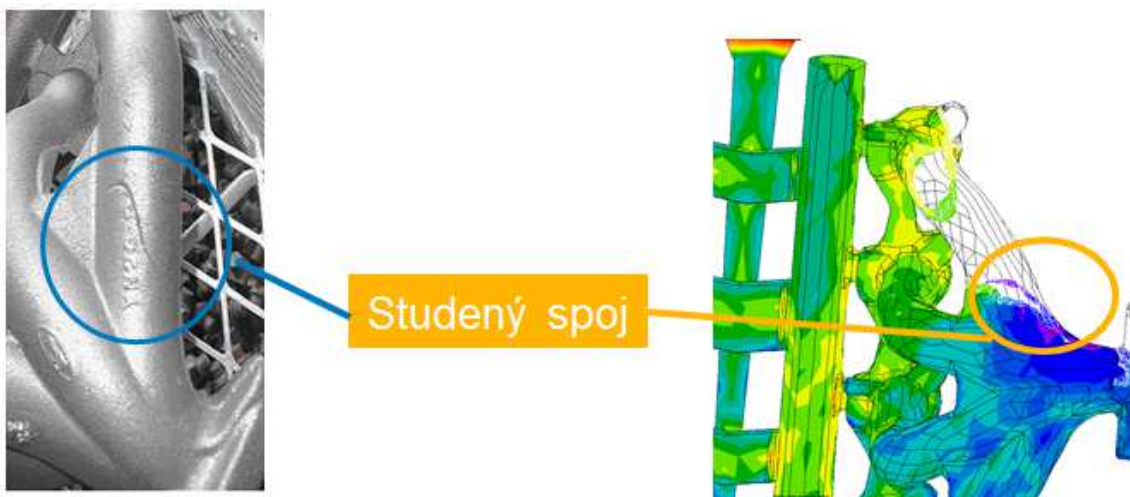
Řešením je vhodná volba vtokové soustavy.



Obr. 3 Nedolítí součástí [4]

Zavaleniny a studené spoje

Zavaleniny a studené spoje vznikají tak, že ztuhlá část tekutého kovu ve formě se při plnění dotkne tekutého kovu, přitékajícího z jiné části vtokové soustavy. Při tomto kontaktu již není tekutý kov dost teplý, proto zůstává stopa (vráska) na povrchu odlitku, v horším případě netěsnost a odlitek může ztratit svou funkčnost (prosakuje nebo prostupuje plyn). Pokud zůstane pouze stopa na povrchu, jde o zavaleninu, pokud zůstává netěsnost, jde o studený spoj.



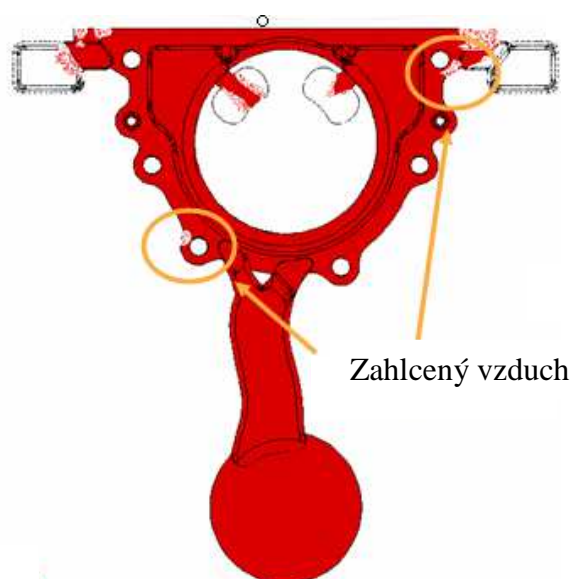
Obr. 4 Predikce studených spojů, vpravo je vidět již chladnoucí část, přičemž z horní části ještě neproudí tekutý kov [4]

Zahlčený plyn

Tato neshoda vzniká, pokud zplodiny reakce tekutého kovu s formovací směsí nestačí včas uniknout, nebo pokud nestačí včas uniknout vzduch.

Pokud s taveninou reaguje zahlčený plyn, bublina je matná, protože se vytvářejí sloučeniny, nejčastěji s kyslíkem. Pokud s taveninou reaguje inertní plyn, nebo vodík, bubliny jsou lesklé.

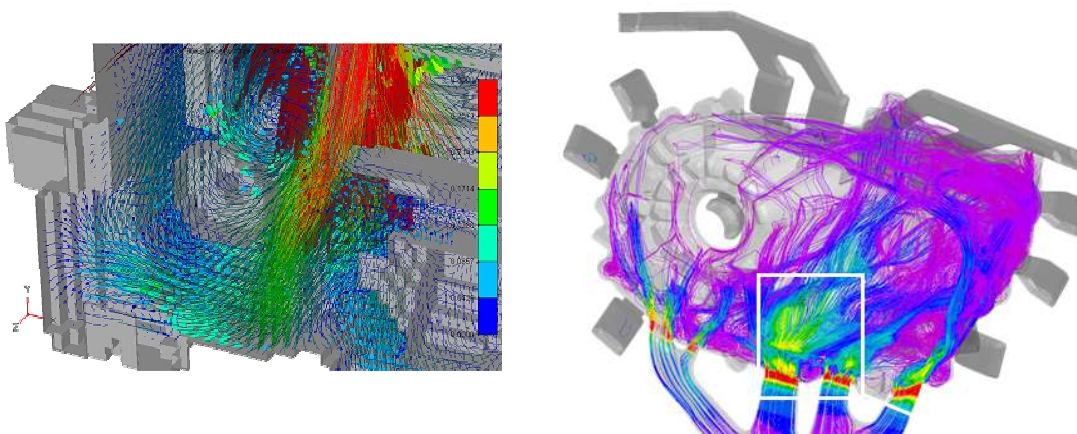
Zahlčenému plynu se dá zamezit použitím prodyšnější formy, nebo použitím výfuků.



Obr. 5 Zobrazení zahlčeného vzduchu [4]

Lokální turbulence

Plnění dutiny formy je hydrodynamický proces. Velmi záleží, zda je proudění laminární, nebo turbulentní. Při turbulentním proudění může dojít k vymílání formovací směsi, případně z jádra. Simulační SW dokáže zobrazit rychlosti proudění a riziková místa, kde při odlévání bude docházet k lokálním turbulencím.

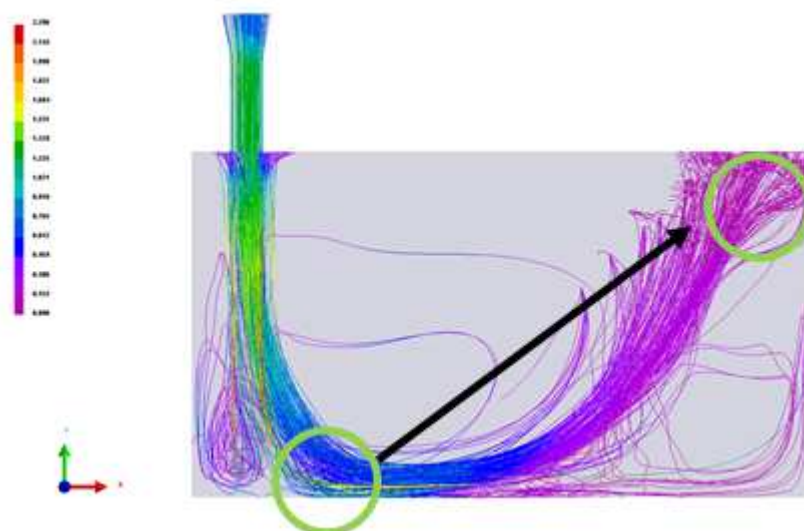


Obr. 6 Vlevo zobrazení rychlostí proudění, vpravo jsou červeně vyznačena místa, kde je charakter proudění turbulentní [4]

Eroze

Eroze je vymílání formovací nebo jádrové směsi v místě vysokého tepelného namáhání a dynamických účinků při plnění dutiny formy.

Dá se jí čelit vhodnou volbou vtokové soustavy, volí se taková, která dynamicky nenamáhá, nebo minimalizuje namáhání dutiny formy. Do nebezpečných míst může být dán jiný materiál, nebo se použije jiná směs (např. chromit). Další variantou je zpevňující postřik nebo nátěr. Někdy také pomůže vložení filtru, kterým se zklidní plnění dutiny formy.



Obr. 7 Místa vyplavení formy [5]

1.2.2 Tuhnutí odlitku

Staženiny

Pokud je v odlitku při tuhnutí nedostatek kovu, vlivem smrštění se mohou objevit staženiny. Dojde k propadnutí materiálu a může se objevit otevřená staženina a pod ní mikroporozita.

K vnitřním staženinám dochází především v tepelných uzlech, je možno jim tedy zabránit vhodnou volbou vtokové soustavy. Snahou je, aby se tepelný uzel dostal do nálitku.

Pomocí simulace je možno zjistit místo a velikost vnějších i vnitřních staženin.



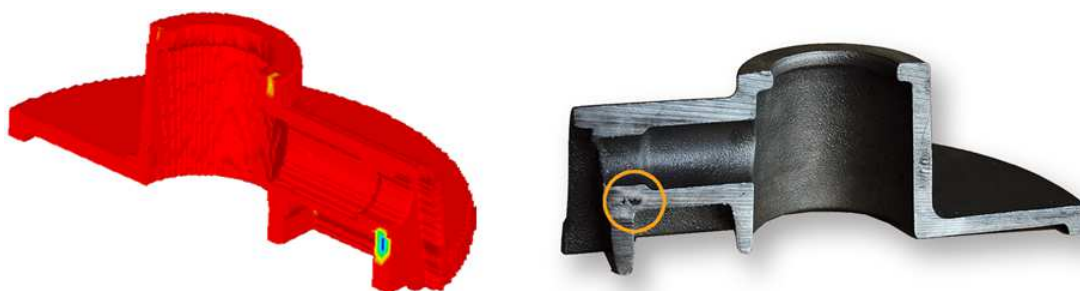
Obr. 8 Reálný odlitek vpravo potvrzuje správnost predikce staženiny [4]

Řediny a mikroporozita

Vznikají stejně jako vnitřní staženiny vlivem nedostatkem kovu v tepelném uzlu, nebo výskytem plynu vzniklého reakcí při kontaktu tekutého kovu s formovací směsí.

Dají se nalézt až na metalografickém výbrusu. Je možno je odlišit vizuálně, řediny jsou nepravidelné, laločnaté a protáhlé, oproti tomu bubliny mikroporezity jsou kulové.

Mikroporozita je při simulaci dobře viditelná při použití modulu „hot spot“, kde software vyznačí oblast tepelného uzlu. V tomto místě je možné predikovat mikroporozitu.



Obr. 9 Porovnání umístění řediny v simulačním SW a na reálném odlitku [4]

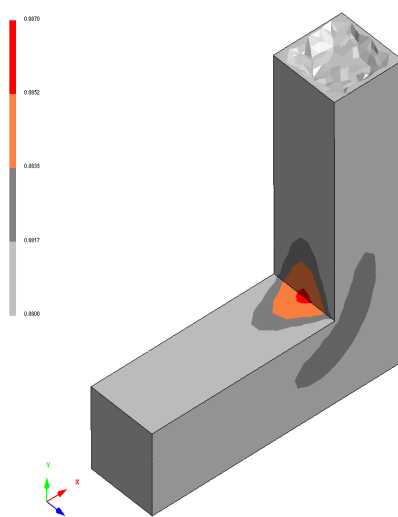
Zapečeniny

Příčinou zapečenin je příliš teplý kov, nebo příliš řídká forma. Projevují se hrubým povrchem odlitku, to souvisí s penetrací. Penetrace je průnik tekutého kovu mezi zrnka formovací látky, ten pak kopíruje povrch zrn formy.

Nejčastěji se zapečeniny objevují v koutech, kde se déle drží teplo. Ve špičkách či tenkých částech odlitku se tato neshoda neobjevuje.

Zapečeninám je možno zamezit povrchovým nátěrem, nebo snížením teploty lití.

Pomocí údajů o formě a teplotách, které se v dutině formy vyskytují, může simulační software odhalit i tuto neshodu.



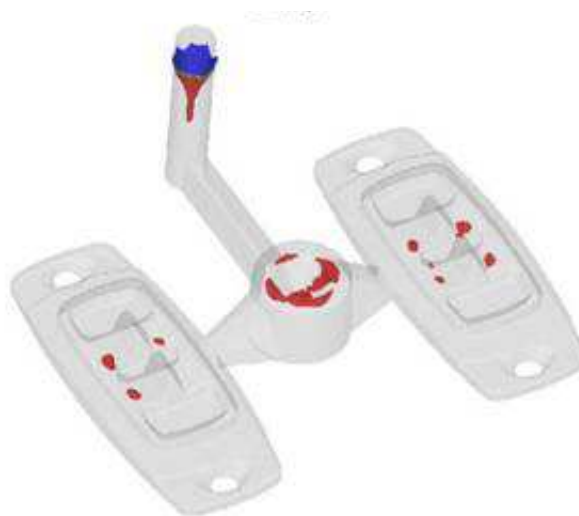
Obr. 10 Vyznačení místa, kde se pravděpodobně objeví zapečenina [5]

Bubliny

Bubliny jsou velmi častým jevem prakticky u všech materiálů, u různých materiálů se však liší. U hliníku vznikají disociací vodní páry v tavenině za vzniku vodíkových bublin a oxidických vměstků. Velkým problémem je obtížnost detekce bublin, ty se dají zjistit až na metalografickém výbrusu, pomocí ultrazvuku, nebo RTG zkouškou, což je nákladné.

Snahou je dosáhnout kulovitého tvaru bublin, protože tento tvar méně ovlivňuje mechanické vlastnosti. Kulovitý tvar drobných dutin má totiž nižší vrubový účinek.

Vlivem povrchového napětí dochází v bublině k tomu, že prorůstá základní fáze alfa (dendrity Al) a případně další (Si eutektikum).



Obr. 11 Na odlitku jsou viditelná místa vzniku bublin [4]

1.2.3 Chladnutí odlitku

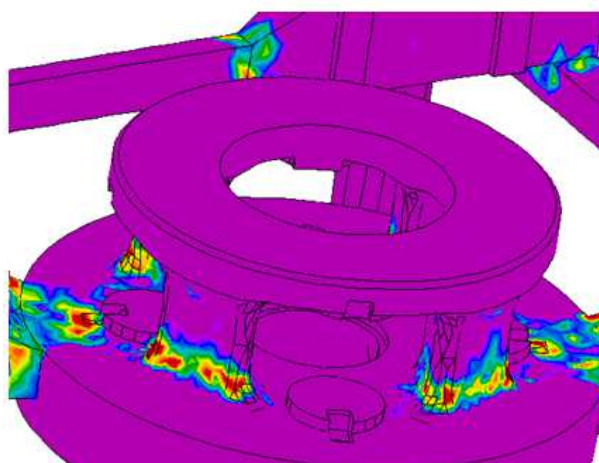
Trhliny a praskliny

Odlišujeme pojem trhliny a praskliny, trhliny vznikají za tepla vlivem pnutí při tuhnutí, prasklina za studena vlivem zbytkového napětí.

Důvodem vzniku prasklin je například příliš tuhá forma nebo velké rozdíly v tloušťkách stěn odlitku. Pokud vlivem pnutí dojde k porušení soudržnosti kovu ještě během tuhnutí, vznikne trhlina, pokud dojde k porušení soudržnosti kovu až při upnutí odlitku na obráběcím stroji nebo během obrábění, jedná se o prasklinu. Trhlinám a prasklinám lze zamezit volbou méně tuhé formy nebo přijatelnou změnou tvaru odlitku (technologičnost konstrukce = přizpůsobit tvar odlitku slévárenským podmínkám).

Pro zamezení vzniku prasklin se provádí žíhání na snížení pnutí, případně se odlitek nechá vystárnout.

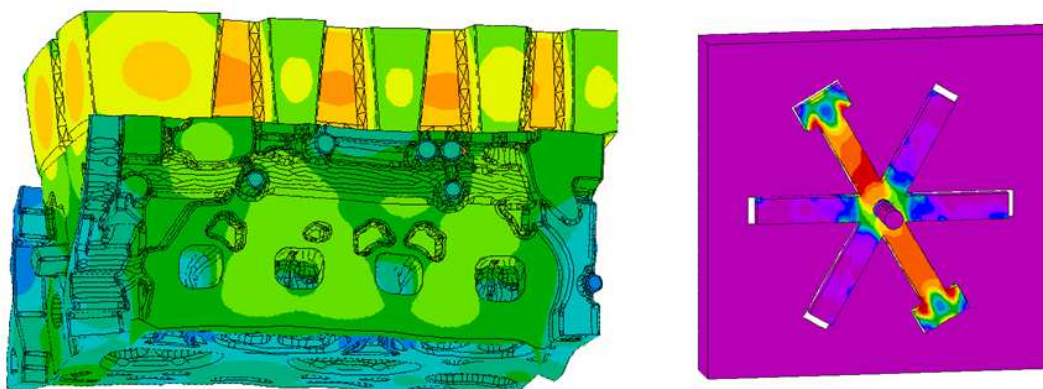
Simulační softwary mají moduly, které počítají velikost zbytkového napětí. Pomocí nich je možné zjistit, kde toto napětí překročuje kritickou mez a včas upravit technologické řešení.



Obr. 12 V místech, kde je červená barva, je vysoká pravděpodobnost výskytu prasklin [4]

Napětí v odlitku a deformace

Odlévání je složitý termodynamický proces, při kterém dochází k mnoha termodynamickým pochodům. Tyto pochody jsou provázeny dilatací tuhneoucího materiálu, v důsledku čehož vznikají zbytková pnutí a deformace. Tyto je třeba predikovat, aby hotový odlitek splňoval jednak geometrické požadavky a dále měl mechanické vlastnosti od něj očekávané, jako je například pevnost a pružnost. Numerická simulace nabízí možnost, jak predikovat velikost a pozici těchto nežádoucích prvků.



Obr. 13 Vlevo zobrazení deformace při ochlazování, vpravo zobrazení pnutí [4]

2 POSTUP PŘÍPRAVY PŘED SIMULACÍ

2.1 Popis zadaného odlitku

Pro praktickou část práce byl zvolen odlitek ze Slévárny a modelárny Nové Ransko s.r.o. Během simulace se pracuje s hodnotami získanými z technologické karty odlitku. Jde o chladič, který je na slévárně skutečně odléván.

Tab.1 Informace o odlitku

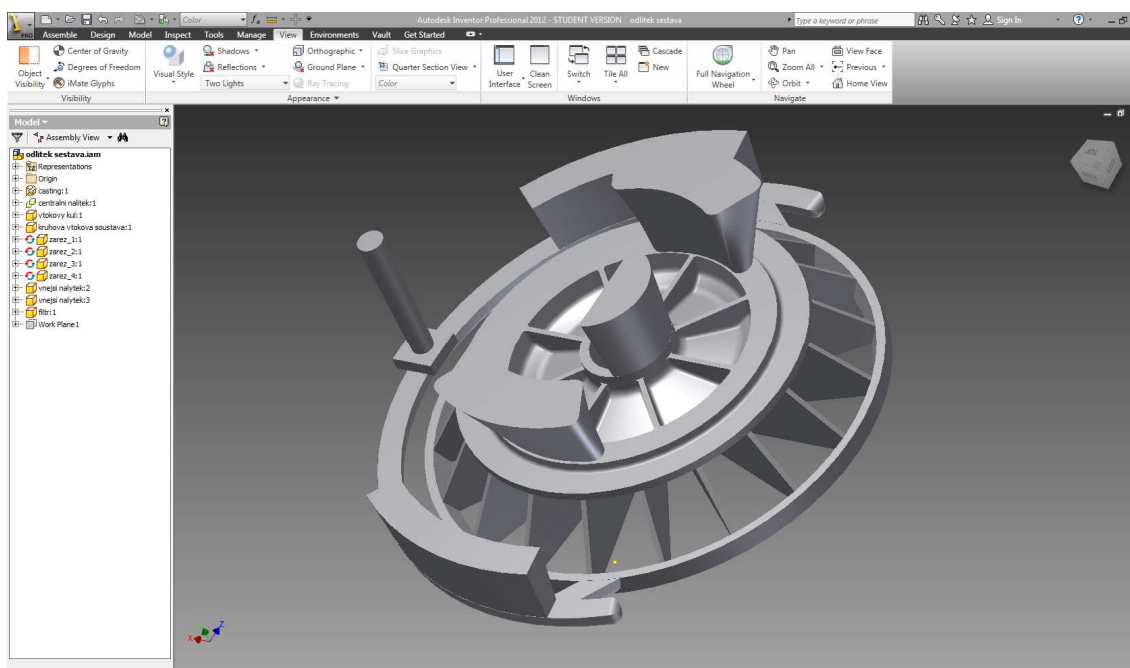
Ventilátor	
Materiál	ČSN 42 4331
Surová hmotnost	20,363kg
Hmotnost odlitku (expediční)	11,2kg
Tavící pec	Tavící pec typu MORGAN, sklopná, max. objem taveniny 580kg
Ošetření taveniny	Odplynění
Modifikace	Granulát na bázi Na
Očkování	Granulát na bázi TiB
Tepelné zpracování	rozpuštěcí žhání 520°C, náběh 50°C/hod., prodleva cca 6 hod., zchlazení do vodní lázně (50 až 80)°C, vytvrzení 170°C náběh 50°C/hod., prodleva cca 6 hod.
Formování	Formováno do jednotné bentonitové směsi (kolový míšič MK 500)
Formovací stroj	FOROMAT 20 (střásání s dolisováním)
Přesnost	ČSN EN ISO 8062-3 DCTG 11



Obr. 14 Modelové zařízení

2.2 Tvorba elektronického modelu odlitku

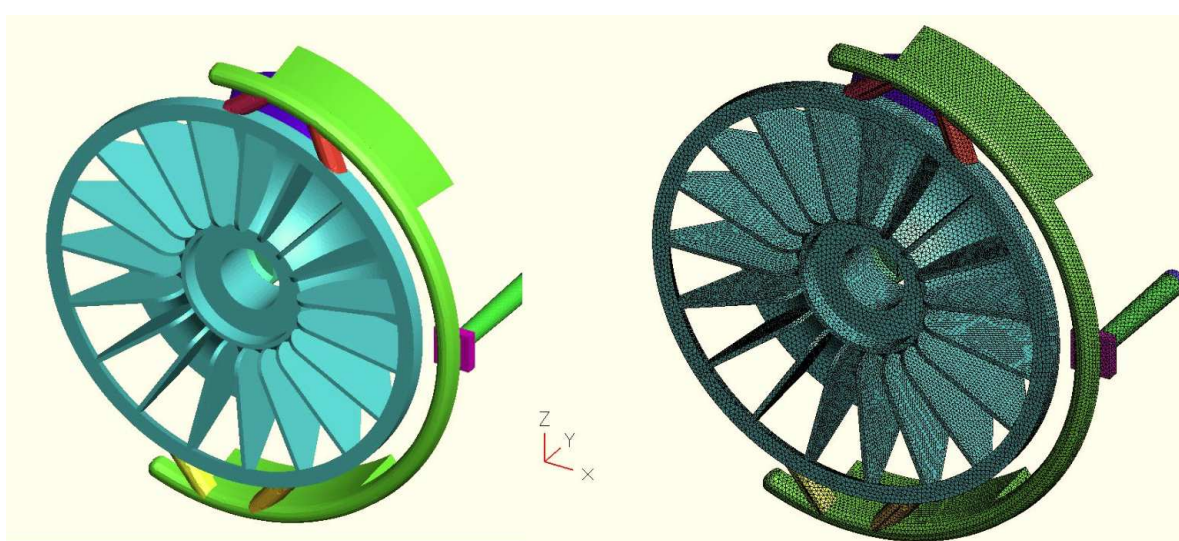
Než začne samotná simulace, je samozřejmě třeba vytvořit elektronický model. K tomuto účelu je k dispozici řada programů, které umožní sestavit 3D model odlitku, jako například Autodesk Inventor, SolidWorks, Pro Engineer a další. Některé simulační SW umožňují modelovat přímo v uživatelském rozhraní programu, jde však pouze o jednoduché tvary, jako je kvádr, válec a podobně, složitější tvarové úpravy tak zůstávají na CAD programech. V této práci je použito softwaru Autodesk Inventor. Pomocí něj byly vytvořeny 3D modely jednotlivých součástí surového odlitku, jako samotný odlitek a vtoková soustava. Tyto součásti byly zavazbeny do sestavy.



Obr. 15 3D model odlitku včetně vtokové soustavy

2.3 Import do simulačního SW

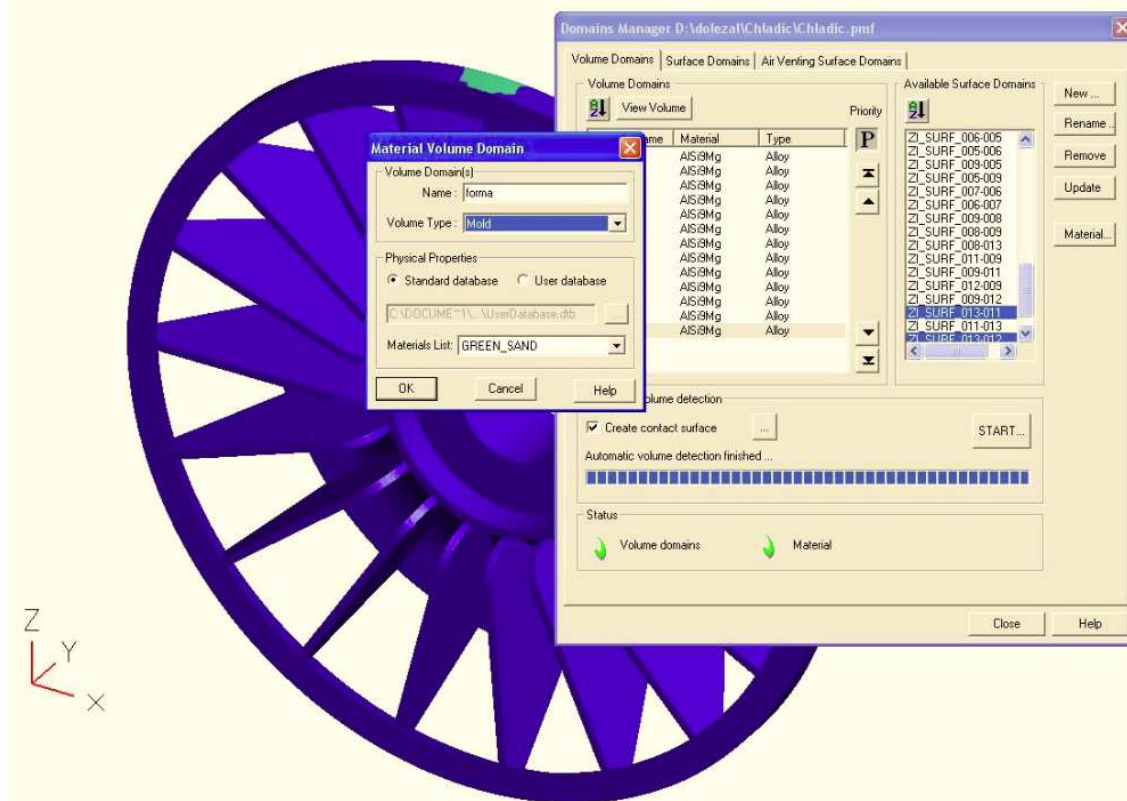
Každý SW, ve kterém je tvořen elektronický model, má zpravidla vlastní formát, který není kompatibilní s ostatními programy, tedy ani se simulačním SW. Je tedy třeba exportovat geometrii do takového formátu, který je program schopen zpracovat. Pro tyto účely se využívá standardních formátů pro 3D modely – STEP, STL, IGS, PARASOLID, případně další.



Obr. 16 Importovaný model (vlevo), zobrazení povrchové sítě (vpravo)

2.4 Přiřazení materiálů

Po úspěšném importu je dalším krokem přiřazení materiálů jednotlivým součástem surového odlitku. SW má v sobě databázi materiálů, kterou je možno využít a výrazně tak usnadnit práci. U materiálů v databázi jsou již určeny jejich materiálové charakteristiky a konstanty, není nutno je tedy zadávat manuálně, SW je zadá automaticky.

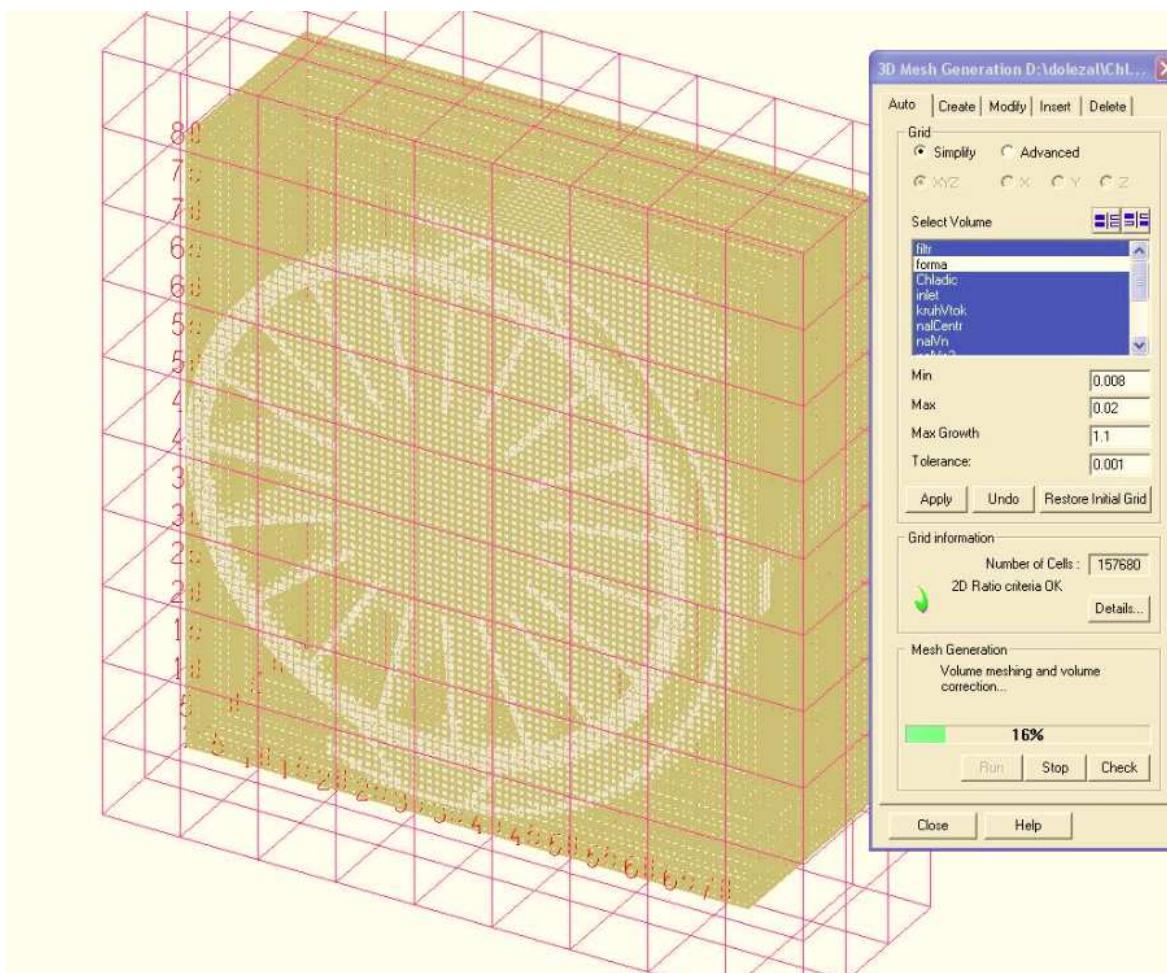


Obr. 17 Přiřazení materiálů z databáze k jednotlivým částem odlitku a formy

2.5 Tvorba 3D sítě – meshing

Jak již bylo zmíněno výše, výpočet běží pomocí metody konečných diferencí. To znamená, že je nutno model zadaného odlitku rozdělit na elementy, na nichž je výpočet prováděn. Tato operace se nazývá meshing.

Objekt je rozdělen obvykle na krychličky pomocí 3D sítě, délka jednotlivých kroků (hrana krychličky) je velmi důležitým faktorem. Špatná volba kroku může negativně ovlivnit práci. Pokud by byl zvolen velký krok, projeví se vliv nepřesnosti způsobené tím, že elementy nejsou nekonečně malé a dochází tak ke zkreslení. Dalším problémem je potom velké zkreslení okrajových ploch, především u zakřivených a malých součástí. Naopak volbou zbytečně malého kroku (velké hustoty krychliček) je sice dosaženo vysoké přesnosti, ale je značně prodloužen výpočetní čas. Z toho vyplývá, že volba kroku je otázkou kompromisu mezi přesností a výpočetním časem. Naštěstí dnešní SW dokáže pracovat i se sítí, která nemá konstantní hustotu. Znamená to tedy, že technolog má možnost v místě vyšší požadované přesnosti síť z hustit a v místech kde se nenacházejí kritické body ponechat síť s delším krokem.



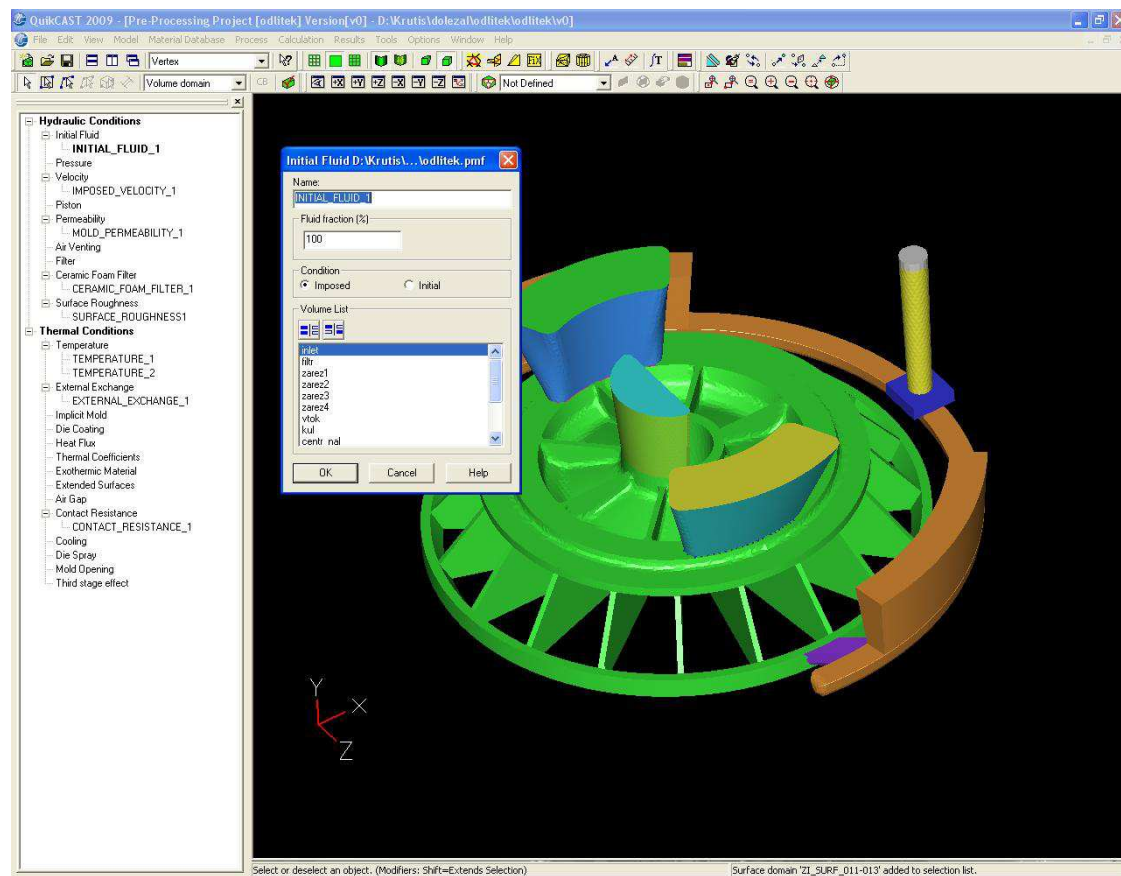
Obr. 18 Tvorba 3D sítě

2.6 Zadání počátečních podmínek

Počáteční podmínky vycházejí z použité technologie výroby odlitku. Hodnoty jsou brány z výše uvedeného výpisu z technologické karty.

Pro náš zadaný odlitek byly termodynamické a mechanické charakteristiky z materiálové databáze manuálně doplněny o dalších 9 počátečních podmínek.

- Jako první bylo nutno určit, kudy bude tekutý kov vstupovat do dutiny formy. Jako vstupní místo byl označen vršek vtokového kůlu.
- Druhým krokem bylo zadání vstupní rychlosti tekutého kovu. Protože tekutý kov není vstříkovaný, ani žádným způsobem zpomalován, byla ponechána defaultní rychlost určená pro gravitační lití.
- Třetí a velmi důležitou počáteční podmínkou byla prodyšnost formovací směsi. Použitou formovací směsí byl bentonit, který je v databázi materiálů, byla tedy ponechána hodnota předvyplněná softwarem.
- Dalším krokem bylo zohlednění použití pěnového filtru. Filtr je definován na zvolené ploše jako odpor, který je kladen proudění tekutého kovu.
- Pátá počáteční podmínka byla drsnost povrchu formovací směsi v dutině formy. Pro zvolený materiál formovací směsi je drsnost $0,05\mu\text{m}$
- V tomto kroku nastává přechod od hydraulických podmínek k termodynamickým. Byla zadána počáteční teplota tekutého kovu 720°C .
- Další termodynamickou podmínkou, sloužící pro vyhodnocení tepelné výměny byla okolní teplota. Byla nastavena na 20°C .
- Poslední podmínkou, která byla zadána, byl kontaktní odpor.



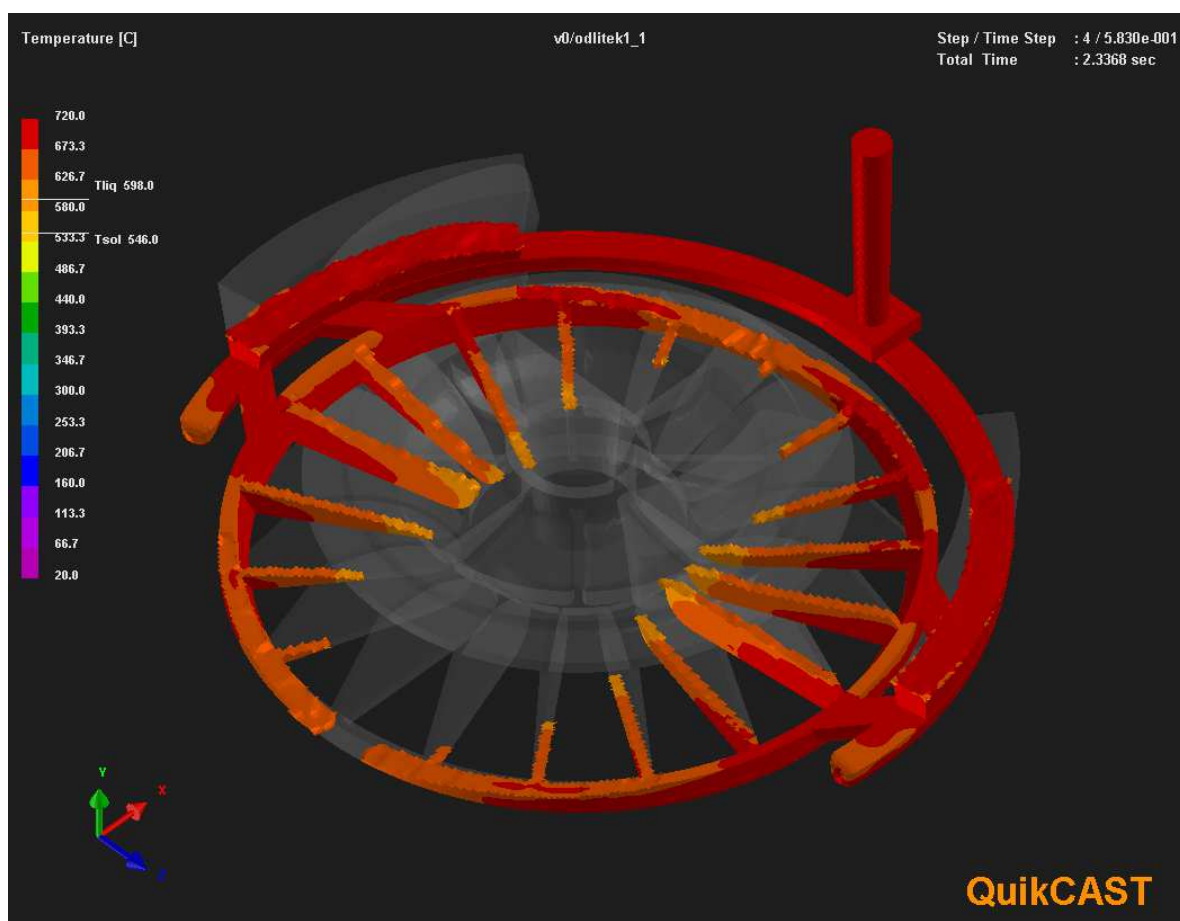
Obr. 19 Volba počátečních podmínek

3 MOŽNOSTI SIMULACE AL ODLITKŮ V OBLASTI PLNĚNÍ FORMY

Průběh plnění formy je velmi důležitý. Numerická simulace umožňuje zobrazit průběh tohoto plnění, může se tak zabránit vzniku studených spojů a dalších neshod způsobených nevhodným vtokem tekutého kovu do dutiny. V průběhu simulace je možno pozorovat nejen proud a směr vtoku tekutého kovu do dutiny, ale i rozložení a postup teplotního pole, ze kterého se dá vyčíst případné nezaběhnutí, či vznik bublin a poretizy v tepelných uzlech.

Simulační software má nástroje umožňující analýzu v jednotlivých kritických bodech, například i uvnitř odlitku. Tyto jednotlivé nástroje a možnosti simulace v oblasti plnění formy budou rozebrány v této kapitole.

3.1 Průběh plnění



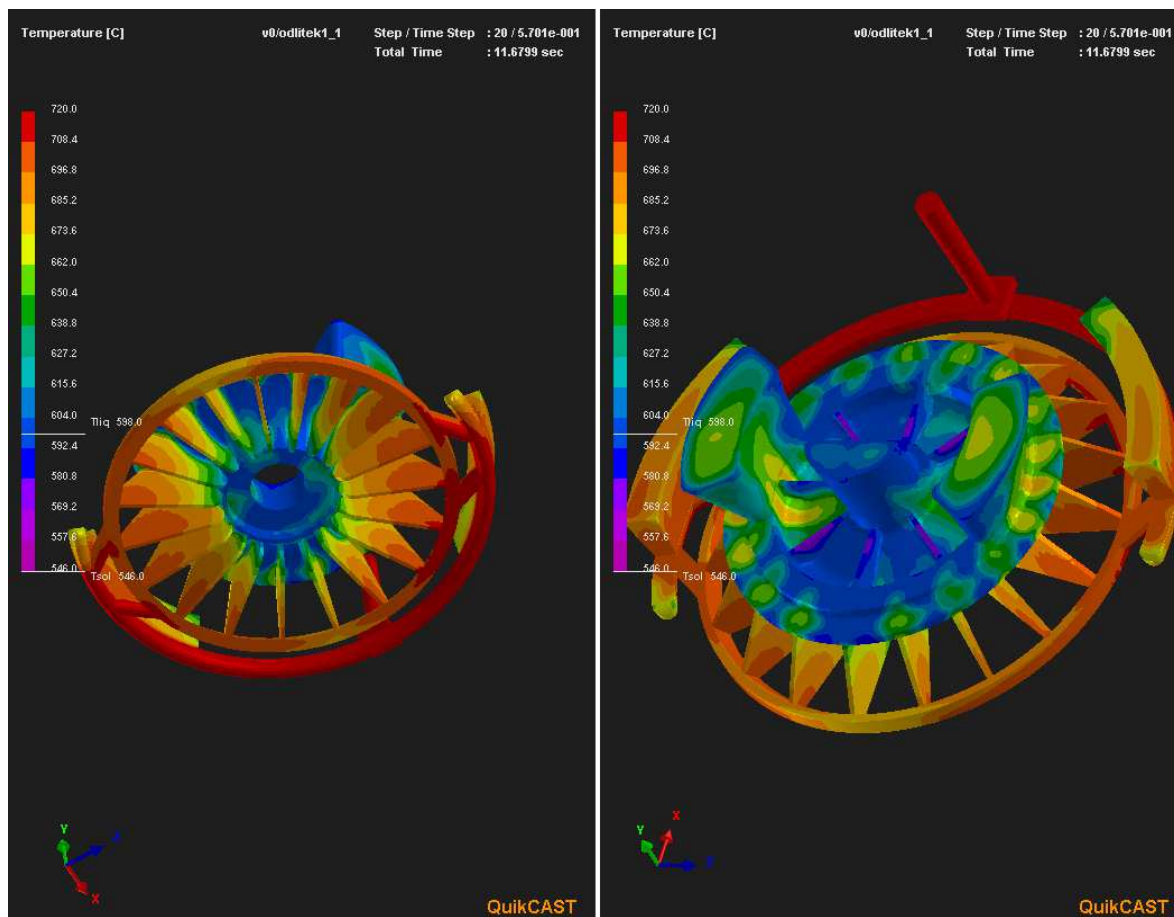
Obr. 20 Průběh plnění dutiny formy

Na obrázku 20 je vidět průběh plnění dutiny formy tekutým kovem těsně po nalití. Je zřejmé, že v místě zářezů, kudy vniká tekutý kov z vtokové soustavy přímo do dutiny tělesa odlitku, je postup tekutého kovu do žebek rychlejší, než ve zbytku žebek. Je tedy jasné, že pokud by v žebrech mělo dojít k nezaběhnutí, bude se to týkat těch žebek, které jsou nejdále od zářezů.

Dále stojí za povšimnutí průběh ochlazování. Již v čase 2s po nalití, kdy tekutý kov teprve proudí žebry do dutiny, je jeho teplota řádově o 100°C nižší. Tento pokles je

způsoben teplotním rozdílem mezi tekutým kovem a formovací směsí a je s ním nutno počítat.

3.2 Rozložení teplotního pole

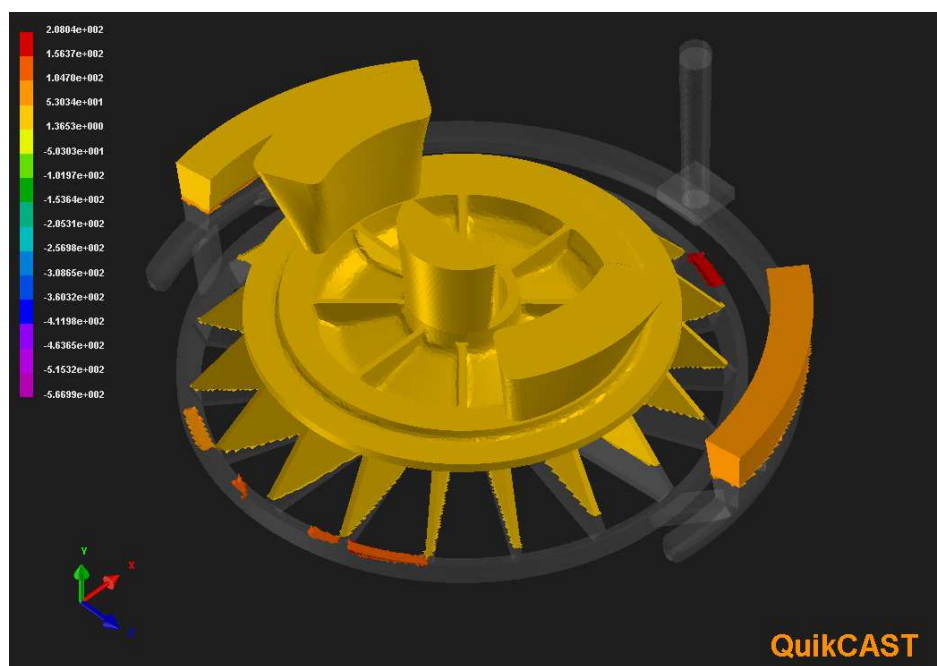


Obr. 21 Rozložení teplotního pole po naplnění dutiny

Po úplném naplnění dutiny je zkoumáno rozložení teplotního pole. Z teplotního pole je možno vyčíst, kde se nacházejí kritické body například pro vznik staženin. Protože nás zajímá především teplota solidu a výše, je výhodné si upravit stupnici teplot a tím rozšířit barevné spektrum mezi bodem solidu a likvidu. Obrázek se tím stává názornější, viz. obr. 21.

Obrázek ukazuje očekávaný průběh teplot. Zatímco vtoková soustava je stále zásobována tekutým kovem a tím je ohřívána, nálitky jsou podstatně chladnější. Z obrázku vpravo je vidět, že části žeber se už pomalu dostávají na teplotu solidu a začínají tuhnout.

3.3 Tlak plynu

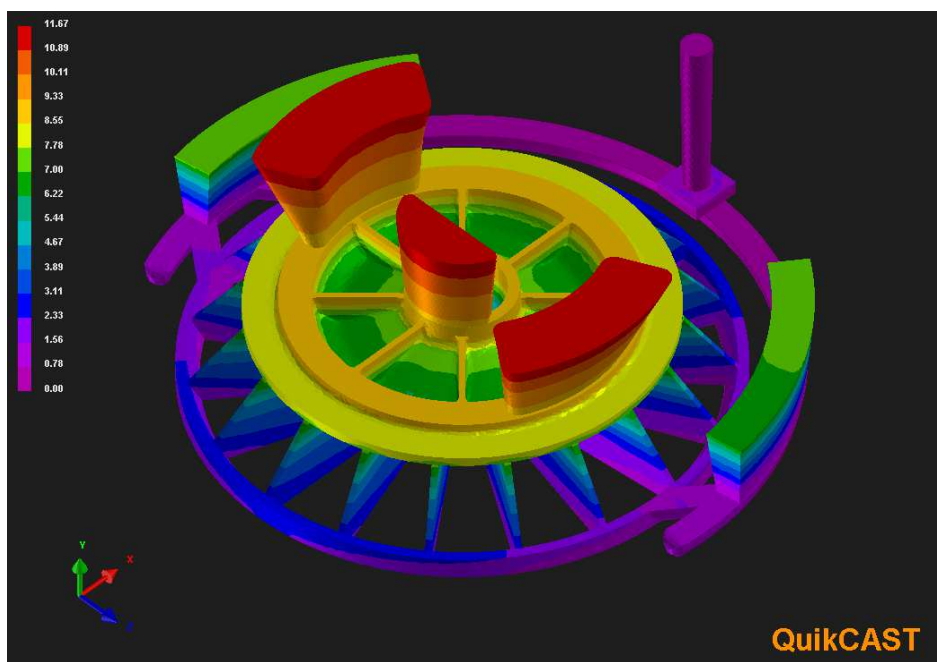


Obr. 22 Tlak plynu

Při nalití tekutého kovu do dutiny formy dochází ke kontaktu tekutého kovu s formovací směsí, při kterém je uvolňován plyn, který spolu se vzduchem přítomným v dutině vytváří tlak. Pokud není zajištěna správná prodyšnost formy, může tento tlak poškodit formu a dojít tak ke geometrickým nepřesnostem u výsledného odlitku.

Na obrázku 22 je vidět lokální tlakové působení plynu, nedosahuje však hodnot, které by mohlo poškodit soudržnost formy.

3.4 Čas naplnění



Obr. 23 Zobrazení časového průběhu plnění dutiny formy

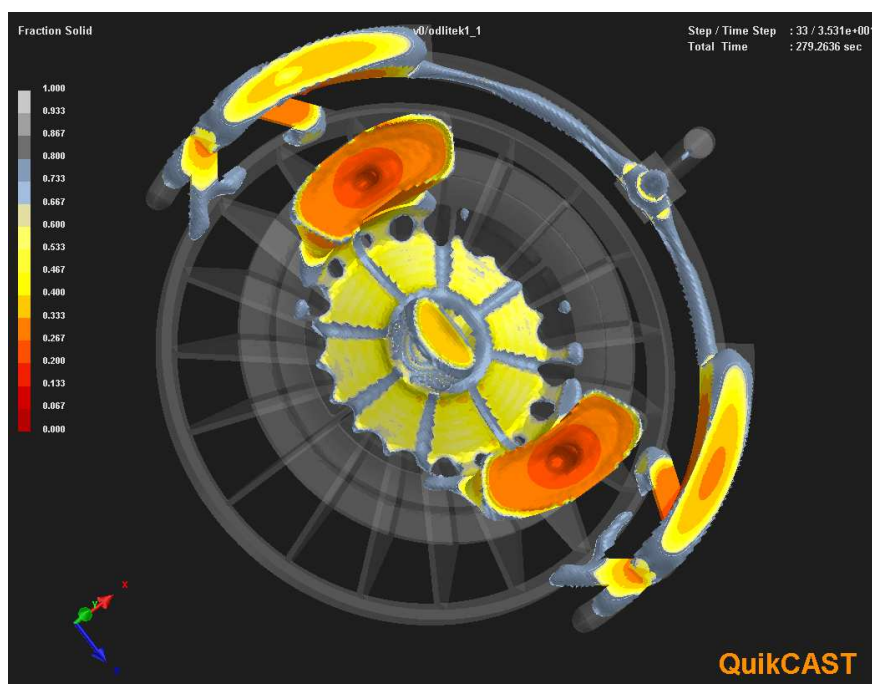
Při navrhování dutiny formy musí technolog uvažovat, jak bude tekutý kov postupovat. Predikční modul „Fill time“ technologovi ukáže, v jakém čase je kterákoliv část dutiny formy zaplněna a může tak z ní vyčíst čas a směr postupu tekutého kovu.

V tomto případě (obrázek 23) plnění probíhá správně, je plynulé a v závěrečné fázi končí v nálitku.

4 SIMULACE TUHNUTÍ A CHLADNUTÍ ODLITKU Z AL SLITIN

Dalším důležitým procesem, který při odlévání nastává, je tuhnutí a chladnutí odlitku. Numerická simulace umožňuje tento proces nasimulovat a zjistit tak, kde kov zůstává nejdéle v tekuté fázi, kde odlitek začíná tuhnout, případně kde je vysoká pravděpodobnost výskytu zbytkového napětí z důsledku pnutí.

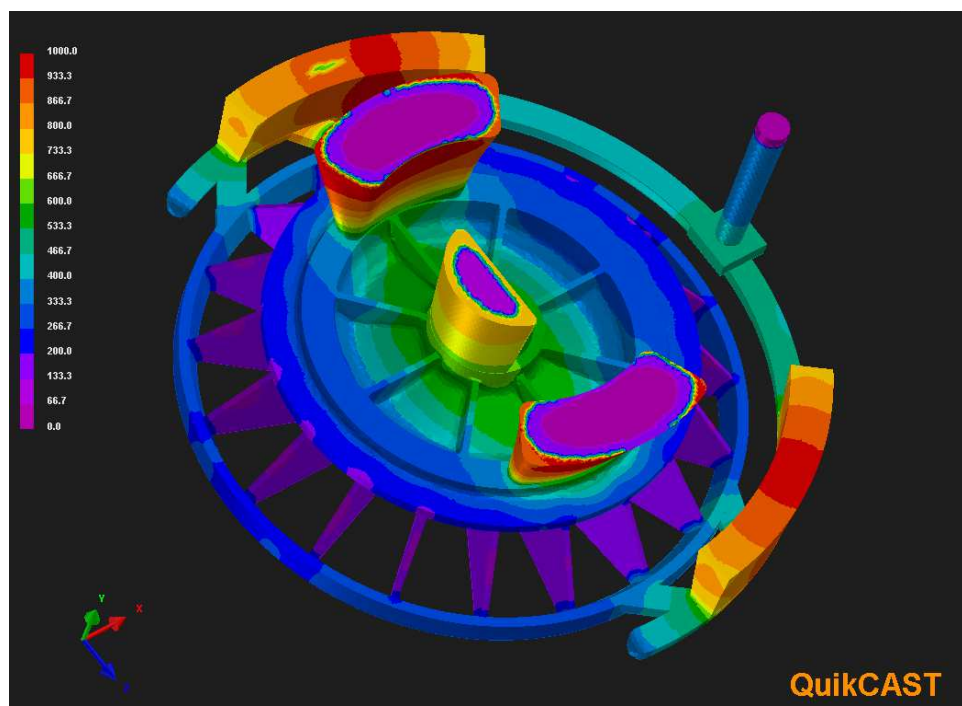
4.1 Podíl tekuté a tuhé fáze kovu



Obr. 24 Použití nástroje slice of při analýze podílu tekutého kovu

Pomocí nástroje „Slice of“ je možno zobrazit podíl tekuté a tuhé fáze kovu v odlitku. To znamená, že po použití tohoto nástroje s nastavením například 70% tekuté fáze, software zobrazuje tuhnutí pouze těch částí odlitku, kde je podíl tekutého kovu vyšší než 70%. Je tedy přehledně zobrazeno, v jakých částech je stále tekutý kov, ztuhlé části jsou skryty. Tento nástroj může sloužit například k analýze tepelných uzlů, zda jsou všechny vedeny správně do nálitků, nebo zůstávají uvnitř součásti. Na obrázku 24 je možno si všimnout tří míst, kde je tekutý kov oddělen od zbytku tekuté části kovu, což je nežádoucí.

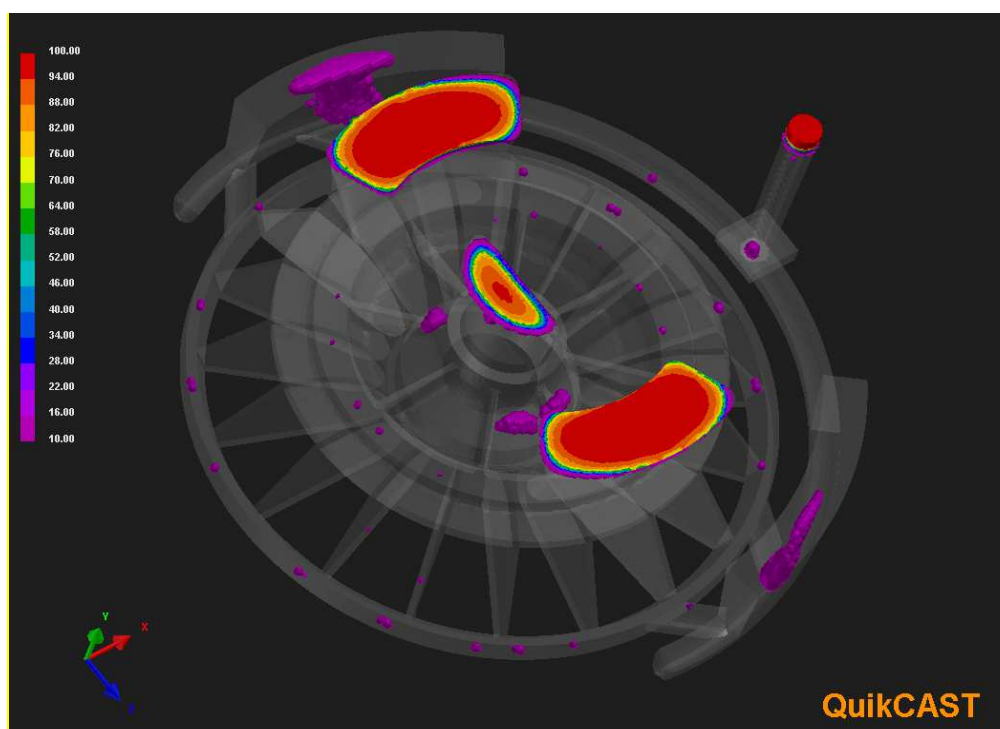
4.2 Čas tuhnutí



Obr. 25 Doba tuhnutí jednotlivých částí odlitku

Dalším nástrojem je čas solidifikace – čas tuhnutí. Touto formou je poskytnuta informace, které části odlitku tuhnou nejrychleji a které pro ztuhnutí potřebují nejdelší čas. Z obrázku 19 je vidět, že nejkratší čas tuhnutí je u žebér (z důvodu jejich malé tloušťky) a nejdelší u nálitků, kterými jsou odváděny tepelné uzly, a tekutý kov se do nich dostane nejpozději.

4.3 Porezita



Obr. 26 Porezita v odlitku

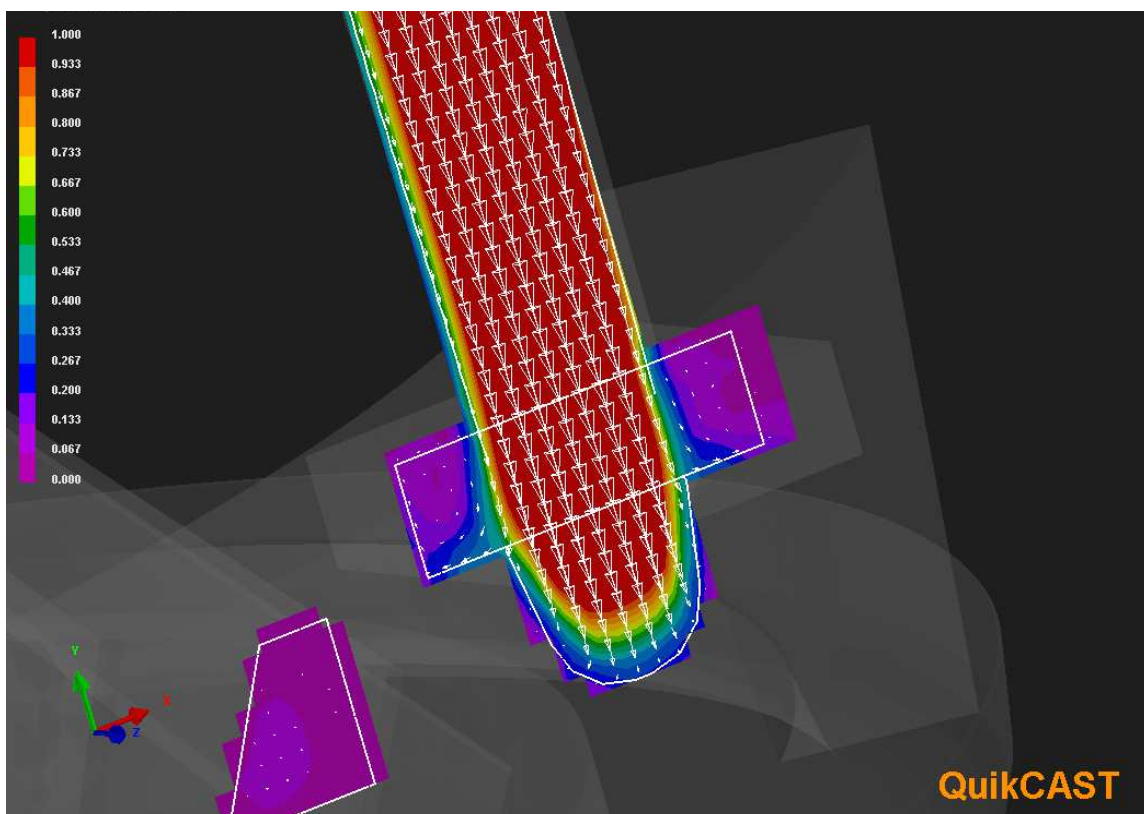
Častou neshodou odlitku je porezita, simulační SW umožňuje zkoumat místa, kde je možnost výskytu této neshody. Při defaultním nastavením parametrů SW zobrazí spoustu míst s výskytem porezity. Toto nastavení zvýrazní celé elementy, kde je porezita větší, než 1%. Tento výsledek však může být zkreslující, protože porezita 1% v jednom elementu je zanedbatelná, je tedy třeba s ohledem na požadavky na odlitek tuto hodnotu změnit tak, aby se zobrazila pouze výraznější porezita a to taková, která má znatelný význam pro vlastnosti odlitku.

Dle obrázku 26 lze usoudit, že tento odlitek je ve velké míře náchylný na porezitu.

5 MOŽNOSTI SIMULACE DALŠÍCH TECHNOLOGICKÝCH PROCESŮ U AL SLITIN

Soudobé simulační softwary jsou schopny predikovat nejen procesy plnění, chladnutí a tuhnutí, ale mají i další moduly, umožňující simulovat procesy, které provázejí odlévání. Analýza těchto dalších procesů může velmi pomoci správnému porozumění dějů, které se odehrávají při nalití tekutého kovu do formovacích směsí.

5.1 Rychlost proudění tekutého kovu



Obr. 27 Zobrazení rychlostního profilu a vektorů rychlosti

Dalším důležitým faktorem při odlévání, je rychlost proudění tekutého kovu do dutiny formy. Pokud by byla moc nízká, tekutý kov začne tuhnout dříve, než je třeba pro správné zaběhnutí a může dojít k nezaběhnutí. Pokud by byla naopak moc vysoká, může dojít k hydraulickému rázu a velkým turbulencím, což vede k vymílání formovací směsi z dutiny a následné geometrické nepřesnosti odlitku.

Pomocí simulačního softwaru je možno zobrazit rychlostní profil proudícího tekutého kovu, včetně hodnot rychlostí. Mimo to software umožňuje zapnout zobrazení pomocí vektorů pro zkoumání charakteru proudění tekutého kovu. Na obrázku 27, který je zachycen v řezu podle os XY, je vidět, že proud tekutého kovu při průchodu vtokovým kulem a filtrem je lineární. Rychlostní profil je rozložen dle očekávání, tekutý kov proudí nejrychleji uprostřed, v místě kontaktu s formou je nejpomalejší. Tento jev je způsobem viskozitou tekutého kovu a třením.

5.2 Další možnosti simulačních softwarů

Mimo zmíněné procesy je s pomocí simulačních softwarů možné simulovat i tyto další:

- Napět'ové stavy při tuhnutí Al odlitků
- Deformace odlitků s predikcí trhlin a prasklin
- Tepelné zpracování, včetně vytvrzení (např. T6)
- Nukleace a růst zrn
- Struktura a mechanické vlastnosti

ZÁVĚR

V současné době se numerická simulace stala důležitým nástrojem při návrhu technologie výroby odlitků. Trendem je neustálé zdokonalování jednotlivých kritérií, které hodnotí jak vnitřní, tak i povrchovou jakost odlitků.

Cílem práce bylo seznámení se s celým procesem simulace, od výroby 3D modelu až po zadávání počátečních podmínek a samotnou simulaci na konkrétním odlitku.

Simulací byla ověřena vhodnost vtokové soustavy a predikce míst, kde se mohou objevit neshody.

Podle hodnot vystupujících ze simulace vyplývá, že vtoková soustava je navržena správně a u odlitku se neobjevují neshody, pouze lokální porezita. Cíl práce, seznámení se se simulačními softwary a jejich využití v technologické praxi, byl splněn.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KRUTIŠ, V. a kol.: Numerická simulace technologických procesů jako nástroj komunikace. *Slévárství*, 2007, roč. LV, č. 4, s. 182-183. ISSN 0037-6825
2. ČECH, Jaroslav, Jan BOČEK a Pavel BOUCNÍK. *Výroba zdravých odlitků se zaměřením na simulaci tuhnutí*. In: *Archives of Foundry Engineering* [online]. [cit. 2012-04-15]. Dostupné z: <http://www.afe.polsl.pl/index.php/en/3084/vyroba-zdravych-odlitku-se-zamerenim-na-simulaci-tuhnuti.pdf>
3. HERMAN, Aleš. *Počítačové simulace ve slévárství*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, Strojní fakulta, 2000, 62 s. ISBN 80-010-2220-X.
4. Interní dokument společnosti MECAS ESI s.r.o.
5. Bezpečné dosažení požadovaných mikrostruktur odlitků. ČECH, Jaroslav, Pavel BOUCNÍK a Rudolf URSACHER. *Pavel Boucník* [online]. 1997 [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: http://www.boucnik.cz/Lit_PDF/Grant97.pdf
6. Metoda konečných prvků. *Numerické simulace* [online]. [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: <http://wood.mendelu.cz/cz/sections/FEM/?q=node/32>
7. BONOLLO, F., ODORIZZI, S. *Numerical Simulation of Foundry Processes*. Padova: S.G.E., 2001. 264 p. ISBN 88-86281-63-3.