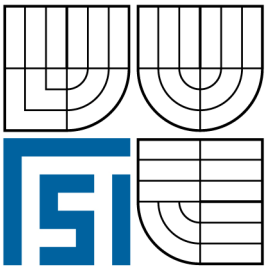


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SIMULACE VSTŘELOVÁNÍ PÍSKOVÝCH SMĚSÍ DO JADERNÍKŮ

NUMERICAL SIMULATION OF CORE BLOWING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. MARTIN ABRAHAM
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. VLADIMÍR KRUTIŠ, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Martin Abraham

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Slévárenská technologie (2301T014)**

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 diplomové práce:

Simulace vstřelování pískových směsí do jaderníků

v anglickém jazyce:

Numerical simulation of core blowing

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o řešení problematiky vstřelování pískových směsí do jaderníků pomocí numerické simulace. Práce bude zaměřena na technologii Cold Box a bude spojena s experimentální validací.

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce je analýza vad na pískovém jádře vyráběném metodou cold box. Analýza bude založena na využití numerické simulace a poslouží jako podklad pro následné změny v koncepci odvzdušnění jaderníku. Navržené změny budou experimentálně validovány.

Seznam odborné literatury:

1. KRUTIŠ, V. Trendy a vývoj v oblasti numerických simulací. Slévárenství. Říjen 2004, roč. LII, č. 10, s. 408-410. ISSN 0037-6825.
2. KRUTIŠ, V., aj. Numerické modelování tepelných procesů soustavy nálitek - exoobklad - forma. In Zborník referátov - TECHNOLÓGIA 2003. Bratislava: Strojnická fakulta STU v Bratislave, Slovensko, 2003, s. 57-60. ISBN 80-227-1935-8.
3. BONOLLO, F. and ODORIZZI, S. Numerical Simulation of Foundry Processes. 1st ed. Padova: S.G.E., 2001. 264 p. ISBN 88-86281-63-3.
4. ČECH, J. and ZEMČÍK, L. Analysis of cooling curves of various alloys for the needs of simulation programs. Archives of Foundry. April 2002, vol. 24, no. 4, p. 80-86. ISSN 1642-5308.
5. CAMPBELL, J. Castings. 1st ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997. 352 p. ISBN 8131200914.

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 20.11.2009

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc. Ředitel ústavu	doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc. Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zaměřuje na simulaci vstřelování pískových směsí do jaderníků. Strojní výroba jader je dnes běžnou součástí v jakékoli slévárně. Avšak nelze nikdy předpovědět, jestli se jádro podaří vyrobit hned na poprvé. Pro tuto situaci můžeme využít jako pomocníka simulační program QuikCAST, který je schopen danou problematiku zpracovat a řešit a může najít optimální východiska.

Klíčová slova
Numerická simulace
Simulace vstřelování jader

ABSTRACT

This work focuses on simulation of core blowing into the core boxes. Mechanical production of cores is now a normal part of any foundry. But can never predict whether core can make right the first time. This situation can be used as a helper QuikCAST simulation program that is able to handle the issue and deal with and can find the optimal basis.

Key words
Numerical simulation
Simulation of core blowing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ABRAHAM, M. *Simulace vstřelování pískových směsí do jaderníků.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 58 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Simulace vstřelování pískových směsí do jaderníků vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum 28.5.2010 ……

Martin Abraham

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Vladimíru Krutišovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Dále děkuji celému kolektivu MECAS ESI s.r.o. za předání zkušeností se simulačním softwarem QuikCAST.

Děkuji rodině a přítelkyni za trpělivost a podporu při studiu.

OBSAH

Abstrakt....4
Prohlášení....5
Poděkování....6
Obsah....7
Úvod....9
Cíl diplomové práce....10
1 VÝROBA JADER VSTŘELOVÁNÍM....11
1.1 Technologie výroby jader....11
1.2 Vstřelovací stroje....12
1.3 Volba vstřelovací hlavy....13
1.4 Návrh jaderníku pro vstřelovací stroj....14
1.5 Dělení jaderníků....15
1.6 Výroba CB jader....16
1.7 Faktory ovlivňující proces výroby jader....19
2 NUMERICKÁ SIMULACE SLÉVÁRENSKÝCH PROCESŮ....20
2.1 Numerické metody....20
2.2 Standardní simulace ve výrobním procesu....21
2.2.1 Výpočet tuhnutí odlitku....22
2.2.2 Chladnutí a vznik nežádoucích jevů....23
3 NUMERICKÁ SIMULACE VSTŘELOVÁNÍ PÍSKOVÝCH SMĚSÍ....24
3.1 Výpočty pro vstřelování jader....25
3.2 Výpočty pro profukování jader....26
3.3 Definice počátečních a okrajových podmínek v programu QuikCAST....27
3.3.1 Definice pro vstřelování....28
3.3.2 Definice pro odvzdušňování....29
3.3.3 Materiálová databáze v numerické simulaci....29
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST....31
4.1 Vliv počátečních parametrů na simulaci vstřelování....31
4.1.1 Vliv vstřelovacího tlaku....33
4.1.2 Vliv odvzdušnění....34
4.1.3 Vliv hustoty písku....35
4.1.4 Vliv drsnosti povrchu....36
4.1.5 Vliv průměru zrna písku....37
4.1.6 Vliv změny parametrů viskozity....38
4.2 Geometrie jádra....40
4.3 Simulace vstřelení původní varianty....41
4.3.1 Počáteční parametry....41
4.3.2 Průběh simulace....42
4.4 Simulace vstřelení druhé varianty....43
4.4.1 Počáteční parametry....44

4.4.2 Průběh simulace 44
4.4.3 Změna průměru zrna písku 46
4.5 Simulace vstřelení třetí varianty 48
4.5.1 Průběh simulace 48
4.5.2 Počáteční parametry 49
4.6 Simulace vstřelení čtvrté varianty 50
4.6.1 Průběh simulace 50
4.6.2 Počáteční parametry 51
4.7 Simulace vstřelení páté varianty 52
4.7.1 Průběh simulace 52
4.7.2 Počáteční parametry 53
4.8 Porovnání simulovaných verzí 54
Závěr 55
Seznam použitých zdrojů 57
Seznam použitých zkratek a symbolů 58

ÚVOD

Řada oblastí ve slévárenství se vyvíjí velice dynamicky. Jsou navrhovány a používány nové procesy a technologie, vedoucí k výrobě odlitků se stále vyšší kvalitou. Numerická simulace reaguje na tyto změny tvorbou nových fyzikálních modelů sledovaných dějů a jejich realizací do výpočtových rovnic. Pro zájem zákazníků v oblasti výroby jader, zejména metodou Cold-Box (dále CB), jsou vyvíjeny modely pro simulaci vstřelování pískových směsí do jaderníků.

Současné programové modely jsou ve fázi přípravy prototypů, bez většího prověření ve výrobním procesu.

Simulace může najít vysoké uplatnění u kovových, případně složitých dřevěných jaderníků, jejichž výroba a následné úpravy stojí nemalé finanční prostředky [1].

CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této diplomové práce je analyzovat vady, které vznikly během vstřelování konkrétního pískového jádra, které bylo vybráno po dohodě s firmou JMA v Hodoníně.

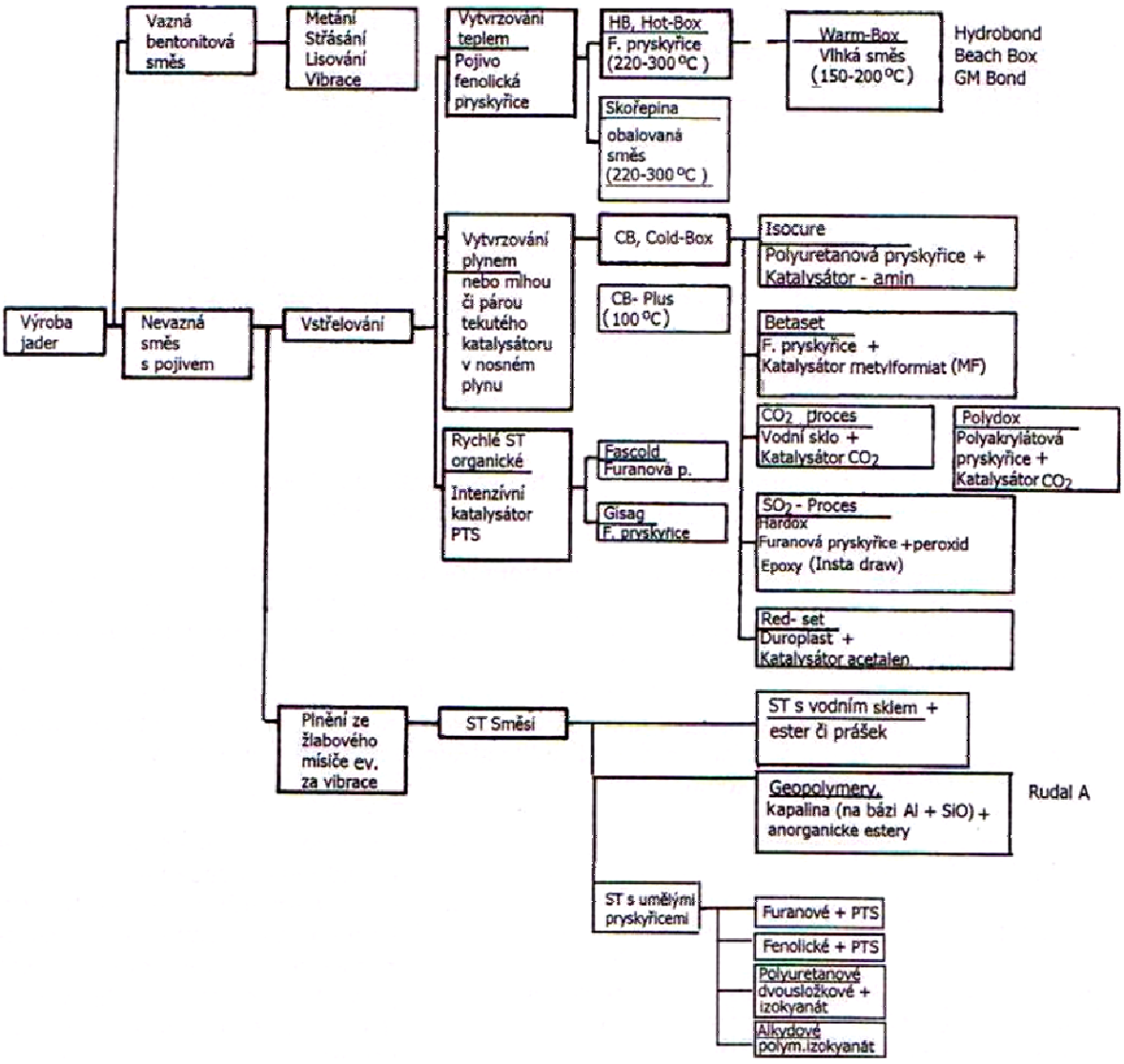
Dalším cílem je navrhnout, jak vzniklé vady případně odstranit. Získaná data budou zpracována v simulačním programu QuikCAST, který je produktem společnosti ESI GROUP a výsledky budou porovnány s realitou.

1 VÝROBA JADER VSTŘELOVÁNÍM

Jádra se zakládají do forem pro duté odlitky nebo do forem s různě složitými tvary, které nelze odformovat (nepravá jádra). Při strojní výrobě jader se jádrová směs plní, zhutňuje, nebo vytvrzuje v jadernících [2].

1.1 Technologie výroby jader

Vývoj dnes používaných procesů výroby jader začal přibližně v roce 1954 CO_2 procesem, který pro slévárenství objevil dr. Petržela [2]. V následujících letech přicházely postupně základní horké procesy: Croning, Hot-Box (dále HB), Warm-Box a dále současné studené procesy: ST směsi, CB a SO_2 - proces.

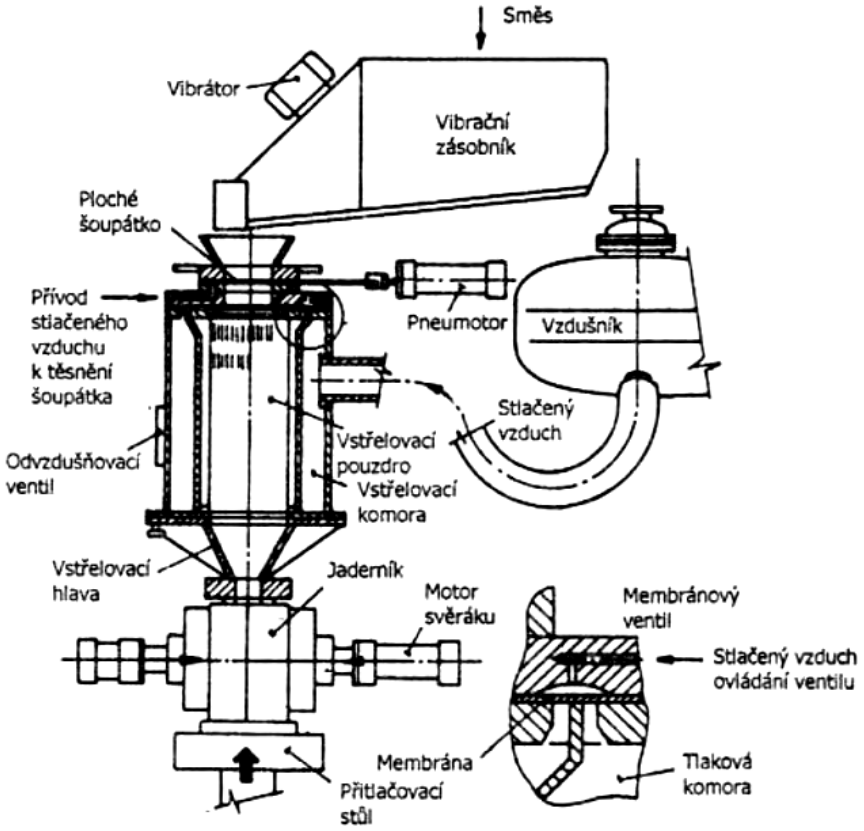


Obr. 1.1 *Přehled výrobních metod na jádra [2]*

Rozhodujícími procesy na jádra jsou dnes ST a CB technologie. V sériové strojní výrobě malých jader do 100 l se uplatňuje především CB proces, umožňující bezproblémově používat automatické jádrové stroje spolu s automatizací procesu. V této oblasti je nejrozšířenější CB s polyuretanovou pryskyřicí, vytvrzovanou terciálními aminy [2].

1.2 Vstřelovací stroje

Pro vstřelovací stroje je charakteristické rychlé plnění jaderníků dávkou jádrové směsi, která není promísena se vzduchem. Potřebné urychlení se směsi udělí ve vstřelovací komoře prudkou expanzí stlačeného vzduchu. Ten působí na sloupec směsi z čelní strany jako pružný píst. Tření směsi o stěny komory může být sníženo tím, že se stlačený vzduch přivádí rovněž štěrbinami ve vstřelovacím pouzdře. Sloupec směsi se tak oddělí od stěny vzduchovou vrstvou. Následkem sníženého tření se směs značně urychlí. Dojde k dobrému vyplnění jaderníku.
Vstřelovací stroje se liší od foukacích tím, že plnění jaderníků probíhá větší rychlostí a jádrová směs není příliš promísena se vzduchem. Proti foukání je nižší spotřeba vzduchu a opotřebení jaderníků [2].



Obr. 1.2 *Vstřelovací stroj s membránovým vstřelovacím ventilem [2]*

Vstřelovací stroje se dělí na jednopolohové a vícepolohové [2]:

- **Jednopolohové**

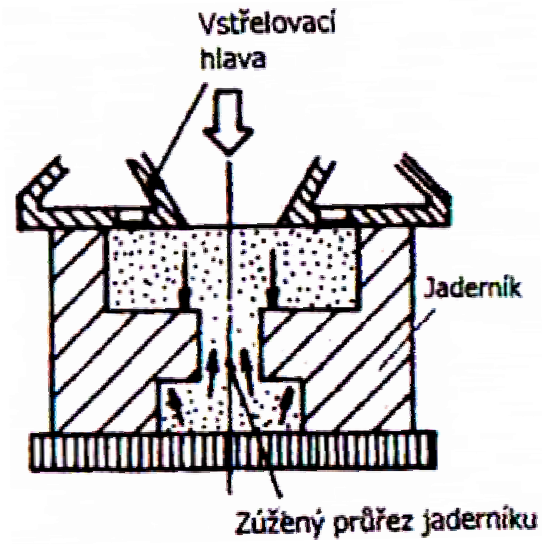
Všechny operace, tj. vstřelení, vytvrzení a vyjmutí jádra z jaderníku (rozebírání) probíhají v jedné poloze, na jednom místě. Používají se především pro výrobu rychle vytvrzujících jader (např. CB).

- **Vícepolohové**

Výrobní operace zajišťují postupně. Různé operace probíhají ve více jadernících současně. Tyto stroje jsou značně výkonné a používají se pro sériovou výrobu zejména HB jader.

1.3 Volba vstřelovací hlavy

Pro volbu vstřelovací hlavy je směrodatná velikost jádra a jeho tvar. Větší průřez vstřelovacího otvoru klade směsi menší odpor. Proto je výhodné vstřelovat největším možným otvorem nebo více otvory. Velikost vstřelovacího otvoru je na druhé straně omezena vazností směsi za syrova, tvarem a velikostí otvorů pro plnění jaderníku a dále nejmenším průřezem jaderníku pod vstřelovacím otvorem. Vstřeluje-li se jádro větším průřezem, než je nejmenší průřez jaderníku pod vstřelovacím otvorem, narazí proud směsi na hranu zúženého průřezu. Vznikne vír a jaderník se špatně zaplní (**obr. 1.3**) [2].

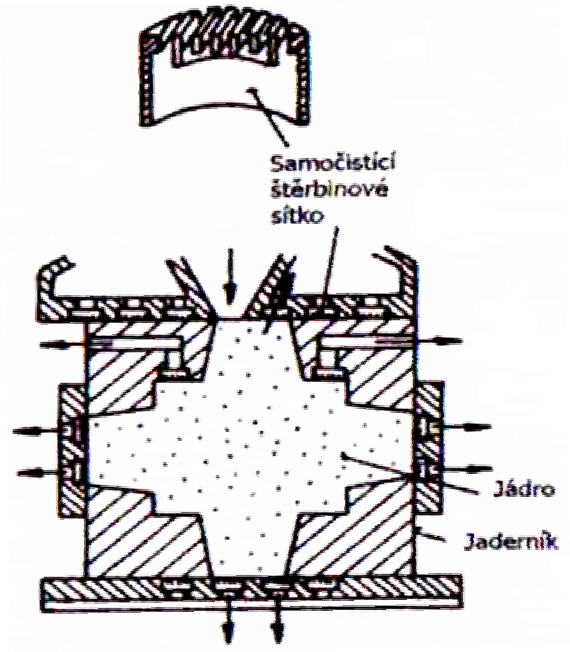


Obr. 1.3 *Chybné vstřelování velkým průřezem [2]*

1.4 Návrh jaderníku pro vstřelovací stroj

Podstatný vliv na zhutnění jádra má správné odvzdušnění jaderníku (**obr. 1.4**) [2]. U jaderníků určených pro vstřelování bývá poměr plochy vstřelovacích otvorů k volné ploše odvzdušnění 0,35 až 0,5. Hlavní zásady odvzdušnění jsou [2]:

- Otevřené jaderníky se odvzdušňují vstřelovací hlavou, jaderník se při vstřelování plní od spodních partií směrem vzhůru.
- Jaderníky otevřené ve dně se pokládají na odvzdušňovací podložky s odvzdušňovacími sítky.
- V rozšiřujících se místech jaderníku vznikají řídká místa. Proto je nutné zaoblit ostré hrany a provést odvzdušňovací kanály do kritických míst v jaderníku.
- Sítka se s výhodou umísťují do známek.



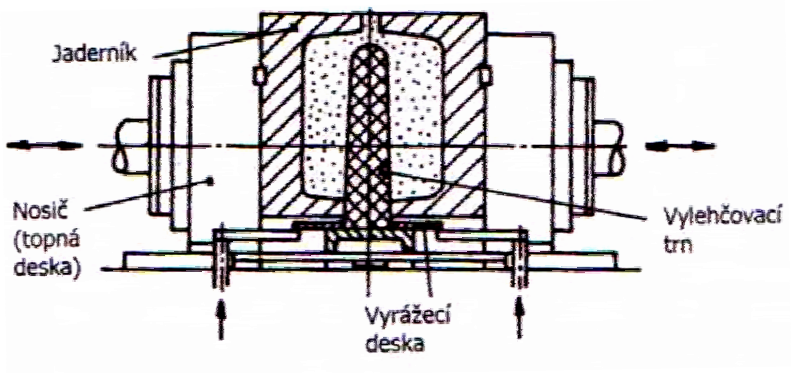
Obr. 1.4 *Odvzdušnění jaderníku, kanály se štěrbinovými sítky [2]*

Do obsahu jádra přibližně 25dm^3 lze používat pro vstřelování jaderníků dřevěných nebo z umělých hmot. Větší jaderníky, u nichž hrozí nebezpečí roztržení při profouknutí vzduchu ze vstřelovací komory, musí být kovové. Jaderníky dřevěné či z umělé hmoty se musí vyztužit ocelovými pásy [2].

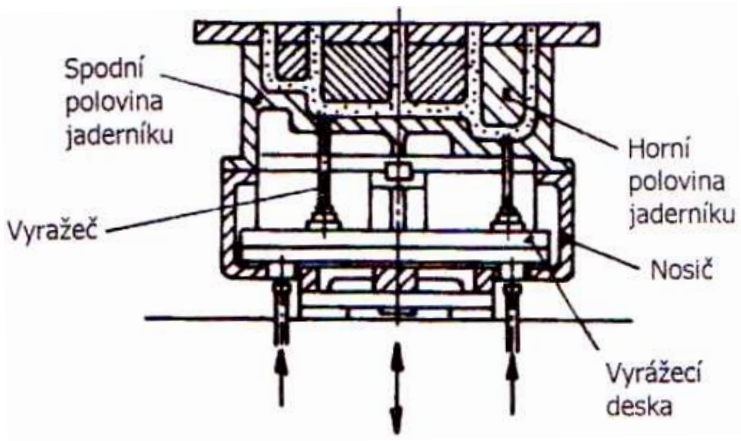
1.5 Dělení jaderníků

Dělení jaderníků musí odpovídat jádrový stroj. Existují jádrové stroje pro svisle dělené jaderníky, vstřelovací stroje pro vodorovně dělené jaderníky a stroje kombinované. Na **obr. 1.5 až 1.8** jsou nejdůležitější druhy jaderníků. Mezi čtyři základní typy patří [2]:

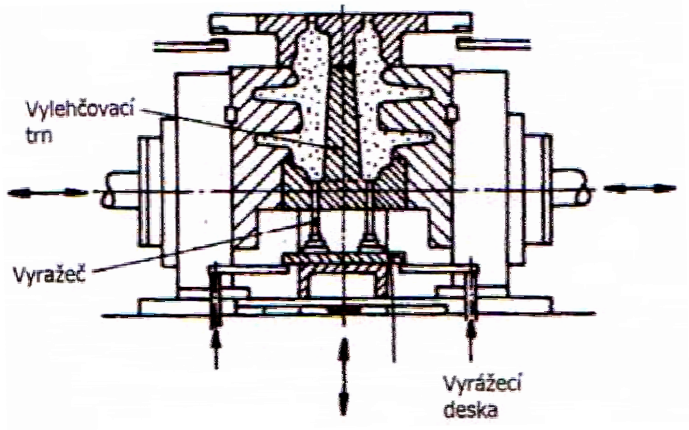
- Svisle dělené jaderníky,
- dvojité jaderníky, se svislým dělením, se dvěma bočními a jedním středním dílem,
- vodorovně dělené jaderníky,
- jaderníky svisle a vodorovně dělené.



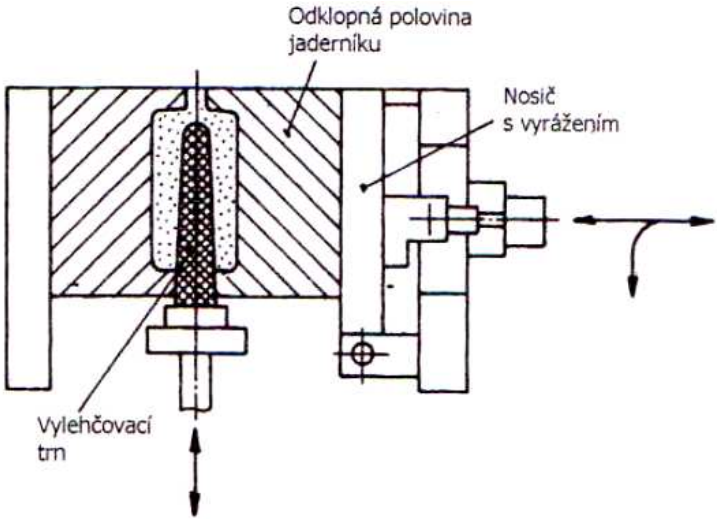
Obr. 1.5 *Svisle dělený jaderník s rozebíráním do dvou stran [2]*



Obr. 1.6 *Vodorovně dělený jaderník s rozebíráním do dvou stran [2]*



Obr. 1.7 *Jaderník svisle a vodorovně dělený s rozebíráním do tří stran [2]*

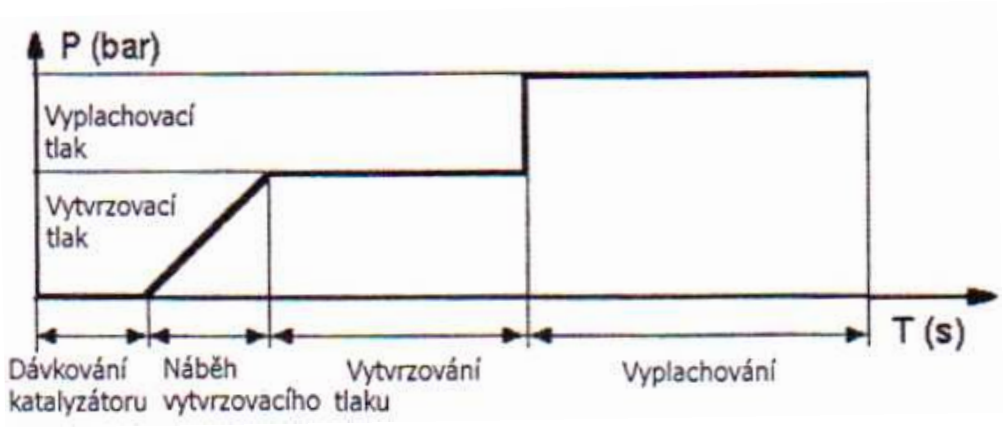


Obr. 1.8 *Svisle dělený jaderník s vysouváním trnu a vyklápěním jádra drženého v polovině jaderníku [2]*

1.6 Výroba CB jader

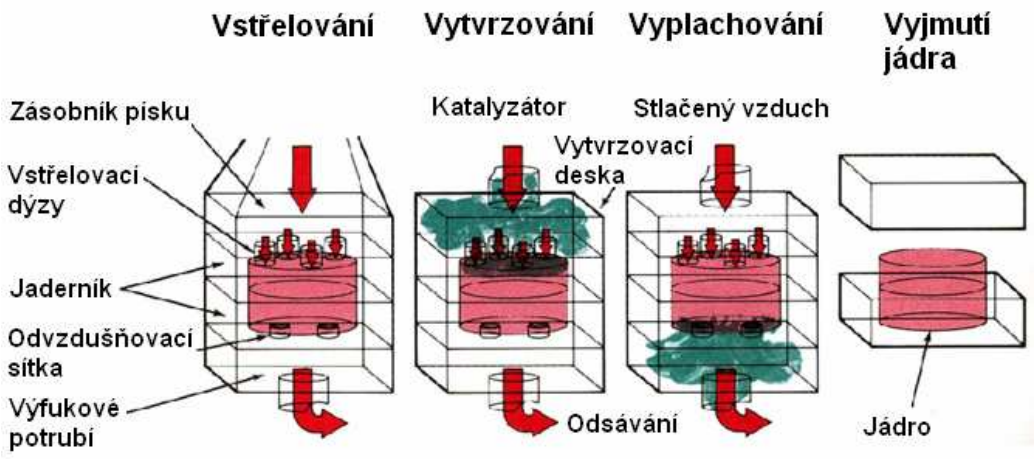
Vlastní metoda CB používá dvousložkovou umělou pryskyřici. Vytvrzování probíhá v jaderníku profukováním parami nebo mlhou tekutého katalyzátoru (amin). Nevýhoda postupu je v použitém katalyzátoru, který je jedovatý a se vzduchem tvoří výbušnou směs. Doba vytvrzování je velmi krátká (sekundy) a dovoluje vysoký výkon stroje při vynikající rozpadavosti jader po odlití. Vstřelovací stroje jsou vybaveny odsávacím zákrytem (kvůli technickým a ekologickým požadavkům). Odsává se přímo z jaderníku nebo z jeho okolí. Nespotřebovaný katalyzátor se musí po průchodu jádrem zachycovat

a likvidovat spálením nebo chemickou neutralizací. Obecně platí, že čím se katalyzátor lépe odpaří, tím bude rychlejší vytvrzování a kvalitnější jádro [2].



Obr. 1.9 *Vytvrzovací cyklus, systém CB [2]*

Při vytvrzování jader je třeba dodržet i další zásady. Aby se zabránilo vytlačení jádrové směsi z jaderníku do vytvrzovacích otvorů, je třeba dávkovat katalyzátor malým tlakem. Aby se mohla překonat reakce katalyzátoru a vytvrzení dosáhlo vzdálená místa jádra, je třeba dávkovat katalyzátor větším tlakem. Grafické znázornění vytvrzovacího cyklu je na **obr. 1.9** [2].

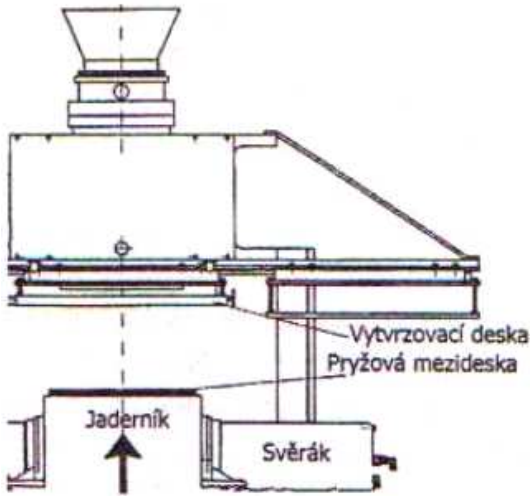


Obr. 1.10 *Ukázka výroby metodou Cold Box [2]*

Vytvrzovací proces závisí na těchto činitelích:

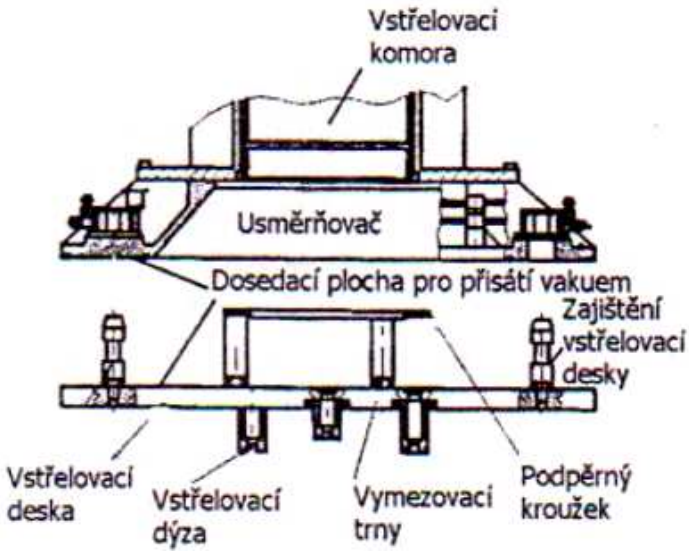
- teplota směsi
- množství použitého triethylaminu
- množství pojiva ve směsi
- objem vzduchu a jeho rychlost proudění
- tlak v jaderníku

Používají se jednopolohové vstřelovací stroje ve spojení s mísiči, dávkovacím zařízením a zachycováním plynu. Moderní stroje používají vytvrzovací desku (**obr. 1.11**) [2]. Jsou standardně vybaveny 1-4 dílnými jaderníky s hydraulickými upínacími svěráky. Vstřelovací deska může být rychle vyměnitelná, vakuově upínaná a mechanicky zajištěná (**obr. 1.12**) [2]. Díky tomu je možné vstřelovat i dýzami a nemusí se dodržet souosost vstřelovací hlavy s jaderníkem [2].



Obr. 1.11 *Vstřelovací CB stroj [2]*

Vytvrzovací deska je součástí stroje a pomáhá při výměně jaderníků. Při zajíždění vytvrzovací desky do pracovní polohy se očistí od směsi horní plocha jaderníku a spodní plocha vytvrzovací desky [2].



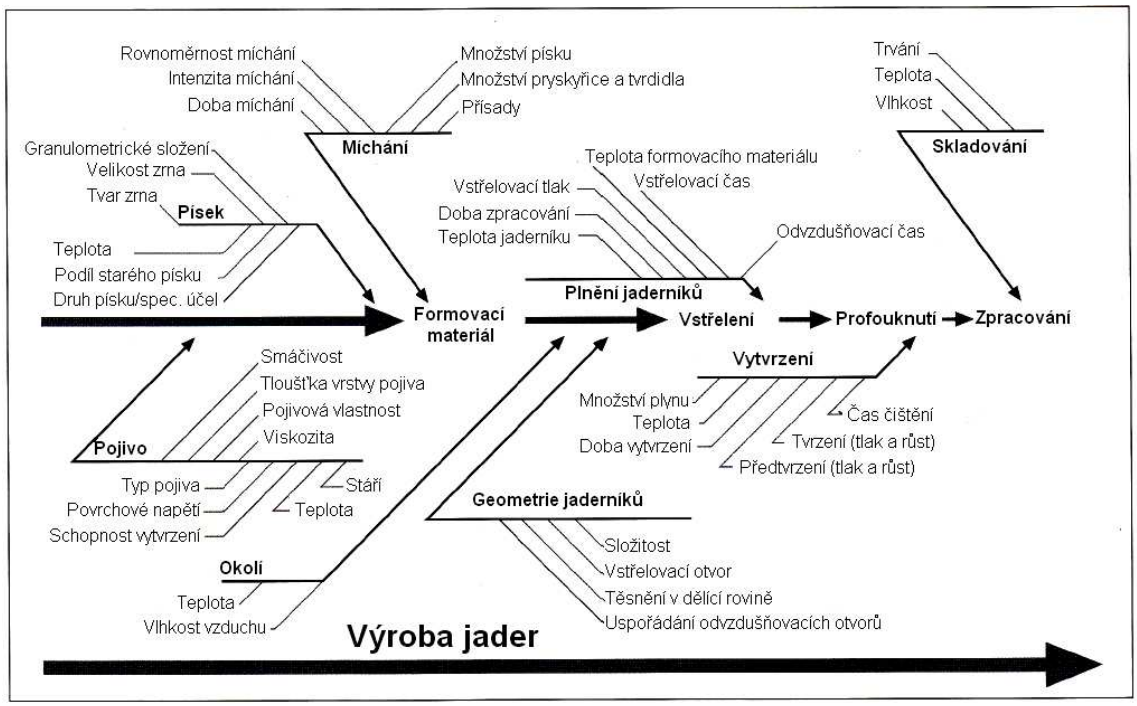
Obr. 1.12 *Vstřelovací jednotka [2]*

Písek a pojivo se přivádí a dávkuje odděleně. Dávkování písku je objemové (případně může být navažován), dávkování pojiva je rovněž objemové a složky pojiva se nasávají podtlakem do vlastních dávkovacích trubic [2].

1.7 Faktory ovlivňující proces výroby jader

Celkem existuje velký počet faktorů, které na proces výroby jader mají vliv. Rozhodující význam je ale v první řadě v zatékavosti formovací směsi, která se projevuje přímo ve zpracovaném formovacím materiálu během vstřelovaní.
Kromě toho existuje mnoho dalších faktorů. **Obr. 1.13** [3] ukazuje rozsáhlou problematiku vlivů. Je vidět, že počet parametrů ovlivňující proces vstřelování je podstatně větší, než je počet faktorů, které mají vliv na profukování.
Uvedené faktory se vztahují zejména na následující otázky [3]:

- Jak vysoká je *pórovitost formovacíh materiálů a jader*, která budou sériově vyrobena a za kterých ideálních podmínek je minimální pórovitost dosažena?
- Jaké kvantitativní vlivy mají různé písky a rozdílné pojivové systémy na *vstřelovacích vlastnostech formovací směsi*?
- Jak vysoká je *odporová síla* formovacích materiálů při průběhu profukování, zejména před a po vytvrzování?



Obr. 1.13 *Vlivy na výrobu jader [3]*

2 NUMERICKÁ SIMULACE SLÉVÁRENSKÝCH PROCESŮ

Numerická simulace slévárenských procesů je v současné době zpracována pro většinu běžně používaných technologií výroby odlitků. Jedná se zejména o technologie gravitačního odlévání do pískových a kovových forem, dále jsou zpracovány modely pro lití do forem za zvýšených sil, metodu Lost Foam a pro tzv. semi-solid procesy. Každá z těchto technologií má své odlišnosti a specifika. Jelikož vývoj v oblasti hardware a software jde neustále kupředu, tak rovněž možnosti a přesnosti výpočtů jsou neustále zdokonalovány. Firmy zabývající se vývojem a prodejem těchto programů vkládají značné úsilí a finanční prostředky do uspokojení potřeb trhu a svých zákazníků. Vývoj a výzkum je zejména zaměřen do následujících oblastí [4]:

- zpřesnění a zrychlení numerických výpočtových metod
- zpřesnění a doplnění databází termo-fyzikálních dat, koeficientů přestupu tepla nezbytných pro výpočet
- možnosti výpočtů nových slévárenských procesů a materiálů
- vývoj modelů pro tzv. mikro-modelování
- zdokonalení kritérií pro vyhodnocení výsledků simulací
- zavedení optimalizačních technik do numerické simulace
- možnosti využití výsledků simulace do dalších technických výpočtů, informačních a kontrolních procesů

2.1 Numerické metody

V současné době jsou simulační programy, jež se využívají ve slévárenství, založeny zejména na dvou numerických metodách [5]:

1) *Metoda konečných prvků (FEM - Finite Element Method):*

Je založena na rozdělení dané oblasti na konečný počet jednoduchých prvků „konečných prvků“ o nichž předpokládáme, že jsou navzájem spojeny v konečném počtu uzlových bodů na hranicích prvků.

2) *Metoda konečných diferencí (FDM - Finite Diference Method):*

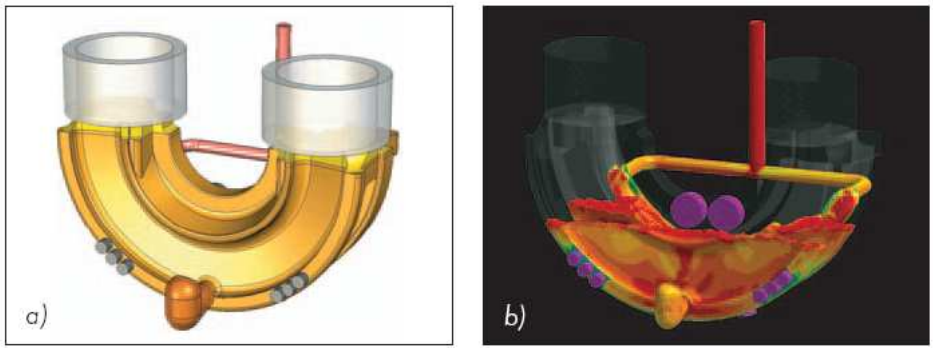
Někdy též jako metoda sítí, je založena na aproximaci základní diferenciální rovnice s příslušnými okrajovými podmínkami odpovídající diferenciální rovnice, jež má tvar algebraických rovnic.
Od ní je odvozená metoda konečných objemů (FVM).

Numerické metody umožňují získat řešení úloh v konečném počtu diskrétních míst (uzlů) zvolené výpočtové sítě. Vývoj je soustředěn zejména do zjednodušení tvorby a generování objemové (případně povrchové) sítě a to zejména u metody FEM, kde na přípravu a preciznost sítě jsou kladeny vyšší nároky.
Pro vysoce náročné výpočty jsou sestavovány speciální výpočtová centra např. na bázi clusterů, u nichž se vysokého výpočetního výkonu dosáhne rozdělením řešení úlohy mezi více procesorů [1].

2.2 Standardní simulace ve výrobním procesu

Na příkladu z oblasti gravitačního lití oceli jsou ukázány možnosti, které numerická simulace nabízí. Jedním z problémů, se kterým se technolog potýká při návrhu nové technologie, se týká zabránění vzniku slévárenských vad typu staženin a ředin, případně jejich minimalizace nebo přemístění tak, aby byly akceptovatelné. Tento typ vad se vyskytuje u většiny technických slitin a jejich podstata je spojena s úbytkem objemu tzv. stahováním, ke kterému dochází v průběhu ochlazování taveniny a tuhnutí. Nemá-li v odlitku vzniknout stažennina, je nutno tento objemový deficit doplnit z dostatečně dimenzovaných nálitků. Technolog se rozhoduje, zda použije nálitky, jakého typu a velikosti a jaké bude jejich rozmístění. Na tyto otázky může pomoci odpovědět numerická simulace. První výpočet tuhnutí samotného odlitku (bez nálitků, vtokové soustavy) napoví, jakým způsobem odlitek tuhne, kde dochází ke vzniku tepelných uzlů a kde jsou poslední místa tuhnutí. Tato analýza napomůže při návrhu rozmístění nálitků, případně dalších prvků ovlivňujících tepelné poměry během tuhnutí a chladnutí (chladítka, izolace). Následuje opětovná fáze tzv. preprocessingu, při které technolog připraví návrh velikosti a umístění jednotlivých nálitků, případně dalších částí. Pro obdržení přesnější představy o tepelné bilanci řešené soustavy, je vhodné modelovat plnění formy – viz **Obr. 2.1** [6]. Analýza této části numerického experimentu odpovídá na následující otázky [6]:

- Je charakter plnění s ohledem na odlévaný typ slitiny vyhovující?
- Je geometrie a dimenzování jednotlivých částí vtokové soustavy optimální?
- Dojde k zaplnění celé dutiny, nehrozí vznik studených spojů?
- Jsou zde kritická místa s ohledem na erozi formy, případně jader?
- Je navržený vtokový systém vhodný z pohledu obdrženého rozložení teplotního pole?

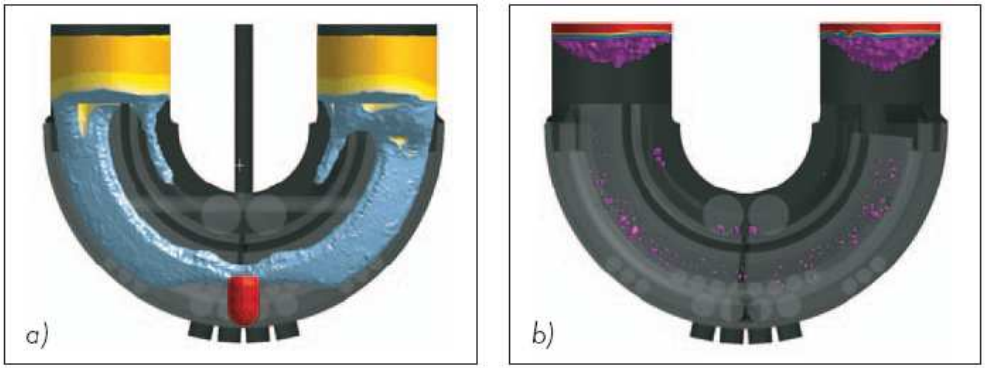


Obr. 2.1 *Vizualizace fáze plnění: a) CAD návrh technologie, b) rozložení teplotního pole na začátku tuhnutí [6]*

2.2.1 Výpočet tuhnutí odlitku

Zodpovězení předchozích otázek je již prvním krůčkem na cestě ke „zdravému“ odlitku. Na výsledky provedených analýz plnění navazuje výpočet tuhnutí, případně chladnutí odlitku (napětí a deformace). Z charakteru teplotního pole během tuhnutí lze sledovat, zda dochází k usměrněnému tuhnutí a zda nálitky jsou tepelně i objemově dostatečné. Z postupu fronty tuhnutí s případným použitím speciálních kritériálních funkcí lze určit dosazovací vzdálenosti nálitků. Přímo lze tedy vidět, zda nedochází k samostatnému tuhnutí některých částí odlitku, které jsou odděleny od dosazování tekutého kovu z nálitků – viz **Obr. 2.2** [6].
Simulace tedy opět odpoví na otázky [6]:

- Je navolené dimenzování nálitků správné?
- Jaké je využití kovu v nálitcích?
- Je počet použitých nálitků dostatečný?
- Je nutné ovlivnit teplotní pole jinými prostředky (chladítka, zásypy)?



Obr. 2.2 *Zobrazení charakteru tuhnutí a vzniku pórovitosti v odlitku: a) zobrazení postupu krystalizační fronty, b) predikce vzniku staženin v odlitku [6]*

V případě, že zvolená technologie řeší uspokojivě problémy spojené s tuhnutím, může se dále optimalizovat například velikost a typ použitých nálitků. V dnešní době je běžnou praxí používání izolačních nebo exotermických obkladů. I tyto moderní technologické pomůcky mohou být zahrnuty do výpočtu [6].

2.2.2 Chladnutí a vznik nežádoucích jevů

U složitých odlitků, které mají komplikované přechody stěn, se často pokládá otázka, jaká zbytková pnutí mohou zůstat v odlitku, jaká je náchylnost ke vzniku trhlin a prasklin a jak se odlitek bude deformovat. Materiálové modely zahrnují elastické, elasto-plastické nebo elasto-viskózní vlastnosti odlitku nebo formy. Během výpočtu se uvažuje s odtržením ztuhlého povrchu odlitku od formy a tedy s formováním vzduchových mezer. Koeficient přestupu tepla je automaticky přepočítáván, což umožní přesné výpočty přenosu tepla během tuhnutí a chladnutí. U nepoddajných forem se může sledovat vliv brzděného smrštění na vznik napětí v odlitku, případně následné deformace po vyjmutí z formy. Tyto výpočty specifikují příčiny vzniku nežádoucích jevů a podněcují úvahy o změně tepelné bilance procesu, případně jsou argumentem k zásahu do geometrie součásti. Možnosti numerické simulace ani zde nekončí. V současné době jsou zpracovány modely pro výpočet nukleace a růst zrn, pro predikci mechanických vlastností, případně speciální modely tepelného zpracování. Záleží pouze na uživateli, jaká oblast je pro něj určující s ohledem na požadované vlastnosti odlitku [6].

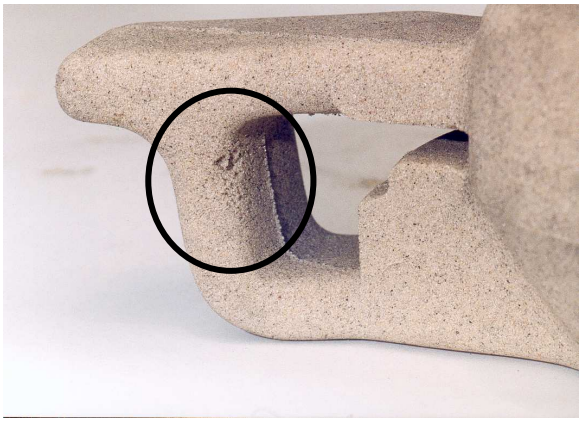
3 NUMERICKÁ SIMULACE VSTŘELOVÁNÍ PÍSKOVÝCH SMĚSÍ

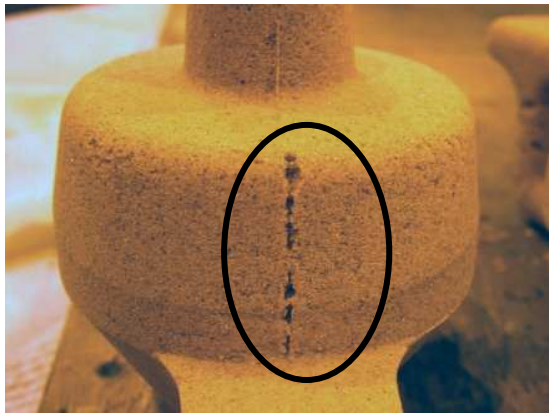
Výroba jader se v simulaci zaměřuje na dvě metody:

1) Vstřelení pískové směsi do jaderníku
2) Vytvrzení směsi pomocí plynu (metoda CB)

Účel simulace:
- predikce pozice odvzdušňovacích sítek
- predikce charakteru proudění a vizualizace pozice spojení front proudění směsi
- výpočet vektorového a tlakového pole směsi
- predikce kritických míst s ohledem na zaběhnutí
- výpočet charakteru průchodu plynu vstřelenou směsí
- predikce kritických míst s ohledem na nedokonalé profouknutí plynem

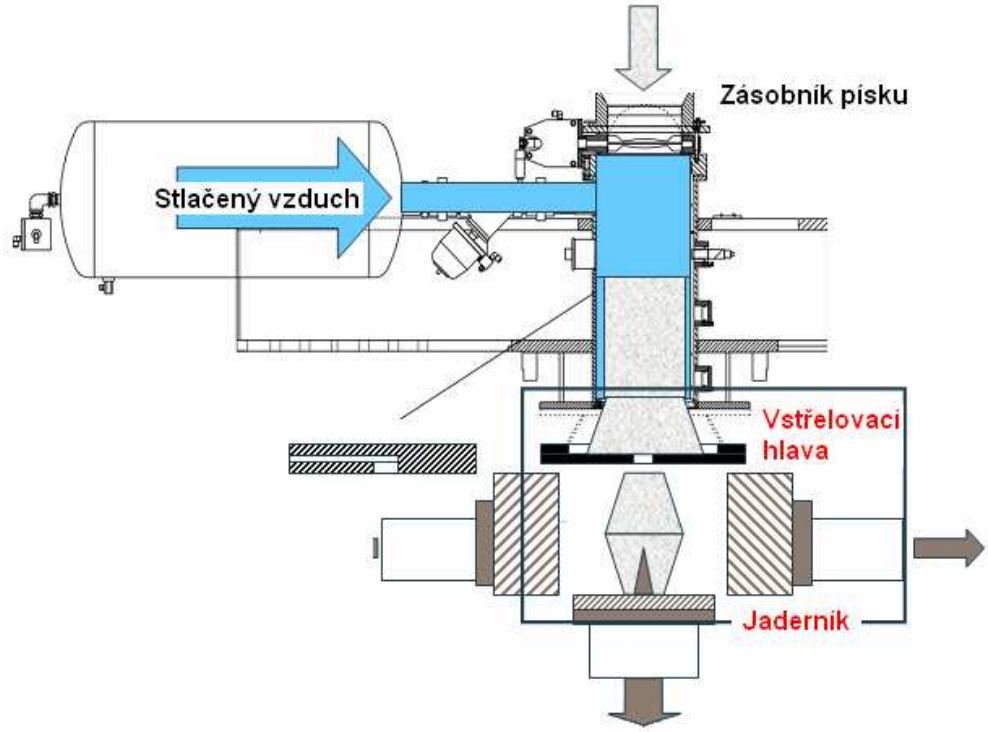
Přínosy simulace:
- lepší porozumění procesu vstřelení a profouknutí
- predikce kritických oblastí pro vstřelení jádra (**obr. 3.1** a **3.2**) [7]
- optimalizace vstřelovacích tlaků
- optimalizace technologických prvků (sítka, vstřelovací hlavy..)
- lepší kontrola parametrů procesu
- finanční a časová úspora
- konkurenční výhoda





***Obr. 3.1**, **3.2** Nejčastější vady jader [7]*

Pro numerickou simulaci vstřelování pískových směsí se berou v úvahu pouze časti vstřelovací hlava a jaderník – viz **Obr. 3.3** [7].



Obr. 3.3 *Schéma vstřelovacího stroje s jaderníkem [7]*

3.1 Výpočty pro vstřelování jader

Současné prototypy modelů proudění pískové směsi (core blowing) jsou založeny na ne-newtonovských modelech proudění.

Předpoklady:
- Jedno fázový ne-newtonský model proudění
- Velikost hustoty se předpokládá konstantní

Dynamická viskozita je ve tvaru [7]:

$$\mu = \mu_{\infty} + \gamma \frac{(\mu_0 - \mu_{\infty})}{S} + \lambda \left(\nabla . \frac{v}{|v|} \right) \qquad (3.1)$$

γ - velikost smykové rychlosti [s^{-1}]
λ - faktor zhutnění [$Kg.s^{-1}$]

S - faktor sklonu viskozity [s^{-1}]
v - vektor rychlosti [$m.s^{-1}$]
μ_0 - viskozita při nulové smykové rychlosti [Pa.s]
μ_∞ - viskozita při vysoké smykové rychlosti [Pa.s]

Tlaková ztráta formou [7]:

$$\Delta P = \rho k \frac{v^2}{2} \qquad (3.2)$$

ρ - hustota směsi [$Kg.m^{-3}$]
v - vektor rychlosti [$m.s^{-1}$]
k - faktor propustnosti sítka [-]

3.2 Výpočty pro profukování jader

Proces profukování (core gassing) může být popsán jako přeprava aktivní látky v porézním prostředí a vyžaduje stanovení čtyř makroskopických proměnných, které jsou definované v měřítku větší než velikost zrnka písku [8]:

ω_A - hmotnostní zlomek aktivní látky [-]
ρ - hustota aktivního plynu [$Kg.m^{-3}$]
v - rychlost proudění plynu [$m.s^{-1}$]
P - celkový tlak plynu [Pa]

Rovnice hmotnostní bilance [8]:

$$\varepsilon \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla.(\rho v) = 0 \qquad (3.3)$$

Rovnice rychlosti [8]:
(Podle Darcyho zákona proudění plynů v porézních médiích)

$$v = -\frac{K}{\mu}(\nabla.P - \rho g) \qquad (3.4)$$

Rovnice bilance aktivní látky - difúze a konvekce [8]:

$$\varepsilon \frac{\partial \rho \omega_A}{\partial t} + \nabla.(\omega_A \rho v) = \nabla.(\rho D \nabla \omega_A) + \sigma_A \qquad (3.5)$$

Rovnice ideálního plynu [8]:

$$P = \rho r T = \rho\left(\omega_A r_A + \omega_B r_B\right)T \qquad (3.6)$$

ε - pórovitost [-]
μ - viskozita plynu [Pa.s]
D - difúzní napětí [$m^2.s^{-1}$]
r - molární konstanty [$J.K^{-1}.mol^{-1}$]
σ_A - faktor uvažující spotřebu aktivní látky během chemické reakce – program QuikCAST tento faktor neuvažuje

Prodyšnost „*K“* lze určit z průměru zrna „*d“ [mm]* a pórovitosti písku „ε“ pomocí Kozeny-Carmanova vzorce. [8]:

$$K = \frac{2\varepsilon^3 d^2}{72\pi\left(1-\varepsilon\right)^2} \qquad (3.7)$$

Současné simulační modely uvažují následující zjednodušení [7]:

- žádné chemické reakce
- energetická rovnice vynechána
- tenzor difúze plynu nahrazen konstantním skalárním difúzním koeficientem
- viskozita směsi vzduchu / katalyzátoru předpokládaná za konstantní
- pórovitost písku je nezávislá na hustotě písku při vstřelování
- blízkost s rovnicí ideálního plynu a Darcyho zákona

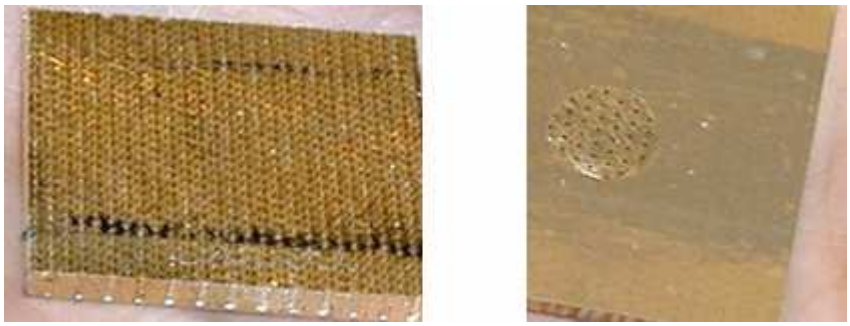
3.3 Definice počátečních a okrajových podmínek v programu QuikCAST

Další parametry, které nejsou zcela zpracovány se týkají definice počátečních případně okrajových podmínek výpočtu. Jedná se například o definici hydraulického odporu při průchodu vzduchu odvzdušňovacím sítkem. Projekt by opět mohl přinést specifikace odporů pro jednotlivé typy běžně používaných sítek, což by vedlo k výraznému zpřesnění predikce posledních míst zaplňování dutiny jaderníku.
Projekt by rovněž mohl přispět k dalšímu zlepšení analýzy výsledků. Důležitým faktorem, který není v současné době vyhodnocován patří například zhutnění směsi v jednotlivých místech vstřeleného jádra. Jednalo by se tedy o nové kritérium, které by specifikovalo změnu hustoty. Vizualizace rovněž pokulhává v případě vstřelu z více jak jedné vstřelovací hlavy. V případě vývoje nového

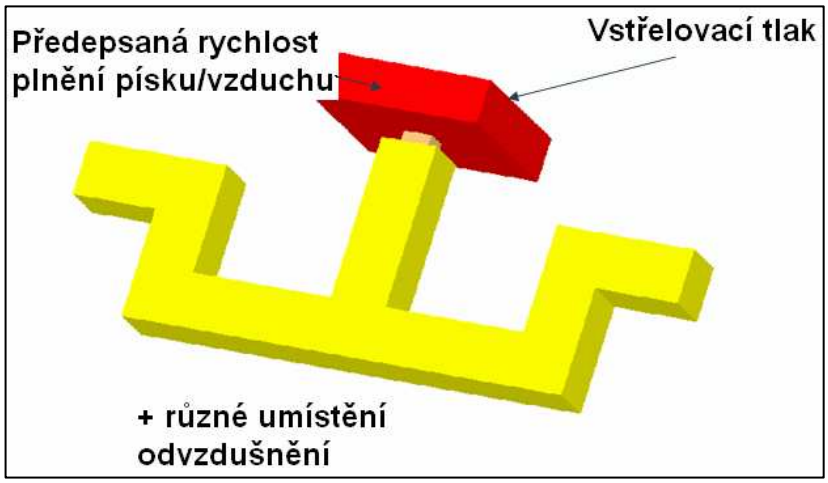
kritéria by se uživatel simulace mohl dovědět jaká část jádra byla vstřelena hlavou 1, 2 atd.

3.3.1 Definice pro vstřelování

- Rychlost plnění písku/vzduchu ze vstřelovacích hlav.
- Konstantní vstřelovací tlak v horní části vstřelovací hlavy v průběhu vstřelování.
- Filtry a odvzdušnění modelů – umístění odvzdušnění je klíčovým parametrem procesu jak pro vstřelení tak pro profukování (**obr. 3.4**).



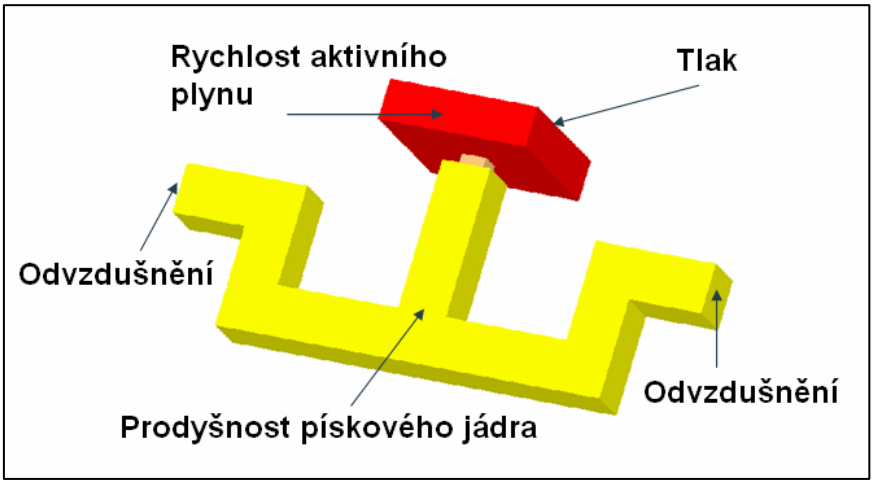
Obr. 3.4 *Otevřené sítko (vlevo), uzavřené sítko - 20% (vpravo) [7]*



Obr. 3.5 *Podmínky pro vstřelování [7]*

3.3.2 Definice pro odvzdušňování

- Rychlost předepsané aktivní látky v objemu hlavy.
- Předepsaný tlak profukování na povrchu hlavy.
- Předepsaná prodyšnost v objemu pískového jádra.
- Okrajová podmínka odvzdušňovacího tlaku pro aktivní plyn a vzduch.



Obr. 3.6 *Podmínky pro profukování [7]*

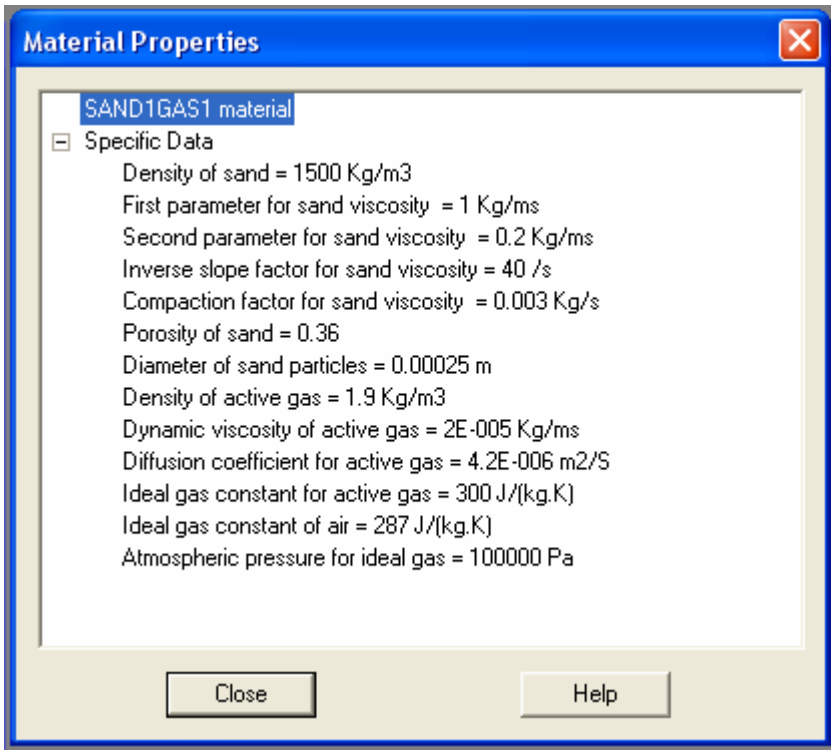
3.3.3 Materiálová databáze v numerické simulaci

Data nutná pro definici výpočtu lze získat [1]:

- z materiálové databáze simulačního programu
- z odborné literatury, kde jsou však uváděny především pro čisté prvky, nebo pro základní druhy materiálu a většinou pouze pro pokojové teploty
- přímým experimentálním měřením (finančně náročné) inverzním modelováním (kombinace experimentu a numerických výpočtů)

V současných databázích simulačních programů se vyskytuje pouze jedna univerzální směs, u které je známa hustota písku (ρ), faktory ovlivňující viskozitu písku (μ_0, μ_∞), faktor sklonu viskozity (S), zhutnění (λ), pórovitost písku, střední průměr zrna písku (d). Dále hodnoty pro aktivní plyn, jako hustota aktivního plynu (ρ), dynamická viskozita (μ), difúzní koeficient (D), ideální plynová konstanta aktivního plynu a vzduchu (r) a atmosférický tlak ideálního plynu (P).

Materiálové vlastnosti a jejich hodnoty pro písek a plyn, které používá program QuikCAST jsou na **obr. 3.7**.

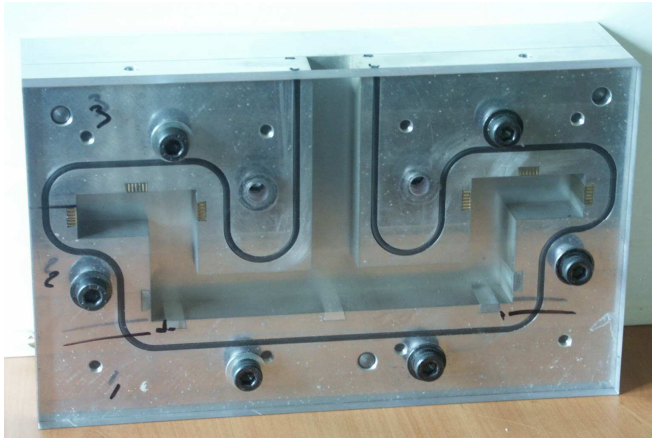


Obr. 3.7 *Materiálové vlastnosti písku a plynu*

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1 Vliv počátečních parametrů na simulaci vstřelování

Pro zjištění následujících definovaných parametrů se použilo zkušební jádro od společnosti ESI Group. Vstřelování se provádělo na kovovém a dřevěném jaderníku (**obr. 4.1, 4.2**) [7]. Na čelní straně jaderníku byla pevně přidělána deska plexiskla pro vizualizaci experimentu, kterou snímala vysokorychlostní kamera s 500 až 2000 snímků/s (**obr. 4.3**) [7].
V následujících podkapitolách je uvedeno, které parametry ovlivňují proces vstřelování z pohledu simulace. Lze ale brát v úvahu, že i když některé parametry výraznou nebo žádnou změnu postrádají, u větších a složitějších jader se změna projevit může. Výsledky jednotlivých simulovaných parametrů jsou uvedeny v závěru práce.



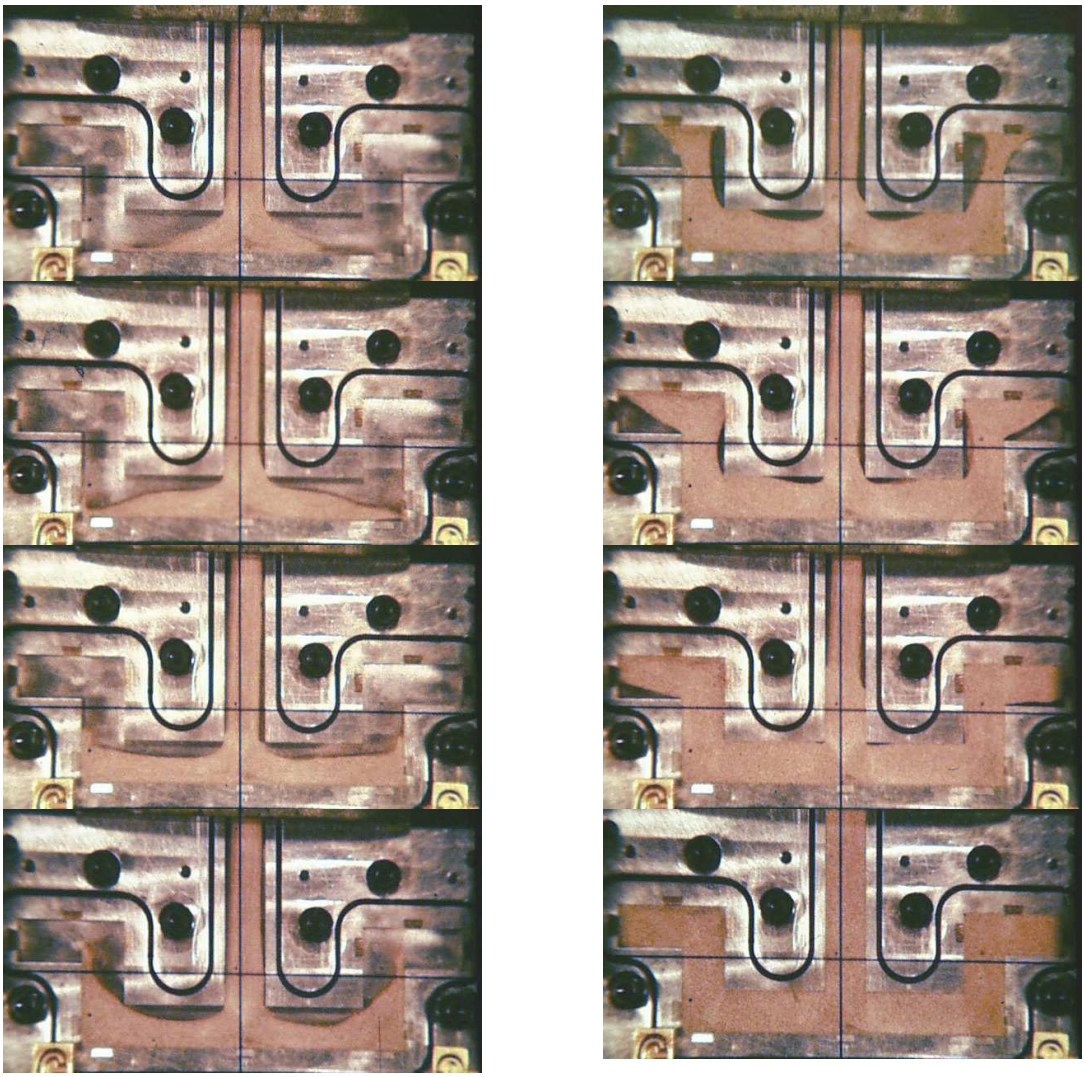
Obr. 4.1 *Kovový jaderník s plexisklem [7]*



Obr. 4.2 *Dřevěný jaderník s plexisklem [7]*



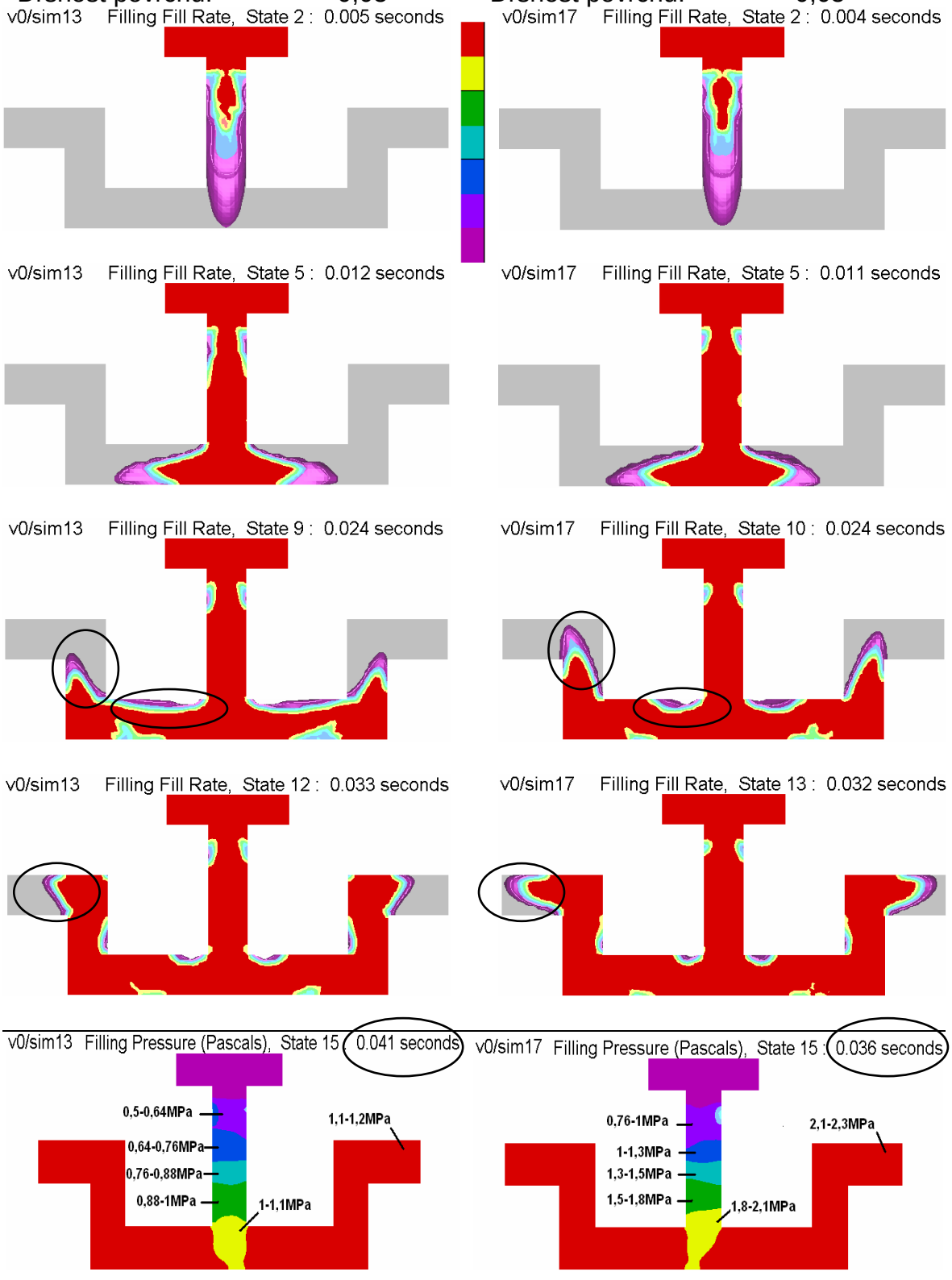
Obr. 4.3 *Snímání vysokorychlostní kamerou [7]*



Obr. 4.4 *Některé snímky pořízené vysokorychlostní kamerou [7]*

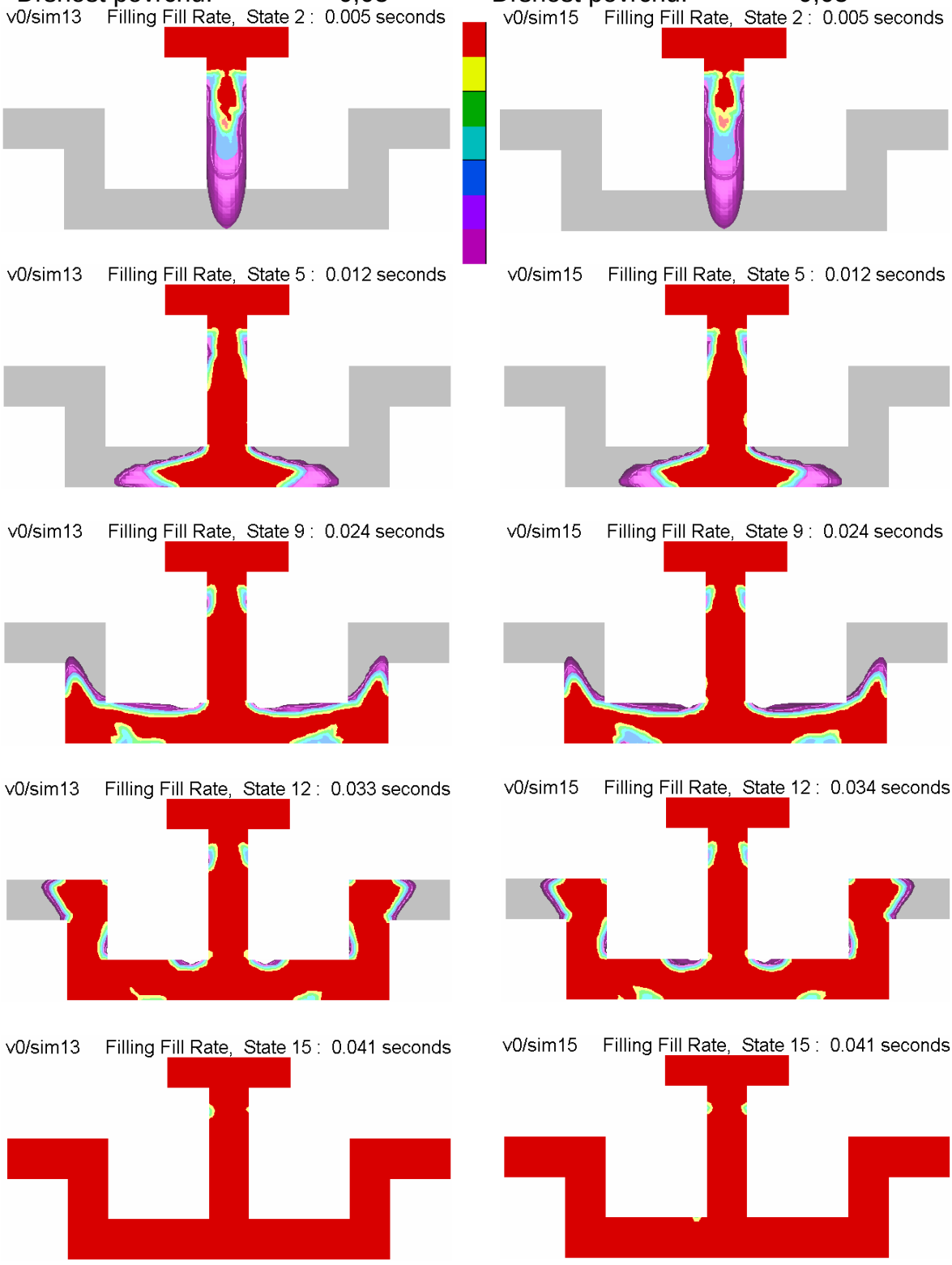
4.1.1 Vliv vstřelovacího tlaku

Vstřelovací tlak:	**4 bar**	**Vstřelovací tlak:**	**5 bar**
Propustnost sítek:	20 %	Propustnost sítek:	20 %
Drsnost povrchu:	0,05	Drsnost povrchu:	0,05



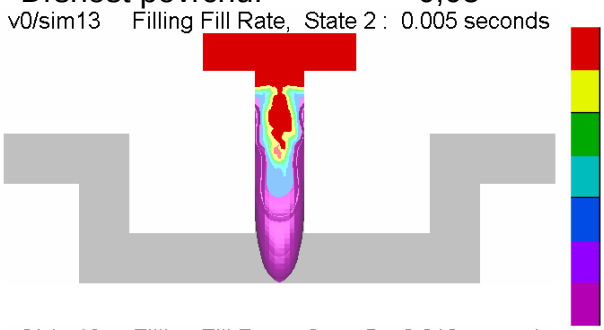
4.1.2 Vliv odvzdušnění

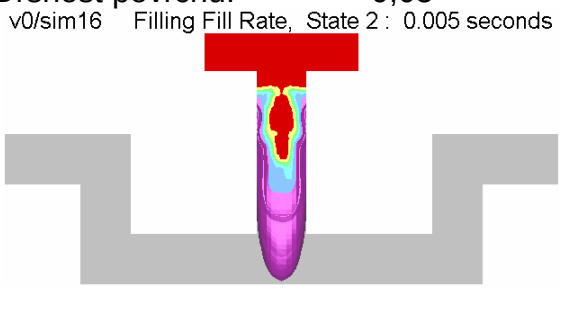
Vstřelovací tlak:	4 bar	Vstřelovací tlak:	4 bar
Propustnost sítek:	**20 %**	**Propustnost sítek:**	**40 %**
Drsnost povrchu:	0,05	Drsnost povrchu:	0,05

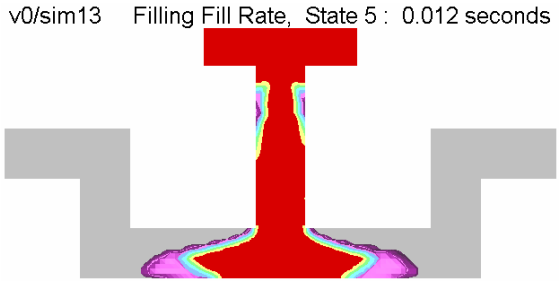


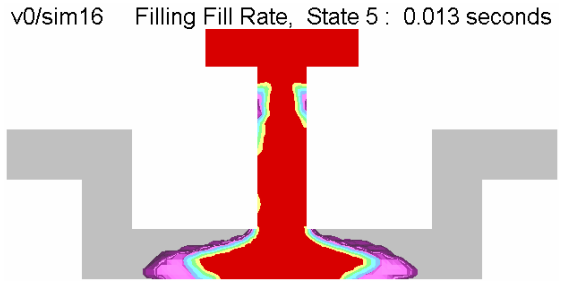
4.1.3 Vliv hustoty písku

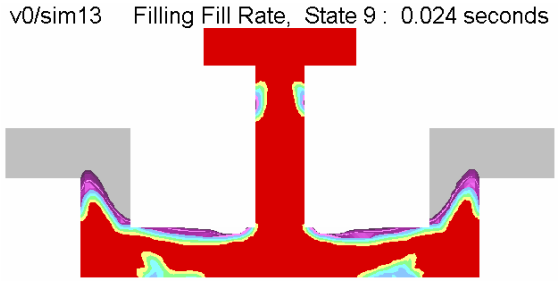
Hustota písku:	**1500 kg/m^3**	**Hustota písku:**	**1600 kg/m^3**
Vstřelovací tlak:	4 bar	Vstřelovací tlak:	4 bar
Propustnost sítek:	20 %	Propustnost sítek:	20 %
Drsnost povrchu:	0,05	Drsnost povrchu:	0,05

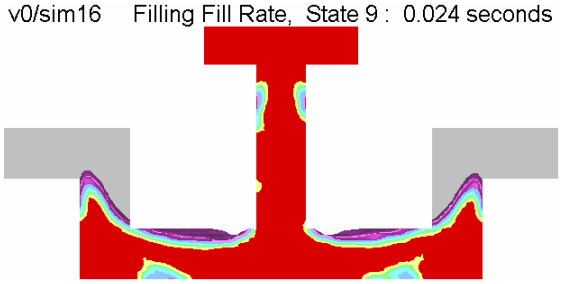


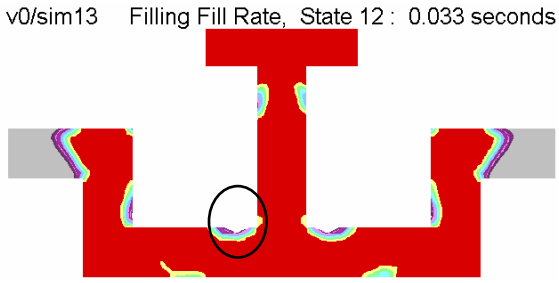


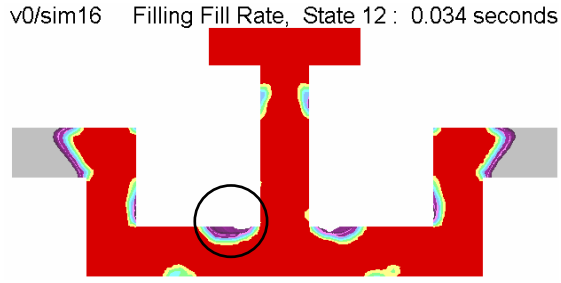


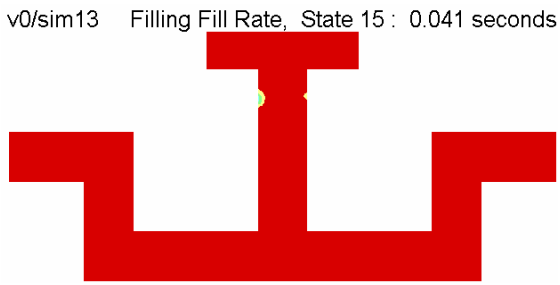


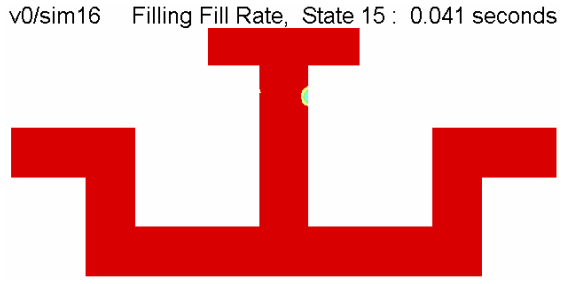






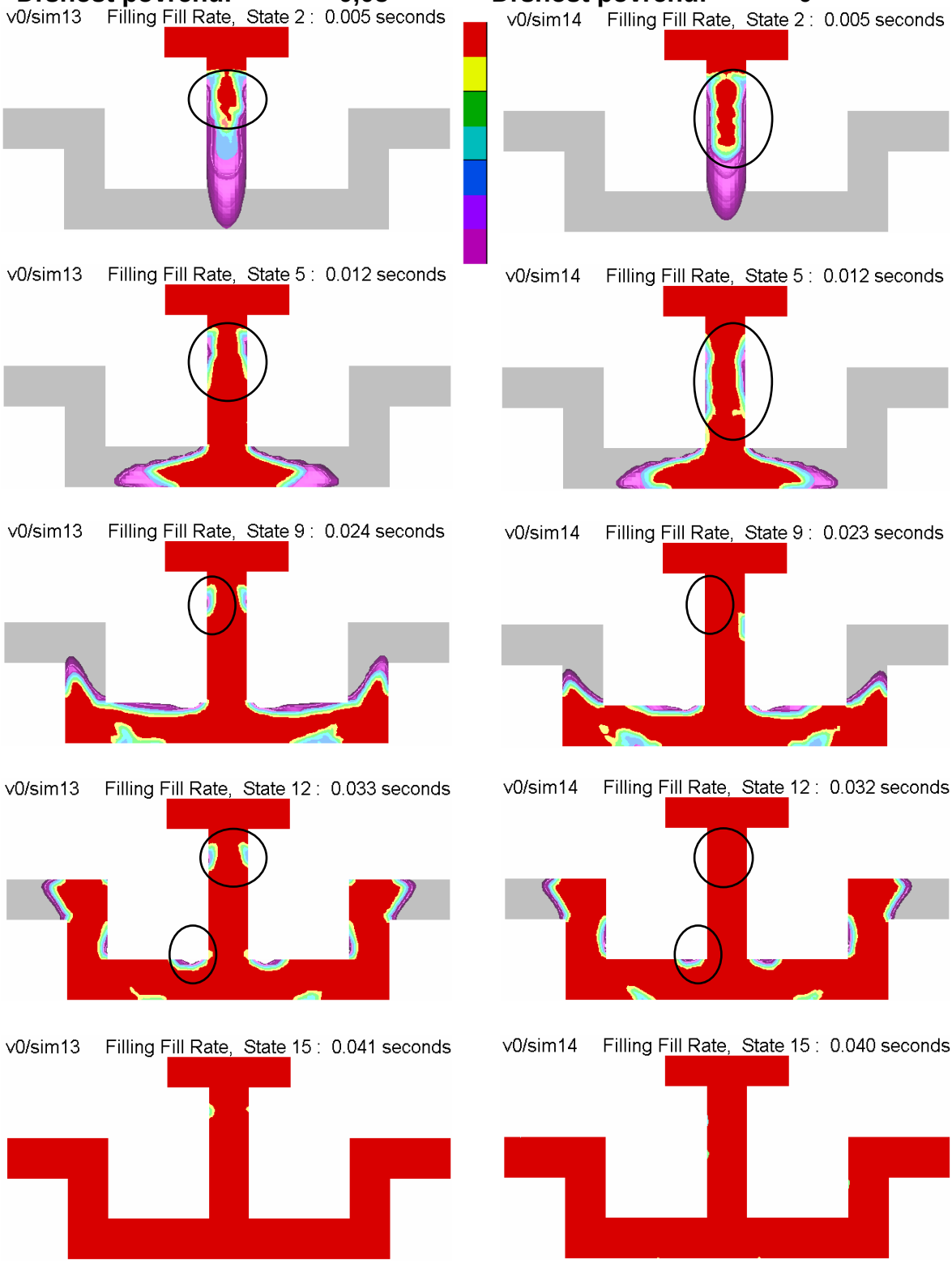






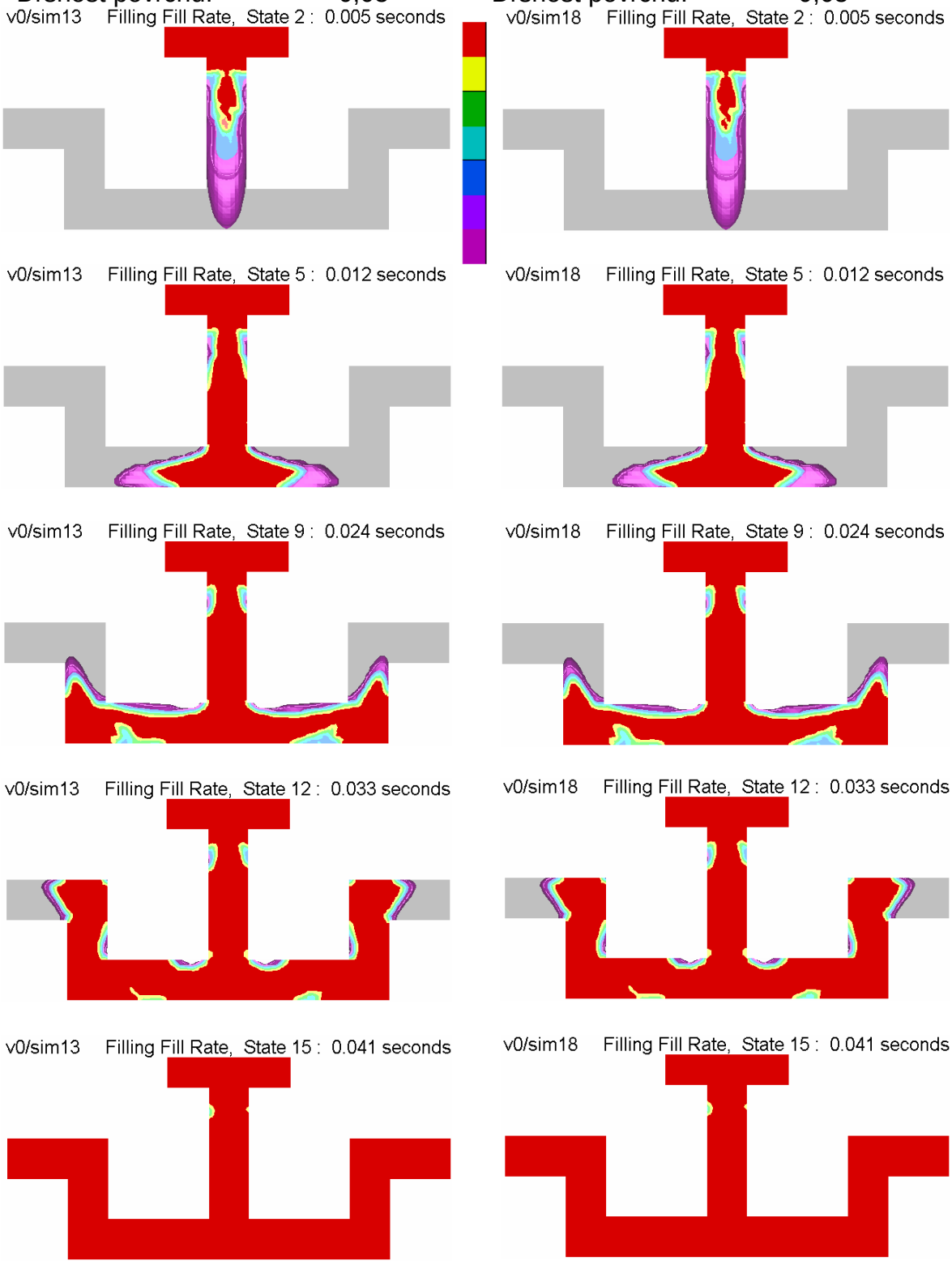
4.1.4 Vliv drsnosti povrchu

Vstřelovací tlak:	4 bar	Vstřelovací tlak:	4 bar
Propustnost sítek:	20 %	Propustnost sítek:	20 %
Drsnost povrchu:	**0,05**	**Drsnost povrchu:**	**0**



4.1.5 Vliv průměru zrna písku

Průměr zrna písku:	**0,00025 m**	**Průměr zrna písku:**	**0,00022 m**
Vstřelovací tlak:	4 bar	Vstřelovací tlak:	4 bar
Propustnost sítek:	20 %	Propustnost sítek:	20 %
Drsnost povrchu:	0,05	Drsnost povrchu:	0,05

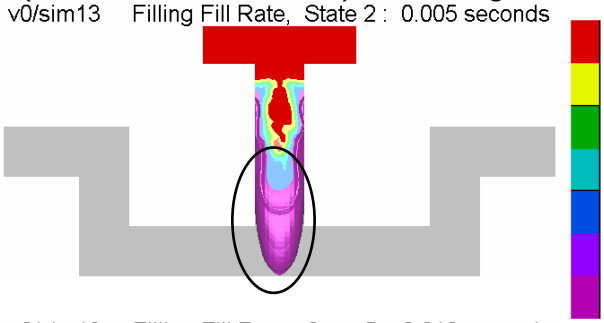


4.1.6 Vliv změny parametrů viskozity

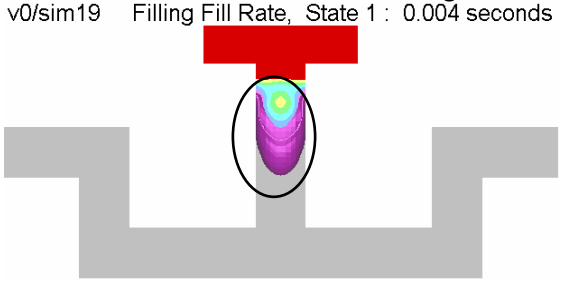
First parameter for sand viscosity (*viz materiál. databáze*): **1 kg/m.s**
Second parameter for sand viskosity (*viz materiál. databáze*): 0,2 kg/m.s

First parameter for sand viscosity: 5 kg/m.s
Second parameter for sand viscosity: 0,2 kg/m.s

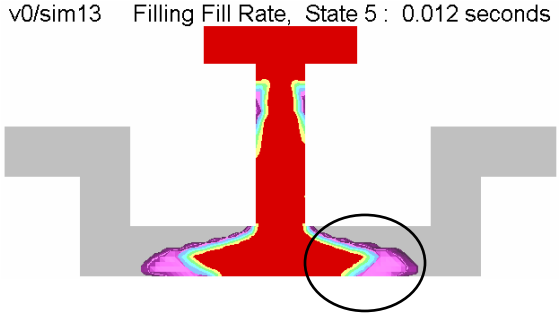
v0/sim13 Filling Fill Rate, State 2 : 0.005 seconds



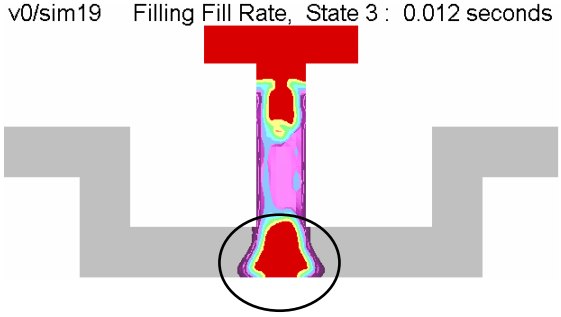
v0/sim19 Filling Fill Rate, State 1 : 0.004 seconds



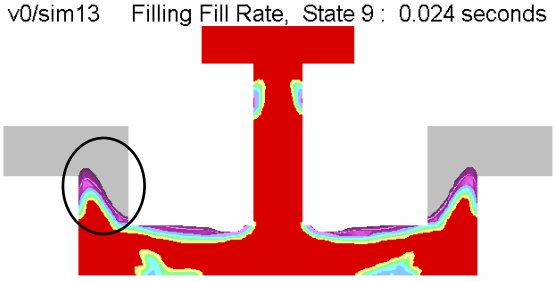
v0/sim13 Filling Fill Rate, State 5 : 0.012 seconds



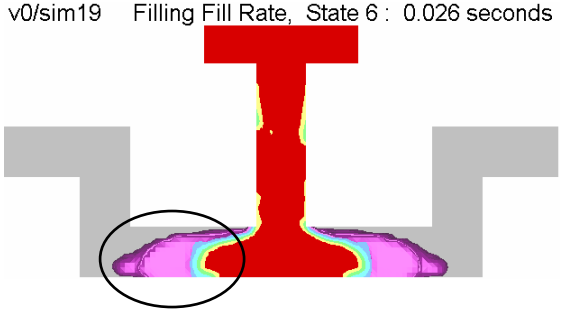
v0/sim19 Filling Fill Rate, State 3 : 0.012 seconds



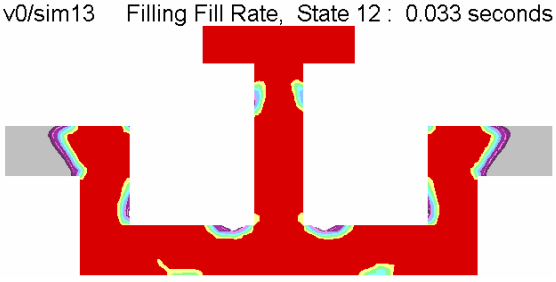
v0/sim13 Filling Fill Rate, State 9 : 0.024 seconds



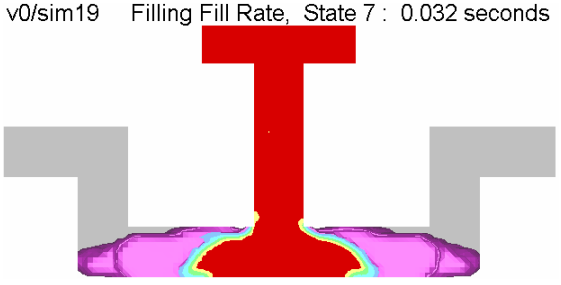
v0/sim19 Filling Fill Rate, State 6 : 0.026 seconds



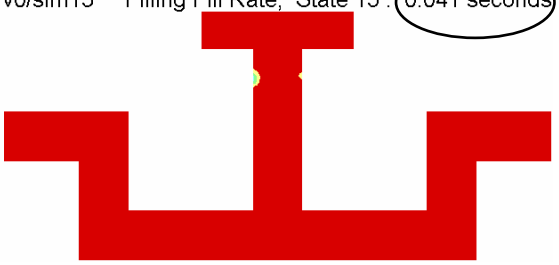
v0/sim13 Filling Fill Rate, State 12 : 0.033 seconds



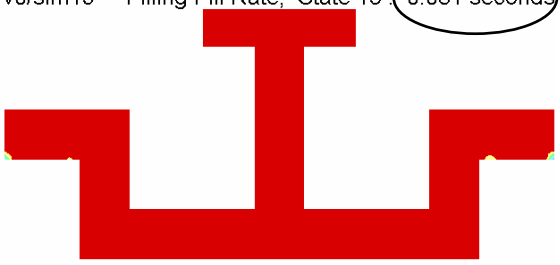
v0/sim19 Filling Fill Rate, State 7 : 0.032 seconds



v0/sim13 Filling Fill Rate, State 15 : 0.041 seconds

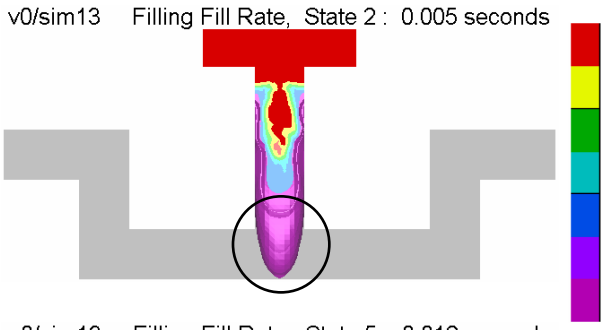


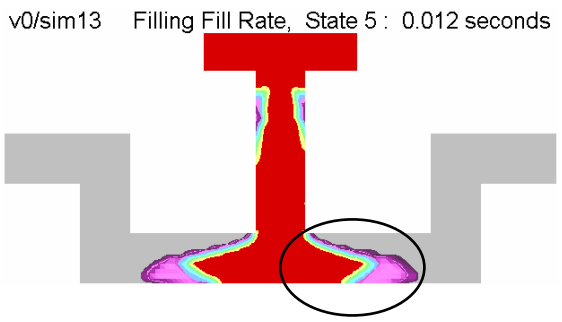
v0/sim19 Filling Fill Rate, State 15 : 0.081 seconds

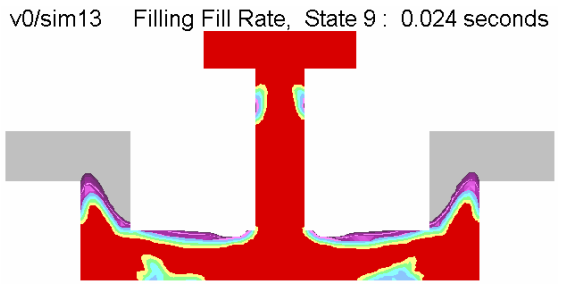


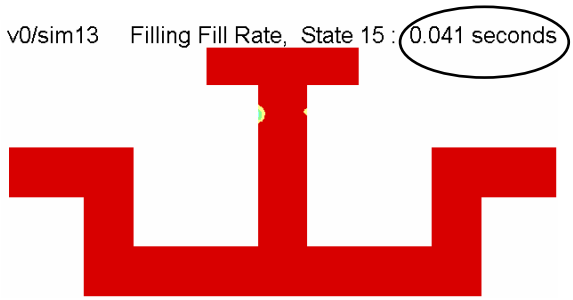
First parameter for sand viscosity (*viz materiál. databáze*): 1 kg/m.s

Second parameter for sand viscosity (*viz materiál. databáze*): 0,2 kg/m.s



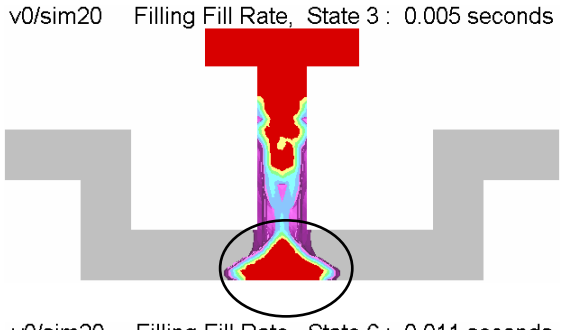


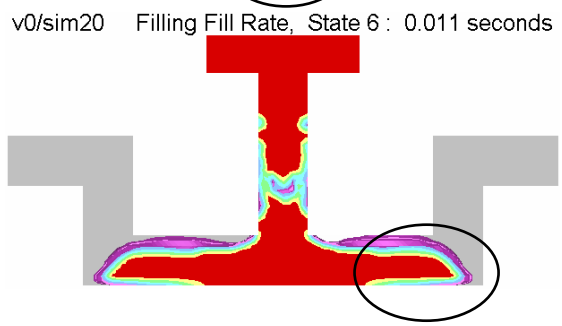


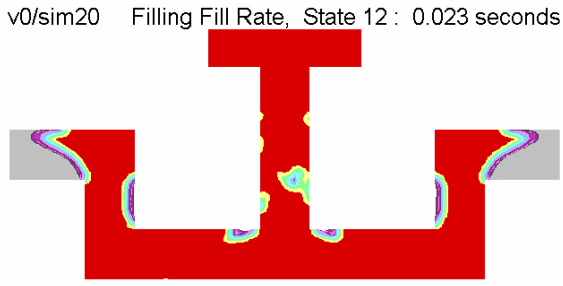


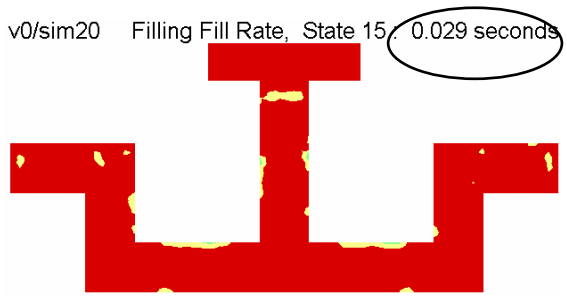
First parameter for sand viscosity: 1 kg/m.s

Second parameter for sand viskosity: 1 kg/m.s



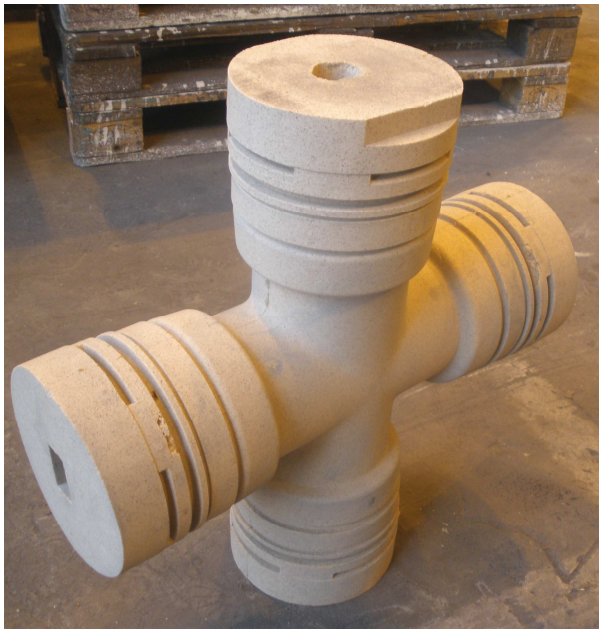






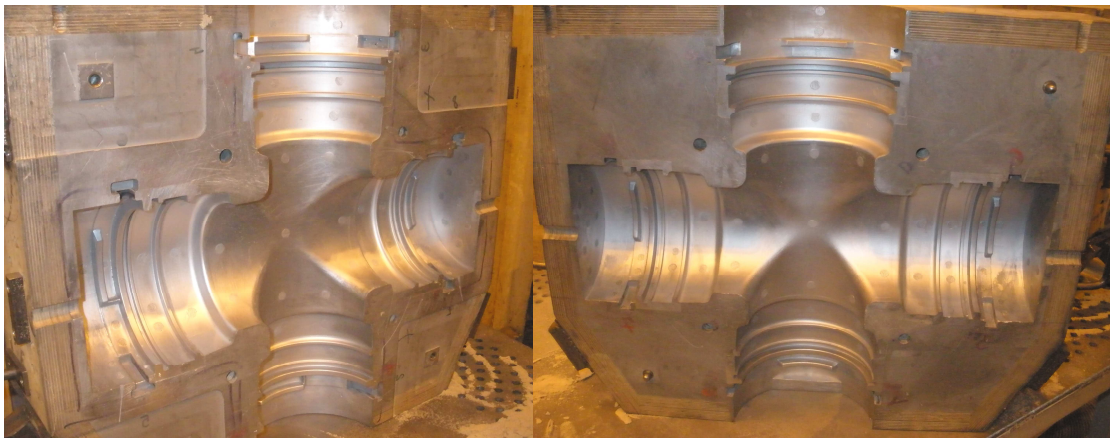
4.2 Geometrie jádra

Pro vlastní experiment bylo vybráno jádro (**obr. 4.5**) od firmy JMA v Hodoníně. Jádro se vstřeluje do svisle děleného dřevěného jaderníku (**obr. 4.6**) a typ písku, který firma aktuálně používá je *Střeleč ST 53* o středním průměru zrna $d_{stř}$=0,27 mm.
Na bočních stranách jádra jsou otvory, které slouží pro snadnější vyjímání z jaderníku a zároveň pro odlehčení.
Jelikož je jádro symetrické, pro zjednodušení simulace se bude experimentovat pouze s jeho polovinou.



Obr. 4.5 *Jádro*

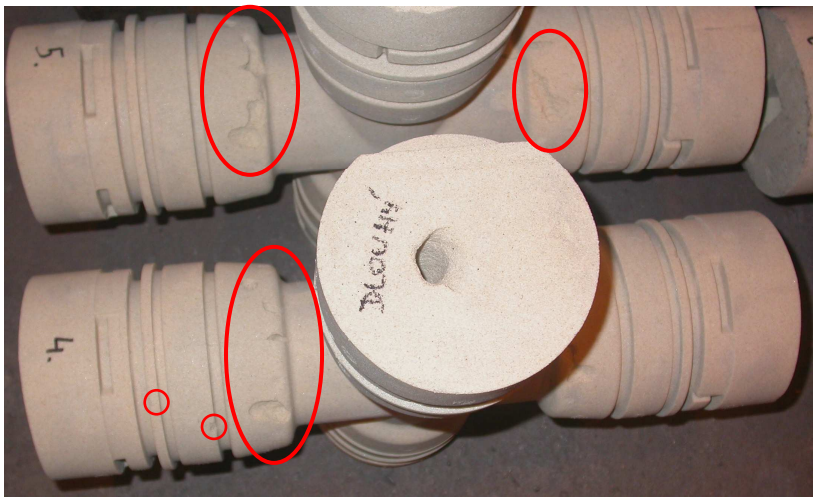
V jaderníku je umístěno několik desítek odvzdušňovacích sítek o velikosti průměru od 4 do 12 mm. Jejich propustnost je 30 %.



Obr. 4.6 *Otevřený jaderník*

4.3 Simulace vstřelení původní varianty

Vady, které jsou vidět na **obr. 4.7** jsou vzniklé po úplně prvním vstřelení a profouknutí. Tyto vady budou dále analyzovány v programu QuikCAST.



Obr. 4.7 *Výskyt a rozmístění vad*

V místech, kde se vady vyskytují lze vidět, že jde o nedovstřelení pískové směsi.

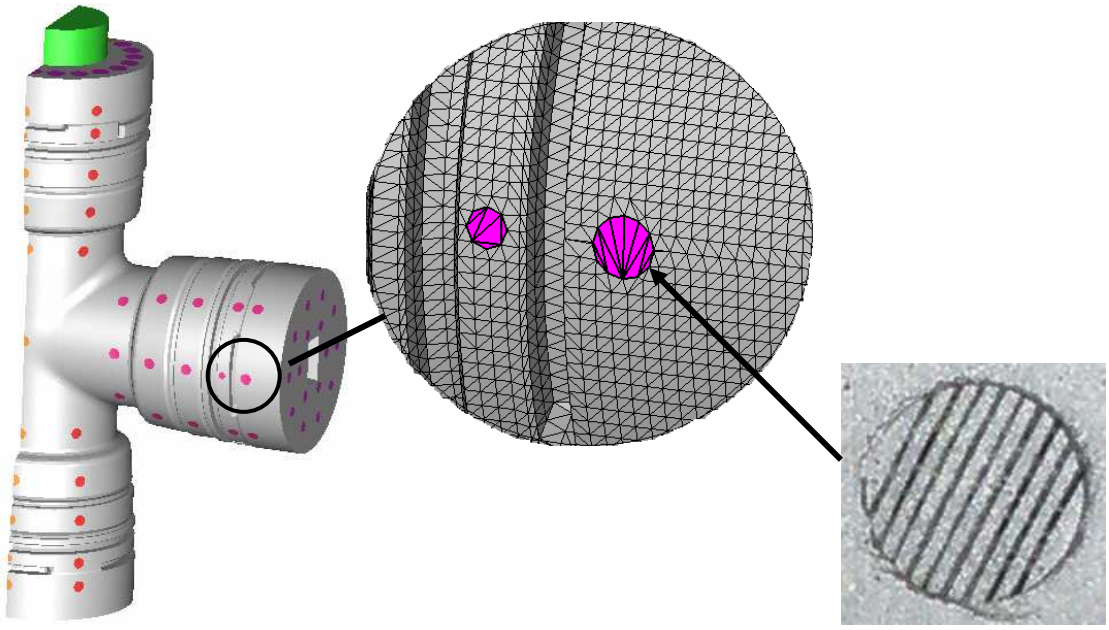


Obr. 4.8 *Detail vady*

4.3.1 Počáteční parametry

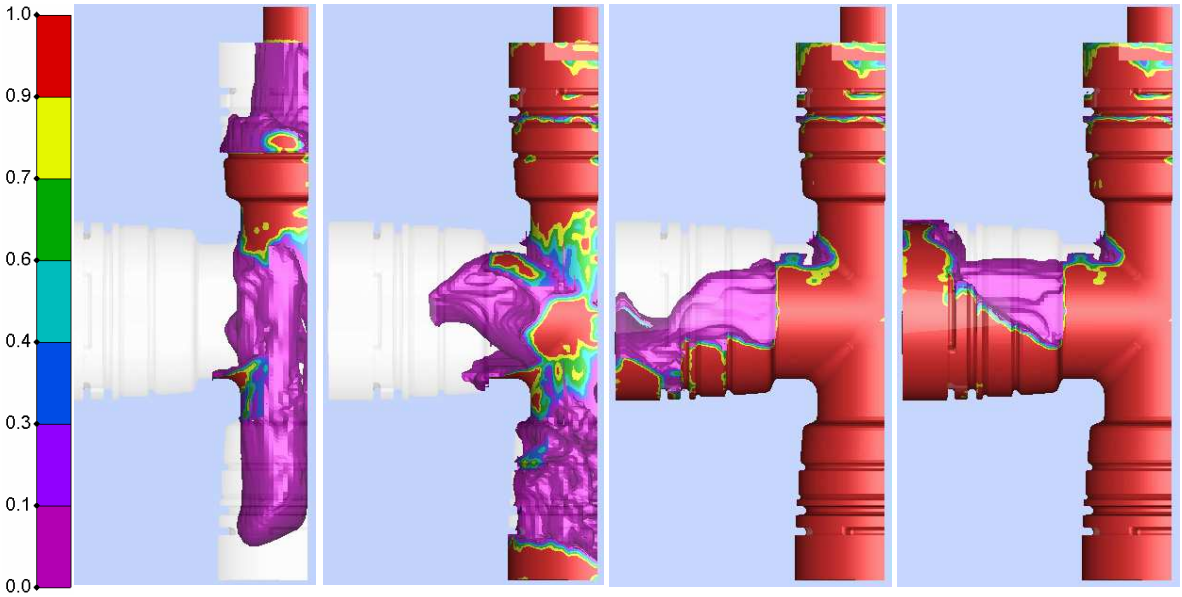
Velikost vstřelovací hlavy:	100 mm (pro následující varianty stejná)
Vstřelovací tlak:	4 bar
Propustnost sítek:	30 %
Propustnost v dělící rovině:	5 % (pro následující varianty stejná)
Drsnost povrchu:	0,05 (pro následující varianty stejná)

Na simulačních modelech se nekreslí žádný jaderník, pouze se pomocí plošných fasetek zadefinuje umístění,velikost a propustnost sítek (**obr. 4.9**). Podobný postup se provedl i v definici dělící roviny.



Obr. 4.9 *Rozmístění sítek (vlevo), plošné fasetky (uprostřed), detail skutečného sítka (vpravo)*

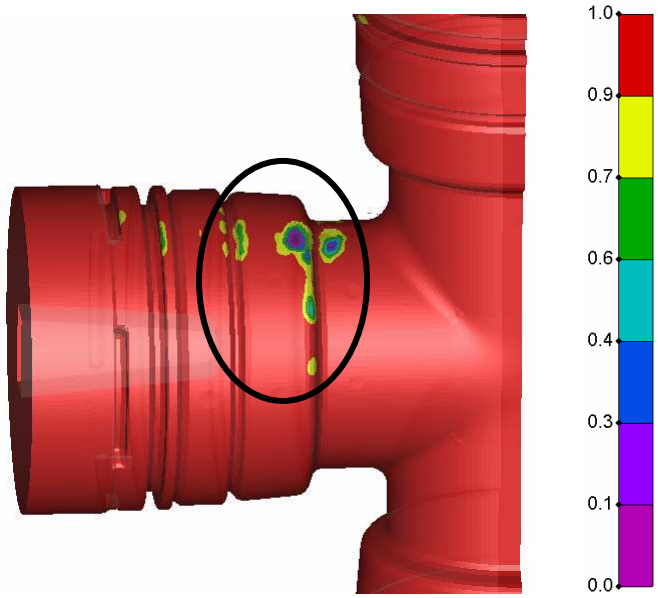
4.3.2 Průběh simulace



0,035 s 0,075 s 0,121 s 0,137 s

Na obrázcích je naznačen průběh plnění při vstřelování v určitých časových krocích.

Čas na konci vstřelení je 0,168 s. Místa výskytu vad (**obr. 4.10**) se téměř přesně shodují se skutečnými – viz **obr. 4.7, 4.8.**

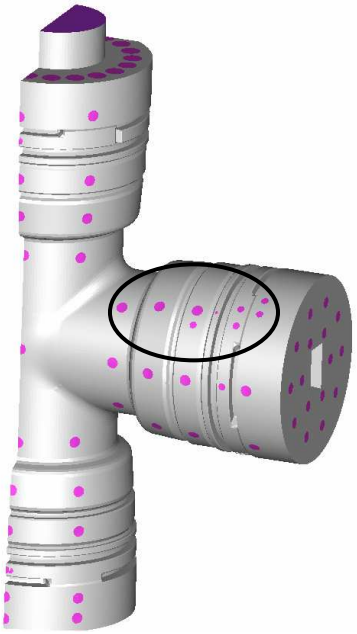


Obr. 4.10 *Zaplnění po vstřelování*

4.4 Simulace vstřelení druhé varianty

Pro vylepšení předchozí verze byly provedeny následující úpravy:

- úprava odvzdušňovacích sítek především v místech kde docházelo k nedovstřelení (**obr. 4.11**)
- přidání odlehčovacího trnu do spodní strany jaderníku (**obr. 4.12**)



Obr. 4.11 *Rozmístění sítek*

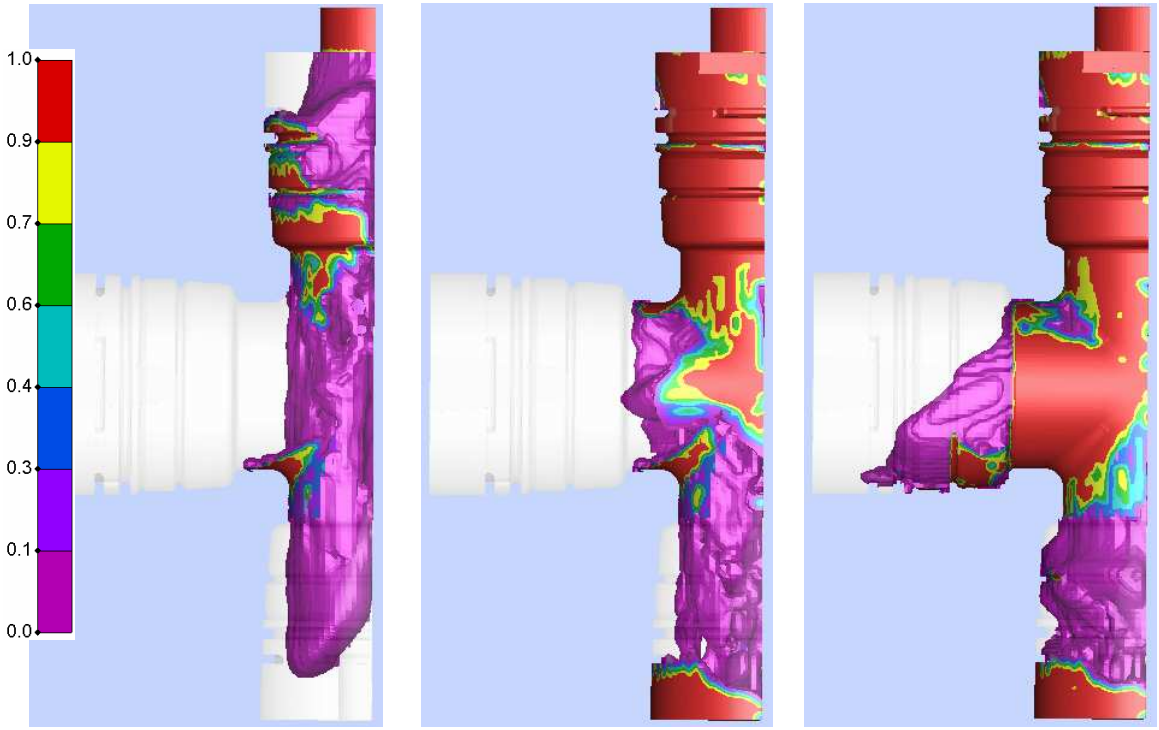


Obr. 4.12 *Vylehčovací trn*

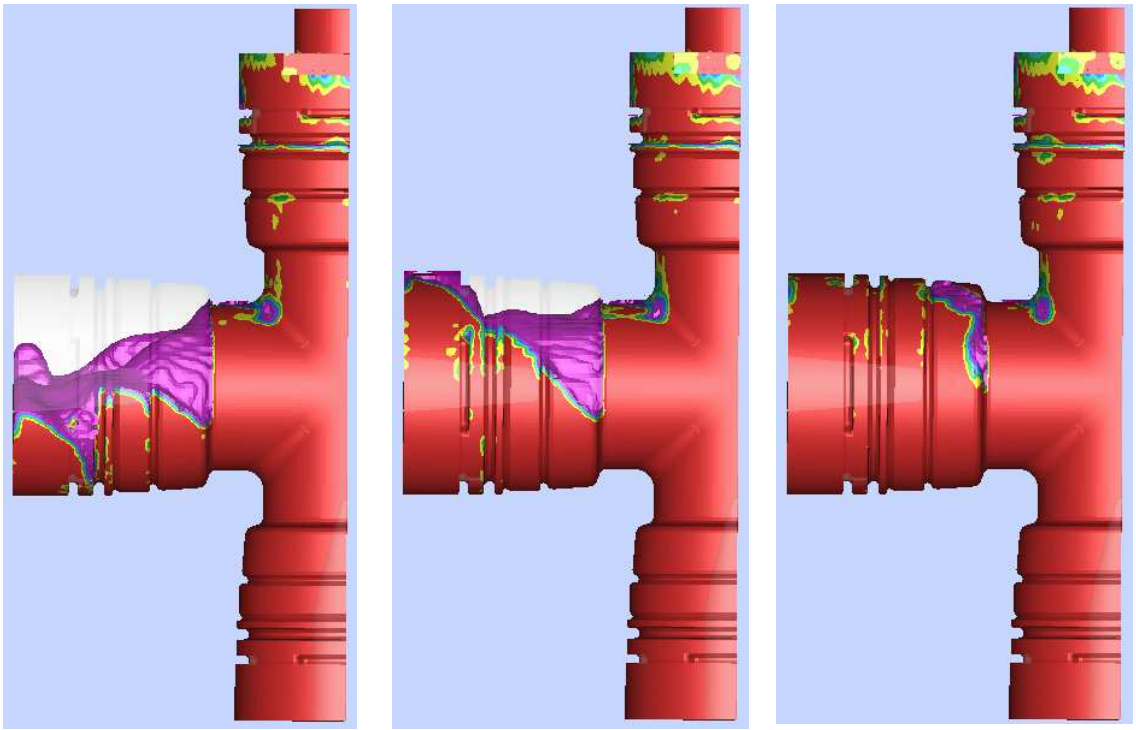
4.4.1 Počáteční parametry

Vstřelovací tlak: 4 bar
Propustnost sítek: 30 %

4.4.2 Průběh simulace

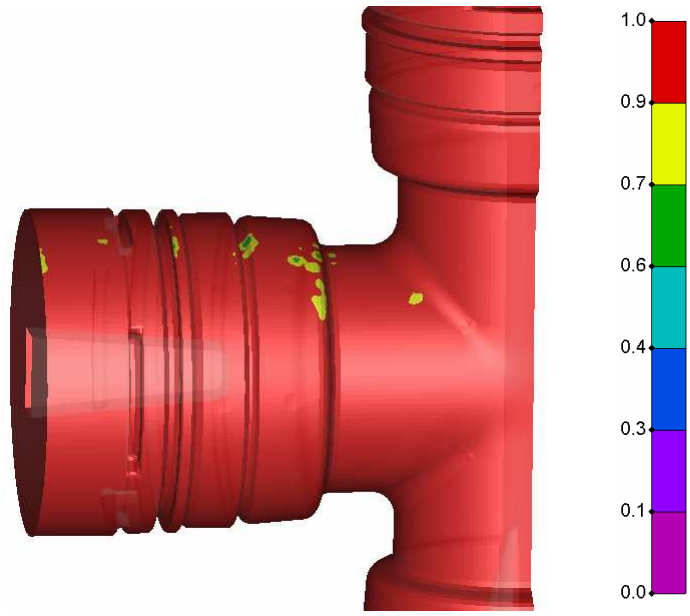


0,034 s | 0,058 s | 0,081 s



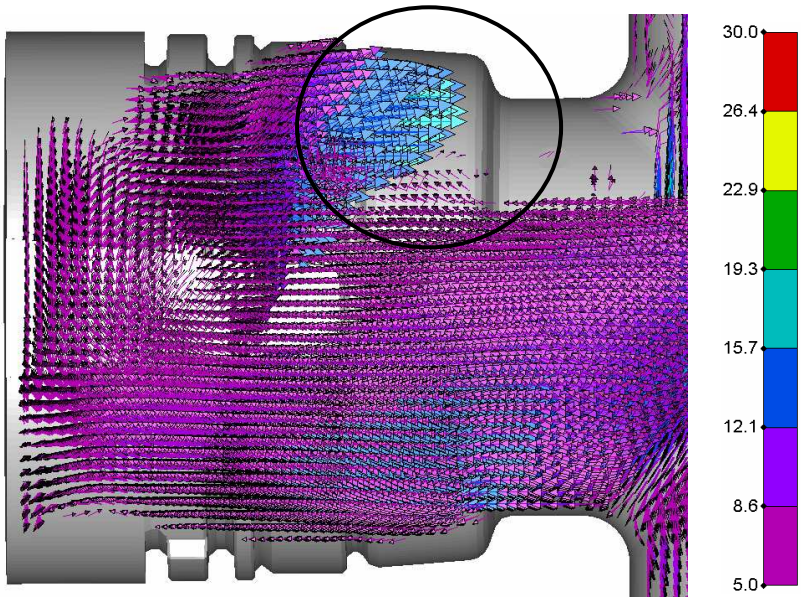
0,111 s | 0,126 s | 0,141 s

Čas na konci vstřelení je 0,156 s. Vyskytující se vady (**obr. 4.13**) už nejsou tak velké, spíše drobné a povrchové, ale jejich rozsah je pořád velký.



Obr. 4.13 *Zaplnění po vstřelování*

Na **obr. 4.14** je v řezu znázorněn pohyb vektorů rychlosti ke konci vstřelování. Částice písku se vracejí zpět směrem ke středu jádra a narážejí do míst, kde se vady vyskytují. V těchto místech dochází k vířivému proudění, vznikají zde místa s uzavřeným vzduchem a proto se zde písek ideálně nezaplní. Rychlost částic se pohybuje okolo 20 m/s.

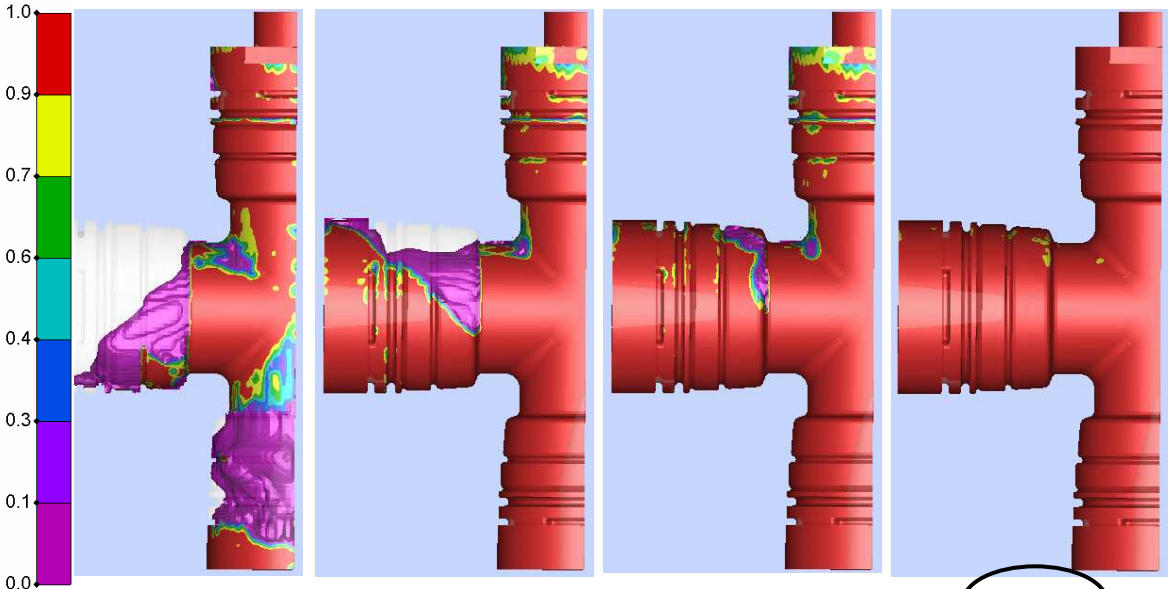


Obr. 4.14 *Vektory rychlosti*

4.4.3 Změna průměru zrna písku

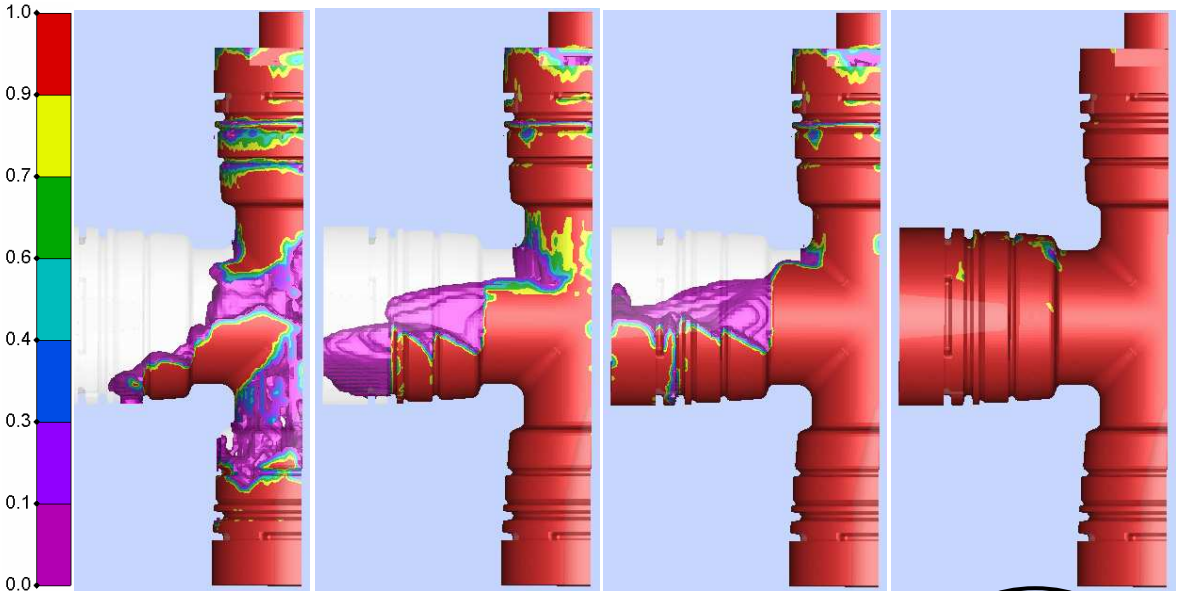
Firma JMA používá k výrobě jader ještě jednu pískovou směs, která se vyznačuje jemnějším průměrem zrna.

Na horních obrázcích je průběh plnění pro pískovou směs se středním průměrem zrna **$d_{stř}$=0,27 mm**.



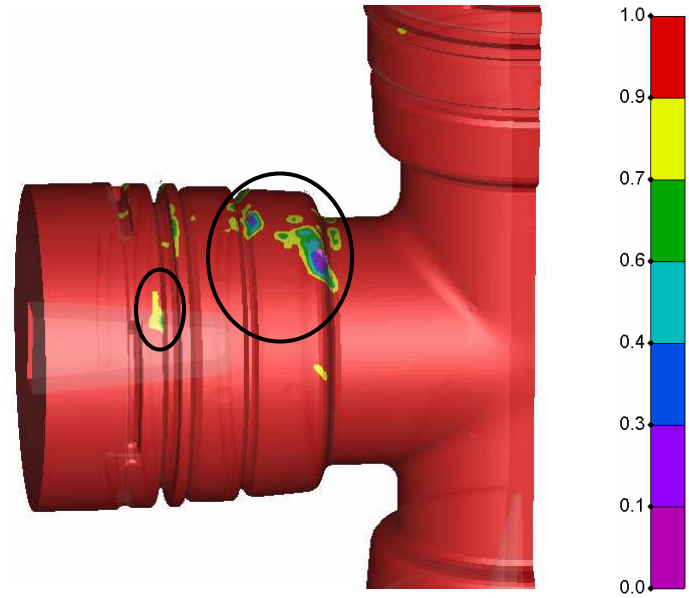
0,081 s | 0,126 s | 0,141 s | **0,156 s**

Na dolních obrázcích je směs se středním průměrem zrna **$d_{stř}$=0,25 mm**.



0,086 s | 0,125 s | 0,144 s | **0,200 s**

Přesto že se může zdát menší průměr zrna jako dobrá varianta pro lepší vstřelení směsi, simulace ukazuje přesný opak (**obr. 4.15**), pokud se jedná o tento typ jádra. Rozdíl času vstřelování je zanedbatelný, ale z hlediska velikosti a výskytu vad se tato změna jeví jako špatná.



Obr. 4.15 *Zaplnění po vstřelování*

Tato změna byla vyzkoušena a pro porovnání je přiložen **obr. 4.16.** Na pravém jádře nebyly viditelné žádné vady jako v simulaci. Především byla poškozena čela jádra. Jako hlavní příčinou může být nedostatečné profouknutí směsi, kvůli menšímu průměru zrna.

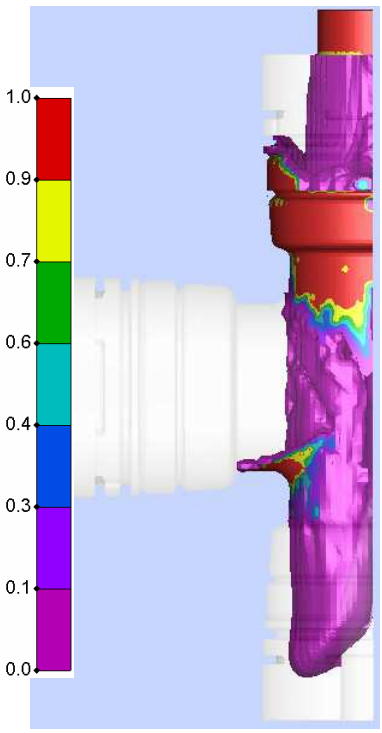


Obr. 4.16 *Jádro*

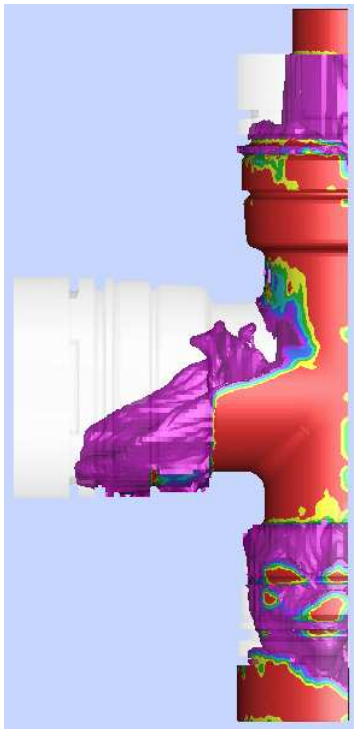
4.5 Simulace vstřelení třetí varianty

Aby se směs lépe dostala do všech míst v jaderníku zvýšil se vstřelovací tlak.

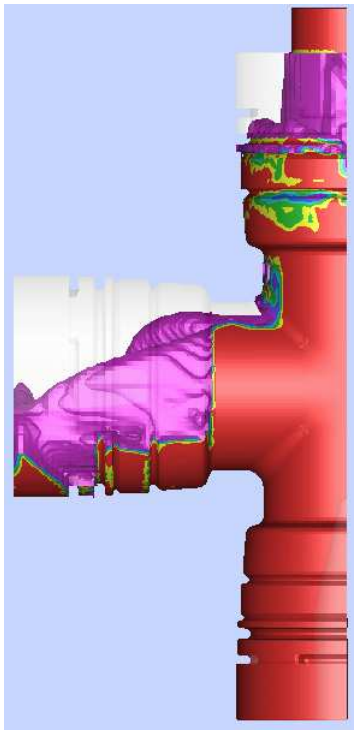
4.5.1 Průběh simulace



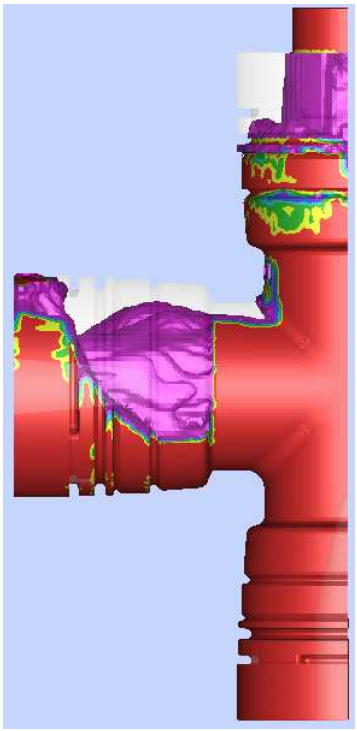
0,030 s



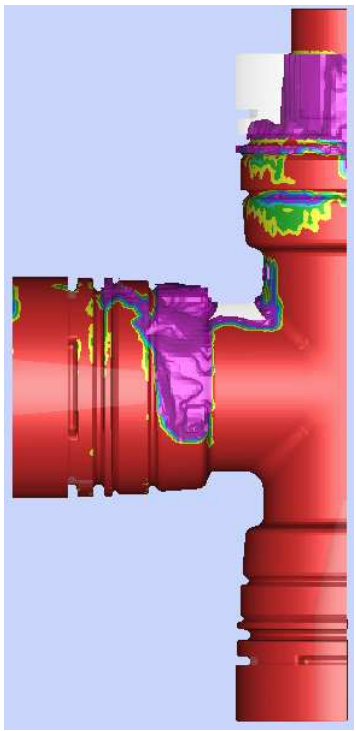
0,058 s



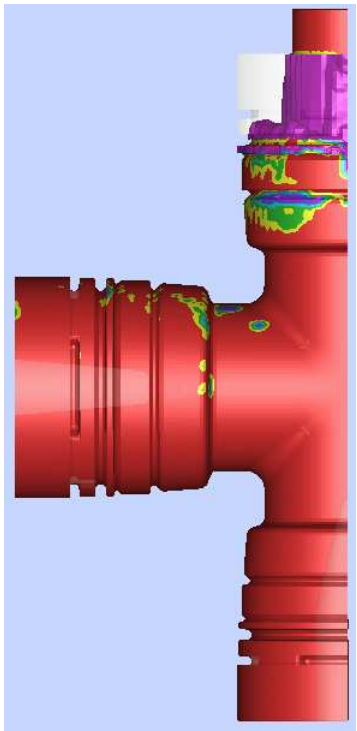
0,085 s



0,099 s

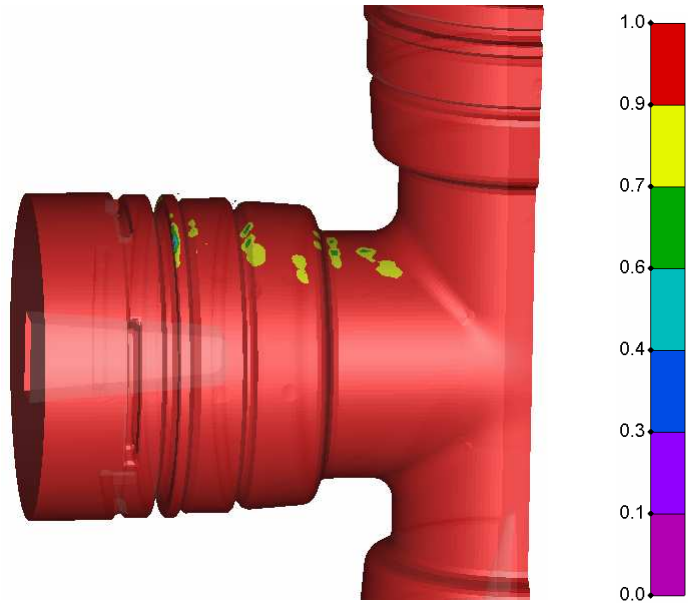


0,113 s



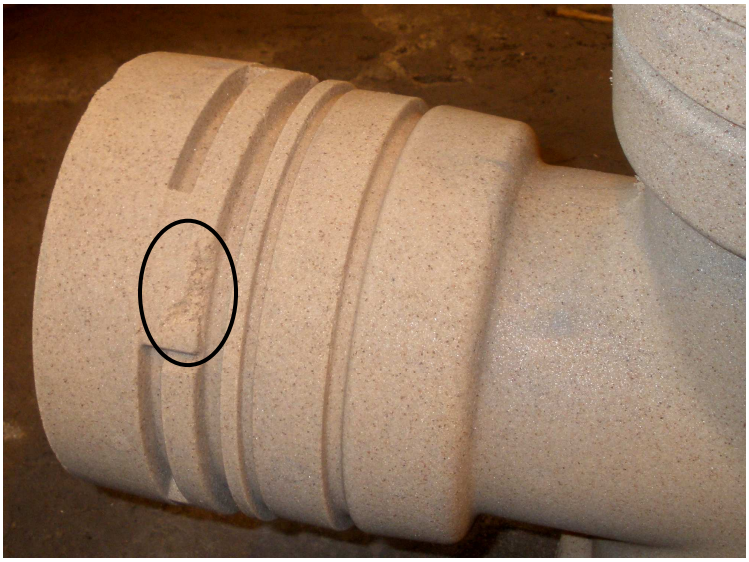
0,127 s

Čas na konci vstřelení je 0,141 s. **Obr. 4.17** přesto dokládá menší povrchové vady.



Obr. 4.17 *Zaplnění po vstřelování*

U jádra vstřeleného větším tlakem byly i přesto vady vidět na některých místech - viz **obr. 4.18**.



Obr. 4.18 *Jádro*

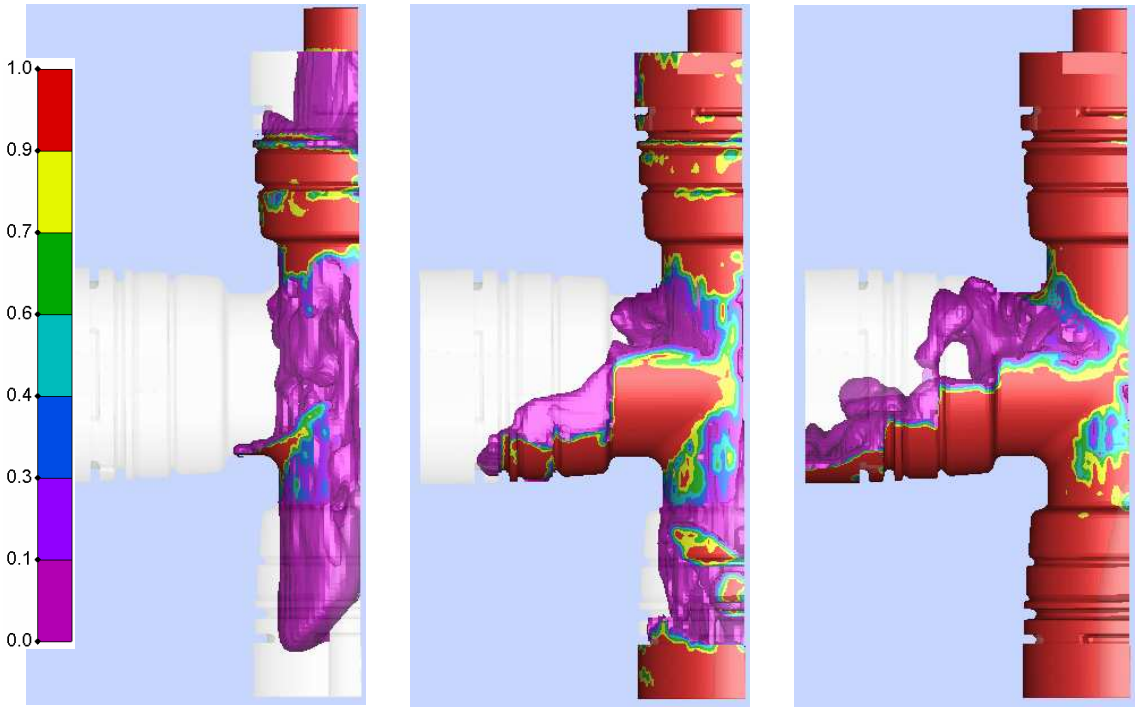
4.5.2 Počáteční parametry

Vstřelovací tlak:	5 bar
Propustnost sítek:	30 %

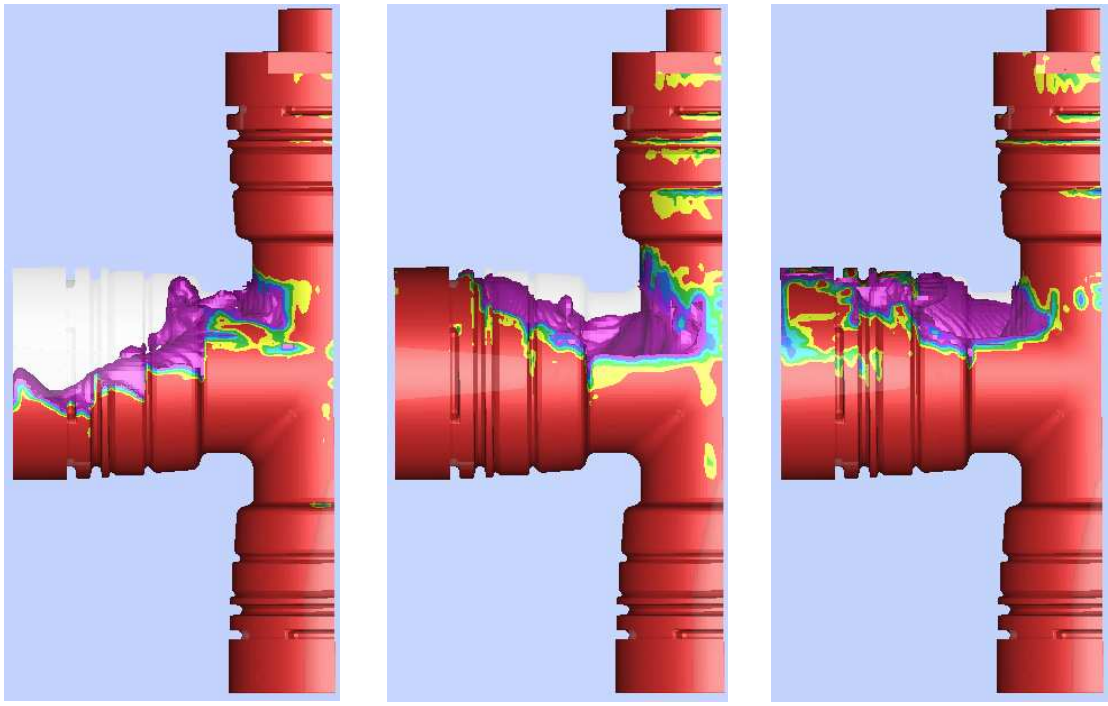
4.6 Simulace vstřelení čtvrté varianty

Tato varianta byla vyzkoušena jako návrh a předpoklad pro zdokonalení všech předchozích pokusů tím, že se změnila velikost propustnosti u některých sítek.

4.6.1 Průběh simulace

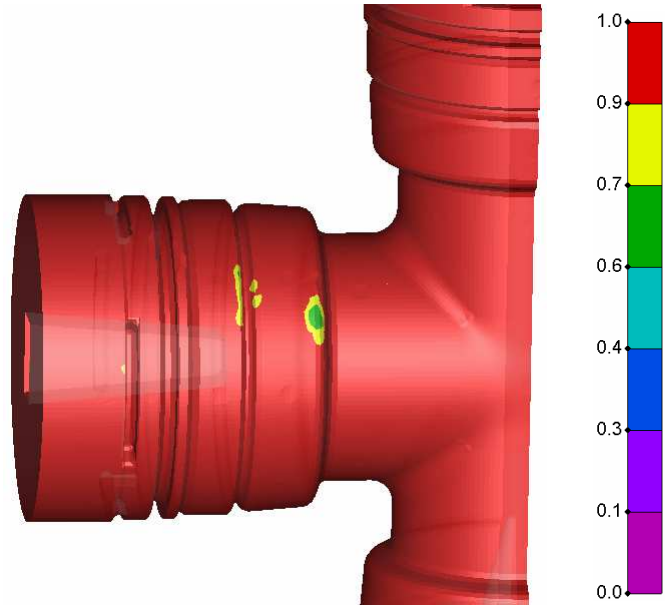


0,034 s | 0,068 s | 0,121 s



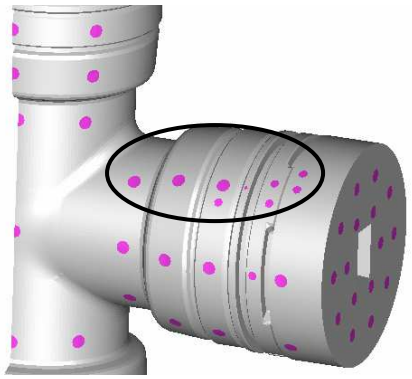
0,146 s | 0,174 s | 0,189 s

Na obr. **4.19** jde pozorovat, že změny jsou oproti předchozím verzím znatelné. Celkový čas na vstřelení je podle vypočtené simulace 0,203 s. To je zatím nejvíce z předchozích simulací, ale rozdíl je přesto minimální. Na druhou stranu to může být způsobeno jiným charakterem plnění směsi.



Obr. 4.19 *Zaplnění po vstřelování*

Protože se u dosavadních simulovaných verzí byly vady skoro na stejném místě u sítek, vyznačených na **obr. 4.20,** se zvýšila jejich propustnost z 30 % na 70 %. Tím se chtělo dokázat, jestli u tohoto jádra má tato změna parametru výrazný vliv nebo ne.



Obr. 4.20 *Rozmístění sítek*

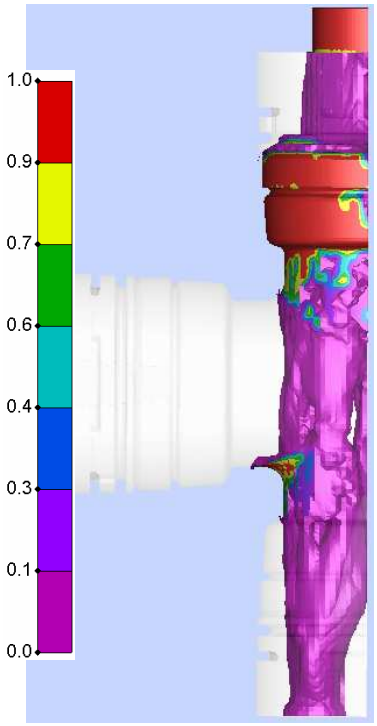
4.6.2 Počáteční parametry

Vstřelovací tlak:	4 bar
Propustnost označených sítek:	70 %
Propustnost ostatních sítek:	30 %

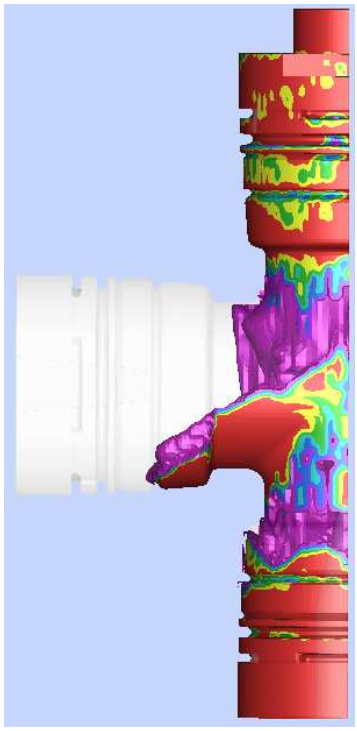
4.7 Simulace vstřelení páté varianty

Poslední varianta byla vyzkoušena jako další možné řešení. Jednalo by se o jiný typ směsi, která se vyznačuje nižší dynamickou viskozitu.

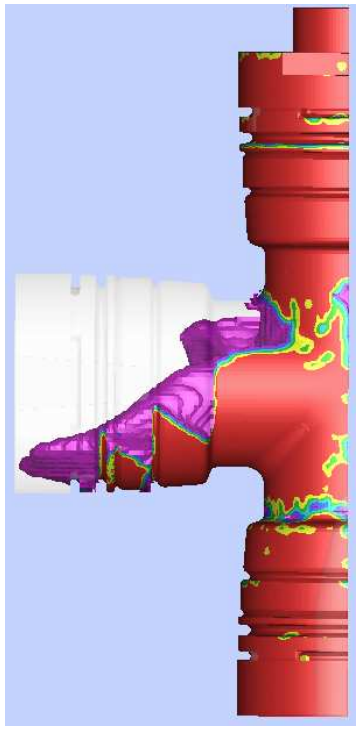
4.7.1 Průběh simulace



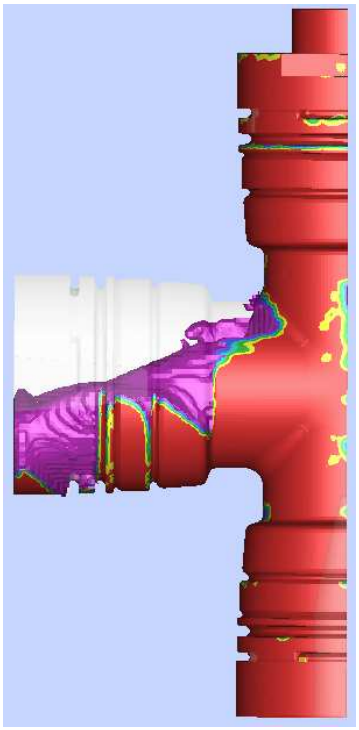
0,033 s



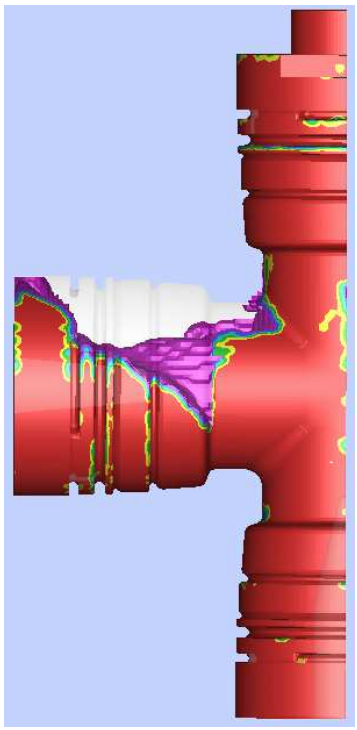
0,106 s



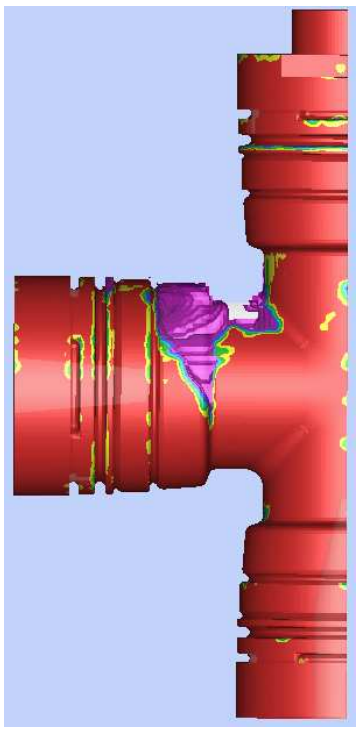
0,140 s



0,155 s

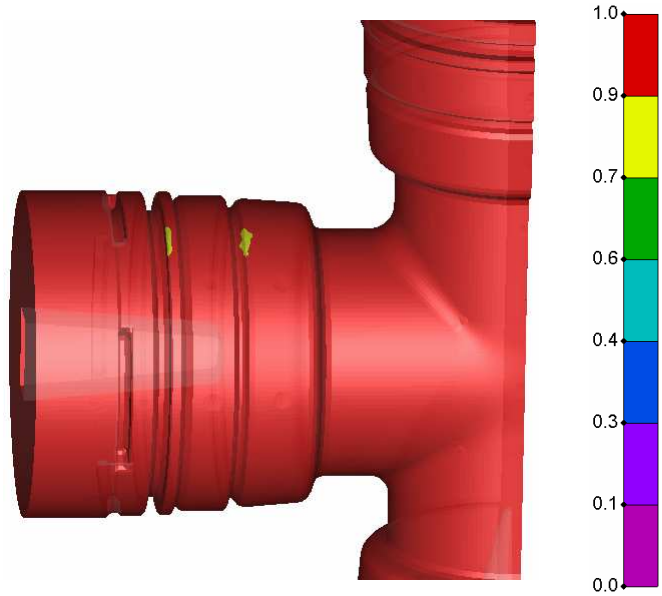


0,170 s



0,185 s

Na **obr. 4.21** je ukázáno jak se směs zaplnila i do problematických míst. Doba za kterou proběhlo vstřelování je 0,199 s.



Obr. 4.21 *Zaplnění po vstřelování*

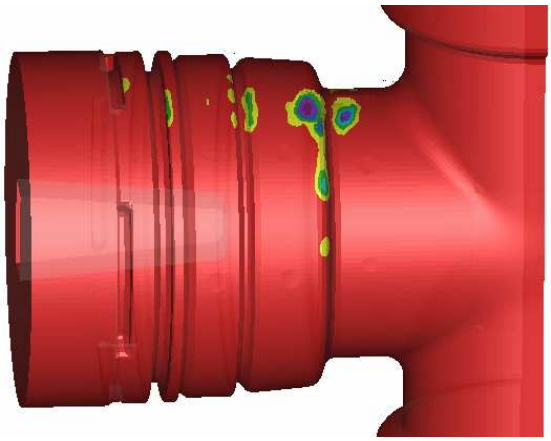
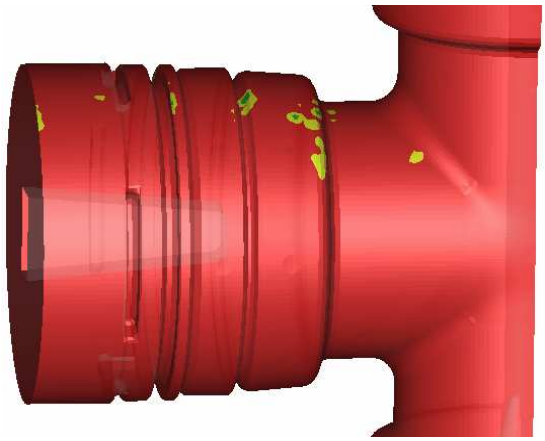
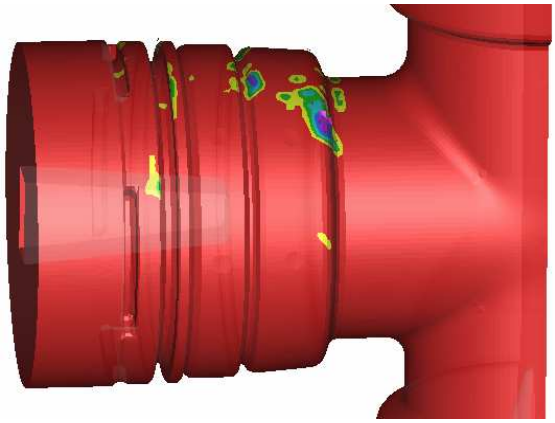
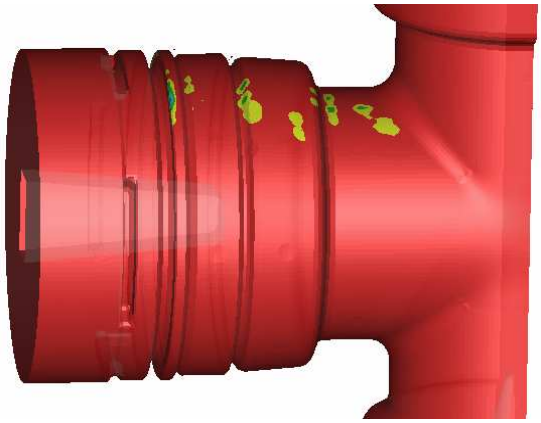
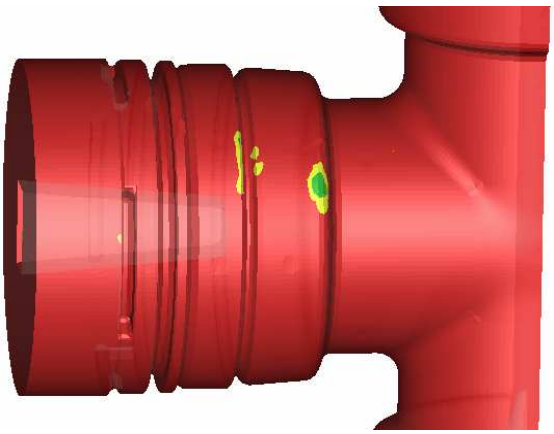
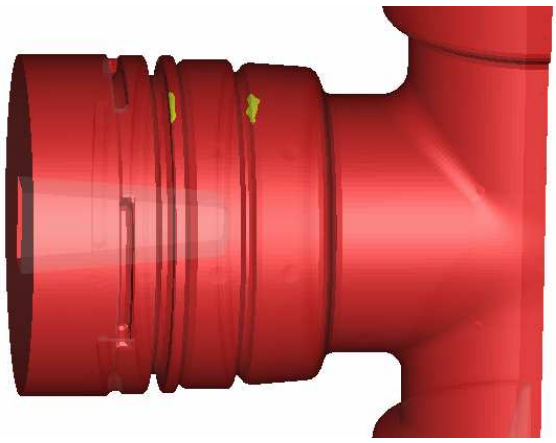
Tato varianta by se dala označit jako jeden z nejlepších návrhů. Do výpočtů byla zadefinovaná směs s celkově nižší dynamickou viskozitou, kterou kolegové z USA testovali právě v programu QuikCAST k těmto účelům. Tedy k dosažení lepších výsledků během vstřelování.

4.7.2 Počáteční parametry

Vstřelovací tlak:	4 bar
Propustnost sítek:	30 %
First parameter for sand viskosity:	10 kg/m.s
Second parameter for sand viskosity:	40 kg/m.s

4.8 Porovnání simulovaných verzí

Tab. 4.1 *Výsledky a vývoj simulovaných verzí*

	
Původní varianta - *vstřelovací tlak 4 bar, propustnost sítek 30 %*	Druhá varianta - *změna sítek a přidání odlehčovacího trnu*
	
Druhá varianta - *změna na menší průměr zrna d_{str}=0,25 mm*	Třetí varianta - *zvýšení vstřelovacího tlaku na 5 bar*
	
Čtvrtá varianta - *změna propustnosti vybraných sítek na 70 %*	Pátá varianta - *změna směsi s menší dynamickou viskozitou*

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo analyzovat vady, které vznikly během vstřelování pískového jádra vyráběného ve firmě JMA v Hodoníně. Dalším cílem bylo navržení opatření pro jejich odstranění a najít případná zlepšení. Tyto cíle se podařilo splnit.

Na začátku experimentální části v podkapitole 4.1 se zkoumalo, které vstupní parametry mají vliv na simulaci vstřelování. Velikost vstřelovacího tlaku má určitě jeden z největších vlivů na samotný charakter plnění, ale také na zhutnění směsi ještě před vytvrzením. Viditelná změna nastane u jiné velikosti jader. U menších jader nebude mít vliv tlaku takový velký rozdíl, jako při výrobě velkých a složitých jader. U použití odvzdušňovacích sítek je nutno dodat, že malé zvýšení nebo snížení propustnosti sítek na konečný výsledek v podstatě nemá výrazný vliv, jak se později ukázalo. A to platí hlavně u malých jader, protože při vstřelovacím tlaku, např. 4 bar se jaderník zaplní do několika setin vteřiny a je jedno, jestli má sítko propustnost 20 % nebo 40 %. U hustoty písku platí téměř to samé co u sítek. Drsnost povrchu má bezpochyby vliv na charakter plnění. Po dokonale hladkém povrchu jaderníku bude směs lépe klouzat a snadněji ho vyplní. Velikost průměru pískového zrna má rovněž vliv pouze u větších jader. V dílčí podkapitole 4.4.3 simulace prezentuje, že směs s menším průměrem zrna se plní výrazně jiným způsobem, než směs s větším průměrem zrna. Změna viskozity se ukázala být také jako jeden z velkých vlivů při simulaci. Při zvýšení jednoho z parametrů v materiálové databázi programu pod názvem „First parameter for sand viskosity“ (μ_0), který je zahrnutý do výpočtu vstřelování v rovnici (3.1) se zvýší dynamická viskozita a směs se chová jako kdyby byla brzděna. Naopak při zvýšení parametru „Second parameter for sand viskosity“ (μ_∞) se dynamická viskozita zmenší a směs je jakoby tekutější. Tato vlastnost bude rozhodující u složitých jader, kde se směs dostává daleko od vstřelovací hlavy a hrozí nedostatečné zaplnění.

Jádro od firmy JMA, na kterém se simulace prováděla se rozměrově může zařadit mezi velké. Hledala se příčina, proč došlo k tak rozsáhlým vadám (**obr. 4.7**). Je zřejmé, že chyba nenastala při profukování plynem, ale již při vstřelování. Na konci plnění se právě v místech výskytu vad uzavřel vzduch a nebyl schopen sítky uniknout ven z jaderníku. Další příčina by mohla být ta, že jádro se od svého středu rozšiřuje a navíc má po obvodu několik drážek a proto se celkově hůře zaplňuje. Podobné vady jsou vidět i na simulaci. Proto se provedla úprava sítek v okolí těch míst, která byla nedovstřelená, jak je popsáno v podkapitole 4.4. Použití jemnější směsi nepřineslo žádné zlepšení. Na čelních stranách jádra nebyla ve skutečnosti

směs řádně vytvrzena a proto se rozpadla hned po vyjmutí z jaderníku (**obr. 4.16**). Zde naznačuje simulace jiný výsledek, než který je v realitě.

U třetí varianty - viz podkapitola 4.5 se zvedl vstřelovací tlak ze 4 bar na 5 bar. Podle simulace by se měly vady vyskytovat ve stejných místech, která jsou uvedena v předchozím případě. Jen by měla být v menším rozsahu. Ve skutečnosti se vady vyskytovaly na jiných místech (**obr. 4.18**).

Čtvrtá varianta - viz podkapitola 4.6 může sloužit jako návrh pro zlepšení. Do kritických míst se uvažovala sítka s propustností 70 % z původních 30 %. I když podle simulace změny nejsou tak velké, přesto se zlepšení projevilo. Tato vysoká propustnost byla zvolena proto, protože se prokázalo, že při tlaku 4 bar by propustnost (např. 50 %) nepřinesla téměř žádný výrazný rozdíl.

Pátá varianta - viz podkapitola 4.7 je vůbec nejlepší možnost při vstřelování u daného jádra, vyplývá to z **tab. 4.1.** Při simulaci se do výpočtů zadefinovala směs s nižší dynamickou viskozitou. Tu doporučili kolegové z USA, se kterou již simulace zkoušeli a zjistili, že pro podmínky vstřelování je vhodnější, než směs v programu QuikCAST. Další návrh je tedy ten, aby se použila taková směs, která je použita v této verzi.

U předchozích výsledků ze simulace a těch které se uskutečnily, může být rozhodující faktor na vzájemnou nepřesnost ten, že při výpočtu simulace se proces zastavil vždy o něco dříve než 100 %.

Aby se simulace více přiblížila realitě, bude nutné do budoucna zajistit řadu experimentálních měření. Vhodným způsobem by bylo použití několik různých zkušebních jaderníků, na kterých by se testovaly různé parametry jako např. vstřelovací tlaky, pozice sítek, propustnost sítek, atd. Dále by bylo vhodné, aby se nějakým způsobem měřily viskozity u jednotlivých směsí. V případě, že by jaderník byl z jedné strany uzavřen průhlednou stěnou z plexiskla, tak by bylo možné snímat a porovnávat charakter proudění pískové směsi, případně při obarvení plynu, rovnou jeho průchod pískem. V tomto případě by však bylo nutné využít nějaké vysokorychlostní kamery, tak aby se dal zachytit rychlý průběh vstřelování.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KRUTIŠ, V. Trendy a vývoj v oblasti numerických simulací. Slévárenství. Říjen 2004, roč. LII, č. 10, s. 408-410. ISSN 0037-6825.
2. CHRÁST, Jaroslav. *Slévárenská zařízení*. Brno : Cerm, 2006. Zařízení jaderen, s. 197-212.
3. REEK, Regina. Optimierung des Füll und Härtungsvorgangs von Giessereisandkernen durch 3-D-Simulation der Strömungsvorgänge. *Giesserei forschung*. 2005, 3, s. 2-14.
4. BONOLLO, F. and ODORIZZI, S. Numerical Simulation of Foundry Processes. 1st ed. Padova: S.G.E., 2001. 264 p. ISBN 88-86281-63-3.
5. *Stefanmichna.com* [online]. 30.5.2007 [cit. 2010-03-22]. Počítačové simulační programy pro odlévání materiálu – jako moderní nástroj pro získání kvalitních odlitků. Dostupné z WWW: <http://www.stefanmichna.com/download/progresivni-technologie/pocitacove_simulacni_programy.pdf>.
6. KRUTIŠ, Vladimír; KUZMA, Zbyněk. Numerická simulace ve slévárenské technologii. *Mmspektrum.com* [online]. 1.9.2009, 10, [cit. 2010-02-06]. Dostupný z WWW: <http://www.mmspektrum.com/clanek/numericka-simulace-ve-slevarenske-technologii>.
7. LAMY, Suzanne. Numerical simulation of core manufacturing including sand blowing and gassing. Prezentace ESI Group. 2006.
8. LEFEBVRE, Dominique, et al. Development and use of simulation in the design of blown cores and moulds. *Foundry Tr.J.*. January/February 2005, 3621, s. 17-20.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
D	[$m^2.s^{-1}$]	Difúzní napětí
d	[mm]	Průměr zrna
FDM	-	Finite diference method (metoda konečných diferencí)
FEM	-	Finite element method (metoda konečných prvků)
FVM	-	Finite volume method (metoda konečných objemů)
k	-	Faktor propustnosti sítka
K	[$g.m^2.24h$]	Prodyšnost
P	[MPa]	Tlaková ztráta formou, tlak plynu
r	[$J.K^{-1}.mol^{-1}$]	Molární konstanta
S	[s^{-1}]	Faktor sklonu viskozity
v	[$m.s^{-1}$]	Vektor rychlosti, rychlost proudění plynu
γ	[s^{-1}]	Velikost smykové rychlosti
ε	-	Pórovitost
λ	[$Kg.s^{-1}$]	Faktor zhutnění
μ	[$N.s.m^{-2}$]	Dynamická viskozita
μ_∞	[Pa.s]	Viskozita při vysoké smykové rychlosti
μ_0	[Pa.s]	Viskozita při nulové smykové rychlosti
ρ	[$Kg.m^{-3}$]	Hustota směsi, aktivního plynu
ω_A	-	Hmotnostní zlomek aktivní látky