

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie

**RACIONALIZACE VÝROBY ODLITKU
TĚLESA KONÍKU**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor:

David Jelínek

Studijní obor:

Výrobní a materiálové inženýrství

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro **Bc. Davida JELÍNKA**

Program: Strojní inženýrství

Obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Název: Racionalizace výroby odlitku tělesa koníku

Název anglicky: Rationalization of tailstock body casting production

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Vady v odlitcích z LKG a LLG
3. Možnosti analýz vad v SW MAGMA
4. Rozbor technologičnosti zadaného odlitku
5. Úprava stávající technologie za použití simulačního SW
6. Zavedení nové technologie do výroby
7. Srovnání původní a nové varianty, kontrola odlitku
8. Závěr

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

Konzultant:

Datum zadání diplomové práce: 10. 4. 2015

Termín odevzdání diplomové práce: 19. 6. 2015

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

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

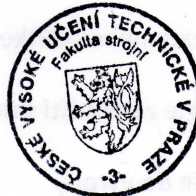
Zadání diplomové práce převzal dne: 21. 4. 2015

.....
J. Čermák

Student

.....
A. Herman

Vedoucí ústavu



.....
A. Herman

Děkan

V Praze

dne 10. 4. 2015

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je navrhnout novou optimalizovanou technologii pro výrobu odlitku tělesa koníku za použití simulačního softwaru MAGMA⁵. Úvod práce je věnován rozboru některých vad odlitků. V další části diplomové práce je uděláno krátké seznámení se simulačním softwarem MAGMA⁵. První kapitola v praktické části práce je věnována rozboru technologičnosti odlitku a rozboru původní technologie. Další kapitola je zaměřena na návrh optimalizované technologie výroby uvažovaného odlitku. V závěru práce je porovnání původní a optimalizované technologie.

Klíčová slova:

Vady odlitku, MAGMA, simulace, optimalizace, litina s lupínkovým grafitem, technologie lití do pískové formy.

ABSTRACT

The aim of this Diploma Thesis is to design new optimized technology for a tailstock body casting production, with the use of simulation software MAGMA⁵. The introduction is devoted to analysis of some castings defects. In the next part of Diploma thesis the short introduction with simulation software MAGMA⁵ is made. First chapter of practical part of the thesis is devoted to analysis technologicity of the casting and analysis the initial casting design. Next chapter is focused on design of optimized technology for tasked casting production. In conclusion of thesis is comparison the initial casting design and the optimized design.

Key words:

Castings defects, MAGMA, simulation, optimization, grey iron, sand mould technology.

Bibliografická citace

JELÍNEK, David. *Racionalizace výroby odlitku tělesa koniku*. Praha, 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Aleš Herman, PhD.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Racionalizace výroby odlitku tělesa koníku“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Aleše Hermana, Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne 7.6.2015

.....

David Jelínek

Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří mě podporovali při tvorbě mé diplomové práce a poskytli mi informace, které jsem mohl při tvorbě své práce využít. Mé poděkování patří mému vedoucímu diplomové práce Ing. Aleši Hermanovi Ph.D., který se ochotně ujal vedení mé práce a v případě potřeby mi byl schopný poskytnout potřebné informace. Rád bych také poděkoval technologům ze společnosti MAS KOVOSVIT a.s., kteří mě ochotně seznámili s jejich společností a provozem, což mi velice pomohlo při návrhu nové technologie pro můj řešený odlitek. Mé největší poděkování patří panu Dr. Ing. Petru Kotasovi a Ing. Michalu Špačkovi ze společnosti MAGMA GmbH, kteří mi nabídli možnost tvorby mé práce, proškolili mne v práci se simulačním softwarem MAGMA⁵, který jsem následně ve své práci využíval a poskytli mi vybavení a velice přívětivé prostředí pro tvorbu mých simulací. Také mi poskytovali podporu a v případě problémů při simulacích okamžitou pomoc. Poděkování patří i mé rodině za jejich neustálou podporu při mém studiu.

OBSAH

1. ÚVOD	9
1.1. TECHNOLOGICKÉ ZAŘÍZENÍ SLÉVÁRNÝ	9
2. VADY V ODLITCÍCH Z LKG A LLG	12
2.1. NEZABĚHNUTÍ A ZAVALENINY	17
2.2. NEDOLITÍ	21
2.3. VYTEČENÝ KOV	22
2.4. DRSNÝ POVRCH	24
2.5. POVRCHOVÉ PŘIPEČENINY	27
2.6. HLUBOKÉ PŘIPEČENINY - ZAPEČENINY	27
2.7. BUBLINY	31
2.8. STAŽENINY	34
2.9. ZÁVĚR	37
3. MOŽNOSTI ANALÝZ VAD V SW MAGMA⁵	38
3.1. OKNO PROJEKTŮ	39
3.2. GEOMETRIE	39
3.3. TVORBA VÝPOČETNÍ SÍTĚ	40
3.4. NASTAVENÍ PARAMETRŮ SIMULACE	42
3.5. VYHODNOCOVÁNÍ VÝSLEDKŮ SIMULACE	42
4. ROZBOR TECHNOLOGIČNOSTI ZADANÉHO ODLITKU	52
4.1. ZÁKLADNÍ DATA K ZADANÉMU ODLITKU	52
4.2. ROZBOR PŮVODNÍ TECHNOLOGIE	60
4.3. PROBLÉMY PŮVODNÍ TECHNOLOGIE	62
4.4. SIMULACE PŮVODNÍ TECHNOLOGIE	65
5. ÚPRAVA STÁVAJÍCÍ TECHNOLOGIE ZA POUŽITÍ SIMULAČNÍHO SW	74

5.1. VARIANTA Č. 1.....	74
5.2. VARIANTA Č. 2.....	87
5.3. VARIANTA Č. 3.....	93
5.4. VARIANTA Č. 4.....	101
5.5. VARIANTA Č. 5.....	108
5.6. VARIANTA Č. 6.....	114
5.7. VOLBA VARIANTY PRO VÝROBU	125
6. ZAVEDENÍ NOVÉ TECHNOLOGIE ODLITKU TĚLESA KONÍKU DO VÝROBY.....	126
6.1. TVORBA VÝKRESOVÉ DOKUMENTACE.....	126
6.2. VÝROBA MODELOVÉ DESKY.....	127
6.3. ZAFORMOVÁNÍ ODLITKU	128
6.4. VÝROBA ODLITKU.....	130
6.5. SHRUTÍ.....	133
7. SROVNÁNÍ PŮVODNÍ A NOVÉ VARIANTY, KOTROLA ODLITKU	134
7.1. TECHNOLOGICKÉ SROVNÁNÍ.....	134
7.2. EKONOMICKÉ SROVNÁNÍ.....	138
8. ZÁVĚR.....	140
POUŽITÁ LITERATURA:.....	142
PŘÍLOHA	143
TABULKA PRŮŘEZŮ ZÁŘEZŮ.....	143
NÁČRTY JEDNOTLIVÝCH VARIANT	143

1. ÚVOD

Hlavním cílem mé diplomové práce bylo navrhnout optimalizovanou technologii výroby pro zadaný odlitek. Pro verifikaci nově navržených technologií jsem používal simulační software MAGMA⁵ od společnosti MAGMA GmbH.

Diplomovou práci jsem dělal ve spolupráci se společnostmi MAS KOVOSVIT a.s. (dále jen KOVOSVIT) a MAGMA GmbH. Ve společnosti KOVOSVIT mi byl zadán odlitek, u něhož měli problém se zvýšeným počtem vad a chtěli tento problém vyřešit optimalizací jejich stávající technologie. V době, kdy jsem začínal tento problém řešit, uvažovali ve společnosti KOVOSVIT nad pořízením simulačního softwaru do své slévárny. Má práce měla tedy současně sloužit i jako ukázka možností simulačního softwaru MAGMA⁵.

Ve své práci jsem se také zabýval rozborem vad, které se ve slévárenské technologii objevují. Vybral jsem takové hlavní zástupce slévárenských vad, které tvoří velké procento vad ve slévárnách. U těchto vad jsem provedl jejich popis a kroky, jak tyto vady řešit, případně jak předcházet jejich vzniku.

V jedné části práci jsem udělal krátké seznámení se simulačním softwarem MAGMA⁵, kde jsem popsal prostředí tohoto softwaru a také některé kroky, jak je možné přistupovat při analýze vad.

1.1. Technologické zařízení slévárny

V úvodu by bylo vhodné zmínit, jaké jsou technologické možnosti slévárny, jaké technologie využívá při formování a při výrobě pískových jader a jaké pískové formovací směsi se ve slévárně využívají.

1.1.1. Příprava kovu

Ve slévárně společnosti KOVOSVIT odlévají odlitky výhradně z litin. A to buď litinu s lupínkovým grafitem (EN GJL 150 - 350) nebo litinu s kuličkovým grafitem (EN GJS 350 - 600) v různých modifikacích chemického složení a mechanických vlastností.

Pro tavbu kovu se používají elektrické pece. Roční kapacita tavicích pecí je celkem 12 000 tun LLG a LKG. Ve slévárně je možné odlévat odlitky o hmotnosti od 2 kg do 12 000 kg.^[8]

1.1.2. Příprava formovací směsi

Lehká formovna je vybavena automatickou formovací linkou doplněnou o regeneraci formovací směsi. Pro formování se používá mechanicky vytvrditelná bentonitová směs. Na střední a těžké formovně se formování provádí na ručních linkách, při použití samovytvrzovací furanové směsi.

Základní vlastnosti jednotné bentonitové směsi jsou uvedeny v Tab. 1-1. V prvním řádku jsou uvedeny požadované vlastnosti, ve druhém pak průměrné hodnoty, které byly experimentálně naměřeny. Jak je vidět, většina hodnot se drží v předepsaných mezích. Pouze hodnota spěchovatelnosti je vyšší, než je požadováno. Vyšší míra spěchovatelnosti může vést ke snížení prodyšnosti formy. Průměr naměřených hodnot je za relativně krátké období a nepokrývá tedy různé výkyvy a extrémy, ke kterým může docházet.

Tab. 1-1: Základní vlastnosti bentonitové formovací směsi

	Vlhkost [%]	Spěchovatelnost [%]	Pevnost v tlaku [kPa/cm ²]	Prodyšnost [j.p.SI]	Bentonit [%]
Požadováno	3,2 - 4,0	35 ± 3	165 - 230	> 170	
Naměřeno	3,4	43	199	175	8

1.1.3. Příprava směsi pro výrobu jader

Ve slévárně společnosti KOVOSVIT používají pro výrobu jader dvě zpracovatelské technologie. První technologií je ruční výroba jader a druhou je výroba jader na vstřelovacích jádrařských strojích.

Technologie COLD BOX

Technologií COLD BOX se jádra vyrábí na vstřelovacích jádrařských strojích. Tato metoda spočívá v chemickém vytvrzování směsi resolové pryskyřice a ostřiva za pomoci aktivátoru a katalyzátoru. Jako aktivátor se používají kyseliny, například amin.^[2]

Předem namíchaná směs ostřiva s pryskyřicí je pneumaticky transportována do zásobníku kontimisiče, který je umístěn na vstřelovacím stroji. Do směsi je nadávkována kyselina, která je v objemu jádrové směsi rychle rozmíchána a bezprostředně "vstřelena" do studeného jaderníku.^[1] Katalyzátor se v kapalném stavu přivádí do zplyňovací komory, zde dojde ke zplynění kapalného roztoku a k jeho zahřátí na cca 95°C. Plyn se následně protlačí jaderníkem se směsí pryskyřice a aktivátoru a tím dojde k vytvrzení směsi.

Pro teplotně velmi namáhaná jádra se do formovacích směsí mohou přidávat proti výronkové přísady. Díky těmto přísadám se stává jádro pružnější a při teplem zatěžování

nedochází k praskání jader, které je způsobeno teplenou roztažností zrn ve formovací směsi.

CT směs

Jádrová CT směs je směs s vodním sklem a křemenným ostřivem, vytvrzená profukováním CO₂. Do směsi se mohou dále přidávat složky, které podporují rozpadavost směsi po odlití. Jde například o asfaltové pojivo, bauxit nebo sacharidy, ap.^[2]

Jádra z CT směsi se vyrábí na ručních pracovištích.

1.1.4. Ochrana jader

Jádra používáme v případě, kdy potřebuje odlít složitější vnější tvar, které by nebylo možné vzhledem k pevnosti formy odformovat nebo v případě předlévání dutin a děr. Jádra tedy bývají značně tepelně zatěžována. Tato zvýšená teplená zátěž může mít za následek degradaci mechanických vlastností jádrové směsi i její soudržnosti. Následkem této degradace dochází k napečení formovací směsi na kov a k vnikání formovací směsi jader do povrchové vrstvy odlitku. Takto zapečená vrstva je obtížně obrobitelná, protože obsahuje velice tvrdé částičky ostřiva, které zvyšují opotřebení obráběcích nástrojů a způsobují vylamování jejich ostří. I v případě, kdy se zapečená plocha neobrábí, zvyšuje se pracnost na její očištění.^[2]

Aby se zabránilo, nebo se alespoň omezil vznik těchto zapečení, nanáší se na jádra ochranné nátěry. Tyto ochranné nátěry ucpávají mezizrnové prostory a tvoří mezivrstvu mezi odlitkem a formovacím materiálem. Tím brání před penetrací kovu a zlepšují hladkost odlitků a omezují vznik připečení.^[1] Zároveň mají tyto nátěry nižší tepelnou vodivost a nedochází k tak intenzivnímu přehřívání jádrové směsi. Ochranné nátěry také omezují uvolňování plynu z jader v místě naneseného nátěru. Plyn z jádra nejvíce uniká přes plochy, které nejsou ošetřeny nátěrem. V těchto místech by mělo být provedeno odvodušnění formy, aby mohl plyn volně unikat.

Ve společnosti KOVOSVIT používají pro ochranu jader dva typy ochranných nátěrů:

- alumino - silikátový nátěr: plnivem je směs oxidů Al₂O₃ · SiO₂, tento nátěr se používá pro méně tepelně zatěžovaná jádra,
- zirkonový nátěr: plnivem je zirkonsilikát, jedná se o žáruvzdorný ochranný nátěr, používaný pro vysoce teplotně namáhaná jádra.

V některých případech se na jádra aplikují oba zmíněné nátěry, pro ještě vyšší ochranu jader.

2. VADY V ODLITCÍCH Z LKG A LLG

Výroba odlitků byla na začátku průmyslového rozvoje slévárenství náročným řemeslem a zároveň uměním. V současné době je slévárenství velice obsáhlým vědním oborem, ale výroba odlitků vysoké kvality a spolehlivosti je neméně náročná a složitá. I dnes občas stojíme nad vadným odlitkem bez jednoznačného návodu na řešení. Je to dáno především tím, že vznik většiny slévárenských vad je ovlivněn mnoha proměnnými faktory. Příčiny vzniku vad jsou komplexní a také jejich řešení musí zvažovat všechny technické, organizační, i lidské faktory.^[5]

Ve slévárenské výrobě má obrovský vliv na jakost výsledného odlitku lidský faktor. Lidský faktor vstupuje snad do každého procesu, který je při výrobě odlitku prováděn. Počínaje technologem, který navrhne technologické parametry, vtokovou soustavu apod., konče brusičem, který provádí apretaci odlitku. Na pracovníky jsou tedy kladeny poměrně vysoké požadavky na jejich znalosti a zkušenosti v dané oblasti a na zodpovědný přístup k jejich práci. V těchto požadavcích na pracovníky ale mohou vznikat poměrně velké problémy. Slévárenství nepatří mezi pracovní přetěžující obory. Čím dál méně lidí je ochotno v obtížném pracovním prostředí vykonávat fyzicky i technicky náročnou práci, která zároveň nebývá moc dobře finančně ohodnocena. Z toho plyne, že na pozicích, jako je jádrař, formíř, slévač, nebo brusič, mohou pracovat málo kvalifikovaní lidé, kteří byli pouze seznámeni s náplní jejich práce, ale už neznají další souvislosti s procesy navazujícími na jejich práci. Vliv lidského faktoru ve výrobních procesech se dá nicméně snížit využitím mechanizace a automatizace jednotlivých procesů.

S rozvojem výpočetní techniky jde ruku v ruce i rozvoj softwarů, pomáhajících zvýšit efektivitu výrobních procesů. Jedná se o softwary pro tvorbu elektronických 3D dat, kde je možné si prohlédnout odlitek ještě před tím, než je fyzicky vyroben a analyzovat místa, kde by mohlo docházet k problémům a tato místa případně upravit. Obrovským pomocníkem technologů mohou být simulační softwary. Díky těmto softwarům může technolog sledovat celý proces odlévání ještě před tím, než se začne vyrábět modelové zařízení. Analýzou výsledků simulace zjistí problémová místa a může provést úpravu technologie. Modelové zařízení se následně vyrobí pro návrh optimalizovaný pomocí tohoto softwaru. Díky tomu se značně sníží riziko vzniku vad a nebude nutné upravovat modelové zařízení z důvodu nevhodně navržené technologie. Také bychom měli docílit snížení nákladů na odlití zkušební série, protože se předpokládá odlévání pouze jedné zkušební série. Využívání simulačního softwaru má ale také svá úskalí. Tímto úskalím je

již zmiňovaný, lidský faktor. Technolog může špatně zadat vstupní data pro simulaci nebo nepřesně vyhodnotit výsledky simulace, přehlédnout nějaký problém, a i když ve výrobě dodrží všechny předepsané technologické parametry, budou se odlévat neshodné odlitky. Na druhé straně stojí přesně opačný případ. Technolog si pomocí simulace vyladí technologii, ale pracovníci ve výrobě nedodrží předepsané podmínky. Formíř například neprovtřá odvzdušňovací kolíky, slévač nedodrží předepsanou minimální lící teplotu a do formy nalije studený kov, apod.

Mimořádně důležité je hodnocení kvality odlitků z hlediska spolehlivého zabezpečení funkce, kterou bude mít ve strojním, chemickém nebo jiném zařízení. V této fázi rozhodování o budoucím odlitku je naprosto nezbytná dobrá spolupráce slévárenského technologa s konstruktérem.^[5]

Odlitek můžeme v zásadě vyrábět v několika stupních kvality:

- v extrémně vysoké kvalitě,
- v předem specifikované, optimální kvalitě,
- v běžné kvalitě.^[5]

Výroba odlitků v extrémně vysoké kvalitě není samozřejmě na závadu funkce, kterou odlitek zabezpečuje. Nicméně každý vyšší kvalitativní stupeň zvyšuje výrobní náklady na odlitek a většinou také jeho materiálovou a energetickou náročnost. Extrémně vysoká kvalita v podstatě znamená zabezpečení každého teplotního uzlu v odlitku, většinou také použití speciální metalurgie, formovacích materiálů, náročnějšího čistírenského zpracování apod. Požadavek na takovou kvalitu musí proto být odůvodněn a nemůže být výsledkem pouhé neznalosti, jistění nebo strachu. Požadavek na extrémně vysokou kvalitu snadno napíšeme do objednávky, draze ji však zajišťujeme a platíme.^[5]

Pod pojmem běžná kvalita většinou chápeme výrobu odlitků podle zvyklostí příslušné slévárny, podle základních platných norem, bez zvláštních přejímek a požadavků. Mezi jednotlivými slévárnami mohou být značné rozdíly. Je tedy velice důležité, před zadáním zakázky, správně a přesně specifikovat technické a dodací podmínky. Vždy je účelnější věnovat více času projednání podmínek výroby odlitků, nežli se dohadovat nad případnými nevyhovujícími dodávkami.^[5]

Při výskytu určité vady na odlitku, sehrává svou významnou roli správné stanovení druhu vady, od kterého pak probíhá další činnost k určení původu vady, ke stanovení příčin a prostředků, k zabránění jejího vzniku.^[5] Pokud tedy dojde k chybnému stanovení druhu vady, můžeme vytvořit sebevíc opatření k jejímu potlačení, ale vzniku vady nezabráníme. S nadsázkou se dá řešení vad v odlitcích přirovnat k léčbě nemocného člověka. Když je

správná diagnóza, povede se pacienta vyléčit. V případě chybné diagnózy, může léčba přivodit další, nové komplikace.

Vadou odlitku rozumíme každou odchylku rozměrů, hmotnosti, vzhledu, struktury, celistvosti, chemického složení nebo vlastností (mechanických a fyzikálních) odlitků od příslušných norem, standardů, výkresů a technických podmínek. Zjišťujeme je vizuálně, měřením, vážením, laboratorními zkouškami a nedestruktivními metodami. Výraz "vada odlitku" má podmíněný význam. Podle ustanovení příslušných norem nebo technických podmínek může být stejná odchylka někdy přípustnou vadou, jindy vadou nepřípustnou, opravitelnou nebo odstranitelnou.^[5]

Nepřípustná vada je odchylka od příslušných norem, nebo sjednaných technických podmínek, kterou nelze odstranit opravou, nebo jejíž oprava je podle dokumentace nepřípustná, protože činí odlitek z funkčního hlediska nepoužitelným.^[5]

Přípustná vada je vada, kterou příslušné normy nebo technické podmínky připouštějí, aniž by požadovaly její odstranění výrobcem odlitku.^[5]

Odstranitelná vada je odchylka na odlitku od příslušných norem nebo technických podmínek, kterou je dovoleno podle těchto předpisů odstranit vhodným způsobem po dohodě s odběratelem odlitku, a to zvláštními úpravami a nepředpokládanými výrobními postupy.^[5]

Vady odlitků mohou být dále zjevné a skryté. Zjevná vada odlitku je vada, kterou je možno zjistit při prohlídce neobrobeného odlitku vizuálně nebo jednoduchými měřidly. Z hlediska polohy na odlitku se jedná převážně o vnější povrchové vady. Skrytá vada odlitku je vada, kterou je možno zjistit až po obrobení odlitku, nebo prorýsováním pomocí vhodných přístrojů či laboratorními zkouškami. Většina skrytých vad jsou vady vnitřní^[5].

V odborné literatuře můžeme najít řadu publikací zabývajících se problematikou analýzy vad odlitků. Tyto publikace ale neslouží jako přímé manuály, jak řešit jednotlivé vady v odlitcích. Jedná se spíše o rozbor jednotlivých vad, příčin jejich vzniku, doplněný o možná opatření k zabránění vzniku jednotlivých vad.

V Tab. 2-1 je uveden seznam tříd, skupin a vad odlitků, jak je uvádí Elbel^[5]. Z tabulky je patrné, že problematika vad odlitků je velice rozsáhlé téma. Vzhledem k rozsahu dané problematiky, se ve své práci zaměřím hlavně na vady, které se objevují u odlitků z materiálů LLG a LKG. To z důvodu, že odlitek, který mi byl zadán, je vyroben z materiálu LLG.

Tab. 2-1: Seznam tříd, skupin a vad odlitků ^[5]

Seznam vad odlitků třídy 100 a 200							
Třída vad		Skupina vad		Druh vad			
Poř. čisl.	Název.	Poř. čisl.	Název	Poř. čisl.	Název		
100	Vady tvaru, rozměrů a hmotnosti	110	Chybějící část odlitku bez lomu	111	Nezaběhnutí		
				112	Nedolití		
				113	Vytečený kov		
				114	Špatná oprava formy		
				115	Přetryskaný odlitek		
				116	Omačkání, potlučení, pohmoždění		
				117	Nesprávně upálený, odřezaný a odbroušený odlitek		
		120	Chybějící část odlitku s lomem	121	Ulomená část odlitku za tepla		
				122	Ulomená část odlitku za studena		
				123	Vyštipnutí		
		130	Nedodržení rozměrů, nesprávný rozměr	131	Špatný model		
				132	Přesazení		
				133	Nevyhovující rozměry		
				134	Zborcení, deformace		
140	Nedodržení hmotnosti odlitku						
200	Vady povrchu	210	Přípečeniny	211	Drsný povrch		
				212	Povrchové přípečeniny		
				213	Hluboké přípečeniny, zapečeniny		
		220	Zálupy	221	Zálupy na horní ploše formy		
				222	Zálup na dně formy		
				223	Zálupové síťoví		
		230	Nárosty	231	Vyboulení		
				232	Odřetí, shrnutí		
				233	Utržení, sesunutí		
				234	Eroze		
		240	Výronky				
		250	Výpotky				
		260	Zatekliny	261	Zatekliny způsobené netěsností formy		
				262	Prasklé jádro		
				263	Prasklá forma		
		270	Nepravidelnosti povrchu odlitku	271	Pomerančová kůra		
				272	Zvrásnění povrchu		
				273	Neštovice místní a čárové		
				274	Okujení, opálení		
				275	Krupičky		
		276	Dolíčková a kanálková koroze				
277	Chemická koroze						
280	Vady povrchové ochrany odlitku						

Seznam vad odlitků třídy 300, 400 a 500					
Třída vad		Skupina vad		Druh vad	
Poř. čisl.	Název.	Poř. čisl.	Název	Poř. čisl.	Název
300	Porušení souvislosti	310	Trhliny	311	Povrchové trhliny
				312	Podpovrchové trhliny
				313	Vnitřní trhliny
		320	Praskliny		
		330	Porušení souvislosti z důvodu mechanického poškození odlitku	331	Lom za tepla
				332	Lom za studena
		340	Porušení souvislosti z důvodu nespojení kovu	341	Zavaleniny
				342	Nedokonalý svar
		400	Dutiny	410	Bubliny
412	Bubliny způsobené vodíkem				
413	Bubliny způsobené dusíkem				
414	Zahlcený plyn				
415	Sít'kovité bubliny				
420	Bodliny				
430	Odvařeniny			431	Odvařeniny od formy, jádra
				432	Odvařeniny od chladítek a zalévaných předmětů
433				433	Odvařeniny od vměstků
440	Staženiny			441	Otevřené staženiny
				442	Vnitřní , uzavřené staženiny
				443	Řediny
				444	Staženiny od jader nebo ostrých hran formy
				445	Povrchové propadliny
				446	Plynové staženiny
500	Makroskopické vměstky a vady makrostruktury	510	Struskovitost	511	Struskovitost exogenní
				512	Sekundární struskovitost
		520	Nekovové vměstky	521	Zadrobenediny
				522	Rozplavený písek
				523	Odpadnutý nátěr
				524	Oxidické pleny
				525	Grafitové pleny
				526	Černé skvrny
		530	Makrosegregace a vycezeniny	531	Gravitační odmíšení
				532	Makroodmíšení
				533	Stvolové vycezeniny
				534	Mezerové vycezeniny
		540	Broky		
550	Kovové vměstky				
560	Nevyhovující lom				

Seznam vad odlitků třídy 600 a 700					
Třída vad		Skupina vad		Druh vad	
Poř. čísl.	Název.	Poř. čísl.	Název	Poř. čísl.	Název
600	Vady mikrostruktury	610	Mikroskopické dutiny	611	Mikrostaženiny
				612	Mikrobubliny
				613	Mikrotrhliny
		620	Vměstky		
		630	Nesprávná velikost zrna		
		640	Nesprávný obsah strukturních složek		
		650	Zatvrdlina, zákalka		
		660	Obrácená zákalka		
700	Vady chemického složení a vlastností odlitků	710	Nesprávné chemické složení	720	Odchylky hodnot mechanických vlastností
				730	Odchylky hodnot fyzikálních vlastností
				740	Nevyhovující homogenita odlitku

V následujících podkapitolách se již budu věnovat popisu vybraných vad, které dle mého názoru, v technologii gravitačního odlévání do pískových forem zastupují velký podíl ze všech vad uvedených v tabulce výše. Ve výběru jsou také zastoupeny vady, které se vyskytovaly na mnou řešeném odlitku.

2.1. Nezaběhnutí a zavaleniny

Nezaběhnutí je vada, která se vyznačuje neúplným zaplněním dutiny formy kovem. Zpravidla vzniká v jeho tenké nebo horní části, protože předčasně ztuhlo čelo kovu. Vada se může projevat buď jako hladká dutina se zaoblenými hranami ve stěně odlitku, nebo nedojde k zaplnění jednoho nebo více výběžků na odlitku^[6].

Zavalenina může vznikat v místech setkání dvou proudů kovu, jejich čela jsou zoxidovaná nebo předčasně ztuhlá, mezi nimiž nedojde k metalurgickému svaření. Nedojde k promísení těchto dvou proudů kovů z důvodu vzniklé blány na čelech proudů, ale dojde pouze k jejich slepení. Tato vada se může projevat jako trhlina, nebo šev s hladkými, zaoblenými hranami. Zavalenina může být v rozsahu celé tloušťky stěny, nebo se projeví jako prohlubeň na povrchu odlitku^[5]. Příklad vady je vidět na obr. 2-1. Na obrázku je zachycena vzniklá zavalenina v horní části žebra odlitku.



obr. 2-1: Zavalenina (Studený spoj) ^[11]

Může se stát, že dojde k chybnému rozpoznání vady a nezaběhnutí nebo zavalenina se vyhodnotí jako vada vzniklá vlivem uzavřeného plynu. Jelikož obě tyto vady, nezaběhnutí a zavalenina, mohou vznikat vlivem nízké teploty kovu, může se opravdu stát, že nezaběhnutí vznikne vlivem velkého množství plynu v dutině formy.

Tyto vady jsou trochu unikátní v tom, že mají mnoho příčin v téměř každém procesu ve slévárně, s výjimkou čistících operací^[6].

2.1.1. Příčiny vzniku vady

Jednou z příčin vzniku nezaběhnutí je nevyhovující zabíhavost kovu, tzn. nevyhovující fyzikální a hydrodynamické vlastnosti taveniny a řada slévárenských technologických činitelů. Z vlastností slitiny jsou to tekutost a viskozita, dále má vliv na zabíhavost chemické složení taveniny, povrchové napětí a nebo například stupeň přehřátí odlévaného kovu^[5].

Vliv chemického složení

Z prvků obsažených v ocelích a litinách, má na viskozitu a tím i zabíhavost velký vliv obsah uhlíku. Z obsahu uhlíku plyne i vliv hodnoty uhlíkového ekvivalentu na viskozitu. Tvrdší a pevnější litiny (s nižším uhlíkovým ekvivalentem) jsou obecně náchylnější na vznik nezaběhnutí a zavalenin kvůli nízké tekutosti. Zároveň i neobvykle vysoký uhlíkový ekvivalent může způsobovat problémy, když se z taveniny začne vylučovat primární grafit. Nadměrné použití stabilizátoru uhlíku může mít stejný efekt jako

nízký uhlíkový ekvivalent a naopak nadměrné použití grafitizačních činidel může mít za následek vyloučení volného grafitu. Nepříznivý vliv na tekutost může mít i nízký obsah fosforu, zvláště u litiny s lupínkovým grafitem. Fosfor totiž vytváří eutektikum s nízkým bodem tání a tím zlepšuje tekutost. Na druhou stranu vysoký obsah fosforu má za následek vyšší křehkost litiny. Hliník a chrom tvorbou oxidických blan na povrchu slitiny zabíhavost snižují^[5,6].

Vliv průběhu odlévání

Proces odlévání se procentuálně asi nejvíce podílí na vzniku nezaběhnutí. Je to důležitý faktor, ale je nutné brát ohledy i na další vlivy. Fakt, že samotný proces odlévání je nejvíce zřejmý, nemusí hned znamenat, že je skutečnou příčinou vzniku vady. I když se nakonec zjistí, že problém skutečně nastal při odlévání, je zde stále několik různých faktorů, které mohly vadu způsobit.

Jak jsem již zmínil, při nezaběhnutí nebo studeném spoji, hraje velkou roli teplota odlévaného kovu. Běžně se stává, že dochází k odlévání kovu o nižší teplotě než je předepsaná teplota. S poklesem teploty taveniny se zvyšuje její viskozita a klesá tepelný obsah. Při návrhu výše přehřátí kovu musíme brát v úvahu jak tvarovou složitost odlévaného kovu (čím složitější tvar s tenčími stěnami, tím vyšší teplotu musíme volit), tak ale i počet odlévaných forem z jedné pánve a rozložení teploty kovu v pánvi. Výše předehřevu je ale také omezena vzhledem k vyššímu obsahu plynů v tavenině, které mohou při jejich uvolňování v době lití naopak svým protitlakem bránit vyplňování formy kovem^[5,6].

Problém může způsobit přerušení procesu odlévání, kdy dojde k přerušení toku kovu z pánve ještě před zaplněním celé dutiny dolitku. Kov v dutině začíná okamžitě oxidovat a tuhnout. Pokud po přerušení znovu obnovíme odlévání, čerstvě přitékající kov již nebude mít možnost se přes oxidickou vrstvu spojit s kovem v dutině formy a vzniká zavalenina. Omezení toku kovu příliš brzy může snížit tlak potřebný k vyplnění dutiny formy. Toto se stává zejména u odlitků, které mají velké výstupky v horní části formy, nebo když je lící jamka mělká. Riziko vzniku zavalenin nebo nezaběhnutí hrozí také v případě, kdy navržená doba lití je zbytečně dlouhá a rychlost kovu ve vtokové soustavě nízká. Čím delší je doba lití, tím více se kov ve formě ochlazuje. Toto riziko se zvyšuje u tenkostěnných odlitků a u materiálů náchylných k oxidaci^[5,6].

Vliv konstrukce odlitku

Vliv na vznik této skupiny vad má i samotný návrh jak odlitku, tak i modelového zařízení. Problematické jsou především velké rozdíly tloušťek stěn, které na sebe navazují, ale to je všeobecný problém, který by se neměl na odlitcích objevovat. Při návrhu odlitku je také nutné brát ohled na materiál, ze kterého se bude odlietek vyrábět. Stěnu o tloušťce 5 mm, při použití litiny s lupínkovým grafitem, odlíjí bez větších problémů, při dodržení technologických podmínek. Zatímco stejnou stěnu, při použití oceli, pravděpodobně nedokážou odlít. Z hlediska konstrukce odlitku může být problém zvolit vhodné zaústění vtokové soustavy do odlitku. Někdy není možné z konstrukčního hlediska přivádět teplý kov ze zářezů přímo k místům se ztenčenou tloušťkou stěny a tím snížit riziko vzniku zavalenin nebo nezaběhnutí. Pokud se někde na odlitku nachází výstupek, který je od zářezů vzdálený a hrozí, že by zde nemuselo dojít k úplnému vyplnění tvaru, je potřeba v těchto místech vytvářet například přetoky, nebo zde umístit od vzdušňovací kolíky. Ty poslouží jak k odvodu vzduchu z těchto míst, tak i jako malý zásobník, kam může vběhnout chladnější kov.

2.1.2. Opatření k zabránění vzniku vady

Z uvedených příčin vzniku nezaběhnutí a zavalenin vyplývají následující opatření, které by měly snížit riziko, nebo úplně zamezit vzniku těchto vad:

- I. Vhodná volba materiálu pro daný typ odlitku. Podstatné je se zaměřit chemické složení a metalurgické zpracování. Velká pozornost se musí věnovat teplotě liti, jednak vzhledem k vypočítané teplotě likvidu podle chemického složení a určení stupně přehřátí odlévaného kovu v závislosti na tvarové složitosti odlitku, způsobu liti a druhu formovací směsi.
- II. Provést důkladnou analýzu konstrukce odlitku se zaměřením na minimální tloušťku stěn a navrhnout polohu odlitku ve formě. Pokud je to možné, tak tenké a vysoké výstupky odlévat do spodní části formy, kde bude zajištěn přísun teplého kovu a gravitace napomůže ke správnému vyplnění dané tvarové části.
- III. Na výstupcích situovaných do horní části formy a v místech, která jsou odlehlá od ústí zářezů a zaplňují se jako poslední je vhodné umístit od vzdušňovací kolíky, které pomohou odvést plyn z dutiny formy.
- IV. Navrhnout vtokovou soustavu s dostatečnými průřezy a počtem zářezů zvláště u tenkostěnných a složitých odlitků, kde je potřeba docílit optimálního a rovnoměrného rozvodu kovu v dutině formy.

- V. Případná volba formovacího materiálu s menší intenzitou odvodu tepla z proudícího kovu. Toto opatření je ale poměrně obtížně realizovatelné, zvláště na automatizovaných formovacích linkách^[5].

2.2. Nedolítí

Nedolítí je vada, při které dojde k neúplnému vytvoření tvaru odlitku v horní části formy, způsobené nedolítím. Jedná se tedy o vadu, která je způsobena hlavně nedostatkem kovu odlitého do dutiny formy.

2.2.1. Příčiny vzniku vady

Dá se říci, že hlavní příčinou vzniku této vady je jednoduše nedostatek kovu přivedeného do dutiny formy. Nicméně, existuje řada aspektů při odlévání, které mohou přispět k nedostatku kovu a nebo ke zdánlivému nedostatku kovu. Často může být ale obtížné rozpoznat, zda došlo opravdu k nedolítí kovu, a nebo došlo k vytečení kovu z dutiny formy. Nedolítí může být také následkem zpětného tlaku nebo odporem, způsobeným nedostatečnou prodyšností formy nebo nedostatečným odvzdušněním formy. V některých případech může být nedolítí způsobeno odlitím kovu o nízké teplotě^[6].

Při odlévání masivních odlitků, s hmotností několika tun, kdy se na jeden tento odlitek využije plný objem jedné lící pánve, může nedolítí vzniknout kvůli nedostatku kovu v pánvi. To může být způsobeno buď nesprávným zvážením tekutého kovu v pánvi, nebo neznalostí správné hmotnosti odlitku. Příčinou může být také předčasné ukončení lítí.

2.2.2. Opatření k zabránění vzniku vady

Jak jsem uvedl, nejčastějším příčinou vzniku této vady je nedostatek tekutého kovu přivedeného do dutiny formy. Důvodem může být nedostatek kovu v lící pánvi, případně chyba slévače, který ukončí odlévání příliš brzy. Opatření proti nedostatku kovu v lící pánvi je její kvalitní vážení. Při odlévání více forem z jedné pánve je potřeba hlídat množství kovu v pánvi. Slévač by měl vědět, kolik kovu v pánvi má a kolik forem může z této jedné pánve odlít.

V případě, že k nedolítí dojde z důvodu zvýšeného tlaku vzduchu ve formě, je vhodné provést analýzu prodyšnosti používané formovací směsi. Například při použití automatické formovací linky s použitím regenerace formovací směsi se může stát, že do bentonitové směsi se přimíchají i směsi, ze kterých se vyrábí jádra (COLD BOX, CT směs). Tyto cizí směsi mají za následek snížení prodyšnost bentonitové formy.

2.3. Vytečený kov

Vytečený kov je vada, při které nedojde k úplnému vytvoření tvaru odlitku, případně stěny odlitku jsou vytvořeny pouze z kovové vrstvy, která vykryštovala před vytečením kovu z dutiny formy. K vytečení kovu z dutiny formy může dojít buď během plnění formy kovem a nebo během tuhnutí kovu v dutině.

I když se může na první pohled zdát, že se jedná o ten samý problém, příčiny vzniku těchto vad se mohou v některých případech lišit. Vytečení kovu během tuhnutí může být například způsobeno hrubým zacházením s formou na ochlazovacím dopravníku nebo příliš brzkým odstraněním závaží z formy. Zatímco vytečení kovu v průběhu plnění formy je způsobeno především malou pevností formy nebo použitím nedostatečného závaží na zatížení formy^[6].

2.3.1. Příčiny vzniku vady

Jednou z příčin vytečení kovu z formy je nevhodný návrh modelového zařízení. V případě, že model odlitku je umístěn na příliš malou základní desku, z čehož plyne i použití formovacího rámu o menších rozměrech, vznikne mezi modelem a formovacím rámem tenká stěna formovací směsi. U této tenké stěny nebude možné dosáhnout dostatečného stupně propěchování a tím pádem nebude dosaženo ani potřebné pevnosti formovací směsi. Tato slabá stěna nedokáže odolat působení kovu přitékajícího do dutiny, pod jeho nápořem se zborťí a dojde k vytečení kovu. Na vznik takovýchto tenkých stěn je potřeba dávat pozor nejen v případě umístění modelu odlitku blízko k rámu formy, ale i při umístění několika modelů jednoho odlitku na modelovou desku. Není tedy úplně vhodné hnát se za co nejvyšším využitím objemu formy a raději volit méně násobné formy. Samozřejmě toto závisí na tvaru odlévaného odlitku, použité formovací směsi a technologii přechování formy.

Všeobecně pevnost formy závisí na použité formovací směsi a jejím stupni upěchování nebo vytvrzení. Pokud použijeme kvalitní formovací směs a nedostatečně ji upěchujeme nebo ji nenecháme dostatečně vytvrdit, výsledkem bude forma o pevnosti nižší než je požadováno. Stejný výsledek má ale i opačná možnost, kdy provedeme dostatečné upěchování nebo vytvrzení, ale použijeme nekvalitní formovací směs.

K vytečení kovu nemusí dojít pouze ven z formy, může dojít i k vytečení kovu do tvarového jádra. Tento případ se stává u odlehčených jader a nebo skořepinových jader vyrobených metodou CRÖNÜNG^[5]. Příčinou vytečení kovu do jádra může být jeho malá únosnost způsobená nedostatečným dimenzováním stěny skořepiny, nebo malá odolnost

jádrové směsi proti teplotnímu šoku, kdy při rychlém ohřátí jádra tekutým kovem, dojde k jeho prasknutí. Příčinou může být i špatně utěsněná známka jádra.

Během plnění formy může dojít k vytečení kovu také z důvodu nedostatečného, případně nerovnoměrného zatížení vrchní části formy. Kov v dutině formy vytváří vztlakovou sílu, která závisí na ploše odlitku promítnutého do dělicí roviny formy. Při nedostatečném zatížení formy tato síla způsobí nadzvednutí horní části formy. Tím vznikne mezera mezi horní a spodní částí formy přes kterou dojde k vytečení kovu. Výška odlitku nemá na velikost vztlakové síly téměř žádný vliv. Při použití automatické formovací linky musí funkci závaží převzít samotný formovací rám.

Mezi další příčiny vzniku této vady může patřit špatný stav podložek pod formy, nesprávné uložení formy na licí pole, případně přetížení únosnosti formy^[5].

2.3.2. Opatření k zabránění vzniku vady

Abychom snížili riziko, že dojde k vytečení kovu z formy nebo do jádra, je vhodné zaměřit se na následující opatření:

- I. Mezi základní opatření k zabránění vzniku vytečení patří udržování pořádku na pracovišti, kvalitní provedení forem a jader, dobrý stav ráků a podložek pod ráky a dodržení předepsané licí teploty. Dále je potřeba hlídat stav modelového zařízení a jaderníku. Jejich zvýšené opotřebení by mohlo vést ke zvětšení vůle ve známkách, nebo naopak známka bude menší než je jádro a nedojde ke správnému uložení jádra.
- II. Volit využití objemu formy vzhledem k únosnosti formovací směsi, velikosti formovacích ráků a konstrukci odlitku. Honba za maximálním objemovým využitím ráků může vést ke vzniku slabých stěn mezi formovacím rákem a odlitkem, které se nedají dostatečně upěchovat. Tyto stěny následně nemusí vydržet nápor kovu při plnění dutiny formy a dojde k jejich zhroucení. Je třeba brát ohled i na konstrukci odlitku. Nízká stěna v blízkosti ráku nezpůsobí takové problémy, jako vysoká stěna.
- III. Při použití skořepinových jader je třeba dbát na přiměřené vůle ve známkách a na dostatečnou vzdálenost odlehčení od vtokové soustavy a nálitků. Je důležité hlídat kvalitu použité obalované směsi a její sklon k praskání vlivem tepelných šoků. Pozor si musíme dávat na únosnost skořepinových jader. Zvláště u silnostěnných masivních odlitků může pod tíhou kovu dojít ke zborcení jádra.
- IV. Nesmí se také opomenout použít dostatečné zatížení horní části formy, aby nedošlo k jejímu nadzvednutí vlivem vztlakové síly, kterou vyvolává kov přitékající do dutiny formy.

Přípečeniny

Přípečeniny jsou vady povrchu, které vznikají reakcí mezi kovem a povrchem formy, nebo kovem a povrchem jádra. Velkou roli při vzniku těchto vad hraje smáčivost formovacích směsí tekutým kovem. Se zvyšující se smáčivostí formy roste i riziko vzniku přípečenin. Vliv na vznik přípečenin má i druh odlévaného kovu. Například grafitizující slitiny vyznačující se vysokou zabíhavostí jsou více náchylné na vznik přípečenin.

Přípečeniny je možné rozdělit do tří skupin, které se liší hloubkou penetrace kovu do pískové formy. Jedná se o následující tři skupiny:

- drsný povrch,
- povrchové přípečeniny,
- hluboké přípečeniny - zapečeniny.

2.4. Drsný povrch

Z uvedených tří skupin se jedná asi o nejméně závažnou vadu, ale i tato může vést k reklamaci odlitku od odběratele, zvláště, pokud se drsný povrch vyskytuje na pohledových plochách, které se nebudou obrábět.

2.4.1. Příčiny vzniku vady

Drsný povrch je způsobený dokonalým smočením dutiny formy, nebo jádra, kovem do hloubky poloviny průměru zrna ostřiva. Vzhledem k tomu, že zrna ostřiva nejsou celá uzavřena v kovu, je poměrně snadné přilehlou vrstvu písku odstranit tryskáním, ale i po otryskání ulpěného písku zůstává povrch odlitku drsný. Problematická jsou nepřístupná místa, jako jsou členité dutiny nebo kapsy, které jsou předlévány pomocí výstupků na jádrech nebo formách. V této situaci je malý objem pískové směsi obklopen velkým objemem roztaveného kovu a písková směs se intenzivně zahřívá. Taková místa na odlitcích by se měla předlévat za použití jader vyrobených ze směsí, které jsou odolnější proti působení vysokých teplot než formovací směsi a jsou ošetřeny žáruvzdorným nátěrem. Mohou se používat například jádra z chromitové pískové směsi, nebo v ojedinělých případech i grafitová jádra. Směsi pro výrobu těchto jader jsou ale podstatně dražší, než směsi pro výrobu jader například technologií COLD BOX, nebo CT směsi. Proto se musí použití těchto dražších materiálů důkladně zvažovat a využívat jich jen v případech, kdy hrozí velké tepelné a dynamické namáhání jádra roztaveným kovem a v místech těžko přístupných pro čištění.

Ochranné žáruvzdorné nátěry snižují množství tepla, které proniká do jádra z roztaveného kovu, čímž snižují tepelné namáhání jader a oddalují degeneraci jádrové

směsi. Zároveň zlepšují celistvost povrchu jader a snižují jejich smáčivost roztaveným kovem, ucpávají póry na jejich povrchu, čímž brání pronikání kovu do povrchu jádra. Výsledný povrch má nižší drsnost než v případě, kdy ochranný nátěr použit nebyl a riziko vzniku drsného povrchu nebo připečenin se snižuje. Existují různé typy nátěrů, lišící se jak svým složením, tak i vlastní žáruvzdorností. Používají se například nátěry se zirkonovým nebo korundovým plnivem. Pro vyšší ochranu jader je možné použít více vrstev nátěru, případně i kombinovat dva různé nátěry s rozdílnými vlastnostmi. Po nanesení ochranného nátěru by měla proběhnout kontrola ošetřeného povrchu. Nátěr musí být souvislý na celé ploše jádra, která bude v kontaktu s kovem. Hrubé zacházení s jádrem může mít za následek odření ochranné vrstvy, nebo vylamování rohů a hran jader. Takto poškozená místa jsou náchylnější na vznik připečenin nebo zadrobenin. Přes tyto porušené oblasti také může snadněji unikat plyn z jádra. Pokud je tato oblast ve známce jádra, nemusí to být na škodu, ale v případě, že je takto porušená oblast v dutině formy, může to mít za následek vznik bublin.

Ochranné nátěry se nepoužívají jenom k ochraně jader, ale i pro ochranu forem. Při výrobě forem na automatických formovacích linkách není ale možné využívat nátěrových hmot a ke zlepšení povrchu odlitků se do bentonitových směsí přidávají uhlíkaté přísady. Podle Elbela^[5] se dá příznivý účinek těchto uhlíkových přísad vysvětlit těmito čtyřmi teoriemi:

- teorie plynového polštáře,
- teorie redukční atmosféry,
- teorie obalování,
- teorie lesklého uhlíku.

Z uvedených teorií je experimentálně ověřen příznivý vliv lesklého uhlíku. Redukční atmosféra nemá přímo vliv na zlepšení drsnosti povrchu odlitků ze šedé litiny, ale je jedním z předpokladů pro dosažení hladšího povrchu.

Elbel^[5] definuje lesklý uhlík jako zvláštní morfologickou formu uhlíku, kde uspořádání v mřížce se nachází mezi grafitem a koksem, s malou spalovací rychlostí. Jeho stálost proti oxidaci, např. v syrové formě, je mnohem vyšší nežli u grafitu. Podle teploty termodestrukce se rozeznávají dva druhy lesklého uhlíku. Prvním je vysokoteplotní, vznikající od teploty 950°C do 1200°C. Druhým je nízkoteplotní, vznikající od teplot 650°C do 950°C. Vysokoteplotní lesklý uhlík vytváří tenké kompaktní filmy, které jsou velice odolné vůči oxidaci. Z toho důvodu se do bentonitových směsí přidávají právě ty

přísady, které uvolňují především vysokoteplotní lesklý uhlík. Lesklý uhlík má tu vlastnost, že není smáčen litinou, ta nezabíhá do mezizrnových prostorů a úměrně s jeho obsahem roste hladkost povrchu. Příliš vysoký obsah lesklého uhlíku může vést k zavaleninám, u tenkostěnných odlitků i k nezaběhnutí. Obsah tohoto uhlíku by se tedy měl udržovat v optimální koncentraci, která se uvádí v rozmezí 0,5 - 0,6% lesklého uhlíku ve směsi^[5].

U odlitků s tloušťkou stěny nad 50 mm, kde tekutý kov je se stěnou formy v kontaktu delší dobu nebo v místech formy, kde je vleká průtočnost kovu, nestačí pouze povrchová blanka lesklého uhlíku. Přísady musí tvořit i dostatečné množství koksu, který má plastický stav, blokuje mezizrnové prostory a brání hlubší penetraci kovu do stěny formy i tvorbě připečenin^[5].

Na vznik drsného povrchu má vliv i vlhkost formovací směsi. Problém může způsobit jak příliš vlhká směs, tak i příliš vysušená. Příliš vysoká vlhkost formovací směsi má za následek lepivost formy a zdrsnění povrchu formy. Naopak příliš suchá směs má tendenci se při manipulaci s formou, nebo při zakládání jader vydrolovat, a i když se forma následně vyfoukáva stlačeným vzduchem, ne všechnu vydrolenou směs se povede vyfoukat. Ta pak může mít za následek vznik zadrobenin a zároveň místa, ze kterých se formovací směs vydrolila, jsou oslabena a tavenina do nich vniká snadněji. V místě zaústění zářezů do odlitku může docházet ke zvýšené erozi formy vlivem proudícího kovu. Při erozi dochází k vymílání zrn formovací směsi. Tato zrna se mohou uzavírat v objemu odlitku a způsobit nekovové vměstky.

Z hlediska formovací směsi je potřeba i správně volit velikost zrn ostřiva. Může být poměrně obtížně vytvořit hladký povrch odlitku, pokud se ve formovací směsi vyskytují příliš velká zrna, která se obtisknou do povrchu odlitku. Příliš jemná zrna zase mohou způsobit problémy spojené s malou propustností směsi.

2.4.2. Opatření k zabránění vzniku vady

K zabránění vzniku drsného povrchu se jádra i formy ošetřují ochrannými nátěry s vysoce žáruvzdornými plnivý. Použitím těchto nátěrů dosáhneme lepší kvality povrchu odlitku a zároveň zvýšíme odolnost ošetřených prvků proti tepelnému namáhání.

V případě výroby forem na automatických formovacích linkách není možné aplikovat ochranný nátěr, proto se musí do syrových formovacích směsí přidávat uhlíkaté přísady, jakou jsou například aktivované černouhelné moučky, které zajistí vyloučení aktivního lesklého uhlíku v požadovaném množství.

Odlévaný kov by neměl být přehřátý na příliš vysokou teplotu. S rostoucí teplotou klesá viskozita taveniny a kov mnohem lépe smáčí povrch formy a lépe proniká mezi zrna. Vyšší teplota zároveň znamená i větší teplené namáhání formy a jader, čímž se zvyšuje riziko jejich degradace.

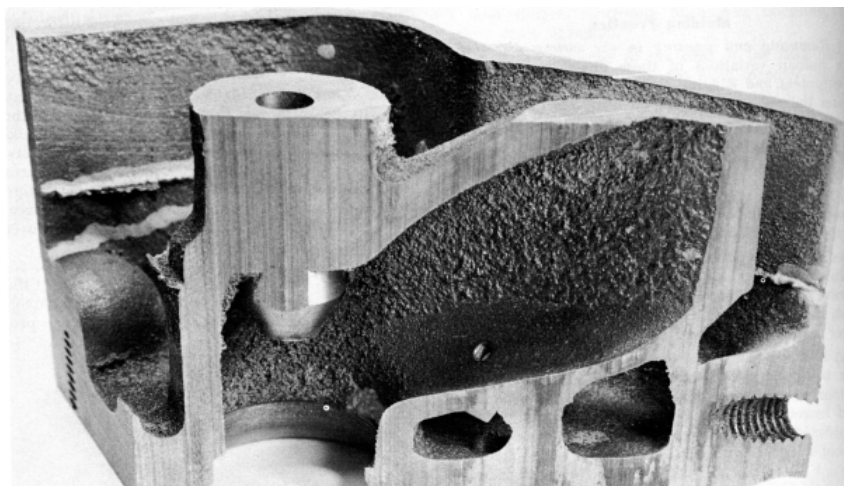
U syrových forem je důležité zvolit optimální velikost ostřiva. Velká zrna ostřiva zdrsňují povrch, zatímco příliš jemná zrna ostřiva snižují propustnost formovací směsi.

2.5. Povrchové připečeniny

Elbel^[5] popisuje povrchovou připečeninu jako tenkou vrstvu písku, která je pevně spojena s povrchem odlitku a často vzniká na rovných plochách. Kov proniká do větší hloubky než je průměr zrna. Připečeniny lze odstranit například opakovaným tryskáním a broušením, ale je to velice obtížné. Vysoká adheze připečenin k povrchu je způsobena tvorbou vícesložkových skel - amorfních silikátů.

2.6. Hluboké připečeniny - zapečeniny

V případě hlubokých připečenin dochází k penetraci kovu do velké hloubky stěny formy nebo jader. Hloubka penetrace dosahuje běžně i několika centimetrů. Roztavený kov vyplňuje dutiny mezi zrny písku bez toho, aniž by tato zrna nahrazoval. Riziková jsou místa jako například výstupky na formě nebo na jádrech, které jsou při odlévání obklopeny velkým objemem roztaveného kovu a dochází k jejich velkému teplenému namáhání. Ukázka vady vzniklé penetrací kovu do formovací směsi je vidět na obr. 2-2.



obr. 2-2: Vada vzniklá penetrací kovu do formovací směsi ^[12]

K penetraci kovu do povrchu formy jsou náchylnější měkčí formovací směsi, jako je například bentonitová směs, ale jsou případy, kdy dochází k penetraci kovu například i do forem vyrobených ze směsí vytvrzených chemicky pomocí profukování CO₂ (oxidem uhličitým) a do skořepinových jader a forem.

Je důležité zmínit, že penetrovat do stěny formy nebo jádra nemusí jenom roztavený kov, ale i oxidy kovů. Kov při zvýšené teplotě (zahrnující i natavený stav) má měřitelnou míru oxidace, když je vystavený oxidační atmosféře. K penetraci může dojít i v případě, že kov v dutině je již ztuhlý ale jeho teplota je stále vysoká. Například není neobvyklé, že penetrace může být mnohem horší, pokud se odlitek drží ve formě příliš dlouho, místo toho, aby se z formy vytrásl ještě za zvýšené teploty. Penetrace oxidů je jedním z možných vysvětlení, kdy se zdá, že kov proniká do poretivity formy za podmínek, kdy je zřejmé, že už není schopný téct^[5,6].

2.6.1. Příčiny vzniku vady

Příčiny vzniku hlubokých připečenin jsou v některých bodech podobné, jako příčiny vzniku drsného povrchu, ale v případě hlubokých připečenin dochází k hlubší penetraci kovu do formovací nebo jádrové směsi. Jak jsem uvedl v kapitole 2.4. Drsný povrch, problémy mohou vznikat v místech, kde malý objem formovací nebo jádrové směsi je obklopen velkým objemem kovu. Jedná se například o tvarové výstupky na formě nebo na jádře, které mají vytvářet v odlitku dutiny. Problematické jsou také ostré hrany, nebo hrany s nedostatečným zaoblením. Jak u výstupků, tak i u ostrých hran dochází k lokálnímu přehřívání formovací nebo jádrové směsi. Toto přehřátí může mít za následek degradaci vlastností této směsi a pronikání kovu do těchto oslabených míst.

Elbel^[5] uvádí jako příčiny vzniku dané vady následující faktory:

- teplota odlévaného kovu - stupeň přehřátí,
- druh kovu,
- stupeň dezoxidace kovu - u ocelí,
- metalostatický a metalodynamický účinek kovu,
- povrchové napětí kovu, jeho viskozita a úhel smáčení formy kovem,
- druh ostřiva a pojivové soustavy,
- velikost zrn ostřiva a jeho tvar,
- stupeň zhuštění formy - velikost pórů.

Uvedené příklady nezahrnují všechny faktory, které by mohly mít vliv na vznik zapečenin.

Bylo již navrženo mnoho teorií a mechanismů vzniku hlubokých připečenin. Elbel^[5] uvádí ty, které jsou prozkoumány a ověřeny. Jedná se o velice rozsáhlou problematiku, proto se pokusím pouze o stručný popis několika významných mechanismů.

Penetrace přes tekutou fázi

Vstup kovu do pórů ve formě probíhá za působení metalostatického nebo metalodynamického tlaku, případně působením kapilárních sil. Výpočet hraniční hodnoty metalostatického tlaku, při kterém dojde k penetraci kovu do formy je možné provést podle vztahu:

$$h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \alpha}{r \cdot \rho \cdot g}$$

- kde: h - kritická výška sloupce kovu
 σ - povrchové napětí tekutého kovu (pro ocel $\sigma = 1,5 \text{ Nm}^{-1}$)
 α - krajní úhel máčení (nesmáčivá forma $\alpha = 180^\circ$)
r - poloměr kapilár (příklad $r = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m}$)
 ρ - hustota taveniny (pro ocel cca $7000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
g - gravitační zrychlení ($g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$).

Pokud dosadíme do vzorce hodnoty uvedené v závorkách, získáme kritickou výšku sloupce kovu, při které dosáhne metalostatický tlak hodnoty umožňující penetraci kovu do pórů ve formě. Pro tento příklad vychází kritická výška $h = 0,875 \text{ m}$, tedy při již poměrně malé výšce. Je-li navíc ve formě oxidační prostředí, například u syrových forem, úhel smáčení silně klesá a kritická výška se výrazně snižuje.

Penetrace za spoluúčasti chemických reakcí

Během odlévání odchází k oxidaci čela proudu kovu a jeho hladiny ve formě. Plénka oxidů železa zvyšuje smáčivost formy kovem, po 3 - 5 minutách^[5], kdy je kov v kontaktu se stěnou formy, se hodnota krajního úhlu smáčení blíží téměř k nule u všech druhů formovacích směsí. Při této minimální hodnotě úhlu smáčení dochází k nasávání kovu do mezizrnových prostor.

AFS^[6] označuje tento mechanismus vzniku připečenin jako "*fusion*". Volně by se tento výraz dal přeložit jako "*splynutí*" a ve skutečnosti se i o splynutí jedná. Zatímco při penetraci kovu do formy dochází k vyplňování pórů ve formě, při fúzi dochází k reakci mezi oxidem železa a ostřivem (křemenným), a to i za relativně nízkých teplot. Po absorbování kovu do písku dojde ke vzniku tvrdé vrstvy, ve které je písek nasycen oxidem železa. Tato vrstva se dá ale snadno odloupnout od odlitku a dostaneme hladký povrch odlitku. Ale aby se dala tato vrstva oddělit od kovu, musí vzniknout přechodová zóna tvořená křemičitany, která má silné adhesní síly k formě i kovu, ale nízkou kohesní pevnost. Pak je možné toto využít při odlévání ocelových odlitků, kdy právě díky této

snadno odstranitelné vrstvě lze snížit pracnost při čistění odlitku. Může se ale stát, že oxidy železa zůstanou v kontaktu s odlitkem a jsou součástí povrchu odlitku. V tom případě vzniká drsný povrch, který vyžaduje dodatečné čištění^[5,6].

Penetrace za spoluúčasti par kovu

Tento mechanismus předpokládá vznik plynného pentakarbonylu železa $\text{Fe}(\text{CO})_5$ na rozhraní kov - forma. Ten proniká do formy a rozkládá se na železo a oxid uhelnatý. Na rychlost vypařování u slitin Fe - C má velký vliv mangan a síra. Tenká vrstva kovu, která se vytvoří na zrnech formy i ve značné hloubce, výrazně mění smáčecí charakteristiky v soustavě kov - forma a tím umožňuje druhotnou vlnu hluboké penetrace tekutého kovu^[5].

Další mechanismy

Mezi další mechanismy tvorby připečenin patří například penetrace explozí vody, nebo penetrace vycezování, která se objevuje hlavně u grafitizujících slitin u nichž dochází ke zvětšování objemu během eutektického tuhnutí.

2.6.2. Opatření k zabránění vzniku vady

K zabránění vzniku zapečenin je možné využít některá opatření, která se používají při ochraně před vznikem drsného povrchu. Jedná se zejména o používání ochranných nátěrů jader, které zacelují povrch jader a brání pronikání kovu a jeho oxidů do prostoru mezi jádra. Dále je potřeba zajistit dostatečné upěchování formovací směsi, aby bylo dosaženo požadované pevnosti a zhutnění formy.

Z hlediska odlévaného kovu není vhodné odlévat kov s příliš velkým přehřátím. Příliš vysoký stupeň přehřátí kovu má tři následky. Prvním následkem je, že kov o vyšší teplotě má vyšší tekutost a zabíhavost a tedy lépe proniká do pórů ve formě nebo jádře. Druhým následkem je, že kov s vyšším přehřátím rychleji oxiduje a dochází k větší penetraci oxidů. Třetím následkem je, že dochází k nadměrnému tepelnému namáhání formy a jádra a následkem toho k degradaci pojiva a rozpadu jádra nebo formy.

Zvláště u mohutnějších odlitků by se měla volit rozvětvená vtoková soustava s několika zářezy. A to ať už z důvodu zajištění klidnějšího spodního plnění, tak i k zabránění lokálního přehřívání formovacích směsí v místech, kde by byl umístěn jeden mohutný zářez.

U odlitků ze šedé litiny je potřeba sledovat chemické složení, zvláště obsah fosforu a stupeň eutektičnosti slitiny, v případě podezření z penetrace vycezováním.

2.7. Bubliny

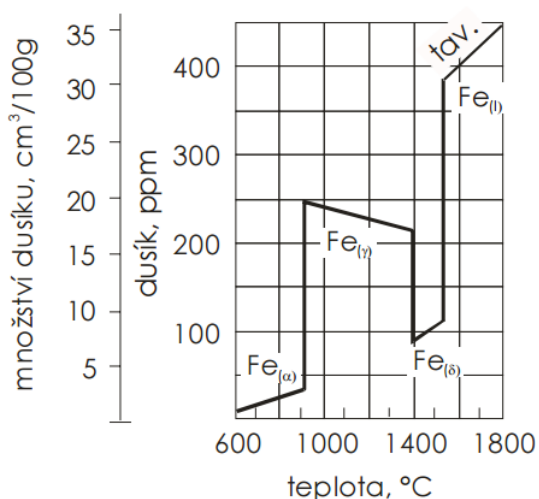
Bubliny jsou vady, na jejichž vznik má primární vliv přítomnost plynů v tavenině, v dutině formy, případně ve formovacích směsích. Bubliny jsou dutiny v odlitku, které mohou být buď otevřené, tedy spojené s povrchem, nebo uzavřené v objemu kovu.

Bubliny je možné rozdělit podle způsobu vzniku na endogenní a exogenní. Endogenní bubliny vznikají z plynů rozpuštěných v tavenině, kdy tlak rozpuštěného plynu převyší tlak kovu v jakémkoliv místě odlitku, během tuhnutí kovu. Exogenní bubliny vznikají během odlévání, a to v případě, kdy tlak plynu v dutině formy převyší odpor, který mu klade čelo proudu kovu. Tento problém vzniká především u špatně prodyšných a nedostatečně odvzdušněných forem a v případě neklidného plnění dutiny formy. Tyto vady, při kterých dochází k uzavření okolního vzduchu do odlitku, jsou definovány jako zahlcený plyn. Ukázka vady je na obr. 2-3.

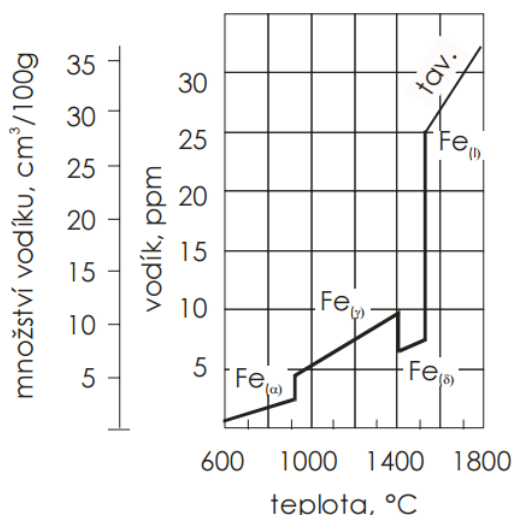
Vady způsobené plyny je jednodušší rozpoznat, než je popisovat. Nicméně i při rozpoznávání této vady může dojít k omylu, kdy dojde k zaměnění bublin za staženiny. Často se při posuzování, zda se jedná o bubliny nebo staženiny, používá jednoduchá poučka, která říká, že dutiny způsobené plyny mají hladký povrch zatímco u staženin je povrch dendritický. Ve většině případů tato poučka skutečně platí, ale v někdy může vést k nepřesnému vyhodnocení vzniklých vad. Existují dva případy, které nás mohou při vyhodnocování zmást. Za prvé, vady způsobené plyny mohou současně vznikat v kombinaci se staženinami. Za druhé, staženiny a bubliny se vyskytují v podobných oblastech, jako jsou místa v odlitku, která tuhnou jako poslední a v mohutnějších oblastech. Pokud si neuvědomíme možnost kombinace těchto dvou vad a budeme tyto řešit buď jen jako vadu způsobenou plyny a nebo jako staženinu, může se stát, že se nám tento problém nepodaří vyřešit^[6].



obr. 2-3: Bubliny uzavřené pod povrchem odlitku



obr. 2-4: Diagram rozpuštění dusíku v čistém železe při tlaku 0,1 MPa[10]



obr. 2-5: Diagram rozpuštění vodíku v čistém železe při tlaku 0,1 MPa[10]

2.7.1. Příčiny vzniku vady

Příčina vzniku bublin v odlitcích spočívá v tom, že v každé tavenině je rozpuštěno určité množství plynů, jejichž míra rozpustnosti je závislá převážně na teplotě taveniny a dále na jejím chemickém složení a okolním tlaku. Čím vyšší teplota taveniny, tím větší objem plynů má možnost se v tavenině rozpustit. S klesající teplotou taveniny ale začne rozpustnost plynů klesat a začne docházet k jejich vylučování ve formě bublin. Na obr. 2-4 a obr. 2-5 jsou znázorněny diagramy popisující rozpustnost dusíku a vodíku v čistém železe v závislosti na teplotě, při konstantním tlaku 0,1 MPa, který odpovídá atmosférickému tlaku.

Zatímco vodík a dusík vytvářejí bubliny přímo při svém uvolňování během chladnutí taveniny, kyslík vytváří bubliny nepřímo prostřednictvím uhlíkové reakce, při které se váže na uhlík v tekutém, případně v tuhoucím kovu a vzniká oxid uhelnatý (CO).

Mezi základní příčiny vzniku bublin v litinových odlitcích lze zahrnout použití nevhodné vsázky, která obsahuje velké množství mnohokrát přetavovaného vlastního odpadu, použití zkorodovaného, vlhkého a neotryskaného odpadu a všeobecně použití vlhké vsázky. Dále může mít vliv na vznik bublin použití nevysušené lící pánve. Z uvedeného je patrné, že jakákoliv vlhkost, s kterou přijde tavenina do styku, může mít za následek vznik bublin, protože dojde k obohacování taveniny vodíkem^[5].

Z hlediska vzniku exogenních bublin je důležité, se zaměřit na obsah plynů v formovacích a jádrových směsích a na jejich vlhkost. Během zahřívání těchto směsí taveninou při odlévání začne docházet k uvolňování plynů a k vypařování vody obsažené v daných směsích. Objem takto uvolněných plynů je značný a i když pískové směsi mají určitou prodyšnost, nestačí to k odvodu takového množství plynu. Pro zajištění snadnějšího

odvodu plynu z formy se používají odvzdušňovací výfuky, které propojují dutinu formy s jejím povrchem.

Vypařování plynů z jader se dá částečně omezit použitím ochranných nátěrů. Nátěry se většinou nanášejí na ty plochy jader, které jsou v kontaktu s odlévaným kovem a známky jader zůstávají bez ochrany. Plyn při svém uvolňování uniká cestou nejmenšího odporu a to je, v případě jader opatřených ochrannými nátěry, přes plochy, které tímto nátěrem ošetřeny nejsou, tedy přes známky jader. Proto je vhodné, zvláště u mohutnějších jader, přidávat výfuky i do známek, aby byl zajištěn snadnější odvod plynů. Při použití ochranných nátěrů musí dojít k jejich řádnému vysušení a to jak z důvodu zajištění správné funkce nátěru, tak i z důvodu, abychom zabránili vnášení další vlhkosti.

Při řešení uzavřeného plynu v odlitku, se nesmí opomenout brát v úvahu také vliv proudění kovu. Pokud kov proudí do dutiny vysokou rychlostí, dochází k rozstříku kovu, nebo se dutině se vytváří víry. Toto chování může vést k pohlcování plynu přítomného v dutině formy taveninou a k následnému uzavření plynu v objemu odlitku.

Důležitou roli hraje teplota odlévaného kovu. Při odlévání kovu při teplotě nižší, než byla předepsána se vystavujeme riziku, že plyn rozpuštěný v tavenině nebude mít možnost z objemu kovu uniknout, protože dojde k předčasnému natuhávání stěn odlitku, přes které plyn nepronikne. Na druhou stranu, při odlévání kovu s příliš vysokým stupněm přehřátí, bude mít plyn rozpuštěný v kovu sice dost času na vyplavání a únik z taveniny, nicméně vysoká teplota kovu má za následek větší ohřev formovacích materiálů a s tím spojený zvýšený objem plynů uvolňujících se z těchto směsí.

Otevřené bubliny vznikají ve většině případů v místech, kde dojde k uzavření plynu na stěně formy hladinou kovu, která je již z části natuhnutá nebo zoxidovaná. Dojde k obklopení plynové bubliny kovem a k obtisknutí této bubliny do povrchu kovu.

2.7.2. Opatření k zabránění vzniku vady

Z uvedených příčin vzniku dané vady lze odvodit i opatření, která by měla být přijata, abychom vznik bublin omezili. Tato opatření zahrnují:

- I. V první řadě je důležité, co možná nejvíce omezit množství plynů rozpuštěných v tavenině. U litin, stejně jako u jiných kovů, je potřeba věnovat pozornost stavu vsázkových materiálů, a to z hlediska jejich vlhkosti a jejich stupně zoxidování. Zoxidované vrstvy kovu obsahují velké množství hydratovaného oxidu železnatého, jehož rozložením v tavicí peci se uvolňuje velké množství vodíku^[5].

- II. Dále musíme věnovat pozornost stavu formovacích směsí, zvláště jejich vlhkosti. Při výrobě forem na syrovo z bentonitových směsí, se přímo do formovací směsi přidává voda, aby byla zajištěna požadovaná pojivost směsi. Vlhkost směsi se ale musí kontrolovat, aby nebyla překročena její maximální povolená hodnota, která by měla za následek zvýšený vývin plynu. Hlídat se také musí obsah organických příměsí, olejů a dalších prvků v pískových směsích, které při ohřevu taveninou začnou vyhořívát, nebo se vypařovat a jsou dalším zdrojem plynů.
- III. U jader opatřených ochrannými nátěry se musí zajistit dostatečné vysušení nátěru.
- IV. Pro lepší odvod plynů z dutiny formy, případně z jader, se používají odvzdušňovací výfuky, které propojují dutinu formy s jejím vnějším povrchem. Tím je umožněn snadnější odvod plynů z dutiny formy do atmosféry.
- V. Navrhnout vtokovou soustavu, která zajistí klidné plnění dutiny formy bez vzniku rozstříku a vírů. Z toho hlediska se jeví jako ideální navrhnout spodní plnění odlitku, díky kterému se opravdu docílí klidného plnění. U klidné hladiny, která není promíchávána čerstvým kovem ale zase hrozí její zvýšená oxidace. Oxidy vzniklé na hladině mají menší propustnost plynů, a tak plyny, které se uvolňují z taveniny, nemají kudy unikát. Toto opatření tedy není vhodné aplikovat ve všech případech.

2.8. Staženiny

Staženiny se dají popsat jako dutiny, které vznikají v objemu odlitku nebo na jeho povrchu, vlivem zmenšení objemu kovu při jeho tuhnutí. Podle místa jejich vzniku lze staženiny rozdělit na uzavřené vnitřní staženiny a otevřené staženiny.

Jak už jsem zmínil v kapitole 2.7. Bubliny, je potřeba si dávat pozor, aby při vyhodnocování vad nedošlo k záměně staženin za vady způsobené plynem a nebo naopak. Obě vady se mohou nacházet v podobných oblastech a i když některé postupy pro řešení těchto vad jsou stejné, najdou se případy, kdy řešení jedné vady, způsobí velké zhoršení té druhé. Proto je důležité věnovat analýze těchto vad zvýšenou pozornost a ne každou dutinu v odlitku hned označovat jako staženinu.

Ukázka staženiny v odlitku je vidět na obr. 2-6.

2.8.1. Příčiny vzniku vady

Otevřené staženiny vznikají na povrchu odlitku. Objevují se pod nálitkem po jeho odříznutí, kdy soustředěná staženiny z nálitku zasahuje až do odlitku, nebo v místech, kde dojde k propadnutí horní plochy odlitku z důvodu stažení kovu pod touto plochou.



obr. 2-6: Staženina v odlitku^[13]

Příčinou vzniku vady může být nedostatečný objem nálitku vzhledem k objemu části odlitku, do které dosazuje, nízká teplota kovu v nálitku, nebo nezaplnění nálitku do požadované výšky.

Vnitřní uzavřené staženiny vznikají v odlitku v místech, kde vznikají tepelné uzly. Tedy v místech, kde se například protínají stěny s různou tloušťkou, v místech, kde je nahromaděný větší objem kovu. Tedy v místech, která tuhnou později, než jejich okolí. Pokud dojde k natuhnutí kovu v okolí těchto míst, dojde k jejich odříznutí od zdroje tekutého kovu, kterým je například náletek, a tyto místa tuhnou bez možnosti dosazování taveninou. Zde má velký vliv na vznik vady samotná konstrukce odlitku.

Mezi další příčiny patří nedostatečný objem a nevhodný poměr mezi průměrem a výškou nálitku a jeho nevhodné umístění. Při používání nálitků je, kromě velikosti samotných nálitků, důležité věnovat pozor také velikosti krčku, který propojuje náletek s odlitkem. Při malém rozměru krčku může dojít k jeho zamrznutí ještě před tím, než ztuhne všechen kov v odlitku a náletek nebude mít možnost do odlitku dosazovat. Příliš velký krček nálitku naopak může způsobit, že poslední místo tuhnutí se z nálitku přesune právě do tohoto krčku. Staženina vzniklá v krčku, může zasahovat až do odlitku. Přítomnost staženiny zjistíme po odříznutí nálitku.

Problémy může způsobit nevhodně navrhnutá vtoková soustava, kdy jsou zářezy zaústěny do masivní části odlitku, která není ošetřena nálitkem.

U grafitizujících slitin, jako jsou litiny, bývají velikosti staženin menší, než například u ocelí nebo nezelezných kovů. Je to dáno grafitickou expanzí, která dokáže z části, nebo úplně, vykompenzovat stažení kovu při tuhnutí. Proto je možné u litin používat menší

nálitky než u ocelí a nebo nálitky vůbec nepoužívat. Funkce grafitizační expanze na zmenšení staženin má velice úzkou spojitost s pevností, nebo spíše, s tuhostí formy. Vysoká tuhost formy bude působit dostatečný odpor proti objemovému růstu během grafitické expanze, čímž bude zajištěn dostatečně vysoký tlak v tavenině, který bude působit proti vzniku staženin.

2.8.2. Opatření k zabránění vzniku vady

Staženiny vznikají v místech tepelných uzlů, nebo v místech, kde se hromadí více tepla, než v jiných oblastech odlitku. Je-li to z konstrukčního a funkčního hlediska součásti možné, pokusíme se s konstruktérem dohodnou úpravy tvarů, abychom tepelné uzly minimalizovali. V případě, že konstrukční úpravy není možné provést, je třeba tepelné uzly ošetřit technologicky. To znamená, využití nálitků pro zajištění přísunu roztaveného kovu do těchto uzlů během jejich tuhnutí, nebo naopak využít chladítka. Využitím chladítek urychlíme tuhnutí tepelných uzlů, které budou tuhnout rychleji než jejich okolí a jejich smrštění bude kompenzováno roztaveným kovem z okolních oblastí. Tím máme šanci dosáhnout usměrněného tuhnutí do míst, která jsou nálitkem ošetřena. Každý tepelný uzel, který musíme ošetřit, znamená značné zvýšení nákladů na výrobu daného odlitku. Zde je prostor pro konzultaci s odběratelem, zda vyžaduje ošetření opravdu každého tepelného uzlu, nebo zda staženina je v daném místě přijatelná a nebude mít vliv na zajištění funkčních vlastností součásti.

Navrhování velikosti nálitků by se mělo řídit pravidlem modulů. Modul odlitku nebo nálitku lze definovat vztahem:

$$M = \frac{V}{S} \quad [7]$$

kde: M - modul odlitku [cm]

V - objem odlitku, nálitku, nebo vybrané oblasti [cm³]

S - ochlazovaný povrch odlitku, nálitku, nebo vybrané oblasti [cm²].

Modul tedy udává poměr mezi objemem a plochou odlitku, nálitku, nebo vybrané oblasti. Čím bude vyšší hodnota modulu, tím bude čas potřebný pro ztuhnutí dané oblasti delší. Aby nálitek plnil svou funkci, musí být jeho modul větší, než je modul oblasti, do které má dosazovat. Pro zajištění správné funkce nálitku platí podmínka:

$$M_n \geq M_{odl} \quad [7]$$

kde: M_n - modul nálitku [cm]

M_{odl} - modul odlitku, nebo modul vybrané oblasti [cm].

Pro lepší využití kovu v nálitcích, nebo v případě, že potřebujeme zmenšit objem nálitků, například kvůli rozměrovému omezení formou, je možné využít izolačních nebo exotermických obkladů. V případě izolačních obkladů se zmenší odvod tepla z nálitku do formy a kov v nálitku vydrží déle natavený. Exotermické nálitky začnou při zahřátí na určitou teplotu sami produkovat velké množství tepla, které ohřívá taveninu v nálitku po určitou dobu.

2.9. Závěr

V této kapitole jsem popsal vady, které se ve slévárenské technologii vyskytují relativně často a je dobré si udělat přehled o tom, jak tyto vady vznikají a jak je možné je řešit. Nechtěl jsem zde uvádět úplně všechny vady, které existují a udělat u nich pouze základní charakteristiku. To by nemělo moc velký význam.

3. MOŽNOSTI ANALÝZ VAD V SW MAGMA⁵

Simulační softwary nám umožňují sledovat průběh výrobního procesu ještě před tím, než dojde k reálnému zahájení výroby. Mohou nám pomoci při predikci problémů, které by mohly ve výrobě nebo výrobním systému vzniknout. Zjištění a vyřešení problémů v předvýrobní fázi, kdy je projekt pouze na "papíře", může uspořit nemalé náklady. Přesunout nálietek, upravit vtokovou soustavu, je mnohem jednodušší a rychlejší ve 3D datech v počítači, než provádět změny na modelové desce a odlévat zkušební série. Možnosti simulací se posouvají neustále dopředu, ale vždy jdou ruku v ruce se současným vývojem v daném sektoru. Zvláště simulace slévárenských procesů vychází z fyzikálních zákonů, takže vše, co chceme simulovat, musíme umět popsat pomocí matematických závislostí.

Je tedy jasné, že není možné do simulace zahrnout úplně všechny vlivy, které do reálného výrobního procesu vstupují. Hlavním vlivem, který se v současné době, a asi ani v budoucnosti nebude dávat do simulace zahrnout, je vliv lidského faktoru. Každý člověk má své pracovní návyky a přístup k práci, a i když dostane přesně daný technologický postup pro výrobu, rád si najde něco, kde by si mohl ušetřit trochu práce a upravit si postup podle sebe. Někdy takovýto zásah může opravdu vést ke zefektivnění výroby, častěji jsou dopady ale opačné. Je tedy potřeba vést pracovníky k technologické kázní.

Lidský faktor se ale vyskytuje i v předvýrobní fázi a i jeho zásah má výrazný vliv na výslednou kvalitu výrobku. Pokud se při tvorbě simulace zadají nepřesná vstupní data, tak i následná simulace a její výsledky budou nepřesné. Pokud dojde k navržení technologického postupu podle takovéto simulace, může se stát, že bude docházet ke vzniku vad, které nebyly předpokládány. Každá slévárna pracuje s nějakým rozsahem chemického složení odlévaného materiálu, s rozsahem licích teplot a podobně. Simulace by měla být vytvořena vždy na stav, který je nejméně příznivý, tedy stav, při kterém je největší riziko vzniku vad.

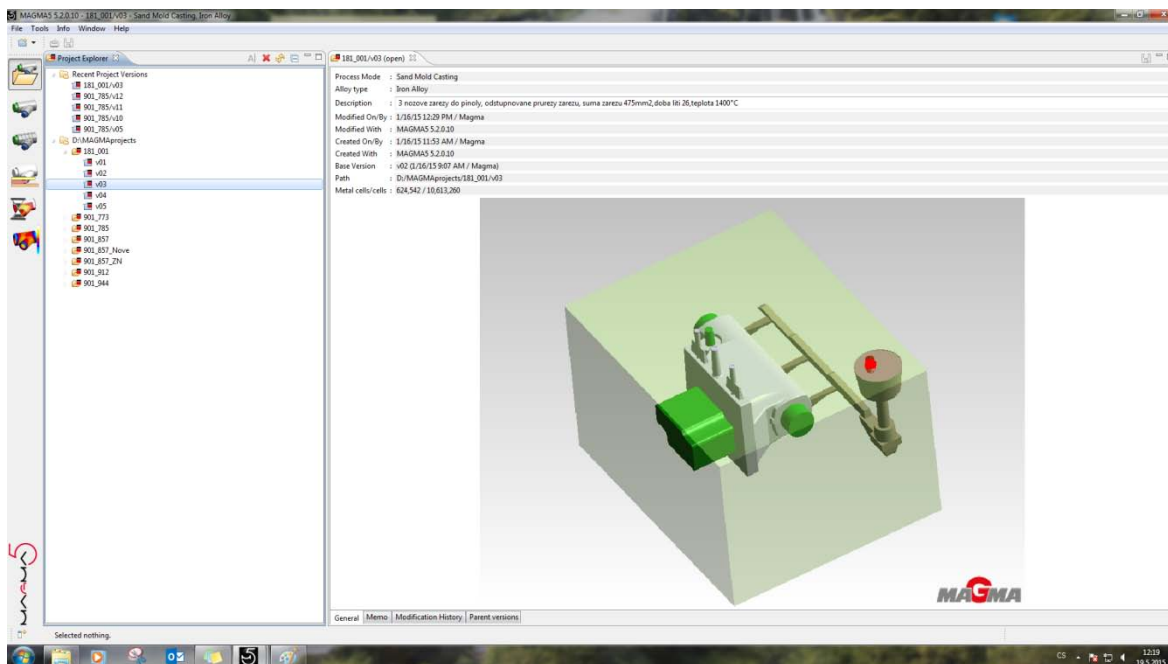
Je ale potřeba mít na paměti, že ze simulace nám nemusí vždy přímo vyskočit obrázek, který jasně ukáže, jaká vada může vzniknout a kde v odlitku se bude nacházet. Často vady vznikají vlivem více parametrů a výsledky simulace se tedy musí hodnotit v souvislostech všech parametrů.

Pro tvorbu své diplomové práce jsem měl k dispozici simulační software MAGMA⁵. Jedná se o velice komplexní software, umožňující simulaci široké řady slévárenských

technologií a vyhodnocování velkého množství parametrů. Tato kapitola bude sloužit jako krátké seznámení s tímto softwarem, jeho možnostmi a s prací s ním.

3.1. Okno projektů

Prvním oknem, se kterým se uživatel setká, je okno s přehledem všech projektů, které byly vytvořeny. Zde se zakládají nové projekty, otevírají staré a tak podobně. Je to tedy takový vstup do MAGMY⁵. Tato úvodní obrazovka je zachycena na obr. 3-1.



obr. 3-1: Úvodní obrazovka

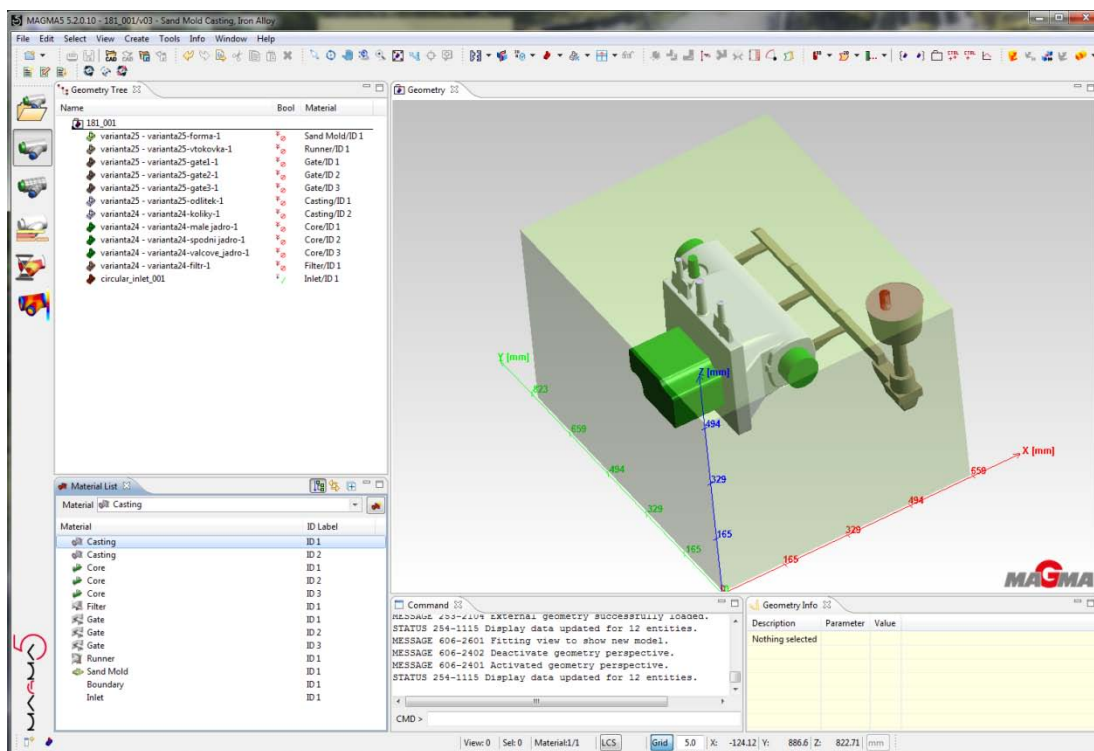
3.2. Geometrie

Tvorba geometrie je hned dalším krokem, který následuje po vytvoření nového projektu. V tomto kroku dochází k načítání 3D dat. Načítání geometrie může probíhat z externích souborů, které byly vytvořeny ve 3D CAD softwaru, nebo MAGMA⁵ obsahuje svůj modul pro tvorbu 3D geometrie. Tento modul má ale velice omezené funkce a hodí se spíše pro tvorbu tvarově jednodušších částí, jako může být nálipek, vtoková soustava, chladítka a podobně. Obrazovka geometrie je zachycena na obr. 3-2.

V tomto kroku se přiřazují materiálové skupiny k jednotlivým částem formy. Je vhodné, jednotlivé části vtokové soustavy a odlitku dělat rozděleně. Při vyhodnocování je někdy potřeba si skrýt nálipek nebo vtokovou soustavu, aby nezkrášlovaly výsledného hodnoty staženin a pokud by vše bylo zahrnuto pod jednu materiálovou skupinu se stejným identifikačním číslem (dále jen ID), nebylo by možné jednotlivé části skrýt. Proto vtoková soustava, zářezy, nálipek i odlitek, mají svou materiálovou skupinu. Díky správnému rozdělení do těchto skupin získáme i další parametry do vyhodnocování. MAGMA⁵ umí

stanovit průtokové množství taveniny jedním zářezem. Pokud každému zářezu přiřadíme jiné ID, je pak možné sledovat, kolik kovu proteče každým zářezem. Když by měly všechny zářezy stejné ID, zjistíme akorát celkový průtok všemi zářezy.^[3]

Aby bylo možné simulovat i plnění, musí se do geometrie vložit "Inlet", který definuje prostor, kterým se bude forma plnit.



obr. 3-2: Nastavení geometrie

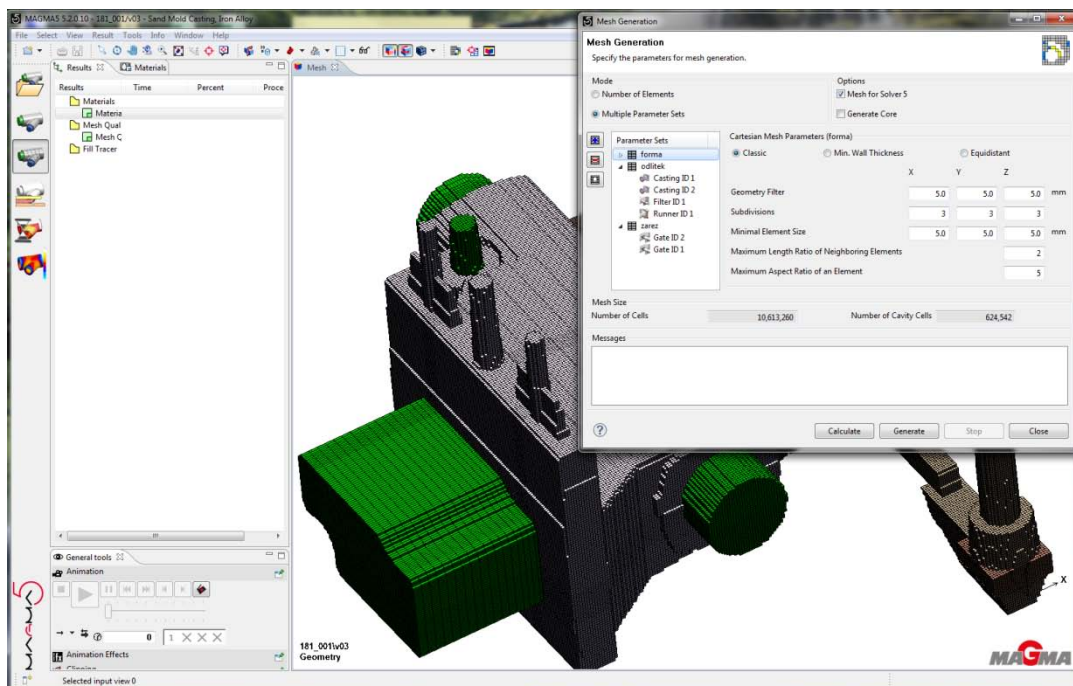
3.3. Tvorba výpočetní sítě

Po vytvoření geometrie následuje tvorba výpočetní sítě. Tento krok má asi nejvýznamnější vliv na dobu trvání výpočtu a také na detailnost výsledků. Na jednu stranu bychom chtěli, aby výpočet proběhl co možná nerychleji, tedy aby výpočetní síť byla hrubá, s malým počtem výpočetních elementů. Proti tomu ale stojí fakt, že pokud navrheme příliš hrubou síť, může dojít ke skrytí některých vad. Toto riziko je asi největší při vyhodnocování staženin, kdy se v příliš velkém elementu může staženina skrýt. Také se doporučuje, aby v každé stěně odlitku byly minimálně tři elementy vedle sebe, aby bylo možné lépe spočítat vstup tepla a další vlastnosti.

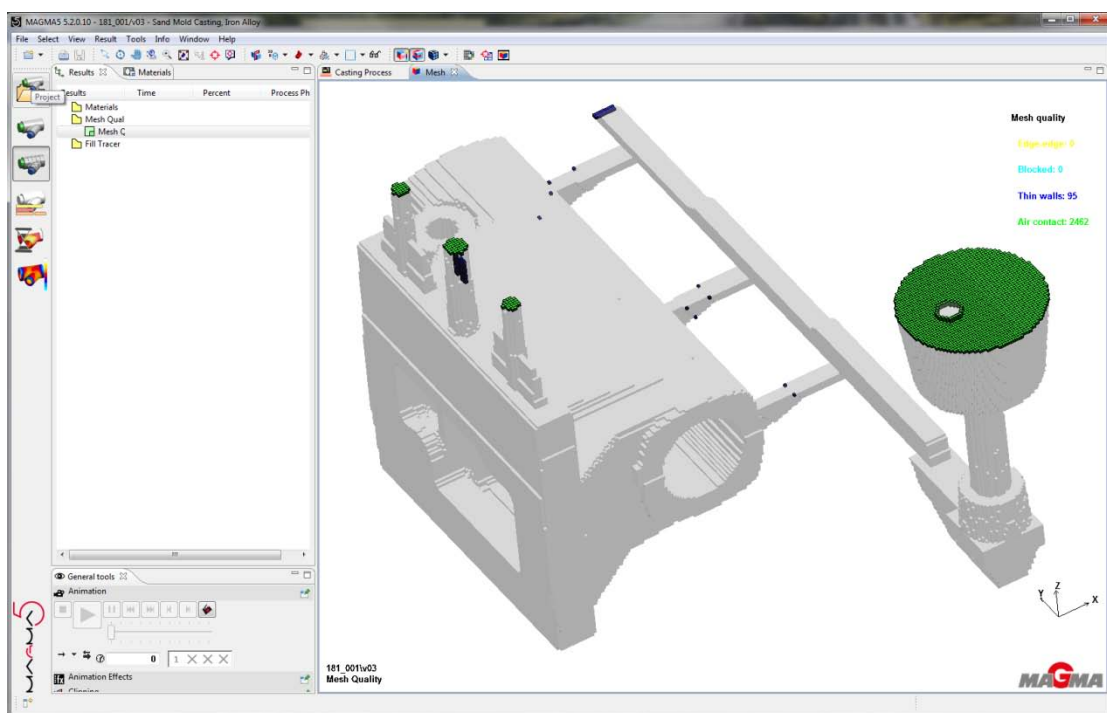
V softwaru MAGMA⁵ je možné elementy pro výpočetní síť vygenerovat několika způsoby (obr. 3-3). Prvním, méně používaným, je způsob, kdy zadáme počet elementů, který chceme, aby výpočetní síť měla a software si následně dopočítá velikost elementů, aby se do tohoto počtu vešel. Druhým, více využívaným, je způsob více parametrický

nastavení. Ten naopak spočívá v definování velikosti elementů v jejíž závislosti pak dojde k vypočtení počtu elementů. Ze zadaných parametrů se nechá vygenerovat výpočetní síť.

Po vygenerování sítě je možné provést kontrolu kvality sítě (obr. 3-4), zda se v síti nevyskytují oblasti s příliš tenkou stěnou (stěny s počtem elementů menší než 2), zda nejsou v odlitku oblasti, které by byly odříznuté od taveniny, nebo plochy, které jsou v kontaktu s okolním atmosférou.^[4]



obr. 3-3: Nastavení sítě

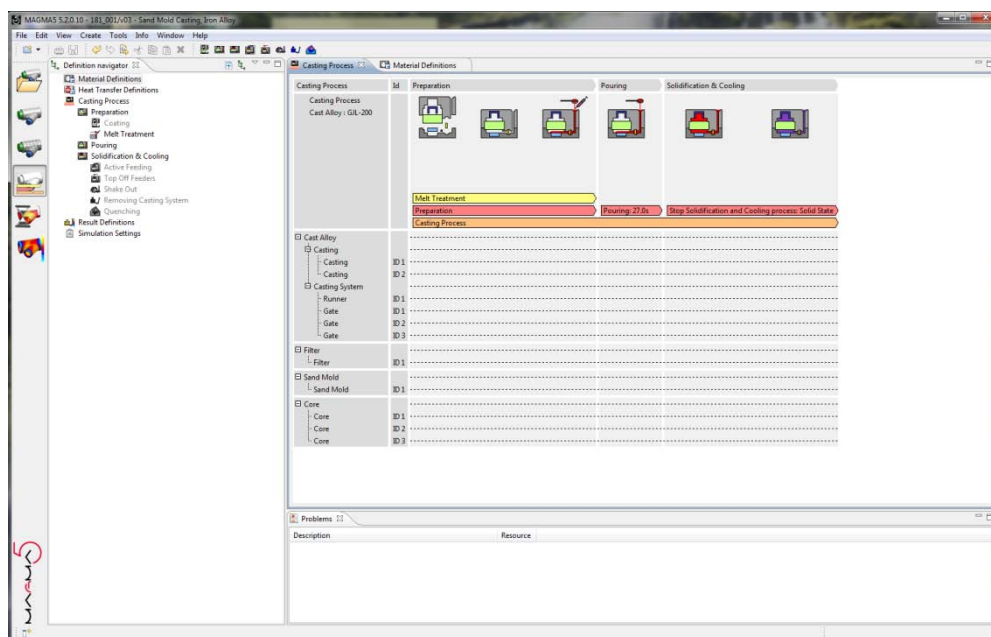


obr. 3-4: Mesh Quality

3.4. Nastavení parametrů simulace

Nastavení parametrů simulace je posledním krokem před zahájením samotné simulace. Parametry jsou rozděleny do několika skupin, od zadání materiálů, přestup tepla mezi materiály, proces slévání až po tuhnutí odlitku a jeho vytloukání z formy. Dále je možné si nastavit, jaké výsledky chci vypočítat. Je i možné vynechat výpočet plnění formy a počítat pouze průběh tuhnutí pro případ, že chceme zjistit, kde se nachází teplotní uzly, kde hrozí vznik staženin a podobně. Tyto výsledky jsou sice trochu zkreslené, protože teplotní pole odlitku je na začátku tuhnutí konstantní, ale první pohled na problematická místa to podá. Výpočet samotného tuhnutí je také výrazně rychlejší, než když probíhá výpočet i plnění. Tím se dá ušetřit čas při optimalizaci polohy nálitků, chladítek a podobně.

Do zadání materiálů spadá nastavení všech materiálů a jejich vlastností. Od chemického složení taveniny, po teplotu chladítek při jejich vkládání do formy. U materiálu odlitku se nastaví chemické složení odpovídající dané slévárně nebo normě, definice mimopecní metalurgie, teplota taveniny při odlévání. Dále se zadávají materiály formy, jader, chladítek, filtrů, izolačních nebo exotermických obkladů a dalších částí přítomných ve formě. [4]



obr. 3-5: Nastavení parametrů simulace

3.5. Vyhodnocování výsledků simulace

S lehkou nadsázkou by se dalo říct, že předchozí kroky týkající se nastavení simulace, by mohl dělat kdokoliv, kdo byl proškolen v práci s daným simulačním softwarem. Stačí znát vstupní parametry a samotné nastavení už je jednoduché. Okamžik, kdy musí nastoupit člověk s povědomím o slévárenské technologii, je při vyhodnocování

simulace. Tento krok již nelze nijak automatizovat. Ke každému návrhu se musí přistupovat jednotlivě, každý návrh má svá specifika a svá rizika vzniku vad. Takže vyhodnocování simulací by měl dělat člověk, který zná tyto souvislosti a dokáže z nich vyčíst možná rizika a případně může navrhnout úpravy technologie pro potlačení těchto rizik.^[3]

Simulační software je nám schopný dodat velké množství různých výsledků, od průběhu plnění dutiny formy taveninou, přes rychlosti kovu v zářezech, až po uzavřený vzduch v tavenině. Někdy stačí provést analýzu pouze jednoho parametru, abychom zjistili, kde by mohl být problém. Většinou je ale potřeba dát si do souvislosti více parametrů, aby vyhodnocení bylo přesné. Takovým základním zástupcem, kdy je potřeba sledovat více parametrů, je uzavřený plyn jak na povrchu odlitku, tak i v jeho objemu. Zde se musí sledovat současně teplota taveniny a tlak plynu, případně množství uzavřeného vzduchu. Pokud dochází k uzavírání plynu v místech, kde je nižší teplota, vzniká zde riziko vzniku otevřených bublin.

V kapitole 3. jsem popsal několik slévárenských vad, a v této kapitole se pokusím popsat postup, jak je možné tyto vady pomocí simulačního softwaru predikovat.

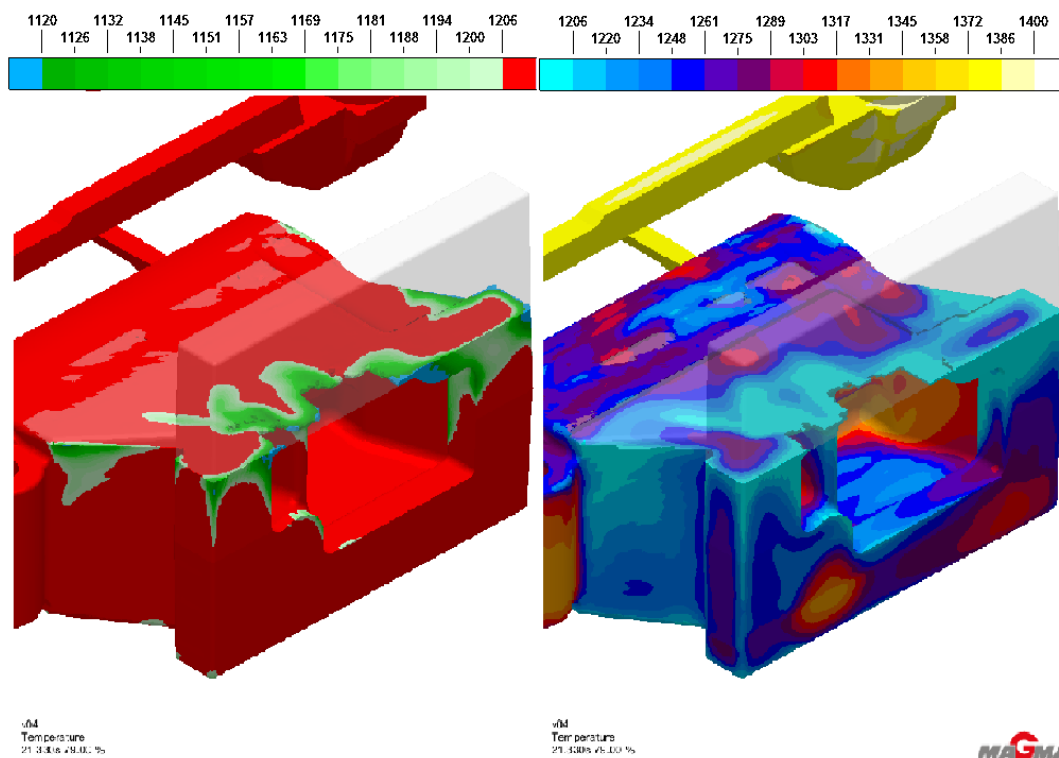
3.5.1. Nezaběhnutí a zavaleniny

Jednou z příčin vzniku vady nezaběhnutí je špatná zabíhavost kovu. Zabíhavost kovu je dána typem materiálu, jeho chemickým složením a jeho teplotou při odlévání. Typ materiálu a jeho chemické složení není problém do výpočtu zahrnout. Chemické složení se u každého materiálu pohybuje v určitém rozmezí a při nastavování simulace je vždy třeba počítat s tou nejméně příznivou variantou, která může nastat. Jen v tom případě jsme simulací krytí pro všechny případy.

Chemické složení a typ materiálu je tedy do simulace započítán. Poslední proměnnou je teplota taveniny při plnění dutiny. Tu je možné sledovat ve výsledcích simulace pod parametrem "Temperature". Aby bylo zajištěné správné vyhodnocení, je potřeba znát teplotu liquidu pro uvažovanou slitinu. Pro litiny s lupínkovým grafitem existují vzorce pro její určení. Pro litiny s kuličkovým grafitem takovéto výpočty neexistují a dají se dohledat maximálně tabulkové hodnoty pro určité průměrné chemické složení. Lepším krokem je provést termickou analýzu taveniny s nejméně výhodným chemickým složením, a tím zjistit nejméně příznivou teplotu liquidu. Bohužel, ne všechny slévárny, pracující s litinou s kuličkovým grafitem mají možnost si termickou analýzu provést. Při simulaci se tedy odkazují na teplotu, kterou jim nabídne software, nebo jí mají zjištěnou jiným způsobem.

Na obr. 3-6 jsou vidět dvě možnosti vyhodnocení teploty taveniny ve formě. Na obrázku vlevo je stupnice nastavena tak, že dolní hodnota stupnice je pro teplotu solidu a horní hodnota pro teplotu liquidu. Tavenina, jejíž teplota je nad teplotou liquidu má červenou barvu. Tavenina s teplotou v rozmezí solidu a liquidu má odstín zelené. Čím tmavší odstín, tím nižší teplota. Tavenina, která se svojí teplotou dostane dokonce až pod teplotu solidu, má barvu modrou. Na obrázku vpravo je druhá možnost vyhodnocení teploty. Zde je spodní hodnotou na stupnici teplota liquidu a horní hodnotou je počáteční teplota taveniny, kterou tavenina měla při zahájení lití. Zobrazení je v několika odstupňováno v několika barvách.

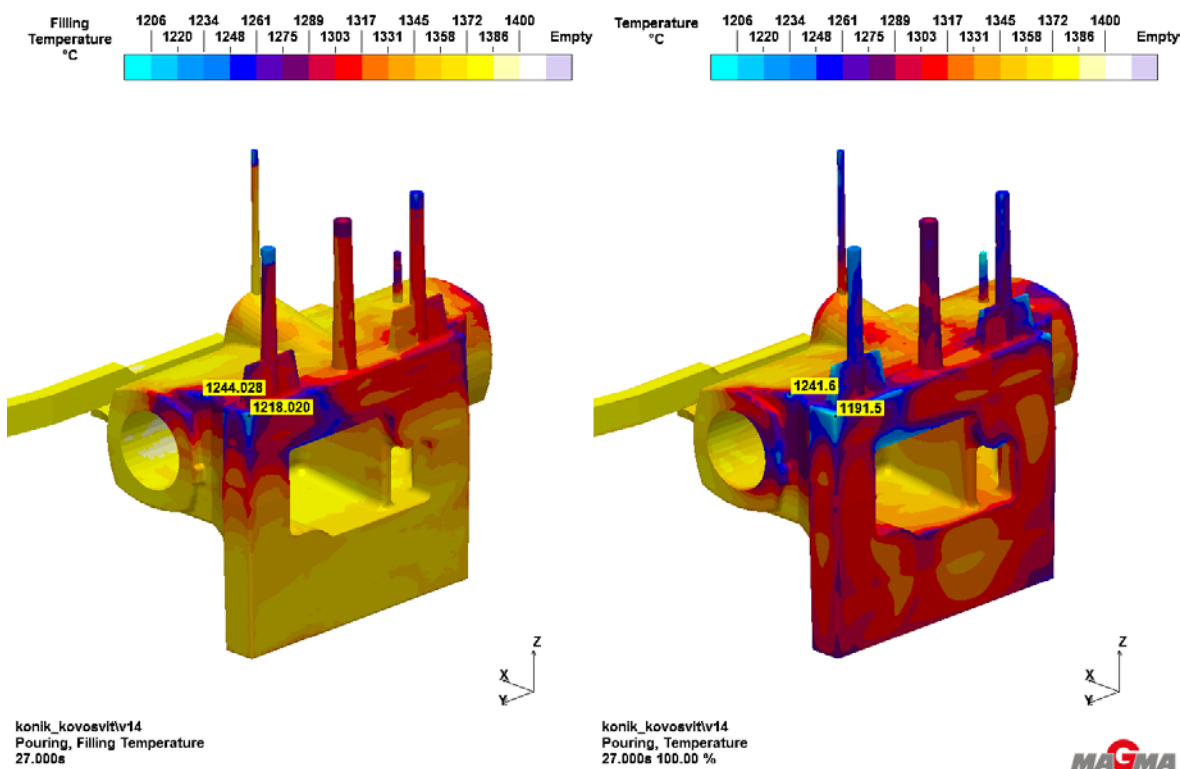
V případě, kdy teplota taveniny klesne při plnění pod teplotu liquidu, vzniká riziko vzniku zavaleniny i nedolití. Pokud dojde k takovému poklesu teploty na čele taveniny, je to známka i toho, že tavenina je dlouhou dobu ve styku s atmosférou ve formě a pravděpodobně na ní budou vytvořeny oxidy kovu. Pokud dojde v některém místě odlitku k setkání dvou proudů taveniny, které budou mít nízkou teplotu čela kovu, nedojde k jejich splnutí a promísení a v místě tohoto styku vznikne zavalenina, neboli také studený spoj. Nízká teplota taveniny také znamená zvýšení viskozity taveniny a s tím spojené snížení zabíhavosti. V případě, že se v horní části dutiny formy nachází stěna o malé tloušťce, a tavenina k ní doteče s nízkou teplotou, případně se zoxidovaným povrchem, může se stát, že do této tenké stěny nezaběhne a vznikne vada "Nezaběhnutí".



obr. 3-6: Teplota taveniny

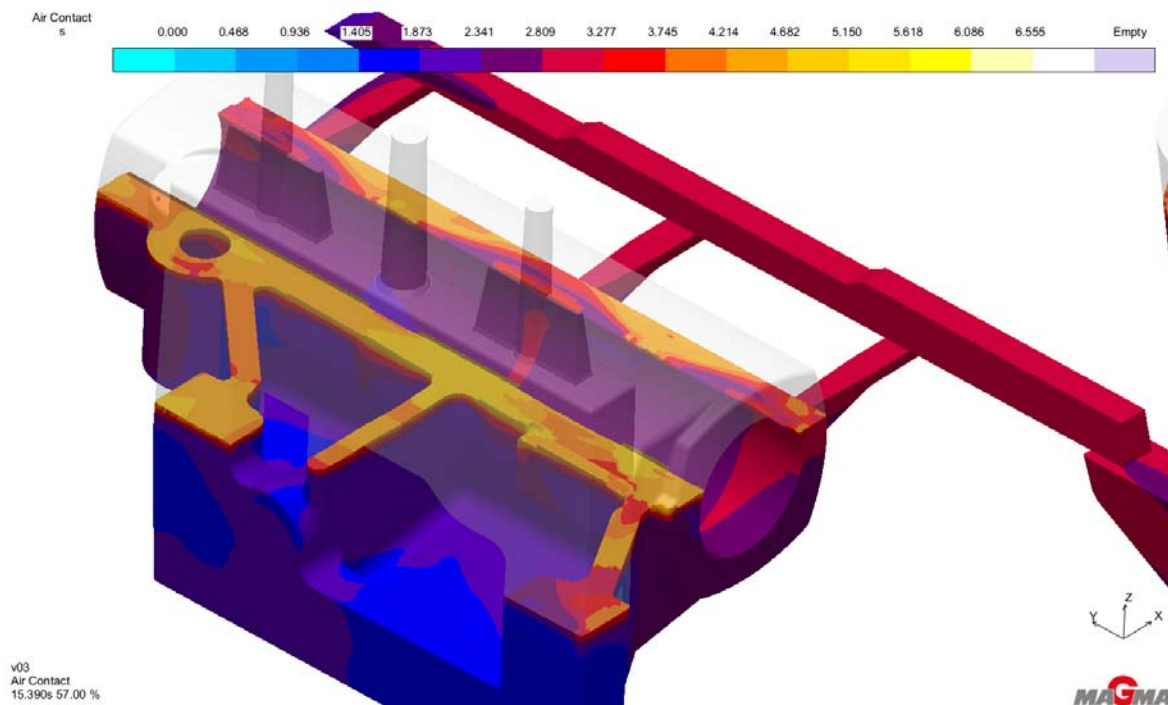
U vyhodnocování teplotního pole pomocí tohoto kritéria je podstatn, vyhodnocovat hodnoty progresivně v celém průběhu plnění. Může se stát, že na odlitku bude nějaké tenké žebro, spíše ve spodní části formy, do kterého tavenina nateče na počátku plnění a jakmile dojde k jeho zaplnění, tavenina v něm přestane proudit a začne chladnout. Pokud se pak teplota vyhodnotí až na konci lití, mohlo by dojít k nepřesnému vyhodnocení, protože při vyhodnocení by tato oblast vypadala, jako by tam přitékal studený kov a mohlo by zde právě hrozit nebezpečí vzniku zavalenin. Takovému chybnému vyhodnocení se dá předejít buď sledováním celého průběhu plnění, nebo se dá využít parametr s názvem "Filling Temperature". Toto kritérium sleduje teplotu čela taveniny v průběhu plnění dutiny formy. Říká tedy, jakou teplotu měla tavenina, když se dostala na dané místo ve formě. Při porovnání konečné teploty z kritéria "Temperature" a hodnot z kritéria "Filling Temperature" se dají v některých případech zjistit opravdu velké rozdíly. To platí hlavně pro tvarově členitější odlitky.^[4]

Na obr. 3-7 je vidět porovnání výsledných hodnot z uvedených kritérií. Porovnání je provedeno na odlitku, který jsem ve své diplomové práci řešil. Vzhledem k tomu, že se nejedná o nijak tvarově složitý odlitek, a i poměrně silnostěnný, není zde rozdíl mezi výslednými teplotami až tak velký. Nicméně rozdíl v teplotních polích vidět je a v horním rohu odlitku je rozdíl teplot téměř 30°C.



obr. 3-7: Porovnání Filling Temperature a Temperature

Pokud bychom chtěli analyzovat riziko vzniku oxidické vrstvy na hladině kovu, mohl by k tomu napomocet parametr, který analyzuje, jak dlouho je hladina taveniny v kontaktu s atmosférou ve formě. Tento parametr se nazývá "Air Contact" a obrázek z jeho analýzy je na obr. 3-8. Tento parametr najde využití hlavně při odlévání slitin hliníku, u kterých dochází k velice rychlé oxidaci taveniny.



obr. 3-8: Air Contact

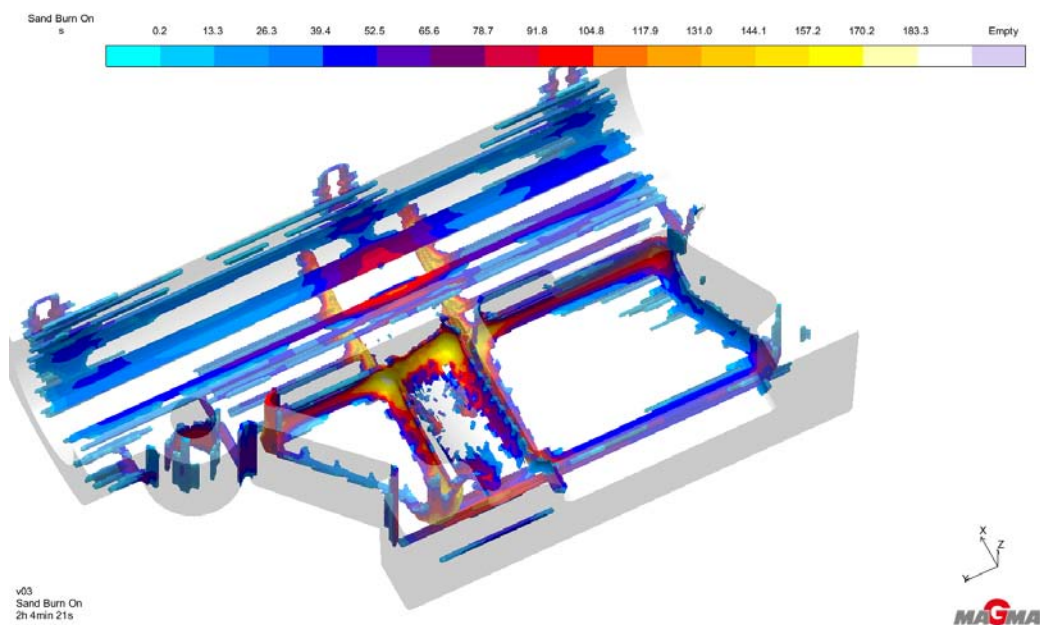
3.5.2. Připečeniny

Připečeniny jsou jednou z vad, jejíž simulace může být trochu obtížná. Připečeniny vznikají interakcí taveniny a formovací směsi a nastavit do simulačního softwaru přesné charakteristiky formovacích směsí, které se ve slévárně používají, může být obtížné. Hlavně ani slévárny někdy nevědí, jaké vlastnosti u svých formovacích směsí dosahují a tedy ani nevědí, kdy přesně může dojít ke vzniku připečenin nebo penetrace. V softwaru MAGMA⁵ je ale možné, si udělat alespoň malou představu, která místa ve formě, nebo na jádrech, mohou být tepelně zatěžovaná a kde může vznikat riziko vzniku těchto vad.

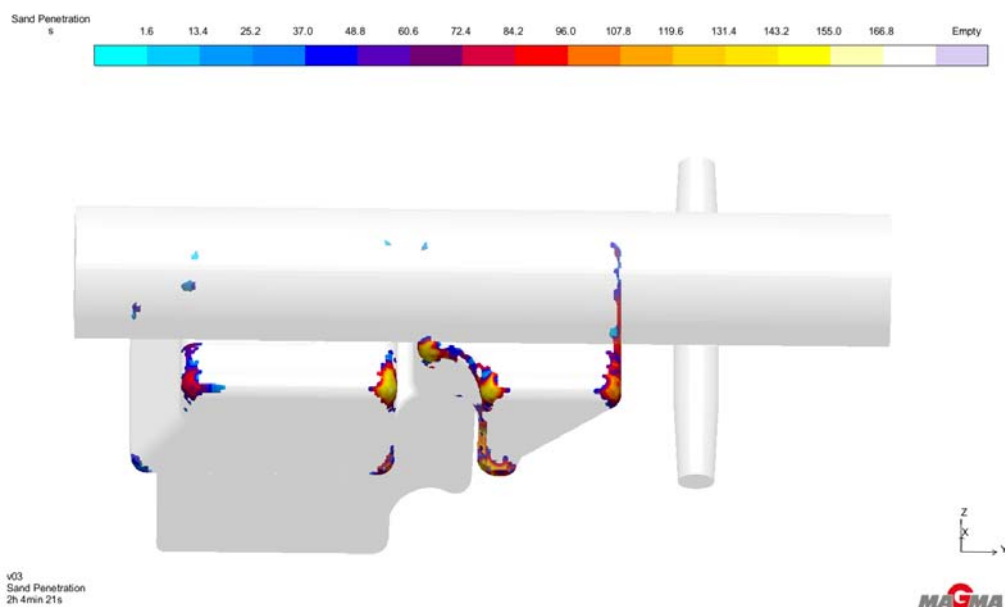
Na obr. 3-9 je kritérium "Sand Burn On", které zobrazuje místa, která by mohla být náchylná na vznik připečenin. Jedná se převážně o rohy s menším poloměrem zaoblení, nebo místa, kde je velký průtok taveniny. obr. 3-10 zobrazuje kritérium "Sand Penetration". To zobrazuje místa na formě, ve kterých by mohlo docházet k penetraci kovu do formovací směsi.

Při vyhodnocování rizika vzniku připečenin nebo penetrace může dojít k určité odchylce z důvodu, že v reálné výrobě jsou jádra ošetřena ochrannými nátěry, které u jader částečně zvyšují jejich odolnost proti působení zvýšených teplot. Tyto nátěry je složité do simulace započítat. MAGMA⁵ sice umí počítat s ochranným nátěrem jak forem, tak i jader, ale je potřeba znát vlastnosti těchto nátěrů. Ty ale většinou chybí, protože je výrobce neposkytuje. Pokud se ale při analýze těchto parametrů najdou místa, která jsou opravdu hodně zatěžovaná, je pravděpodobné, že se problémy objeví i u skutečných odlitků.

Například u odlitku, který je na obr. 3-10, jsou vidět nejvíce zatěžovaná místa v rozích tvarového jádra a opravdu v těchto místech vznikaly problémy s připečeninami.



obr. 3-9: Sand Burn On



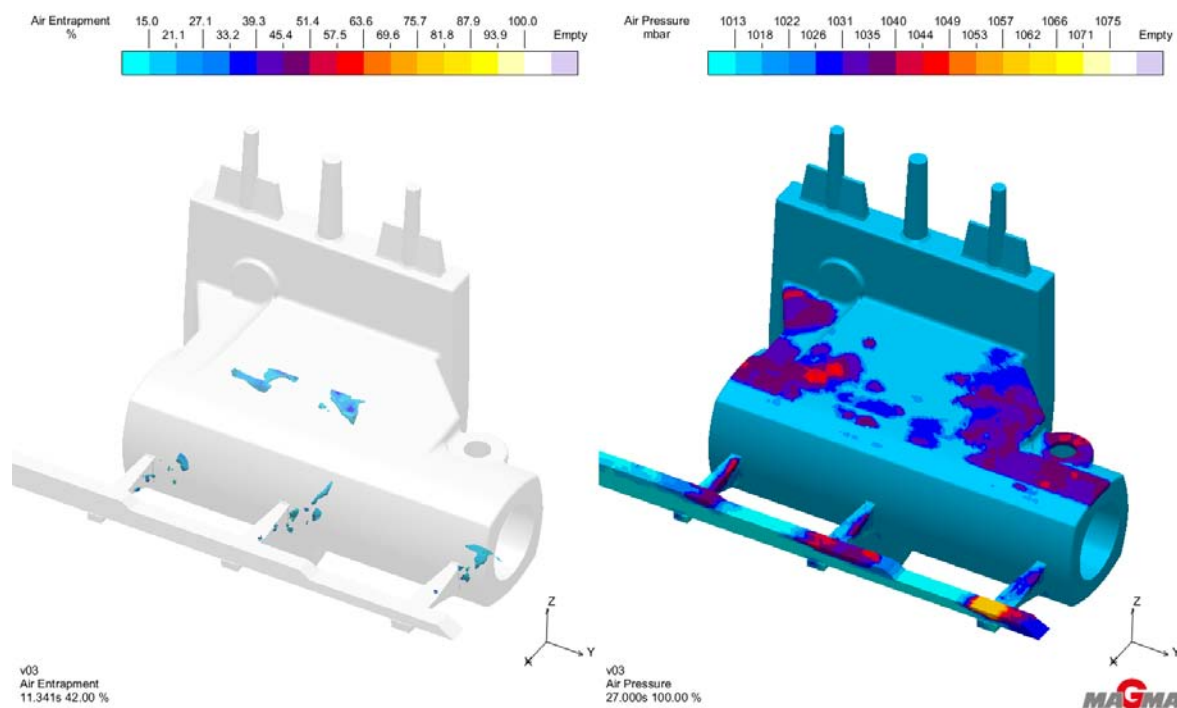
obr. 3-10: Sand Penetration

3.5.3. Bubliny

Bubliny vznikají vlivem plynu přítomného v dutině formy nebo v tavenině. Pro vyhodnocování rizika vzniku vad spojených s přítomností plynu v dutině formy se v softwaru MAGMA⁵ používají dva základní parametry. Prvním je tlak plynu v dutině formy působící na hladinu taveniny - "Air Pressure" a druhým je analýza množství uzavřeného plynu v tavenině - "Air Entrapment".

První parametr slouží k vyhodnocení hlavně povrchových vad. Druhý pomáhá při analýze rizika vzniku bublin v objemu odlitku.

Oba tyto parametry jsou na obr. 3-11. Vlevo parametr "Air Entrapment" a vpravo "Air Pressure". Oba tyto parametry jsou progresivní, je tedy možné jejich chování sledovat v celém průběhu plnění formy. A je i velice vhodné jejich chování sledovat v celém průběhu plnění. Pokud bychom sledovali množství pohlceného plynu pouze na konci plnění, mohli bychom usoudit, že je vše v pořádku, protože žádný pohlcený plyn bychom asi nenašli. Stejně tak, pokud bychom sledovali tlak plynu pouze na konci plnění, tak zjistíme, kde došlo k uzavírání plynu taveninou, ale už nevíme, za jakých podmínek. Při analýze tlaku plynu je vhodné, současně sledovat průběh teplot taveniny v místech se zvýšeným tlakem plynu. Pokud v místech se zvýšeným tlakem plynu je dostatečně vysoká teplota taveniny, nemělo by docházet k žádným problémům a plyn by měl mít čas uniknout přes formu. V případě, že v těchto místech bude teplota taveniny nízká, může se stát, že do hladiny taveniny se obtisknou plynové bubliny, které na ploše odlitku zůstanou.



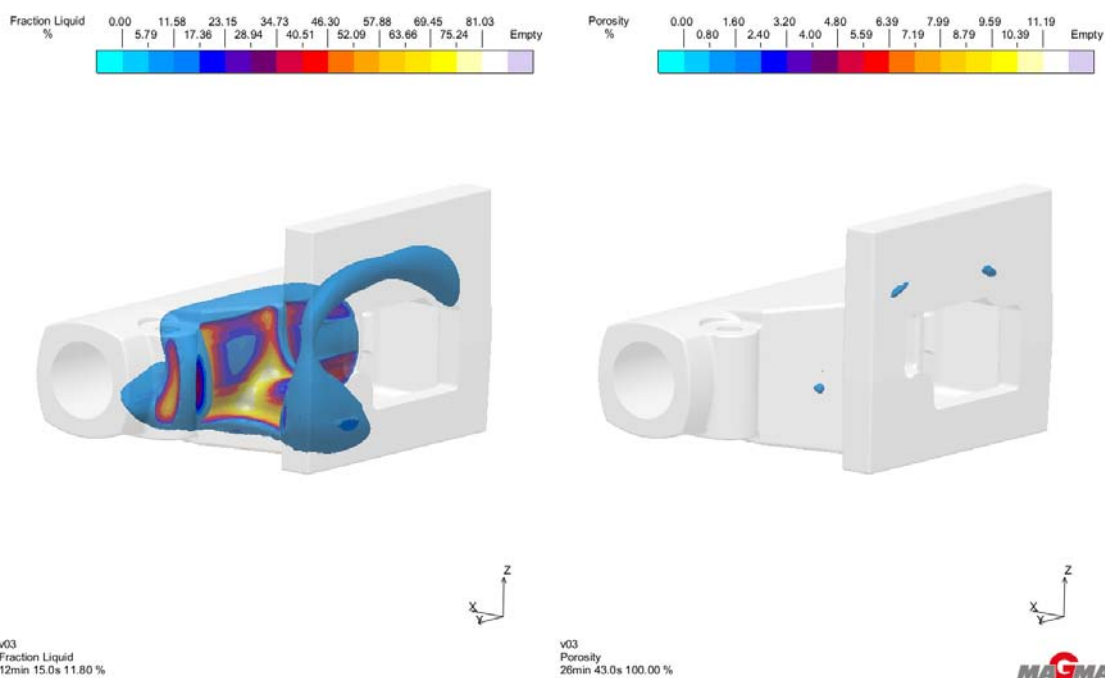
obr. 3-11: Air Entrapment a Air Pressure

Jediný nedostatek u softwaru MAGMA⁵ byl ten, že software při výpočtu tlaku a množství plynu ve formě nepočítal s plynem obsaženým v jádrech. Takže pokud bylo při výrobě použito masivní jádro, MAGMA⁵ neuměla do simulace zahrnout množství plynu, které se z jádra uvolní. Tento nedostatek už byl ale doplněn v nové verzi, která vyšla v době, kdy jsem dokončoval svou diplomovou práci, tedy v květnu 2015. Neměl jsem bohužel možnost provést porovnání celkového tlaku plynu, který byl vypočten v předchozí verzi, a který by vyšel ve verzi nové.

3.5.4. Staženiny

Riziko vzniku staženin je možné analyzovat ze dvou různých parametrů. První parametr, "Porosity", ukáže přímo hodnotu a polohu staženiny po ztuhnutí odlitku. U litin může být zajímavé sledovat vznik staženin progresivně v průběhu celého tuhnutí. Díky grafitické expanzi totiž může docházet v průběhu tuhnutí ke vzniku staženin, které jsou ale následně grafitickou expanzí zase potlačeny a zmizí.

Druhým parametrem, který je možné sledovat je "Fraction Liquid", tedy podíl tekuté fáze v odlitku během jeho tuhnutí. Analýzou tohoto parametru můžeme sledovat usměrnění tuhnutí taveniny a analyzovat oblasti posledního tuhnutí taveniny. Pokud používáme nálitky, snažíme se dosáhnout toho, aby poslední místo tuhnutí bylo právě v nálitku. Při odlévání litiny s lupínkovým grafitem, se nálitky v častých případech používat nemusí, ale i tak je třeba tepelné uzly sledovat a v případě potřeby provést jejich ošetření.



obr. 3-12: Fraction Solid a Porosity

Na obr. 3-12 je vidět vyhodnocení obou parametrů. Průběh tuhnutí s teplotními uzly je na obrázku nalevo. Vyhodnocení hodnoty a polohy konečných staženin je na obrázku vpravo. Kromě těchto parametrů, by se analýza posledně tuhoucích míst dala provést i dalšími parametry, ale do takových detailů už nemá smysl zacházet. Pro základní vyhodnocení porezity stačí uvedené dva parametry.

3.5.5. Analýza mikrostruktury

Při práci na své diplomové jsem se dostal v softwaru MAGMA⁵ do styku především s modulem "Iron". Tento modul je stavěný pro simulace litin a možnosti analýz jsou opravdu rozsáhlé. Například při analýze tuhnutí litiny s kuličkovým grafitem, je možné zjistit, kolik kuliček grafitu se vyloučí v dané oblasti odlitku. Tento parametr je pak následně možné změřit i na skutečném odlitku. Z analýzy mikrostruktury lze také zjistit, zda v některých místech, nebude docházet k příliš rychlému ochlazování taveniny a vzniku zákalky. Tedy, zda v některých oblastech nebude tavenina tuhnout podle metastabilního diagramu Fe - Fe₃C, za vzniku cementitu.

3.5.6. Analýza mechanických vlastností

V softwaru MAGMA⁵ je také možné zjistit, jaké mechanické vlastnosti bude mít odlitek pod odlití. Jedná se analýzu pevnosti v tahu, modulu pružnosti a tvrdosti podle Brinella. Tyto vlastnosti jsou u litin výrazně ovlivněné tloušťkou stěny odlitku a chemickým složením. Analýza těchto vlastností se hodí zvláště v případě, kdy zákazník požaduje určité hodnoty mechanických vlastností. Díky této simulaci je možné zjistit, za je možné těchto vlastností dosáhnout při požadované tloušťce stěny a při daném chemickém složení.

3.5.7. Optimalizace v softwaru MAGMA⁵

V květnu roku 2015 došlo k vydání poměrně rozsáhlé aktualizace softwaru MAGMA⁵. Tato nová verze přináší řadu nových funkcí, například, jak jsem uvedl, zahrnutí obsahu plynu z jader do výpočtu. Největší novinkou této verze ale je, že ze simulačního softwaru, se stává software optimalizační. Zjednodušeně řečeno to znamená, že v původní verzi se o hledání optimálního návrhu staral technolog, který navrhoval různé varianty technologie v návaznosti na simulace, které vytvořil a vyhodnotil. V nové verzi, se o hledání optimálního návrhu stará samotný software.

Na první pohled by se mohlo zdát, že tím přijdou technologové o práci. To ale v žádném případě nehrozí. MAGMA⁵ sice umí navrhnout nějakou optimální variantu, ale

pořád je na technologovi, aby zadal vstupní podmínky. To znamená nějaký původní návrh vtokové soustavy, která se bude upravovat, aby definoval plochy, na kterých mohou být nálitky a zadal rozmezí velikostí těchto nálitků. To samé s chladítky a odvodušňovacími kolíky. Zadání všech těchto parametrů tedy může být poměrně náročný úkol a je potřeba zkušeností technologa s daným výrobním procesem, aby do softwaru zadal takové vstupní podmínky, aby pak výsledný optimalizovaný návrh, bylo možné v dané slévárně vůbec vyrobit. Do vstupních podmínek se také zadávají parametry, které chceme simulací dosáhnout. Například maximální hodnotu staženin, maximální tlak plynu a podobně.

Software MAGMA⁵ z těchto vstupních podmínek následně vypočítá širokou řadu verzí s různými vlastnostmi. Každá z verzí je výhodnější v různém parametru a zde právě nastupuje opět práce technologa, aby ze všech vypočtených variant vybral takovou, která bude pro daný odlitek nejpříjemnější.

4. ROZBOR TECHNOLOGIČNOSTI ZADANÉHO ODLITKU

V této kapitole provedu rozbor technologičnosti zadaného odlitku z pohledu slévárenské technologie. Při rozboru technologičnosti je třeba brát v úvahu, kromě tvaru odlitku, i materiál, ze kterého bude odlitek vyráběn. Například, budou-li na odlitku přítomny stěny o tloušťce 5 mm a materiál odlitku bude předepsán EN GJL 200 (litina s lupínkovým grafitem, označení dle normy EN 1561), neměly by vzniknout při odlévání odlitku problémy s nezaběhnutím, za předpokladu, že budou dodrženy předepsané technologické podmínky. Pokud by byl ten samý odlitek navržen z oceli, už by byly s jeho výrobou poměrně velké problémy z důvodu výrazně horší zabíhavosti oceli oproti litině.

4.1. Základní data k zadanému odlitku

Při řešení technologičnosti odlitku jsem vycházel ze základních parametrů, mezi které patří tvar odlitku, materiál, ze kterého se bude odlitek vyrábět, formovací směs, a v neposlední řadě technologie výroby forem. Parametry vztahující se k odlitku, který mi byl zadán, jsou uvedeny v Tab. 4-1.

Tab. 4-1: Základní parametry

Materiál odlitku	EN GJL 200	
Hmotnost čistého odlitku	40	kg
Objem výroby	cca 100	ks/rok
Formovací směs	Bentonitová formovací směs	
Technologie formování	Automatická formovací linka	

4.1.1. Chemické složení a mechanické vlastnosti

Pod označením EN GJL 200 se nachází litina s lupínkovým grafitem. Chemické složení litiny je uvedeno v Tab. 4-2. U litin s lupínkovým grafitem ale není chemické složení směrodatným parametrem, který by byl odběratelem odlitku požadován, nebo který by byl uveden v normě. Každá slévárna má svůj "recept" a své vnitřní předpisy na chemické složení pro jednotlivé třídy litin. Chemické složení uvedené v tabulce níže je tedy pouze vnitřní předpis slévárny společnosti KOVOSVIT.

Tab. 4-2: Chemické složení EN GJL 200

třída materiálu	C [%]	Si [%] před očkovaním	Si [%] po očkování	Mn [%]	P _{max} [%]	S _{max} [%]	C _E před očkovaním	S _c před očkovaním
20	3,45 - 3,25	1,66 - 2,06	1,80 - 2,20	0,5 - 1,0	0,2	0,15	3,70 - 3,90	0,89 - 0,96

U litin jsou směrodatné parametry pevnost v tahu a tvrdost. Tyto parametry jsou pro jednotlivé třídy litin předepsány normou a jsou to parametry, které slévárna musí zajistit. Hodnota těchto parametrů má spojitost s chemickým složením litiny. Takže i když má slévárna volnost v tom, s jakým chemickým složením litinu namíchá, musí s tímto složením zajistit, že výsledný odlitek bude mít požadované mechanické vlastnosti. U označení EN GJL 200, označuje číslovka 200 hodnotu minimální pevnosti v tahu v $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$. Hodnoty mechanických vlastností řešené litiny jsou uvedeny v Tab. 4-3.

Tab. 4-3: Tabulka mechanických vlastností litiny EN GJL 200^[9]

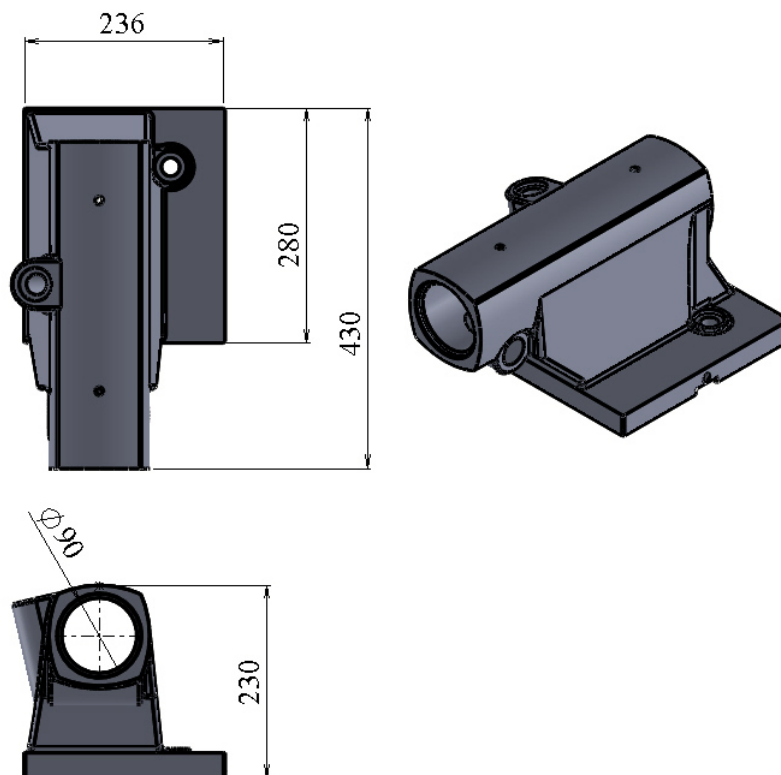
Pevnost v tahu	Max. tvrdost	Modul pružnosti	Lomová houževnatost
R_m [$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$]	HB	E [$\text{kN}\cdot\text{mm}^{-2}$]	K_{IC} [$\text{N}\cdot\text{mm}^{-3/2}$]
200 - 300	200	88 - 113	400

Pevnost v tahu R_m , uvedená v tabulce, byla naměřena pro vzorek o průměru $d = 30$ mm, který byl odlit ve formě odděleně od odlitku. Hodnoty naměřené ze vzorku o tomto rozměru odpovídají v odlitku tloušťce stěny $t = 15$ mm^[9].

Mechanické vlastnosti u litin jsou velmi ovlivněny tloušťkou stěny odlitku. Pokud bychom vzali minimální a maximální hodnotu tvrdosti pro materiál EN GJL 200, pro tloušťku stěny 5 až 10 mm, dostaneme hodnoty tvrdosti, pohybující se od HB 140 do HB 225. Hodnoty tvrdosti pro tloušťku stěny 40 až 80 mm se pohybují v rozmezí od HB 100 do HB 175^[9]. Na první pohled je vidět značný rozdíl tvrdostí v různých tloušťkách stěn a ta samá závislost platí i v případě pevnosti v tahu. S touto skutečností by měli počítat zejména konstruktéři při návrhu součásti a požadavky na pevnost či tvrdost součásti vztahovat ke stěnám, které budou nejvíce zatěžovány a kde je opravdu potřeba zajistit požadované mechanické vlastnosti.

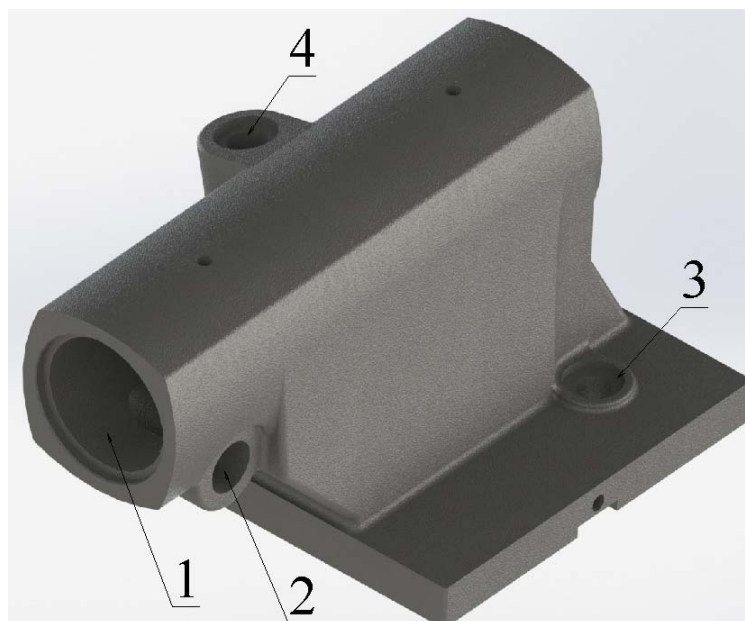
4.1.2. Tvar odlitku

Na výrobu odlitku má největší vliv samozřejmě tvar odlitku. Tvar odlitku určuje, v jaké poloze se bude odlitek odlévat, zda bude potřeba využít tvarová jádra pro předlévání dutin, nebo pro odlití složitějších vnějších tvarů. Z tvaru také můžeme hned vidět, zda jsou v odlitku místa, kde by mohly vznikat tepelné uzly, tedy místa, které bude potřeba ošetřit nálitkem nebo chladítkem. Základní rozměry uvažovaného odlitku jsou uvedeny na obr. 4-1. Z důvodu utajení není možné dodat kompletní výkresovou dokumentaci.



obr. 4-1: Základní rozměry odlitku

3D model odlitku, který mi byl zadán k řešení, je zobrazen na obr. 4-2. Jedná se o těleso koníku, používané v CNC obráběcích centrech. Obrázek ilustruje čistý odlitek, tedy odlitek po dokončovacím obrobení. Na obrázku jsou číslicemi označené díry vyskytující se na odlitku, které by bylo možné předlévat a tím zjednodušit konečné obrábění.



obr. 4-2: 3D model zadaného odlitku

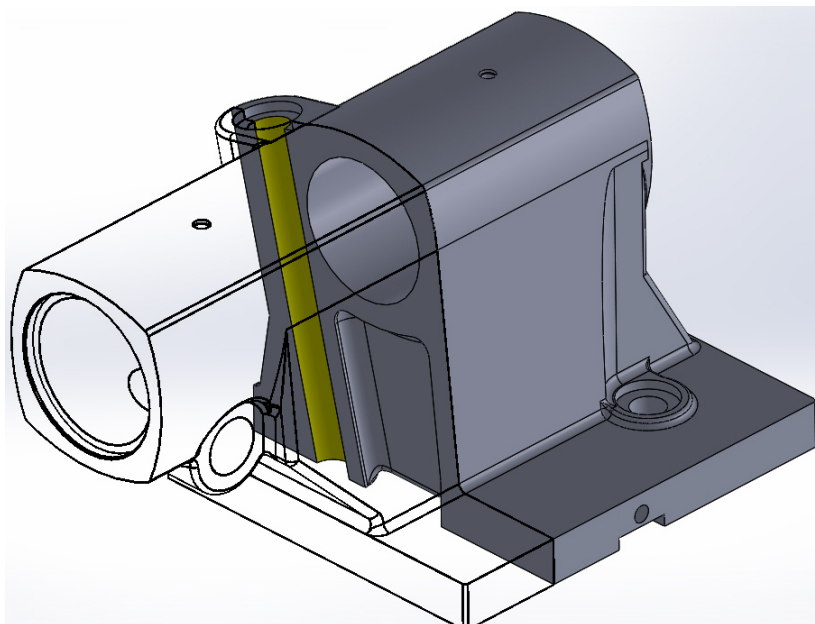
Rozměry otvorů v milimetrech a požadované technologické přídávky na plochách řešených otvorů jsou uvedeny v Tab. 4-4. Z umístění jednotlivých otvorů a jejich rozměrů lze říci, že otvory 1 a 2 bude možné bez větších problémů předlévat za použití tvarových jader. Otvor 3 už by mohlo být náročné předlévat. Vzhledem ke konstrukci odlitku a poloze otvoru by bylo obtížné založit do formy jádro, které by zajistilo přelití daného otvoru. Zároveň se jedná už o poměrně malý otvor a použití takto tenkého jádra by mohlo způsobit akumulaci tepla v něm a při tuhnutí by zde vznikl velký tepelný uzel s rizikem vzniku staženin. Otvor 3 se tedy předlévat nebude.

Tab. 4-4: Rozměry otvorů v odlitku a velikosti technologických přídávků

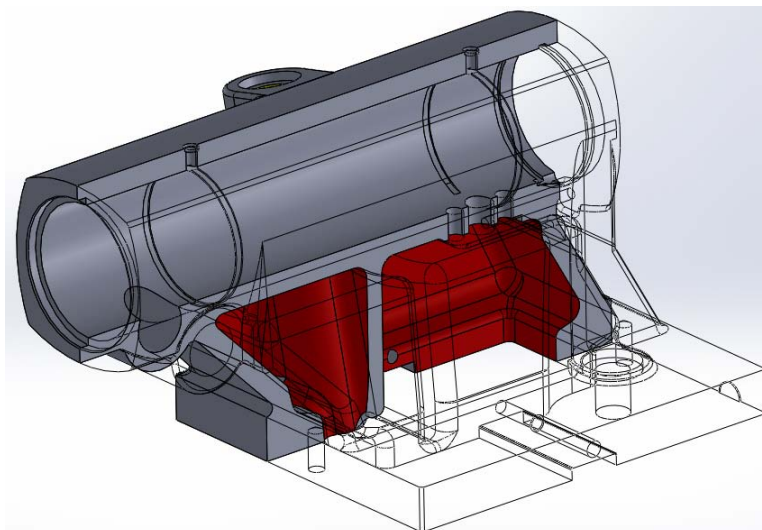
Otvor	Rozměr		Technologické přídávky		Rozměr s přídávky	
1	Ø 90	mm	5	mm	Ø 80	mm
2	Ø 35	mm	4	mm	Ø 27	mm
3	Ø 22	mm	3	mm	Ø 16	mm
4	Ø 25	mm	4	mm	Ø 17	mm

Podobný případ jako u otvoru 3 je s otvorem 4. Průměr toho otvoru je dle Tab. 4-4 17 mm. Jak je vidět z obr. 4-3, kde je otvor 4 zvýrazněn žlutou barvou, jedná se o poměrně dlouhý otvor, jehož délka je 215 mm. Při takovémto poměru mezi délkou a průměrem jádra, by bylo velice obtížné a nákladné vyrobit jádro, pomocí kterého by bylo možné zabezpečit předlití otvoru. I v případě použití jádra s ocelovou výztuhou by asi nebylo možné, zabránit deformacím jádra vlivem působení proudící taveniny a vysoké teploty. Také kvůli své poloze by bylo komplikované správné založení jádra do formy. A vezme-li se v potaz i poslední hledisko, jímž je objem výroby daného odlitku za rok, uvedený v Tab. 4-1, je jasné, že předlévat tento otvor není vhodné. Je jednodušší, a méně rizikové, při daném objemu výroby, tento otvor obrábět.

V odlitku je dále vytvořena tvarová dutina, jejíž účel je odlehčení výrobku. Tvar dutiny je nastíněn na obr. 4-4 a je zvýrazněn červenou barvou. Vzhledem k rozměrům dutiny a její poloze, nebude problém, tuto dutinu předlít pomocí tvarového jádra.



obr. 4-3: Řez odlitkem a zvýraznění otvoru č. 4

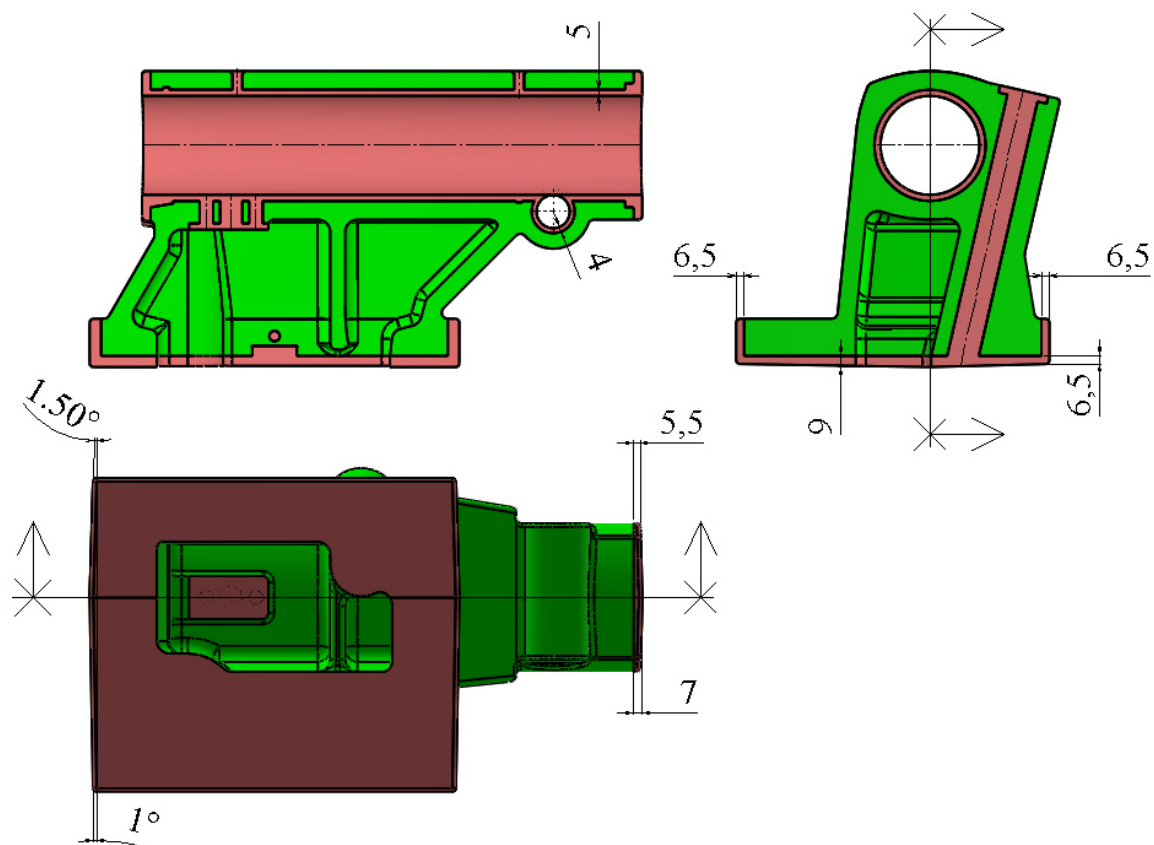


obr. 4-4: Zobrazení vnitřní dutiny

4.1.3. Poloha odlitku ve formě, technologické přídavky

Poloha odlitku ve formě byla daná původní technologií, ze které jsem vycházel při následných úpravách. Na obr. 4-5 je zobrazen zjednodušený náčrt odlitku (zeleně) a technologických přídavků (červeně) a jejich hodnoty. Podrobný postupový výkres není možné dodat z důvodu utajení dat.

Na obr. 4-5 je také znázorněno umístění dělicí roviny. Tvar odlitku, který je ve směru šipek bude zaformován do horní části formy. Tvar pod dělicí čarou bude zaformován do spodní částí formy.



obr. 4-5: Technologické přídávky

4.1.4. Tvarová jádra

Pro předlévání dutin byla navržena tři tvarová jádra. Na obr. 4-6 je model tvarového jádra, pomocí kterého se bude předlévat vnitřní tvarová dutina. Původní návrh technologie počítal s použitím jádra z CT směsi, na které byl nanesen ochranný nátěr. Aby se omezilo ulamování přední části jádra, která je ke známce jádra napojena přes poměrně tenkou stěnu, zaformovávají se do jádra ocelové výztuhy.

Na obr. 4-7 je vidět jádro pro předlévání dutiny číslo 1. Jedná se o tvarově jednoduché, válcové jádro. Technologie výroby je totožná jako u předchozího jádra, tedy výroba z CT směsi. Délka jádra je 490 mm a průměr 80 mm. Díky poměrně velkému průměru jádra není potřeba používat pro zvýšení tuhosti žádnou výztuhu. Jádro je ošetřeno ochranným nátěrem.

Třetí jádro, pro přelévání otvoru číslo 2, je zobrazeno na obr. 4-8. Jedná se o drobné jádro, jehož délka je 210 mm a průměr 27 mm. Na obou koncích jádra jsou vytvořeny technologické úkosy pro zajištění bezpečného založení jádra do formy. Stejně jako ostatní jádra je i toto ošetřeno ochranným nátěrem.

Založení a poloha jader v odlitku je vidět na obr. 4-9.



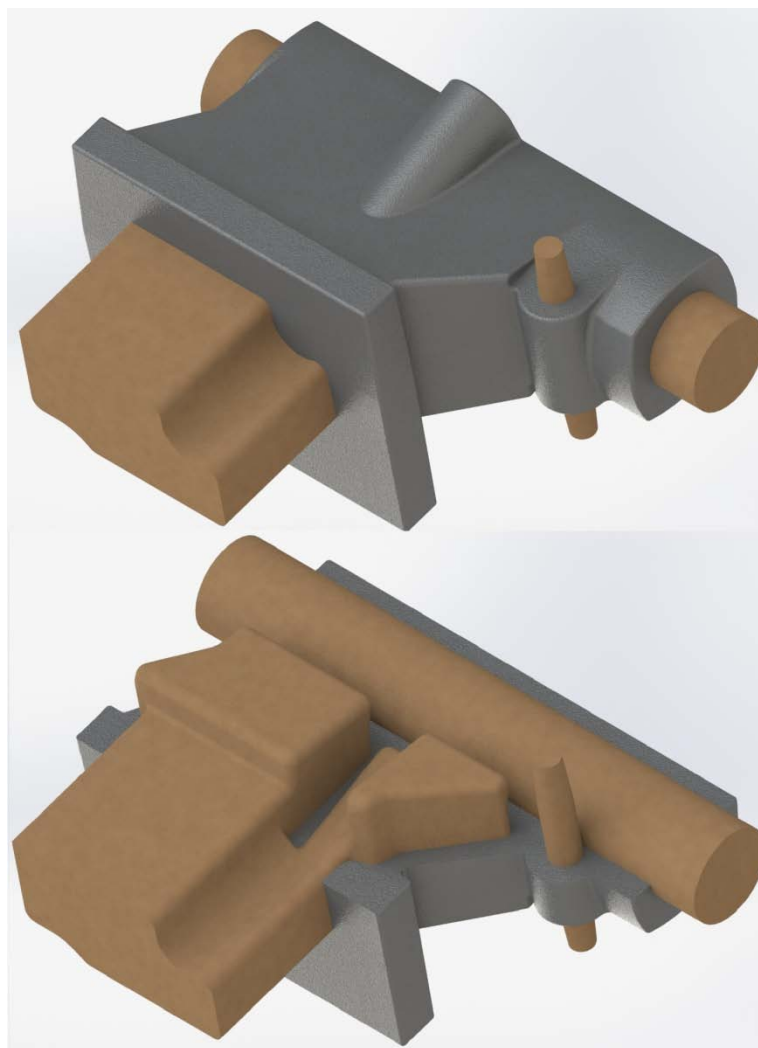
obr. 4-6: Tvarové jádro vnitřní dutiny



obr. 4-7: Jádro pro dutinu číslo 1



obr. 4-8: Jádro pro dutinu číslo 2



obr. 4-9: Založení jader v odlitku + řez odlitkem

4.1.5. Technologie výroby forem

Každá technologie výroby forem má svá specifika a při hodnocení technologičnosti odlitku je třeba brát v potaz vhodnost určité technologie pro daný odlitek. Každá technologie má svá omezení, která jsou většinou daná materiálem formy. Do kovových forem například není možné, kromě některých speciálních případů, odlévat odlitky z oceli nebo litiny a tyto formy se používají především pro odlévání neželezných slitin. U technologie vysokotlakého lití není možné předlévat členité vnitřní duriny, protože vnitřní jádra musí být vyrobena z kovu a jsou součástí formy, takže není možné je vyjmout s odlitkem. Odlévání do pískových forem má omezení v požadavcích na přesnost rozměrů odlitku a drsnost jeho povrchu. Je tedy zapotřebí navrhovat větší technologické přídavky na obrábění, než v případě odlévání do kovových forem.

U pískových forem hraje roli také způsob formování. Zda se jedná o ruční formování, nebo o formování na automatických formovacích linkách. Při formování na

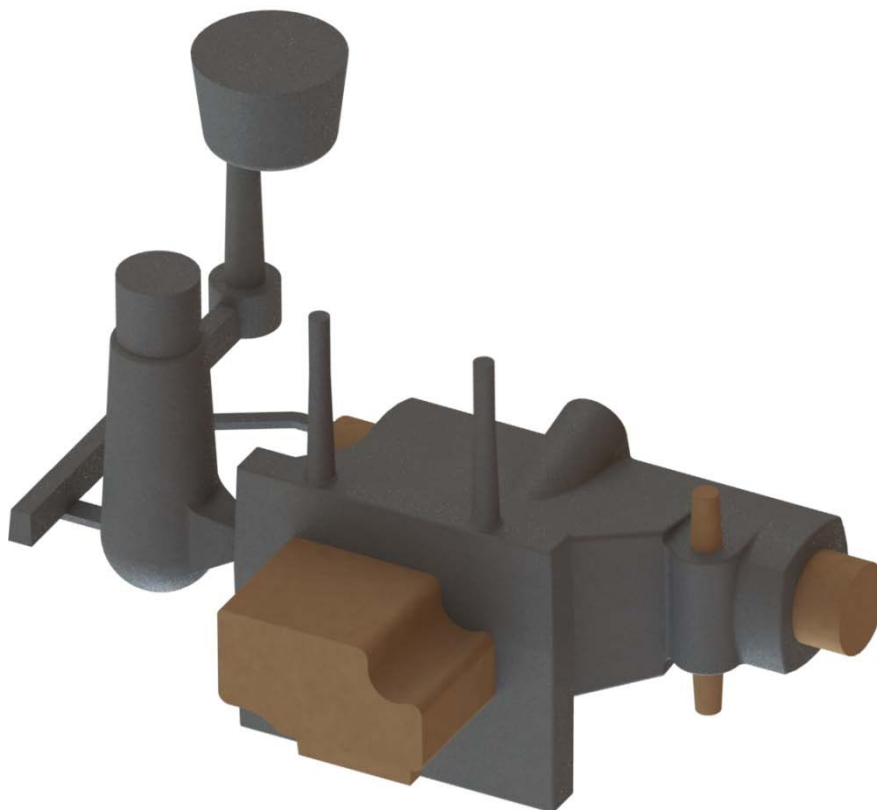
linkách musí být všechny části modelu pevně uchyceny na modelové desce, zatímco při ručním modelování je možné k modelu přikládat volné části, jako například chladítka. Na lince také není možné přímo formovat otevřené nálitky nebo výfuky. Ty se musí formovat jako uzavřené a následně se provrtávat, nebo prorážet.

Řešený odlitek se vyrábí na automatické formovací lince. Materiál používaný pro výrobu forem na lince je bentonitová formovací směs. Bentonit se na linkách používá z toho důvodu, že k jeho vytvrzení stačí provést spěchování směsi mechanickou silou. Furanové směsi nejsou vhodné pro výrobu forem na automatických linkách, protože jejich vytvrzení probíhá chemickou reakcí a tato reakce může trvat i několik desítek minut.

4.2. Rozbor původní technologie

Původní technologie byla navržena přibližně v roce 2002. V nedávné době se ale u této pozice začaly množit problémy. Zároveň slévárna začala projevovat zájem o simulační software MAGMA⁵, díky čemuž mohla vzniknout tato práce.

Od technologů ze společnosti KOVOSVIT jsem dostal 3D model čistého odlitku tělesa koníku a postupový výkres pro výrobu modelového zařízení. Jako první krok tedy bylo na čistý odlitek přidat technologické přídatky a namodelovat vtokovou soustavu podle výkresu. 3D model odlitku se vtokovou soustavou je zobrazen na obr. 4-10.



obr. 4-10: 3D model odlitku se vtokovou soustavou

Z obr. 4-10 je vidět, že ačkoliv je odlitek odléván z materiálu EN GJL 200, byl použit poměrně objemný nálietek. Jelikož se jedná o relativně silnostěnný odlitek, byly zde obavy z objemových změn, ke kterým by mohlo docházet při chladnutí taveniny z teploty přehřátí kovu. Technologové si nebyli jisti, zda nálietek je opravdu potřeba, ale ze strachu, aby nedocházelo ke vzniku vad, ho pro jistotu zachovali. Nálietek má hmotnost 12,5kg, to představuje velké množství kovu vzhledem k tomu, že odlitek má hmotnost přibližně 50kg. Jedním z úkolů simulace bude zjistit, zda odlitek opravdu má nějakou funkci a zda to není jen velký ohřívač na kov.

Technologické parametry pro daný odlitek jsou uvedeny v Tab. 4-5. V kolonce teploty je uveden rozsah teplot, ve kterém se ve slévárně mohou pohybovat. Teplota 1450°C je ale extrém a z tak vysoké teploty by se takto mohutný a silnostěnný odlitek odlévat neměl. Čas lití 20s mi byl zadán technologem.

Tab. 4-5: Parametry pro danou variantu

Původní varianta		
Materiál odlitku	EN GJL 200	
Materiál jader	CT směs	
Hmotnost odlévaného kovu	75	kg
Teplota lití - simulovaná	1350 - 1450	°C
Čas lití	20	s
Celkový průřez zářezů	300	mm ²

Horní polovina modelové desky je vidět na obr. 4-11 a spodní část modelové desky je na obr. 4-12.



obr. 4-11: Horní polovina modelové desky



obr. 4-12: Dolní část modelové desky

4.3. Problémy původní technologie

Tato pozice mi byla zadána z důvodů, že se u této pozice zvýšil výskyt vad. V první řadě bylo potřeba zjistit, jaké vady se u odlitku projevují. V tom mi byl nápomocný interní systém společnosti KOVOSVIT, kde jsou zaznamenány údaje o lití všech pozic. Mezi tyto údaje například patří množství odlitků, které bylo odlito za daný časový úsek a na to navazující počet neshodných odlitků s uvedenou příčinou vady. Nicméně, příčiny vad uvedené v databázi, jsou spíše orientační a nedá se zpětně s jistotou říct o jakou vadu šlo a jaká mohla být její příčina.

Z tabulek se ale dalo vyčíst, že nejčastějšími vadami, které se u této pozice vyskytují, jsou především vady způsobené plynem ve formě, tedy bubliny, dále pak odvařeniny a zavaleniny. Zvláštní je jistá nekonzistence výskytu vad, kdy při jednom lití se zmetkovitost pohybuje kolem 55% (ze 42 odlitých odlitků má 23 odlitků vadu) a při dalším odlévání v jiné období, je zmetkovitost necelých 10% (ze 44 odlitých odlitků mají vadu 4 odlitky). Příčiny vad v obou případech jsou ale shodné, a těmito příčinami jsou bubliny a odvařeniny. Při takto velkém výkyvu v objemu vad je pravděpodobné, že na vzniku vad se nebude podílet pouze navržená technologie, ale budou zde působit další vnější vlivy. Jelikož formovací linka není vybavena nástroji pro provrtávání výfuků, může se stát, že formář zapomene prorazit výfuky pro zajištění odvodu plynů z formy, nebo slévač odlije kov z příliš vysoké teploty, což má za následek vývin většího objemu plynu. Příliš vlhká formovací směs, nebo jádrová směs má také za následek zvýšený objem plynů v dutině formy.

Před zadáním pozice k simulaci proběhlo odlití jedné série. Tato série potvrdila problémy s odvařeninami, které byly zaznamenány již dříve v databázi. Vzniklé vady jsou zobrazeny na následujících fotkách (obr. 4-13, obr. 4-14, obr. 4-15).



obr. 4-13: Odvařeniny na odlitku 1



obr. 4-14: Odvařeniny na odlitku 2

Na prvních dvou fotkách jsou vidět velmi rozsáhle odvařeniny na horních plochách odlitku. Jednou z příčin vzniku odvařenin je velký objem plynů přítomný v dutině formy, který nebyl z dutiny v čas odveden, ať už z důvodu nevhodně navrženého

odvzdušňovacího systému formy a nebo nízkou prodyšností formovací směsi. Dalším vlivem může být vysoký stupeň přehřátí taveniny, který má za následek přehřívání formovacích a jádrových směsí a tím i zvýšený vývin plynů z těchto směsí. Zvláštní je, že k největším zavařeninám dochází na ploše, která je ošetřena výfuky pro odvod plynu z formy. Výfuky zde nemusely plnit svou funkci buď z důvodu, že jejich průřez byl nedostatečný vzhledem k objemu vyvinutého plynu a rychlosti plnění dutiny formy taveninou, kdy plyn nestihl včas utéct. Příčinu vady lze také hledat u formiře, který, ačkoliv má v návodce uvedeno, že kolíky se mají prorážet, mohl na proražení kolíků zapomenout a nebo mu nevěnoval pozornost a nepřikládal mu velkou důležitost. Na obr. 4-14 vznikla odvařenina i na výstupku, kde není navrženo odvzdušnění.



obr. 4-15: Nedolití způsobené ulomeným jádrem

Na obr. 4-15 je vyfocen jiný druh vady, která byla pravděpodobně způsobena ulomením přední části vnitřního tvarového jádra a při plnění dutiny taveninou došlo k vyplutí této části jádra k povrchu odlitku. Tento jev se vyskytuje při odlévání poměrně často, kdy i při lití jedné série čítající přibližně 15 kusů odlitků, došlo k prasknutí jádra u více než poloviny odlitků. Vnitřní tvarové jádro se vyrábí z CT směsi na ručním pracovišti a je v něm zaformovaná ocelová výztuha. Při vkládání jader do formy se pod jádro a také na jádro vkládají podpěrky, které by měly zajistit pevnou polohu jádra ve formě a také tvořit podporu proti působení vztlakové síly na jádro při plnění formy, aby právě nedocházelo k ulamování části jádra. Tyto podpěrky se pomocí lepidla přilepí jak na formu, tak i na jádro. K odlomení jádra může dojít buď kvůli tomu, že formiř zapomene

použít podpěrky, hlavně ty, které se umísťují na horní plochu jádra, a ke zlomení dojde působením vztahové síly kovu. Nebo podpěrky mohou být použity, ale lepidlo používané k přilepení podpěrek nestihne před odléváním vytvrdnout a proud kovu odnese podpěrky do jiného místa. Problém by mohla působit i nedostatečně vytvrzená jádrová směs.

Na tom samém obrázku je také vidět problém se zaplněním kolíků pro odvodušnění. Levý kolík se zaplnil bez problémů a byl následně uražen, zatímco do druhého kolíku zatek kov jenom v tenké "skořepině", což značí přítomnost plynů v kolíku.

4.4. Simulace původní technologie

Prvním krokem, než jsem mohl začít s návrhem úprav technologie, bylo vytvoření simulace pro původní návrh, aby bylo možné analyzovat, zda a jaké problémy při odlévání odlitku vznikají. Parametry simulace jsou uvedeny v Tab. 4-6 a chemické složení taveniny, které bylo nastaveno pro simulaci je uvedeno v Tab. 4-7.

Tab. 4-6: Parametry pro simulaci

Varianta 0		
Materiál odlitku	EN GJL 200	
Hmotnost odlévaného kovu	74	kg
Počáteční teplota lití	1350	°C
Doba lití	20	s
Průřez zářezů	290	mm ²
Materiál jader		
velké tvarové jádro	CT směs	
válcová jádra	CT směs	
Ochranný nátěr jader	ANO	
velké tvarové jádro	alumino - silikátový + zirkonový	
válcová jádra	alumino - silikátový	
Filtr	NE	
hustota filtru	ppi	

Tab. 4-7: Chemické složení taveniny pro simulaci

třída materiálu	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
20	3,35	2,05	0,7	0,2	0,15

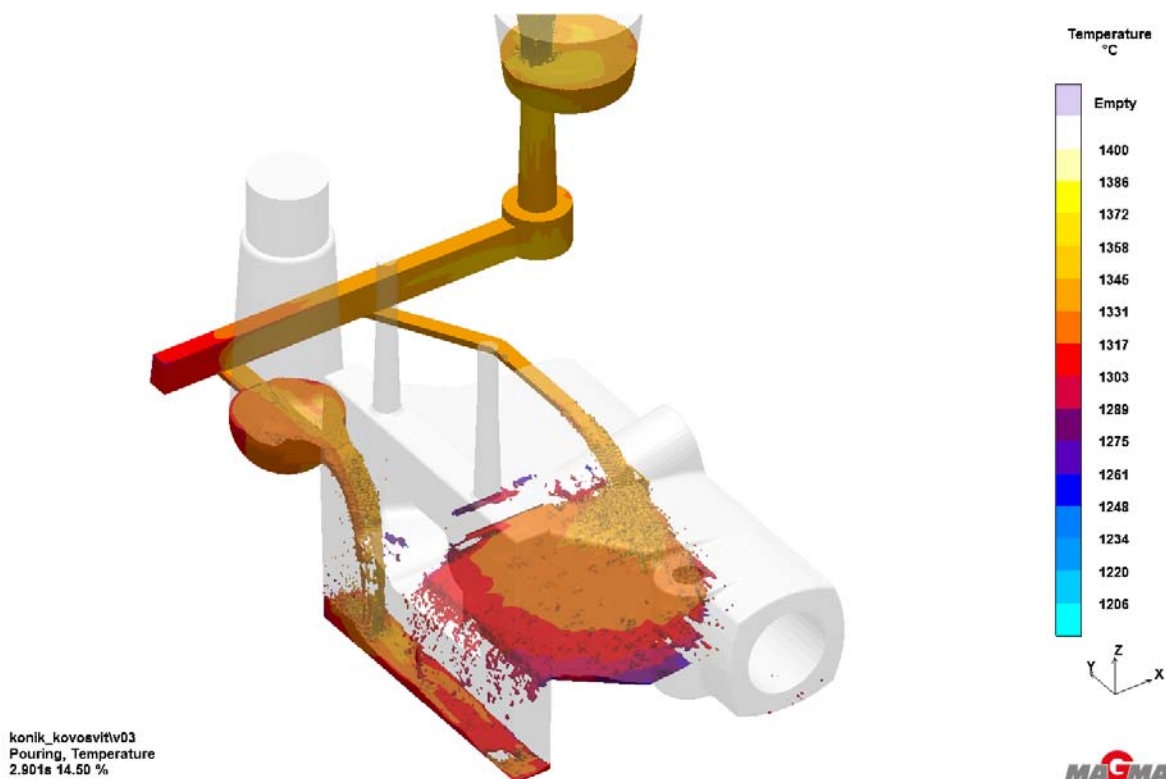
4.4.1. Analýza plnění

Jako první se zaměřím na analýzu plnění dutiny formy taveninou. Charakter proudění taveniny v dutině formy může mít zásadní vliv na výslednou kvalitu odlitku a na vznik určitých vad. Pokud je proudění neklidné, dochází k víření taveniny a vzniká riziko uzavření plynu do taveniny a mohou vznikat bubliny. Důležitým parametrem je i celistvost proudu taveniny. Pokud dochází někde k rozstříku proudu taveniny, kov více oxiduje a také se rychleji ochlazuje.

Začátek plnění je vidět na obr. 4-16. Už z tohoto začátku plnění je vidět, že daný návrh není zrovna ideální z hlediska celistvosti proudu kovu a dochází k rozstříku taveniny. Ze zářezu proudí tavenina do nálitku, ale po nárazu taveniny do stěny nálitku dojde k rozdělení proudu taveniny a do dutiny formy kov "šplouchne" a dojde k rozstříku taveniny o stěny formy. Po chvíli dojde k zaplnění důlku u nálitku a tavenina začne z nálitku proudit v celistvém proudu, ale padá z velké výšky. Na obr. 4-17 je vidět, jak tavenina, přitékající ze zářezu blíže ke vtokovému kůlu, vytváří slabou vrstvu kovu, která je rozlitá po celé spodní ploše formy. Tím jak kov teče pouze v tenké vrstvě, dojde k roztrhání této vrstvy, když taveniny začíná vtékat do spodního dutiny. Z hlediska plnění není tato poloha odlitku ideální. Hloubka odlitku pod dělicí rovinou je poměrně velká a vzhledem ke konstrukci odlitku bude poměrně obtížné navrhnout vtokovou soustavu tak, aby se docílilo celistvého proudu.



obr. 4-16: Začátek plnění dutiny formy - teplotní pole



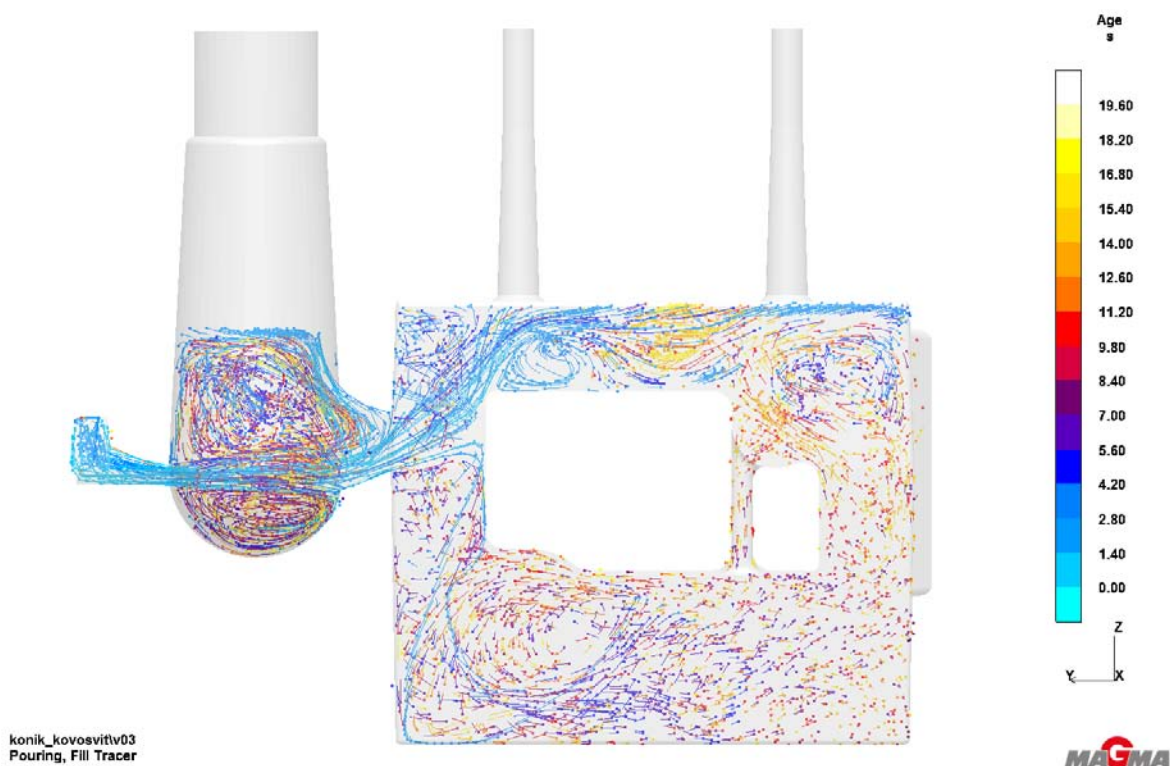
obr. 4-17: Průběh plnění - teplotní pole

Na následujících obrázcích je analýza proudění taveniny v přírubě odlitku pomocí trasování částic. Na obr. 4-18 je vidět proudění taveniny ve spodní části odlitku. Tavenina přitékající z nálitku se mísí s taveninou z druhého zářezu a dochází k turbulencím. Tyto turbulence mohou mít za následek uzavírání plynu v tavenině a nebo mu bránit v úniku z taveniny. Případně se v tavenině mohou uzavírat nečistoty.

Jak je vidět z obr. 4-19, k tvorbě turbulencí dochází i při zaplnění příruby taveninou. Tyto turbulence v horní části formy jsou i více nebezpečné než turbulence v dolní části formy, protože pokud dojde k pohlcení plynu v horní části formy, těsně před zaplněním dutiny taveninou, plyn už nemusí mít dostatek času, aby po skončení odlévání z taveniny unikl před jejím ztuhnutím. Záleží ale také na teplotě taveniny v daném místě.



obr. 4-18: První část plnění



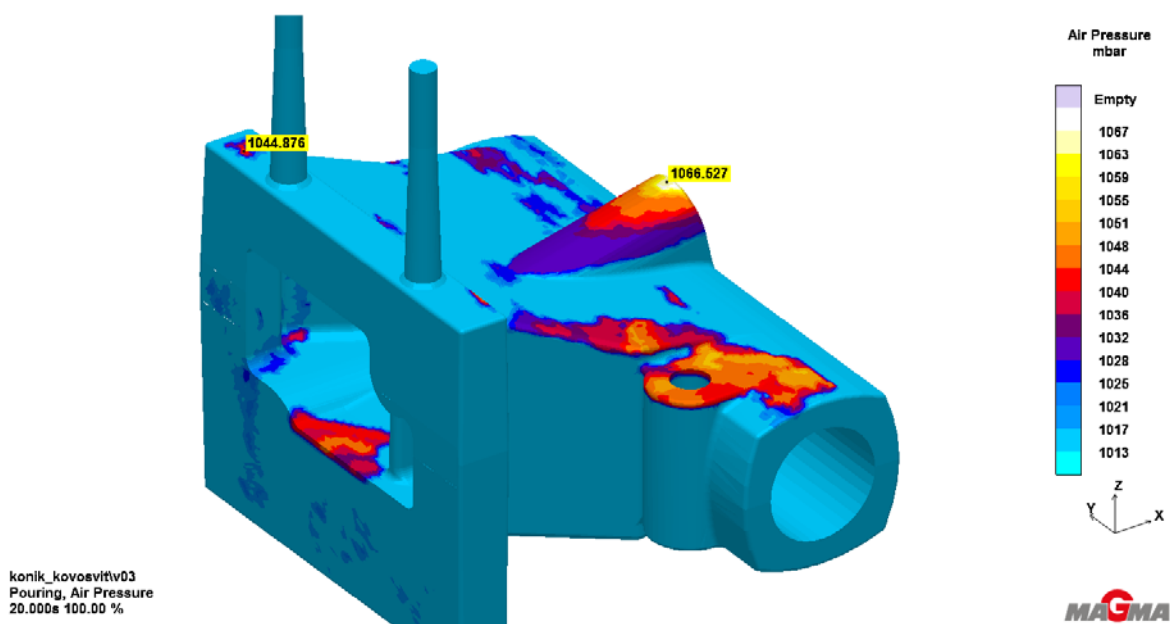
obr. 4-19: Konec plnění

Turbulence způsobené od zářezu blíže k nálitku jsou vidět na obr. 4-20. Na konci dutiny dojde k setkání taveniny z obou zářezů a po naražení proudu do stěny formy a vznikne turbulence.



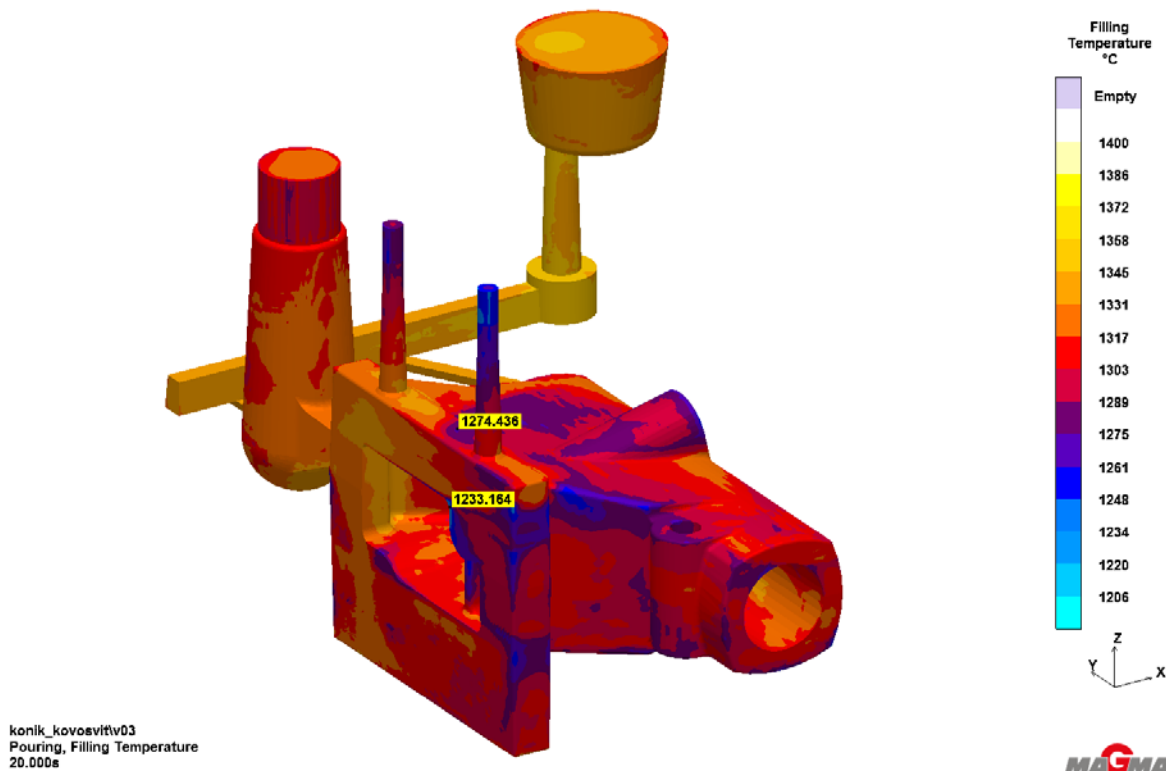
obr. 4-20: Pohled do spodní části formy

Při vzniku odvařenin hraje velkou roli přítomnost plynů v dutině formy. Na obr. 4-21 je analýza tlaku plynu. Je zde vidět jedno kritické místo, a tím je výstupek na pinole koníku. Zde není použit kolík pro odvzdušnění a je vidět, že hodnota tlaku plynu zde dosahuje hodnoty přibližně 1070 mbar. V případě zachování této polohy odlitku ve formě bude určitě vhodné, na tento výstupek kolík umístit, protože i z fotek vad bylo patrné, že zde k uzavírání vzduchu docházelo.



obr. 4-21: Tlak plynu

Vady vznikající vlivem plynu, jako jsou bubliny, mají blízkou spojitost s teplotou taveniny. Na obr. 4-22 je vidět teplotní pole odlitku pomocí kritéria "Filling Temperature" (více o tomto kritériu je napsáno v kapitole 3.). Teplota liquidu pro daný materiál se pohybuje v rozmezí od 1180°C do 1206°C v závislosti na chemickém složení taveniny.



obr. 4-22: Teplota taveniny při plnění dutiny formy

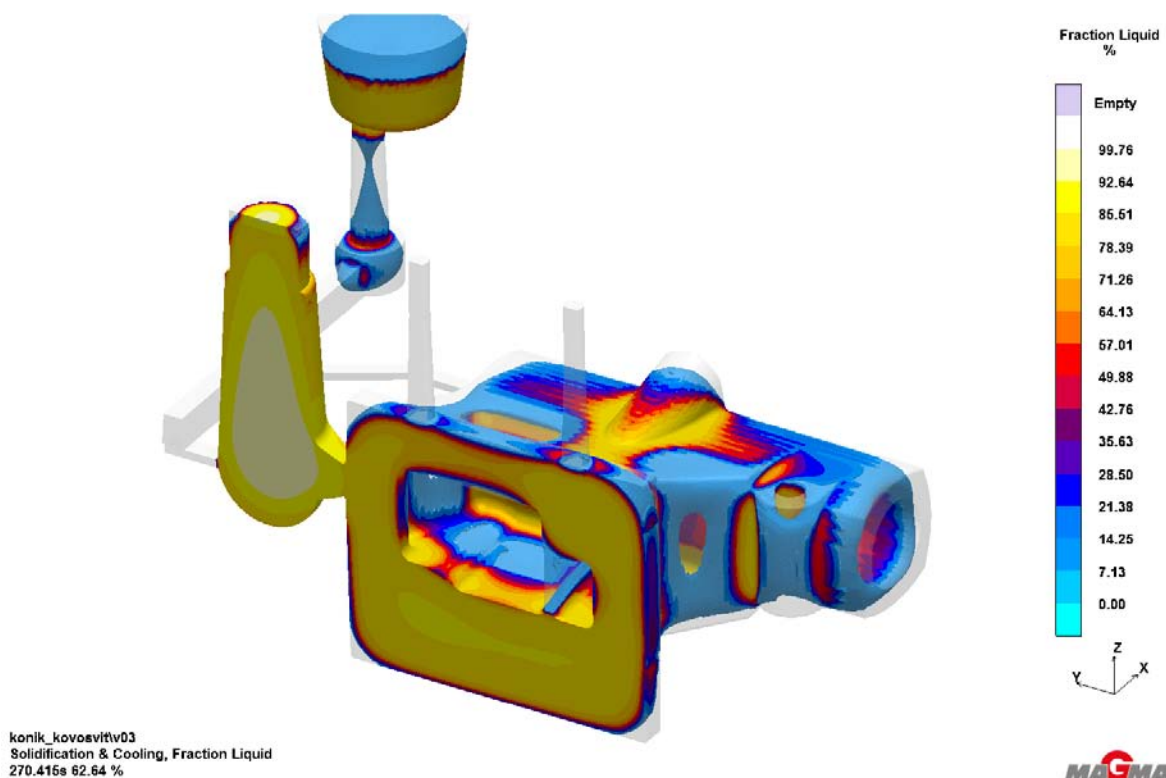
Při vyhodnocování simulací je vhodné vyhodnocovat výsledky vzhledem k nejméně příznivé situaci, která může při odlévání nastat. Méně příznivá je samozřejmě teplota liquidu 1206°C. Proto výsledky teplotních polí, jak v této tak i v dalších variantách, budu vztahovat právě k této teplotě.

Teplota taveniny na horních plochách odlitku, se pohybuje v minimech kolem 1260°C. Teplotní rezerva činí přibližně 50°C.

4.4.2. Analýza tuhnutí

Při analýze tuhnutí se zaměřím především na funkci nálitku, neboli, zda má skutečný význam odlévat přibližně 12kg taveniny navíc. Průběh tuhnutí je vidět na obr. 4-23 a obr. 4-24. Na první obrázku je vidět, že schopnost dosazování nálitku do oblasti pinoly je hodně omezená a už v době, kdy je v odlitku ještě víc jak 60% taveniny, dojde k natuhnutí stěny mezi pinolou a přírubou a nálitek dosazuje pouze do příruby. Na obr. 4-24 je tuhnutí v přírubě a i zde je vidět, že nálitek se oddělí od taveniny ve spodní části příruby v době, kdy v přírubě je ještě poměrně velké množství taveniny. Nálitek je ale ještě plný taveniny,

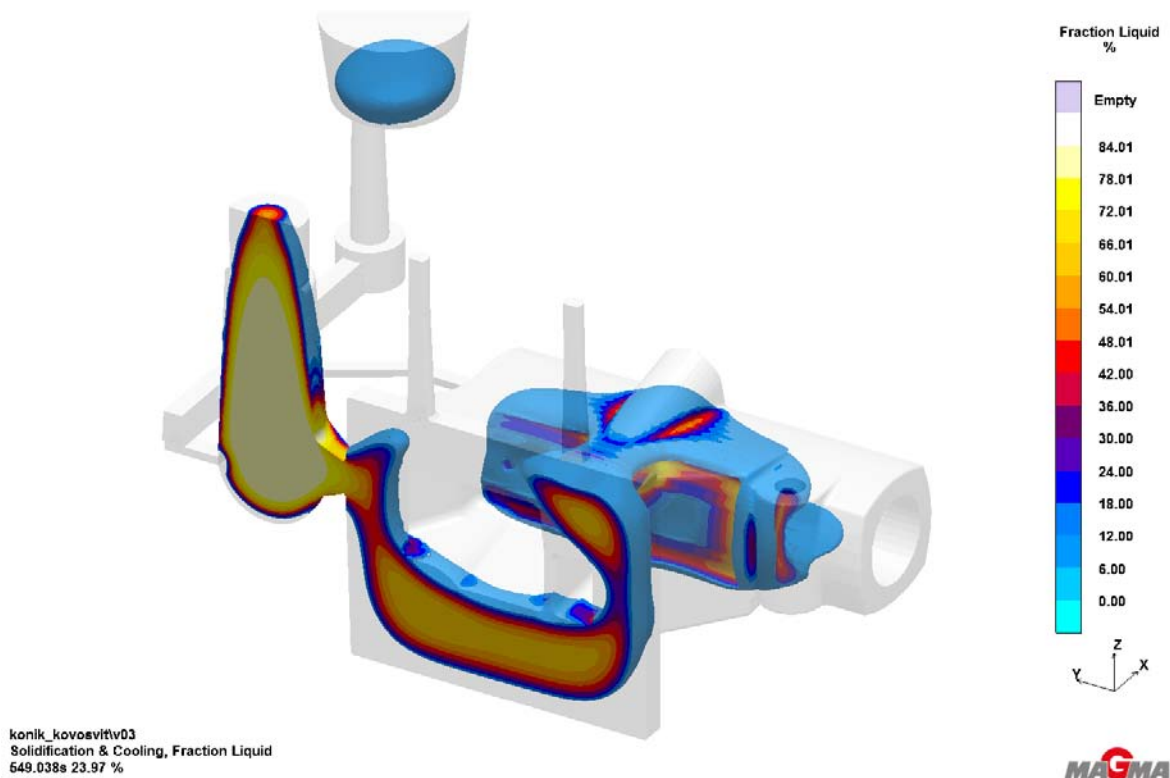
ale už nemá, kam by jí dosazoval. Je tedy vhodné se zamyslet, zda nálitek nezmenšit nebo rovnou nezkusit odstranit celý.



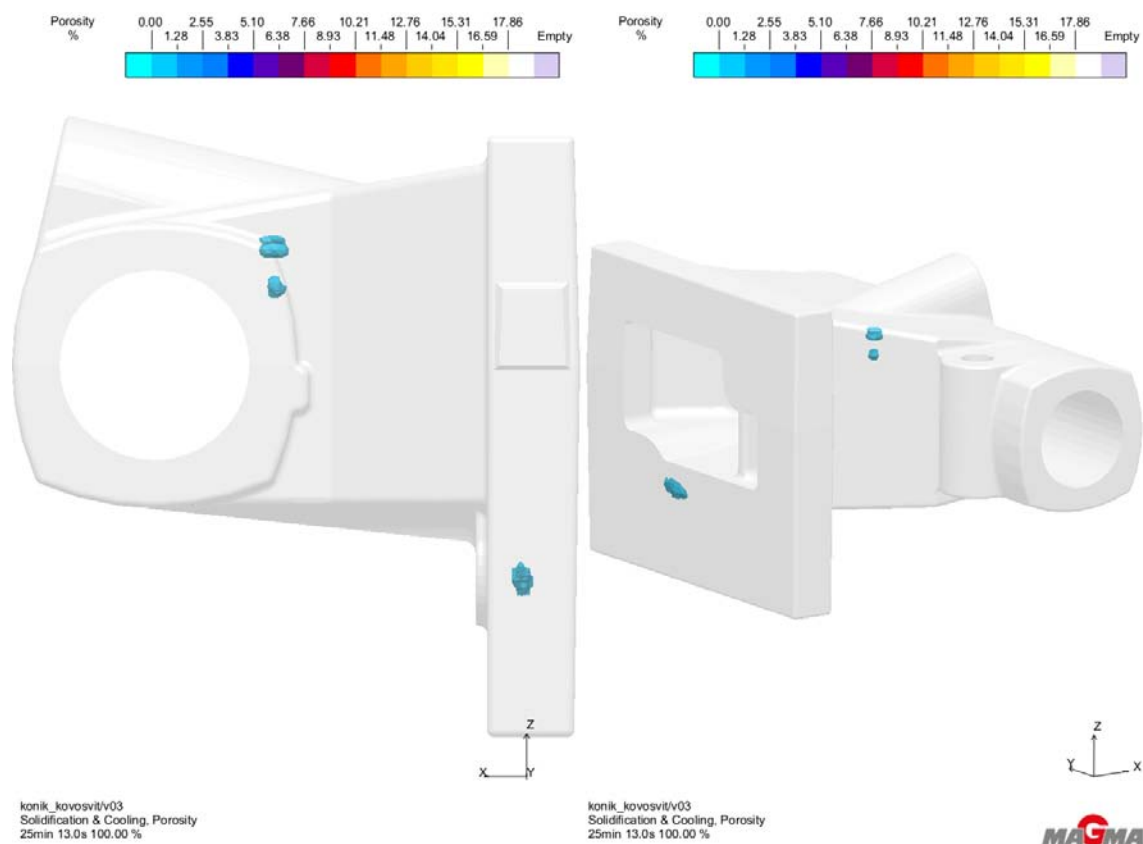
obr. 4-23: Průběh tuhnutí

Z průběhu tuhnutí je vidět, že k poslednímu tuhnutí dochází v oblastech odlitku, které nálitek nemá šanci pokrýt. V místech posledního tuhnutí vzniká vždy riziko vzniku staženin, nicméně u litin s lupínkovým grafitem velice dobře působí proti vzniku staženin grafitická expanze, která dokáže kompenzovat objemové smrštění taveniny při jejím tuhnutí a hodnoty staženin nejsou až tak velké.

Na obr. 4-25 jsou vzniklé staženiny v místech posledního tuhnutí taveniny. V podstavě je hodnota staženiny přibližně 18%. Při této hodnotě se nejedná ani tak o staženinu, jako spíše ředinu. Staženina pod výstupkem na odlitku má hodnotu přibližně 4%, což je zanedbatelná hodnota.



obr. 4-24: Průběh tuhnutí v přírubě



obr. 4-25: Porezita v objemu odlitku

4.4.3. Zhodnocení původní varianty

Z hlediska plnění je tento návrh vtokové soustavy nevyhovující. Při plnění dochází k velkému rozstříku kovu a také vznikají v tavenině turbulence. Oba tyto jevy mohou mít negativní vliv na kvalitu výsledného odlitku. Kapky kovu vnikající při rozstříku rychleji oxidují a také rychleji ztrácí teplotu. Turbulence taveniny v odlitku mohou mít za následek uzavírání plynů nebo nečistot v tavenině. Mým úkolem tedy hlavně bude, zaměřit se na úpravu vtokové soustavy, aby se docílilo rovnoměrného a klidného plnění.

Analýza tuhnutí ukázala, že použitý nálietek je předdimenzovaný a zbytečně se odlévá několik kilogramů kovu navíc. Každé kilo kovu, které se musí natavit, zvyšuje náklady na výrobu. Jedním z bodů mé práce bude vytvoření simulace bez použití nálitku a z této simulace vyvodit, zda doporučit odlévání bez nálitku nebo provést alespoň jeho zmenšení.

Čas 20s, který mi byl zadán technologem, neodpovídal skutečnosti, což mohlo mít určitý vliv na výsledky simulace, protože k zaplnění jamky při simulaci došlo již někdy v 50% plnění. Pokud v SW MAGMA⁵ dojde takto k zaplnění lící jamky ještě před koncem plnění, začne program vyvozovat tlak na taveninu, aby bylo možné dutiny zaplnit za zadaný čas. Zvýšení tlaku zvýší rychlost taveniny v odlitku a dojde ke zkreslení trasovacích částic. V tomto případě byl hlavně kritický zatáček plnění, který ovlivněn nebyl. Skutečný čas lití se mohl pohybovat kolem 40s.

5. ÚPRAVA STÁVAJÍCÍ TECHNOLOGIE ZA POUŽITÍ SIMULAČNÍHO SW

V této části práce se budu zabývat rozбором simulací, které jsem provedl při řešení úprav technologie zadaného odlitku.

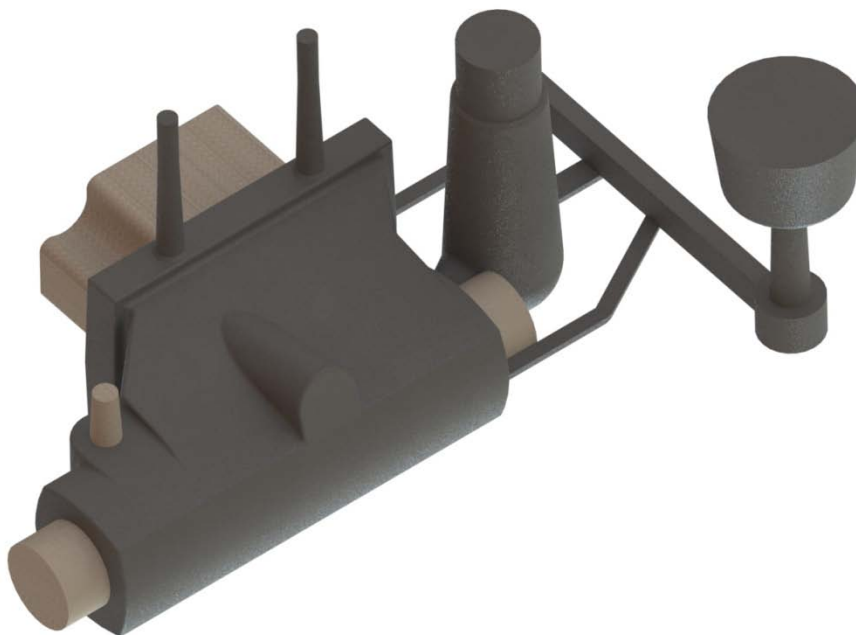
5.1. Varianta č. 1

Tato první úprava byla vytvořena technologií ze slévárny společnosti KOVOSVIT, bez jakékoliv návaznosti na simulaci původní varianty. Tento návrh byl vytvořen velmi krátce poté, co jsem daný odlitek dostal zadán k řešení pomocí simulace. Neměl jsem tedy možnost do tohoto návrhu zasáhnout a dát nějaká doporučení vycházející ze simulace původní varianty.

S tímto návrhem proběhlo odlití několika sérií odlitků s nestabilními výsledky. V žádném případě sice nedošlo k tak masivním odvařeninám jako v případě původní varianty, ale vady způsobené přítomností plynu stále zůstaly.

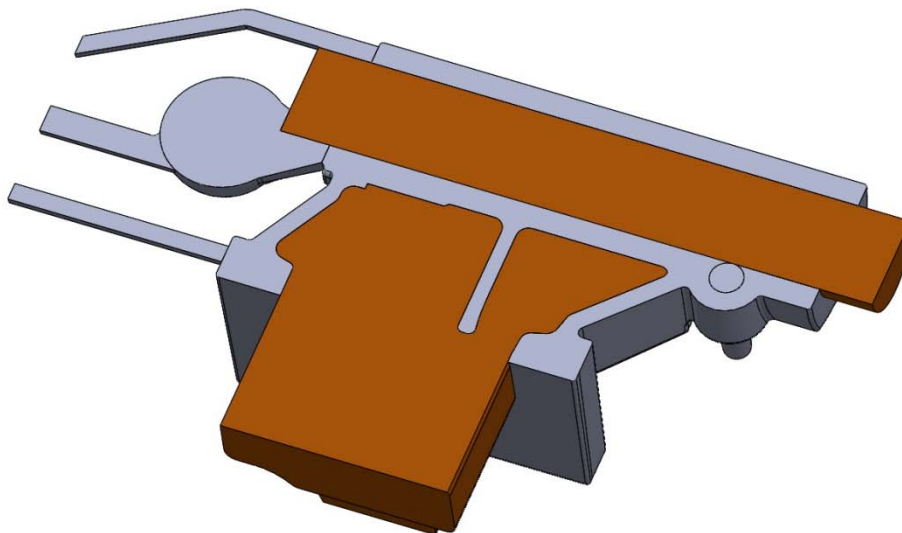
5.1.1. Popis varianty

Jak už jsem uvedl, tato varianta byla navržena bez návaznosti na simulaci původní varianty. Hlavní změnou v této variantě je posunutí nálitku z oblasti příruby koníku k pinole. Na místo původního nálitku byl přidán zárez. 3D model návrhu je na obr. 5-1. Náčrt varianty je uveden v příloze.



obr. 5-1: 3D model návrhu

Z mého pohledu mi nebylo jasné, jaký přesně mělo smysl takto přemístit nálietek, protože z poměrně masivní příruby se nálietek přesunul do oblasti pinoly a připojil se na poměrně tenkostěnnou část, jak je vidět na obr. 5-2. Nálietek se, zjednodušeně řečeno, "přilepil" na velké válcové jádro, čímž došlo k redukci plochy krčku nálitku a také je zde riziko přehřívání konce jádra od nálitku. Připojení nálitku na tenkou stěnu bude mít akorát za následek dřívější zamrznutí krčku nálitku a tím pádem dojde i ke zkrácení doby, po kterou má nálietek možnost do odlitku dosazovat taveninu.



obr. 5-2: Řez odlitkem

Výchozí parametry pro simulaci jsou uvedeny v Tab. 5-2 a chemické složení taveniny pro simulaci je uvedeno v Tab. 5-1. Oproti původní variantě došlo ke zvětšení celkové plochy zářezů o 100 mm², způsobené přidáním třetího zářezu. Čas lití byl stanoven a také změřen při reálném odlévání. Při volbě teploty lití jsem také vycházel z reálného odlévání odlitku, která proběhlo s touto novou technologií.. Při odlévání prvního odlitku měla tavenina teplotu 1430°C, odlévaná série čítala 10ks forem a při odlévání poslední formy, byla teplota taveniny 1400°C. Při odlévání této varianty se začal zkoušet vliv použité jádrové směsi. Některé odlitky se odlévaly s jádry vyrobenými metodou COLD BOX.

Tab. 5-1: Chemické složení taveniny pro simulaci

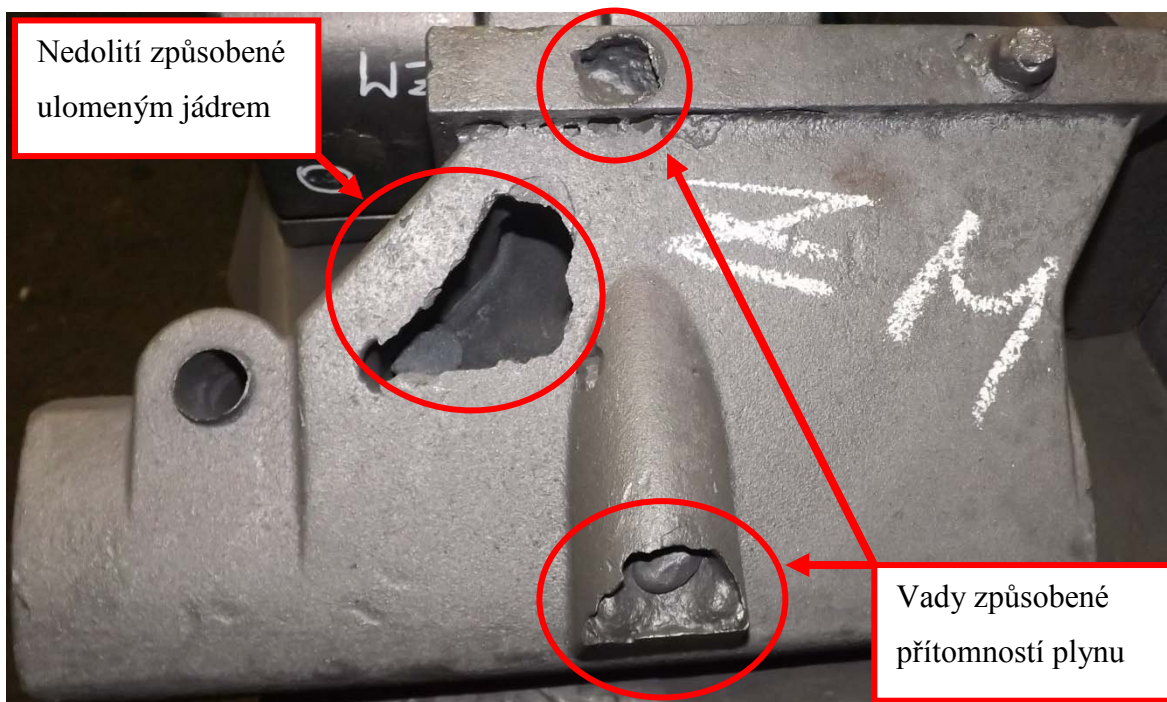
třída materiálu	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Cu [%]
20	3,36	1,89	0,58	0,03	0,03	0,009	0,006

Tab. 5-2: Výchozí parametry simulace

Varianta č. 1		
Materiál odlitku	EN GJL 200	
Hmotnost odlévaného kovu	74	kg
Počáteční teplota lití	1400	°C
Doba lití	30	s
Průřez zářezů	400	mm ²
Materiál jader		
velké tvarové jádro	CT směs	
válcová jádra	CT směs	
Ochranný nátěr jader	ANO	
velké tvarové jádro	alumino - silikátový + zirkonový	
válcová jádra	alumino - silikátový	
Filtr	NE	
hustota filtru		ppi

5.1.2. Vady vzniklé při odlévání

Jak jsem na začátku uvedl, bylo odlito několik sérií odlitků, ve kterých se objevily vady spojené s přítomností plynů v tavenině. Tyto vzniklé vady jsou vidět na následujících obrázcích. Na obr. 5-3 jsou zachyceny odvařeniny od plynu, které vznikly v oblasti jednoho odvzdušňovacího kolíku a také ve výstupku v horní části formy.

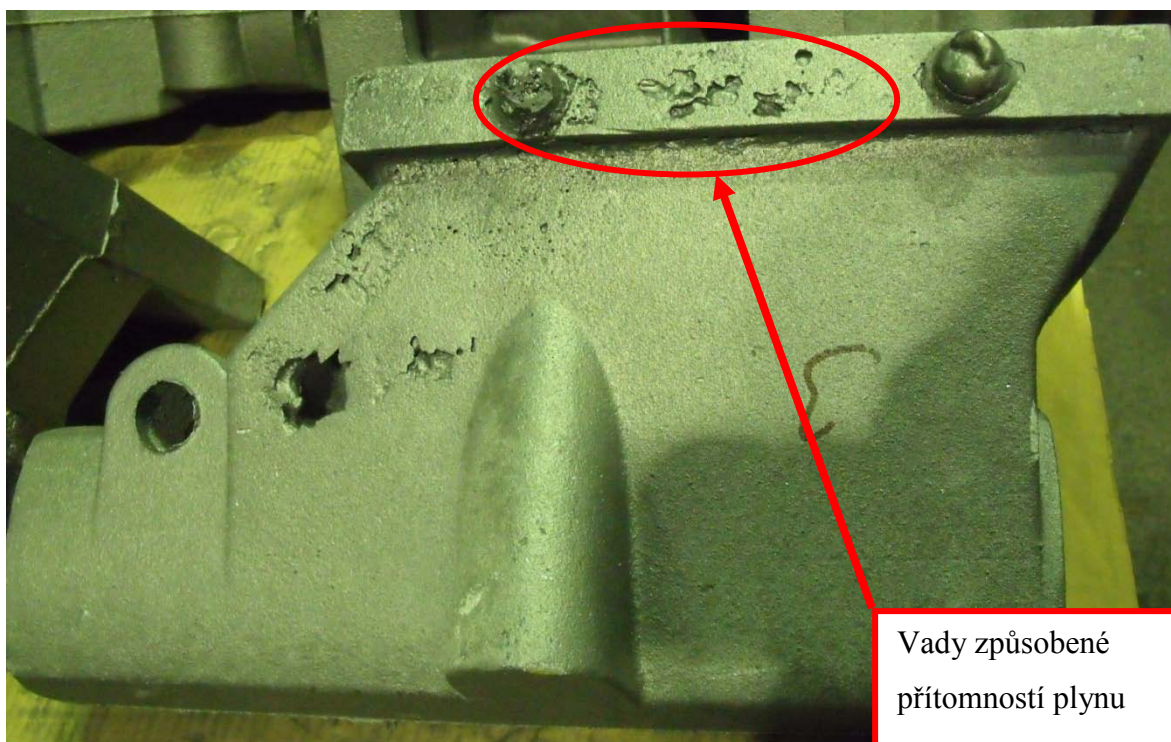


obr. 5-3: Odvařeniny na odlitku

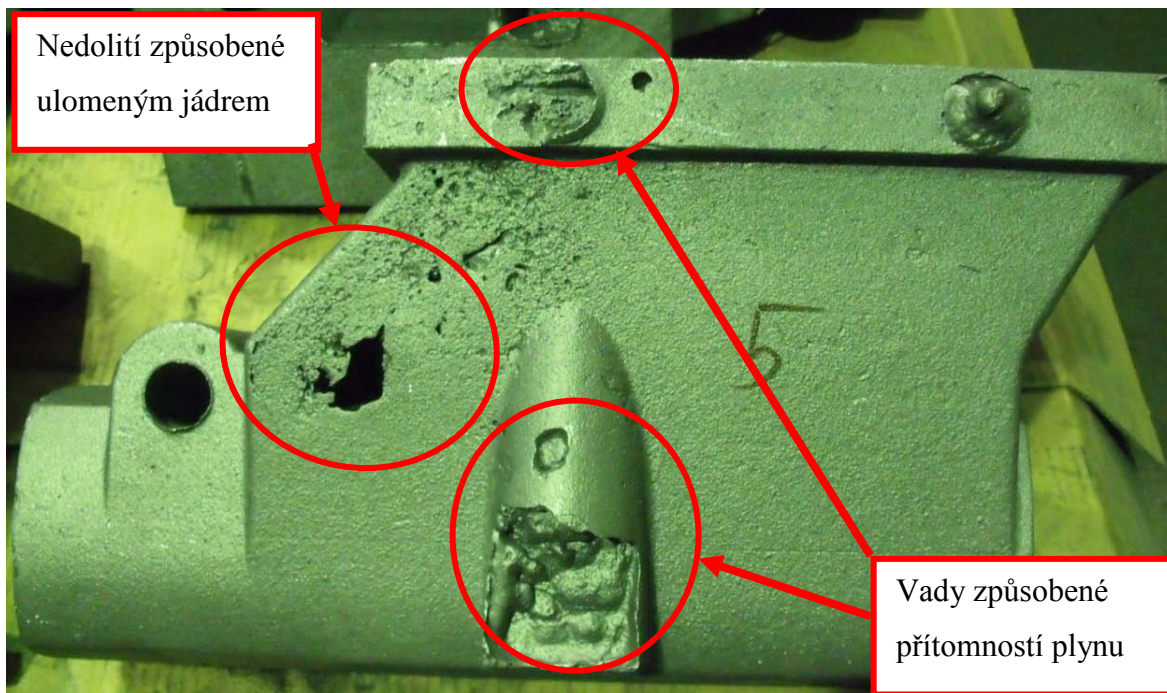
Na obr. 5-4, obr. 5-5 a obr. 5-6 jsou vyfoceny vady, které vznikly při odlévání jedné série, při jejímž odlévání jsem byl přítomen. U těchto odlitků tedy mohu říct, že byl dodržen technologický postup, který byl předepsán. Asi nejdůležitější pro mne bylo, že jsem měl jistotu, že došlo k proražení odvzdušňovacích kolíků, protože to byl parametr, který jsem si nemohl u předchozích sérií ověřit a přitom to je jeden z hlavních parametrů, při řešení problému s plynem.

Z odlité série 10 kusů odlitků, bylo na šesti z nich zjištěna nějaká vada. Každá z forem byla před odléváním označena číslem, aby pak bylo možné identifikovat pořadí odlitků, jak byly odlévány. Na zmíněných obrázcích, jsou 3 odlitky, u nichž byl příčinou vzniku vady plyn, přítomný v dutině formy. Podle čísel na odlitcích je vidět, že vady se vyskytují nahodile, v celém průběhu odlévání série. Nelze tedy přesně říci, zda je na vině příliš vysoká teplota, která způsobí větší vývin plynů z jader nebo formy, nebo je na vině nízká teplota kovu, kvůli které nemá plyn dostatek času uniknout z taveniny.

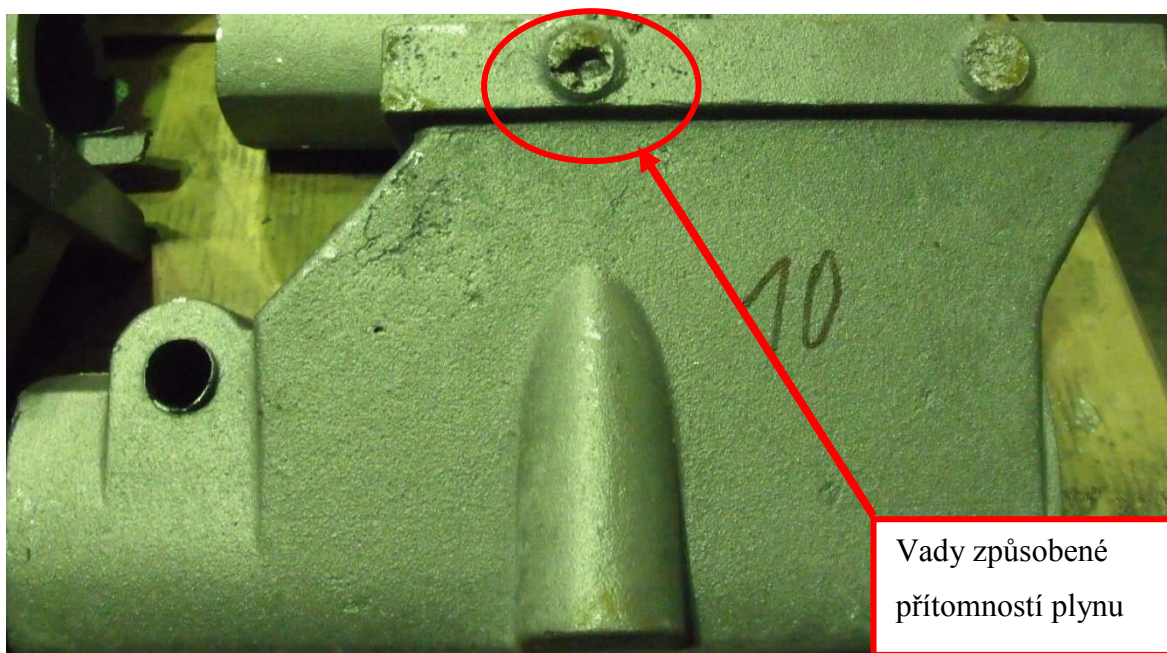
Je zde určitá možnost, že u odlíku 3 a 5, mohlo vlivem odlomení části jádra dojít ke zvýšení vývinu plynů z lomové plochy jádra, protože není ošetřena ochranným nátěr a plyn touto plochou může procházet snadněji. Tuto teorii mi ale trochu vyvrací odlitek číslo 10, u kterého k odlomení jádra nedošlo a přesto zde vznikly vady z důvodu uzavření plynu pod kolíkem. Dalšími narušiteli teorie byly odlitky na pozici 2 a 6, u kterých došlo k ulomení jádra, ale vady způsobené plyny se neobjevily.



obr. 5-4: Bubliny



obr. 5-5: Bubliny ve výstupku



obr. 5-6: Bubliny v kolíku

I v případě, že vady nejsou zřejmé na povrchu odlitku, mohou se vyskytovat v objemu odlitku a odhalí se až po obrobení, jak je vidět na obr. 5-7 a obr. 5-8. Zde se po obrobení objevily bubliny uzavřené v objemu odlitku. Plyn neměl možnost z taveniny uniknout pravděpodobně z důvodu nízké teploty taveniny .



obr. 5-7: Vady po obrobení v přírubě



obr. 5-8: Bubliny ve výstupku

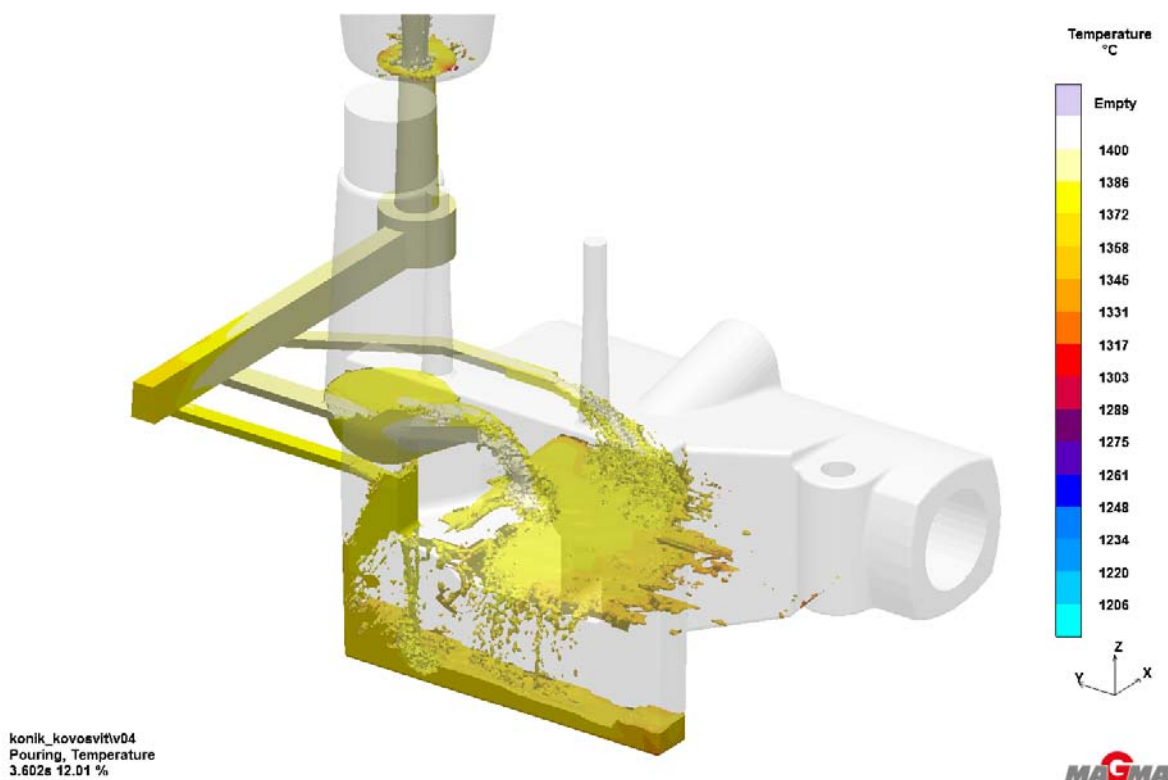
5.1.3. Analýza plnění

Na obr. 5-9 je zachycena první část plnění dutiny formy a jak je vidět, tak i zde, stejně jako v původním návrhu, dochází k rozstříku kovu. První problém při plnění zde vytváří zářez, který je na místě původního nálitku, jehož zaústění je přímo proti jádru a proud taveniny do tohoto jádra naráží a dochází k rozstříku taveniny. Dále pak, stejně jako v původní variantě, dochází k padání taveniny ve spodní části formy, která přitéká od

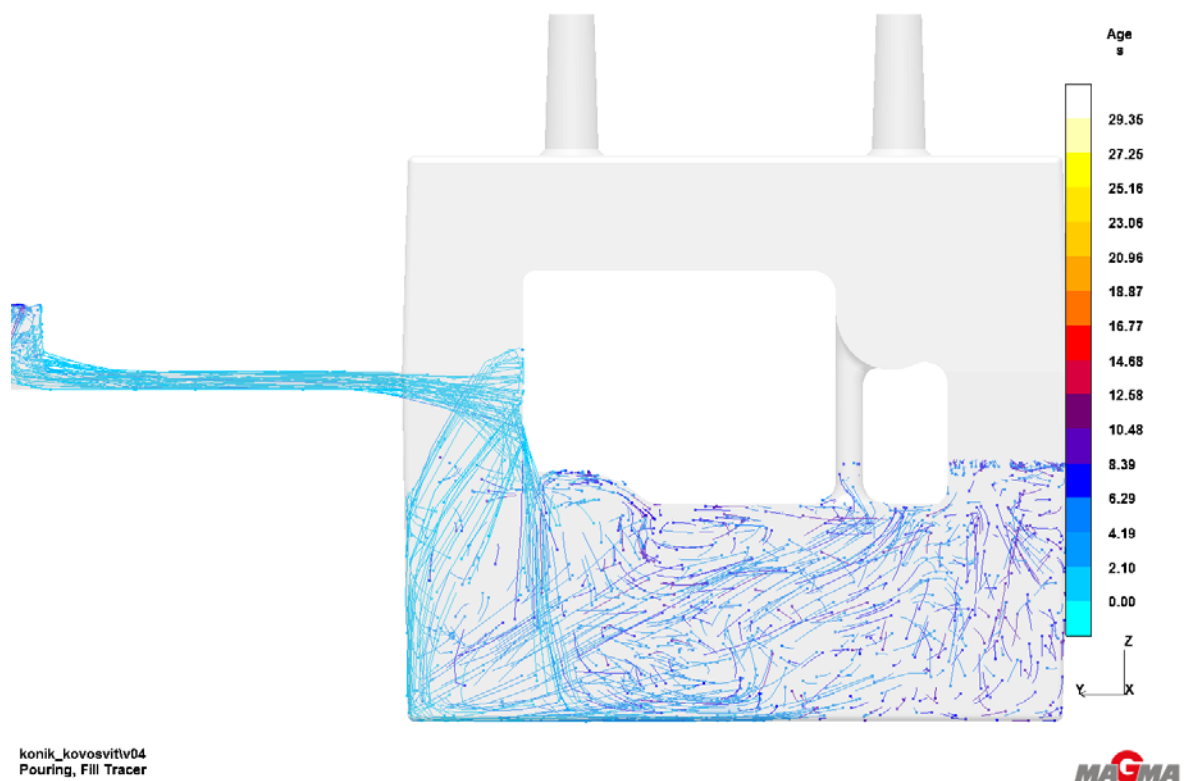
nálitku a prvního zářezu. Stejně jako u původního návrhu, tak i zde může mít tento nesoudržný tok taveniny za následek vyšší oxidaci taveniny, větší ochlazení taveniny a nebezpečí uzavírání většího množství plynů do taveniny.

Trasovací částice, zobrazené na obr. 5-10, zachycují proudění taveniny v přírubě odlitku. Oproti původní variantě je vidět, že ve spodní části příruby nedochází ke vzniku takových turbulencí. Proud taveniny ze zářezu narazí do jádra, čímž dojde k rozbití celistvosti proudu a rozstříknutá tavenina padá spodku příruby. Takto rozrušený proud taveniny nemá sílu k tomu, aby v tavenině vytvářel nějaké větší turbulence. Určitě se ale nejedná o klidné plnění. Zaústění zářezu takto proti jádru navíc zvyšuje riziko tepelného namáhání jádra.

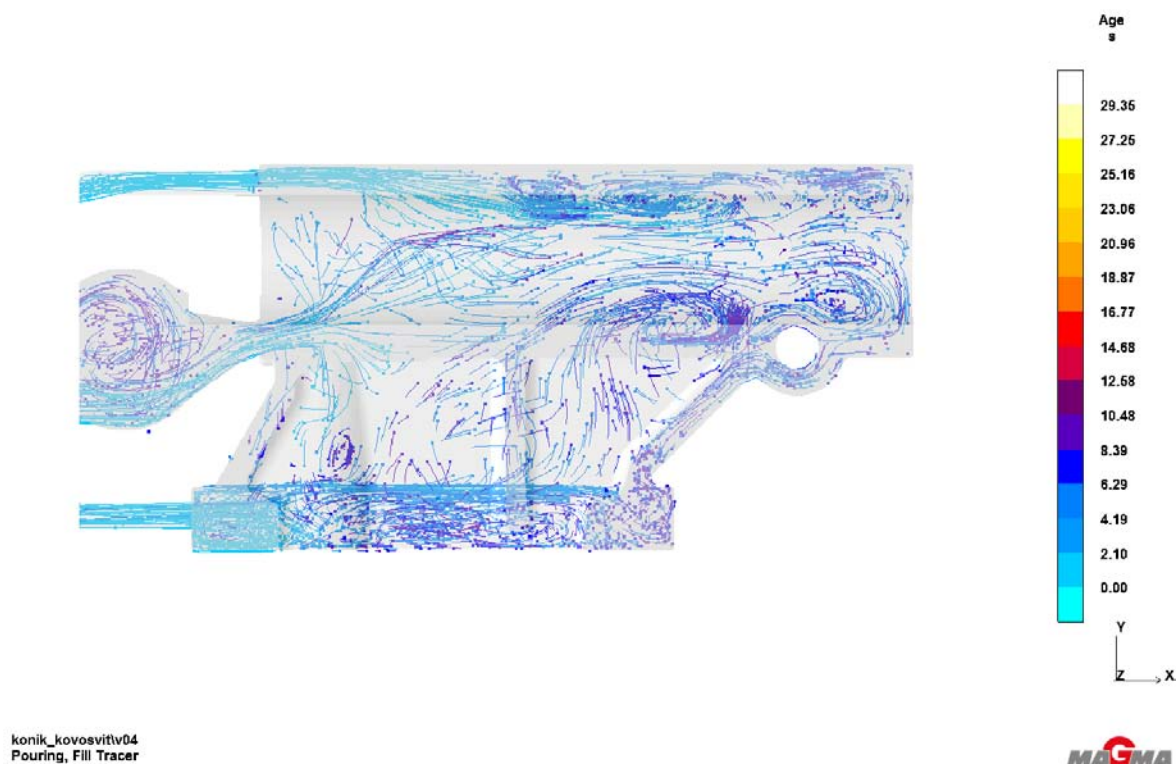
Průběh plnění spodní poloviny dutiny formy je vidět na obr. 5-11, kde dochází k tvorbě turbulencí z důvodu protínání proudů taveniny ze zářezů připojených k pinole a taveniny přitékající od příruby.



obr. 5-9: První část plnění - teplotní pole

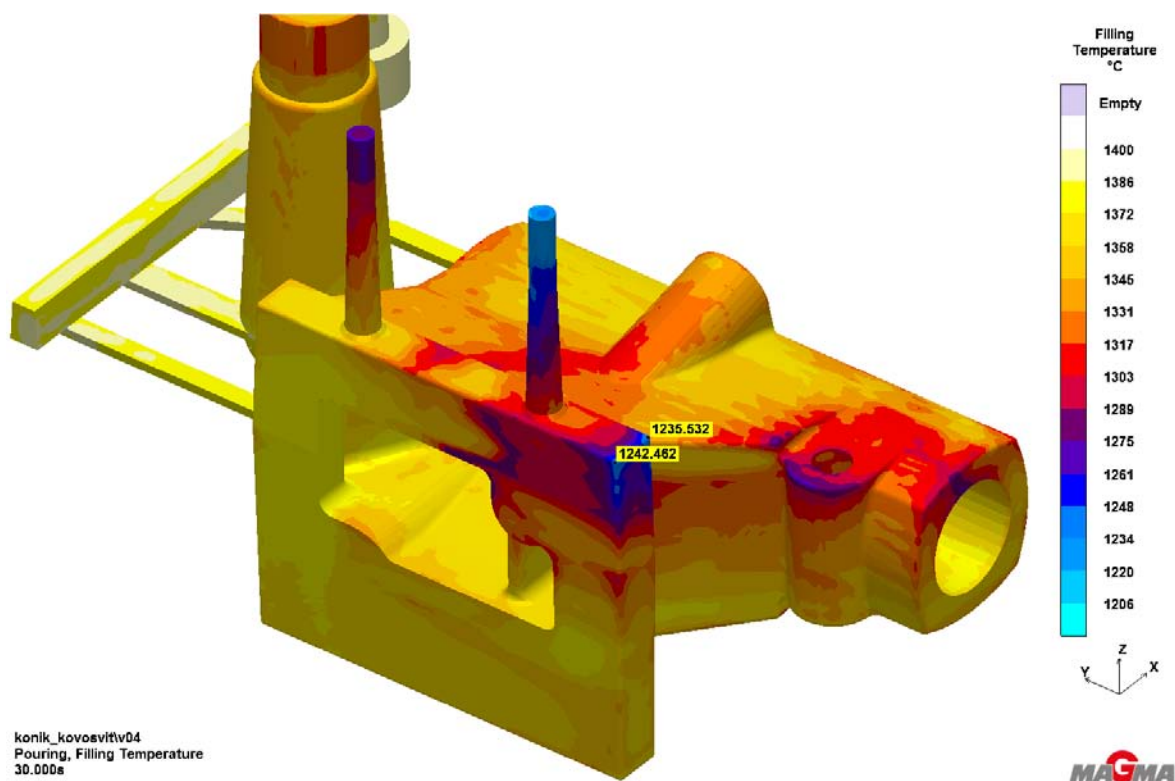


obr. 5-10: Trasovací částice v přírubě



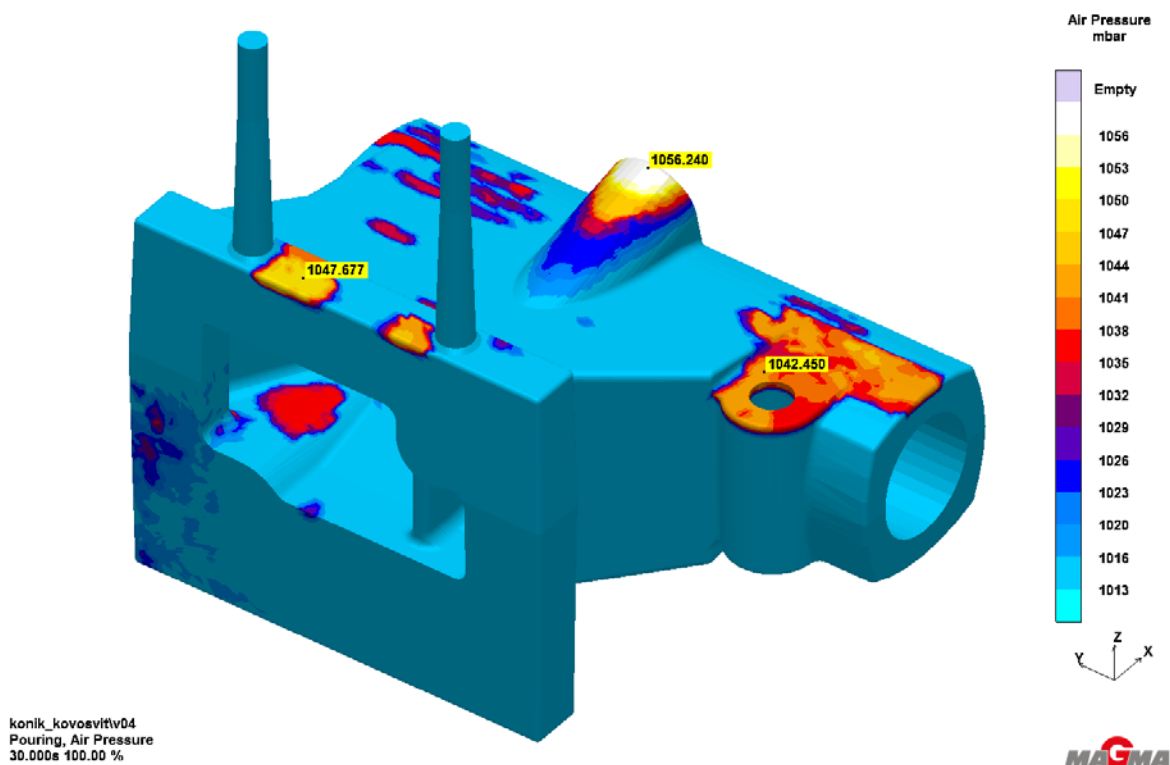
obr. 5-11: Trasovací částice ve spodní části formy

Z analýzy teplotního pole (obr. 5-12) pomocí parametru "Filling Temperature" je vidět, že do místa, kde se nejčastěji objevují vady, tavenina přitéká s nižší teplotou, než do jiných částí odlitku.



obr. 5-12: Filling Temperature

Analýza tlaku plynů v dutině formy ukazuje velice podobné výsledky jako v původní variantě. To se dalo i očekávat, protože nedošlo k žádné změně na odvzdušnění formy a i charakter plnění je velice podobný původní variantě. Kritickým místem zůstává výstupek na odlitku, kde tlak plynu dosahuje hodnoty 1060mbar. To, že se jedná o problematické místo, dokazují i vzniklé vady na odlitcích. Tlak plynu vzniklý na horní ploše příruby je sice v jiné poloze, než v původní variantě, ale to je dáno průběhem plnění. Každá odlitá forma je originál a průběh plnění je v každé formě trochu odlišný a tedy i poloha vzniku tohoto tlaku se může mírně měnit.



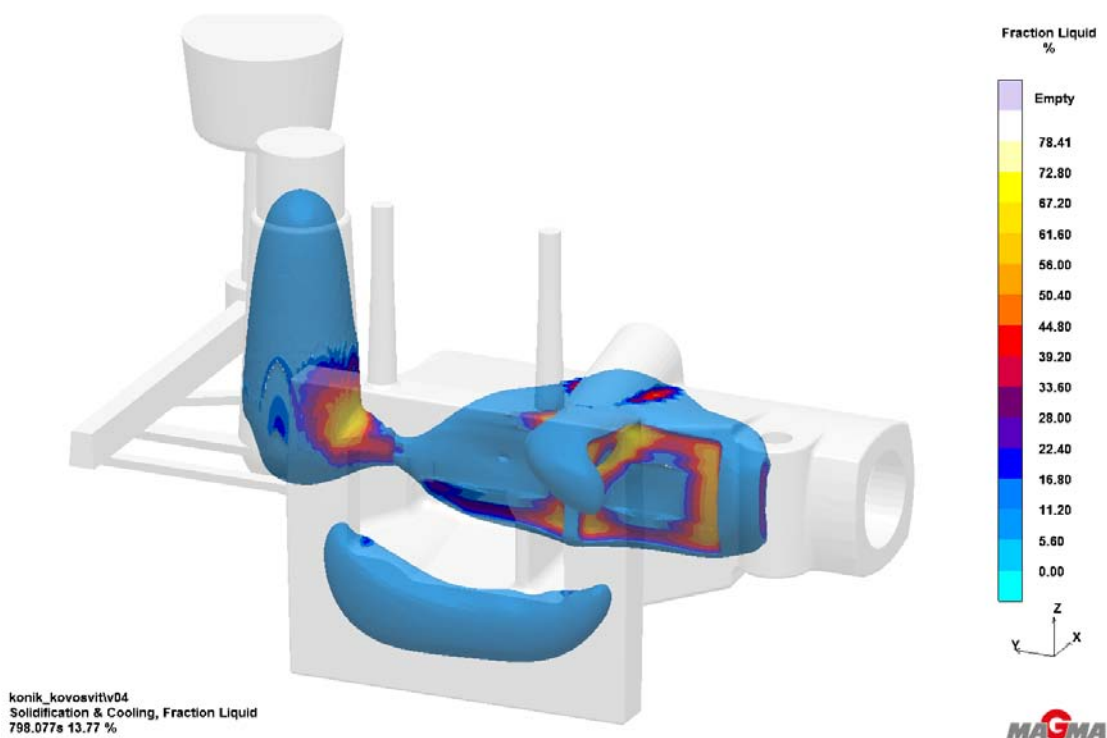
obr. 5-13: Tlak plynů

5.1.4. Analýza tuhnutí

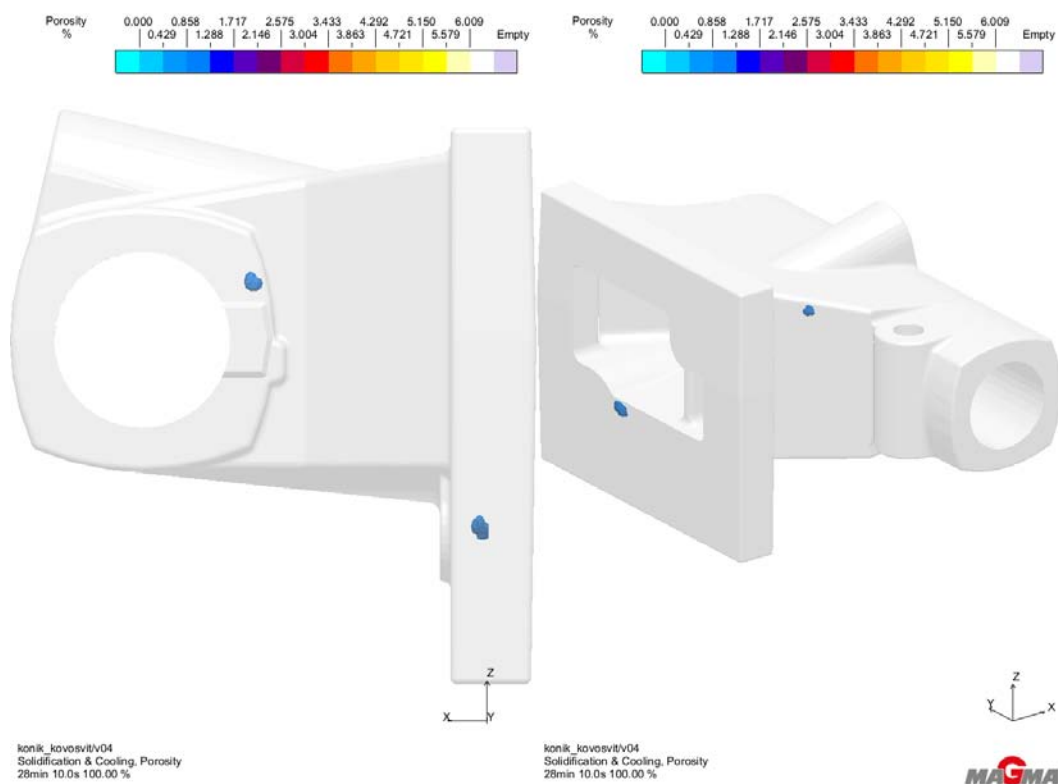
Stejně jako v předchozí variantě se při analýze tuhnutí zaměřím na využitelnost nálitku a na vzniklé staženiny.

Průběh tuhnutí je vidět na obr. 5-14. Po přesunutí nálitku k pinole, došlo k dřívějšímu odříznutí taveniny ve přírubě. Ale také u pinole dojde k předčasnému natuhnutí krčku odlitku v době, kdy je v odlitku přítomen poměrně velký objem taveniny. Z těchto analýz je patrné, že odlitek nemůže nijak ovlivnit velikost vzniklých staženin a z toho hlediska je jeho použití zbytečné.

Po vyhodnocení tuhnutí u této a původní varianty, jsem vznesl na technologii slévárny KOVOSVIT dotaz, proč tam mají takto předimenzovaný nálitek. Jako první odpověď zaznělo, že tento odlitek se takto odlévá už více jak deset let a na jeho návrhu pracoval člověk, který již ve slévárně není a že se bojí nálitek odstranit, protože neví, co by to mohlo způsobit. To mi přišlo jako ne úplně dostačující důvod k tomu, odlévat 12 kg kovu navíc. Druhý důvod, který byl uveden, už byl trochu oprávněný. Jelikož se jedná o poměrně mohutný a silnostěnný odlitek, byly zde obavy, aby nedošlo k deformacím odlitku, vlivem objemových změn taveniny, při chladnutí z teploty lití, na teplotu liquidu. Tato změna objemu ale určitě nedosahuje takových hodnot, aby na její kompenzaci byl použit tak mohutný nálitek.



obr. 5-14: Průběh tuhnutí



obr. 5-15: Porezita

Z analýzy porezity na obr. 5-15 je vidět, že porezita se objevuje ve stejných oblastech odlitku, jako tomu bylo v původní variantě. Při této simulaci vyšly hodnoty porezity nižší, než v původní variantě, ale to je dáno změnou chemického složení při

simulaci. Porovnání chemického složení z původní varianty a chemického složení této varianty je vidět v Tab. 5-3. V původní variantě bylo použito chemické složení z databáze softwaru MAGMA⁵. Ve variantě č. 1 a č. 2 bylo použito chemické složení, které bylo naměřeno z odlitého vzorku. Po simulaci s tímto složením mi bylo sděleno, že toto chemické složení mi bylo chybně zadáno a u prvků P, S, Cr a Cu by mělo být o jedno desetinné místo méně. Tato nepřesnost mohla mít vliv na rozdíl velikosti vzniklé porozity při simulaci. Při simulaci varianty č. 2 jsem desetinné místo u zmíněných prvků upravil a dané chemické složení použil. Od varianty č. 3 jsem se ale vrátil k chemickému složení, které uvádí simulační software MAGMA⁵.

Tab. 5-3: Porovnání chemického složení

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Cu [%]
Původní varianta	3,35	2,05	0,7	0,2	0,15		
Varianta 1	3,36	1,89	0,58	0,03	0,03	0,009	0,006

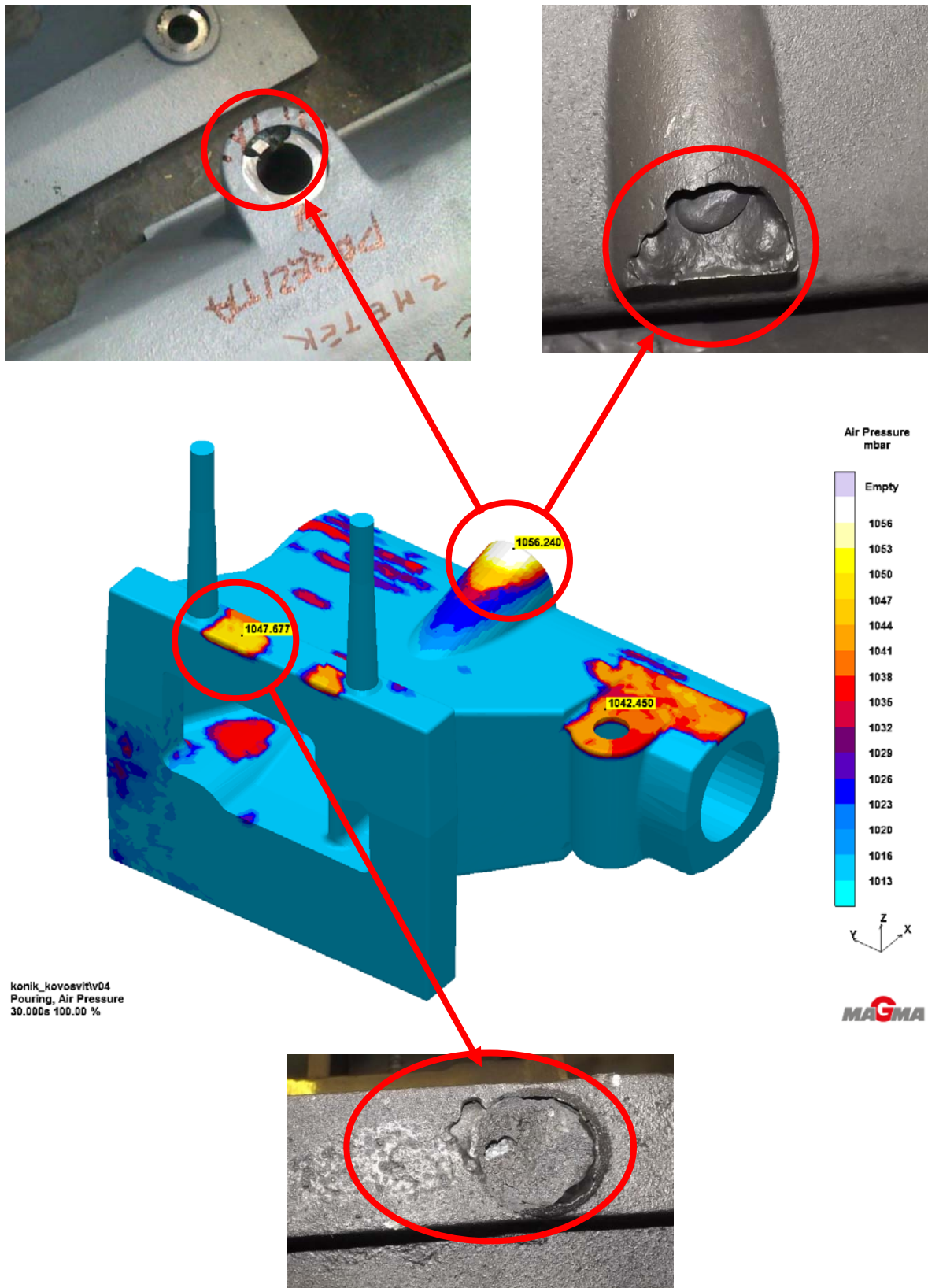
5.1.5. Zhodnocení varianty

Jak jsem uvedl na začátku, tato varianta byla navržena technologií slévárny KOVOSVIT bez jakékoliv vazby na simulaci původní varianty. Oproti ní došlo k posunutí nálitku z oblasti příruby k pinole koníku. S tímto návrhem došlo k odlití několika sérií odlitků. U těchto sérií už sice nedocházelo ke vzniku tak mohutných zavařenin, jako v původním návrhu, ale vady spojené s přítomností plynu zůstaly.

Z hlediska průběhu plnění dutiny formy taveninou nedošlo k výraznému zlepšení oproti předchozí variantě. Tavenina ze zářezu, který je na místě původního nálitku, proudí přímo do tvarového jádra a při nárazu do něj se rozstříkne. Každý takovýto rozstřík může mít za následek zvýšení objemu uzavřeného plynu v tavenině a tím zvyšuje riziko vzniku vad, způsobených přítomností plynu v tavenině.

Analýza tuhnutí taveniny opět ukázala, že náliček není schopen, dosazovat do dvou kritických oblastí, které tuhnou jako poslední a kde vzniká malé procento staženin. Opět se nabízí otázka, zda náliček neodstranit a nebo ho alespoň zmenšit.

Na obr. 5-16 je vidět porovnání výsledků simulace s reálně odlitým odlitkem. V tomto případě se jedná o predikci vad spojených s přítomností plynů v dutině formy. V oblastech odlitku, kde se v simulaci vyskytoval zvýšený tlak plynu, se následně objevily vady, které vznikly právě přítomností plynů v dutině formy.



obr. 5-16: Srovnání simulace s reálným odlitkem

5.2. Varianta č. 2

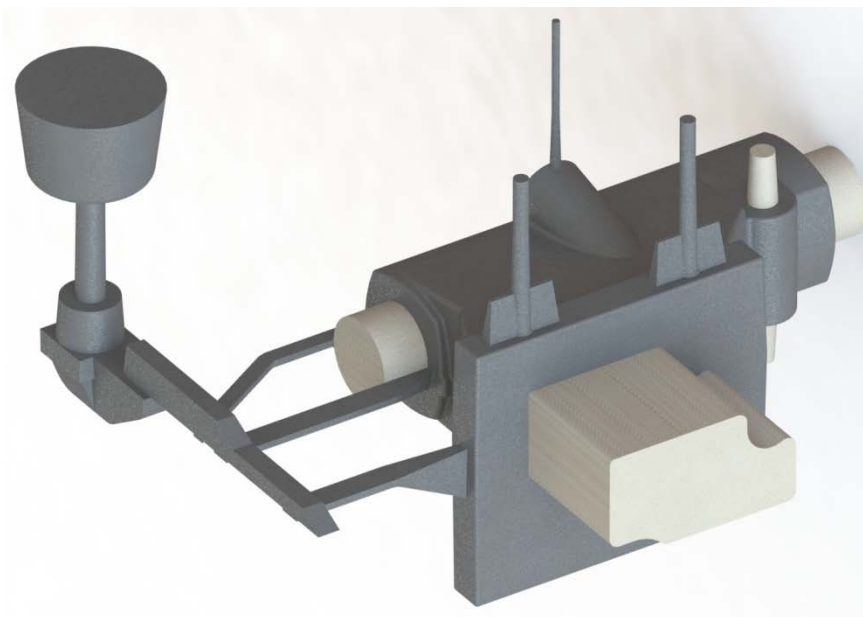
Tato varianta vychází z varianty č. 1. Hlavní změnou u této varianty je odstranění nálitku. Poloha odlitku a vtoková soustava byla z velké části zachována, a to hlavně z důvodu, aby bylo možné provést co možná nejpřesnější porovnání chování jednotlivých variant.

5.2.1. Popis varianty

Jak jsem již uvedl, hlavní změnou u této varianty, je odstranění nálitku. Malou úpravou prošla vtoková soustava, kde k zaústění do odlitku byly použity nožové zářezy. Hlavně nožový zářez, napojený k přírubě, by měl zlepšit charakter plnění, kdy tavenina bude v první části plnění usměrněna pod jádro a ne přímo do jádra, jak tomu bylo ve variantě 1. 3D model varianty č. 2 je zobrazen na obr. 5-17.

Úpravou prošel i systém odvodu dutiny formy. Na horní ploše příruby byly k odvodu plynů přidány "křídélka", aby byla pokryta větší plocha a zamezilo se tak uzavírání plynů vedle kolíků, jak se někdy stávalo u předchozí varianty. Také byl přidán jeden odvod plynů na výstupek u pinole, aby i z této oblasti byl zajištěn odvod plynů, které zde způsobovaly nemalé problémy.

Do vtokového systému byl přidán filtr, který je umístěn pod vtokovým kulem. Tento filtr měl být použit už v předchozí variantě, ale při výrobě modelové desky došlo patrně k jeho přehlédnutí a na modelovou desku přidán nebyl.



obr. 5-17: 3D model varianty

Parametry pro nastavení simulace jsou uvedeny v Tab. 5-4 a chemické složení taveniny při simulaci je uvedeno v Tab. 5-5. Náčrt varianty je uveden v příloze.

Tab. 5-4: Parametry pro nastavení simulace

Varianta č. 2		
Materiál odlitku	EN GJL 200	
Hmotnost odlévaného kovu	63	kg
Počáteční teplota lití	1400	°C
Doba lití	30	s
Průřez zářezů	470	mm ²
Materiál jader		
velké tvarové jádro	CT směs	
válcová jádra	CT směs	
Ochranný nátěr jader	ANO	
velké tvarové jádro	alumino - silikátový + zirkonový	
válcová jádra	alumino - silikátový	
Filtr	ANO	
hustota filtru	10	ppi

Tab. 5-5: Chemické složení taveniny pro simulaci

třída materiálu	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Cu [%]
20	3,36	1,89	0,58	0,3	0,3	0,09	0,06

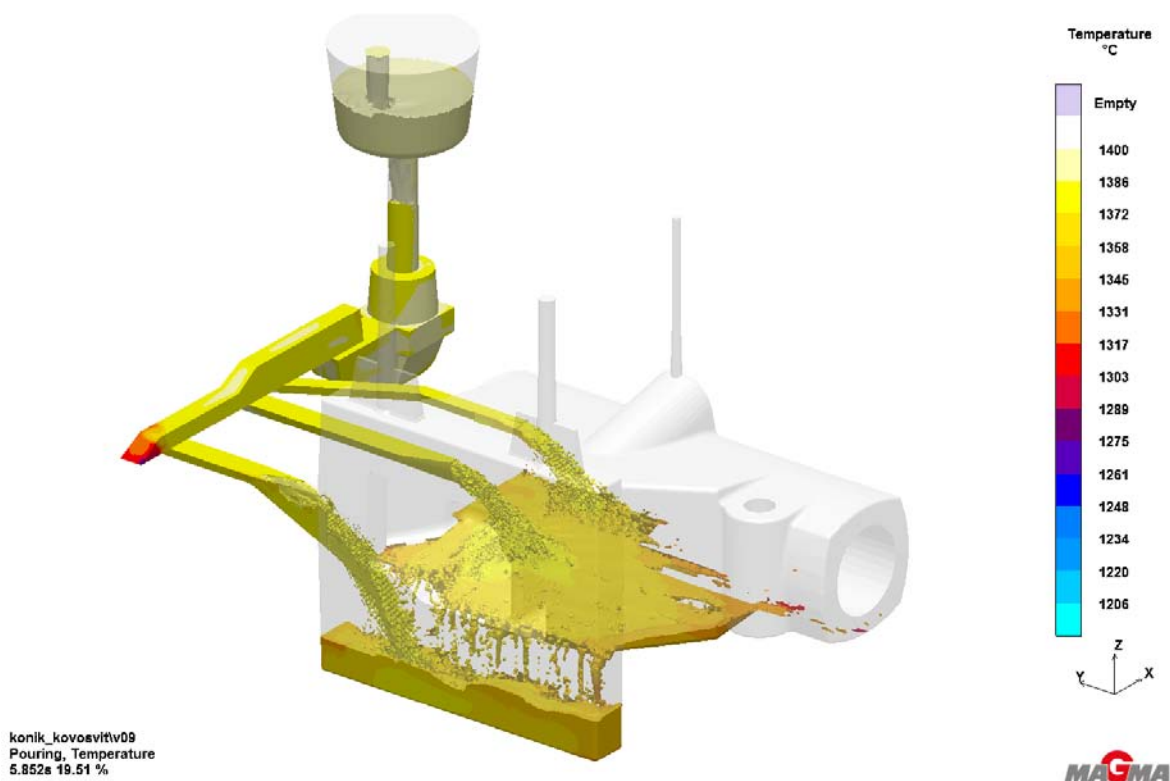
5.2.2. Analýza plnění

Na obr. 5-18 je zachyceno plnění dutiny formy a je zde i vidět, že nožový zářez, napojený k přírubě koníku, opravdu dokázal usměrnit proud taveniny pod tvarové jádro a nedochází k jeho rozstříku. Stále zde ale vzniká problém s padáním kovu, při zaplňování spodní části formy. Řešení tohoto problému bude asi potřebovat výraznější změnu vtokové soustavy, nebo úpravu polohy odlitku.

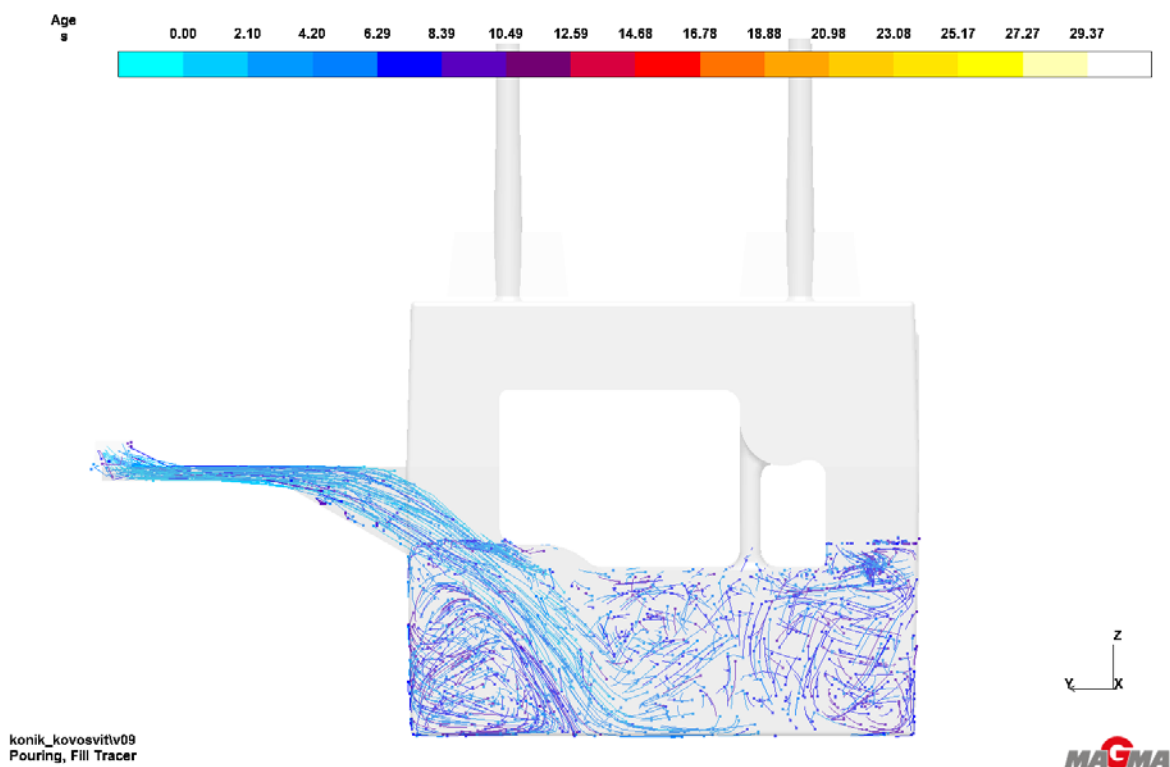
Z analýzy trasovacích částic na obr. 5-19 je vidět, jak nožový zářez v přírubě usměrňuje proud taveniny pod jádro, při plnění spodní části dutiny formy. Nevýhoda tohoto usměrnění je, že tavenina proudí do spodní části formy poměrně velkou rychlostí a způsobuje turbulence v tavenině.

Na obr. 5-20 jsem provedl porovnání tlaku plynů v dutině formy. Výsledek vlevo patří k variantě č. 2 a výsledek vpravo k variantě č. 1. Jak je z porovnání vidět, tak kolík, přidaný na výstupek u pinoly, dokázal odvést plyn z toho místa a tlak plynu klesl na úroveň atmosférického tlaku. Tím by se mělo omezit riziko vzniku vad v tomto místě.

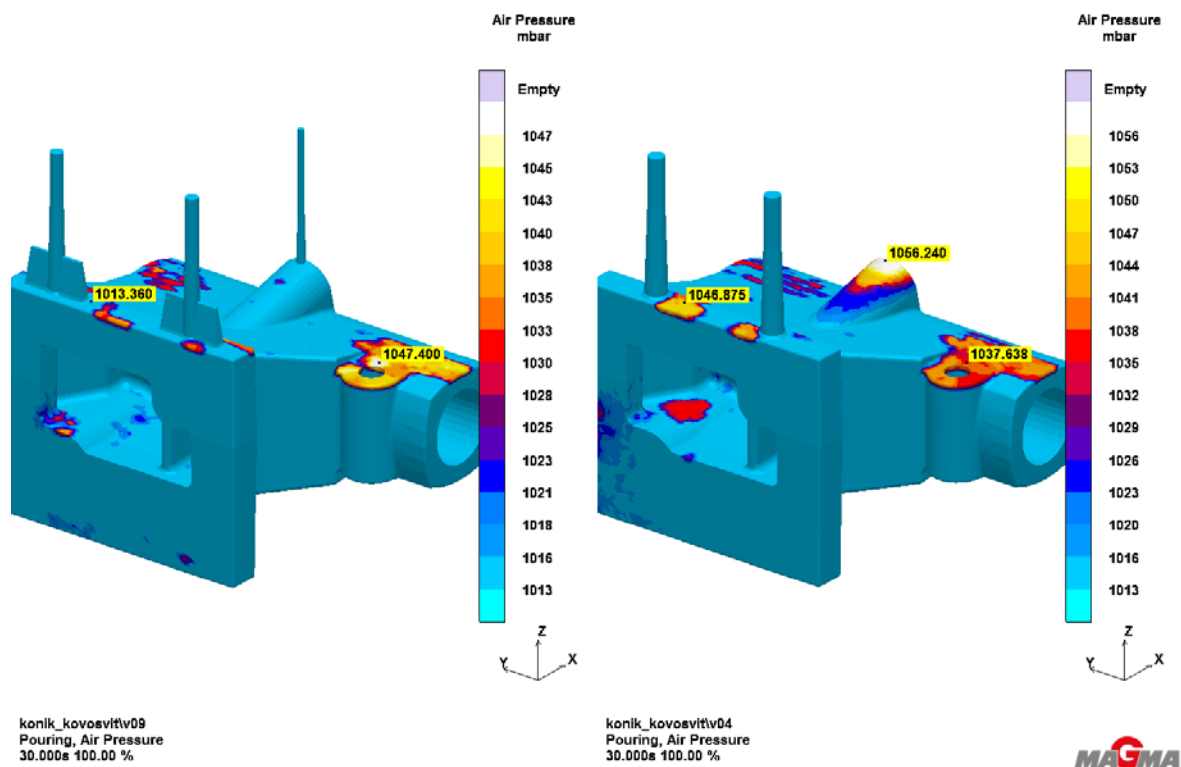
Zároveň i křídélka, která byla umístěna na horní plochu příruby, pomohla odvést větší část plynů z této plochy.



obr. 5-18: Analýza plnění - teplotní pole

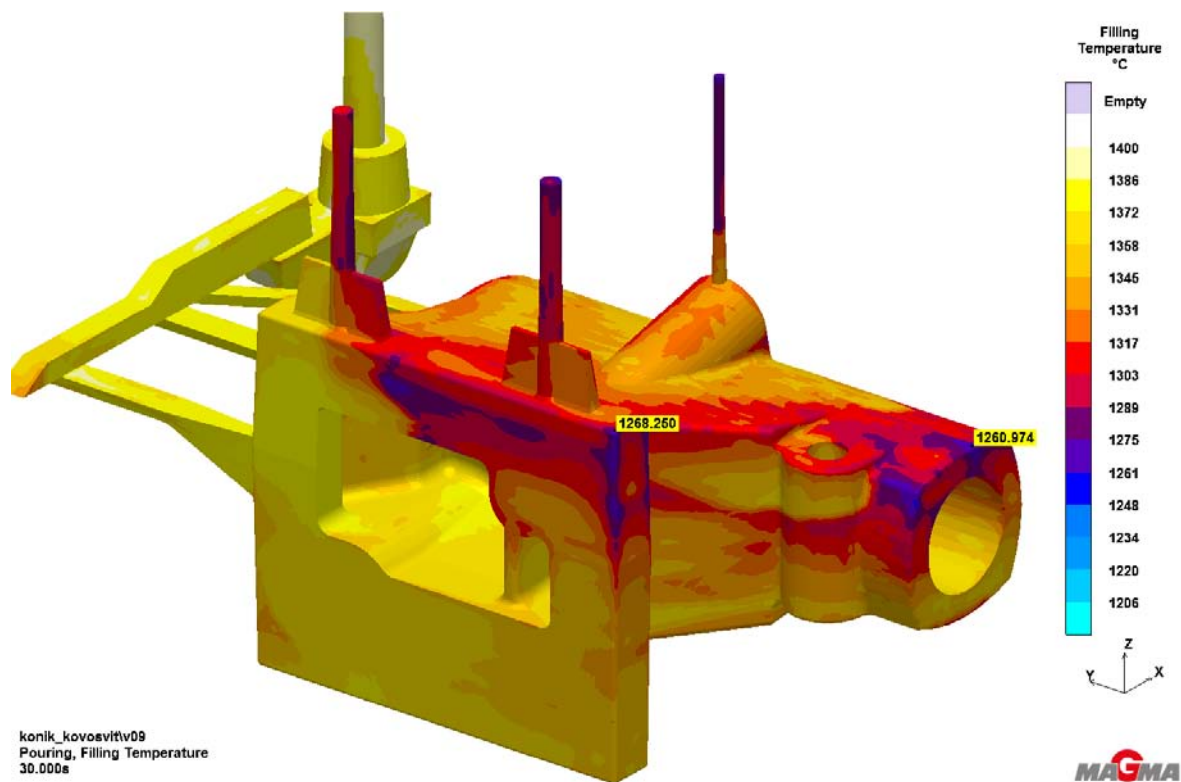


obr. 5-19: Trasovací částice v přírubě



obr. 5-20: Porovnání tlaku plynů

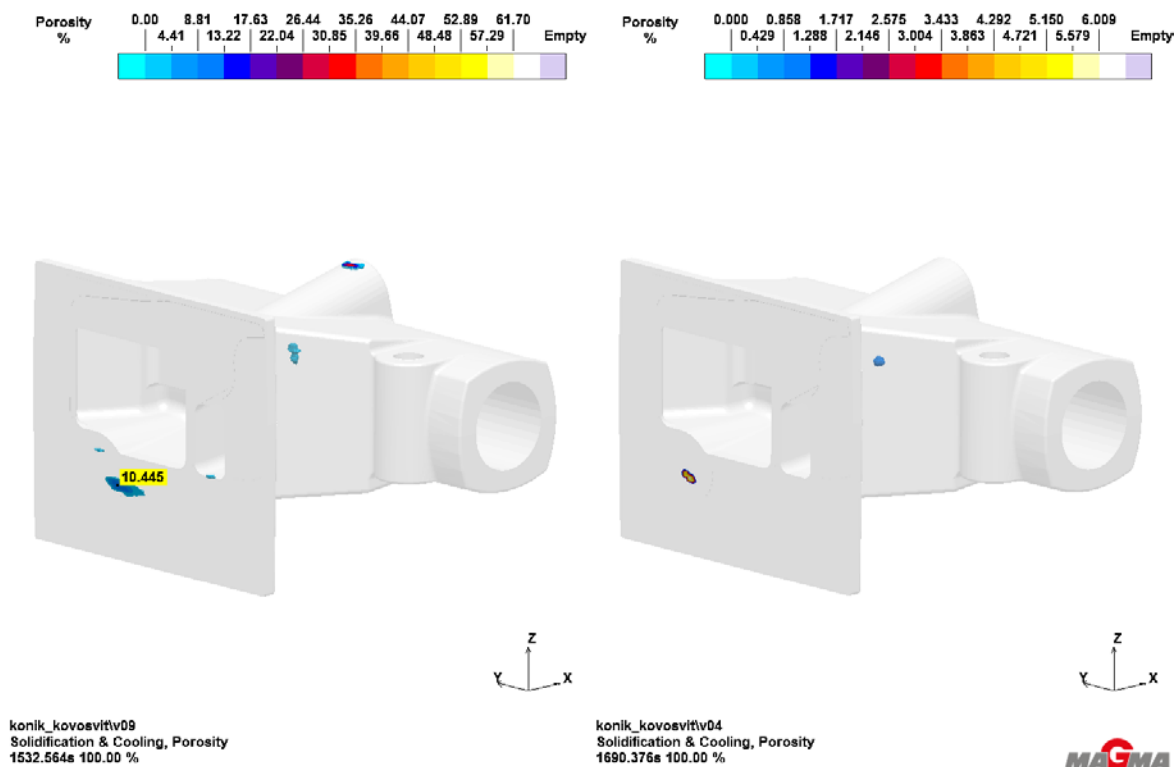
Teplotní pole charakterizované parametrem "Filling Temperature" je vidět na obr. 5-21. Teplotní pole je velice podobné jako ve variantě č. 1. I zde je v horní části příruby chladnější kov.



obr. 5-21: Filling Temperature

5.2.3. Analýza tuhnutí

Hlavním parametrem, který jsem u této varianty chtěl vyhodnotit, je vzniklá porezita. Porovnání porezity u této varianty a u varianty č. 1 je vidět na obr. 5-22. Vlevo je zobrazena porezita ve variantě č. 2 a vpravo ve variantě č. 1. Oproti variantě č. 1, vzrostla hodnota porezity z přibližně 6% na asi 10%. Vzhledem k funkčnosti odlitku a poloze staženiny, je tento nárůst porezity v jednotkách procent zanedbatelný. Proto bych doporučil odlévat odlitek bez použití nálitku.



obr. 5-22: Porezita

5.2.4. Zhodnocení varianty

Tato varianta měla sloužit primárně k ověření funkčnosti nálitku. Z analýzy tuhnutí a výsledných hodnot porezity jsem vyvodil doporučení odlévat tento odlitek bez použití nálitku. Odstraněním nálitku by se při každé odlité formě ušetřilo 12 kg kovu.

Pro zaústění vtokové soustavy do odlitku jsem navrhl použít nožové zářezy pro lepší usměrnění proudu taveniny. Díky tomu se zamezilo rozstříku taveniny o tvarové jádro, zároveň ale způsobuje neklidné plnění. V tomto případě má na neklidné plnění vliv opět fakt, že tavenina padá do poměrně velké hloubky.

Úpravou prošel i odvzdušňovací systém, kdy ke kolíkům na horní ploše příruby byla přidána křídélka, aby se docílilo odvodu plynů z větší plochy. Dále byl přidán kolík na výstupek u pinole.

Největším problémem zůstává průběh plnění. Aby bylo možné tento problém vyřešit, bude potřeba upravit stávající vtokovou soustavu, případně upravit polohu odlitku ve formě.

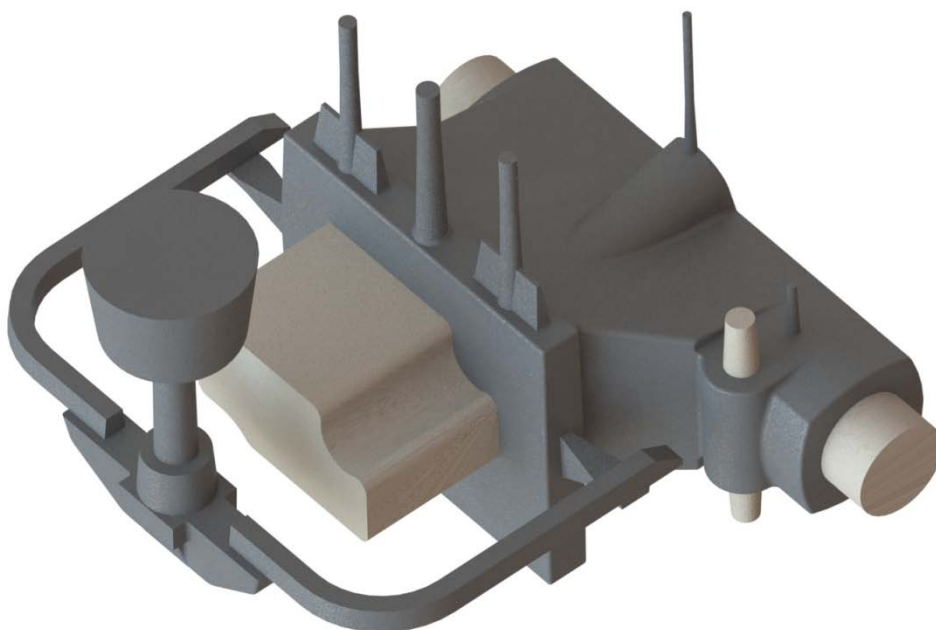
5.3. Varianta č. 3

Vzhledem k nevhodnému průběhu plnění v předchozích návrzích bylo potřeba navrhnout úpravu vtokové soustavy, aby bylo zajištěno klidnější plnění bez rozstříku taveniny a bez výraznějších turbulencí taveniny.

5.3.1. Popis varianty

U této varianty jsem úplně přepracoval vtokovou soustavu. Model nového návrhu je na obr. 5-23. Z obrázku je patrné, k jaké změně došlo. Místo plnění odlitku z boku se vtoková soustava přesunula pod odlitek a plnění se provádí dvěma nožovými zářezy, zavedenými do příruby koníku. Přivedením obou zářezů do příruby koníku se zamezí vzniku "vodopádu", který vznikal při pádu taveniny přicházející od zářezů od pinoly do spodní části formy. Nožové zářezy by měly zajistit usměrnění proudu taveniny pod jádro a po zaplnění spodní části by mělo docházet ke klidnému a rovnoměrnému plnění dutiny formy. Náčrt varianty je uveden v příloze.

I když ve variantě č. 2 se zdálo, že navržené odvědušnění bude dostačující, tak po konzultaci jsem přidal ještě jeden kolík na horní plochu příruby, aby celková plocha odvědušňovacích kolíků byla rovna, nebo raději větší, než je plocha zářezů.



obr. 5-23: 3D model návrhu

Parametry pro nastavení simulace jsou uvedeny v Tab. 5-6 a chemické složení taveniny při simulaci je uvedeno v Tab. 5-7.

Tab. 5-6: Parametry pro nastavení simulace

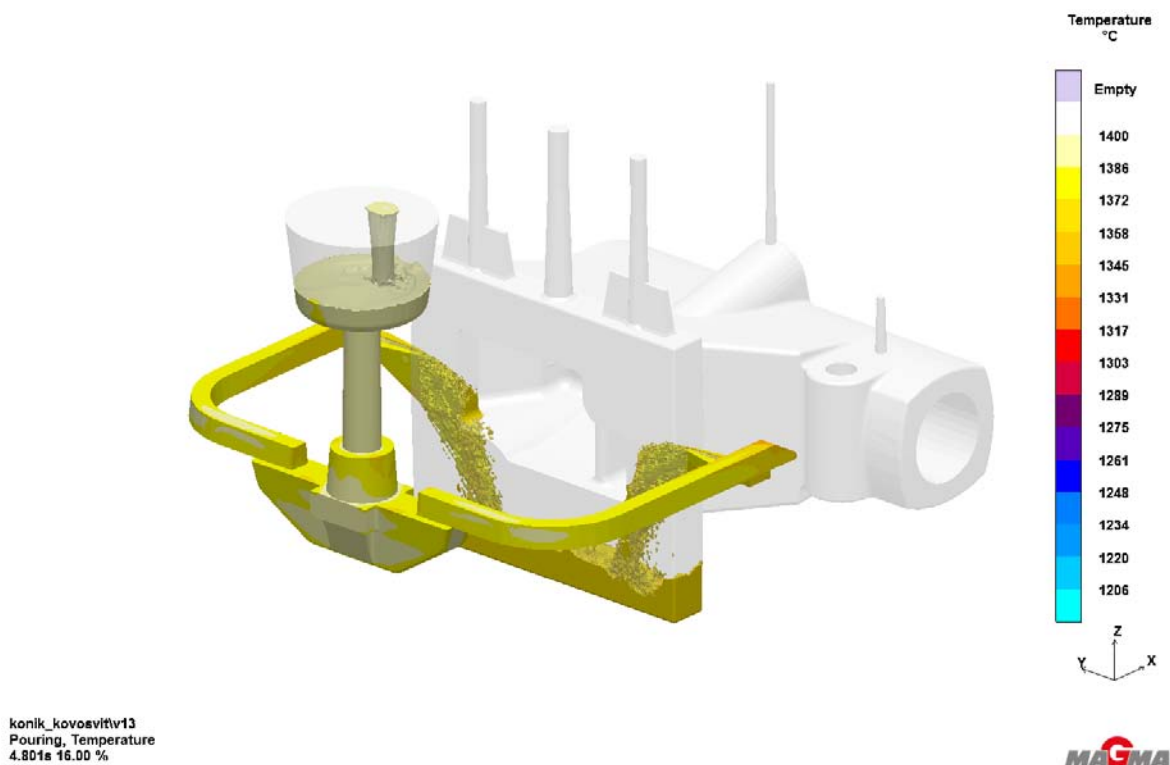
Varianta č. 3		
Materiál odlitku	EN GJL 200	
Hmotnost odlévaného kovu	65	kg
Počáteční teplota lití	1400	°C
Doba lití	30	s
Průřez zářezů		mm ²
verze 1	430	mm ²
verze 2	600	mm ²
Materiál jader		
velké tvarové jádro	COLD BOX	
válcová jádra	CT směs	
Ochranný nátěr jader	ANO	
velké tvarové jádro	alumino - silikátový + zirkonový	
válcová jádra	alumino - silikátový	
Filtr	ANO	
hustota filtru	10	ppi

Tab. 5-7: Chemické složení taveniny při simulaci

třída materiálu	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Cu [%]
20	3,35	2,05	0,7	0,2	0,1	/	/

5.3.2. Analýza plnění

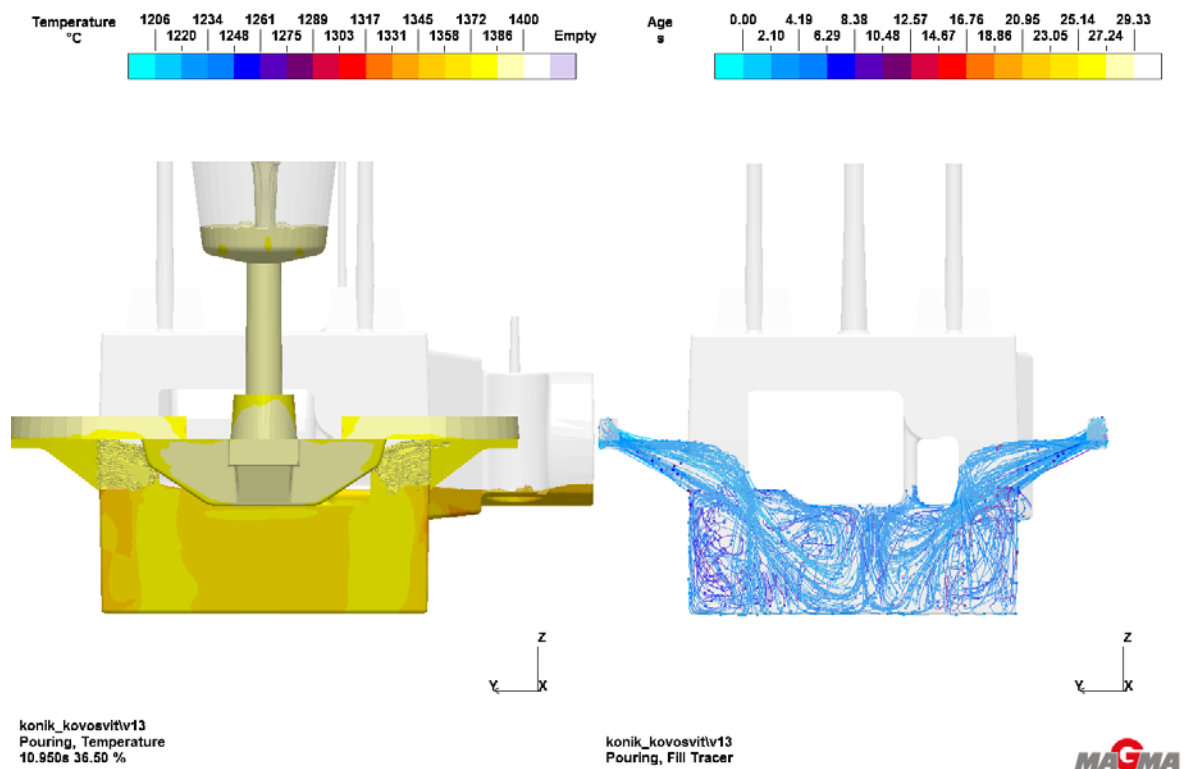
Začátek plnění dutiny formy taveninou je vidět na obr. 5-24. Tavenina je usměrněna nožovými zářezy pod jádro a plnění vypadá relativně dobře. Mé znepokojení nastalo ve chvíli, kdy jsem začal analyzovat proudění taveniny pomocí trasovacích částic. Tato analýza je provedena na obr. 5-25 a je z ní vidět, že nožové zářezy sice usměrňují taveniny pod jádro, ale pod ním se oba proudy srážejí a dochází ke vzniku velkých turbulencí.



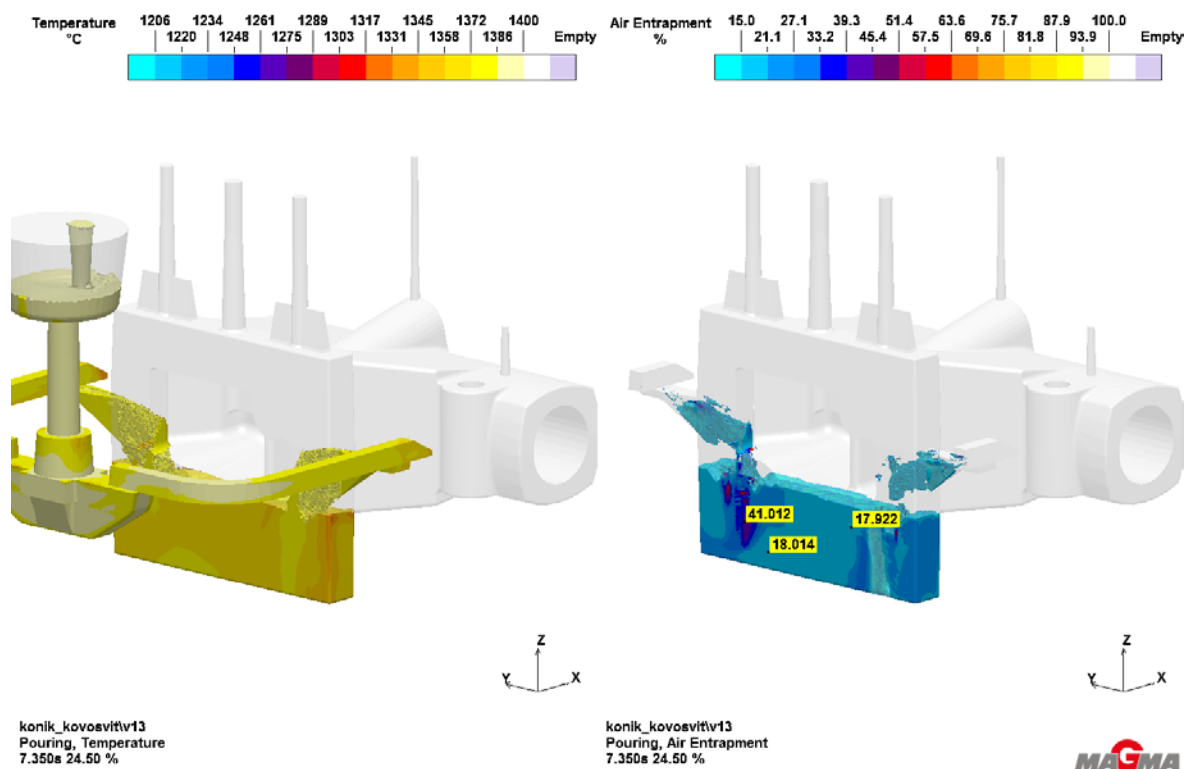
obr. 5-24: Začátek plnění - teplotní pole

Při analýze množství pohlcovaného vzduchu do taveniny (viz obr. 5-26), na mě čekalo další nemilé překvapení. Jak je z analýzy vidět, dochází k pohlcování velkého množství plynu do taveniny. Odpověď na otázku, proč k tomuto uzavírání plynu dochází, by mohla poskytnout analýza rychlosti proudění taveniny, která je na obr. 5-27. Z analýzy je vidět, že tavenina proudí do volného prostoru rychlostí vyšší, než je $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tato rychlost může mít za následek, že tavenina do sebe strhává plyn, který se v ní pak uzavírá.

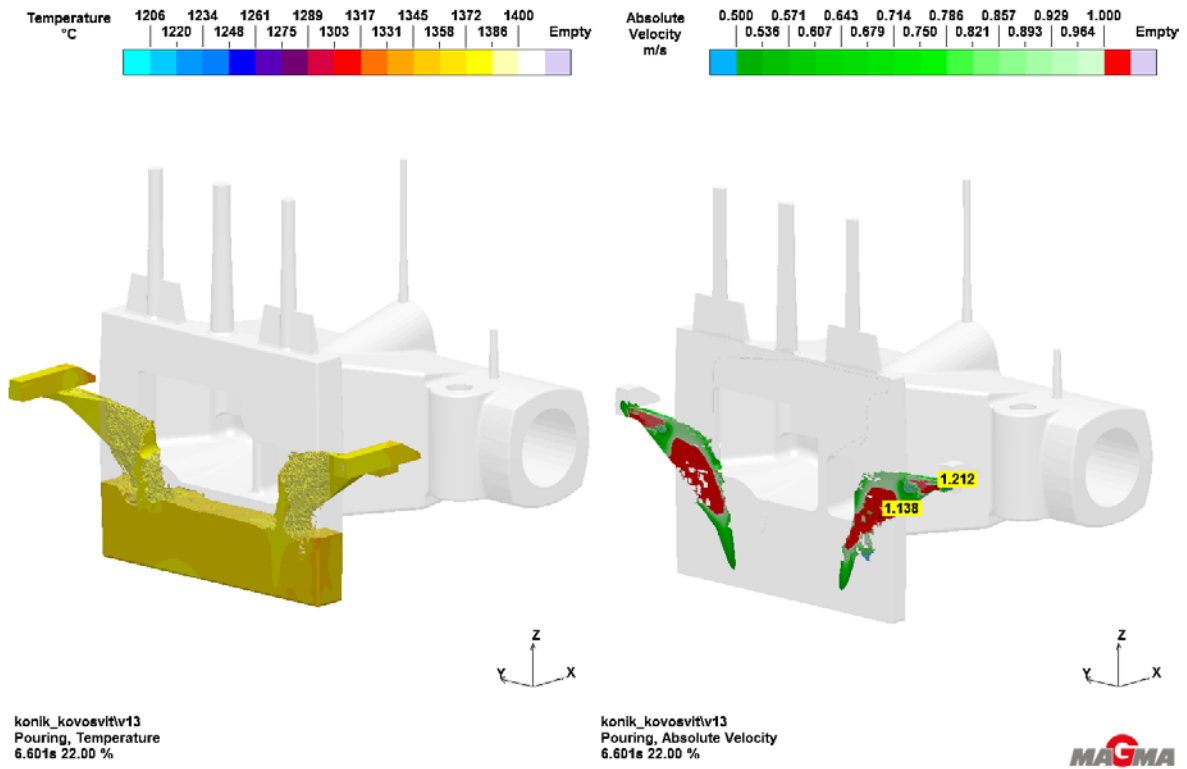
Příčinu tohoto chování bych v první řadě hledal v nevhodně dimenzovaném rozměru nožového zářezu. Plocha nožového zářezu, kterou je zářez napojený na odlitek, by měla být výrazně větší, než je řídicí průřez zářezu, aby se tavenina stačila zklidnit. Na rychlost taveniny v zářezu mohla mít vliv také nedostatečná délka zářezu. Pro prodloužení zářezu by se musel navrhnout struskovák větším rozevřením.



obr. 5-25: Analýza trasovacích častic

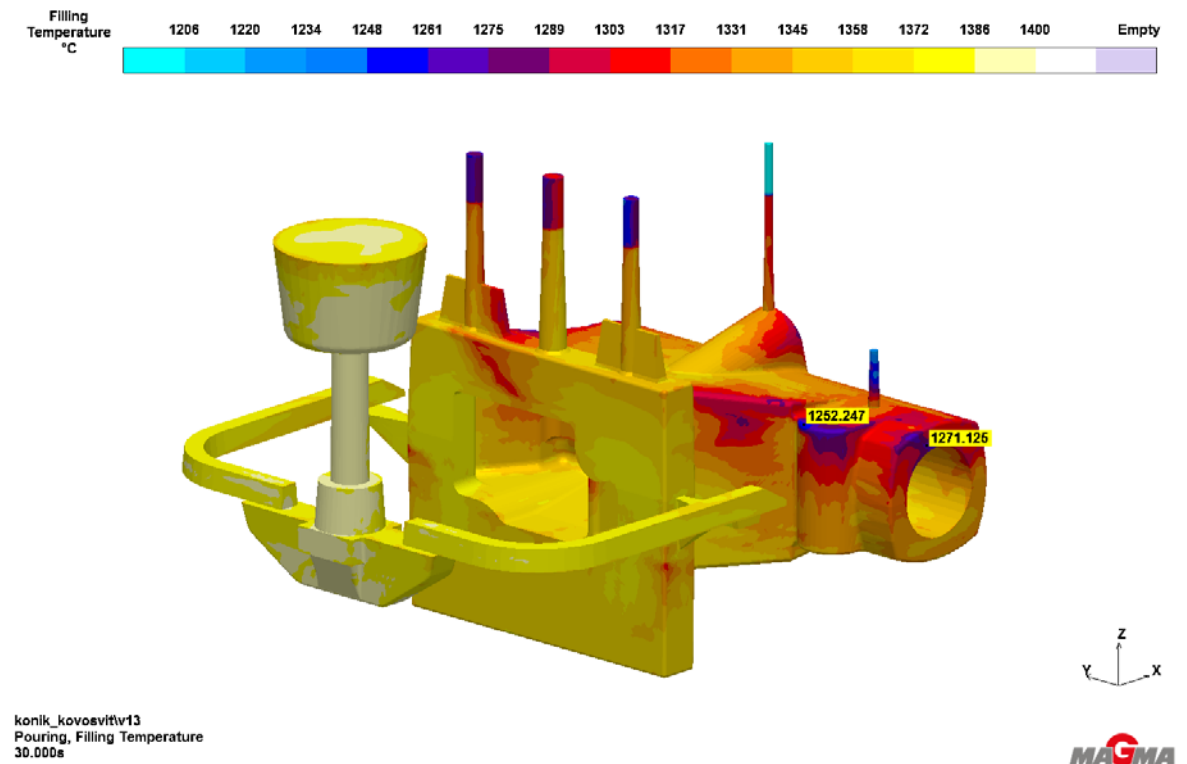


obr. 5-26: Pohlcený vzduch v tavenině

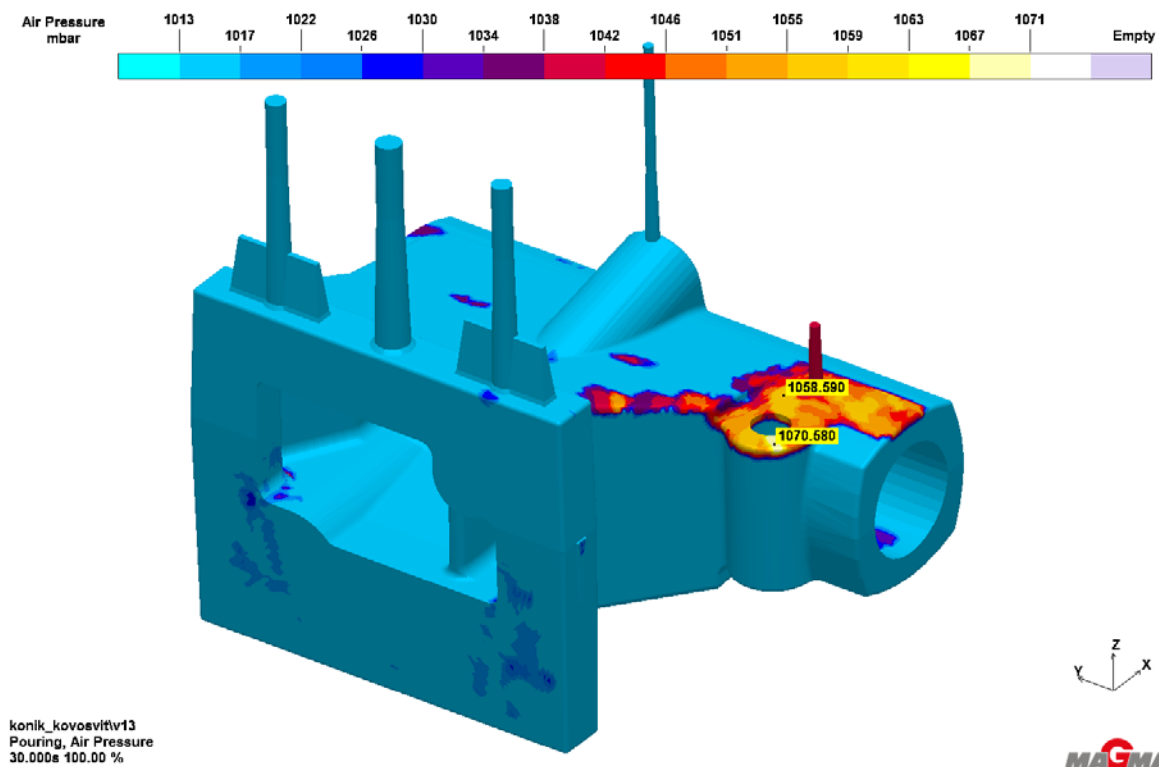


obr. 5-27: Analýza rychlosti proudu taveniny

Jednou kladnou stránkou tohoto návrhu je konzistentní teplotné pole. Na obr. 5-28 je analýza teplotního pole pomocí parametru "Filling Temperature" a z analýzy je opravdu vidět, že teplota taveniny je v celém objemu velice vyrovnaná.



obr. 5-28: Filling Temperature



obr. 5-29: Analýza tlaku plynu

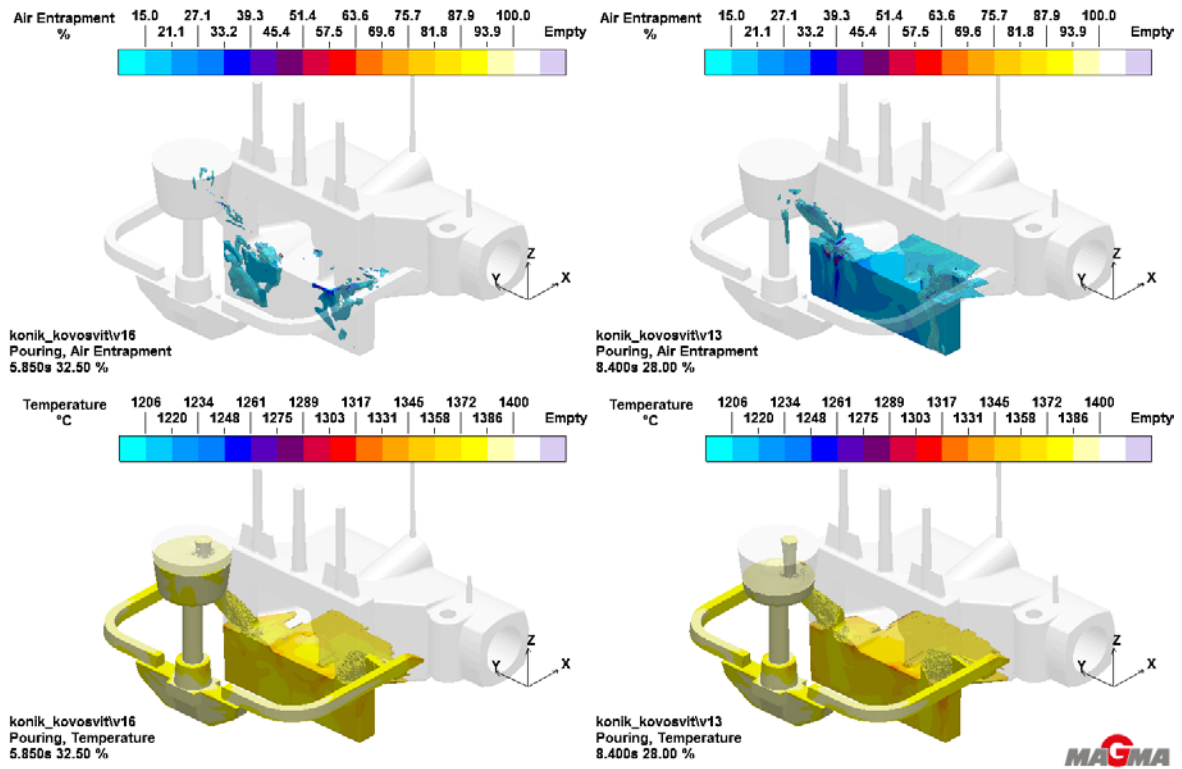
Také analýza plynu vypadá relativně dobře. Jak na horní ploše příruby, tak i ve výstupku u pinoly není žádný zvýšený tlak plynu. Zvýšený tlak plynu se ale stále drží v oblasti kolem malého válcového jádra. Zde by ale nemělo docházet k žádným problémům. Tavenina zde má dost vysokou teplotu a zároveň zde tavenina stále proudí.

Úprava průřezu nožového zářezu

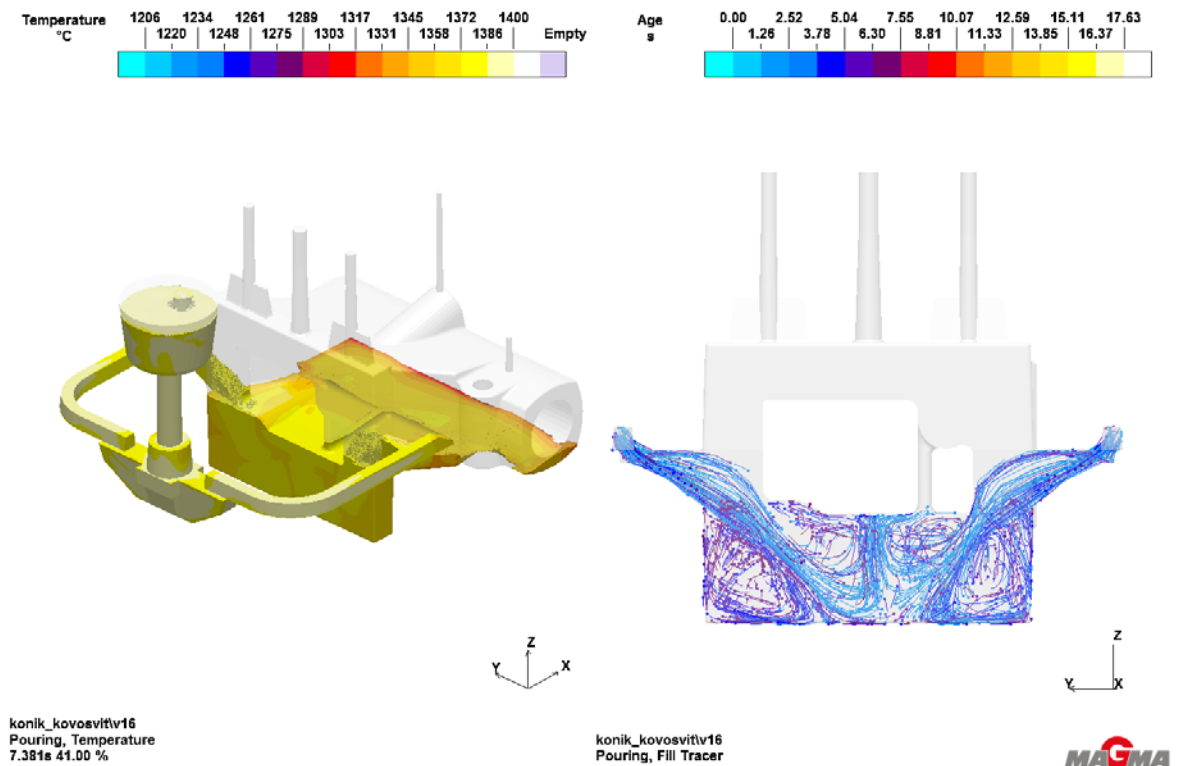
V rámci této varianty bych zde ještě uvedl variantu, ve které jsem upravil průřez nožového zářezu. Uvádím to v rámci této varianty, protože došlo opravdu pouze ke změně průřezu nožového zářezu a bylo by tedy zbytečné vyčleňovat pro tento návrh samostatnou kapitolu.

Na obr. 5-30 je vidět porovnání množství uzavřeného plynu před a po úpravě průřezu nožového zářezu. Obrázek vpravo je před úpravou a obrázek vlevo je po úpravě průřezu. Z uvedeného obrázku je patrné, že zvětšení průřezu opravu pomohlo, aby se snížil objem pohlcovaného plynu. Stále zde k nějakému pohlcování dochází.

Z obr. 5-31 je vidět stejný problém s prouděním taveniny jako byl v případě menších zářezů. Stále zde dochází ke vzniku turbulencí.



obr. 5-30: Porovnání množství uzavřeného vzduchu

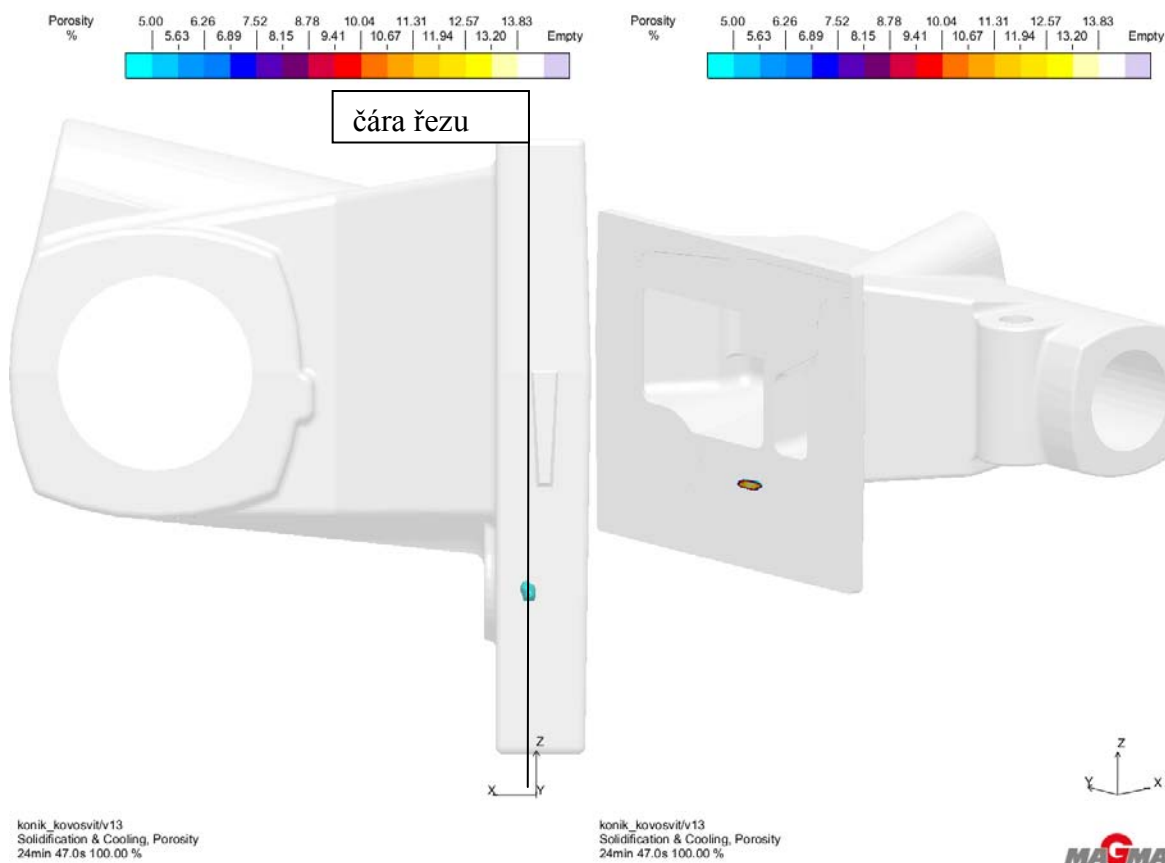


obr. 5-31: Proudění taveniny

5.3.3. Analýza tuhnutí

Při analýze tuhnutí jsem se zaměřil primárně na hodnoty porezity. Na obr. 5-32 je vidět výsledná porezita v odlitku. Oproti předchozím variantám je vidět, že došlo k malé

změně polohy porezity. Tato změna polohy mohla být způsobena změnou teplotního pole odlitku, které bylo ovlivněno zaústěním zářezů z obou stran příruby. Hodnota porezity je 14%, což je stále přípustná hodnota, která by neměla mít vliv na funkci odlitku. Při vyhodnocení byly skryty staženiny menší než 5%, proto zde není vidět staženina pod výstupkem.



obr. 5-32: Porezita + řez porezitou

5.3.4. Zhodnocení varianty

Novým návrhem vtokové soustavy jsem chtěl docílit klidnějšího plnění bez vzniku turbulencí a hlavně docílit souvislého toku taveniny, bez vzniku rozstříku a podobně. Díky nožovým zářezům, připojeným do příruby, jsem sice dosáhl usměrnění toku taveniny pod tvarové jádro, ale pod tímto jádrem proudy taveniny z jednotlivých zářezů srážely a vytvářely turbulence. Úpravou průřezu nožového zářezu se sice povedlo dosáhnout snížení pohlcovaného plynu, ale na celkový průběh plnění to nemělo velký vliv.

Pozitivem této varianty je konzistentní teplotní pole odlitku. Zároveň se povedlo snížit tlak plynu jak ve výstupku na odlitku, tak i na horní ploše příruby.

Tato varianta tedy má svá pozitiva, ale vzhledem k problémům při plnění, tuto variantu nedoporučuji.

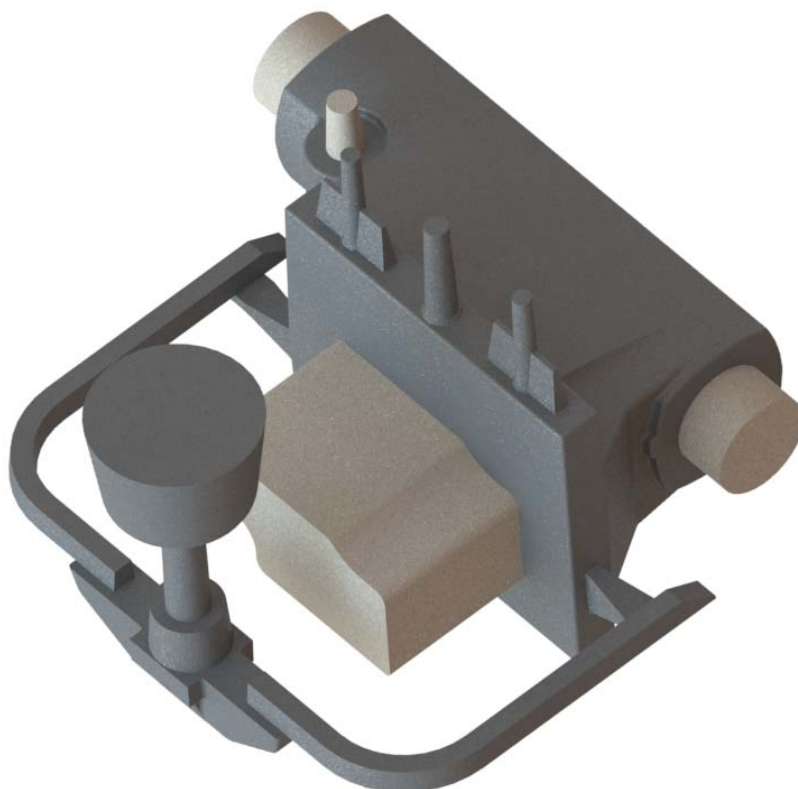
5.4. Varianta č. 4

Tato varianta, svým řešením vtokové soustavy, vychází z varianty č. 3. Úpravou prošla hlavně poloha odlitku ve formě, kdy došlo k jeho otočení "vzhůru nohama".

5.4.1. Popis varianty

Hlavní konstrukční změnou v této variantě, oproti variantě č. 3, je změna polohy odlitku ve formě. Provedl jsem jeho otočení, aby vyšší část příruby byla zaformována do horní poloviny. Tím jsem chtěl docílit toho, aby nedocházelo k padání taveniny do takové hloubky, jako tomu bylo v předchozích variantách. Tímto krokem by se mělo omezit množství pohlcovaného plynu, ale také by mělo dojít k uklidnění proudění taveniny.

Na obr. 5-33 je 3D model nového návrhu. Z toho modelu je vidět, že největší změnou v tomto návrhu je poloha odlitku ve formě. Další prvky, jako odvzdušňovací kolíky a vtoková soustava, zůstaly zachovány. Díky otočení odlitku jsem potlačil riziko vad spojených s přítomností plynu ve výstupku. Náčrt varianty je uveden v příloze.



obr. 5-33: 3D model návrhu

Parametry pro nastavení simulace jsou uvedeny v Tab. 5-8 a chemické složení taveniny při simulaci je uvedeno v Tab. 5-9.

Tab. 5-8: Parametry pro nastavení simulace

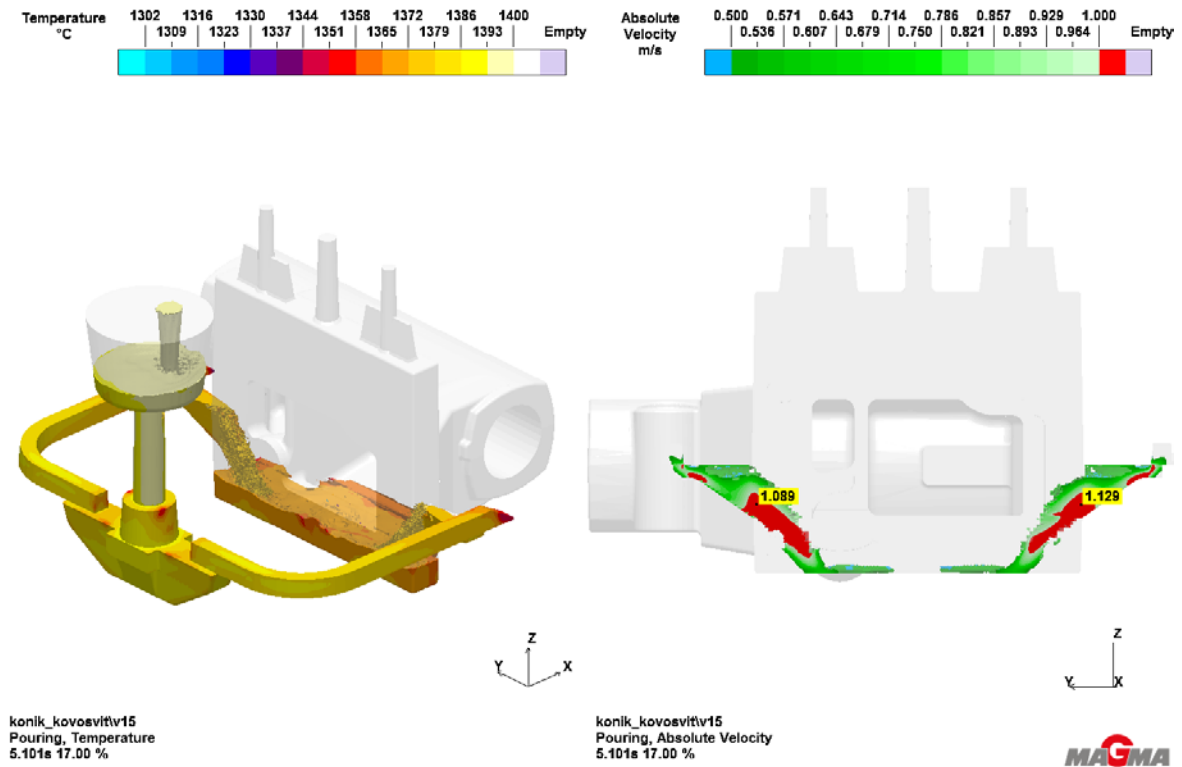
Varianta č. 4		
Materiál odlitku	EN GJL 200	
Hmotnost odlévaného kovu	64,5	kg
Počáteční teplota lití	1400	°C
Doba lití	30	s
Průřez zářezů	560	mm ²
Materiál jader		
velké tvarové jádro	COLD BOX	
válcová jádra	CT směs	
Ochranný nátěr jader	ANO	
velké tvarové jádro	alumino - silikátový + zirkonový	
válcová jádra	alumino - silikátový	
Filtr	ANO	
hustota filtru	10	ppi

Tab. 5-9: Chemické složení taveniny při simulaci

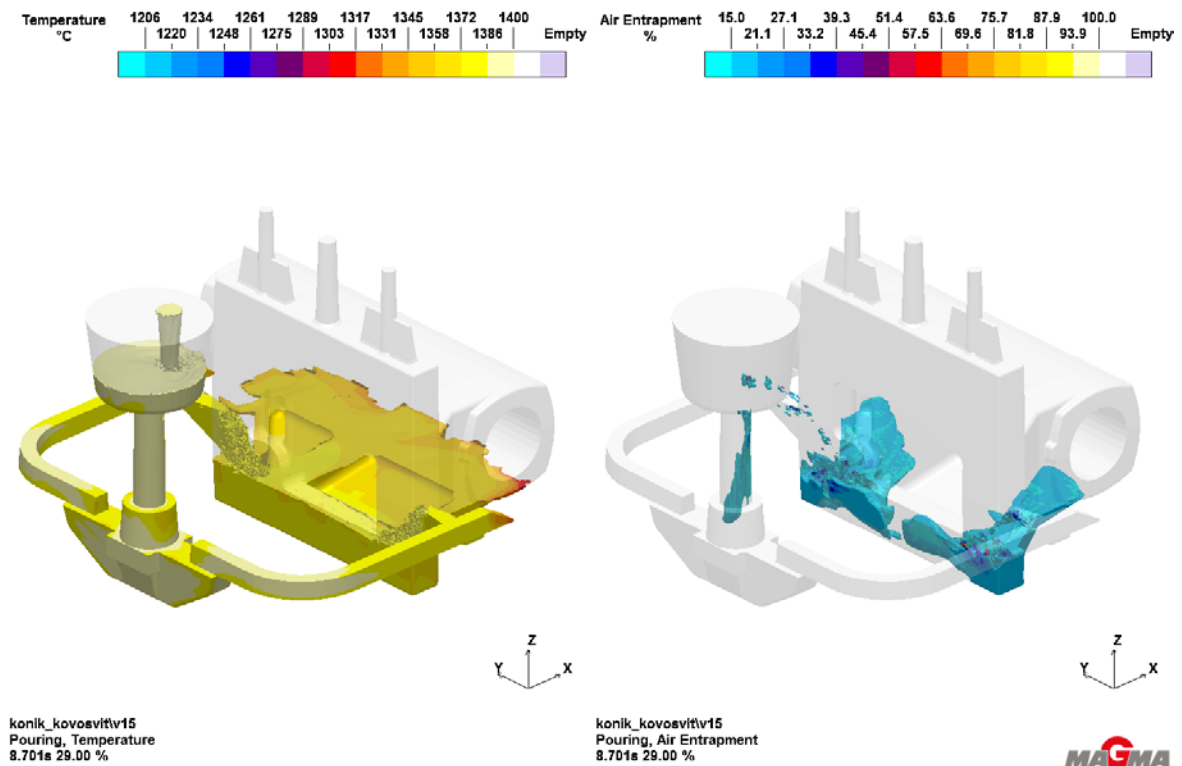
třída materiálu	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Cu [%]
20	3,35	2,05	0,7	0,2	0,1	/	/

5.4.2. Analýza plnění

Hlavním sledovaným parametrem této varianty bude opět analýza plnění. Hned na obr. 5-35 je vidět průběh plnění s analýzou množství uzavřeného plynu. Na první pohled probíhá plnění relativně klidně a tavenina je usměrněna pod jádro. Nicméně je stále vidět, že tavenina proudící ze zářezů pohlcuje relativně hodně vzduchu. To je pravděpodobně způsobenou příliš vysokou rychlostí proudění taveniny ze zářezů.



obr. 5-34: Průběh plnění a analýza rychlosti taveniny v zářezech



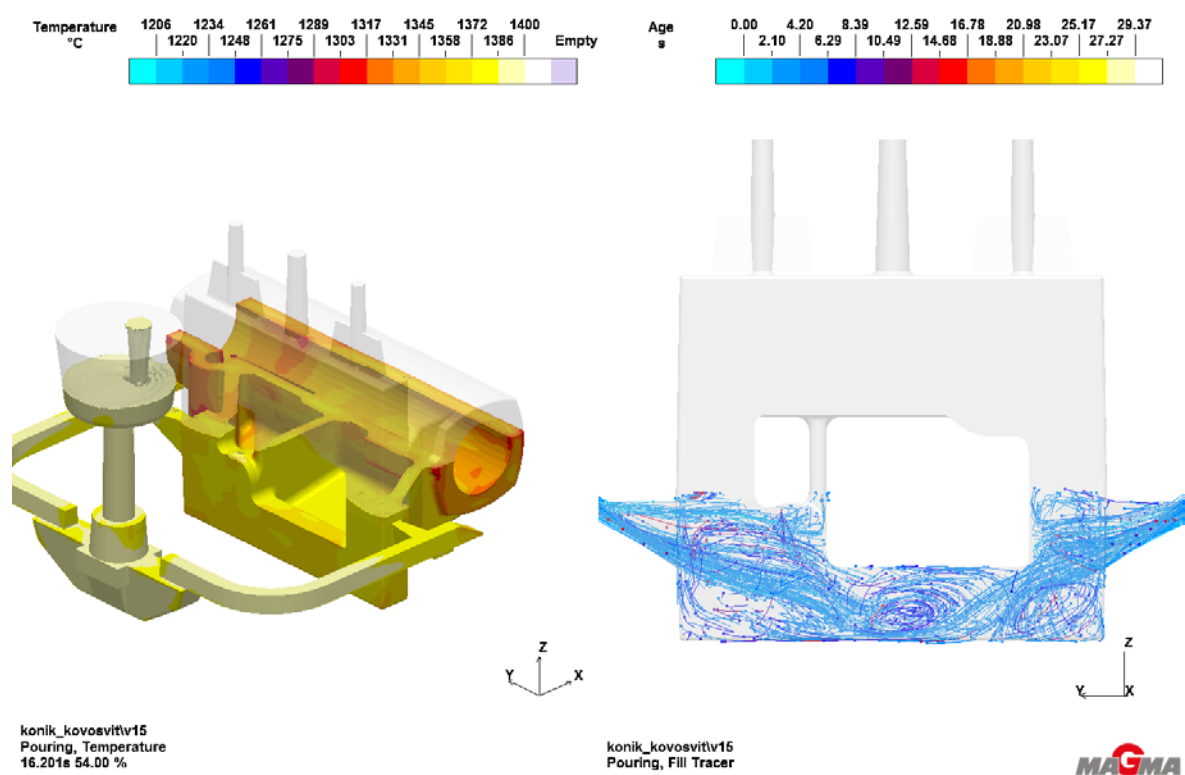
obr. 5-35: Průběh plnění a analýza pohlceného vzduchu v tavenině

Analýza rychlosti taveniny v zářezech je vidět na obr. 5-34. Z naměřených hodnot je vidět, že tavenina proudí rychlostí vyšší než 1 m/s. Tato rychlost proudění už je relativně dost vysoká a může právě způsobovat problémy s pohlcováním plynu. Příčinou takto vysoké

rychlosti může být opět nevhodně navržený průřez nožového zářezu. Tavenina se také sama urychluje při pádu do dutiny, protože na ní působí gravitační síly.

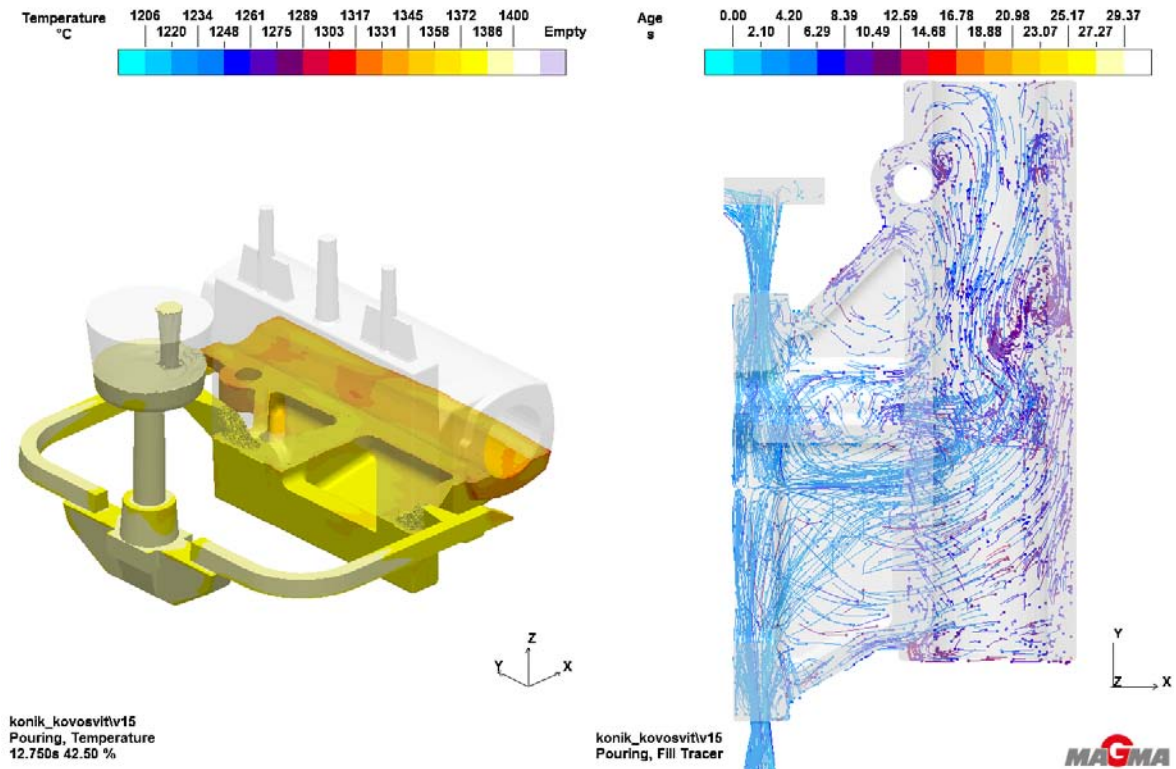
Také analýza trasovacích částic na obr. 5-36 neukazuje pozitivní výsledky. Proudění taveniny se sráží pod jádrem, stejně jako ve variantě č. 3, ale vlivem toho, že pod jádrem je nyní méně prostoru, jsou víry ještě intenzivnější. Zároveň tavenina ze zářezů naráží přímo na jádro, čímž je jádro namáháno jak tepelně, tak i mechanicky a mohly by zde vznikat připečeniny.

Na obr. 5-37 je vidět průběh plnění spodní části dutiny formy pomocí trasovacích částic a i zde je vidět, že při plnění této části, dochází ke vzniku turbulencí a plnění je neklidné.

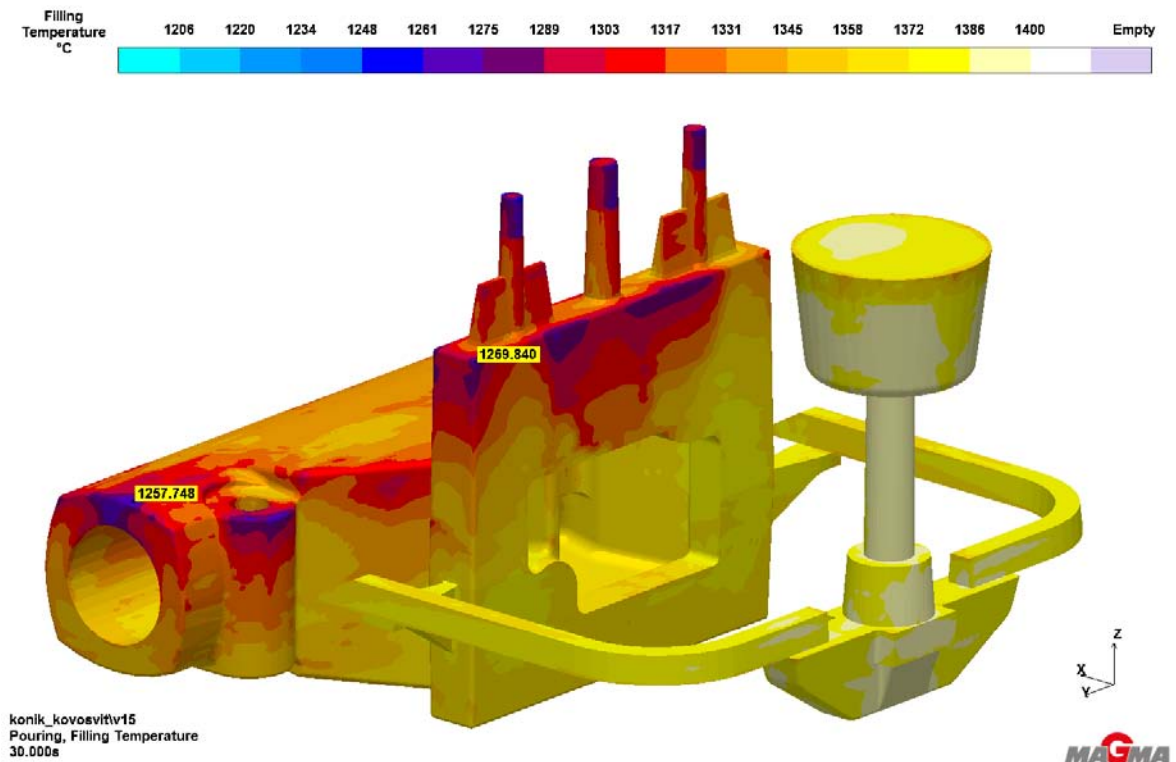


obr. 5-36: Trasovací částice

Teplotní pole charakterizované parametrem "Filling Temperature" je vidět na obr. 5-38. Z obrázku je vidět, že tavenina přitéká do všech částí dutiny formy s dostatečně vysokou teplotou. Pouze v horní části příruby je teplota o něco nižší, ale není to nic, co by mohlo dělat nějaké problémy.



obr. 5-37: Trasovací částice ve spodní části formy

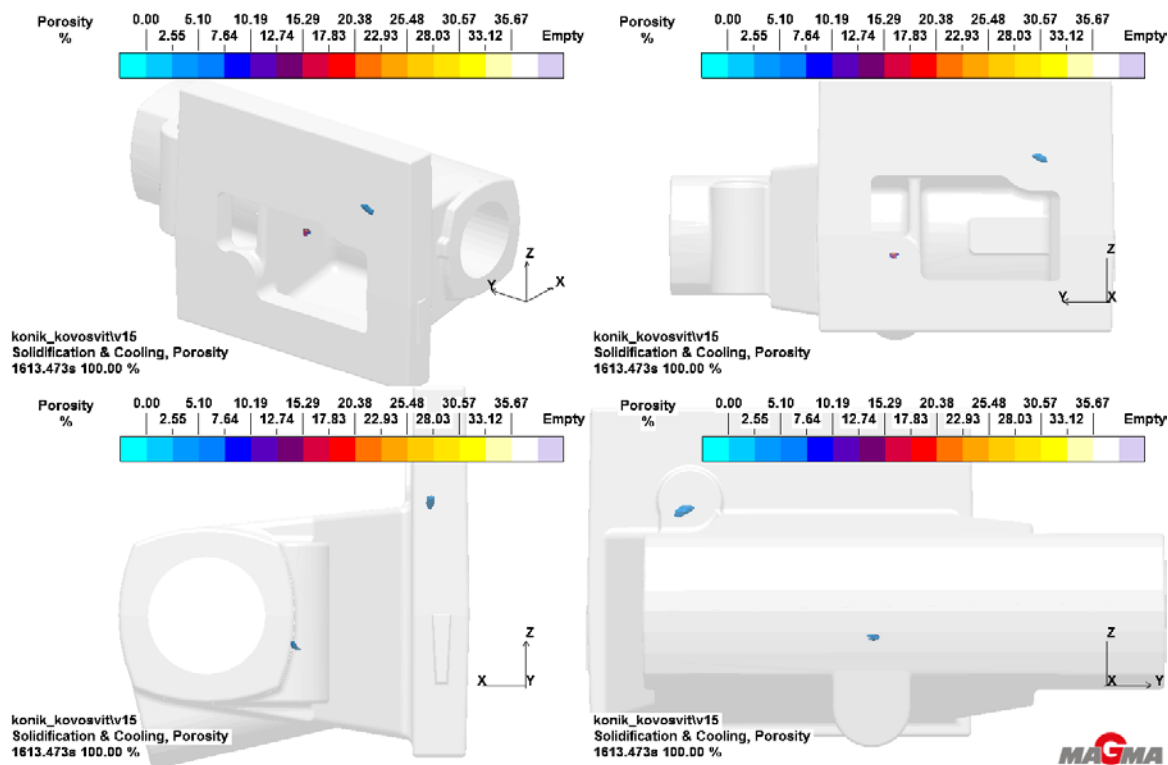


obr. 5-38: Filling Temperature

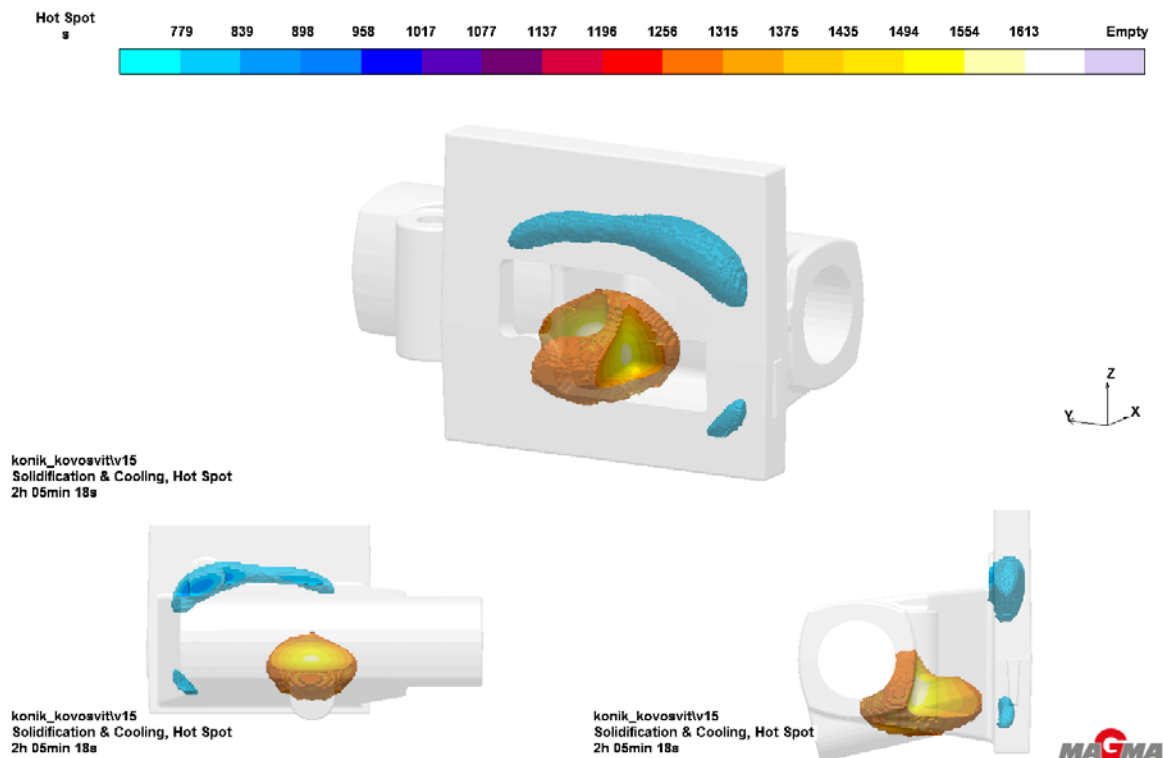
5.4.3. Analýza tuhnutí

Co se týče tuhnutí, bude mě zajímat opět hlavně hodnota porezity. U této varianty vzrostla hodnota porezity v oblasti pinoly na 35%. Tato hodnota porezity je poměrně

vysoká a už je riziko, že při jejím odhalení by hrozila reklamáce odlíku. Oproti předchozím variantám se poloha staženiny změnila a posunula se blíže ke vnitřnímu tvarovému jádru. Z obr. 5-40 je dokonce spíše vidět, že největší teplený uzel se drží v těsné blízkosti tvarového jádra. Mohlo zde dojít k přehřátí jádra, které do sebe akumulovalo teplo a během tuhnutí a tímto svým teplem pak zpomalovalo chladnutí kovu. Možnou příčinou je i změna charakteru plnění formy, kvůli jiné vtokové soustavě a také kvůli změně polohy odlítku.



obr. 5-39: Výsledná perezita



obr. 5-40: Hot Spot [doba tuhnutí - s]

5.4.4. Zhodnocení varianty

Největší změnou v této variantě, byla změna polohy odlitku ve formě. Jeho otočením jsem chtěl docílit klidnějšího plnění díky tomu, že tavenina ze zářezů nepadala do takové hloubky jako v předchozích variantách. Tento úmysl vyšel bohužel jenom z části. Tavenina opravdu nepadala do takové hloubky, takže proud taveniny vycházející ze zářezů byl celistvější. Proudění taveniny z obou zářezů se ale srážely pod jádrem, kde vytvářely poměrně velké turbulence a ani průběh plnění spodní části dutiny formy nebyl klidný. Také docházelo k pohlcování relativně velkého množství plynu.

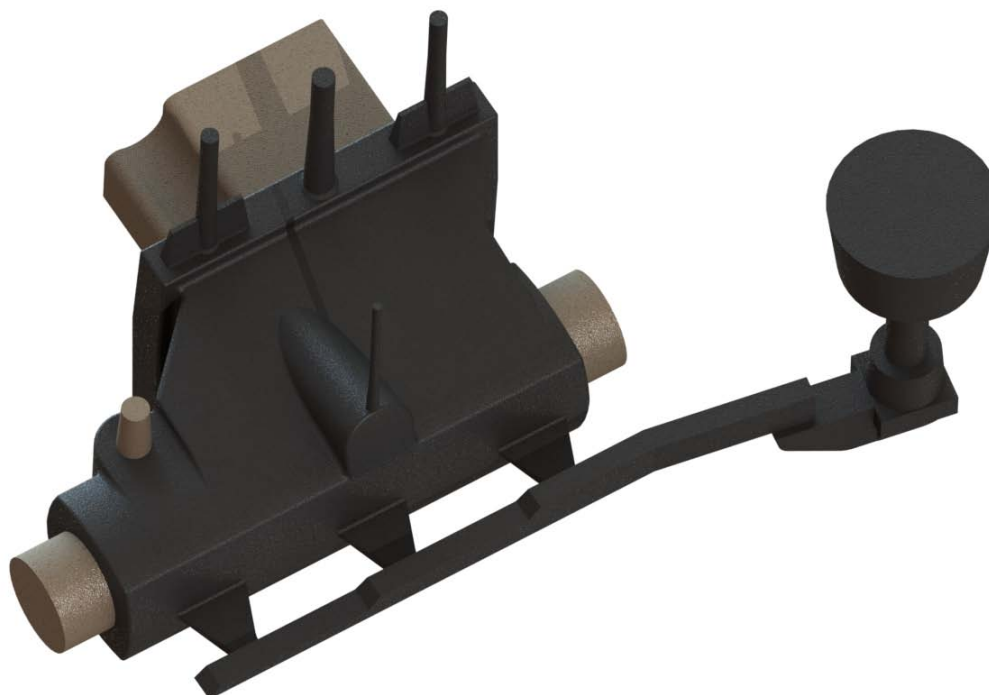
Došlo ke změně polohy staženiny v oblasti pinole, kde se staženina přiblížila blíže ke tvarovému jádru a k nárůstu hodnoty porezity, v tomto místě, na 35%.

5.5. Varianta č. 5

Vzhledem ke geometrii odlitku je poměrně obtížné vymyslet vhodné zaústění vtokové soustavy, aby zářezy nemířily přímo proti jádru a nedocházelo tak k velkému rozstříku taveniny o toto jádro. V této variantě přesunu vtokovou soustavu z oblasti příruby, do oblasti pinoly.

5.5.1. Popis varianty

Jak jsem uvedl, v této variantě jsem provedl změnu polohy vtokové soustavy, jak je vidět na obr. 5-41. Navrhl jsem zde tři ploché zářezy, které jsou zaústěné do pinoly. Poloha odlitku ve formě je stejná jako u původních variant. Tedy ve spodní části formy je zaformována vyšší část příruby. Tuto polohu jsem při simulaci zvolil, protože jsem u všech úprav myslel na to, aby úprava modelového zařízení byla co možná nejméně nákladná. V tomto případě by stačilo pouze upravit vtokovou soustavu.



obr. 5-41: 3D model varianty

Parametry pro nastavení simulace jsou uvedeny v Tab. 5-10 a chemické složení taveniny při simulaci je uvedeno v Tab. 5-11. Náčrt varianty je uveden v příloze.

Tab. 5-10: Parametry pro nastavení simulace

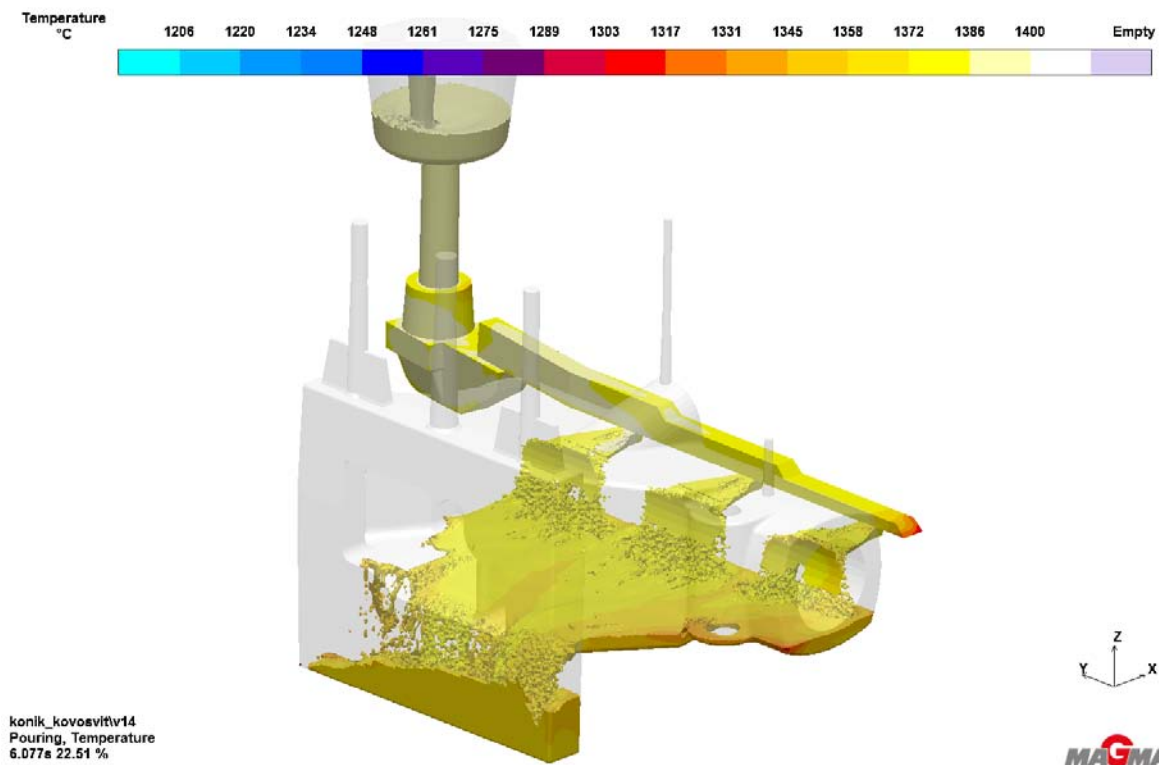
Varianta č. 6		
Materiál odlitku	EN GJL 200	
Hmotnost odlévaného kovu	63,5	kg
Počáteční teplota lití	1400	°C
Doba lití	27	s
Průřez zářezů	560	mm ²
Materiál jader		
velké tvarové jádro	COLD BOX	
válcová jádra	CT směs	
Ochranný nátěr jader		
	ANO	
velké tvarové jádro	alumino - silikátový + zirkonový	
válcová jádra	alumino - silikátový	
Filtr		
	ANO	
hustota filtru	10	ppi

Tab. 5-11: Chemické složení taveniny při simulaci

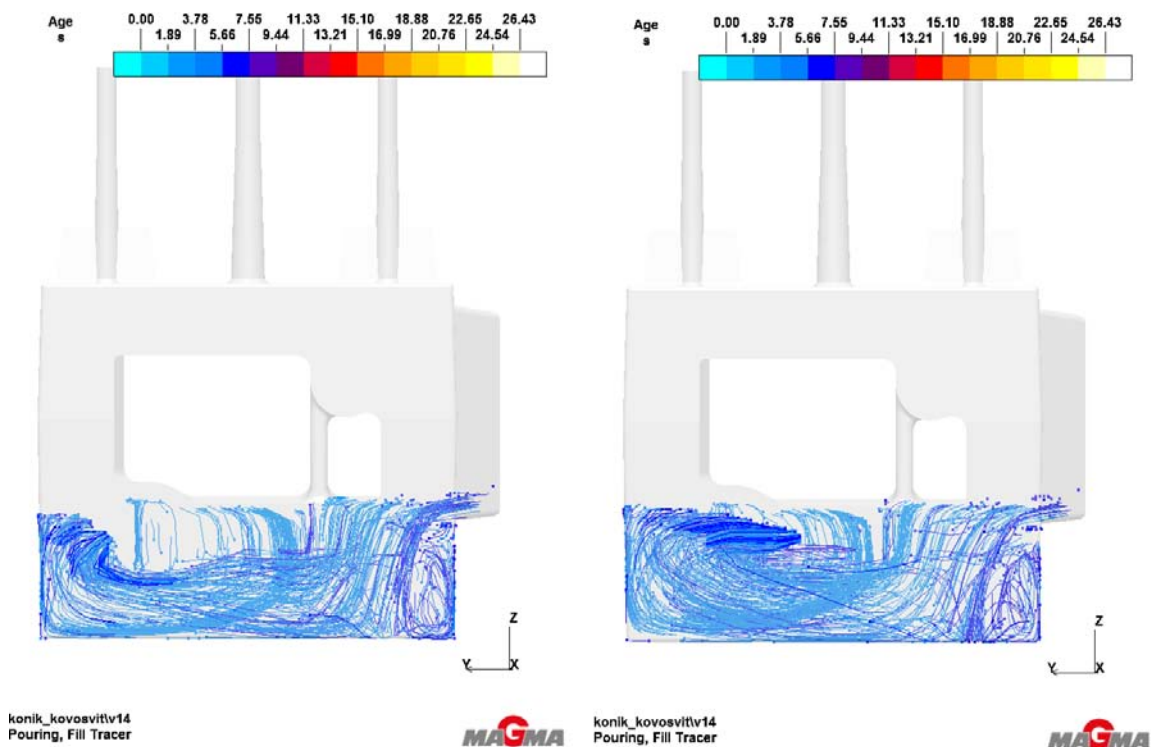
třída materiálu	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Cu [%]
20	3,35	2,05	0,7	0,2	0,1	/	/

5.5.2. Analýza plnění

Průběh plnění je vidět na obr. 5-42. I když jsem se snažil udělat průřez plochého zářezu, který je napojený na odlitek, dostatečně velký, aby na taveninu v zářezu nepůsobil zvýšený tlak a její rychlost nebyla vysoká, úplně se mi to nepodařilo. Tavenina si udržuje poměrně vysokou rychlost ze struskováku a v poměrně krátkém zářezu se nestihne uklidnit. Tavenina pak ze zářezu stříká přímo proti jádru a dochází k rozstříku taveniny, i když tento rozstřík není tak mohutný jako v předchozích variantách, stále zde je a s ním spojené riziko zvýšeného pohlcování plynu do taveniny.



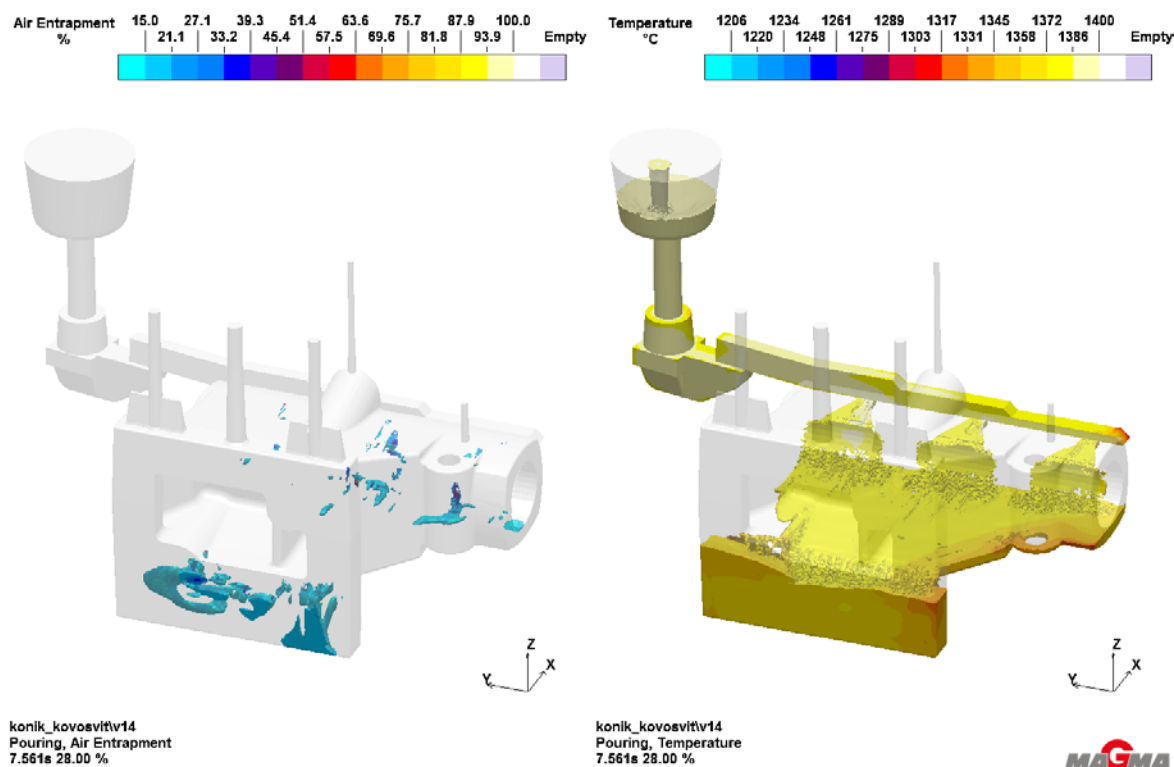
obr. 5-42: Průběh plnění - teplotní pole



obr. 5-43: Trasovací částice v přírubě

Z obrázku je také vidět, že opět dochází k padání taveniny do dutiny ve spodní části formy. Díky většímu množství kovu, přitékajícímu ze tří zářezů, je proud padajícího kovu trochu více konzistentní. Na druhou stranu větší množství přitékajícího kovu má za

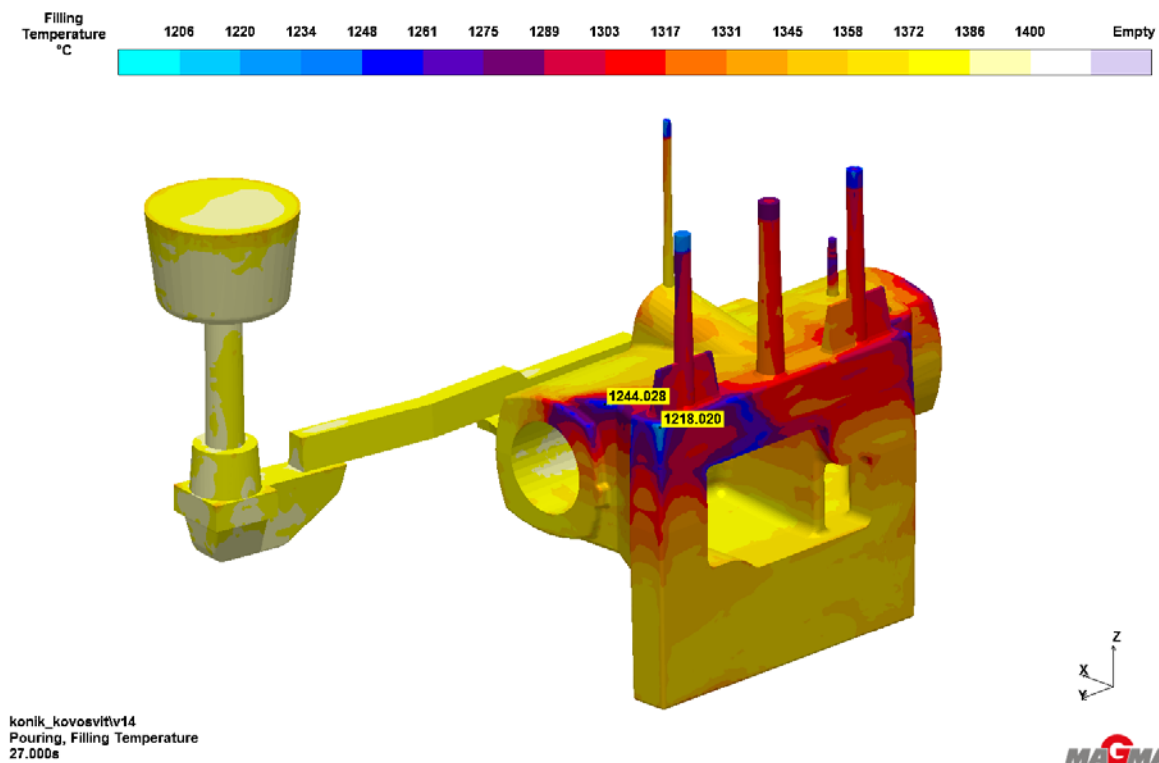
následek, že v přírubě dochází k neklidnému proudění taveniny, jak je vidět z obr. 5-43. V jeden okamžik proud taveniny vytvoří vlnu ve spodní části příruby. Tato vlna může pohltit plyn a uzavřít jej v tavenině. A jak je vidět na obr. 5-44, domněnka o uzavření většího množství plynu do taveniny se potvrdila. Krátce poté, co se vlna taveniny uzavřela, je v objemu taveniny přítomný větší objem plynu. Tím se opět zvyšuje riziko vzniku vad, spojených s přítomností plynů.



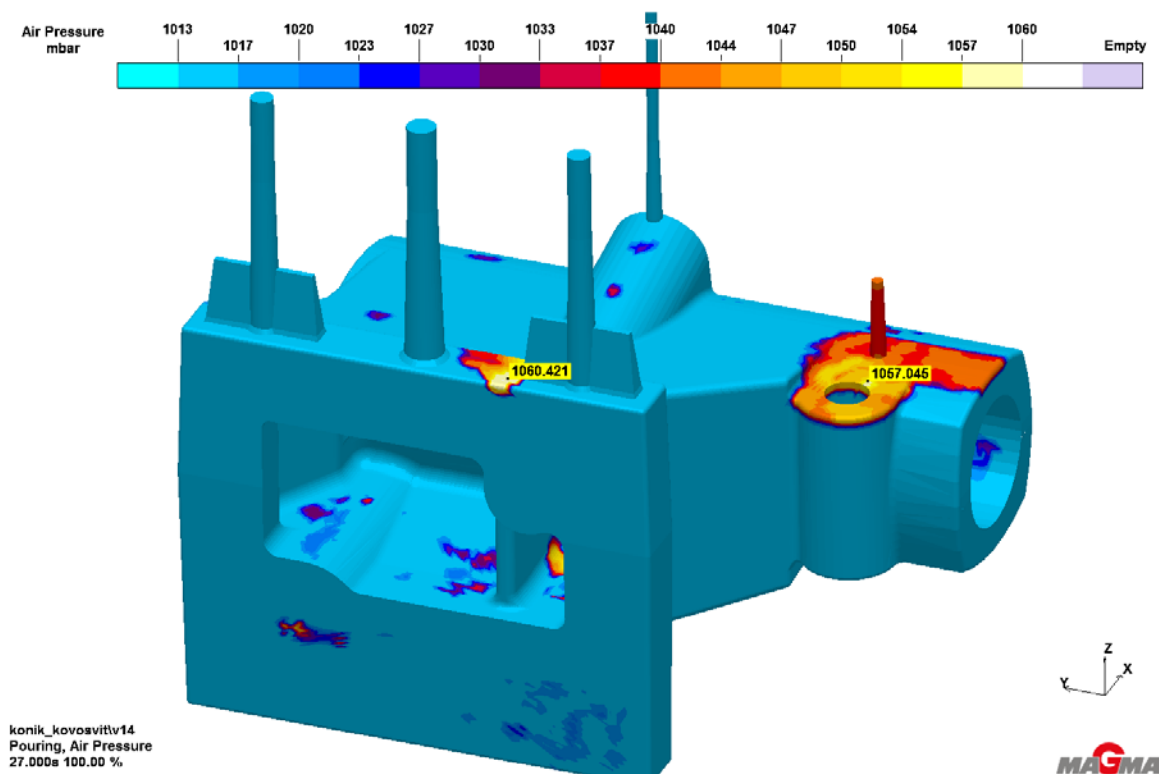
obr. 5-44: Analýza pohlčeného plynu s průběhem plnění

Z analýzy teplotního pole pomocí kritéria "Filling Temperature" je vidět, že teplota v horní části příruby je nižší než v předchozích variantách. Je to dáno tím, že do příruby není napojen žádný zářez, který by taveninu v přírubě prohřival. Ale i v nejchladnějším místě má tavenina teplotu zhruba 1220°C, takže zde je stále určitá teplotní rezerva než teplota klesne pod teplotu liquidu, která je, v nejméně optimálním případě, 1206°C.

Z analýzy tlaku plynu v dutině formy na obr. 5-46 je vidět zvýšený tlak plynu na horní ploše příruby. Tento zvýšený tlak může být způsoben neklidnou hladinou taveniny při konečném zaplnění dutiny formy. Stálá přítomnost tlaku plynu v oblasti malého jádra by neměla způsobovat žádné problémy. V žádné odlité sérii se v těchto místech vada neobjevila. I když zde je zvýšený tlak plynu, tak tavenina v těchto místech má vždy dostatečně vysokou teplotu, takže plyn má dostatek času uniknout přes formu, než dojde k obtisknutí bublin do povrchu odlitku.



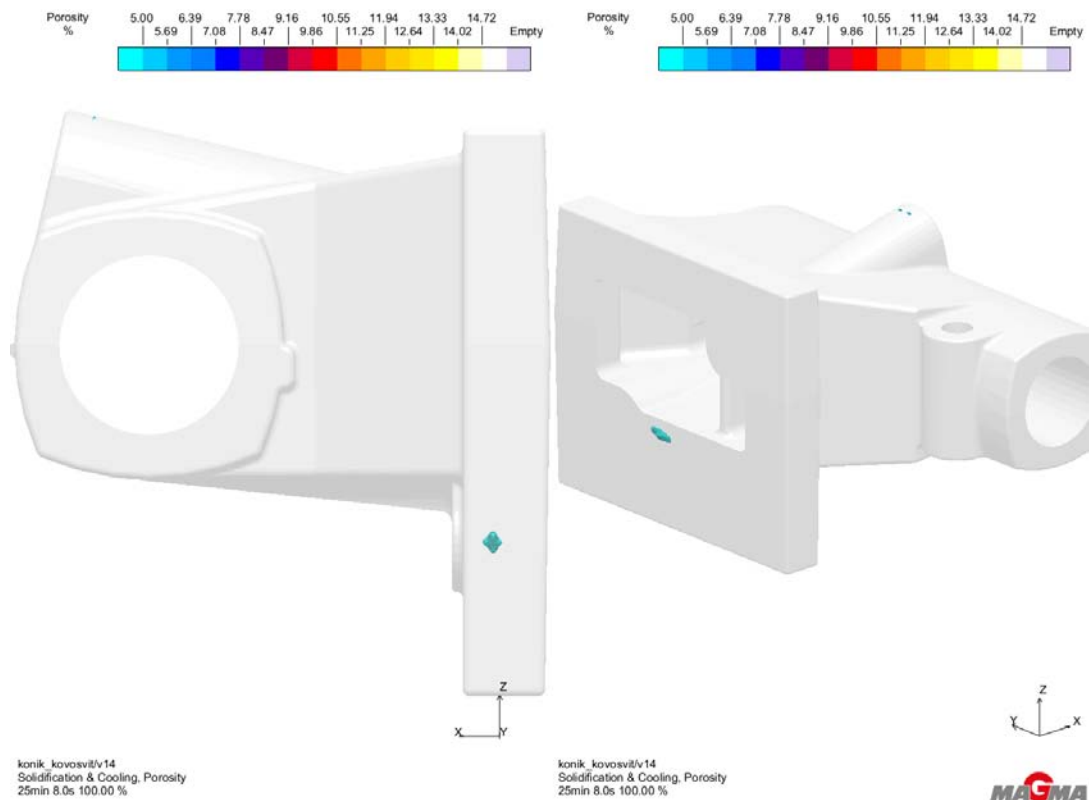
obr. 5-45: Filling Temperature



obr. 5-46: Tlak plynu v dutině formy

5.5.3. Analýza tuhnutí

Výsledná hodnota porezity u této varianty je vidět na obr. 5-47. Maximální hodnota porezity je přibližně 15%. To se nijak výrazně neliší od hodnot v předchozích verzích.



obr. 5-47: Porezita

5.5.4. Zhodnocení varianty

V této variantě jsem přepracoval vtokovou soustavu. Místo zaústění zářezů do příruby, jak tomu bylo v předchozích variantách, jsem zvolil zaústění do pinoly. Tím jsem chtěl docílit klidnějšího a rovnoměrnějšího plnění, hlavně v oblasti příruby. Polohu odlitku jsem nechal původní. Ukázalo se, že ponechání odlitku v původní poloze, je hlavním nedostatkem dané varianty. Většina problémů vzniká opět vlivem pádu taveniny do dutiny ve spodní části formy. Je tedy jasné, že pokud budu chtít docílit klidnějšího plnění, bude potřeba polohu odlitku ve formě změnit. Z předchozích variant se ukázalo, že otočení odlitku ve formě by mohlo pomoci ke klidnějšímu plnění. Teď jde jen o to, najít vhodný návrh vtokové soustavy a její zaústění do dutiny formy.

Vzniklou porezitu není potřeba nějak výrazně řešit. Její hodnota je relativně nízká a je v oblasti, kde nemá žádný vliv na funkci odlitku.

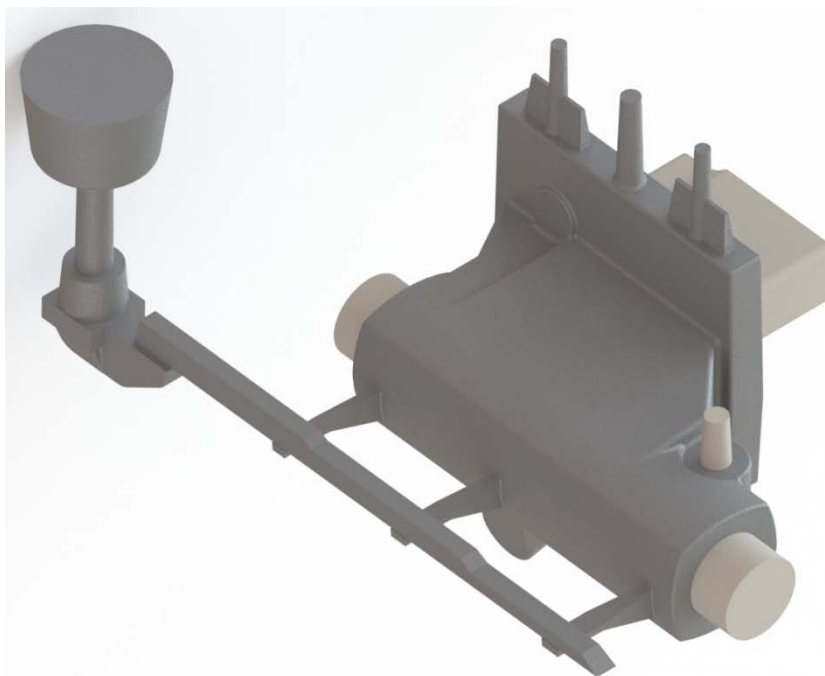
5.6. Varianta č. 6

Z varianty č. 5 jsem si vzal ponaučení, že pokud budu chtít zajistit klidné proudění taveniny v dutině formy, bude potřeba upravit polohu odlitku. Plnění zářezy, zaústěnými do pinoly, by mohlo zajistit klidnější průběh plnění, je jen potřeba zmenšit rozstřík taveniny o válcové jádro.

5.6.1. Popis varianty

Tato varianta bude řešením vtokové soustavy vycházející z varianty č. 5. V této variantě tedy budou použity tři zářezy, zaústěné do pinoly. Změnil jsem ale jejich geometrii a místo plochých zářezů jsem použil nožové zářezy. Ty by měly zajistit, hlavně při první fázi plnění, usměrnění toku taveniny pod jádro. Průřezy struskováku jsou odstupňované, aby nedocházelo ke ztrátě tlaku taveniny a ke ztrátě její rychlosti. Zároveň i průřezy zářezů jsou odstupňované, aby průtok taveniny jednotlivými zářezy byl vyrovnaný. Když měly všechny zářezy stejný průřez, prvním proudilo největší množství kovu a u dalších zářezů množství klesalo a je vhodnější, aby všechny zářezy plnily rovnoměrně.

Změnil jsem také polohu odlitku ve formě, aby nedocházelo k padání taveniny do dutiny ve spodní části formy.



obr. 5-48: 3D model návrhu

Parametry pro nastavení simulace jsou uvedeny v Tab. 5-12 a chemické složení taveniny při simulaci je uvedeno v Tab. 5-13.

Tab. 5-12: Parametry pro nastavení simulace

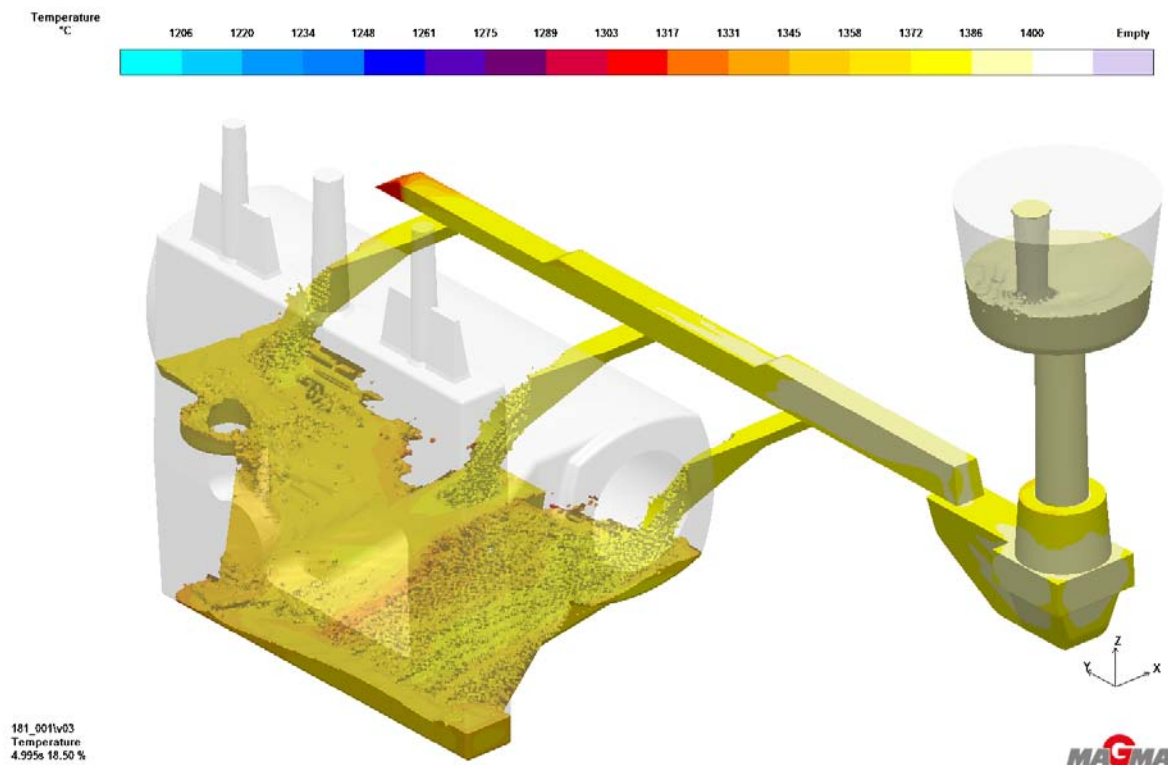
Varianta č. 6		
Materiál odlitku	EN GJL 200	
Hmotnost odlévaného kovu	63,5	kg
Počáteční teplota lití		
Verze 1	1400	°C
Verze 2	1360	°C
Doba lití	27	s
Průřez zářezů	450	mm ²
Materiál jader		
velké tvarové jádro	COLD BOX	
válcová jádra	CT směs	
Ochranný nátěr jader	ANO	
velké tvarové jádro	alumino - silikátový + zirkonový	
válcová jádra	alumino - silikátový	
Filtr	ANO	
hustota filtru	10	ppi

Tab. 5-13: Chemické složení taveniny při simulaci

třída materiálu	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Cu [%]
20	3,35	2,05	0,7	0,2	0,1	/	/

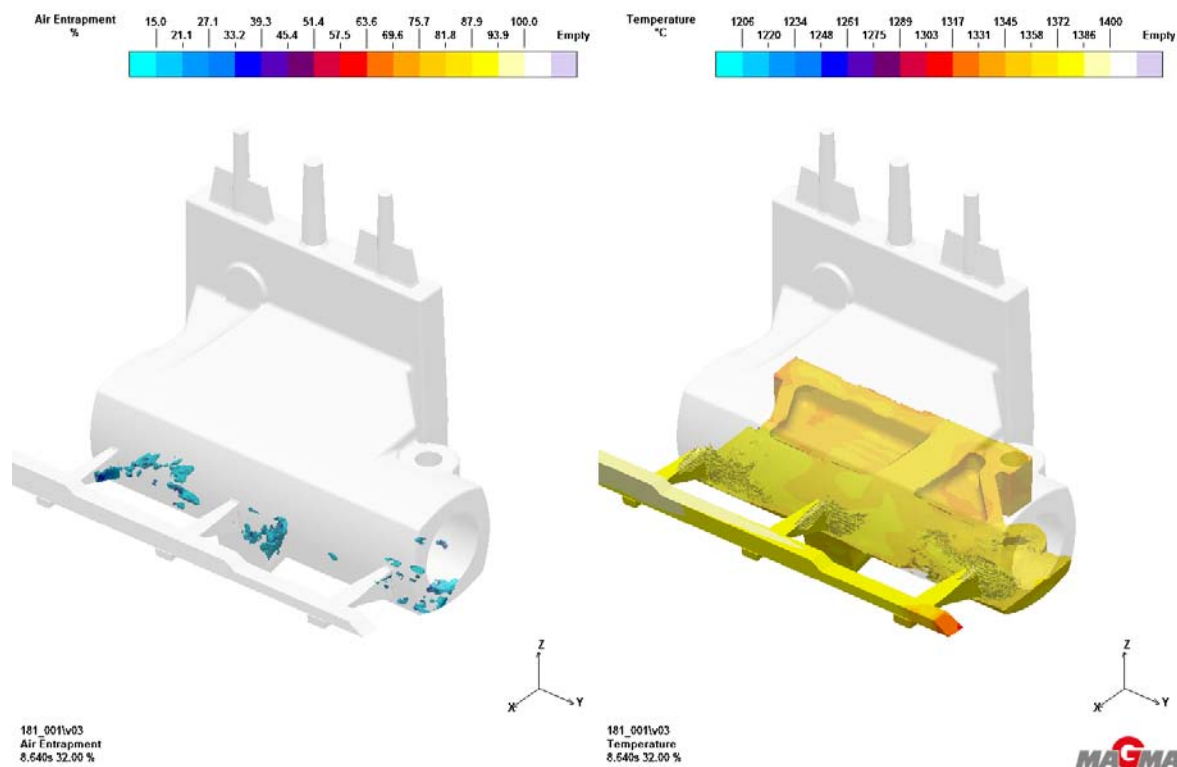
5.6.2. Analýza plnění

První část plnění, která je vidět na obr. 5-49, probíhá relativně klidně, bez větších rozstříků a dutina formy se plní rovnoměrně. Pouze je vidět, že z nejbližšího zářezu, který má největší řídicí průřez, vytéká větší množství taveniny, která lehce naráží do jádra. Po tomto nárazu ale ani nedochází k žádnému rozstříku, ani to nemá vliv na průběh proudění. U tohoto třetího posledního zářezu jsem navrhl příliš velký průřez, při jeho zmenšení, by se proud taveniny zmenšil a k nárazu taveniny do jádra by nedocházelo.



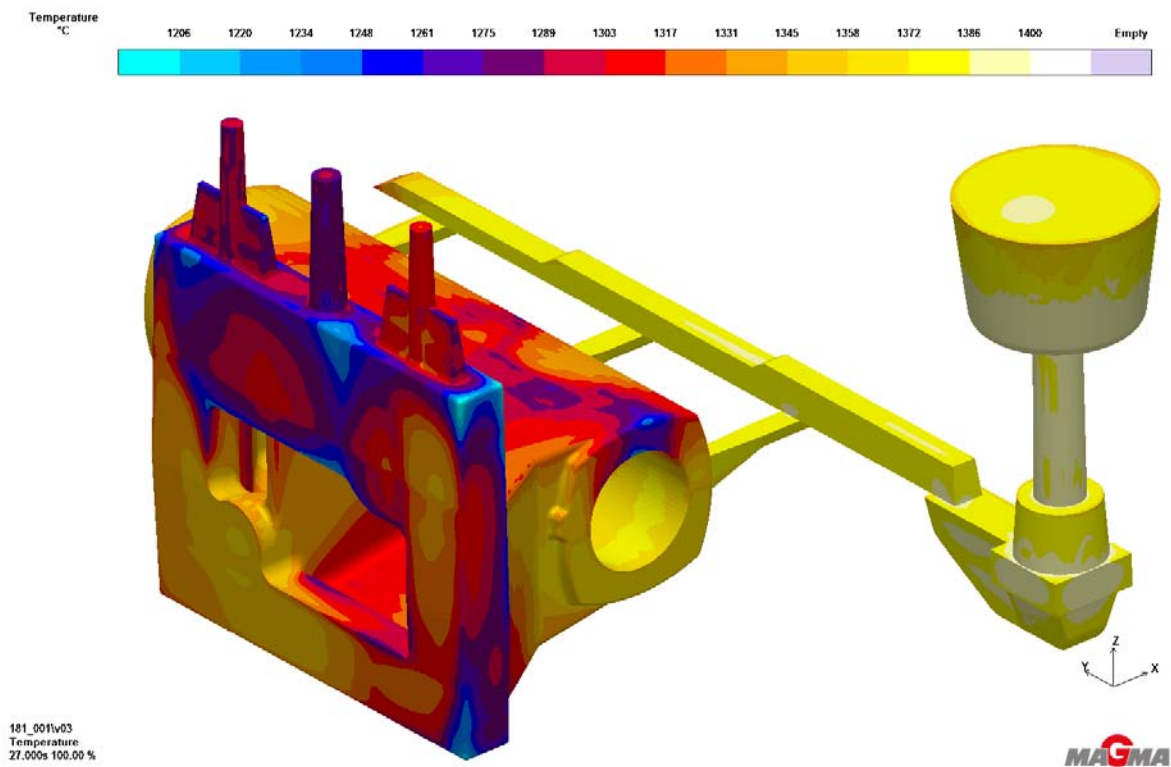
obr. 5-49: Začátek plnění - teplotní pole

Z analýzy pohlcovaného plynu na obr. 5-50 je vidět, že při plnění je do taveniny pohlcováno relativně malé množství plynu. Jediné místo, kde se v určitém množství uzavřený plyn drží, je oblast kolem zářezů. To je dáno v první řadě konstrukcí nožových zářezů, kde řídicí průřez zářezu, napojený na struskovák, je menší, než průřez, který je zaústěný do odlitku. Díky takto navrženému zářezu se dá dosáhnout nižší rychlosti proudění taveniny, protože se jedná o podtlakové řešení. Na druhou stranu v zářezu je přítomný plyn, který je strhávám proudem taveniny. Druhým, asi výraznějším důvodem, proč dochází k pohlcování plynu v těchto místech, je, že proud taveniny jdoucí ze zářezů víří taveninu, která již je v dutině formy. S tímto jevem se setkáme ve velkém množství případů. Pro mě je důležitější, že ve zbylém objemu taveniny, k žádnému pohlcování plynu nedochází. To je dobrý krok k tomu, potlačit vznik bublin, uzavřených v objemu odlitku.

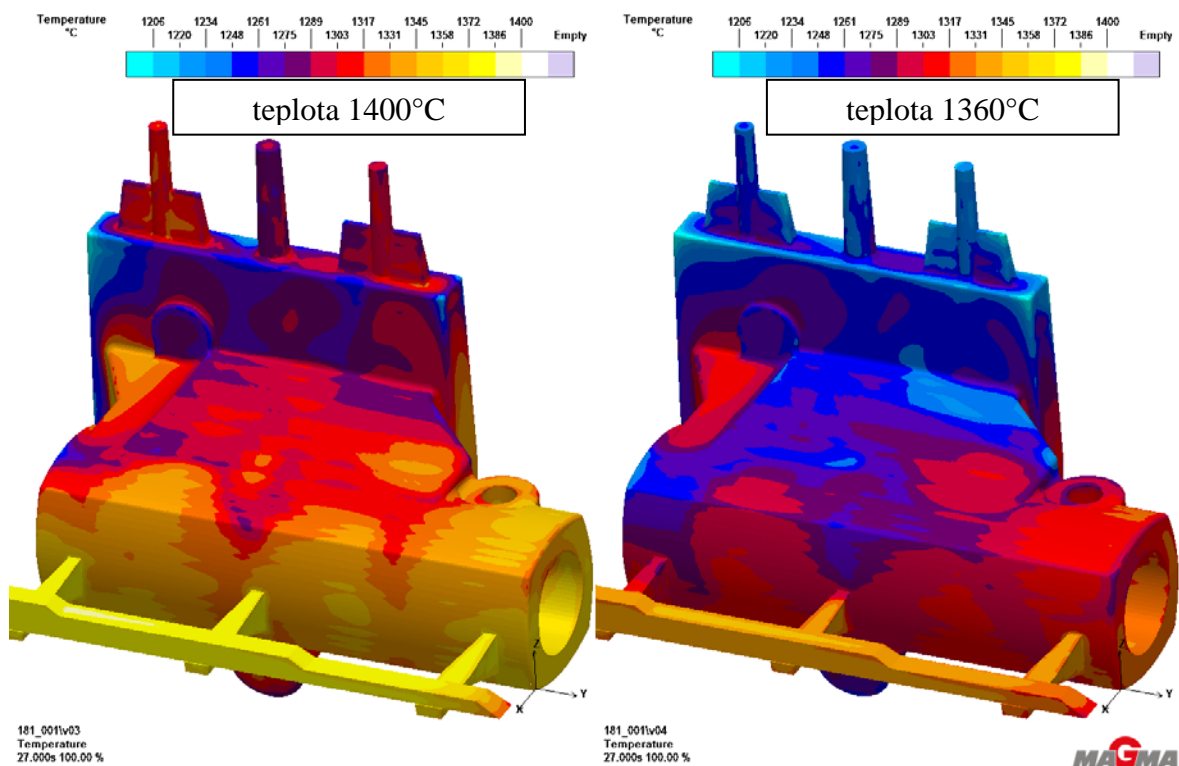


obr. 5-50: Analýza pohlčeného plynu s průběhem plnění

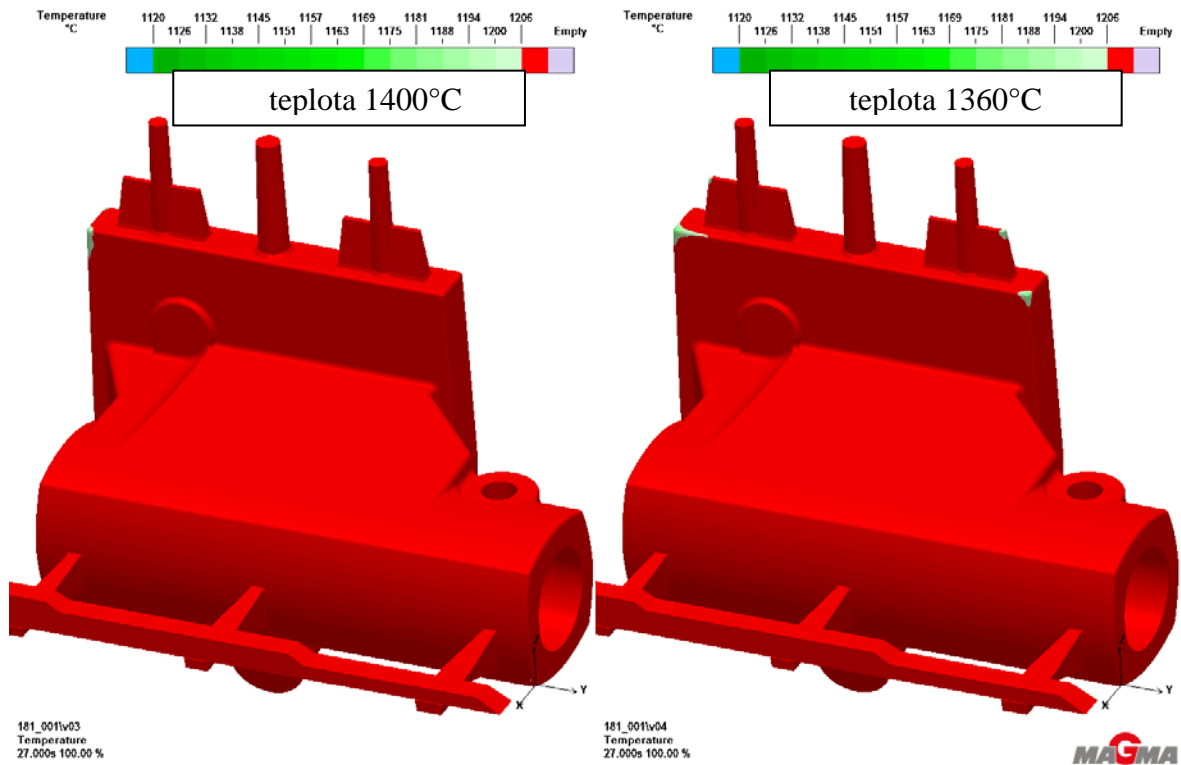
Na obr. 5-51 je vidět teplotní pole odlitku po zaplnění dutiny formy. Je zde vidět, že hlavně v horní části příruby je teplota kovu relativně nízká a v určitých oblastech se blíží teplotě liquidu. Po vyhodnocení první simulace, s počáteční teplotou taveniny 1400°C, jsem pro jistotu provedl ještě jednu simulaci, ale s počáteční teplotou taveniny 1360°C. Tuto kontrolu jsem provedl, abych byl krytý pro případ, kdy k licí lince dovezou taveninu s nižší teplotou, než v případě, kdy jsem prováděl svá měření. Porovnání teplotních polí je na obr. 5-52. Obrázek vlevo je pro licí teplotu 1400°C a obrázek vpravo pro 1360°C. Z obrázku je vidět, že rozdíl obou polí je poměrně výrazný, což se dalo očekávat. Důležitější bude ale pohled na obr. 5-53, kde je provedeno stejné srovnání, jen je upraven výstup výsledků. Červená barva značí taveninu, jejíž teplota se stále drží nad teplotou liquidu, tedy 1206°C a zelená značí oblasti, kde tavenina pod tuto teplotu klesla. Na tomto porovnání je vidět, že problematická místa jsou horní rohy v přírubě. V těchto rozích jsou zelené oblasti, kde došlo k poklesu teploty pod teplotu liquidu. Z analýzy teplotního pole pomocí parametru "Filling Temperature", která je na obr. 5-54, že pouze do jednoho rohu přitéká tavenina, jejíž teplota je pod teplotou liquidu. U tohoto rohu hrozí, že by zde nemuselo dojít k úplnému vyplnění tvaru, tedy místo ostrého rohu by vznikl roh mírně zakulacený. Tuto případnou vadu by měly ale pokrýt technologické přídatky na obrábění a neměla by vést k vyřazení odlitku jako zmetku.



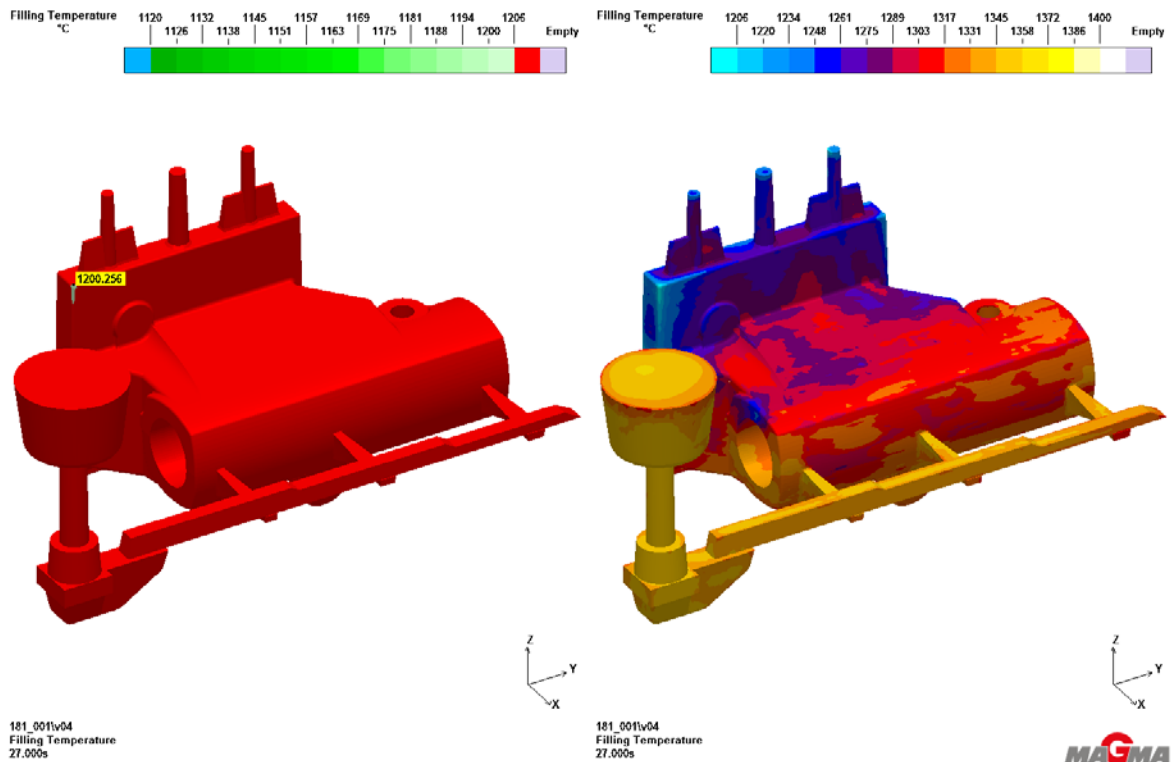
obr. 5-51: Teplota kovu po zaplnění dutiny formy [počáteční teplota 1400°C]



obr. 5-52: Porovnání teplotních polí



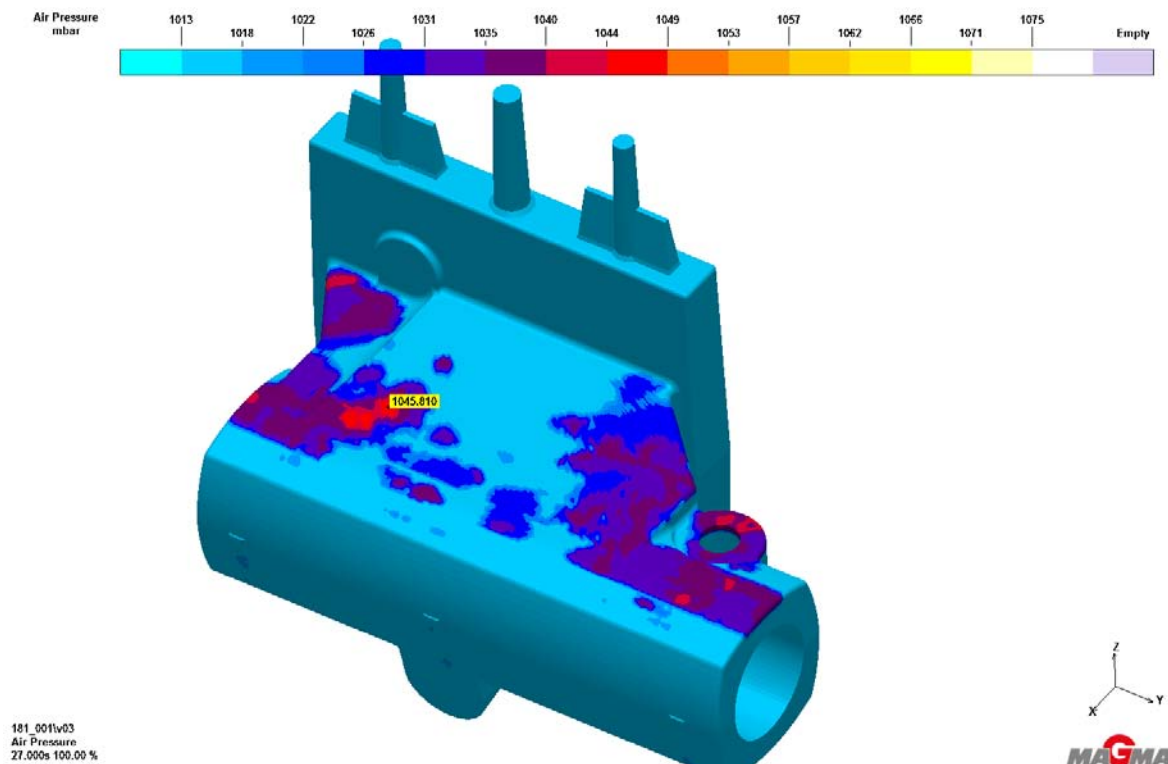
obr. 5-53: Porovnání teplotních polí 2 [solidus - liquidus]



obr. 5-54: Filling Temperature pro 1360°C

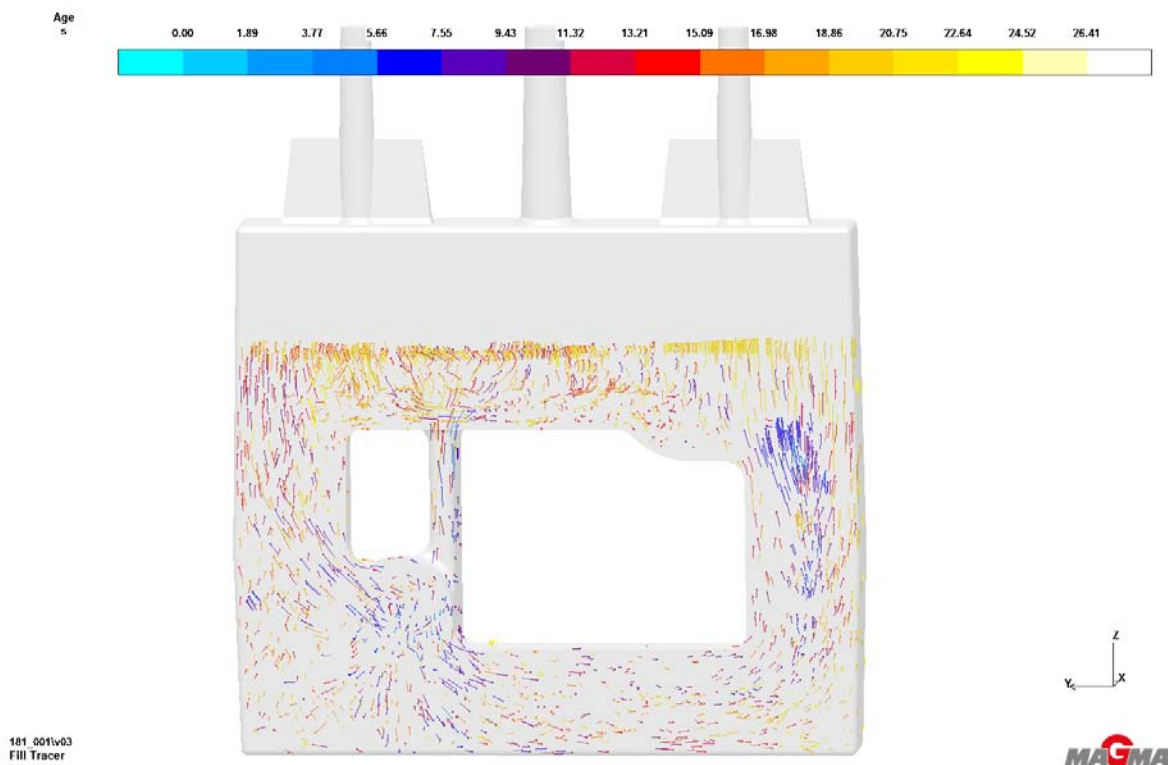
Analýza tlaku plynu ve formě na obr. 5-55 ukazuje, že na horní ploše u pinoly je větší tlak, než býval v předchozích variantách. To je dáno změnou geometrie horní plochy. Boční stěny koníku totiž mají rozdílné zkosení. V případě původní polohy byla v horní

části formy plocha s větším zkosením, takže plyn po ní mohl snadněji utíkat. Při otočení odlitku se však do horní části formy dostala plocha s menším zkosením. Vzhledem k usměrněnému proudění taveniny od zářezů k odvzdušňovacím kolíkům, nebude problém plyn v horní ploše z dutiny formy vytlačit.

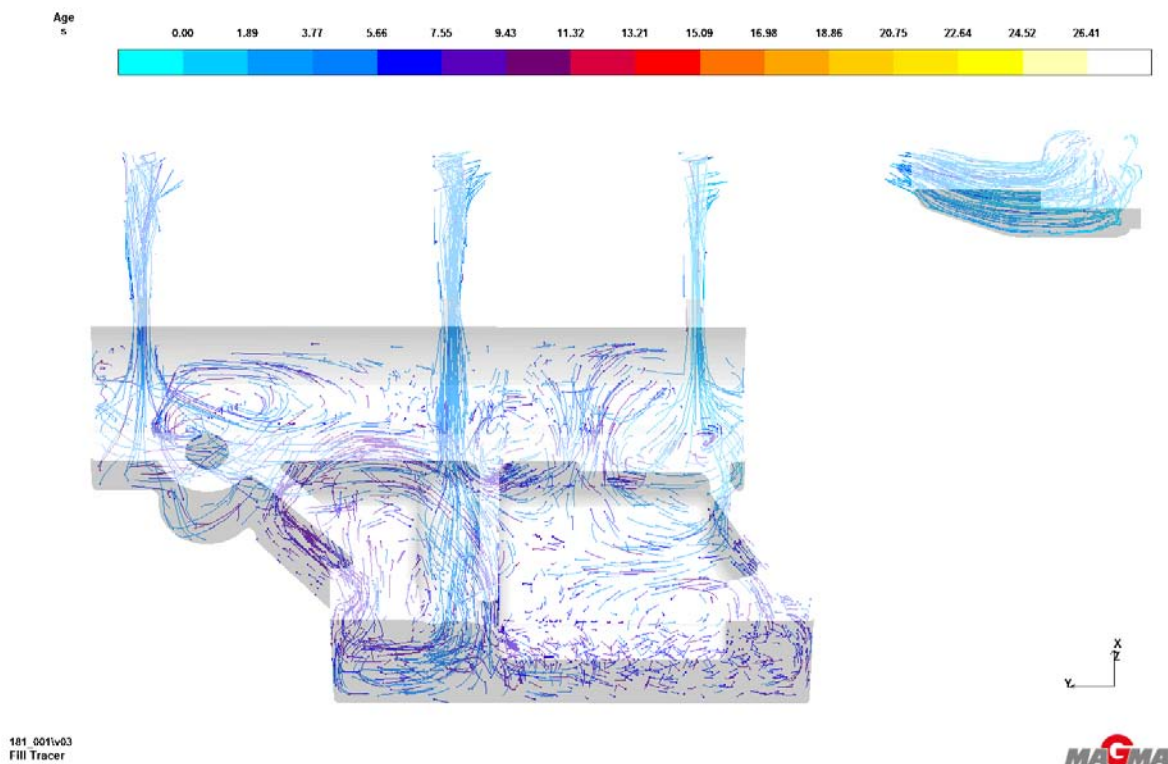


obr. 5-55: Analýza tlaku plynu

Krátce se ještě vrátím k průběhu plnění dutiny formy. Na obr. 5-56 jsou trasovací částice v přírubě a je zde vidět klidné plnění, bez vzniku jakýchkoliv vírů. Z této analýzy je i vidět, že na čele taveniny je nejstarší kov, což má za následek nižší teplotu taveniny v této části příruby. Trasovací částice na obr. 5-57 ukazují průběh proudění taveniny ve spodní části formy. Zde je proudění neklidnější. Vliv na proudění mají tvarová jádra, do kterých tavenina místy naráží a roztáčí se. Oproti předchozím variantám tedy nedošlo v této části k výraznému zlepšení, ale je zde vidět alespoň určité usměrnění toku a nevznikají zde malé intenzivní víry, jako v předchozích variantách.



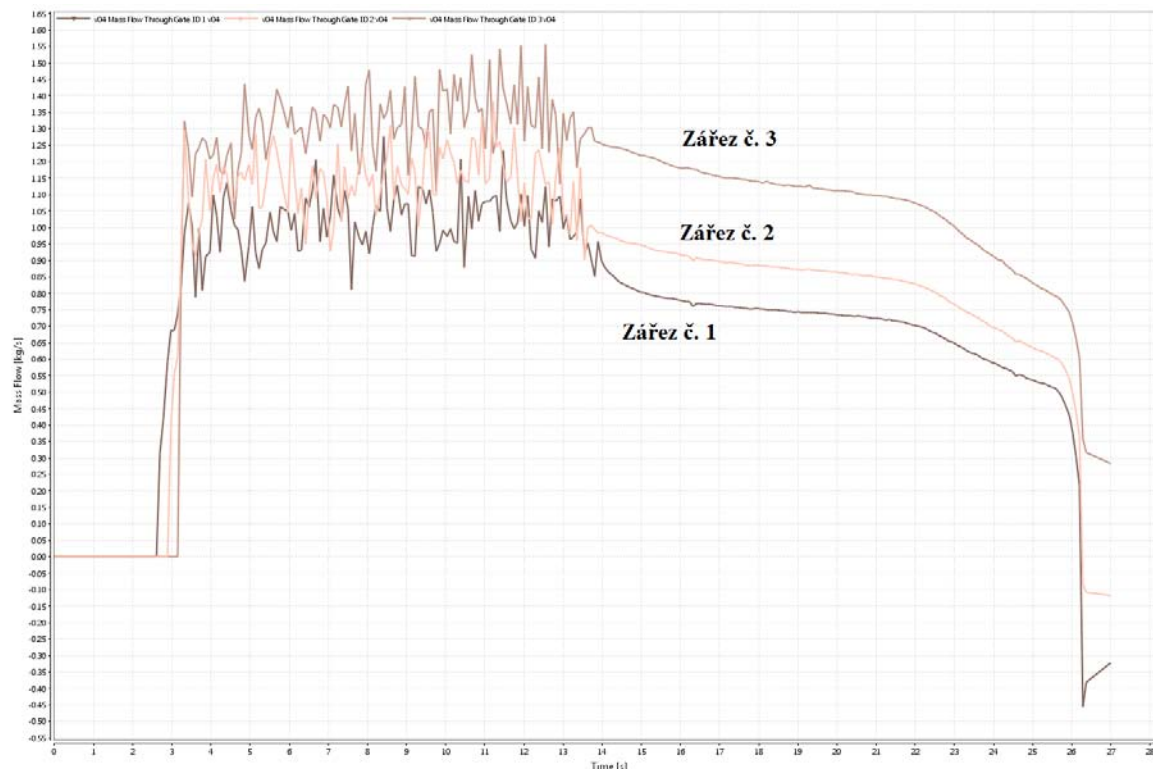
obr. 5-56: Trasovací částice v přírubě



obr. 5-57: Trasovací částice ve spodní části formy

V popisu této varianty jsem zmínil, že jsem provedl odstupňování řídicích průřezů zářezu, abych docílil rovnoměrného plnění ze všech tří zářezů. Z obr. 5-58 je ale vidět, že tento záměr se mi nepovedl. Zářez č. 3, tedy ten nejvzdálenější s největším řídicím

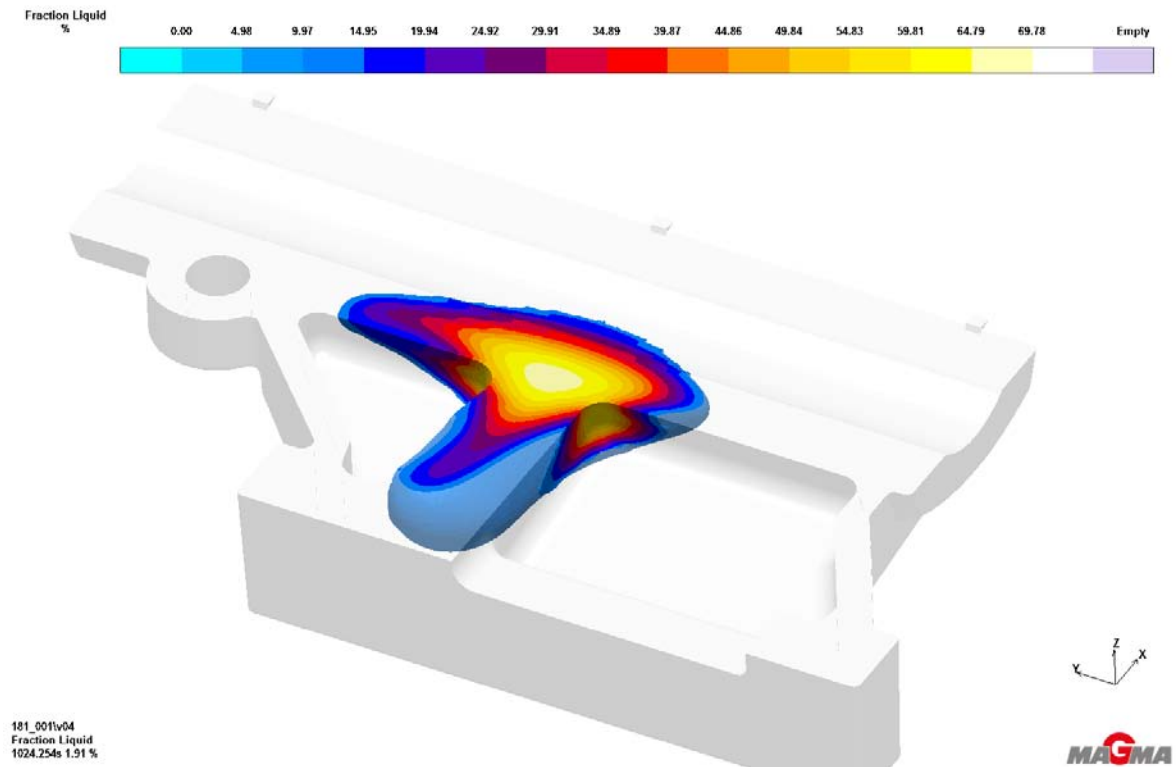
průřezem, má největší průtočné množství kovu. Bez použití tohoto odstupňování to bylo přesně naopak. Z uvedeného grafu vyplývá, že poslední zářez jsem předdimenzoval a naopak první poddimenzoval. Najít přesný poměr mezi zářezy, aby všechny plnily stejně by bylo asi relativně zdlouhavé.



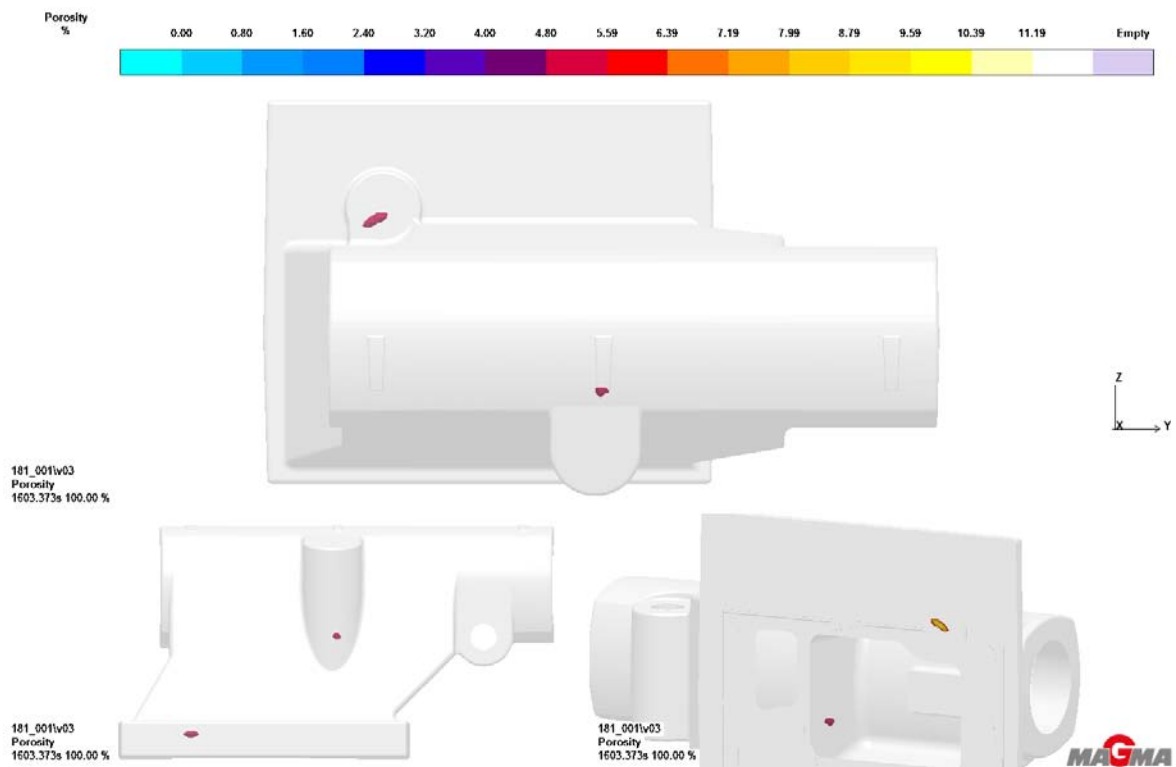
obr. 5-58: Hmotnostní průtok taveniny s odstupňovanými zářezy

5.6.3. Analýza tuhnutí

Poslední oblast tuhnutí taveniny je vidět na obr. 5-59. Je v místě tepelného uzlu mezi částmi vnitřního tvarového jádra a válcového jádra. Tedy v oblasti, jako u předchozích variant. Očekával bych tedy, že největší hodnota porezity bude právě v tomto místě. Vyhodnocení porezity na obr. 5-60 ale ukázalo, že hodnota stažení v přírubě je vyšší, než hodnota stažení v tomto posledně tuhoucím místě. V přírubě hodnota porezity dosahuje hodnoty téměř 12%, zatímco v tepelném uzlu, je její hodnota 7%. Rozdíl hodnot je zanedbatelný, stejně jako celková hodnota stažení.



obr. 5-59: Poslední oblast tuhnutí



obr. 5-60: Porezita

5.6.4. Zhodnocení varianty

Průběh plnění u této varianty, je asi nejlepší ze všech variant, které zde byly zmíněny. Tavenina proudí relativně usměrněně a dochází k pohlcování pouze malého množství plynu u zářezů. To by ale nemělo působit žádné problémy. Jediným rizikem u této varianty je teplota taveniny v horní části příruby. Tam se dostává už relativně chladný kov, který hlavně na stěnách formy rychle ztrácí svou teplotu. To je jedna z nevýhod změny polohy odlitku. S původní polohou by ale nebylo možné dosáhnout takto klidného proudění taveniny v přírubě. Pokud bychom tedy neuvažovali použití vnějších tvarových jader, díky kterým by se dalo navést taveninu do spodní části dutiny formy, a to i v případě původní polohy odlitku. Vzhledem k odlévanému množství tohoto odlitku, by ale takovéto řešení bylo ekonomicky nákladné, z důvodu nutnosti vyrobit nový jaderník.

Z hlediska průběhu tuhnutí i hodnot vzniklé porezity, je na tom tato varianta podobně jako varianty předchozí.

5.7. Volba varianty pro výrobu

Po vyhodnocení simulace původní varianty bylo zřejmé, že mým úkolem bude navrhnout takové řešení vtokové soustavy, které by zajistilo klidné plnění dutiny formy taveninou bez vzniku rozstříků a turbulencí. Podle tohoto hlediska by asi nejlépe dopadla varianta č. 6, kde se opravdu podařilo dosáhnout relativně klidného plnění bez většího pohlcování plynů do taveniny.

Jedním z kritérií, které jsem si zadal bylo, že nové řešení by mělo být realizovatelné s co možná nejmenšími úpravami modelového zařízení. Zde nastává problém u variant č. 3 a č. 4, protože zde by bylo zapotřebí odmontovat celý model odlitku a posunout ho, případně ještě otočit. Zároveň ani výsledky proudění u těchto variant nebyly úplně dobré. Tyto varianty bych tedy nedoporučil. V porovnání pracnosti vycházely téměř rovnocenně varianty č. 5 a č. 6. U varianty č. 5 by stačilo pouze předělat vtokovou soustavu, což by nebyl velký problém. Varianta č. 6 je o trochu pracnější z důvodu otočení odlitku ve formě. Ve výsledku by ale úprava nebyla tak náročná, protože by stačilo pouze označit dolní modelovou desku jako horní a naopak. Pouze by došlo k malé úpravě úkosů u známek jader, aby se zajistilo jejich bezproblémové zakládání do formy.

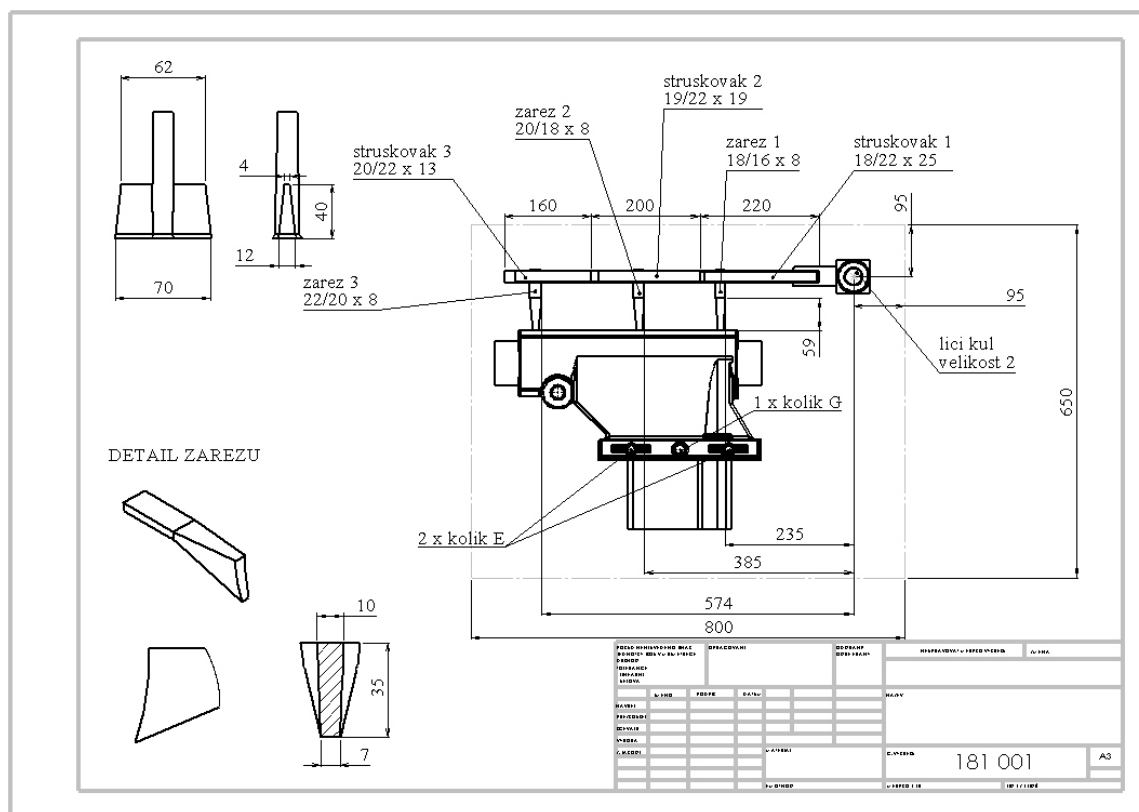
Po konzultaci s technologi ze slévárny KOVOSVIT a po znovu projití všech variant jsme se rozhodli, že do výroby doporučíme variantu č. 6.

6. ZAVEDENÍ NOVÉ TECHNOLOGIE ODLITKU TĚLESA KONÍKU DO VÝROBY

V této kapitole shrnu postup, který předcházal zavedení upravené technologie do výroby. Dále pak uvedu výsledky, kterých bylo dosaženo při odlévání odlitku pomocí této upravené technologie.

6.1. Tvorba výkresové dokumentace

Prvním krokem byla tvorba výkresové dokumentace, takzvané umístěnky. Díky tomu, že celý návrh technologie jsem měl vytvořený ve 3D datech, nebyl problém z těchto dat výkres vytvořit. Na umístěnce je zakreslen návrh umístění odlitku na modelové desce, návrh vtokové soustavy s rozměry struskováků a zářezů. Je to vlastně návod pro modelárnu k vytvoření modelové desky. Samotný model odlitku se vyrábí podle složitosti, buď na obráběcích centrech nebo ručně. Pro výrobu modelu odlitku se samozřejmě používají detailněji rozkreslené výkresy s rozměry. Výkres umístěnky pro nově navrženou technologii je vidět na obr. 6-1.



obr. 6-1: Výkres umístěnky

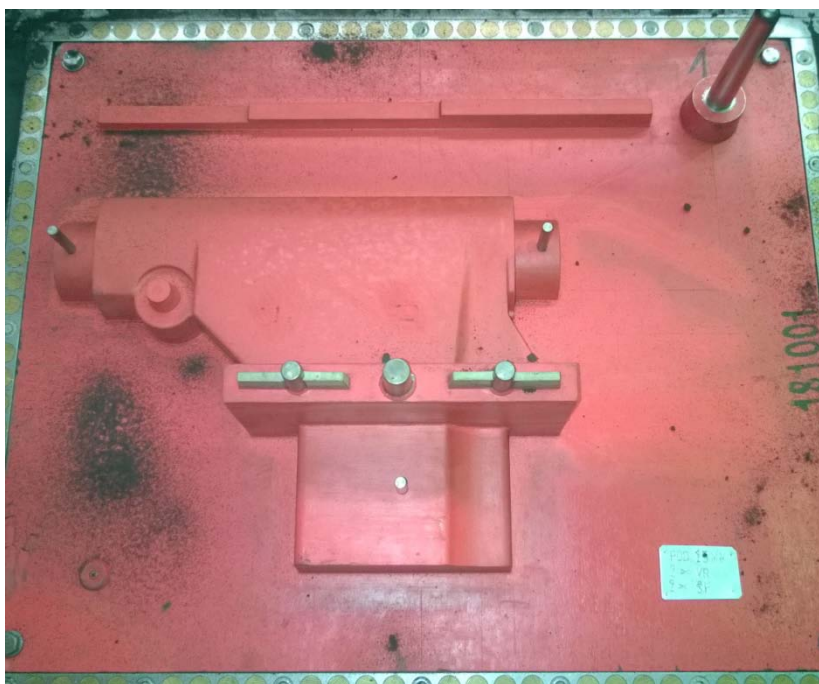
Oproti uvedenému výkresu došlo během výroby modelové desky k jedné změně. Ta se týkala rozměrů křidélek u odvodušňovacích kolíků. Došlo ke snížení jejich výšky z navrhnutých 40 mm na výšku 25 mm. To z důvodu, že výška modelu na modelové desce,

nesmí přesáhnout 190 mm, aby byl zajištěn bezproblémový průchod modelové desky na formovací lince.

6.2. Výroba modelové desky

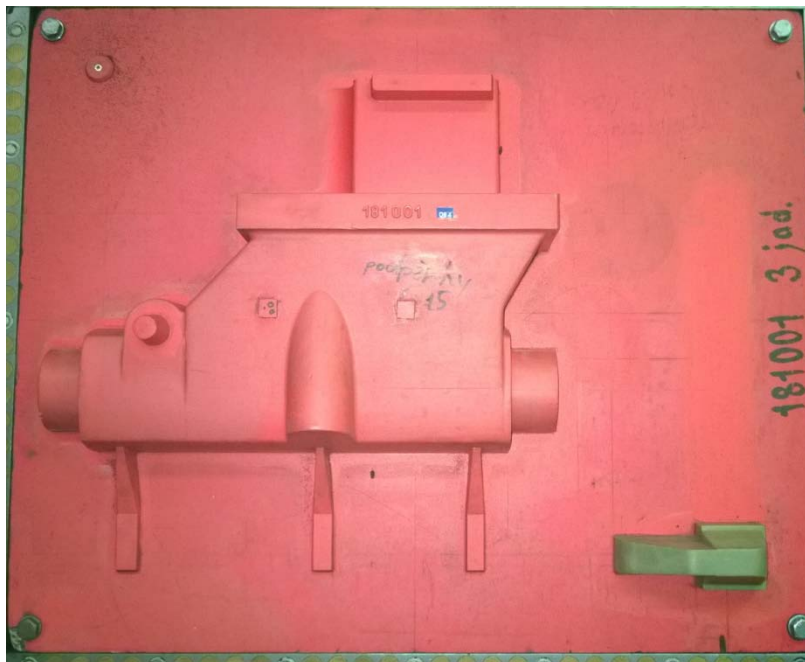
Podle navržené umístěnky se provedla úprava stávající modelové desky. Jak jsem uvedl, při návrhu nové technologie jsem se snažil, aby úprava modelové desky byla co možná nejméně pracná. Poloha modelu odlitku na modelových deskách tedy zůstala zachována. Došlo tedy pouze k prohození modelových desek, kdy ze spodní se udělala horní a naopak. Dále došlo k úpravě technologických úkosů, především na stěnách jader, aby se zajistilo jejich bezproblémové zakládání.

Na obr. 6-2 je vidět horní část modelové desky. Oproti simulaci a umístěnce zde byly přidány odvzdušňovací kolíky na jádra. A to jak na válcové jádro, tak na velké tvarové jádro. Po zaformování se provede provrtání, případně proražení všech těchto kolíků, aby byl zajištěn snadný únik plynů z formy. Zároveň ještě ve spodních rozích velkého tvarového jádra se provrtávají dva malé výfuky navíc. A jak bylo při odlévání vidět, je toto odvzdušnění opravdu potřeba, protože množství plynu, které z těchto výfuků vycházelo, bylo opravdu velké.



obr. 6-2: Horní část modelové desky

Spodní část modelové desky je na obr. 6-3. Zde je vidět zaústění zářezů do odlitku a použitá jamka na filtr. Na obrázku je také vidět odstupňování řídicích průřezů zářezů.



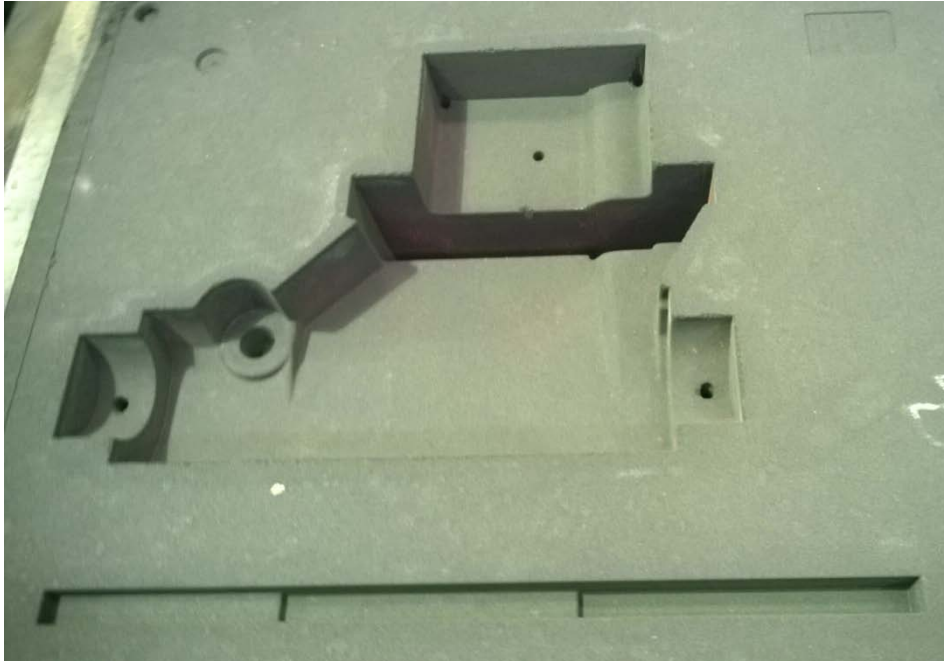
obr. 6-3: Spodní část modelové desky

6.3. Zaformování odlitku

Zaformování probíhá na automatické formovací lince při použití bentonitové formovací směsi. Na obr. 6-4 je odformovaná spodní část modelové desky a na obr. 6-5 je odformovaná horní část modelové desky. U horní části jsou relativně dobře vidět i výfuky, vyvrtné ve spodních rozích známky velkého tvarového jádra.



obr. 6-4: Odformovaná spodní část formy



obr. 6-5: Odformovaná horní část modelové desky



obr. 6-6: Založení jader

Založení jader do formy je vidět na obr. 6-6. Na tomto obrázku je vidět použití podpěrek pod jádro u velkého tvarového jádra. Jádro má sice poměrně velkou známku, ale asi ani ta by nedokázala zabránit určitému vyhýbání jádra. Navíc bentonitová směs je poměrně měkká a při pohybu takto těžkého jádra by docházelo k jejímu otláčování a pohyb jádra by se zvětšoval. Díky těmto podpěrkám je zajištěna pevná poloha jádra a zároveň má jádro i podporu před působením tlaku taveniny.

Zde je také důležité zmínit, že došlo ke změně technologie výroby tohoto velkého tvarového jádra. Původně se jádro vyrábělo ručně z CT směsi (formovací směs s vodním sklem, vytvrzená profukováním CO₂). U těchto jader ale docházelo k častému praskání jádra. Na vině mohla být právě zvolená technologie. Při ručním formování nemuselo dojít ke správnému vytvrzení směsi. U této technologie je také problém, pokud se jádra vyrobí s velkým předstihem, třeba i pár dní. S postupujícím časem dohází k degradaci směsi a její pevnost se snižuje. Do jádra se sice vkládaly ocelové pruty pro jeho vyztužení, ale ani toto opatření nezabránilo jejich lámání.

Z těchto důvodů se přešlo na výrobu jader technologií COLD BOX. Jedná se o strojní formování, takže je zde menší riziko výroby nedostatečně vytvrzeného jádra. Jádro vyrobené touto technologií je pevnější a nedochází u něj k tak výrazné degradaci mechanických vlastností.

6.4. Výroba odlitku

Modelová deska vyrobena, formy také, můžeme se vrhnout na samotné odlévání. Bohužel se mi z časových důvodů nepodařilo být přítomný u odlévání první série odlitků. Nicméně při odlévání byl přítomný procesní technolog, který na odlévání dohlížel. V této první sérii bylo odlito 10 ks odlitků. Z toho jeden odlitek byl s vadou. Na tuto vadu neměla vliv navržená technologie, ale nedodržení technologických parametrů. Slévač odlil kov s příliš vysokou počáteční teplotou. V tomto případě se teplota pohybovala nad 1450°C. Takto vysoká teplota způsobila, že došlo k tvorbě zapečenin.

Po této sérii se provedlo odlití jedné zkušební série, která čítala pouze dva kusy odlitku. U této série jsem byl přítomen a mohl jsem nasbírat nějaká data, i když v případě takto malé série těch dat nebylo mnoho. Nejdůležitějším parametrem, který se mi podařilo změřit, byla teplota taveniny. Tyto dva odlitky byly na licím poli jako první. Při změření teploty taveniny v licí pánvi jsme zjistili hodnotu, opět přesahující 1450°C. Slévač tedy dostal instrukci, aby nejdříve odlil formy, které byly řazeny po těchto dvou formách a pak se k nim vrátil. Když se po odlití forem vrátil zpět na začátek, teplota taveniny v licí pánvi byla na hodnotě 1360°C. Tato hodnota teploty taveniny mě potěšila, protože jsem měl alespoň možnost zjistit, jak odlévání dopadne v případě, že se bude odlévat z takto nízké teploty.

Na obr. 6-7 a obr. 6-8 jsou odlitky ze zkušební série po otryskání. Po ohledání těchto dvou odlitků jsem na povrchu ani jednoho z nich nenašel výraznější vady, které by mohly vést k vyřazení odlitku. Jediným problémem zde bylo, že docházelo k vydrolování formovací

směsi kolem křidélek u odvzdušňovacích kolíků. To bylo způsobeno tím, že křídélka byla lehce zdeformovaná a při vytahování modelové desky po zaformování docházelo k tomuto vydrolení. Do modelárny byl následně podán požadavek na úpravu křidélek, aby se vydrolování omezilo. Není to sice problém, který by měl za následek vyřazení odlitku, ale zvyšuje to pracnost při očišťování odlitku.



obr. 6-7: Otryskaný odlitek - horní plocha



obr. 6-8: Otryskaný odlitek - spodní plocha



obr. 6-9: Obrobený koník



obr. 6-10: Obrobený koník 2

Měl jsem také možnost prohlédnout odlitky po obrobení, zda se v nich nenachází nějaká vnitřní vada. Tyto odlitky byly odlity v první sérii. Neměl jsem možnost prohlédnout úplně všechny kusy, ale byl jsem ujištěn, že pokud by se na nějakém kusu objevila jakákoliv vada, bylo by to hned hlášeno.

Na odlitcích je ze slévárny nanесena ochranná barva, aby se zabránilo vzniku koroze. Proto je zde povrch odlišný od odlitků po otryskání.



obr. 6-11: Obrobení výstupku

6.5. Shrnutí

K datu 10.5.2015 bylo odlito 30 ks těchto odlitků s upravenou technologií. Z těchto 30 ks byl pouze jeden odlitek s vadou a ta vznikla, jak jsem uvedl, z důvodu nedodržení technologických parametrů při lití. Takto silnostěnný a relativně mohutný odlitek není možné odlévat z tak vysoké teploty, protože to neúměrně zatěžuje formovací směs.

Shrnutí technologických parametrů je uvedeno v Tab. 6-1.

Tab. 6-1: Shrnutí základních technologických parametrů

Materiál odlitku	EN GJS 200	
Technologie výroby jader:		
velké a malé válcové jádro	CT směs	
velké tvarové jádro	COLD BOX	
Teplota lití	1420 - 1360	°C
Doba lití	27	s
Hmotnost odlévaného kovu	64,5	kg
Využití kovu	80	%

7. SROVNÁNÍ PŮVODNÍ A NOVÉ VARIANTY, KOTROLA ODLITKU

V této kapitole provedu srovnání původního a nového návrhu a to jak po stránce technologické, tak i ekonomické.

7.1. Technologické srovnání

V tomto srovnání půjde hlavně o to, porovnat chování obou variant během plnění a tuhnutí. Na obr. 7-1 je porovnání původního návrhu (vpravo) a nového návrhu (vlevo). V původní variantě byly navrženy dva zářezy zaústěné do boku odlitku v oblasti pinoly a příruby. V nové variantě jsou navrženy tři zářezy zaústěné do pinoly. Plocha zářezů vzrostla z původních 300 mm² u původní varianty, na 450 mm² u nové varianty. Díky tomu je možné dosáhnout kratší doby plnění, i když kratší doba plnění spojená s rychlejším prouděním taveniny nemusí být vždy pozitivní.

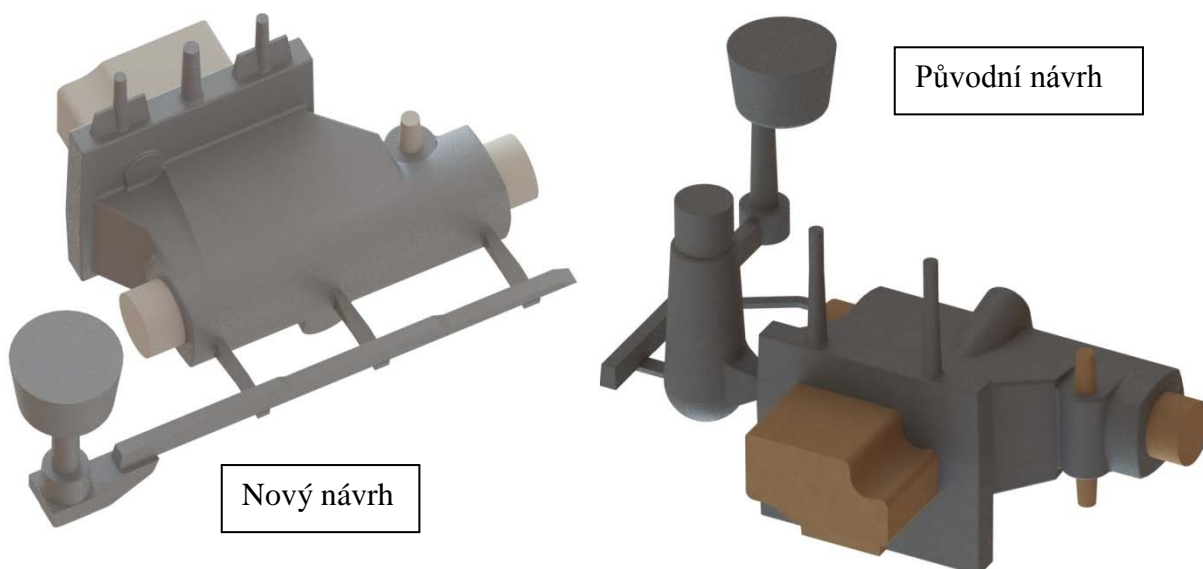
Změna proběhla i v poloze odlitku ve formě, kde došlo k jeho otočení, kvůli dosažení lepšího průběhu proudění taveniny.

Další výraznou změnou v technologii je odstranění nálitku, čímž bylo možné uspořit přibližně 13 kg kovu na jednu formu.

Změnou prošlo také řešení odvodu dutiny formy, kdy namísto dvou kolíků byly použity kolíky 3 a ke dvěma krajním kolíkům byla přidělána křídélka pro lepší pokrytí odvodu plochy.

Technologická změna proběhla také v technologii výroby velkého tvarového jádra. To bylo původně vyráběno na ručním pracovišti z CT směsi. Docházelo ale k poměrně častému problému s ulamováním části jádra, které vedlo k vyřazení odlitku. Proto se v nové verzi toto jádro vyrábí technologií COLD BOX, což by mělo zajistit větší stabilitu mechanických vlastností a vyšší pevnost jádra. Jádra vyráběná technologií COLD BOX by také měla obsahovat menší vlhkost, než jádra vyrábět z CT směsi. To by mělo pomoci ke snížení objemu plynů vyvíjených během odlévání

V Tab. 7-1 je uvedeno srovnání technologických parametrů původní a nové technologie. Zajímavým parametrem ve srovnání je využití kovu. V původní variantě bylo využití kovu 65 %. U nové je to 80 %. Tyto hodnoty znamenají velice zajímavou úsporu kovu a zvýšení produktivity při odlévání.



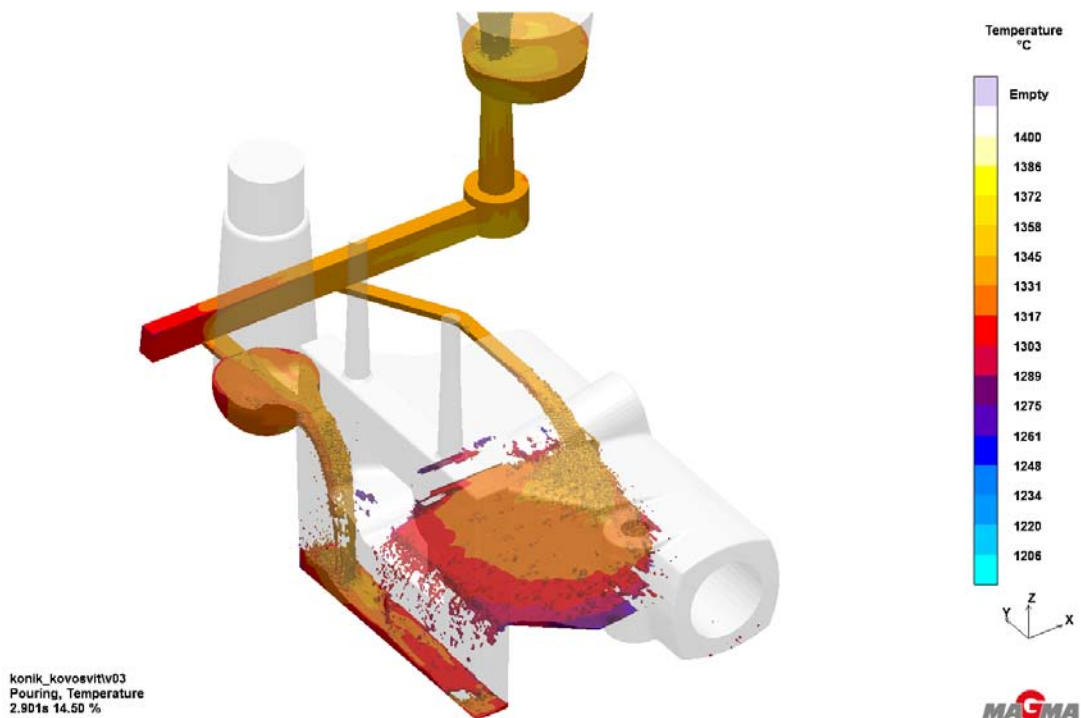
obr. 7-1: Porovnání návrhů

Tab. 7-1: Srovnání variant

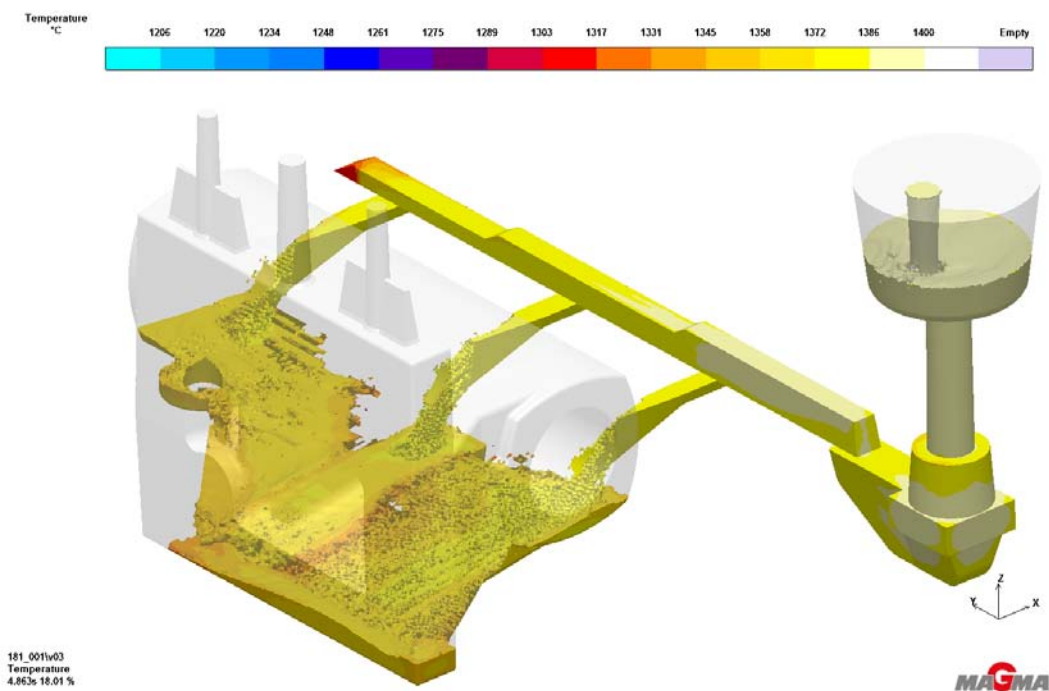
Porovnání variant			
	Původní varianta	Nová varianta	
Materiál odlitku	EN GJS 200	EN GJS 200	
Materiál jader			
válcová jádra	CT směs	CT směs	
velké tvarové jádro	CT směs	COLD BOX	
Průřez zářezů	300	450	mm ²
Doba lití	40	27	s
Teplota taveniny při simulaci	1350	1360 - 1400	°C
Hmotnost odlévaného kovu			
celkem	78	65	kg
vtoková soustava	26,5	13,5	kg
odlitek	51,5	51,5	kg
úspora kovu		13	kg
Využití kovu	65%	80%	

Na obr. 7-2 a obr. 7-3 jsou vidět průběhy plnění dutiny formy taveninou. U původní varianty byl problém s padáním taveniny do dutiny ve spodní části formy. Takový průběh plnění mohl mít za následek zvýšené pohlcování plynu do taveniny a s tím spojené vady. U nové varianty je, díky otočení odlitku, plnění mnohem klidnější a proud taveniny celistvý. Riziko pohlcování plynu je tedy výrazně menší, než u původní varianty a tedy i riziko vzniku vad spojených s přítomností plynu je menší. To dokazují i výsledky odlitých kusů.

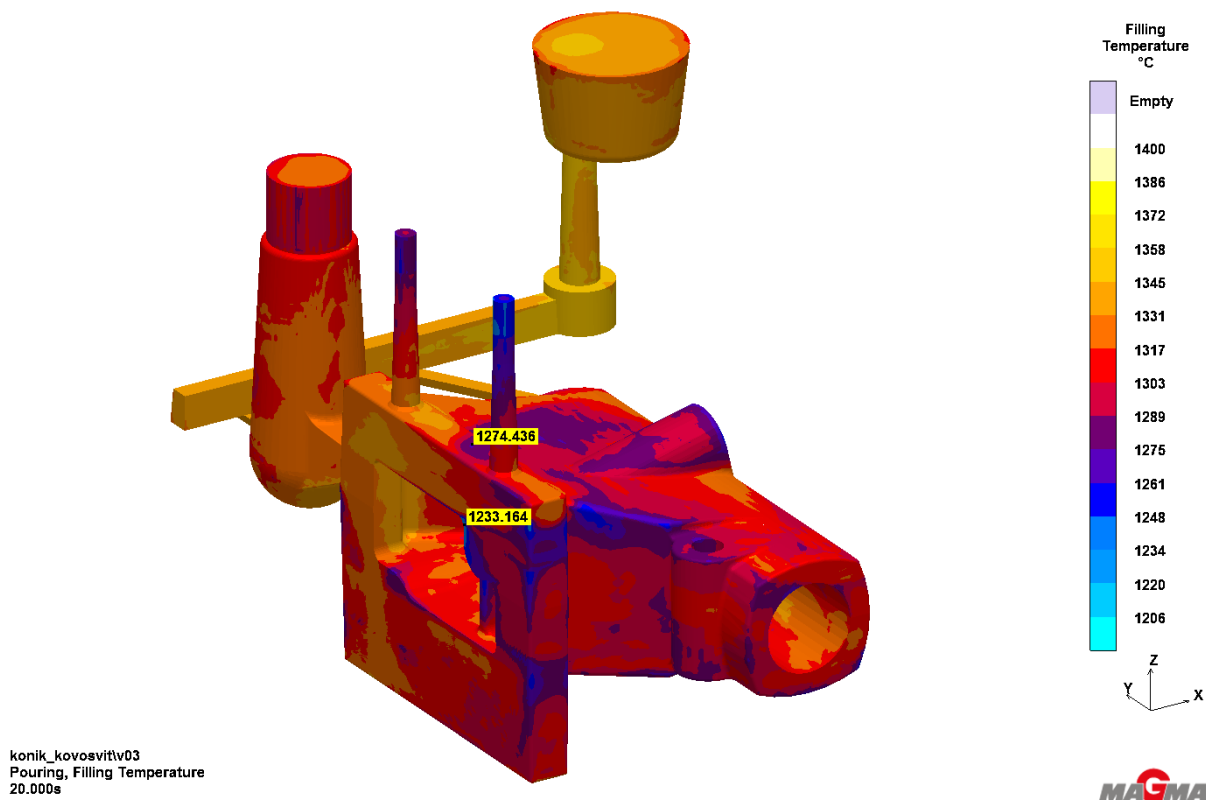
Z analýzy teplotních polí pomocí parametru "Filling Temperature" na obr. 7-4 a obr. 7-5 je vidět, že z hlediska tohoto parametru je na tom lépe původní varianta, hlavně co se týče oblasti příruby. Ale jistý vliv na výsledek mohlo mít nesprávné určení doby lití, která byla pro původní variantu zadána 20 s, ale reálný čas byl asi 40 s. Tím, že se dutina zaplnila rychleji, nestačilo dojít k takovému poklesu teploty taveniny. Kritický byl ale začátek plnění, který nebyl nesprávným určením doby lití ovlivněn.



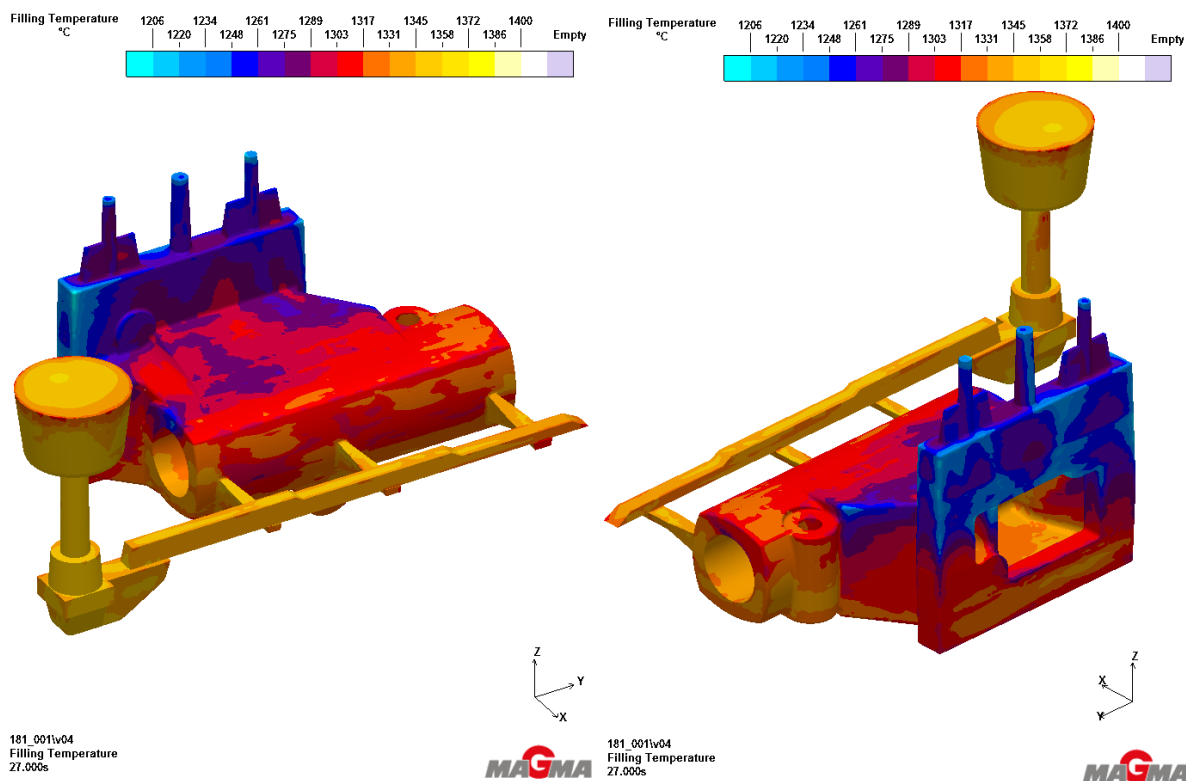
obr. 7-2: Průběh plnění v původní variantě (lící teplota 1350°C)



obr. 7-3: Průběh plnění nové varianty (lící teplota 1400°C)



obr. 7-4: Původní varianta - Filling Temperature (počáteční teplota 1350°C)



obr. 7-5: Nová varianta - Filling Temperature (počáteční teplota 1360°C)

7.2. Ekonomické srovnání

Při porovnávání variant z ekonomického hlediska jsem vycházel především ze srovnání využití kovu a z množství zmetkovitosti, která byla u této pozice zaznamenána. V Tab. 7-2 jsou uvedeny vstupní parametry pro tvorbu ekonomického srovnání.

Při vyčíslování ekonomických úspor jsem vycházel z nákladů, které musí slévárna vynaložit na natavení jednoho kilogramu taveniny. Z obchodního úseku slévárny společnosti KOVOSVIT jsem získal hodnotu nákladů, kterou mají spojenou s natavením jednoho kilogramu kovu. Tato hodnota je uvedena v tabulce níže. Jedná se opravdu pouze o náklady spojené s natavením kovu. V této hodnotě nejsou započteny náklady na výrobu forem, hodinové sazby dělníků, ani jiné další náklady.

Výpočet níže je tedy pouze jednoduchým propočtem úspor na výrobu jedné formy, když budeme počítat s úsporou kovu díky odstranění nálitku.

Tab. 7-2: Tabulka ekonomického srovnání

Náklady na natavení 1 kg kovu	23	Kč/kg
-------------------------------	----	-------

Porovnání variant			
	Původní varianta	Nová varianta	
Hmotnost odlévaného kovu na 1 formu			
celkem	78	65	kg
vtoková soustava (včetně nálitku)	26,5	13,5	kg
odlitek	51,5	51,5	kg
Náklady na kov na 1 formu			
celkem	1 794 Kč	1 495 Kč	
vtoková soustava	610 Kč	311 Kč	
odlitek	1 185 Kč	1 185 Kč	
Úspora nákladů na 1 formu		299 Kč	

Podstatným parametrem při tvorbě ekonomického srovnání je také množství neshodné výroby, které bylo u původní varianty a které bylo dosaženo úpravou technologie. V Tab. 7-3 jsou uvedeny hodnoty zmetkovitosti řešené pozice. Hodnoty pro původní variantu jsou získané z databáze slévárny KOVOSVIT, kde zmetkovitost dané pozice je zaznamenávána od roku 2008. Za tu dobu bylo odlito téměř 530 kusů odlitku s průměrnou zmetkovitostí 33 %. To je relativně vysoká hodnota.

V okamžiku, kdy jsem dokončoval svou diplomovou práci, bylo odlito s použitím nové technologie cekem 30 kusů odlitku. Z tohoto počtu byl kvůli vadám vyřazen pouze jeden odlitek. Vada, která u tohoto odlitku vznikla, nebyla způsobena problémem spojeným s navrženou technologií, ale z důvodu nedodržení technologických parametrů. V tomto případě došlo k odlití s taveninou, jejíž teplota byla výrazně vyšší, než je doporučena. Teplota taveniny byla přes 1450°C a vlivem toho došlo ke vzniku připečenin od formy.

Je pravda, že z 30 odlitých kusů odlitku se nedají dělat dlouhodobé závěry, ale už i z výsledků je vidět poměrně velký pokrok.

Také je potřeba brát ohled na to, že všechny vady, které vznikly při používání původní technologie, nebyly způsoby pouze problémy, které jsem řešil. Některé vady mohli vzniknout nedodržením technologických parametrů, stejně jako v jednom případě při odlévání nové varianty. Některé vady mohly být dále způsobeny ulomením tvarového jádra, to se ale také snad podařilo vyřešit použitím jiné technologie výroby jader.

Tab. 7-3: Hodnoty zmetkovitosti pozice

Porovnání variant			
	Původní varianta	Nová varianta	
Počet vyrobených odlitků	527	30	ks
Počet neshodných kusů	176	1	ks
Průměrná zmetkovitost	33%	3%	

Na několika odlitcích jsem provedl vizuální kontrolu jak ve stavu po odlití, tak i po obrobení. Bohužel jsem neměl možnost provést kontrolu pomocí rentgenu nebo ultrazvuku pro analýzu případných vnitřních vad.

Bližší ohledání odlitků jsem provedl v kapitole 6. , kde byly vidět i obrázky odlitků po odlití a i po obrobení. Po odlití byly na odlitku vidět drobné povrchové vady v oblasti odvzdušňovacích křidélek, které byly způsobeny vydrolením formovací směsi při odformování. Vydrolení bylo způsobeno lehkou deformací křidélek, která vznikla při jejich výrobě. Jiné vady, které by mohly vést k vyřazení odlitku, jsem na odlitcích neodhalil

8. ZÁVĚR

V mé práci jsem se zabýval návrhem nové technologie pro výroby odlitku tělesa koníku. Svou práci jsem dělal ve spolupráci se společností MAGMA GmbH a MAS KOVOSVIT a.s.

Simulační softwary mohou být skvělým nástrojem při návrhu technologie pro výrobu nových odlitků, ale také pomáhají analyzovat problémy u technologií stávajících. Abychom ze simulace byli schopni správně predikovat rizika vzniku vad, musíme znát příčiny vzniku jednotlivých slévárenských vad a také možnosti, jak vzniku těchto vad zabránit. Proto jsem v úvodu své práce provedl rozbor několika slévárenských vad, které se při výrobě odlitků často objevují. Provedl jsem popis těchto vad, popsal příčiny jejich vzniku a také postupy, jak zabránit vzniku těchto vad.

V druhé kapitole jsem udělal krátké seznámení se simulačním softwarem MAGMA⁵ od společnosti MAGMA GmbH. Zjednodušeně jsem popsal postup, jak nastavit simulaci v daném programu a následně jak postupovat při predikci některých vad a jaké při tom použít parametry.

Při rozboru technologičnosti zadaného odlitku jsem se zaměřil na parametry, mezi které patří například hmotnost odlitku, tloušťky stěn na odlitku, materiál odlitku a v neposlední řadě i technologie výroby forem. V druhém kroku jsem provedl analýzu původní technologie a vad, které u této technologie vznikaly. Pro danou technologii jsem vytvořil simulaci, aby bylo možné zjistit průběh odlévání a také riziková místa nebo chování, které by mohlo vést ke vzniku vad. Ze simulace původní technologie jsem zjistil, že největší problém u této technologie je průběh plnění, které mohlo způsobovat zvýšené pohlcování plynů do taveniny.

V návaznosti na simulaci původní technologie jsem navrhl několik nových variant. Provedl jsem simulaci všech těchto variant a z výsledků simulací jsem vybral tu variantu, u níž bylo dosaženo nejlepších výsledků. Snažil jsem se najít takovou variantu, u které by bylo docíleno co možná neklidnějšího plnění dutiny taveninou. Vybírání bylo poměrně náročné, protože u varianty, u které se mi povedlo dosáhnout klidného plnění, byl problém s nižší teplotou taveniny. U variant s dostatečně vysokou teplotou taveniny po zaplnění dutiny formy, byl zase problém s neklidným plněním. Jelikož hlavní problémy u původní varianty plynuly z neklidného plnění, zvolil jsem jako výslednou variantu tu s klidným plněním, i když u ní byla nižší teplota. Z analýzy tuhnutí u původní varianty jsem si všiml, že použitý nálietek není schopen během tuhnutí pokrýt oblasti, ve kterých vznikají

staženiny. Z tohoto poznat jsem vyvodil doporučení na odstranění tohoto nálitku a tím ušetřit přibližně 13 kg kovu na jednu formu.

Vybranou variantu jsem následně doporučil do výroby. Ze 3D modelu jsem vytvořil výkres umístěnky, tedy výkresu, podle kterého následně v modelárně vyrobili modelovou desku. Následně bylo v delším časovém rozmezí odlito 30 ks odlitků, ze kterých pouze jeden odlitek byl s vadou. Tato vada byla navíc způsobena nedodržením technologických požadavků a nebyla tedy způsobena vlivem nově navržené technologie.

Pokud bych měl krátce provést porovnání původní varianty a té nové, největším rozdílem by bylo odstranění nálitku a změna vtokové soustavy. Díky odstranění nálitku se zvýšilo využití kovu téměř o 15%. Úpravou vtokové soustavy se docílilo klidnějšího plnění dutiny formy taveniny, díky čemuž se snížilo riziko pohlcování plynu do taveniny. Úpravou prošla poloha odlitku ve formě, kdy došlo k jeho otočení vzhůru nohama. Změna proběhla v technologii výroby velkého tvarového jádra, které se z místo původní CT směsi, vyrábí technologií COLD BOX. To by mělo zajistit větší pevnost tvarového jádra a omezit jeho ulamování v průběhu odlévání.

Práce na této diplomové práci pro mě byla opravdu velkým přínosem. Dozvěděl jsem se spoustu zajímavých a užitečných informací týkajících se slévárenské technologie a zároveň jsem získal praktické zkušenosti z výroby.

POUŽITÁ LITERATURA:

Knižní zdroje:

- [1] JELÍNEK, Petr. *Slévárství*. 5. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-802-4812-823.
- [2] JELÍNEK, Petr. *Slévárenské formovací směsi*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 1996, 177 s. ISBN 80-707-8326-5.
- [3] Školící materiál pro software MAGMA⁵
- [4] Manual for MAGMA⁵
- [5] ELBEL, Tomáš, František HAVLÍČEK, Petr JELÍNEK, Petr LEVÍČEK, Jan ROUS a Karel STRÁNSKÝ. *Vady odlitků ze slitin železa: (klasifikace, příčiny a prevence)*. Brno: MATECS, 1992.
- [6] *Analysis of casting defects*. Des Plaines: American Foundry Society, 2002, 140 s. ISBN 08-743-3004-1.
- [7] NĚMEC, Milan, Bohumír BEDNÁŘ a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. *Teorie slévání*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2009, ISBN 978-80-01-04395-0.

Internetové zdroje:

- [8] [online]. [cit. 2015-01-23]. Dostupné z: <http://www.kovosvit.cz/cz/slevarna/>
- [9] [online]. [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: http://www.claasguss.de/html_e/pdf/THB11_engl.pdf

Internetové zdroje pro obrázky

- [10] [online]. [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: http://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/cs/studium-a-vyuka/studijni-opory/618-Adolf-sekundarni_metalurgie.pdf
- [11] [online]. [cit. 2015-06-03]. Dostupné z: <http://merrillndt.com/capabilities/conventional-ndt-services/visual-optical-testing>
- [12] [online]. [cit. 2015-06-03]. Dostupné z: <http://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/>
- [13] [online]. [cit. 2015-06-09]. Dostupné z: <http://efoundry.iitb.ac.in/Defects/shrinkage.html>

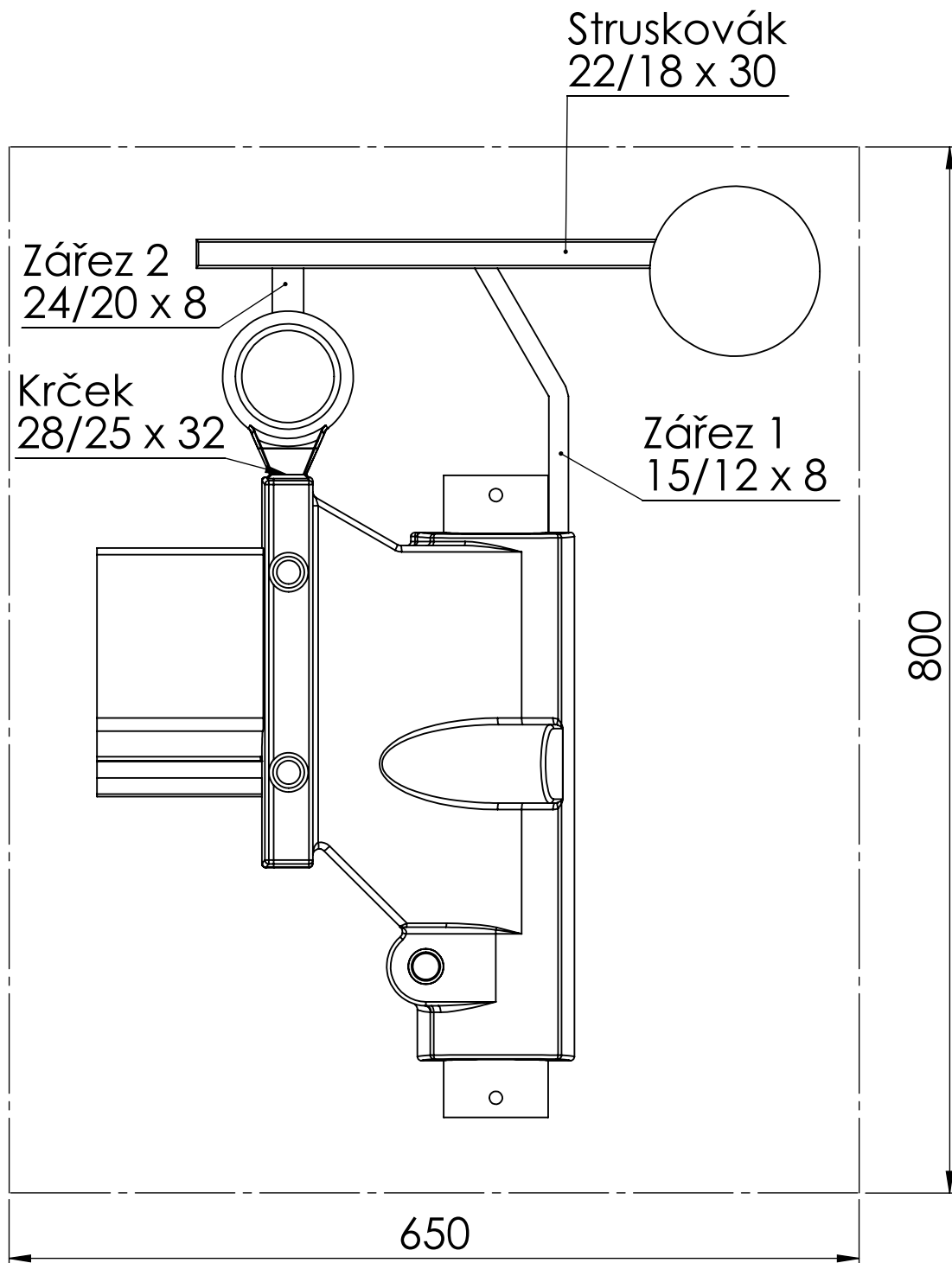
PŘÍLOHA

Tabulka průřezů zářezů

	Licí kůl	Struskovák	Zářez 1	Zářez 2	Zářez 3	Nožový zářez	Celková plocha zářezů
Původní varianta	490	600	108	176			284
Varianta č. 1	490	600	108	176			284
Varianta č. 2	490	600	108	176	184	450	468
Varianta č. 3	750	2 x 360	216	216		2 x 282	432
Varianta č. 4	750	2 x 360	290	290		2 x 380	580
Varianta č. 5	750	600	200	200	200	3 x 430	600
Varianta č. 6	750	500	128	152	168	3 x 300	448

Všechny rozměry jsou uvedeny v mm²

Náčrty jednotlivých variant



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK:
JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH
DRSNOST:
TOLERANCE:
LINEÁRNÍ:
ÚHLOVÁ:

OPRACOVÁNÍ:

ODSTRANIT
OSTRÉ HRANY

NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU

ZMĚNA

NÁZEV	PODPIS	DATUM		
NAVRHL	Jelínek			
PŘEZKOUŠEL				
SCHVÁLIL				
VÝROBA				
Z. JAKOSTI			MATERIÁL:	
			HMOTNOST:	

NÁZEV:

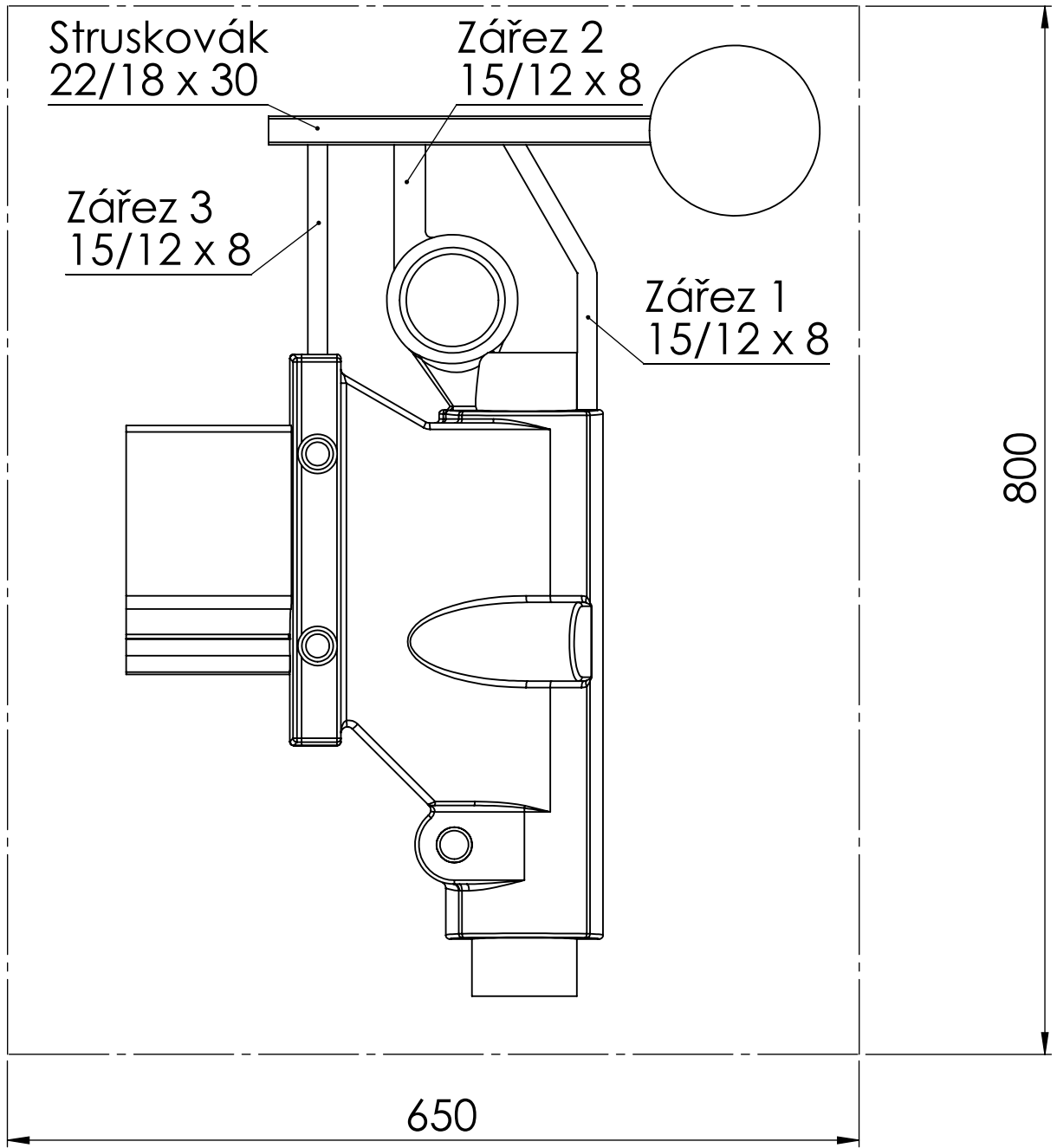
Č. VÝKRESU

Puvodni varianta

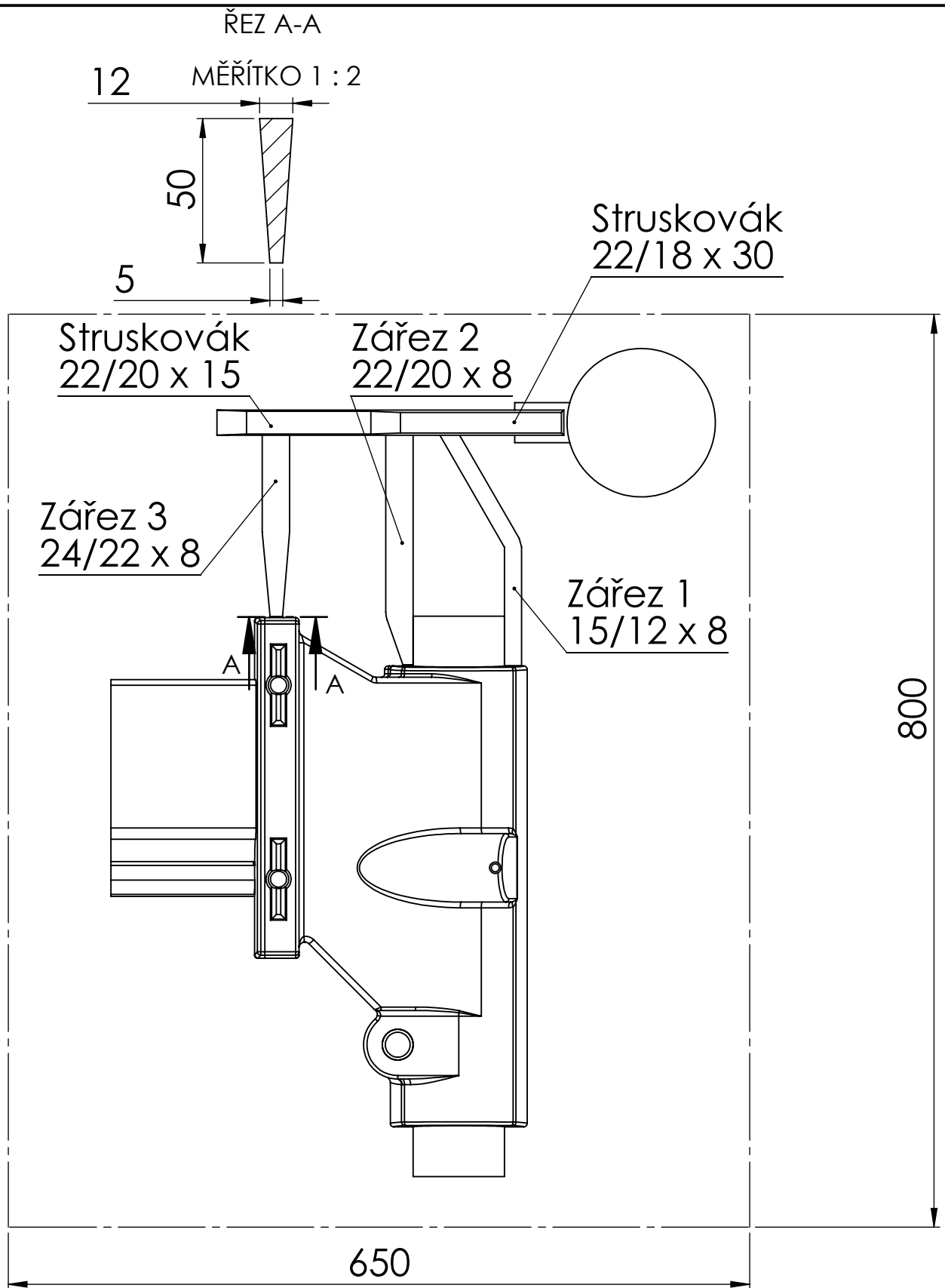
A4

MĚŘÍTKO:1:10

LIST 1 Z 1 LISTŮ



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:		OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTŘÉ HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU		ZMĚNA	
NAVRHL		PODPIS		DATUM		NÁZEV:			
PŘEZKOŠEL									
SCHVÁLIL									
VÝROBA									
Z. JAKOSTI				MATERIÁL:		Č. VÝKRESU		Varianta c. 1	
						MĚŘÍTKO:1:10		A4	
				HMOTNOST:		LIST 1 Z 1 LISTŮ			



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK:
JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH
DRSNOST:
TOLERANCE:
LINEÁRNÍ:
ÚHLOVÁ:

OPRACOVÁNÍ:

ODSTRANIT
OSTŘÉ HRANY

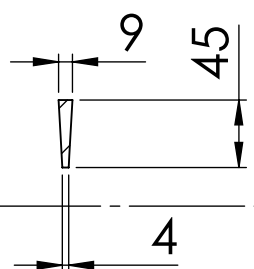
NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU

ZMĚNA

NÁZEV	PODPIS	DATUM			
NAVRHL	Jelínek				
PŘEZKOUŠEL					
SCHVÁLIL					
VÝROBA					
Z. JAKOSTI					
				MATERIÁL:	
				HMOTNOST:	

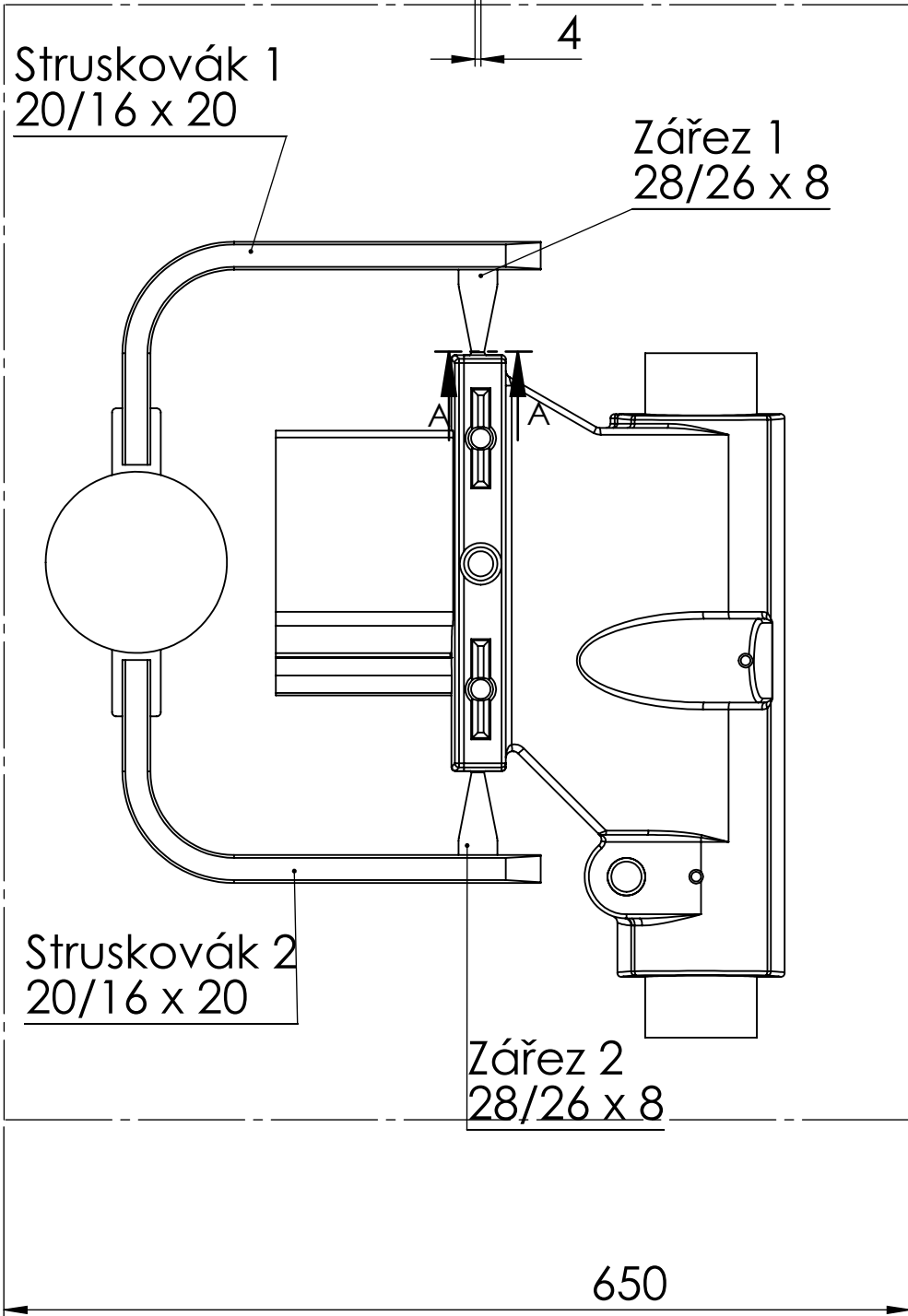
NÁZEV:	
Č. VÝKRESU	Varianta c. 2
MĚŘÍTKO: 1:10	LIST 1 Z 1 LISTŮ
	A4

ŘEZ A-A
MĚŘÍTKO 1 : 5



Struskovák 1
20/16 x 20

Zářez 1
28/26 x 8



Struskovák 2
20/16 x 20

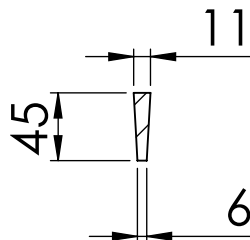
Zářez 2
28/26 x 8

650

800

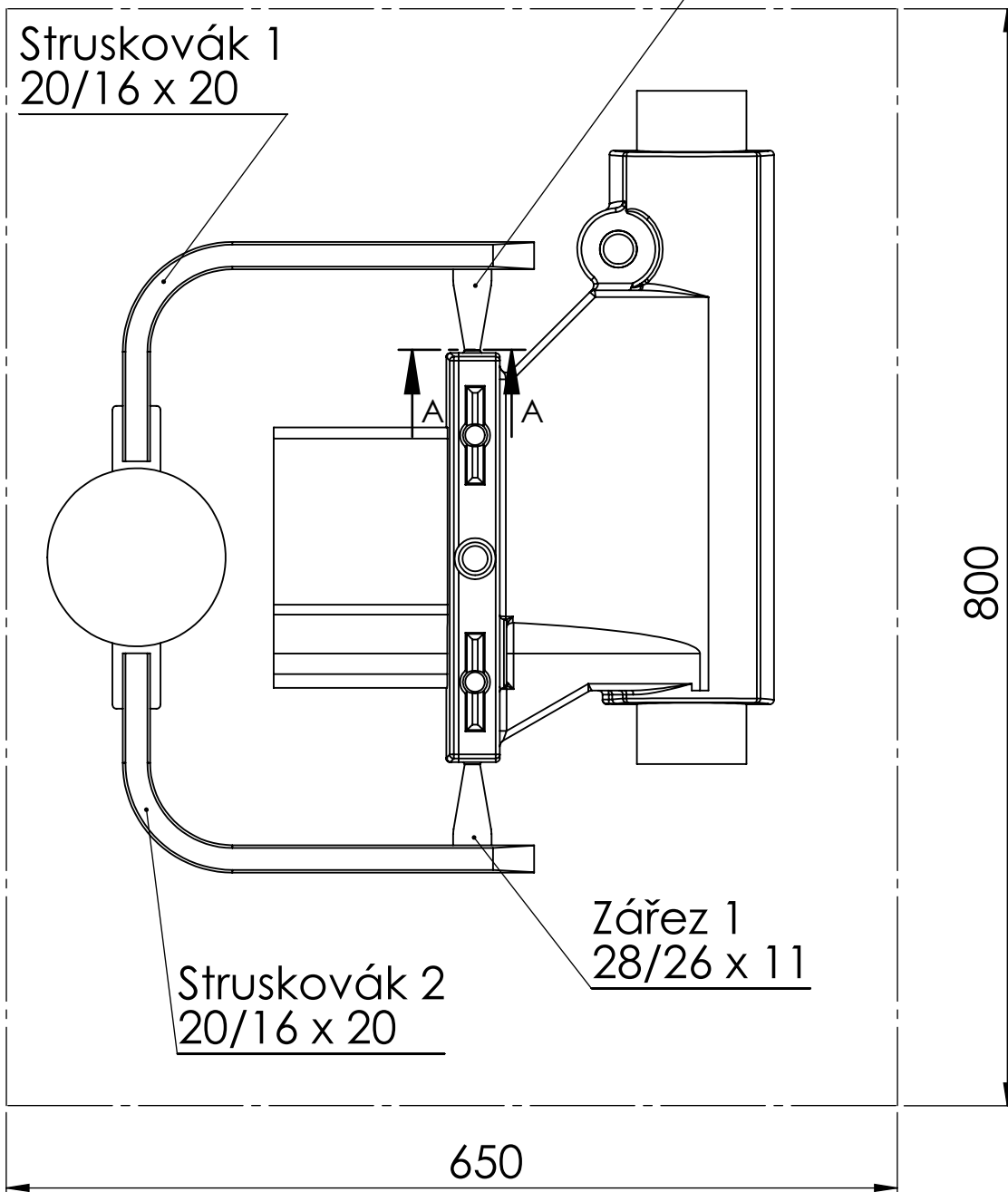
POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:		OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTŘÉ HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU		ZMĚNA	
NÁZEV	PODPIS	DATUM				NÁZEV:			
NAVRHL	Jelínek								
PŘEZKOUSĚL									
SCHVÁLIL									
VÝROBA									
Z. JAKOSTI					MATERIÁL:	Č. VÝKRESU		Varianta c. 3	
								A4	
					HMOTNOST:	MĚŘÍTKO:1:10		LIST 1 Z 1 LISTŮ	

ŘEZ A-A
MĚŘITKO 1 : 5



Zářez 2
28/26 x 11

Struskovák 1
20/16 x 20



Struskovák 2
20/16 x 20

Zářez 1
28/26 x 11

POKUD NENÍ UVEDENO JINAK:
JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH
DRSNOST:
TOLERANCE:
LINEÁRNÍ:
ÚHLOVÁ:

OPRACOVÁNÍ:

ODSTRANIT
OSTRÉ HRANY

NEUPRAVOVAT MĚŘITKO VÝKRESU

ZMĚNA

NÁZEV	PODPIS	DATUM		
NAVRHL	Jelínek			
PŘEZKOUŠEL				
SCHVÁLIL				
VÝROBA				
Z. JAKOSTI			MATERIÁL:	
			HMOTNOST:	

NÁZEV:

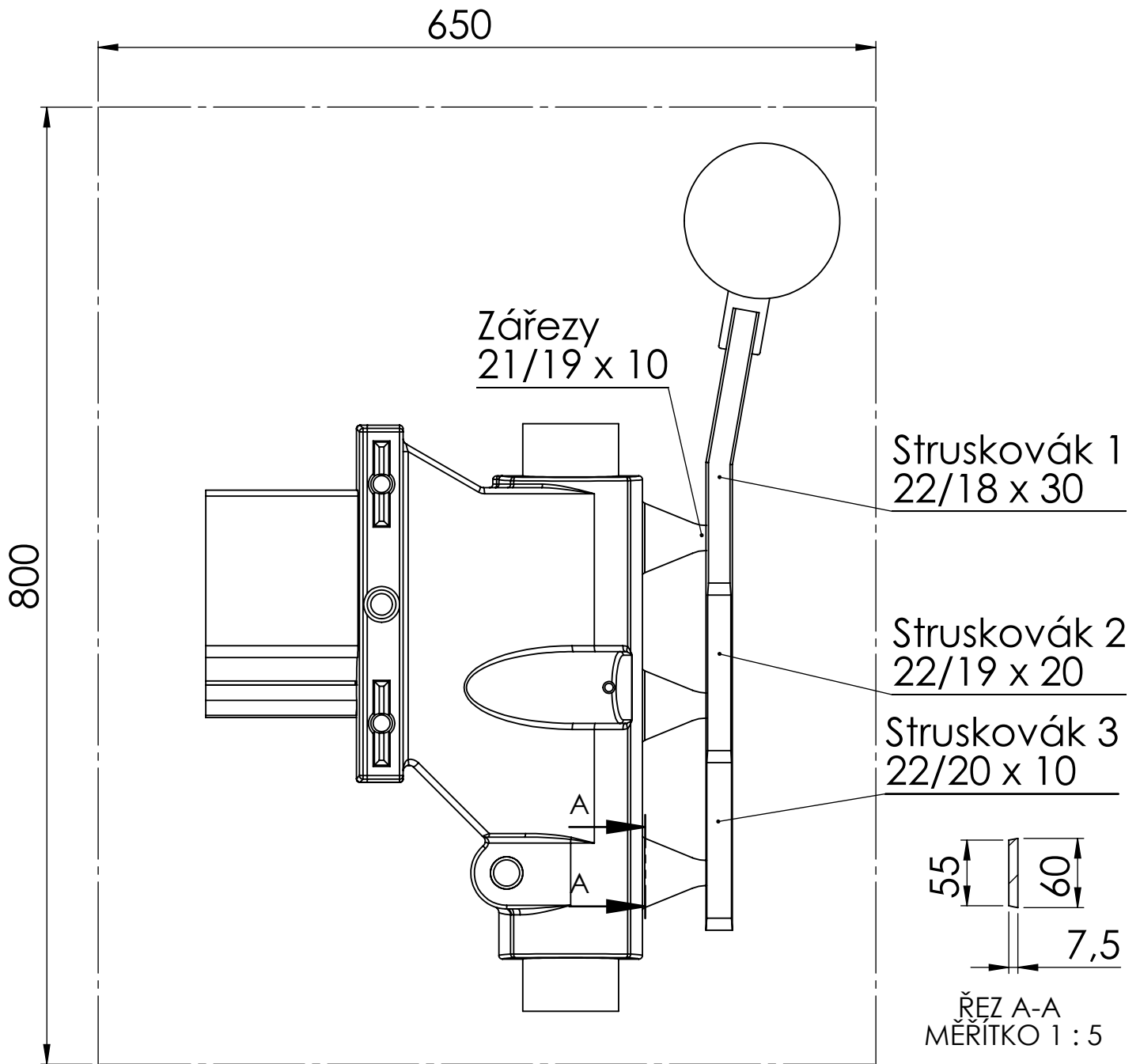
Č. VÝKRESU

Varianta c. 4

A4

MĚŘITKO:1:10

LIST 1 Z 1 LISTŮ



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:		OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTŘÉ HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘITKO VÝKRESU		ZMĚNA	
NAVRHL		PODPIS		DATUM		NÁZEV:			
PŘEZKOUSEL									
SCHVÁLIL									
VÝROBA									
Z. JAKOSTI				MATERIÁL:		Č. VÝKRESU		Varianta c. 5	
						MĚŘITKO:1:10		A4	
				HMOTNOST:		LIST 1 Z 1 LISTŮ			