ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav strojírenské technologie

Vliv tepelné vodivosti postřiku kovové formy na kvalitu odlitku ze slitiny Al-Si

The Die Coating Influence of Heat Conduction on Al-Si Alloy Casting Quality

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Master´s Thesis

Autor práce: Bc. Václav Rašovec

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

PRAHA 2017

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v přiloženém seznamu využitých zdrojů.

V Praze dne..... .....

podpis autora

Poděkování

Mé poděkování patří vedoucímu této diplomové práce panu Ing. Aleši Hermanovi, Ph.D. a konzultantovi panu Ing. Milanu Luňákovi za jejich čas, věcné připomínky a cenné rady, které mi byly přínosem nejen pří vypracování Diplomové práce.

Dále děkuji společnosti BENEŠ a LÁT a.s. za poskytnutí informací a podkladů, bez kterých by nebylo možné zpracovat praktickou část diplomové práce. Zvlášť mé poděkování patří technologickému oddělení za efektivní spolupráci při řešení dané problematiky.

ANOTACE

Tato diplomová práce se zabývá fyzikálními vlastnostmi postřiků kovových forem a to konkrétně jejich tepelnou vodivostí. Experiment, který zkoumal vlastnosti postřiků, se realizoval ve společnosti BENEŠ a LÁT a.s. Při navrhování experimentu byl kladen vysoký důraz na to, aby podmínky, za kterých se daný postřik (či jejich kombinace) zkoumal, co možná nejvíce odpovídaly skutečnému výrobnímu procesu.

Hlavním cílem tohoto experimentu byla korekce vstupních parametrů do simulačního softwaru, za potom zjištění skutečných hodnot koeficientů přestupu tepla mezi taveninou a stěnou formy. Zjištěné hodnoty byly následně ověřeny simulačním softwarem $MAGMA_5$ a porovnány se skutečným procesem sériové výroby odlitku pro renomovaného zákazníka.

Klíčová slova

postřiky kovových forem, způsoby nanášení postřiků, kovové formy, simulační software

ANNOTATION

This diploma thesis deals with the physical properties of sprays of metallic forms, namely their thermal conductivity. An experiment that investigated the properties of spraying was carried out at BENEŠ and LÁT a.s. During the design of the experiment, the emphasis was placed on the conditions whcn the spraying (or combination thereof) was investigated, as closely as possible to the actual production process.

The main goal of this experiment was to correct the input parameters in the simulation software by detecting the actual values of heat transfer coefficients between the melt and the mold wall. The detected values were subsequently verified by the MAGMA5 simulation software and compared to the actual serial process. For castings production to importem customer.

Keywords

Spraying of metal molds, spraying methods, metal forms, simulation software

OBSAH

ÚVOD ..... - 9 -

1. PROBLEMATIKA ODLÉVÁNÍ DO TRVALÝCH FOREM ..... - 10 -

1.1. Gravitační lití do kovových forem ..... - 10 -

1.2. Nízkotlaké lití ..... - 15 -

1.2.1. Konstrukce forem ..... - 16 -

1.2.2. Technologie lití ..... - 17 -

2. SLÉVÁRENSKÉ SLITINY HLINÍKU ..... - 19 -

2.1. Tvar eutektika ve slitinách Al-Si ..... - 21 -

3. TYPY POSTŘIKŮ, JEJICH VLASTNOSTI A ZPŮSOBY NANÁŠENÍ ..... - 25 -

3.1. Role nátěrů a postřiků během lití ..... - 25 -

3.2. Funkce povlakové vrstvy ..... - 26 -

3.3. Vliv povlakové vrstvy na přestup tepla ..... - 26 -

3.4. Aplikační metody ..... - 28 -

3.5. Řízení toku kovu ..... - 29 -

3.6. Snadné vyjímání odlitků ..... - 30 -

3.7. Kvalita povrchu odlitku ..... - 30 -

3.8. Faktory ovlivňující životnost nástřiku ..... - 30 -

3.9. Příprava povrchu před nanesením povlaku ..... - 31 -

3.10. Teplota ..... - 31 -

3.11. Tloušťka naneseného povlaku ..... - 32 -

3.12. Způsoby skladování nástřikových směsí ..... - 33 -

3.13. Příprava směsí ..... - 33 -

3.14. Kontrola kvality postřiku ..... - 34 -

3.15. Podmínky aplikace nástřiku stříkáním ..... - 35 -

3.16. Kontrola tloušťky povlaku ..... - 37 -

3.17. Lokální čištění formy pomocí CO2 ..... - 38 -

4. NUMERICKÉ SIMULACE SLÉVÁRENSKÝCH PROCESŮ ..... - 39 -

5. PRINCIP EXPERIMENTU A POPIS MĚŘÍCÍHO ZAŘÍZENÍ ..... - 43 -

5.1. Konstrukce měřícího zařízení ..... - 44 -

5.2. Simulace tuhnutí a teplotní pole zkušební formy ..... - 45 -

5.3. Výroba zkušební formy ..... - 47 -

5.4. Zkušební měření ..... - 48 -

5.5. Popis použitého zařízení a vstupních veličin ..... - 49 -

5.6. Návrh rozložení termočlánků na měřící aparatuře ..... - 53 -

6. POSTUP MĚŘENÍ ..... - 55 -

6.1. Příprava zkušební formy v nástrojárně ..... - 55 -

6.2. Předehřátí zkušební formy na aplikační teplotu ..... - 56 -

6.3. Aplikace separačního postřiku ..... - 56 -

6.4. Měření tloušťky naneseného postřiku ..... - 57 -

6.5. Instalace termočlánků ..... - 58 -

6.6. Záznam údajů ..... - 59 -

7. VYHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH DAT ..... - 60 -

8. APLIKACE ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ V SOFTWARU $MAGMA_5$ ..... - 63 -

8.1. Odlitek části převodovky ..... - 63 -

8.2. Výsledky simulace - Teploty plnění ..... - 64 -

8.3. Výsledky simulace - Teploty tuhnutí ..... - 67 -

8.4. Výsledky simulace - Podíl tuhé fáze ..... - 70 -

8.5. Výsledky simulace - Tepelné uzly ..... - 73 -

8.6. Výsledky simulace - Staženiny ..... - 73 -

8.7. Výsledky simulace - Mikroporezita ..... - 74 -

8.8. Rentgenový snímek odlitku a jeho vyhodnocení ..... - 74 -

ZÁVĚR ..... - 76 -

SEZNAM ZDROJŮ A POUŽITÉ LITERATURY ..... - 78 -

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ ..... - 81 -

SEZNAM OBRÁZKŮ ..... - 82 -

SEZNAM TABULEK ..... - 86 -

SEZNAM PŘÍLOH ..... - 87 -

ÚVOD

Odlévání odlitků do trvalých, kovových forem, je hlavním odvětvím odlévání neželezných kovů. Pro lepší výsledky ve výrobě je možné provádět numerické simulace procesu lití a tuhnutí odlitku. Přesné numerické modely vyžadují přesné vstupní parametry jako termo-fyzikální vlastnosti tuhnoucí slitiny, tak i hraniční podmínky. V tomto experimentu se budu zabývat důležitým vstupním parametrem a to koeficientem přestupu tepla mezi odlitkem a kovovou formou a dále zkoumat postřiky, které tento parametr ovlivňují.

Nanášená tloušťka postřiku se skládá z několika vrstev různých typů postřiku. Každý jednotlivý postřik má své specifické vlastnosti. Tyto vlastnosti ovlivňují proces tuhnutí taveniny, celkové zabíhání taveniny a konečné vyjímaní odlitku. Výrobci těchto postřiků obvykle poskytují pouze základní specifikace pro daný přípravek. Při skutečnosti, že v reálném provozu se používají vždy kombinace různých postřiků, jsou informace poskytované výrobcem nedostačující. Z tohoto důvodu byl připraven tento experiment, který zkoumá vlastnosti nejpoužívanějších kombinací postřiků. Hlavní body, klíčové pro objasnění vlastností tepleného toku, byly tloušťka nanesené vrstvy postřiku a koeficient přestupu tepla mezi stěnou formy a odlitkem. Získané hodnoty byly ověřeny na reálně odlévaných součástech. Tyto součásti vykazovaly neshodu mezi výsledky simulace a realitou. Při zkoumání celého procesu lití bylo zjištěno, že součinitel přestupu tepla je u těchto případů zásadní vstupní proměnná, která výrazně ovlivňuje výsledky simulace.

Hlavním cílem této práce je navržení vhodného způsobu zjištění koeficientu přestupu tepla pro dané kombinace postřiků, aplikace výsledné hodnoty do simulačního softwaru a porovnání výsledků simulace a reálného výrobku.

1. PROBLEMATIKA ODLÉVÁNÍ DO TRVALÝCH FOREM

Obsahem této části diplomové práce je podrobné popsání všech problematik, které se týkají praktické části práce. To zahrnuje podrobné popsání všech použitých technologií a materiálů, které s danou problematikou přímo souvisí.

Hlavním kritériem pro odlévání do kovových forem je celková ekonomická efektivita. Ta je přímo závislá na sériovosti výroby dané součásti. Podle tvarové složitosti formy se odvíjejí náklady na její zhotovení. Důležité je, aby účinná použitelnost formy limitovala náklady na její výrobu. [2, str. 99]

Odlitky vytvořené odléváním do trvalých kovových forem jsou převážně menších až středních rozměrů. [2, str. 99]

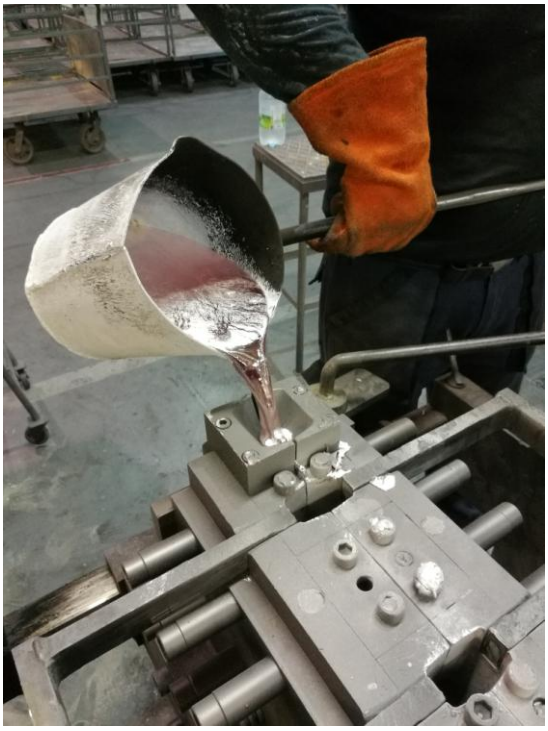
1.1. Gravitační lití do kovových forem

U gravitačního lití do kovových trvalých forem stéká roztavený kov do formy vlivem gravitace a tuhne za normálního tlaku vzduchu. Gravitační lití do kovových forem (obr. 1.) je velice produktivní a progresivní a i přesto se jedná o poměrně jednoduchou metodu pro výrobu odlitků. Použití této metody odlévání odlitků je předepsáno v technické dokumentaci dané součásti a určuje se hlavně s ohledem na sériovost výroby. Gravitační lití do kovových forem může být také navrženo na základě porovnání nákladů při klasické výrobě odlitků dané série do pískových forem a do kovových forem. [1, str. 297]

Hlavní výhody gravitačního odlévání do kovových forem:

- možnost ovlivnění ochlazovacího účinku formy (dáno součinitelem tepelné akumulace),
- možnost dosažení kvalitního povrchu odlitku, za předpokladu použití správného typu postřiku,
- dosažení vyšší přesnosti odlitku a snížení přídavků na obrábění,
- výhodné požití tepelně izolačních a exotermických obkladů nálitků (obr. 2.),
- komplexní pracoviště lze částečně nebo plně automatizovat, k jedné udržovací peci dva licí stroje (obr. 3.),

- je možné očekávat snížení počtu vadných odlitků (zmetků), za předpokladu dodržení technologického taktu a kázně v celém procesu. [1, str. 297]



Obr. 1. Gravitační lití

Obr. 2. Izolační obklad nálitku

Obr. 3. Udržovací odporové pece - kelímkové

Nevýhody gravitačního odlévání do kovových forem: [1, str. 297]

- ekonomicky nevýhodné při nižším počtu odlitků,
- technická náročnost přípravných prací,
- finanční náklady na výrobu forem,
- kovová forma není prodyšná, a proto je nutné vytvoření kvalitního odvzdušnění.

Zařízení pro gravitační lití do kovových forem mohou být dvojího druhu: [1, str. 297]

a) jde o jednoduchou dělenou kovovou formu, umístěnou na vhodném licím stole bez použití mechanizace (obr. 4.)
b) jde o pracoviště vybavené hydraulickými tahači pro uzavírání a rozevírání kovové formy a pro pohyb jader (obr. 5.)

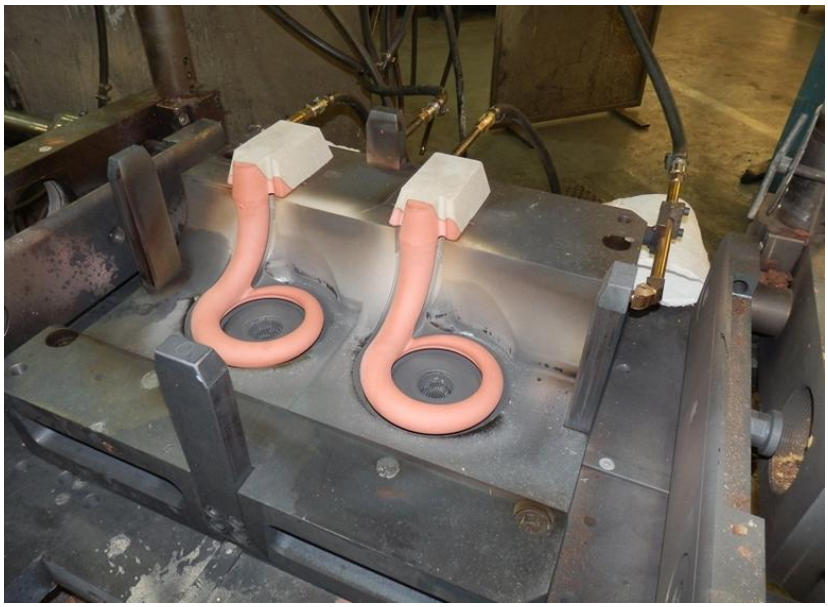
Obr. 4. Ruční zakládání jádra

Obr. 5. Mechanizované odformování

Velkou výhodou gravitačního lití do kovových forem je použití cenově i technicky dostupných materiálů pro výrobu slévárenských forem. Velmi často používaným materiálem je šedá litina, která je dostupná, levná a dobře zpracovatelná. Její hlavní výhoda je dobrá stabilita při tepelném namáhání. Mezi její nevýhody patří zvýšený obsah fosforu a síry. Vlastnosti této litiny lze zlepšit přidáním legujících prvků (0,3-0,5% Cr, nebo 0,3-0,5% Cu a 0,2-0,7%V). [1, str. 298]

Formy vyrobené z chrom-niklové oceli (2,8 % Cr a 1,2 % Ni) se obtížněji opracovávají, jsou dražší a po tepelném namáhání se více deformují, ale celkově mají formy z uhlíkových a nízkolegovaných ocelí delší životnost. Tepelně namáhané části formy (jádra a výstupky) jsou vložkovány ze žárupevných a žáruvzdorných ocelí. [1, str. 297]

Formy jsou vyráběny v různém provedení, buď dvoudílné nebo vícedílné. Jádra mohou být stálá (kovová), nebo jednorázová (písková). Písková jádra se používají ve speciálních případech, kdy by kovové jádro nešlo pro svůj tvar z dutiny odlitku vyjmout. (obr. 6.) [2, str. 100]



Obr. 6. Písková jádro

Formy pro gravitační lití (tzv. kokily) bývají nainstalovány na k tomu určených stolech. Tyto stoly jsou ve většině případů univerzální, aby bylo možné je používat pro více forem. Licí stolky jsou vybaveny přidržovači hydraulických tahačů. Tahače jsou připojeny k řídícímu počítači, který je schopen pracovat buď v automatickém nebo v manuálním režimu. [2, str. 100]

a) Automatický režim

Je řízen předem připravenou receptůrou pro daný typ odlitku. Dává slévači signál, kdy plnit formu. Naopak po uplynutí doby tuhnutí dává signál k otevření formy a vyjmutí odlitku.

b) Manuální režim

Manuální režim je závislý na zkušenostech slévače.

Formy bývají ve většině případech řešeny se svislou dělící rovinou (viz obr. 2.). Jelikož se jedná převážně o ruční manipulaci pohybuje se hmotnost odlitků od několika desítek gramů až do cca 20-30 kg, výjimečně i více. [2, str. 100]

Obecný technologický postup gravitačního lití do kovových forem:

1) očištění kokily od postřiku drátěným kartáčem
2) ohřátí kokily dvěma plynovými hořáky na teplotu odparu vody z postřiku cca 150-180°C
3) provedení postřiku: vtok + nálitky: postřik STEIGER WOHO, celý tvar: DYCOTE 34 ESS a přerosit AQUANET LS
4) zbavení dutiny kokily nečistot stlačeným vzduchem
5) založení pískových jader na známky do dutin v pevné polovině a jejich zajištění
6) vložení drátěného sítka 50x35 (2x2) mm do vtokové jamky do obou otisků pomocí kleští
7) hydraulické uzavření polovin
8) pomalé lití materiálu nálitkem až do úplného naplnění
9) tuhnutí materiálu
10) hydraulické otevření polovin
11) vyjmutí odlitku kleštěmi za nálitek
12) samokontrola z hlediska slévárenských vad a uložení odlitku na vozík

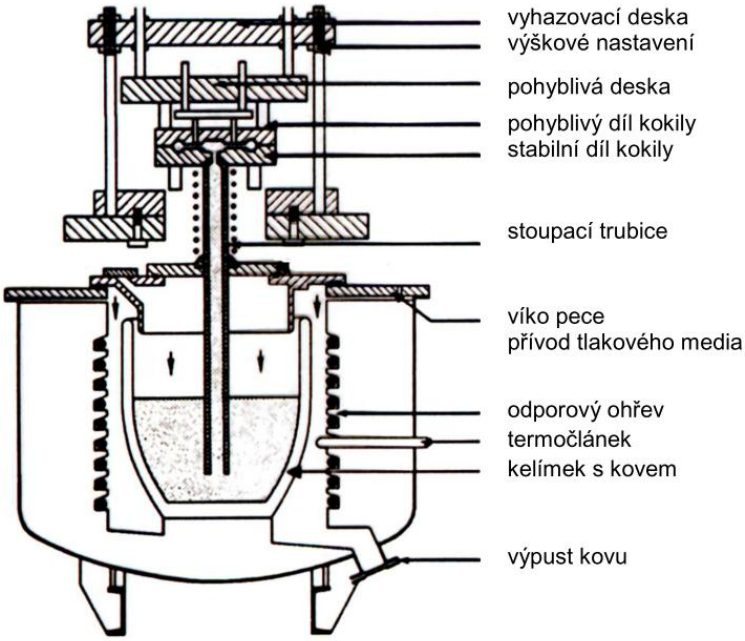
<u>Monitorované parametry procesu:</u>

Licí teplota: 735 ± 10°C

1.2. Nízkotlaké lití

Svým charakterem lze nízkotlaké lití srovnávat s litím do gravitačních kokil, proti kterému má celou řadu předností. Z hlediska technologie je to v prvé řadě klidné plnění formy kovem, které je u Al odlitků nezbytné. Dále jeho výhodou je vysoké využití tekutého kovu. V průměru lze dosáhnout až 95% využití kovu oproti gravitačnímu, kde se dosahuje využití cca 65%. [3, str. 27]

Nízkotlaké lití lze velmi snadno automatizovat. Je proto téměř pravidlem, že jeden operátor obsluhuje podle náročnosti 2-4 pracoviště. Odpadá fyzicky namáhavá práce slévače při nalévání kovu do formy a tím také snížení rizika popálení tekutým kovem. Nízkotlaká udržovací pec je hermeticky uzavřený prostor a z tohoto důvodu má menší energetické ztráty. Při nízkotlakém lití je tekutý kov zvedán nízkým tlakem plynu na lázeň a plnící trubicí stoupá do formy, kde pod tímto tlakem tuhne. Schéma a obrázek nízkotlakého stroje lze vidět na obr. 7, 8. Kromě udržovací odporově



Obr. 7. Schéma nízkotlakého licího stroje

Obr. 8. Nízkotlaký licí stroj

vytápěné elektrické pece se nízkotlaký licí stroj skládá z keramického kelímku a vzduchotěsně uzavřeného víka. Jeho středem prochází trubice, na které je uložen litinový, či nerezový mezikus (obr. 9.). V ose trubice je na mezikus položena základní deska nízkotlaké formy. Horní část formy je ovládána hydraulickým válcem,

upevněným na horní konzole, která je sloupky spojena se základní deskou. Stlačený vzduch je přiváděn trubicí nad hladinou roztaveného kovu. Přívod a vypouštění stlačeného vzduchu řídí elektropneumatický ventil. Působením stlačeného vzduchu na hladinu kovu stoupá kov vtokovou trubicí do formy. Po celou dobu lití a tuhnutí odlitku ve formě působí tento takzvaný "dotlak" na hladinu kovu a tím i na samotný odlitek. Při poklesu tlaku v kelímku klesne sloupec roztaveného kovu ve vtokové trubici na úroveň hladiny. Přerušení kovového sloupce nastane v přechodové oblasti mezi již ztuhlým a tekutým kovem ve vtokovém kanálu formy. Toto musí být jištěno vhodnou konstrukcí, jak formy, tak i vtokového kůlu a zároveň optimálním časem tuhnutí. [3, str. 28]

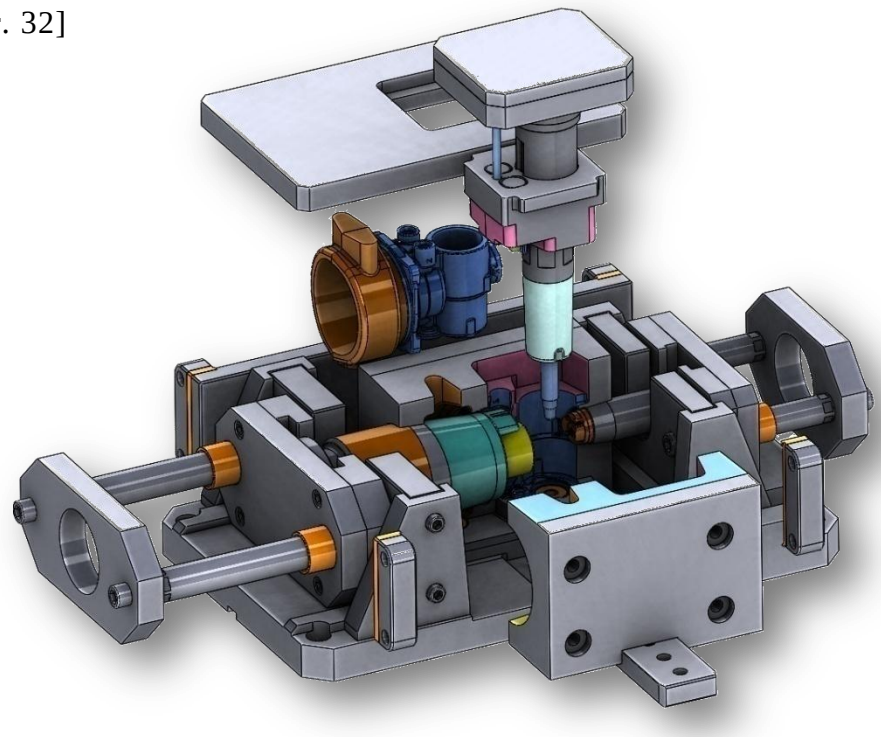
Obr. 9. Mezikus

1.2.1. Konstrukce forem

Z porovnání finančních nákladů na výrobu forem pro gravitační, nízkotlaké a vysokotlaké lití je patrné, že nízkotlaké lití je z hlediska pořizovacích nákladů na formu výrazně nejekonomičtější. Formy pro nízkotlaké lití nemusí být vyrobeny z legovaných materiálů, přestože jsou v průběhu licích cyklů namáhány tlakem a působením tepla. Namáhání tlakem kovu je zanedbatelné, naproti tomu působení tepla vyvolává ve formě střídavě vysoké napětí a jeho pokles. Funkční část formy, ohřátá stykem s roztaveným kovem, se působením tepla roztahuje více než povrch

formy, který tomuto roztahování brání. Tím vzniká velmi vysoké vnitřní napětí v materiálu formy. [3, str. 32]

Navrhování a konstrukce forem vyžaduje značné zkušenosti v tomto oboru. Samotná výroba forem se příliš neliší od výroby kokil pro gravitační lití. Jako výchozí materiál pro výrobu forem se nejčastěji používá šedá litina, ocelolitina nebo tvářené materiály. Přesnost, s jakou jsou formy pro nízkotlaké lití vyráběny, je srovnatelná s gravitačním litím jen s tím rozdílem, že vůle pro vyhazovače a odvzdušňovací štěrbiny může být maximálně 0,15 mm. Drsnost povrchu tvaru odlitku se předepisuje Ra 6,3. Pro vtokové soustavy a nálitky je drsnost povrchu stanovena na Ra 12,5. Postřik chránící vtokové soustavy a nálitku na drsnějším povrchu lépe drží a neloupe se. Životnost forem závisí na členitosti a hmotnosti odlitků a na použitém materiálu pro jeho výrobu. Optimální životnost u středně složitých odlitků je cca 30 – 40 000 cyklů. [3, str. 32]



Obr. 10. Schéma NTL formy

1.2.2. Technologie lití

Technologií nízkotlakého lití nelze vyrábět všechny druhy odlitků. Je nutné si uvědomit, že nízkotlaké odlitky mají převážně jediný plnící kanál, který je současně také jediným nálitkem. Zaústění tohoto kanálu je nutné umístit do nejsilnější stěny

nebo do tepelného uzlu odlitku. Ideální odlitek pro nízkotlaké lití je takový, kde nejvzdálenější část, odlitku jsou nejslabší a směrem ke vtoku se rozšiřují. Kov, který stoupá při lití vtokovým kanálem pomalu do formy, se o její stěny ochlazuje tak, že po naplnění formy od nejvzdálenějších a nejslabších stěn odlitku usměrněně tuhne směrem ke vtoku. Před stoupacím kovem je vytlačován z formy vzduch, a proto je nutné, aby bylo ve formě vhodně umístěné odvzdušnění. Odvzdušnění se provádí jako u kokilového lití s tím rozdílem, že odvzdušňovací štěrbina nesmí být větší než 0,15 mm. Je možné i použití obvyklých průduchů, nejúčinnější je využití dělící roviny formy nebo dělení jednotlivých částí. Dělení a vložkování forem je nutné provádět uvážlivě, aby nebylo z tohoto důvodu porušeno usměrněné tuhnutí odlitku. Právě dělení formy je jedna z možností, jak usměrněnému tuhnutí pomoci. [3, str. 34]

Forma musí být tepelně vyvážená, aby byl zaručen kvalitní odlitek s dobrými mechanickými vlastnostmi. Je nutné, aby hmotnost a povrch formy zaručily, že její teplota neklesne pod technologicky stanovenou úroveň. Její hodnota se mění v závislosti na typu a složitosti formy, obvykle se tato hodnota pohybuje od 430-450°C. Téměř u všech forem je pravidlem, že se za provozu chladí. Nejčastěji se požívá hlazení vodou, neboť vzduch je příliš drahý, málo účinný a teplo odvedené z formy nepříznivě ovlivňuje klima na pracovišti. Chlazení formy vyžaduje značné zkušenosti. Je nutné ho využít tak, aby pomáhalo usměrňovat tuhnutí odlitku. Chladí se nejvzdálenější část formy od vtoku, a to z pravidla tak, že přes rohy formy jsou navrtané otvory, kterými proudí voda. Je nutné, aby byly vzdálené nejméně cca 10 - 15 mm od odlitku. Doporučuje se volit otvory menší a je-li chlazení nedostatečné, je vhodné je zvětšovat. Z bezpečnostních důvodů je nutné dbát na to, aby vyvrtanými otvory nevnikla voda do dutiny formy nebo dokonce do pece. Pro zvládnutí tepelných uzlů v odlitku se používají u kokilového lití měděná chladítka. Také postřiky hrají v této problematice zásadní roli, jelikož jejich rozdílná tepelná prostupnost nám zásadně ovlivňuje tuhnutí odlitku. [3, str. 31]

Jedna z nejdůležitějších částí nízkotlaké formy je vtokový kanál. Nejčastěji je používaný válcový tvar vtokového kanálu, který se směrem k odlitku kuželově rozšiřuje. Má-li takový kanál správně plnit svou funkci, je nutné, aby byl dokonale tepelně izolován. To znamená, že materiál v něm musí tuhnout směrem od odlitku, nikoliv od jeho stěn. Proto je důležité, aby byl zvolen i jeho správný průměr. Je-li

jeho průměr příliš velký, odlitek chladne příliš dlouho a snižuje se produktivita práce a odlitek má vlivem dlouhého tuhnutí hrubší strukturu a tím i nižší mechanické hodnoty. Naopak u malého vtokového kanálu vzniká nebezpečí, že materiál ztuhne v celém průřezu dříve než odlitek, který potom bude vykazovat vnitřní nebo povrchové staženiny. [3, str. 33]

Napojení vtokového kanálu na odlitek je možné provést několika způsoby. Nejúčinnější a také nejvyšší využití kovu je u takových odlitků, kde je kanál napojen přímo na odlitek. U menších odlitků je možné napojit na jeden vtok několik odlitků tak, že vtokový kanál je ve středu a odlitky jsou umístěny okolo. Větší množství malých odlitků je možné napojit na společný pravítkový vtok, kde vtokový kanál je v jeho středu. U odlitků, kde není možné dosáhnout usměrněného tuhnutí z jednoho místa, je možné používat i nálitky. Tyto nálitky musí být uzavřené, dobře odvzdušněné a hlavně dobře tepelně izolované. Je třeba jich užívat jen tam, kde je to nezbytné, neboť u těchto odlitků ztrácíme největší výhodu nízkotlakého lití a to vysoké využití nataveného kovu. [3, str. 35]

Dutiny nízkotlakých odlitků je možné vytvářet pomocí pískových jader. Při použití pískových jader je třeba dbát na to, aby vlivem zhoršeného odvodu tepla nebylo opět porušeno usměrněné tuhnutí odlitku. Dále je nutné, aby forma byla dostatečně odvzdušněna a plyn z jader mohl volně odcházet. [3, str. 35]

2. SLÉVÁRENSKÉ SLITINY HLINÍKU

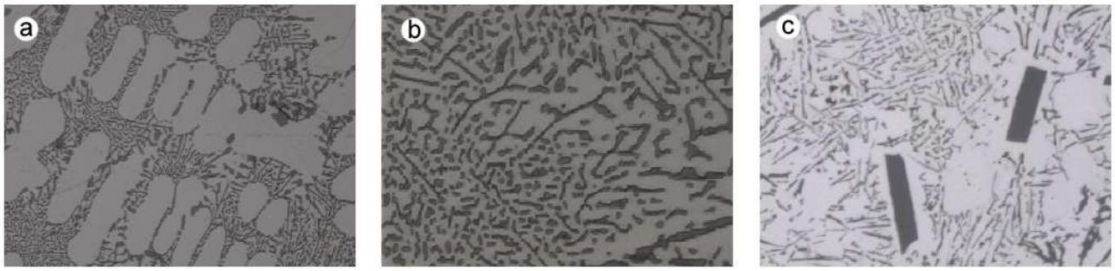
Jednou z hlavních skupin slévárenských slitin jsou slitiny hliníku s vyšším obsahem křemíku, zvané *siluminy*. Současně se vedle těchto slitin používají slitiny s přídavkem mědi, hořčíku a zinku. Tyto typy slitin se ovšem nepoužívají v takové míře jako slitiny s přídavkem křemíku. Slévárenské slitiny hliníku mají jeden společný znak. Všechny mají většinou takový obsah přidaných prvků, že obsahují eutektikum. Díky tomu mají dobrou tekutost a nízké smrštění. Slévárenské vlastnosti se s narůstajícím eutektikem ve struktuře zlepšují. Nejlepší slévatelnost vykazují slitiny čistě eutektické. Mechanické vlastnosti u většiny eutektických slitin nejsou dostatečné (příklad slitin Al-Cu, Al-Mg), a proto se častěji používají slitiny

podeutektické, u kterých je slévatelnost horší, ale za to vykazují lepší mechanické vlastnosti. [4, str. 669]

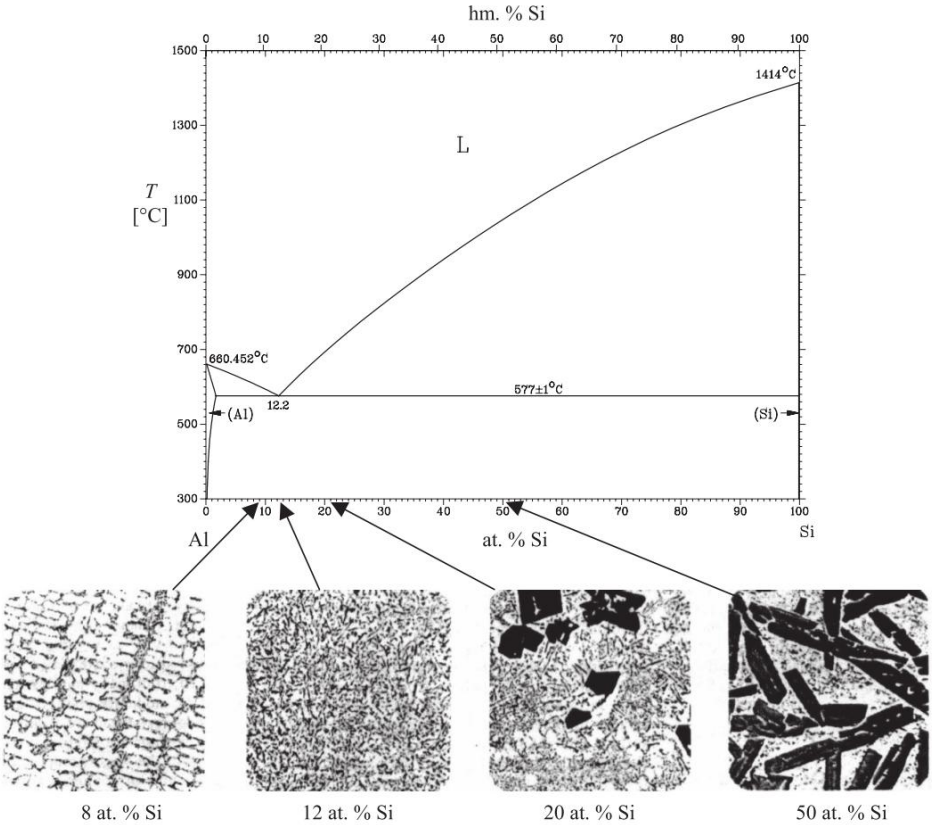
Výjimkou mezi slévárenskými slitinami hliníku je slitina Al-Si (silumin), jehož rovnovážný diagram je patrný na obr. 12. Křemík je v hliníku téměř nerozpustný a eutektikum ve slitině vzniká až při koncentraci 11,6% Si. [4, str. 670]

Slévárenské slitiny hliníku s křemíkem lze rozdělit podle obsahu křemíků do tří skupin (obr. 11.) :

- podeutektické
- eutektické
- nadeutektické

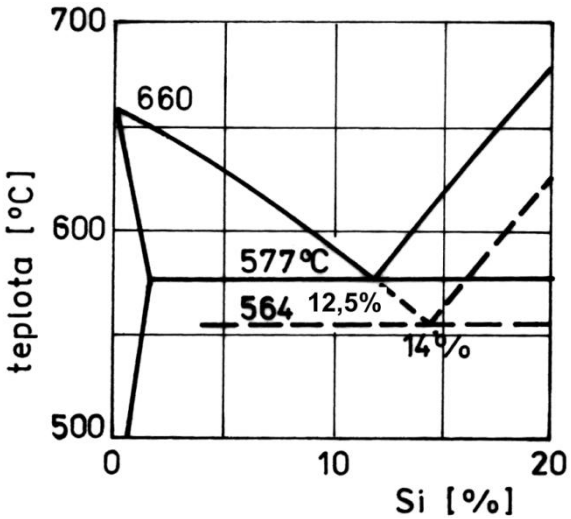


Obr. 11. a) podeutektická, b) eutektická, c) nadeutektická struktura Al-Si [5, str. 21]



Obr. 12. Fázový diagram systému Al – Si a charakteristiky mikrostruktur slitin Al – Si s různým obsahem křemíku [1, str. 186]

Křemík byl z počátku považován za nežádoucí prvek a slitiny o větším obsahu křemíku nebylo možno použít pro jeho vysokou křehkost, která je vyvolána vyloučením velmi hrubého a tvarově nevyhovujícího eutektika. Použití těchto druhů slitin bylo umožněno až po zavedení vhodných modifikačních a očkovacích prvků, které byly díky svým vlastnostem schopny měnit tvar a uspořádání křemíku ve struktuře. [4, str. 669]



Obr. 13. Posuv eutektického bodu a eutektické přímky po modifikování [2, str.30]

2.1. Tvar eutektika ve slitinách Al-Si

Křemík se ve slitině Al-Si vylučuje převážně jako čistý prvek s minimálním obsahem cizích příměsí. Částice, které se ve slitině vylučují, dosahují různých tvarů a velikostí cca (1 μm - 2 mm). Podle tvaru částic křemíku je rozdělen typ eutektika do tří skupin: [2, str. 24]

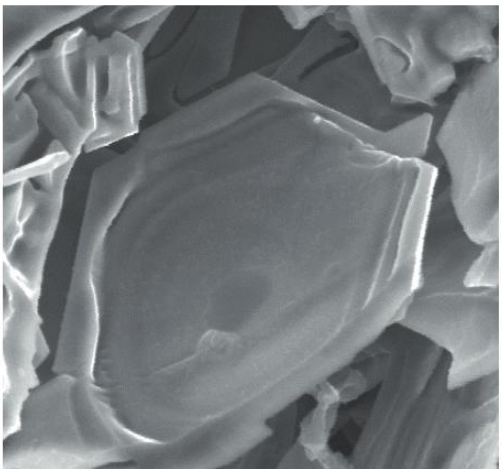
- zrnité
- lamelární
- modifikované

Krystalizace eutektického křemíku souvisí s druhem eutektika. Jako krystalizační zárodky křemíku v nemodifikované struktuře slouží různé druhy nečistot. Nejčastěji slouží jako krystalizační zárodek fosfor. Přítomnost fosforu v tavenině může mít několik příčin. Nejčastěji ze vsázkového materiálu, materiálu vyzdívky, použitých

solí a metalurgických přípravků. K vytvoření krystalizačního zárodku stačí i malý obsah v tavenině (cca 0,0001%).[2, str. 24]

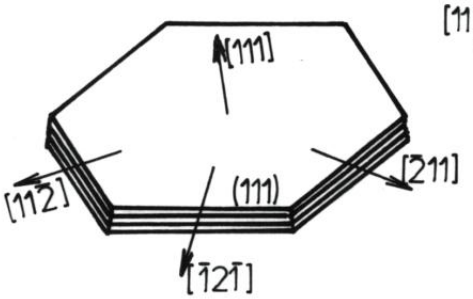
a) Zrnité eutektikum

Zrnité eutektikum vzniká při obsahu nad 0,0005-0,001% fosforu. Eutektický křemík se vylučuje ve tvaru polyedrických zrn nebo hrubých lamel (obr. 14.). Tento tvar eutektického křemíku vzniká v nemodifikovaném stavu u slitin běžné technické čistoty. [2, str. 24]

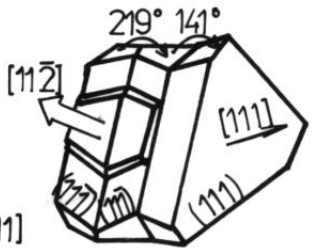


Obr. 14. Prostorový tvar hexagonální desky nemodifikovaného eutektického křemíku ve slitině Al-Si [1, str. 274]

Hexagonální desky vytvářejí prostorový skelet se společným krystalizačním centrem v rámci eutektické buňky. Růst fasetového deskového hexagonálního krystalu začíná rozvojem dvojčatových ploch v místě tupého úhlu roviny {111} a pokračuje především ve směru <211> při současném zachování tupého úhlu. [1, str. 274]



Obr. 15. Vícenásobné dvojčatění v hexagonálním krystalu [1, str. 275]



Obr. 16. Přednostní růst krystalu křemíku ve směru <211> [1, str. 275]

b) Lamelární eutektikum

Lamelární eutektikum vzniká v čitých slitinách s nízkým obsahem sodíku a fosforu cca 0,0001-0,0002%. Ke krystalizaci eutektika dochází při větším přechlazení pod rovnovážnou eutektickou teplotou. To je způsobeno sníženým množstvím krystalizačních zárodků ve slitině. K růstu částic dochází podobným způsobem, jako je tomu u zrnitého eutektika s tím rozdílem, že eutektická zrna jsou podstatně menší. Křemík u tohoto typu eutektika vytváří jemné lamely, které jsou paralelně uspořádány vedle sebe. [2, str. 25]

c) Modifikované eutektikum

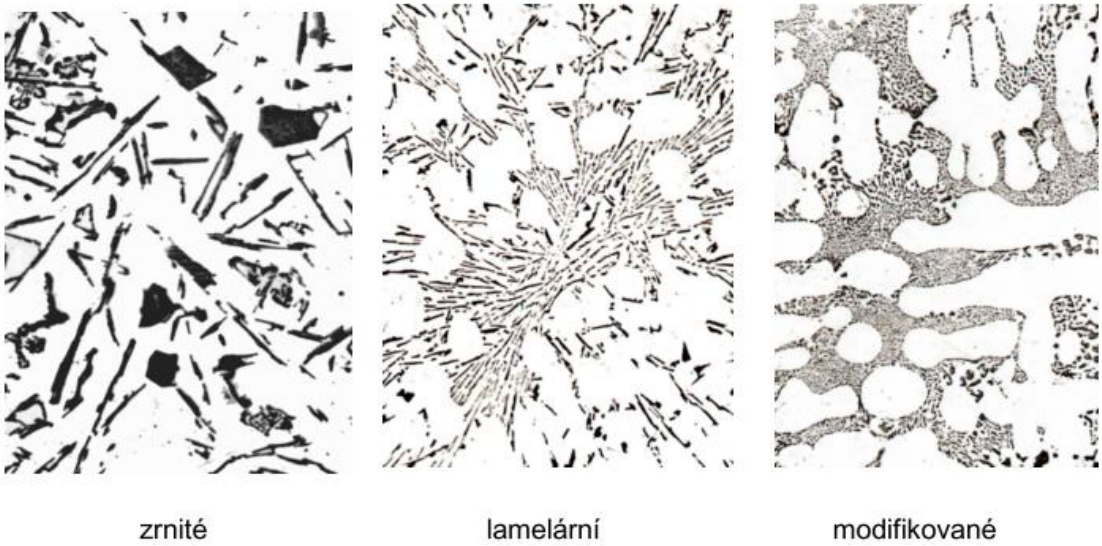
Přítomnost modifikovaného eutektika ve struktuře je způsobena modifikačními prvky, které svými vlastnostmi jsou schopny ovlivňovat výsledný tvar eutektického křemíku. Těmito prvky jsou převážně sodík a stroncium. Při porovnání účinnosti těchto dvou prvků můžeme konstatovat, že modifikační účinek sodíku je podstatně větší než u stroncia. [2, str. 25]

Sodík díky svým vlastnostem neutralizuje krystalizační zárodky fosfidu hlinitého (AlP) tak, že váže fosfor do krystalizačně neaktivních sloučenin.

$$AlP + 3\ Na \Rightarrow Al + Na3P$$

Tento jev způsobí, že krystalizace křemíku probíhá zcela jiným mechanizmem růstu, než je tomu u zrnitého eutektika. Princip, jakým modifikační prvky ovlivňují tvar eutektického křemíku, je dán jejich povrchovou aktivitou. Atomy modifikátoru blokují růstové stupně na rozhraní krystalů křemíku a taveniny a tím podporují dvojčatění útvarů křemíku. Mají velmi nízký rozdělovací součinitel, a proto jsou vytlačovány z tuhnoucích částí hliníku před frontu tuhnutí. [2, str. 25]

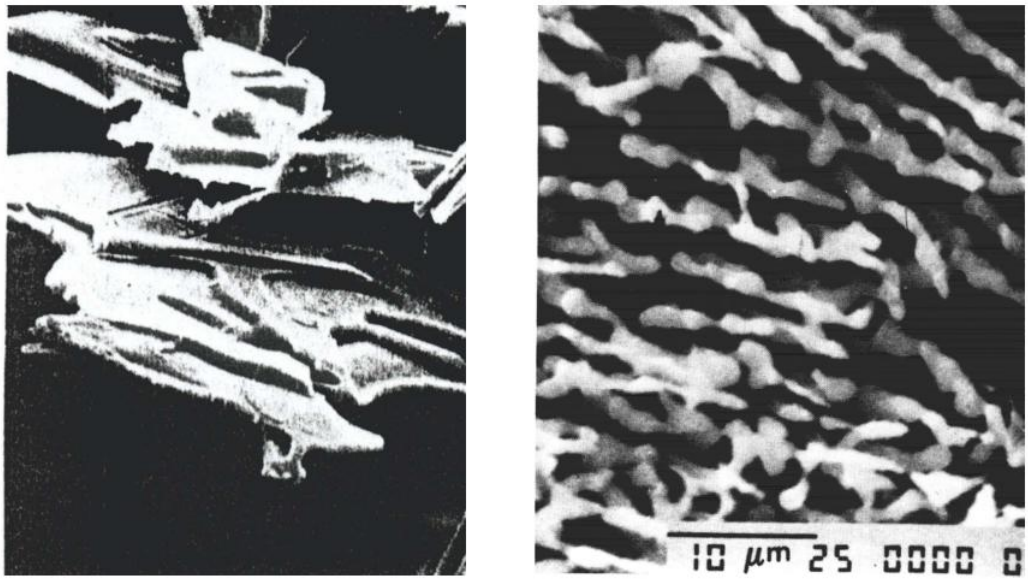
Účinek modifikátoru přímo závisí na hustotě dvojčat v částicích křemíku. Povrch krystalů křemíku je v modifikovaném stavu v důsledku rovin dvojčatění výrazně hrubý. Částice vyloučeného křemíku jsou krystalicky nedokonalé a každá krystalická vada je potencionálním místem pro další větvení. [2, str. 25]



Obr. 17. Struktura různých druhů eutektika slitiny Al-Si [2, str. 25]

Z metalografického výbrusu je patrné, že částice křemíku vyloučené v modifikovaném eutektiku připomínají svým tvarem jemná vlákna, popřípadě tečky. Díky úpravě tvaru výsledných částic křemíku dochází k nárůstu mechanických vlastností a to především tažnosti. [2, str. 26]

Optimální tvar částic křemíku lze získat i řízeným ochlazováním. Podle rychlosti ochlazování se určuje použití různých typů modifikátorů. Při vyšších rychlostech ochlazování (nízkotlaké lití) je možné použití slabšího modifikátoru (stroncia). Při odlévání objemnějších odlitků je nutné použití silného modifikačního účinku, který je možné dosáhnout pouze sodíkem. [2, str. 26]



Obr. 18 Částice křemíku v nemodifikovaném eutektiku (vlevo) a v modifikovaném eutektiku (vpravo) [2, str. 26]

3. TYPY POSTŘIKŮ, JEJICH VLASTNOSTI A ZPŮSOBY NANÁŠENÍ

Ačkoliv byla problematika lití do trvalých forem v průběhu let studována a vyvinuta, malá pozornost byla věnována prostředkům a metodám, které chrání povrch formy a ovlivňují proces tuhnutí. V současné době je to často operátor, který v průběhu licího cyklu vybere a připraví nanášený materiál. Jeho rozhodnutí je výhradně založeno na praktických zkušenostech a teoretické úvaze.

3.1. Role nátěrů a postřiků během lití

Lití do trvalých (kovových) forem umožňuje velké série identických odlitků. Na rozdíl od pískových forem, u nichž je únik vzduchu závislí na stupni zhutnění, jsou kovové formy nepropustné, a proto je nutné, aby byly vhodně umístěny větrací otvory. [6, str. 1]

Výhody trvalé formy oproti pískové:

- lepší vzhled odlitku,
- redukcece vměstků,
- větší rozměrová přesnost,
- vyšší produkce,
- nižší náklady (u větších sérií).

Ve srovnání s pískovými formami vyžaduje použití trvalých kovových forem zcela odlišné podmínky plnění kovové slitiny a její tuhnutí. Pomocí nanesené ochranné vrstvy na dutině formy můžeme regulovat procesy, jako jsou usnadnění vyjímání odlitku, ovlivnění tuhnutí a prodloužení životnosti formy. Při odlévání patří výběr povlaku a jeho nanesení ke stejně důležitým faktorům jako jsou konstrukce formy, typ slitiny, teplota kovu, atd. [6, str. 2]

Obr. 19. Forma ošetřená základním nástřikem

3.2. Funkce povlakové vrstvy

Hlavní požadované funkce povlaku jsou: [6, str. 2]

- ovlivnění schopnosti taveniny zabíhat do složitých tvarových dutin formy,
- ovlivnění času tuhnutí v různých částech odlitku (pomáhá ctít pravidlo usměrněného tuhnutí),
- jednoduché vyjímání odlitku z formy, jelikož odlitky jsou vyjímány těsně po ztuhnutí,
- dobrá drsnost povrchu odlitku,
- zvýšení životnosti a tím i produktivity formy.

3.3. Vliv povlakové vrstvy na přestup tepla

Ovlivnění rozložení teplotního pole v různých oblastech odlitku patří nepochybně k nejdůležitějším charakteristikám nanesených vrstev. [6, str. 3]

Stupeň izolace závisí na:

- vlastnostech použitých surovin,
- aplikační metodě,
- tloušťce nanesené vrstvy.

Základní složky povrchové vrstvy a jejich vlastnosti: [6, str. 3]

a) Plniva

Plniva jsou složeny převážně ze žáruvzdorných prášků, jako jsou TiO2, mastek, oxid křemičitý, oxid železa, Al2O3. Licí teplota slitin hliníku je v rozmezí 650-800°C. Žáruvzdornost dává plnivu inertní vlastnosti. To znamená, že mezi plnivem a taveninou neprobíhají žádné chemické reakce. Díky této vlastnosti má plnivo jen fyzikální význam, tj. pouze tepelnou vodivost.

b) Pojiva

Ve většině případů se jako pojivo používá křemičitan sodný v odpovídajícím poměru SiO2/Na2O. V jiných případech je možné použít určité druhy jílů, škrob, atd.

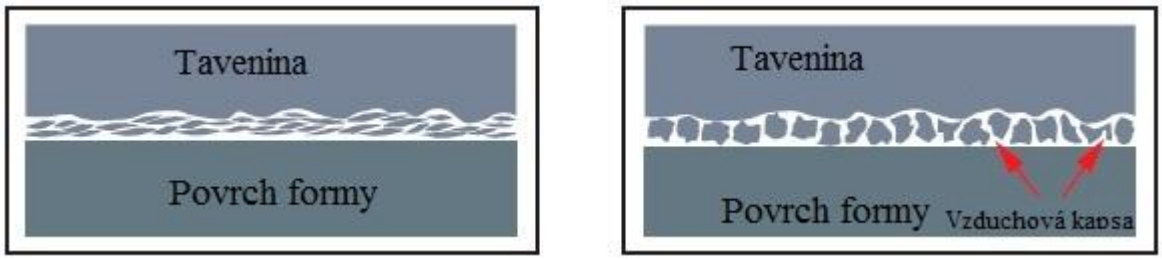
c) Voda

Stupeň zhutnění vrstvy závisí na způsobu aplikace vrstvy. Aplikace ovlivní vlastnosti tepelné izolace, je-li nekompaktní, kontakt mezi částicemi je nepatrný. To má za příčinu zvětšení propustnosti tepla a snížení izolačních vlastností. Přípravky pro ošetření povrchu formy jsou dodávány ve formě past. Tyto pasty jsou ředěny vodou v závislosti na typu aplikace. Pro aplikaci se používají štětce nebo nástřiky. Ředící poměr je relativně nedůležitý, jelikož přebytek vody se odstraní pomocí akumulovaného tepla ve formě. Potřebnou úroveň izolace získáme nanesením více vrstev na povrch formy. Nanášecí teplota se způsobem nanášení liší. Pro aplikaci kartáčkem je teplota stanovena na 120-140°C. Při použití nástřiku je teplota povrchu stanovena na 150-180°C. [6, str. 3]

3.4. Aplikační metody

a) Štětec, kartáč

Aplikace pomocí štětce vytváří nesouvislý a hrubý povrch nekonstantní tloušťky. Takový povrch má tu hlavní výhodu, že na jeho povrchu jsou uchyceny vzduchové kapsy. Tento jev má za následek vysoký stupeň izolace. Přednosti takového povrchu se využívají v místech, kde je nutná vysoká tepelná izolace, jako jsou například nálitky a vtokové soustavy. [6, str. 4]

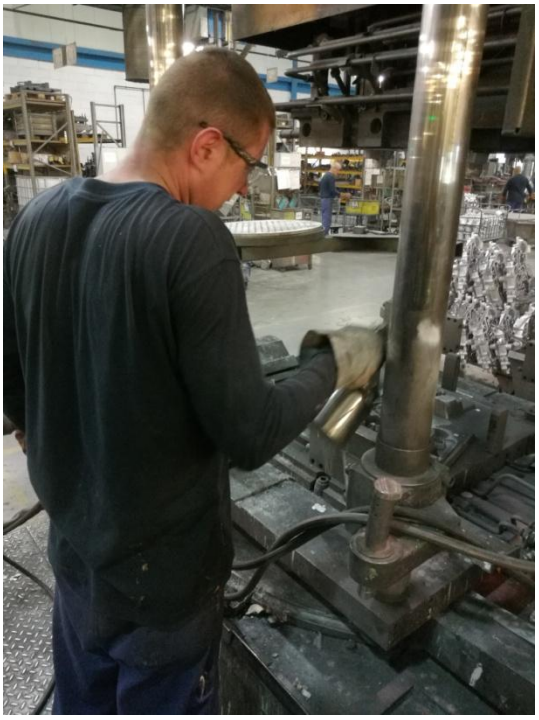


Obr. 20. Rozdíl mezi hladkým a drsným povrchem[6, str. 6]

b) Stříkání

Při stříkání se používaný materiál nanáší v několika tenkých vrstvách, dokud není dosažena požadovaná tloušťka. V tomto případě vrstva rovněž obsahuje vzduchové bubliny, ale ty jsou mnohem menší než v předchozím případě. Díky nanesení konstantní vrstvy nástřiku jsou bubliny rovnoměrně rozmístěny a to nám způsobuje konstantní odvod tepla z ošetřené oblasti. [6, str. 4]

Při nanášení postřiku pomocí stříkací pistole je nutné dodržovat předepsané parametry. Tlak vzduchu a vzdálenost pistole od povrchu formy musí být dostatečná, aby bylo možné eliminovat vypaření částí směsi a umožnit ulpění nástřiku na povrchu formy. Pomocí experimentu byla stanovena optimální vzdálenost mezi tryskou a povrchem formy na 25-30 cm a pracovní tlak vzduchu 0,4 – 0,5 MPa. [6, str. 4]



Obr. 21. Nanášení postřiku stříkáním

3.5. Řízení toku kovu

Jelikož ulpělá vrstva povlaku je tenká (50 – 150 µm) a teplotní rozdíl mezi taveninou a stěnou formy se pohybuje mezi 300 – 400°C, je tepelná vodivost relativně vysoká a přenos tepla z taveniny do formy okamžitý a intenzivní. Fyzikální vlastnosti nanášené vrstvy mají výrazný vliv nejen na povrch a kvalitu odlitku, ale také na tečení kovu a na stupeň izolace. Z tohoto tvrzení lze usoudit, že pokud je povrch, který má dostatečný kontakt s tekutým kovem, zvyšuje se přenos tepla mezi taveninou a povrchem formy. Na základě toho se snižuje tekutost. To může mít za následek nedokonalé naplnění formy (tzv. nezaběhnutí materiálu). [6, str. 5]

Při nanesení nástřiku nedochází ke přímému kontaktu mezi tekutým materiálem a povrchem formy. Hrubý povrch formy způsobený nástřikem a povrchové napětí tekutého kovu nám napomáhá k výraznému snížení kontaktu mezi kovem a nástřikem. Výsledkem tohoto jevu je snížení teplotních ztrát na minimum a kov se díky tomu ponechává svou tekutost i při kritickém momentu. Hrubé nátěrové hmoty s ostrými hranovými částicemi mají tendenci se v průběhu lití obrušovat. Z tohoto důvodu je nutné nástřiky po určitém taktu obnovovat. [6, str. 5]

3.6. Snadné vyjímání odlitků

Bez ohledu na složitost formy se pro usnadnění vyjímání odlitků používají grafitické nástřiky. Grafit může být použit buď jako součást nástřikové základny, nebo také i jako nástřik sám. Je-li použit grafit v kompozici s ochranným nástřikem, je třeba dbát na to, aby nedošlo k oslabení základního nástřiku a jeho následné oloupnutí. Pokud je základní nástřik narušen, má tendenci ztrácet své tepelně izolační vlastnosti. Kompozitní izolační a grafitické nástřiky se často používají v místech, kde je riziko problémového uvolnění nebo tam, kde jsou pohyblivé součásti formy (jádra). Složení základního nástřiku je nutné důkladně kontrolovat, jelikož v případě, že pojiva budou tvořit tvrdou skořepinu okolo každé částečky grafitu, bude mazací účinek snižovat svou účinnost či úplně zmizet. Po uplynutí určitého počtu cyklů je nutné grafitické nástřiky obnovovat. V důsledku neustálého tření mezi kovem a formou, způsobené smršťováním v průběhu tuhnutí dochází k jeho odírání. Díky mazacímu účinku grafitického nástřiku je tření, způsobené smrštěním materiálu, minimální a tím se zvyšuje životnost termoizolačního nástřiku i samotné formy. [6, str. 7]

3.7. Kvalita povrchu odlitku

Kvalita povrchu se odvíjí od zvoleného typu nástřiku. Podle tvarové složitosti formy jsou identifikována místa, kde je potřebná tepelná izolace (nálitky, vtokové soustavy) a místa, kde hrozí riziko zadření. Podle místa určení se volí vhodný typ nástřiku. Pro vtokové soustavy a nálitky, kde je prioritou tepelná izolace, není vzhled povrchu důležitý. Povrch těchto míst je hrubý. Naopak u míst, které se po odlití již dále nezpracovávají, je povrch důležitý. Na tato místa se volí jemné nástřiky. [6, str. 10]

3.8. Faktory ovlivňující životnost nástřiku

Hlavní faktory, které ovlivňují výslednou životnost nástřiku jsou:

- typ použitého pojiva,
- způsob aplikace,
- typ základového žáruvzdorného materiálu.

Pojivo v nástřikové vrstvě nemusí odolávat jen vysokým teplotám, ale také vysokým teplotním změnám. Ty nám způsobují tahová napětí v povrchové vrstvě.

Velmi často se používá směs Na2O / SiO2, neboť odolává nejen teplotním skokům, ale v průběhu doby vykazuje vyšší odolnost vůči vysokým teplotám. Díky tomu je tento typ ochranné vrstvy dlouhotrvající.

Jak již bylo uvedeno na začátku, způsob nanesení ochranné vrstvy má zásadní vliv na její výsledné vlastnosti. Dalším neméně důležitým faktorem je aplikační teplota. Teplota podkladového materiálu ovlivňuje výslednou skladbu ochranné vrstvy. Pokud je teplota příliš nízká, odpařování vody z nanášené směsi není dostatečné a na povrchu se vytváří nepropustný povlak. Tento nepropustný povlak způsobí, že zachycená, dosud neodpařená voda, se začíná vypařovat a tvořit pod nanesenou vrstvou bublinky plynu. To má za následek odlupování nanesené vrstvy a její degradaci. Pokud je teplota příliš vysoká, odpařování vody je příliš intenzivní. Následkem toho se žárovzdorný materiál, který je dosud obklopen vodním filmem při dosednutí na povrchu od tohoto povrchu, odděluje. Oddělení neneseného materiálu je způsobeno drobnými explozemi, které vznikají při kontaktu s přehřátým povrchem. Výsledkem je slabá a hrubá vrstva, která se snadno odlupuje [6, str. 12]

3.9. Příprava povrchu před nanesením povlaku

Základní požadavky na vyčištěný povrch jsou: žádné zbytky předešlého nátěru, odstranění mastnoty a sazí. Čištění povrchu lze provádět pomocí drátěného kartáče, tryskáním pískem nebo ocelovými broky. V poslední době byly vyvinuty systémy čistění suchým ledem, které umožňují tryskání na místě, aniž by bylo nutné demontovat tryskanou formu z rámu. Mezi nevýhody tohoto způsobu čistění patří vysoký hluk při provozu zařízení, problémové čištění hlubokých částí forem a nedokonalé očistění všech druhů nátěrových hmot. [6, str. 10]

3.10. Teplota

Formy pro nízkotlaké lití obecně pracují při teplotách kolem 300-400°C. Taková teplota je pro nanášení ochranných postřiků příliš vysoká. Při uvádění formy do

provozu je nutné dodržovat jistý teplotní průběh. Po nanesení ochranné vrstvy na povrch je možné další navyšování teploty na její provozní hodnotu. Během tohoto ohřevu dochází i k vytvrzení nanesené vrstvy. [6, str. 20]

Během provozu je možné, že některé místa formy budou vyžadovat opravu nanesené vrstvy. Tato operace musí být provedena na provozní teplotě a je třeba dodržet předepsaný postup. [6, str. 20]

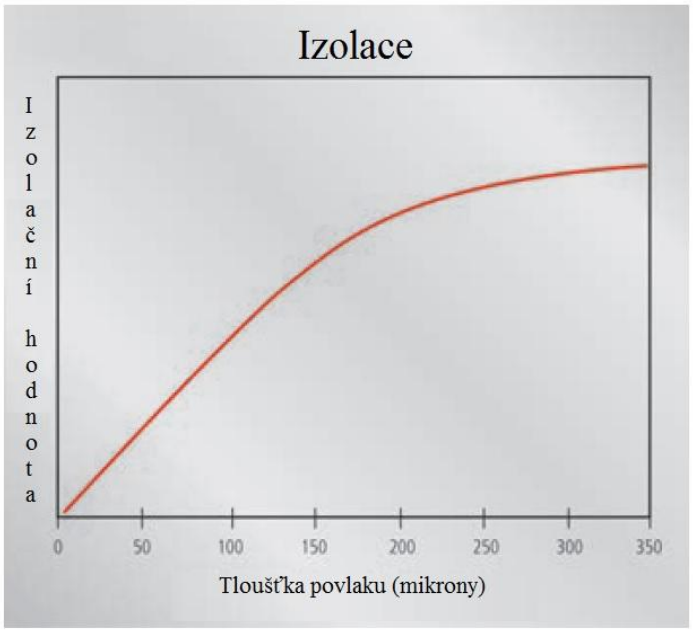
Jak se zvyšuje teplota aplikace, adheze se snižuje. Proto by teplota formy měla být přesně určena bezkontaktním pyrometrem. [6, str. 20]

Obr. 22. Bezkontaktní pyrometr

3.11. Tloušťka naneseného povlaku

Tloušťka nanesené vrstvy musí být definována a kontrolována na základě požadovaného izolačního stupně. Tloušťky 50-150 µm (viz obr. 23.), jsou postačující pro získání maximálního stupně izolace typické pro nástřikový systém aplikace. Pro nálitky a vtokové soustavy jsou prostředky aplikovány pomocí štětce a lze u tohoto způsobu dosáhnout tloušťky až 4-5 mm. Tloušťka povrchové vrstvy je hlavním faktorem v oblasti výměny tepla mezi tekutým kovem a formou. Při nedbalém nanášení povlaků na předchozí povlaky dochází ke kumulování nanesených vrstev. Negativní důsledky takového jednání se projevují změnou tloušťky, špatnou těsností formy a výskytem nepředvídaných teplotních uzlů v odlitku. Vliv tloušťky povlaku

na plnící schopnosti je znázorněn na obrázku, který poukazuje vliv na tekutost. [6, str. 19]



Obr. 23. Zvyšování izolační hodnoty

3.12. Způsoby skladování nástřikových směsí

Skladování a prostor, ve kterém jsou nástřikové směsi míchány a skladovány jsou životně důležité pro získání optimálních vlastností povlaku. Směsi musí být skladovány a připravovány v uzavřených a suchých místech, která nejsou vystavena přímému slunečnímu záření. Povlaky jsou velice citlivé na mráz. Musí být skladovány při teplotě okolí (10-25°C). Skladování při stabilní teplotě zajistí konstantní viskozitu a hustotu směsi. Příliš vysoká teplota vede ke změnám viskozity a zrychlení biodegradace. Příliš nízká teplota změní viskozitu směsi a její použití není možné. Pořadí, ve kterém se uskladněné směsi spotřebovávají, určuje jejich stáří. Datum, které určuje dobu garantované kvality směsi je uvedeno na obalu příslušných směsí a podle jejich druhu se životnost mění. [6, str. 14]

3.13. Příprava směsí

Správné míchání a příprava směsi je nezbytné pro zajištění správné hustoty, pro získání optimálních vlastností a reprodukovatelnosti. Prostor přípravy a uložení

směsí by měl být od okolního provozu závodu oddělen. Pro pečlivé namíchání směsi je nutné použití vhodného míchacího zařízení. Takové zařízení nám zajišťuje rovnoměrné naředění směsi na požadovanou hustotu. [6, str. 13]

Postup směšování: [6, str. 14]

- 1/3 až 1/2 míchacího kontejneru naplnit vodou,
- spustit mixér,
- postupně přidávat určité množství pasty až do vytvoření husté pasty, bez hrudek,
- jakmile má směs jednotný vzhled, zvýšíme množství vody na požadovanou hustotu pro danou aplikaci.

Výsledný produkt směšování je nutné uskladnit do uzavřené nádoby, ve které bude směs permanentně míchána za stabilní teploty.

Důvody těchto opatření jsou následující. Nádobu je nutné uzavřít, jelikož dochází k neustálému odpařování vody ze směsi a to by mělo za následek změnu hustoty směsi. Permanentní míchání je důležité z hlediska toho, že těžší částice směsi klesají ke dnu nádoby a způsobují nehomogenitu směsi.

Díky těmto opatřením je možné prodloužit životnost přípravků, přesto po určité době se v nádobě tvoří biologické usazeniny. Tyto usazeniny je nutné odstranit. [6, str. 14]

3.14. Kontrola kvality postřiku

a) Hustota

<u>Metoda Baumé</u> [6, str. 14]

Stupně Baumé je měrná jednotka určující hustotu kapalin. Systém měření vychází ze skutečnosti, že voda má 0°Bé a kyselina sírová s koncentrací 98% má 66° Bé.

Metoda hustota / objem [6, str. 14]

Měření hmotnosti a objemu materiálu.

Obr. 24. Pomůcky pro určení hustoty

Obr. 25. Hustoměr s racionální stupnicí Baumé [6, str. 15]

b) Pevný obsah

Suchý obsah [6, str. 15]

Odvážené množství směsi se suší v sušárně a znovu se zváží. Suchý zbytek je procentní poměr konečné hmotnosti a počáteční hmotnosti.

3.15. Podmínky aplikace nástřiku stříkáním

V zásadě existují dva různé typy stříkacích zařízení: [6, str. 16]

a) Nasávací pistole (obr. 26.) využívá stlačený vzduch pro vytvoření podtlaku, který způsobuje, že roztok prochází přes tělo pistole až do trysky. V ústí trysky dochází k transformaci roztoku do malých kapiček.
b) Air-less systems (obr. 27), čerpání směsi probíhá za vysokého tlaku přímo do pistole, kde je protlačena skrz trysku a poté rozprášena expanzí.

Obr. 26. Nasávací pistole (rosenka)

Obr. 27. Air – less systems

Operace, které musí být provedeny k zajištění povlaku, odpovídající kvality jsou: [6, str. 17]

- Nanášecí pistole musí být vždy zcela čistá a to zejména výstupní tryska.
- Nádržku aplikační pistole naplnit jen potřebným množstvím směsi. Přebytečnou směs je nutné vrátit zpět do udržovací nádrže. Příliš dlouhá výdrž ve stacionární poloze může způsobit nehomogenitu směsi.
- Nastavení tlaku v potrubí na 0,4 – 0,5 MPa (v závislosti na zředění směsi). Příliš vysoký nebo příliš nízký tlak způsobuje nežádoucí velikost kapek.
- Před začátkem aplikace nástřiku na formu je nutné aplikovat zkušební nástřik mimo formu na zkušební desku a tím ověřit správné fungování nástřikové pistole. Před a během aplikace je nutné držet pistoli v neustálém pohybu.
- Při aplikaci nástřiku je nutné dodržovat předepsanou vzdálenost mezi pistolí a formou. Podle zkušeností a provedených zkoušek byla tato vzdálenost stanovena na 20-30cm.
- Při aplikování směsi je nutné pracovat rychle a opatrně, jelikož každý průchod způsobuje ochlazení formy.
- Pokud je aplikační vzdálenost příliš krátká (>20cm) povlak má tendenci zvyšovat svou tloušťku. To má za následek pomalé zasychání a může způsobovat skvrny na odlitcích.

- Pokud je aplikační vzdálenost příliš dlouhá, část vody se vypaří a na povrch formy dopadne jen suchý prášek. Výsledná vrstva má minimální přilnavost a dochází ke snadnému odlupování.
- Je výhodné aplikovat povlak ve více tenčích vrstvách než v jedné silné. Mezi aplikacemi jednotlivých vrstev je nutné dodržet dané přestávky, aby podkladový povlak dostatečně zaschl.
- Operátor by měl aplikovat nástřik z několika různých úhlů, čímž se zabrání stínovému efektu.

3.16. Kontrola tloušťky povlaku

Tloušťka povlaku je velmi obtížně zjistitelný parametr, jelikož provozní a aplikační teploty jsou na formách příliš vysoké. Existují dva způsoby, jak tloušťku povlaku změřit. Přístroj Elcometer 157 je mechanický tloušťkoměr tužkovitého tvaru (obr. 28.). Tento magnetický tloušťkoměr měří tloušťky nemagnetických povlaků (práškové barvy, epoxidy, galvanické povlaky) na magnetickém podkladu (uhlíková ocel, litiny nerezová ocel, železo). Tento typ tloušťkoměru je možné použít i za vysokých teplot. Hlavní nevýhodou tohoto přístroje je jeho krátká životnost a poruchovost. [6, str. 19]

Obr. 28. Elcometer 157 [6, str. 19]

Obr. 29. PosiTector 6000 [7]

Druhým přístrojem na měření tloušťky je přístroj PosiTector 6000 (obr. 29.). Tento plně elektronický přístroj měří tloušťky povlaků feromagnetických i neferomagnetických kovů, využívá magnetického měření a princip vířivých proudů. Přístroj vyniká svou okamžitou použitelností. Není nutné žádné kalibrování. Hlavní nevýhoda tohoto přístroje je maximální použitelná teplota. Ta se u některých typů sond udává až do teploty 250°C. Tato teplota by zpočátku byla dostačující, jelikož aplikační teplota nástřikové směsi je cca 180°C. Problém nastává v době, kdy forma jede v nepřetržitém provozu, kde se její teplota pohybuje kolem 400°C. V tomto případě by bylo nutné formu ochladit na provozní teplotu přístroje a poté znovu zahřát. [6, str. 19]

3.17. Lokální čištění formy pomocí CO2

Technika známá jako " kryogenní " otryskávání (obr. 30.) se provádí vrháním pelet pevného oxidu uhličitého (suchého ledu) na znečištěnou oblast formy. Neabrazivní suchý led odstraňuje povlak bez poškození a bez opotřebení formy. Pelety oxidu uhličitého po zasažení povrchu formy sublimují (přecházejí do stavu par) bez vytváření usazenin nebo zvlhčení formy. Ztráta teploty formy je velmi omezená a je možné v krátkém čase nanést novou vrstvu nástřiku.

Obr. 30. Kryogenní tryskací zařízení

Tento systém se stále častěji využívá, jelikož úspora času je nezanedbatelná. Hlavní výhodou tohoto způsobu je to, že forma může být vyčištěna přímo na odlévacím stroji, což snižuje čas prostoje. Nevýhodou je, že povlaky s dlouhou životností mohou být touto technikou obtížně odstranitelné. [6, str. 26]

4. NUMERICKÉ SIMULACE SLÉVÁRENSKÝCH PROCESŮ

Z teoretického hlediska může být slévárenský proces považován za součet různých kroků: [8, str. 5]

- plnění dutiny formy pomocí roztavené slitiny, jak je popsáno zákony o dynamice tekutin (Navier-Stokesova rovnice, aj.),
- tuhnutí a chladnutí slitiny podle zákonů o přenosu tepla (Fourierova rovnice),
- transformace v pevném stavu, která souvisí s termodynamikou a kinetikou, jak je popsáno fyzikální metalurgií.

Konečné vlastnosti (geometrické, fyzikální, mechanické, mikrostrukturální) odlitku jsou přímým výsledkem různých kroků procesu. Při kontrole těchto kroků lze výše uvedené vlastnosti optimalizovat. Diferenciální rovnice popisují takové jevy, které jsou dobře známy a umožňují vyhodnotit hmotnostní, hybnostní a teplotní funkce v čase a prostoru. Řešení rovnic Navier-Stokes (dynamika tekutin) a Fourier (přenos tepla) se stává stále složitější, protože složitost geometrie a požadovaná úroveň přesnosti se zvyšují. [8, str. 5]

V zásadě lze říci, že hlavní kroky slévárenského procesu mohou být popsány pomocí matematických přístupů s různou složitostí. Spolehlivost této fyzikálně - matematické analýzy je významně spojena s přesností přijatou pro definování počátečních a okrajových podmínek a znalostí použitých materiálů. [8, str. 5]

Prostřednictvím hraničních podmínek musí být vzaty v úvahu základní parametry, jako je teplota lití, surová hmotnost a konfigurace formy (vtoky, podávače, jádra atd.). [8, str. 5]

Pokud jde o materiálové vlastnosti, je třeba vědět nebo odhadnout: [8, str. 5]

- pro slitinu: teplota liquidus a solidus, jako funkce teploty, viskozity, hustoty, tepelné vodivosti a difuzivity,
- pro formu (a pro jádra): tepelné vlastnosti a případně vlastnosti chlazení / chladicího systému,
- koeficienty přenosu tepla mezi slitinou a formou.

Geometrická složitost odlévání a počet použitých proměnných velmi komplikující analytický popis plnění forem, ztuhnutí a ochlazování slitiny. Tento problém je překonán dostupností výkonných počítačů, které dokážou pomocí vhodných numerických metod kalkulovat systémy s miliony diferenciálních rovnic. Tento přístup je založen na modelech získaných metodou diskrétní reprezentace (CV - kontrolní objemy, FE - konečné prvky, FD - konečné rozdíly nebo jiné). [8, str. 6]

Geometrie, která má být analyzována, je správně rozdělena podle pravidel v závislosti na přijaté metodě do velmi vysokého počtu svazků (tzv. "Meshů"), které mají zjednodušenou geometrii (např. kubickou nebo tetragonální). Podmínky stanovené integrálními a diferenciálními rovnicemi, které řídí úlohu, jsou uloženy s odkazem na konečný počet bodů souvisejících s takovým rozdělením. [8, str. 6]

Přesnost výsledku závisí jak na použitých algoritmech, tak i na přesnosti použité při vytváření sítě (tedy na počtu zpracovaných rovnic). Pomocí výpočtů, které mohou být také velmi náročné, lze dosáhnout skutečně přesných výsledků. [8, str. 6]

Ve skutečnosti je možné vypočítat fluidní dynamiku, tepelné pole systému odlévání a formy. V důsledku toho je možné okamžitě poznat chování taveniny při plnění, tuhnutí a ochlazování odlitku. [8, str. 6]

Přesnost a spolehlivost analýzy významně souvisí s přesností při definování výše uvedených okrajových podmínek (teplota odlévání, velikost odlitku, konfigurace formy, přísady, systém odvzdušnění apod.) a se znalostí vlastností použitých materiálů všech částí systému. [8, str. 7]

V důsledku toho je zřejmé, že po monitorování plnění formy, tuhnutí a chladnutí odlitku jsou k dispozici všechny informace potřebné pro vyhodnocení metalurgické

kvality odlitku. Na jedné straně, studie tekutinové dynamiky systému umožňuje detekci vad způsobené nesprávným plněním formy, na druhé straně, existuje také možnost korelace některých tzv. "parametrů tuhnutí ", které zásadně ovlivňují mikrostrukturální vlastnosti odlitku. Mezi tyto parametry by se mělo vzít v úvahu: [8, str. 7]

- místní čas tuhnutí, užitečný pro individualizaci "tepelných uzlů" souvisejících s charakteristikami dendritických struktur,
- okamžitá míra ochlazování, která v ukazateli rychlosti tuhnutí ovlivňuje konečnou velikost zrna,
- maximální teplotní gradient na konci tuhnutí,
- orientace izotermů ve směru tepelného gradientu, která udává rychlost tuhnutí.

Možnost zobrazení kritických oblastí odlitku poskytuje základní informace pro validaci a využití samotného odlitku. To je klíčový faktor pro úspěch simulačních softwarů obecně. To znamená, že výše popsané numerické modely mohou být použity: [8, str. 7]

- v diagnostice, určení a porozumění příčiny vad v odlitku a navrhování možných úprav,
- v predikci, pro prioritní vyhodnocení charakteristik a potenciálu procesu slévárenství, dává rozhodující podporu pro konstrukci a licí systém, jakož i optimalizaci samotného procesu.

Z vědeckého i technologického hlediska je vývoj výpočetních algoritmů, určených pro simulaci slévárenských procesů, kontinuální.

Faktory, které jsou klíčové ve vývoji simulace procesu: [8, str. 8]

- snížení nákladů na výpočetní techniku,
- snížení nákladů na software,
- lepší výkon, spolehlivost a uživatelsky přívětivý přístup k softwaru,
- snížení pracovní doby pro sestavení modelu a následný výpočet,

Evoluce v této oblasti je dobře popsána časopisem *Metals*, který pravidelně zvyšuje inovativní znalosti. V roce 1992 bylo konstatováno, že numerické simulační techniky pomalu, ale neustále zvyšují jejich význam ve slévárnách. Mění se z akademického nástroje na praktický průmyslový nástroj věnující se jak diagnostice procesů, tak designu. [8, str. 8]

Nedávno bylo zveřejněno, že významná část aplikovaného výzkumu ve slévárně je věnována vývoji a použití výpočetních technik při studiu fenoménu tuhnutí.

Zdá se tedy, že tento trend velmi jasně ukazuje, že používání algoritmů pro simulaci slévárenských procesů bude mít stále důležitější roli. Tím se stane základní strategií pro slévárny za účelem poznání potenciálu tohoto silného konstrukčního nástroje. [8, str. 8]

5. PRINCIP EXPERIMENTU A POPIS MĚŘÍCÍHO ZAŘÍZENÍ

Obsahem praktické části této diplomové práce je řešení zadaného projektu společností BENEŠ a LÁT a.s. a to konkrétně v oddělení výrobní technologie závodu Z02 v Poříčanech. Cílem zadaného projektu je korekce vstupních údajů pro simulační software $MAGMA_5$, a to zejména zjištění hodnoty koeficientu přestupu tepla mezi taveninou a stěnou formy.

Jako první úkol bylo nutné najít vhodnou měřící metodu, kterou by bylo možné implementovat na zadaný úkol. Jak již bylo zmíněno v úvodu této diplomové práce, celé měření bylo nutné, co možná nejvíce přiblížit standardnímu výrobnímu procesu.

Základy celého experimentu jsou postaveny na principu přestupu tepla přes etalonový váleček. Metoda je založena na měření tepelného toku z lineárního zdroje tepla. U této metody se obvykle používá jako zdroj tepla elektrická energie, která je dodávána na tenký kovový drát, který je umístěn ve vzorku a slouží jako konstantní zdroj tepla.
Hustota tepelného toku je dána vztahem:

$$Q = \frac{q}{A} \left[\frac{W}{m^2}\right] \qquad (1)$$

Pro výpočet tohoto vztahu je nutné znát hodnotu tepelného toku uvnitř válečku "q". Ta je dána vztahem:

$$q = \frac{\lambda_{etalonu}}{l} . (T1 - T2) \ [W] \qquad (2)$$

q - tepelný tok [W]

Q - hustota tepelného toku [W/m^2]

A - plocha, na níž tok kolmo prochází [m^2]

l - vzdálenost mezi termočlánky [m]

T1, T2 - teplota [K]

$\lambda_{etalonu}$ - součinitel přestupu tepla [W/m^2K]

Pomocí rovnic 1 a 2 je možné odvodit příslušný vztah pro výpočet tepelné vodivosti postřiku.

$$\lambda = \frac{Q \cdot t}{\Delta T} \qquad [W/m^2K] \quad (3)$$

t - tloušťka naneseného povlaku

ΔT - rozdíl teplot pod nanesenou vrstvou a taveninou

Tato metoda je použitelná pro široké spektrum materiálů. Všestrannost a přesnost této metody byla hlavní motivací pro použití právě tohoto principu.

Hlavní změny, které byly provedeny, spočívaly v celkové změně designu měřící aparatury. Z důvodu implementace měření na výrobní proces ve slévárně, nabylo měřící zařízení tvaru jednoduché formy, kde jako konstantní zdroj tepla sloužila tavenina a měření teploty zajišťovala měřící stanice WIS (viz kapitola 5.5.).

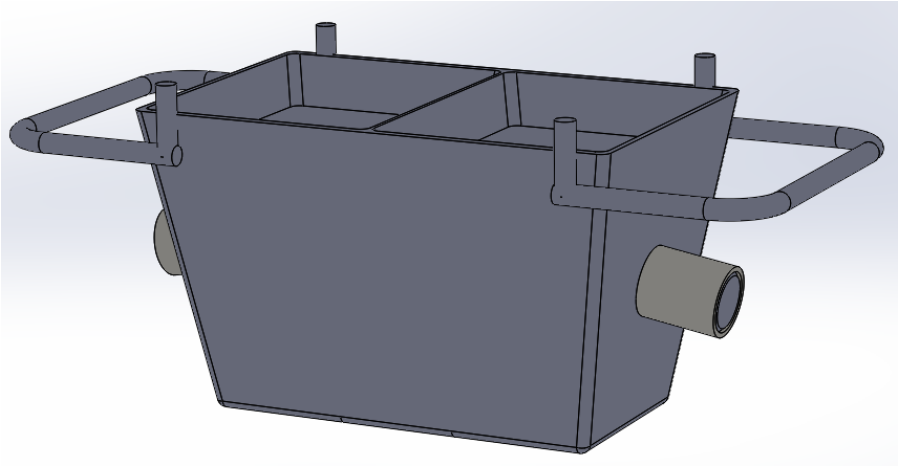
5.1. Konstrukce měřícího zařízení

Zkušební aparatura byla konstruována tak, aby byly dodrženy veškeré normami udávané konstrukční a technologické podmínky (úkosy, zaoblení, atd.). Pro jednoduchou výrobu byla zvolena základní konstrukce, tvarem připomínající pravidelný čtyřboký komolý jehlan. Pro efektivnější měření byl zvolen dvojkomorový typ formy. Díky tomu bylo možné provádět měření u dvou různých kombinací postřiků současně. Zkušební forma byla pro lepší manipulaci opatřena po stranách úchytovými madly. Z důvodu efektivnějšího vyjímání odlitku z formy, byly na vrchní část formy umístěny podpůrné růžky. Ty nám dávaly tu možnost, že v případě zaseknutí odlitku ve formě, mohlo být použito mechanického rázu pro jeho uvolnění.

Jako materiál formy byla zvolena nelegovaná jakostní konstrukční ocel S235JR (ČSN EN 10025-2/04). Tato ocel byla zvolena pro svou dobrou zpracovatelnost a to hlavně pro dobrou svařitelnost. Díky jejím vlastnostem nebylo nutné používat žádné speciální vybavení. Výpis z chemické analýzy (P1) a kompletní výkresová dokumentace formy (P4) je k dispozici v příloze této práce.

Pro měření teplot bylo vytipováno cca 6 oblastí vhodných pro měření. Ty byly postupně redukovány, buď pro své nevhodné umístění, nebo pro složitost výroby. Ve výsledku byly určeny dvě oblasti vhodné pro umístění termočlánků.

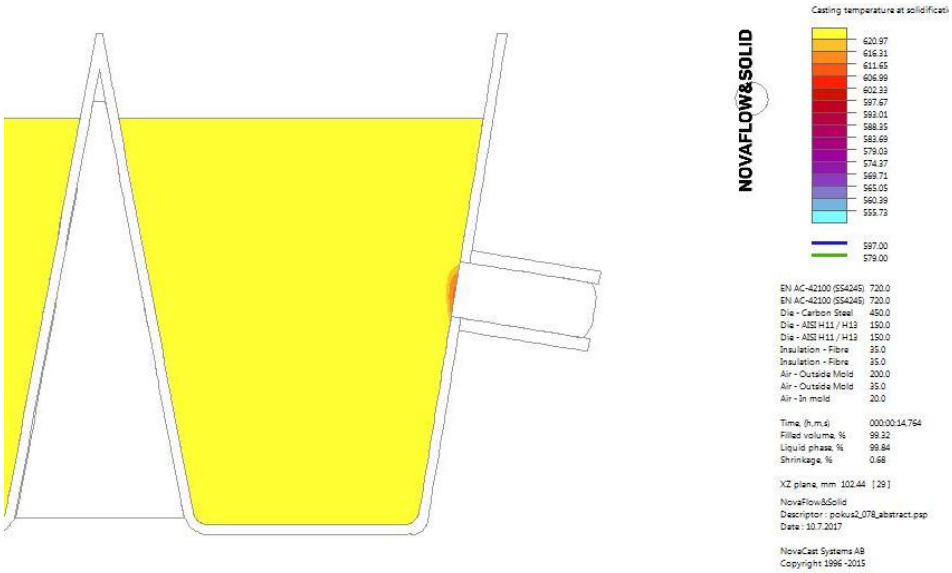
Měření v daných oblastech bylo zajištěno dvojicí rozměrově daných válečků. Tyto válečky byly zhotoveny z korozivzdorné oceli a sloužili jako etalonový materiál. U tohoto materiálu bylo známo jak chemické složení, tak i fyzikální vlastnosti. Chemické složení etalonového materiálu (P2) je k dispozici v příloze této práce.



Obr. 31. 3D model měřící formy

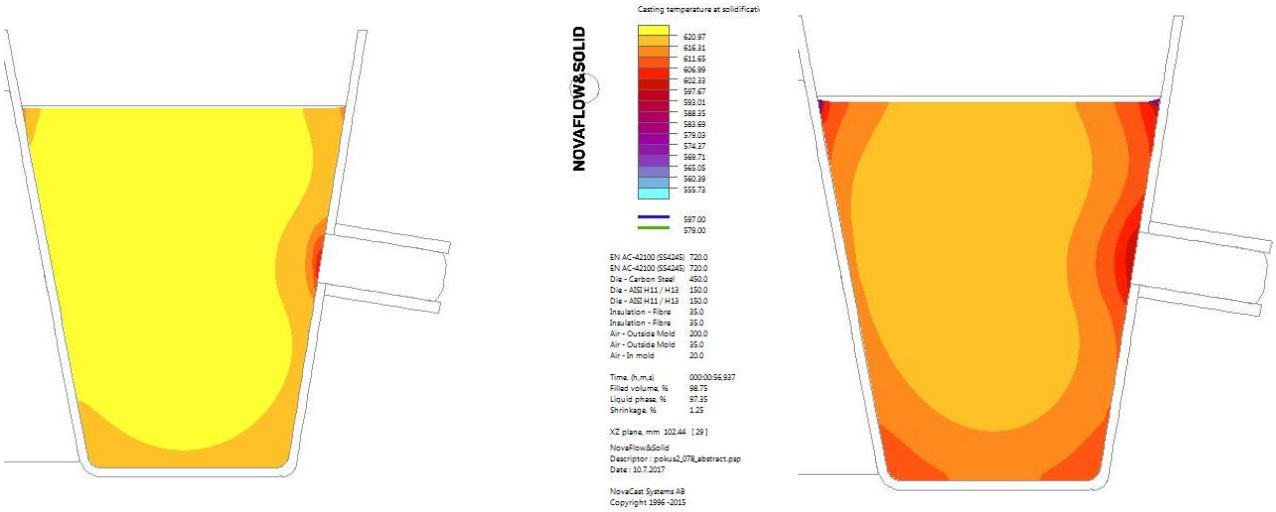
5.2. Simulace tuhnutí a teplotní pole zkušební formy

Pro lepší představu o průběhu tuhnutí a pro potvrzení správného umístění termočlánků, byla provedena simulace.



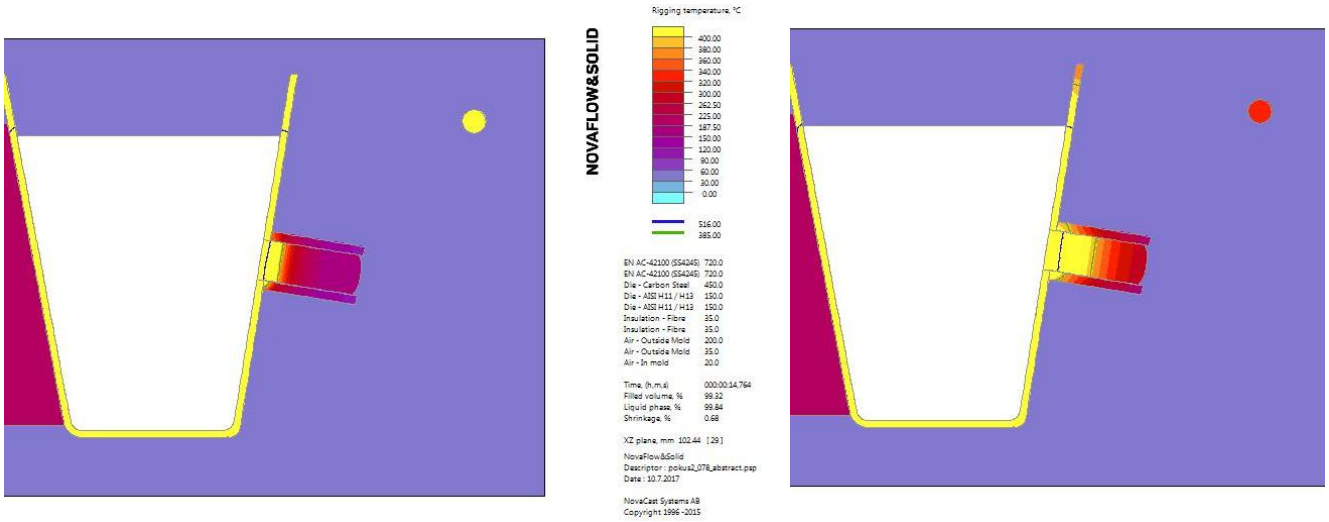
Obr. 32. Začátek tuhnutí

Z obr. 32. je patrné, že tuhnutí začíná v místě umístění etalonového válečku. Je to způsobeno tím, že v místě válečku je vyšší objem materiálu a tím i větší akumulace tepla.



Obr. 33. Postup tuhnutí směrem do odlitku

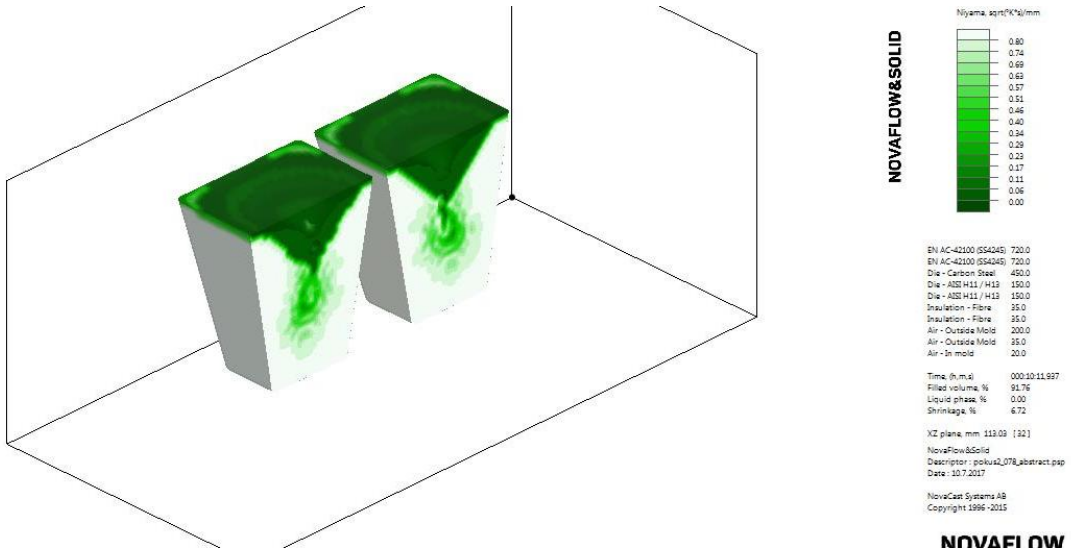
Obr. 33. ukazuje, že váleček na sebe vzal funkci chladítka a odklání směr tuhnutí lázně.



Obr. 34. Aktivace tepelného toku uvnitř válečku

Obr. 34. znázorňuje aktivaci tepelného toku uvnitř válečku. Na základě této simulace byly určeny polohy umístění termočlánků, díky kterému bylo možné dopočítat hodnotu tepleného toku uvnitř tohoto válečku.

Z tohoto důvodu byly etalonové válečky opatřeny tepelnou izolací. Díky tomuto opatření jsme byli schopni redukovat tepelný tok (snížením ztrát radiací tepla) a zajistit, aby tepelný tok proudil pouze jedním směrem.



Obr. 35. Výsledná porezita

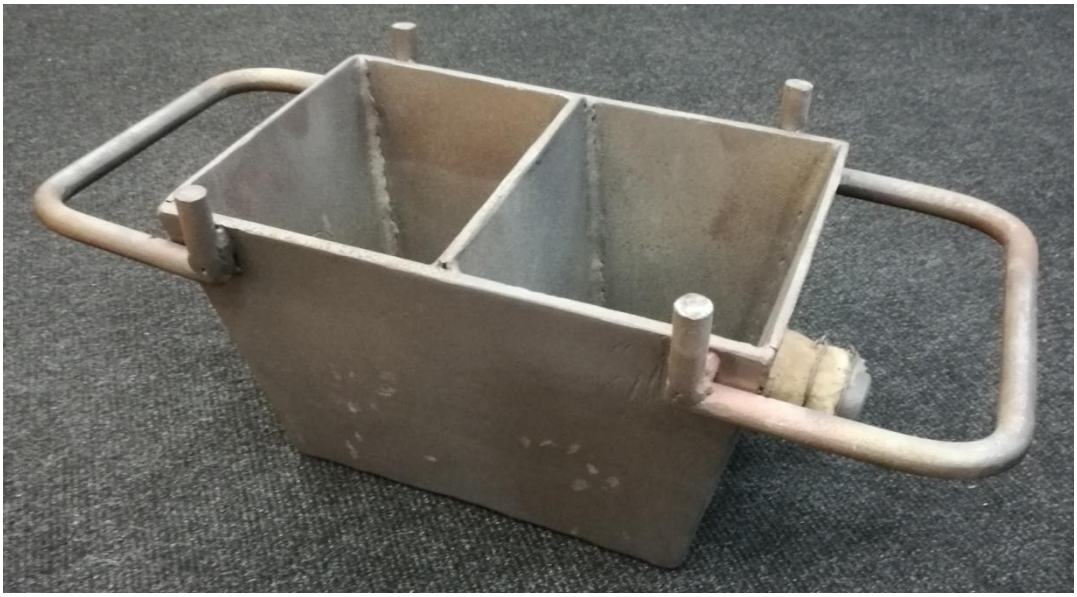
5.3. Výroba zkušební formy

Výroba zkušební formy byla provedena v externí zámečnické dílně za pomocí níže uvedeného vybavení:

- pásová pila,
- svařovací souprava,
- stahovací svěrky,
- kleště,
- kladivo,
- bruska.

Pro dělení materiálu na požadovaný tvar byla použita pásová gravitační pila (PILOUS ARG 300 F). Díky nastavitelnému stolu bylo možné přesně nastavit úhel zkosení tak, aby jednotlivé části zkušební formy do sebe zapadaly bez dalšího opracování.

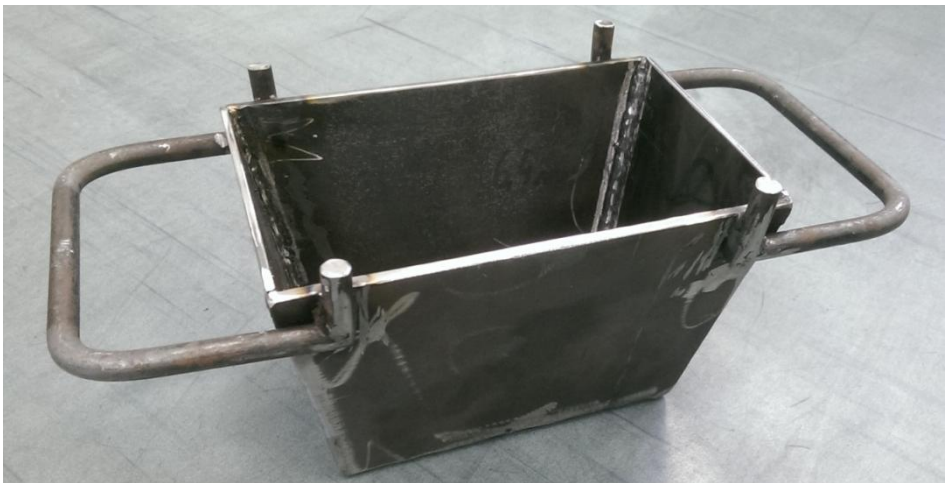
Spojení jednotlivých částí formy se realizovalo pomocí ručního odporového svařování. Jako přídavný materiál byla použita obalená elektroda od firmy ESAB OK 46.00. Jedná se o univerzální rutilovou elektrodu, která je vhodná pro svařování ve všech polohách a s dobrou odstranitelností strusky. V konečné fázi byly zhotovené svary zabroušeny.



Obr. 36. Finální podoba zkušební formy

5.4. Zkušební měření

V první fázi probíhaly pokusy na zjednodušené pokusné formě, kde byly testovány zvolené úkosy a rádiusy.



Obr. 37. Měřící aparatura verze_1

Hlavní aspekty, které jsme z tohoto testování získali, nám potvrdily, že zvolené úkosy jsou dostatečné a výsledný odlitek je schopen po ztuhnutí sám vypadnout z formy. Jako negativní zjištění tohoto pokusu bylo, že z důvodu nevhodně umístěných svarů je značně ztíženo celé vyjímání odlitku a je potřeba značné síly pro jeho uvolnění. Díky tomuto faktu bylo aplikováno nápravné opatření (vyfrézování svarů stopkovou frézou do plynulých rádiusů), které tento zásadní nedostatek odstranilo.

Dalším úkolem tohoto experimentu bylo zjistit, zdali je možné umístit tyčkový termočlánek přímo do taveniny a následně ho po ztuhnutí odlitku vyjmout. Tato část přípravy nám potvrdila, že termočlánek, který je předem ošetřen separačním postřikem (grafit+voda), je možné bez větších obtíží z odlitku uvolnit.

Díky předběžnému experimentu bylo možné eliminovat prvopočáteční nedostatky.

Obr. 38. Zkouška vyjímání termočlánku

5.5. Popis použitého zařízení a vstupních veličin

a) Měřící stanice WIS (WELDING INFORMATION SYSTEM)

Měřící stanice WIS je zařízení, které primárně slouží k monitorování svářecího procesu. Z tohoto důvodu je stanice vybavena senzory na měření elektrického odporu

nebo měření průtoku ochranného plynu. Stanice WIS byla ovšem zvolena z jiného důvodu a to pro svou schopnost kontinuálního zápisu teplot z celkem šesti nezávislých vstupů. Tento počet vstupů byl pro náš experiment plně dostačující.

Monitorovací systém WIS je tvořen centrální měřící jednotkou, napájenou napětím 20 V, která je propojena USB kabelem s uživatelským prostředím počítače. K centrální jednotce jsou připojeny specifické kabely, vedoucí k jednotlivým snímačům, které měří příslušné veličiny

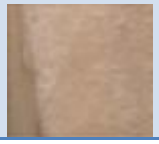
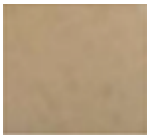
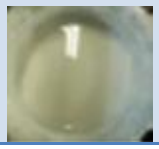
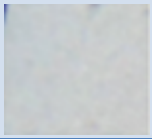
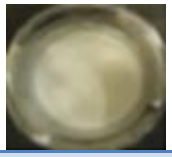
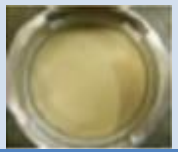
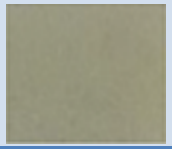
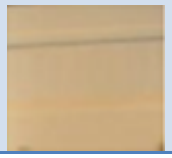
Obr. 39. Měřící stanice WIS s převodníky

Teplota materiálu v příslušných oblastech je měřena pomocí termočlánků typu "K". Ten umožňuje měření teplot v rozmezí od 0°C do 1200°C s dobou odezvy 1,5s a přesností ± 1,5°C. Každý termočlánek má svůj vlastní převodník a ten je prostřednictvím samostatného kabelu připojen k příslušnému vstupu měřící jednotky.

Obr. 40. Termočlánek typu "K"

b) Typy měřených postřiků a jejich obecné fyzikální vlastnosti

V závislosti na oblasti použití rozlišujeme různé druhy postřiků. Postřiky se navzájem liší svou hrubostí, způsobem aplikace a izolačními vlastnostmi. Nejčastěji používané typy postřiků a jejich vlastnosti jsou uvedeny v (Tab. 1.).

Název postřiku	**Vlastnosti postřiku**	**Barva postřiku**		**Hustota směsi [g/cm3]**	**Koeficient přestupu tepla [W/m2.K]**
Steiger Woho - nátěr	Izolační výmaz			Paste	400-500
Steiger Woho – postřik	Izolační postřik			1.2	750
Dycote 34 ESS	Hrubý izolační postřik			1.36	724
Dycote 39 ESS	Jemný izolační postřik			1.25	950
DAG 193 T (Deltacast cG555)	Polovodivý středně hrubý postřik			1.16	100
Aquanet LS	Vodivý roztok grafitu, třecí plochy			1.3	1200
KS 92	Podkladový postřik			1.13	1550

Tab. 1. Seznam používaných postřiků a jejich vlastnosti

Postup aplikace jednotlivých postřiků je vždy uveden v technologickém postupu pro každý příslušný odlitek. Je už pravidlem, že každá forma má svojí kombinaci postřiků. Jen v ojedinělých případech se stává, že na formu je použit jen jeden druh postřiku.

V návaznosti na výše uvedený text a teoretickou část této práce byl proveden průzkum. Cílem tohoto průzkumu bylo zjistit, jaké jsou nejčastěji používané kombinace postřiků jak u nízkotlakých forem, tak i u gravitačních kokil. Informace byly získávány přímo od slevačů a také z aktuálních výrobních postupů. Na základě získaných dat bylo vygenerováno 12 nejčastěji používaných typů postřiků (Tab. 2.).

Číslo měření	Aplikovaný postřik
1	Dycote 34
2	Dycote 34, Aquanet
3	Cilollin 223G, Dycote 34, Aquanet
4	KS 92, Dag 193
5	KS 92, Cilollin 223G
6	KS 92, Dycote 34
7	KS 92, Cilollin 223G, Aquanet
8	KS 92, Dycote 34, Aquanet
9	KS 92, Dag 193, Aquanet
10	Mix Dycote 34 a Dycote 39, Aquanet
11	Steiger Woho-výmaz
12	Aquanet

Tab. 2. Nejčastěji používané kombinace postřiků

c) Použitá hliníková slitina AC 42100

Hliníková slitina, označovaná podle EN jako AC 42100 (chem. AlSi7Mg0,3), je hojně využívá v automobilovém průmyslu a to převážně na nízkotlaké odlitky kol u osobních automobilů nebo částí motorových dílů. Další oblast, kde je možné se s

touto slitinou setkat, je letecký průmysl. V důsledku přítomnosti křemíku ve fázi Mg2Si, se jedná o slitinu vhodnou pro vytvrzování. Tato slitina má dobré mechanické a slévárenské vlastnosti. Další velká přednost této slitiny je její odolnost proti korozi, kterou je možné pomocí modifikace a očkování ještě zlepšit.

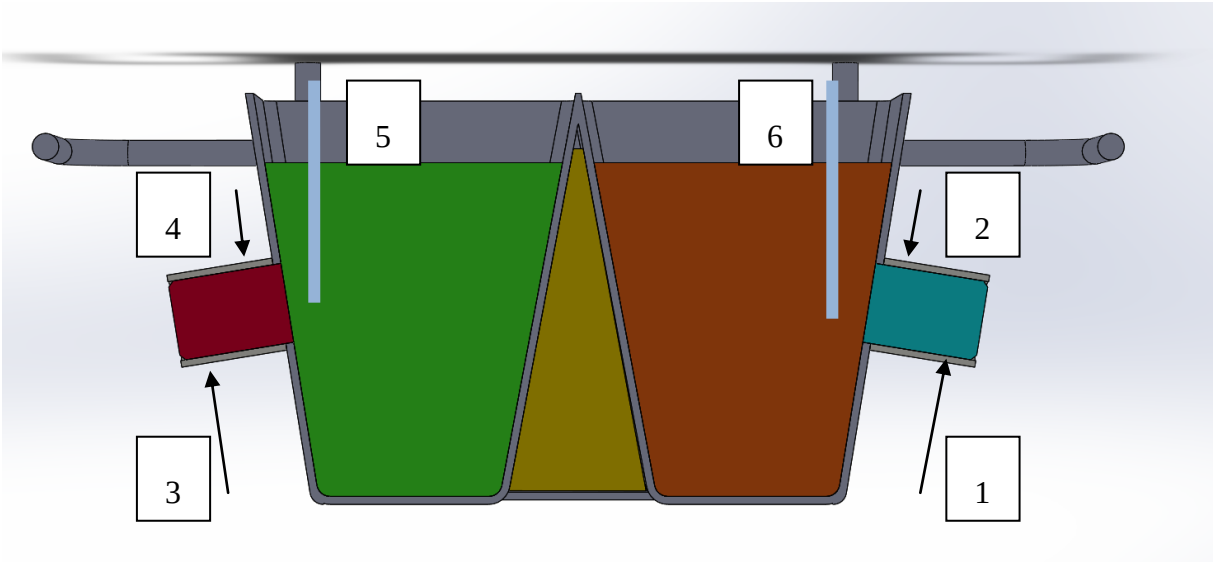
Tato slitina se vyznačuje podílem eutektika ve struktuře α fáze a řadí se do skupiny podeutektických siluminů. Jejich použití se omezuje na tvarově jednoduché odlitky a to z důvodu zhoršené zabíhavosti. Hlavní činitelé, kteří mají zásadní vliv na mechanické vlastnosti, jsou očkování a modifikace. Modifikování je proces, při kterém dochází ke změně morfologie eutektického křemíku tak, že dochází ke změně tvaru z hexagonálních desek na tyčinky a vlákna. Výpis z chemické analýzy použitého materiálu (Tab. 3.).

Prvek	Fe [%]	Si [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	Ni [%]	Zn [%]	Pb [%]	Sn [%]	Ti [%]	Ca [%]	Sr [%]	Al [%]
Množství	0,146	7,481	0,008	0,049	0,315	0,008	0,044	0,044	0,021	0,131	0,001	0,016	91,71

Tab. 3. Chemické složení použité slitiny

5.6. Návrh rozložení termočlánků na měřící aparatuře

S provedenými simulacemi bylo zjištěno, že při zalití formy taveninou dochází v měřené oblasti k aktivaci tepelného toku. Hlavním úkolem této části práce bylo

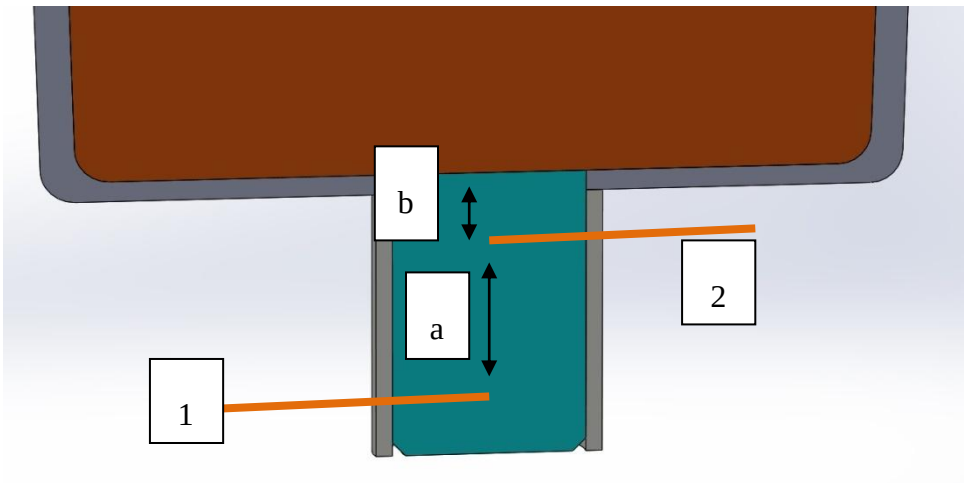


Obr. 41. Schéma připojení termočlánků

zjistit, v jakých místech etalonového válečku jsou optimální místa pro uložení termočlánků.

Na obr. 41. jsou vidět oblasti, ve kterých dochází k měření teplot. Termočlánky 5 a 6 byly umístěny přímo uvnitř taveniny v těsné blízkosti stěny formy, aby bylo zamezeno zkreslení zaznamenaných hodnot.

Termočlánky 1, 2, 3 a 4 byly určeny pro měření teploty uvnitř válečků. Díky těmto získaným hodnotám a známému součiniteli přestupu tepla bylo možné dopočítat hodnotu tepelného toku uvnitř těchto válečků.



Obr. 42. Schéma zapojení termočlánků uvnitř etalonového válečku

Zapojení termočlánků v etalonovém válečku je znázorněno na obr. 42. Tímto střídavým umístěním bylo zajištěno, že tepelný tok, který válečkem prochází, není brzděn žádnou překážkou. V tomto případě otvorem pro termočlánek. Každý z otvorů byl pomocí stojanové vrtačky vyvrtán až k ose válečku. To znamená, že při průměru válečku 30 mm byla hloubka vytvořeného otvoru 15 mm. Vzdálenosti, které bylo potřeba bezpodmínečně dodržet pro závěrečný výpočet, jsou znázorněny na obr. 42., kde hodnota b = 10 mm a hodnota a = 25 mm.

Pro udržení jednoho směru tepelného toku byly válečky od okolního prostředí odděleny vrstvou izolace (sibraloví papír - FIBER-FLEX).

6. POSTUP MĚŘENÍ

Testovací forma byla podrobena standardnímu procesu přípravy formy před litím.

6.1. Příprava zkušební formy v nástrojárně

Tryskáním docílíme odstranění veškerého zbytkového znečištění, které na formě ulpělo při její výrobě. Tyto nečistoty by se daly kvalifikovat jako zbytky mastnoty, okuje a strusky. Toto znečištění by mohlo způsobit pozdější problémy s nedokonalou adhezí separačního postřiku. Z těchto důvodů byla forma podrobena důkladnému tryskání všech funkčních ploch. Tryskání probíhalo za pomoci manuálního tryskacího stroje. Jako abrazivum byl použit sekaný ocelový drát.

Takto ošetřená forma získala jednotnou strukturu povrchu bez známek nečistot. Díky procesu tryskání byl jinak hladký válcovaný povrch rovnoměrně zdrsněný. Takto opracovaný povrch tvoří ideální podklad pro následné nanášení separačních postřiků.

Obr. 43. Tryskaný povrch zkušební formy

6.2. Předehřátí zkušební formy na aplikační teplotu

Před aplikací nástřiku je nutné formu zahřát na teplotu danou technologickým postupem. Tato teplota je dána výrobcem postřiků a pohybuje se v intervalu 150 – 180°C v závislosti na typu postřiku. Pro předehřátí formy byl použit standardní plynový hořák, využívaný pro ohřev forem.

Pro kontrolu předepsané aplikační teploty byl použit bezkontaktní pyrometr Kecheng KC-180B-1.

Obr. 44. Průběh předehřevu

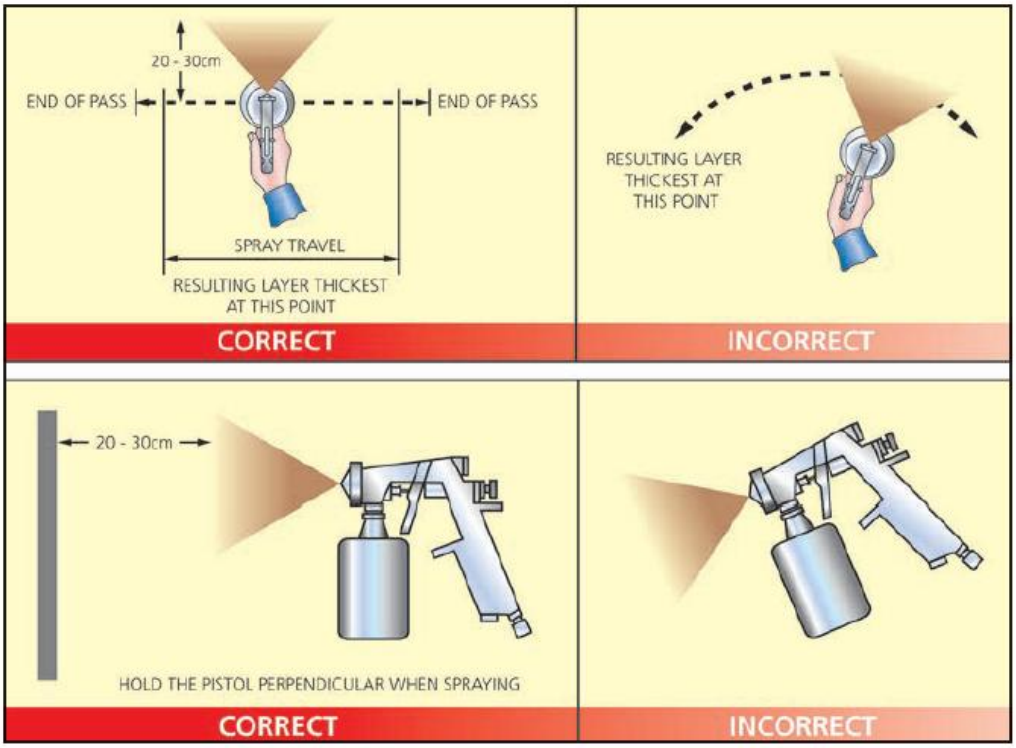
6.3. Aplikace separačního postřiku

Aplikace separačního postřiku byla provedena podle technologického postupu, který doporučoval výrobce postřiků. Ten definuje ideální podmínky, za kterých by měl být postřik aplikován.

Tyto podmínky byly podrobně rozepsány v teoretické části této práce. Pro zopakování si proto uvedeme jen ty nejpodstatnější:

- aplikační teplota 130 - 160 °C,
- vzdálenost od formy 20 - 30 cm,
- tlak vzduchu od 0,4 do 0,5 MPa.

Pro lepší představu je na obr. 45. znázorněn správný postup aplikace postřiku.

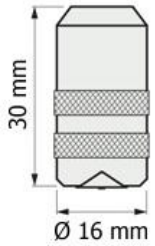


Obr. 45. Postup aplikace postřiku [6, str. 15]

6.4. Měření tloušťky naneseného postřiku

Měření tloušťky naneseného postřiku bylo realizováno přístrojem PosiTector 6000. Tento přístroj je možné využít jak pro feromagnetické základní materiály (ocel, litina), tak i pro neferomagnetické materiály (hliník, měď).

Tento přístroj je možné pořídit ve velkém množství konfigurací. Přístroj používaný při tomto experimentu byl standardního provedení PosiTector 6000 FS1. FS1 nese označení typu použité sondy. Tato sonda je určena pro měření feromagnetických základních materiálů. Její základní parametry jsou vyznačeny v tabulce 4.

Sonda FS		
	Měřící rozsah	0-1500 µm
	Přesnost	±(1 µm + 1%) pro 0 - 50 µm ±(2 µm + 1%) nad 50 µm

Tab. 4. Parametry sondy "FS"[18]

Hlavní nevýhodou tohoto typu sondy je její maximální pracovní teplota, která má hranici na 50°C. Z tohoto důvodu docházelo k velkým časovým prodlevám během měření.

6.5. Instalace termočlánků

Před samotnou instalací termočlánků byla forma zahřáta na provozní teplotu. Tato teplota je ve slévárně předepsána na 450°C.

K dosažení této teploty byly opět použity plynové hořáky. Po zahřátí následovala opětovná kontrola teploty pomocí bezkontaktního pyrometru.

Termočlánky byly instalovány na předem určená místa. Pro termočlánky umístěné uvnitř válečků (obr. 46.) bylo nutné zajistit patřičnou fixaci, aby nedošlo k jejich samovolnému uvolnění. Z tohoto důvodu byly předvrtané otvory opatřeny jen nezbytně velkou vůlí, která postačovala pro jejich vyjímání, ale zabraňovala samovolnému uvolnění.

Pro stabilizaci termočlánků v tavenině a zabezpečení jejich určené polohy byl vyroben speciální, odnímatelný a výškově nastavitelný stativ (obr. 47.). Tento staviv zajišťoval správnou polohu termočlánků při každém měření.

Obr. 46. Etanolový váleček

Obr. 47. Stativ

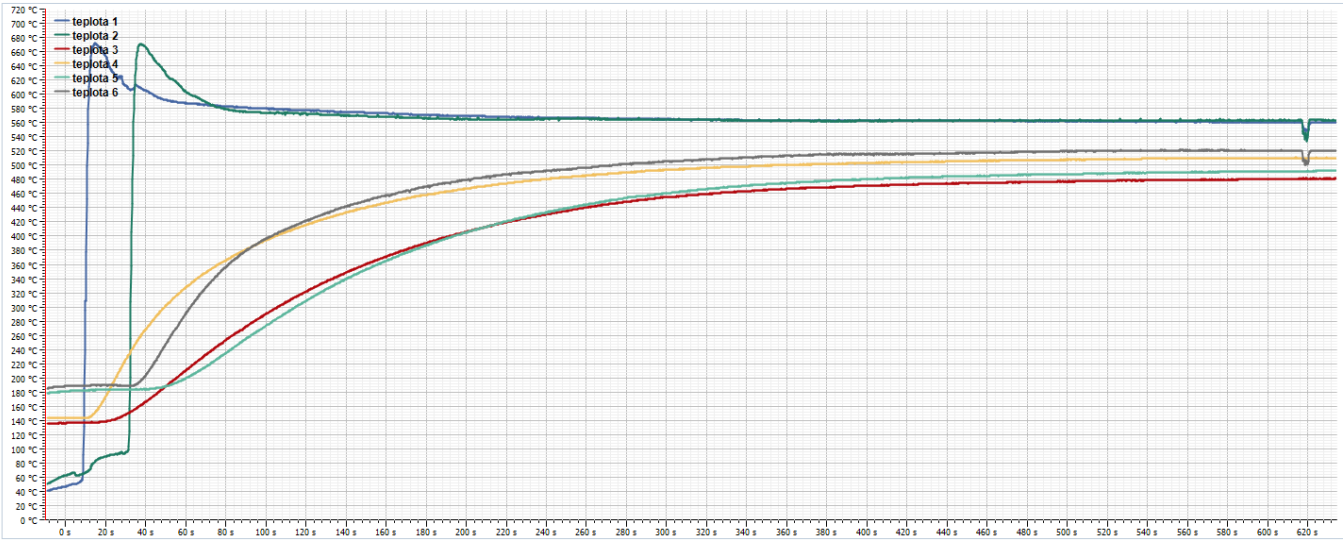
Termočlánky určené pro měření v tavenině bylo nutné před každým měřením ošetřit separačním postřikem (grafit+voda). Toto ošetření zajistilo snadné vyjímání senzoru ze ztuhlého odlitku. Pro správnou aplikaci separačního postřiku bylo nutné senzor vyčistit a zahřát na aplikační teplotu (cca 150 °C). Nanesení potřebné vrstvy postřiku

bylo realizováno pomocí stříkací pistole (rosenky). Po této aplikaci bylo nutné očistit hlavičku senzoru, jelikož právě v těchto místech se nacházel měřící bod.

Obr. 48. Měřící soustava připravená pro měření

6.6. Záznam údajů

Před samotným zalitím termočlánků tekutým kovem se spustil příslušný zaznamenávací program, který ukládal naměřené hodnoty ze všech šesti vstupů současně. Všechny naměřené hodnoty se v reálném čase vykreslovaly do grafu.



Obr. 49. Příklad pořízeného záznamu

V tomto grafu bylo později možné si najít příslušnou dobu, ve které se celý proces ustálil a získat potřebná data zaznamenaná v jednom okamžiku.

7. VYHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH DAT

V první části této kapitoly se budu zabývat záznamy měření tloušťky nanesených postřiků. Měření tloušťky bylo realizováno na třech místech. Z těchto naměřených dat se později vytvořil aritmetický průměr.

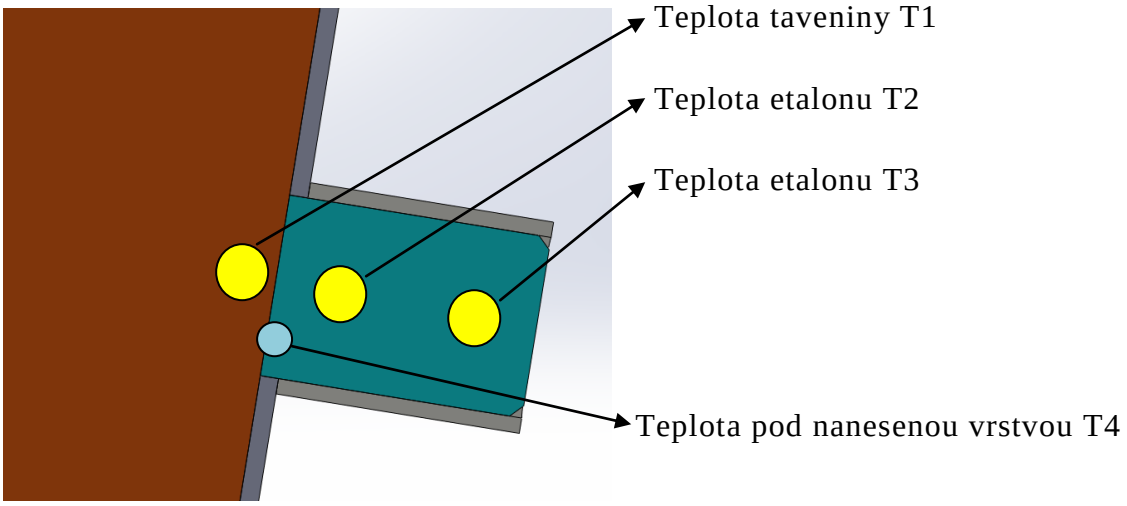
Výsledky měření tloušťek postřiku jsou k dispozici v tabulce níže.

Číslo měření	Aplikovaný postřik	Tloušťka postřiku[µm]
1	Dycote 34	77
2	Dycote 34, Aquanet	73
3	Cilollin 223G, Dycote 34, Aquanet	135
4	KS 92, Dag 193	58
5	KS 92, Cilollin 223G	67
6	KS 92, Dycote 34	116
7	KS 92, Cilollin 223G, Aquanet	83
8	KS 92, Dycote 34, Aquanet	185
9	KS 92, Dag 193, Aquanet	86
10	Mix 34 a 39, Aquanet	86
11	Steiger Woho-výmaz	175
12	Aquanet	14

Tab. 5. Výsledky měření tloušťek postřiku

V následující části této práce se budu zabývat samotným vyhodnocením získaných údajů pomocí stanice WIS.

Při ustálení zaznamenávaných hodnot byl záznam po cca 10 min zastaven. Následný vykreslený graf viz (obr. 50) nám umožňoval vrátit se do požadovaného časového úseku měření a získat potřebné hodnoty teplot.



Obr. 50 Vyhodnocení teplot

Pomocí rovnice (2) z kapitoly 2.1 a znalosti součinitele tepelné vodivosti etalonového materiálu je možné vypočítat tepelný tok tímto materiálem.

$$q = \frac{\lambda_{etalonu}}{l} . (T2 - T3) \quad [W]$$

Při získání hodnoty tepelného toku je možné se pomocí transformace rovnice dopočítat teploty v jakémkoliv místě válečku.

Hlavním zájmem je zjištění teploty přímo pod nanesenou vrstvou postřiku. Tu získáme již zmíněnou transformací rovnice (2).

$$q = \frac{\lambda_{etalonu}}{l} . (T4 - T2) => T4 = \frac{(q . l) + (\lambda_{etalonu} . T2)}{\lambda_{etalonu}} \quad [K] \quad (3)$$

Dalším krokem je výpočet hustoty tepelného toku "Q". Ten je definován podílem tepelného toku a plochy, jíž tento tok kolmo prochází. Tato rovnice byla již zmíněna v kapitole 2.1 jako rovnice (1).

$$Q = \frac{q}{A} \left[\frac{W}{m^2}\right]$$

Závěrečným krokem této výpočetní části je získání požadovaného součinitele tepelné vodivosti "λ". Součinitel tepelné vodivosti je definován jako míra schopnosti látky přenášet teplo vedením, tj. předávat kinetickou energii tepelných pohybů mezi

molekulami bez proudění látky. Je určen jako součinitel úměrnosti gradientu teploty a hustoty tepelného toku v látce.

Díky rozdílům mezi teplotami T1, T4 a vypočtené hustotě tepelného toku jsme schopni pomocí rovnice (4) vypočítat požadovaný součinitel tepelné vodivosti "λ".

$$\lambda = \frac{Q \cdot l}{\Delta T} \quad \left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m \cdot K}}\right] \quad (4)$$

Pomocí výše uvedených výpočetních kroků bylo dosáhnuto požadovaných výsledků. Tyto výsledky jsou uvedeny v tabulce níže.

Číslo měření	Aplikovaný postřik	Tloušťka postřiku[μm]	λnást. [W/m^{2}K]
1	Dycote 34	77	1342,3
2	Dycote 34, Aquanet	73	1323,4
3	Cilollin 223G, Dycote 34, Aquanet	135	1371,8
4	KS 92, Dag 193	58	1389,9
5	KS 92, Cilollin 223G	67	1362,3
6	KS 92, Dycote 34	116	1367,0
7	KS 92, Cilollin 223G, Aquanet	83	1349,8
8	KS 92, Dycote 34, Aquanet	185	1369,0
9	KS 92, Dag 193, Aquanet	86	1350,9
10	Mix 34 a 39, Aquanet	86	1365,5
11	Steiger Woho-výmaz	175	1381,3
12	Aquanet	14	1424,7

Tab. 6. Vyhodnocení součinitele přestupu teplo pro danou kombinaci postřiků

Velikost součinitele tepelné vodivosti je přímo závislá na hrubosti výsledného povlaku, jelikož profil výsledného povrchu zadržuje určité množství vzduchu ve formě bublin. Množství zadrženého vzduchu závisí na typu postřiku. Kombinací jednotlivých postřiků získáme podobný profil povrchu a tím i přibližně stejné množství zadrženého vzduchu. Tuto úvahu podporují i výsledky experimentu, jelikož hodnoty koeficientu přestupu tepla se liší jen v řádu desítek jednotek.

8. APLIKACE ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ V SOFTWARU MAGMA$_5$

Hlavním cílem této diplomové práce byla korekce vstupních údajů do simulačního softwaru a odstranění rozdílů mezi výsledky simulace a skutečně vyrobenými odlitky.

K tomuto záměru byl použit software využívaný společností BENEŠ a LÁT a.s., MAGMA$_5$. Tento software je pravidelně nasazen jak k analýze odlitků, které jsou už vyráběny, tak i k odlitkům, které jsou zatím ve fázi vývoje a vzorkování.

Simulační software MAGMA$_5$ je založený na simulacích tepelného toku, dynamiky tečení, napětí v materiálu a změně struktury v průběhu tuhnutí při reálných technologických podmínkách. Za vstupní veličiny lze použít již existující CAD data, většiny používaných systémů. Definování podmínek procesu lití a výběr použitých materiálů tvoří jen část vstupních veličin, které si může uživatel libovolně určit. V programu MAGMA$_5$ jsou veškeré prováděné kroky procesu dělány paralelně. To nám dává možnost interaktivního zobrazení a definice procesu lití, manipulace s geometrií nebo simultánní vyhodnocování výsledků.

8.1. Odlitek části převodovky

Právě na tomto odlitku budou aplikovány zmíněné vstupní parametry. Jedná se o odlitek, na kterém jsou již delší dobu pozorovány vady, které se v simulaci neobjevily. Jedná se především o výskyt mikroporezity a ředin.

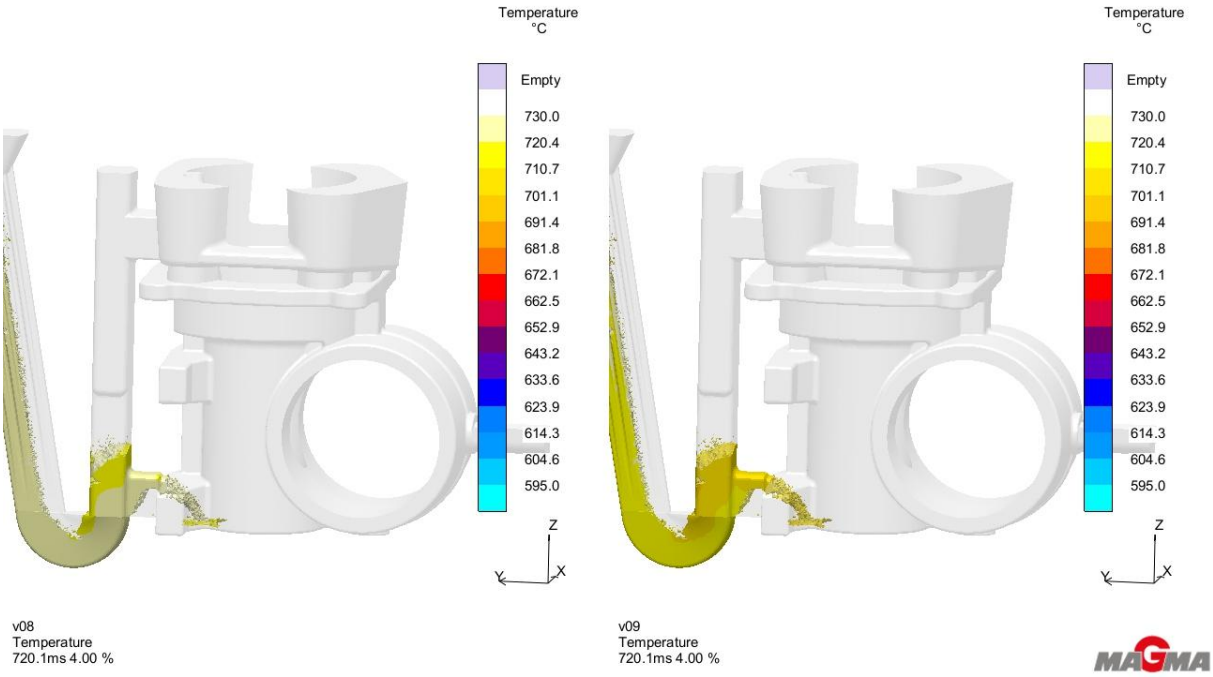
Daná součást je odlévána a dodávána zákazníkovi společnosti Christ Car Wash System. Tato společnost je jedním z předních výrobců mycích systémů v Evropě. Společnost nabízí širokou škálu produktů, od inovativních mycích jednotek až po myčky tramvají a vlaků.

Odlitek číslo 1900099 je součástí převodovky v automobilové myčce (obr. 51.).

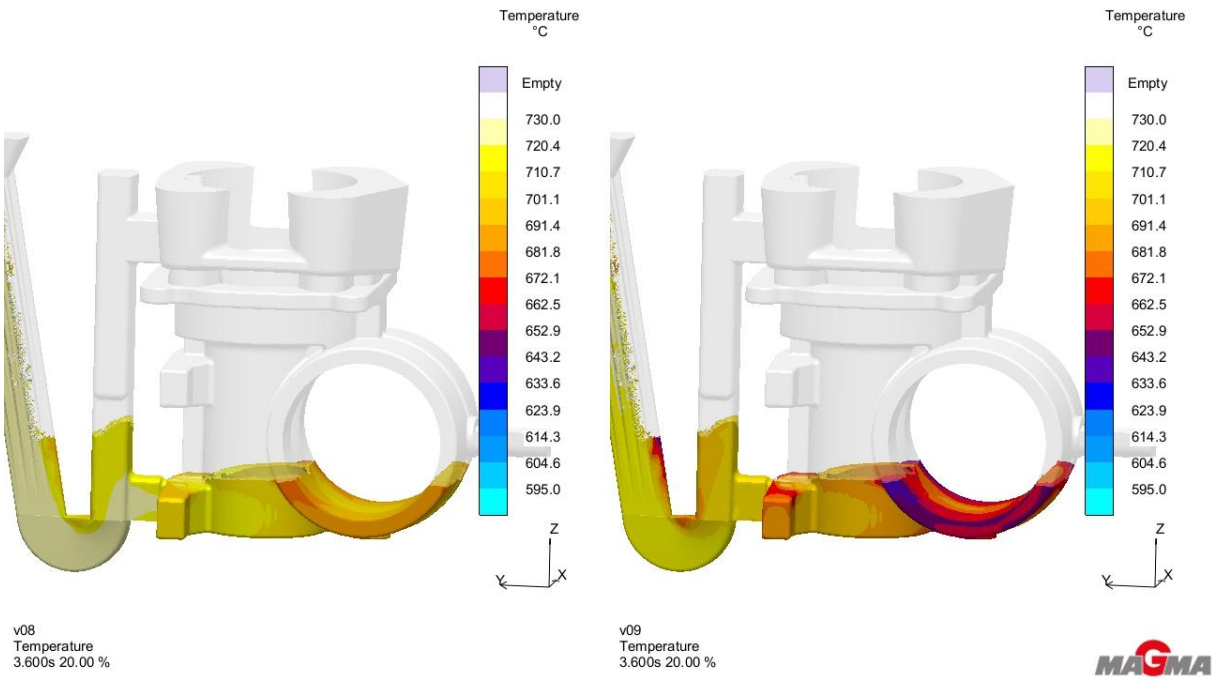
Obr. 51. Finální aplikace dílu jako převodovka v automobilové myčce

8.2. Výsledky simulace - Teploty plnění

Na následujících obrázcích jsou znázorněny teploty kovu při plnění formy. Stupnice je nastavena v rozsahu teplot likvidu a teploty lití. Na obrázcích je vždy znázorněno porovnání staré (v08) a nové verze (v09). V nové verzi byly již použity nové hodnoty součinitele tepelné vodivosti, viz Tab. 6. Ostatní technologické podmínky zůstaly nezměněny.

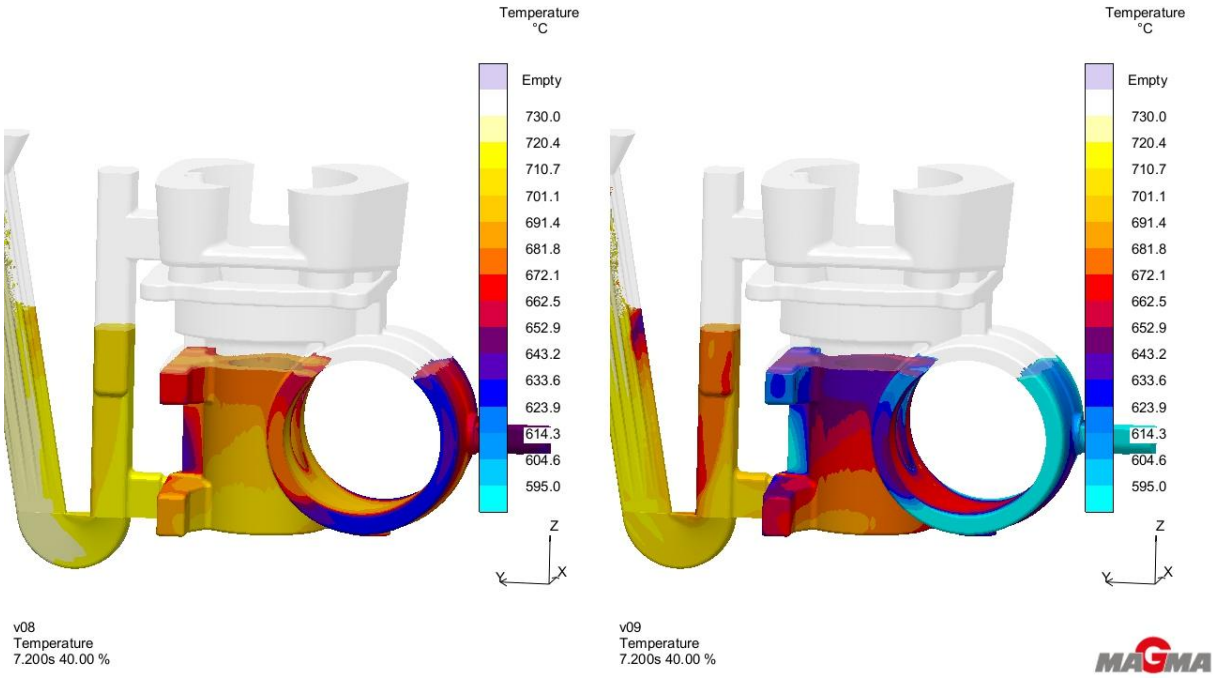


Obr. 52. Plnění 4%



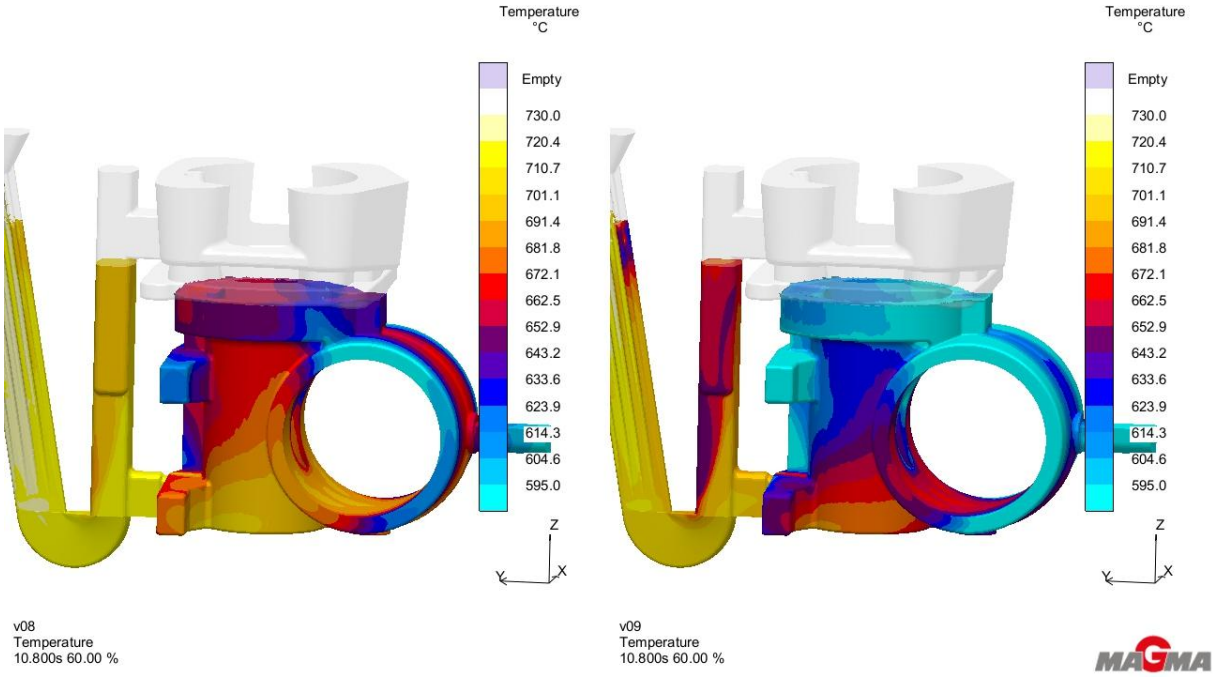
Obr. 53. Plnění 20%

Na tomto obrázku jsou již pozorovány změny v teplotě taveniny

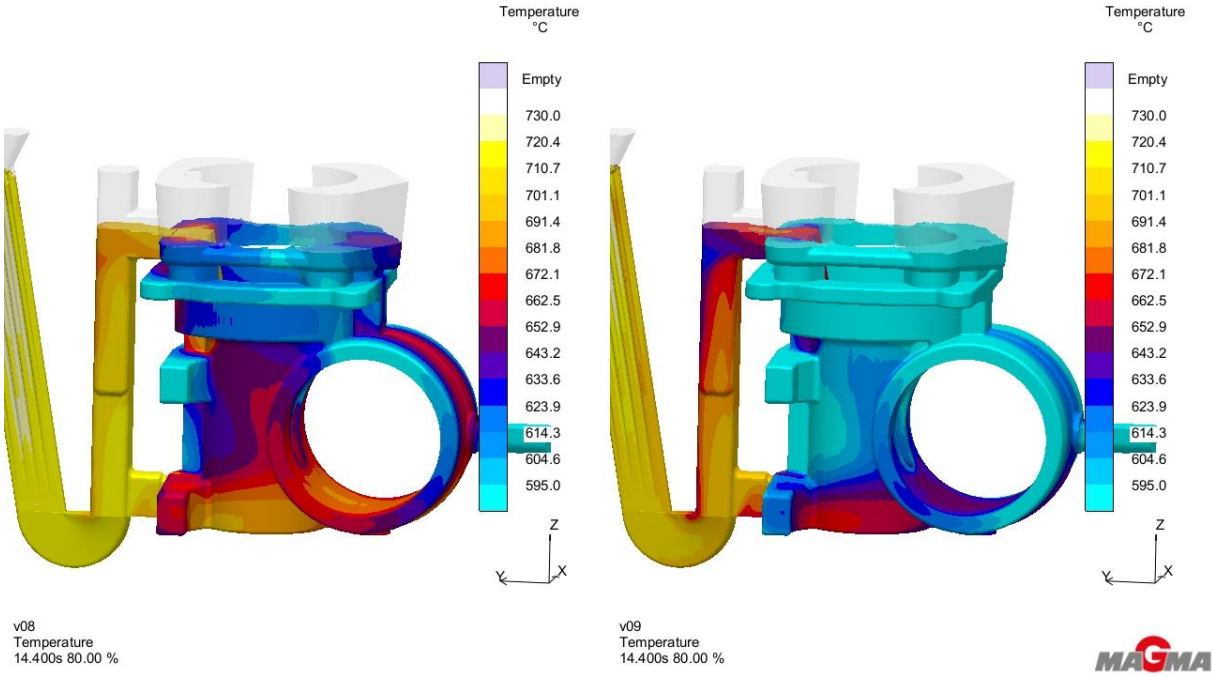


Obr. 54. Plnění 40%

Tento obrázek (obr. 54.) vykazuje už podstatné odlišnosti od původní verze. Je vidět, že tavenina při proudění kolem jádra ztratila velkou část tepla. V porovnání s původní verzí je tento rozdíl až cca 60°C.

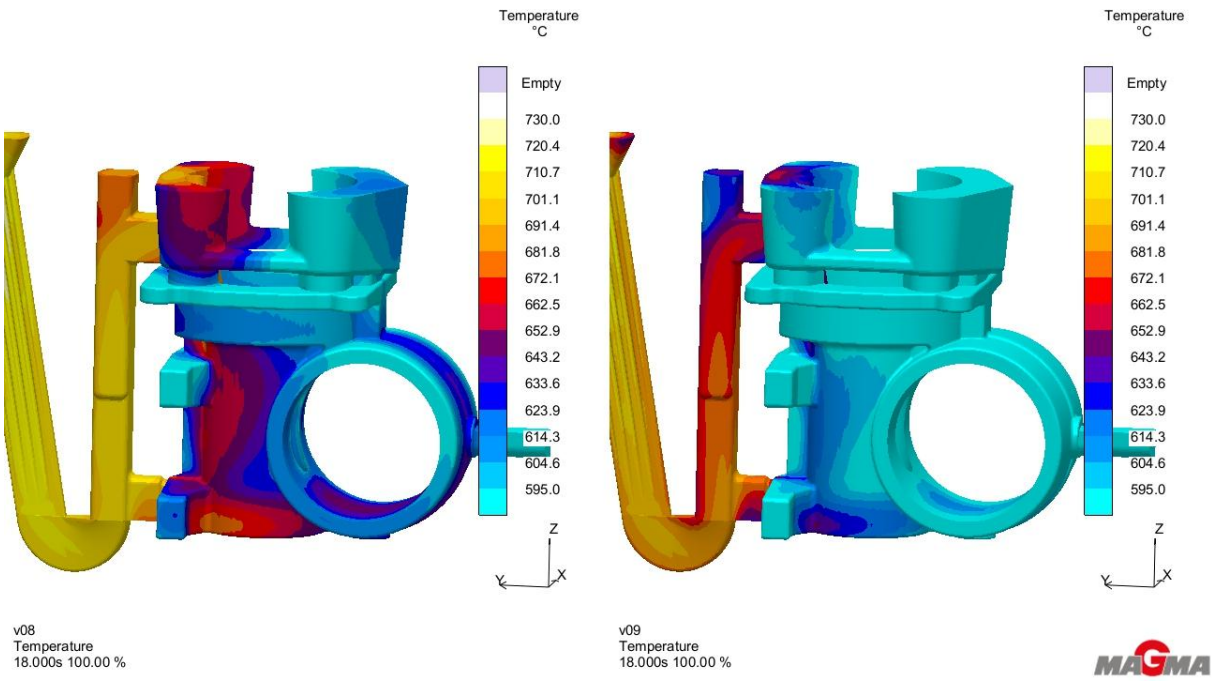


Obr. 55. Plnění 60%



Obr. 56. Plnění 80%

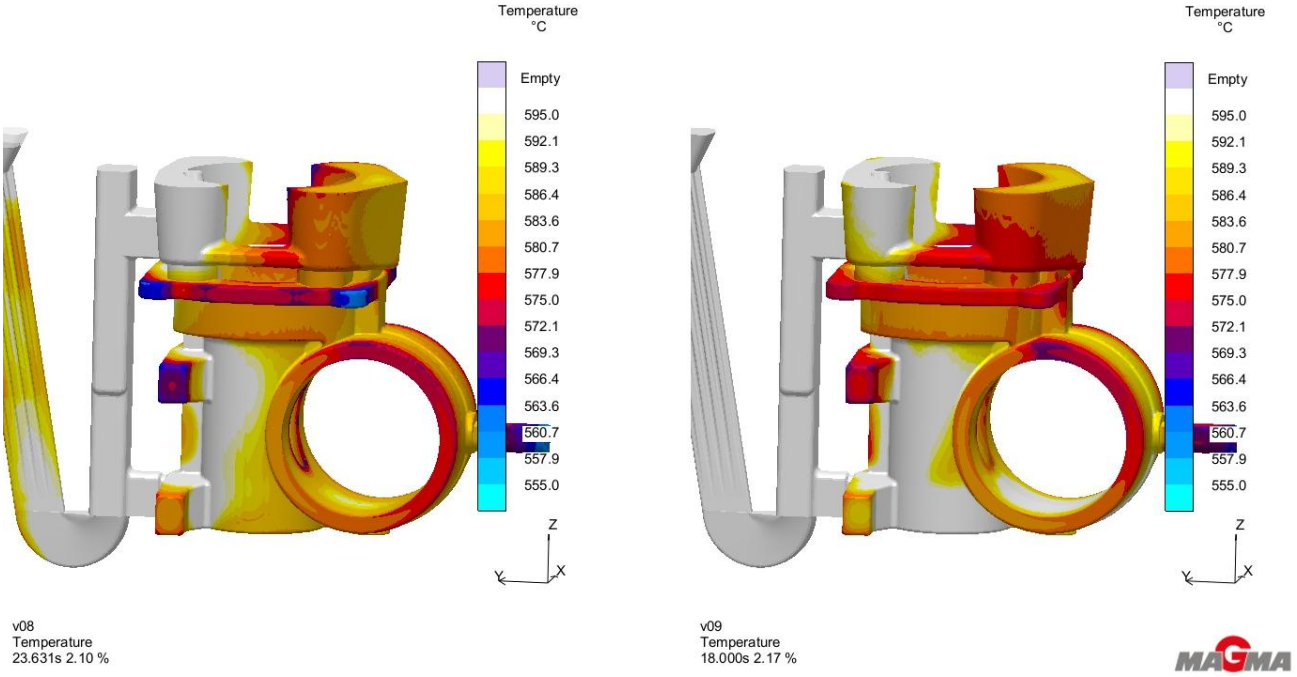
Při srovnání obr. 56. a 57. jsou na první pohled patrné teplotní změny v horní části odlitku. Od původní verze se ta aktualizovaná liší převážně v teplotách na horním věnci odlitku. Zde jsou patrné rozdíly odpovídající přibližně 30°C.



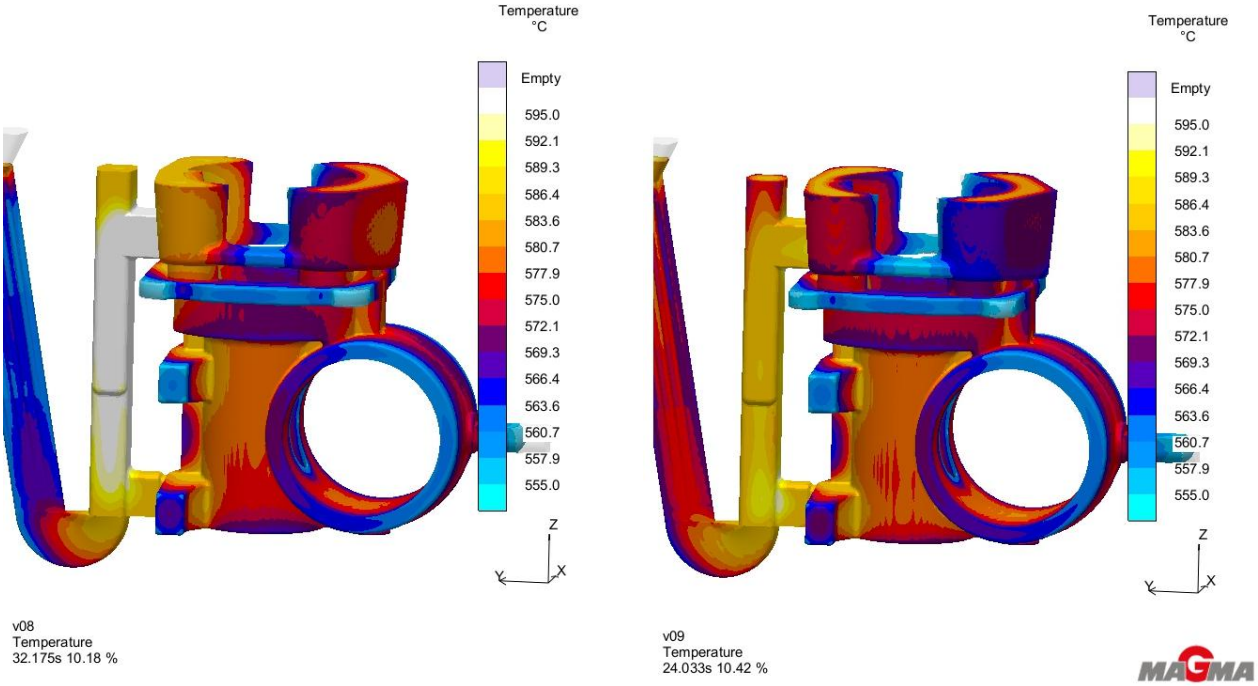
Obr. 57. Plnění 100%

8.3. Výsledky simulace - Teploty tuhnutí

V této kapitole se budeme zabývat rozdíly v tuhnutí. Hlavní pozornost je třeba zaměřit ke dvěma hlavním nálitkům v horní části odlitku.

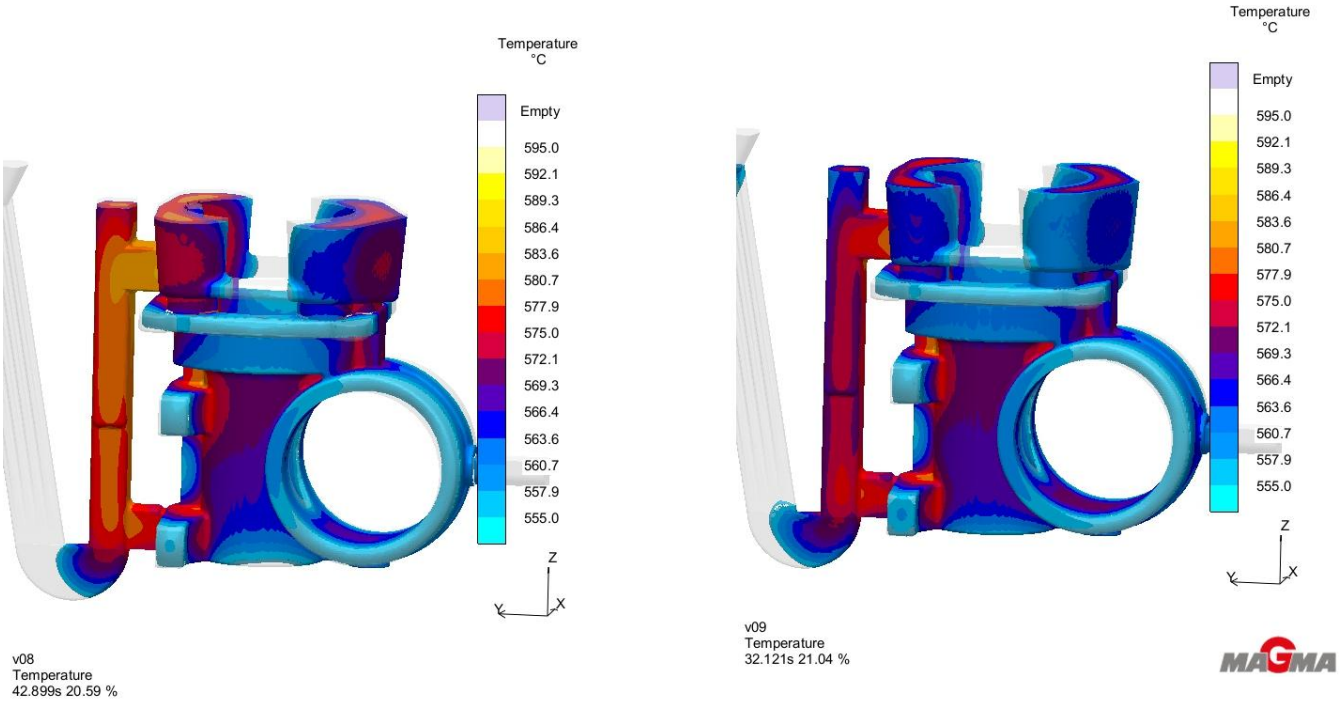


Obr. 58. Tuhnutí 2,17 %

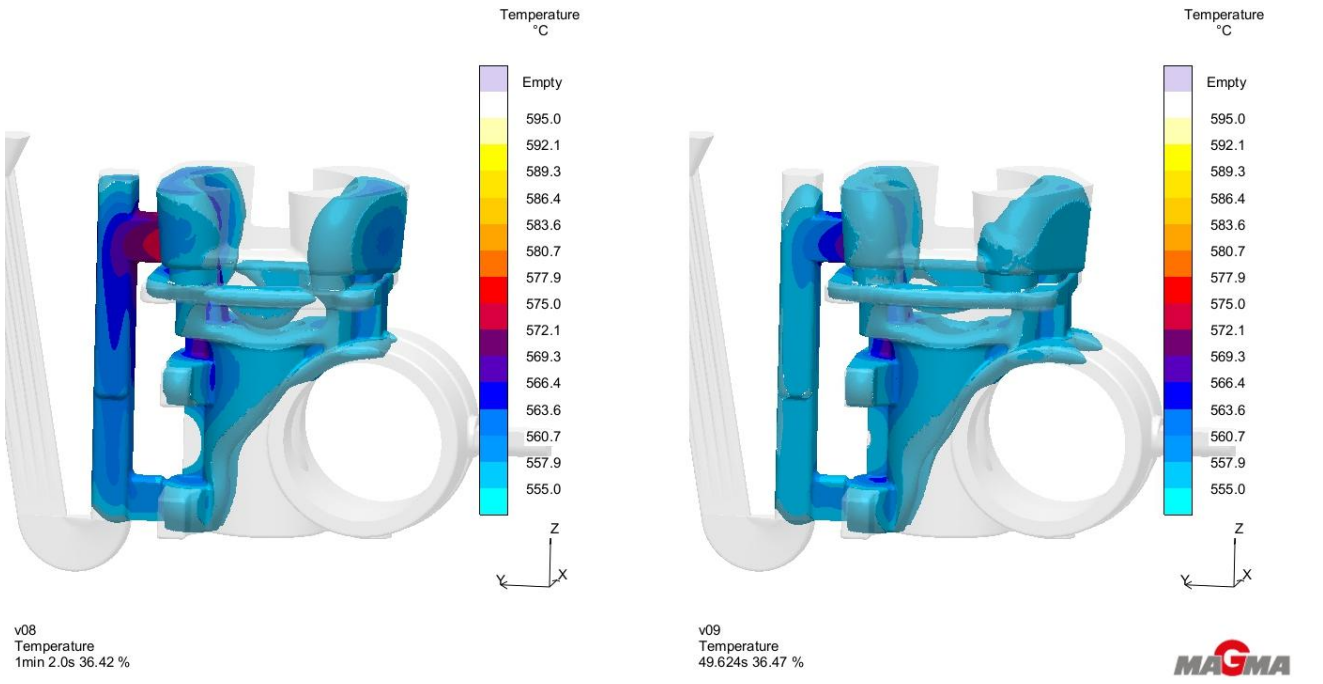


Obr. 59. Tuhnutí 10,18%

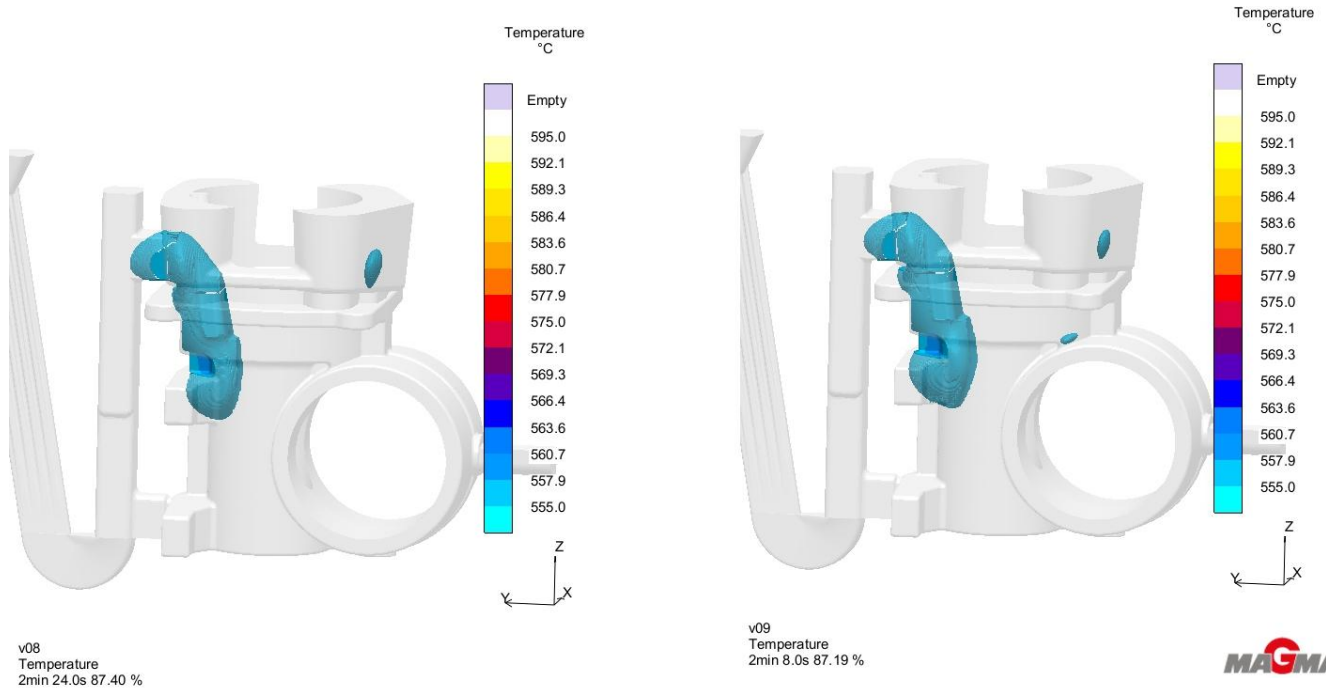
Na obr. 60. jsou v této fázi tuhnutí patrné již drobné změny. Je vidět, že u původní verze na levém nálitku jsou teploty nepatrně vyšší než než u nové verze, kde se již začínají tvořit pro tento tvar nálitku charakteristické srpy. Ty indikují začátek tuhnutí směrem ke středu, tedy k nejteplejší části odlitku.



Obr. 60. Tuhnutí 20,59%



Obr. 61. Tuhnutí 36%

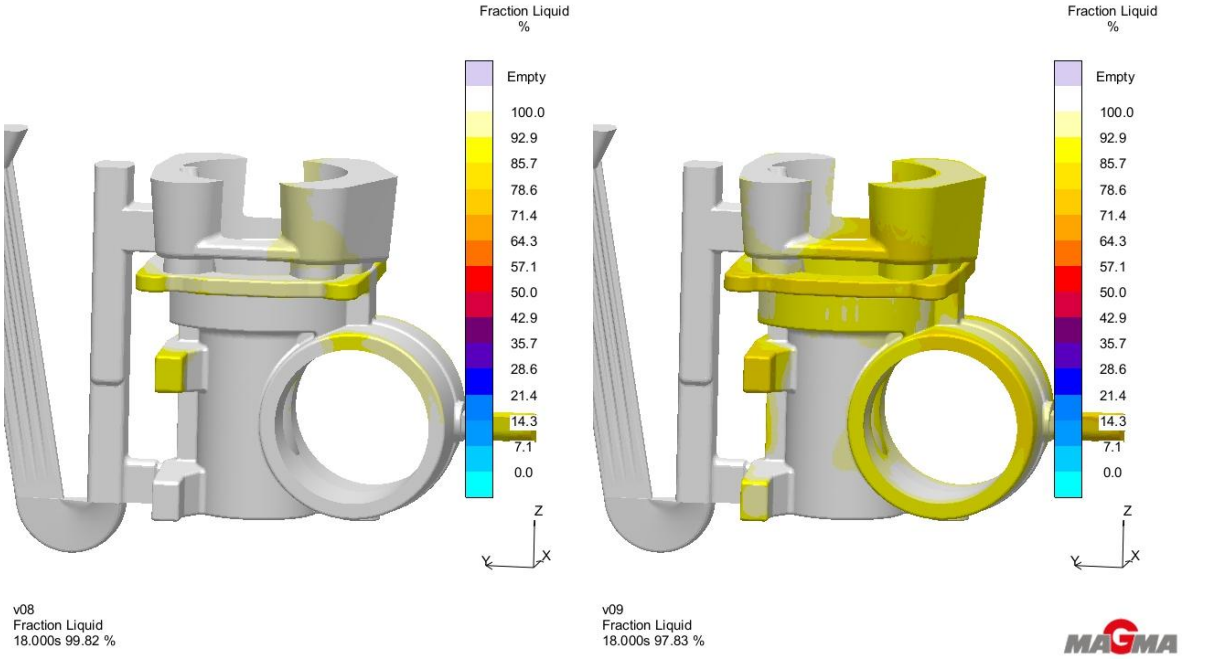


Obr. 62. Tuhnutí 87%

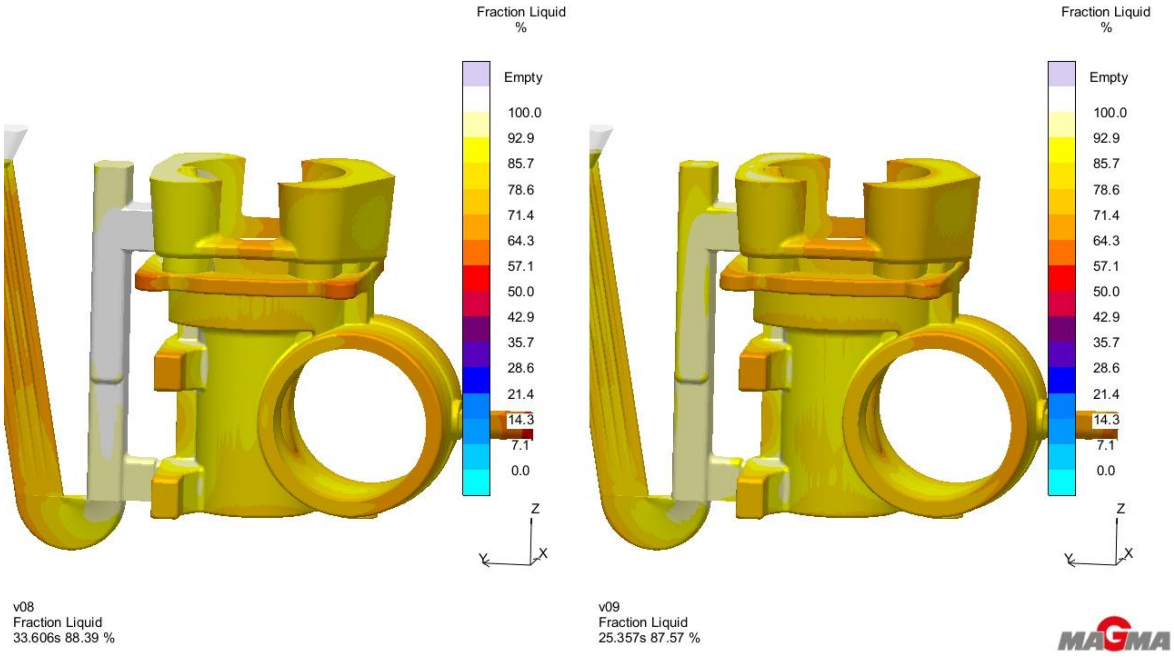
Tuhnutí z obr. 62. a 63. nevykazovalo žádné větší rozdíly v teplotách tuhnutí. Z toho lze usuzovat, že ke hlavním rozdílům dochází v prvních chvílích po nalití taveniny do prostoru formy, kdy je přestup tepla mezi formou a taveninou nejintenzivnější.

8.4. Výsledky simulace - Podíl tuhé fáze

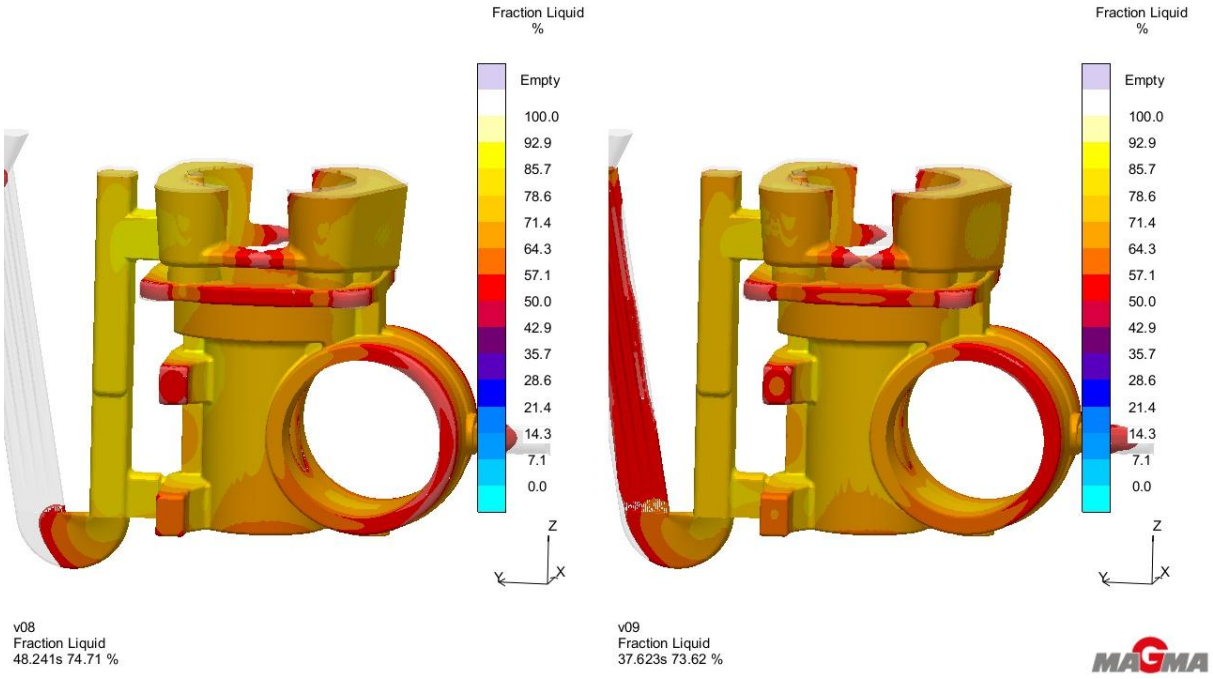
Podíl tuhé fáze ukazuje místní procentuální podíl tekuté fáze ve všech časových krocích během tuhnutí odlitku. Odhaluje oblasti, kde je zbytková tavenina plně obklopena chladnějším materiálem. V těchto místech pak materiál není schopný dostatečně dosazovat a hrozí vznik objemových staženin.



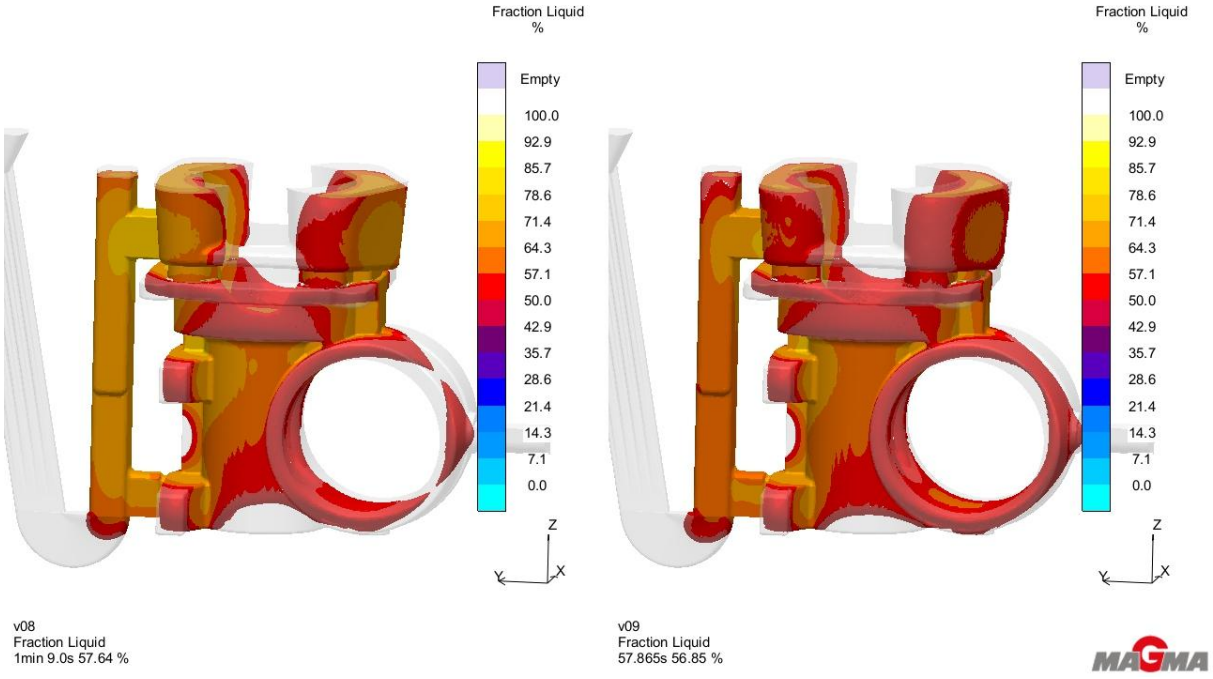
Obr. 63. Podíl tuhé fáze 97%



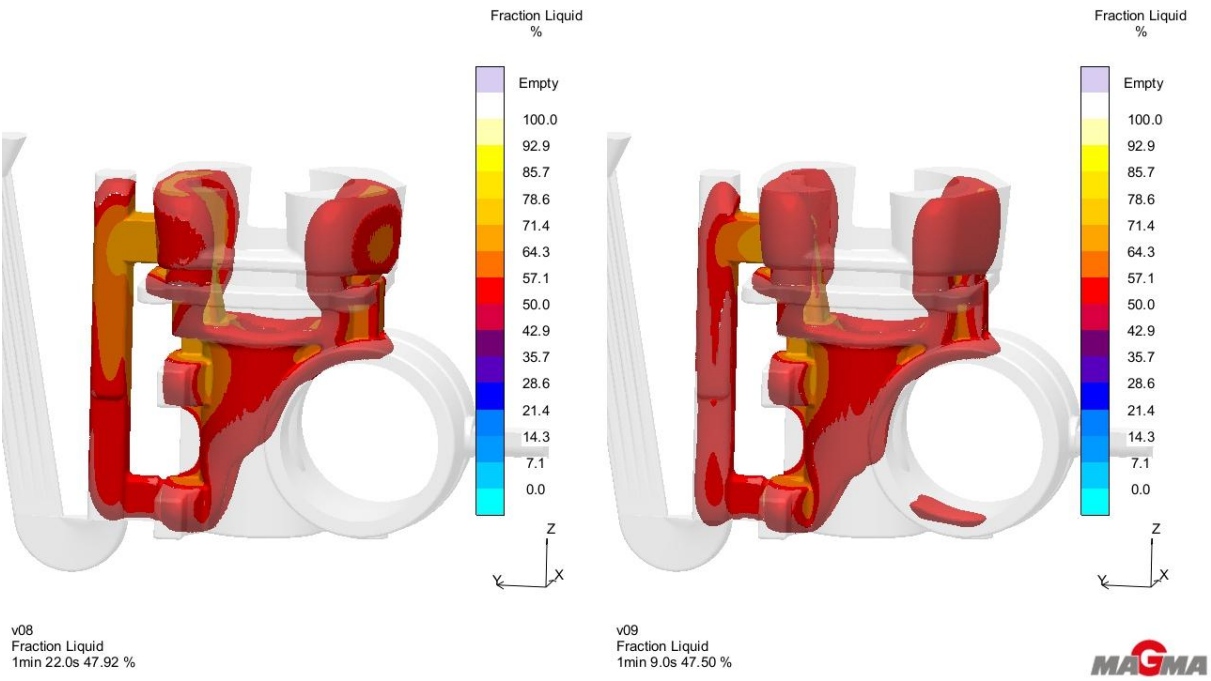
Obr. 64. Podíl tuhé fáze 87%



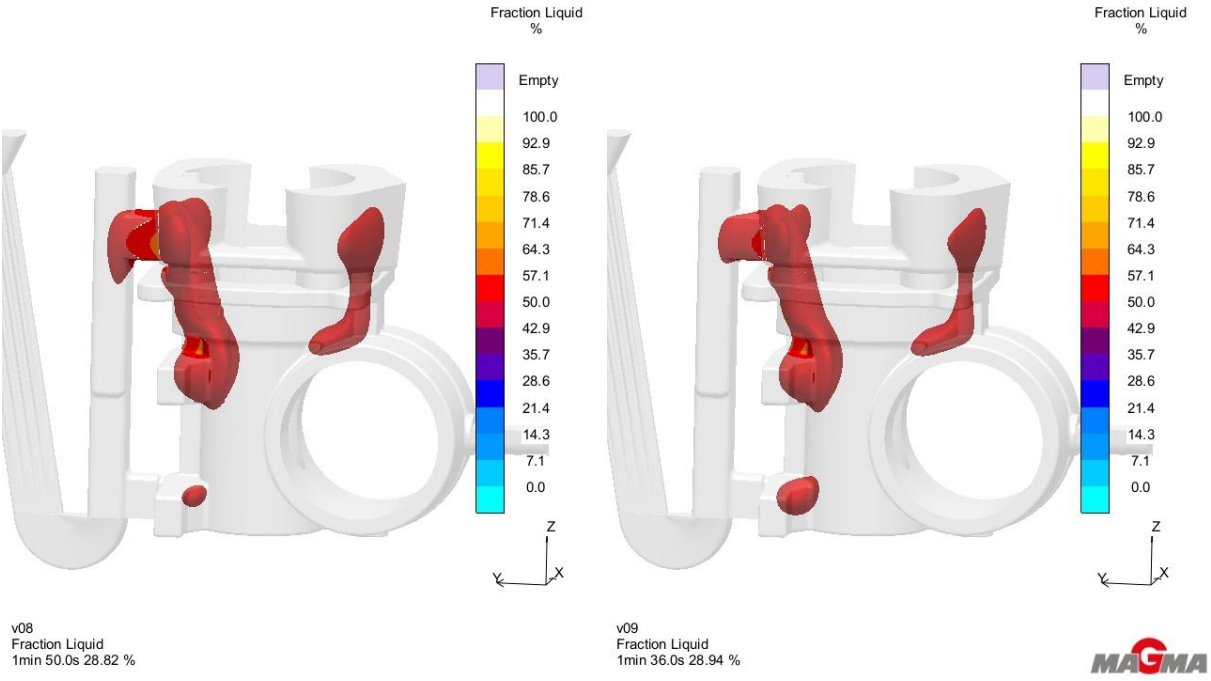
Obr. 65. Podíl tuhé fáze 73%



Obr. 66. Podíl tuhé fáze 56%



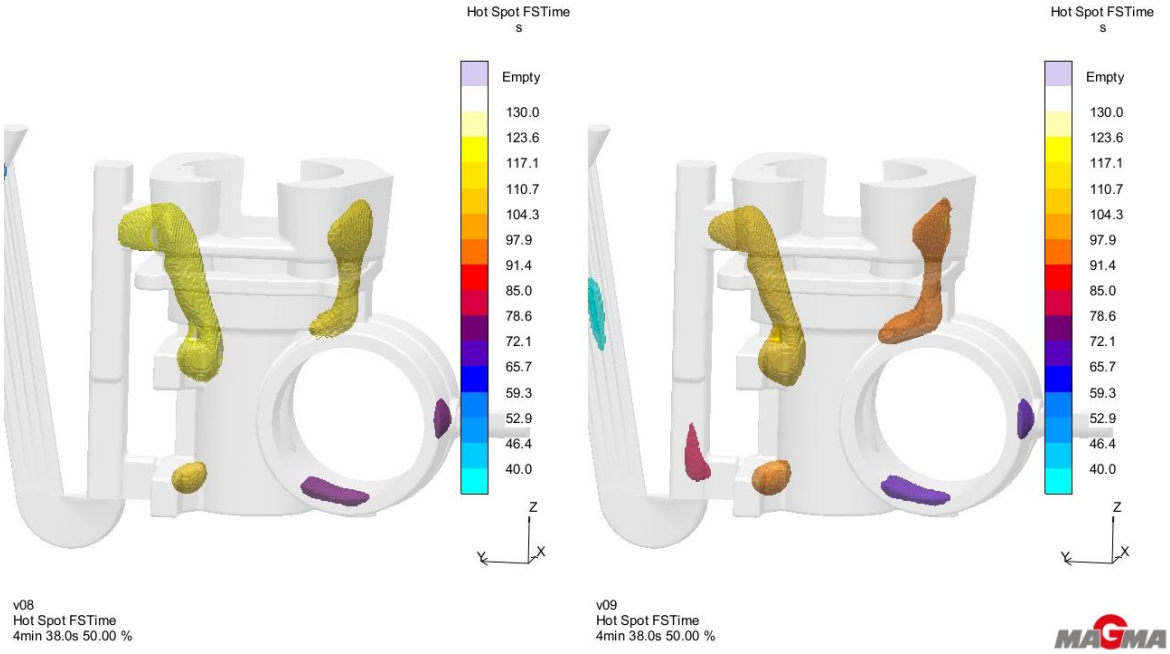
Obr. 67. Podíl tuhé fáze 47%



Obr. 68. Podíl tuhé fáze 29%

8.5. Výsledky simulace - Tepelné uzly

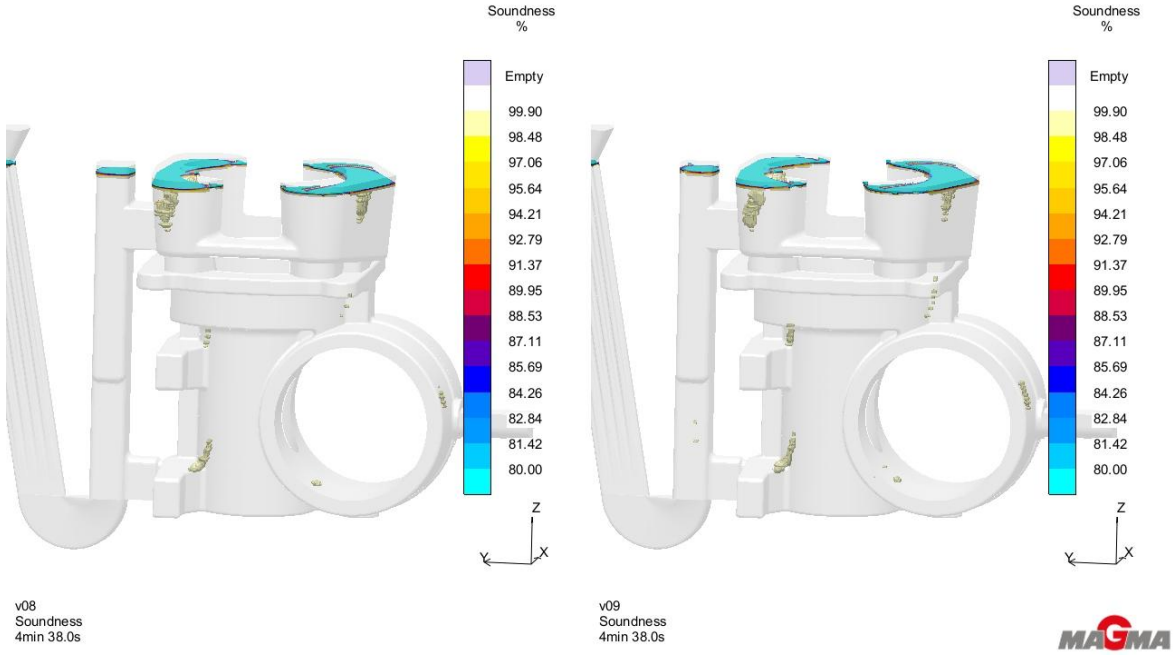
Tepelné uzly zobrazují oblasti, jejichž časy tuhnutí jsou značně odlišné od jejich okolí. Opět je zde možná predikce vzniku staženin.



Obr. 69. Tepelné uzly

8.6. Výsledky simulace - Staženiny

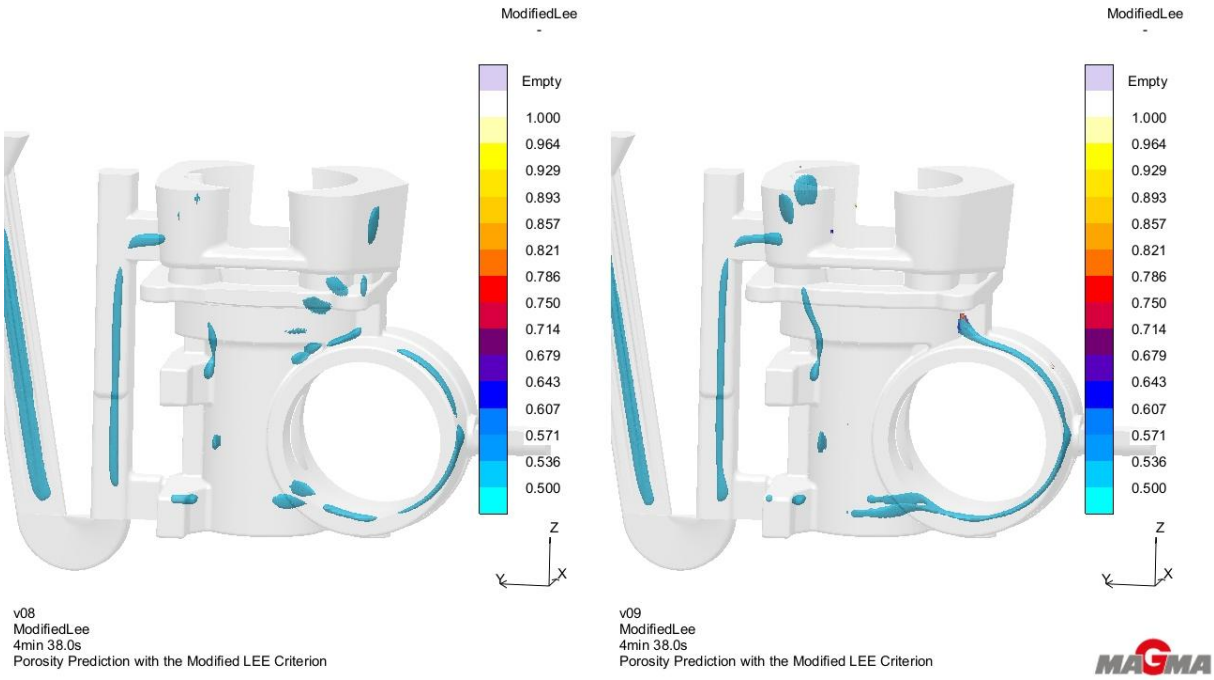
V této kapitole je zobrazena zdravost odlitku z hlediska staženin (porezity). 100% zdravost odlitku odpovídá 0% staženin (0% deficitu kovu) a naopak.



Obr. 70. Staženiny

8.7. Výsledky simulace - Mikroporezita

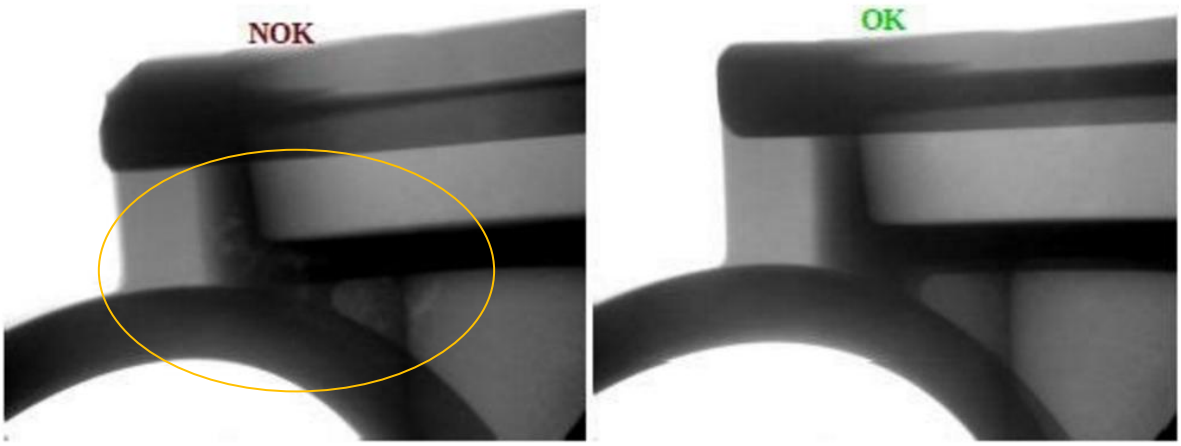
Toto kritérium je kritické převážně pro tlakutěsné odlitky. Mezní hodnota je stanovena na 0,5. Od hodnoty 1 je to potom při obrábění odlitku viditelná porezita (řediny).



Obr. 71. Mikroporezita

8.8. Rentgenový snímek odlitku a jeho vyhodnocení

Na obr. 72 je znázorněna dvojice měřených součástí. Levý obrázek odlitku vykazuje značný výskyt mikroporezity v oblasti tepelného uzlu. Při porovnání s obr. 71 je na

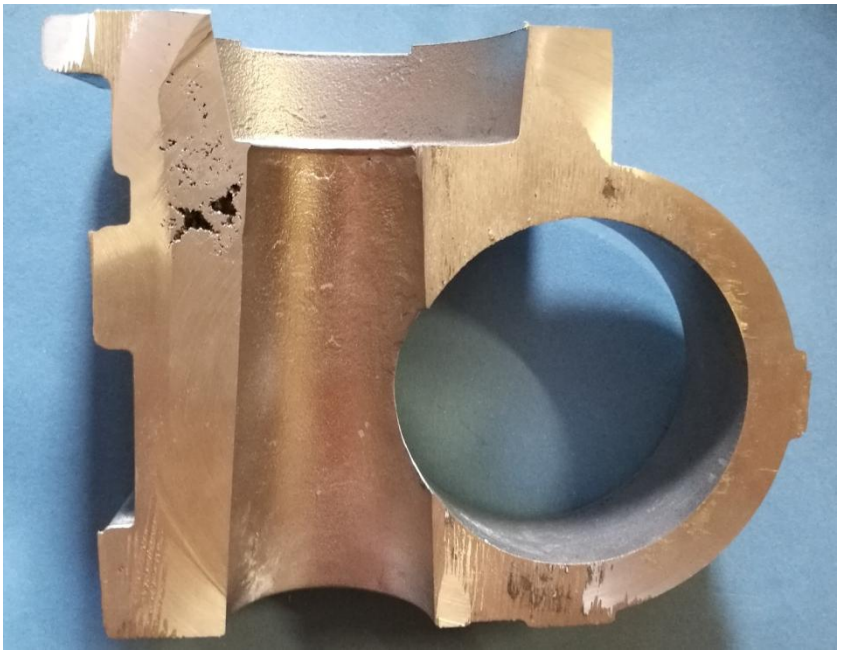


Obr. 72. Rentgenový snímek odlitku

nové verzi simulace patrné zvýšené riziko vzniku mikroporezity. Původní výsledky simulace tento problém neodhalily.

Jako nápravné opatření tohoto problému bylo zvoleno očistění daného místa od izolačního nástřiku a aplikování vysoce tepelně vodivého postřiku. Ten zaručil rychlejší odvod tepla z kritického místa a tím redukovat vznik tepelného uzlu.

Rentgenový snímek v pravé části obrázku potvrzuje, že nápravné opatření mělo pozitivní účinek na zdravost odlitku.



Obr. 73. Důsledek hrubého přehřátí formy

Na výše uvedeném obrázku je znázorněn důsledek vysokého přehřátí formy. Toto přehřátí bylo způsobeno dvěma faktory. První zcela zásadní faktor ukazoval na nedodržení předepsaného taktu odlévání a tím i postupné zvyšování teploty formy. Druhým faktorem bylo vysoké navrstvení postřiku a tím i zhoršený odvod tepla z tuhnoucího odlitku.

Celý tento problém poukazuje na nejčastější příčinu vzniku většiny vad odlitků a to technologickou nekázeň obsluhy.

ZÁVĚR

Hlavním cílem této diplomové práce byla korekce vstupních parametrů pro simulační software $MAGMA_5$ a porovnání získaných výsledků s reálně vyráběnými odlitky. Zásadní pozornost byla věnována součiniteli přestupu tepla mezi odlitkem a stěnou formy. Pro tento účel byla navržena a následně zkonstruována měřící aparatura. Výsledný design měřící aparatury byl co možná nejvíce přiblížen reálné výrobě tak, jako celkový průběh měření. Ten zahrnoval standardní přípravu formy před litím podle interních směrnic společnosti BENEŠ a LÁT a.s. Následné měření probíhalo podle obecného technologického postupu s ohledem na napodobení reálných výrobních podmínek.

Před samotným měřením byl proveden průzkum, kterým bylo zjištěno, jaké jsou nejčastěji používané separační postřiky. Průzkum byl prováděn jak mezi samotnými slévači, tak i v aktuálních technologických postupech. Na základě tohoto průzkumu bylo vybráno dvanáct nejpoužívanějších kombinací postřiků.

Po vyhodnocení získaných hodnot byly tyto výsledky implementovány do vstupních parametrů simulačního softwaru $MAGMA_5$. Při porovnání výsledků simulací původní verze a verze s nově aplikovanými parametry, jsem již na počátku mohl konstatovat, že navržená metodika se projevila jako správná. Při podrobnějším pohledu na výsledky simulace si nyní projdeme nejdůležitější rozdíly, které se objevily mezi původní a novou verzí.

Velké rozdíly byly patrné již při simulaci plnění formy, kdy kov protékající spodní částí odlitku ztratil při stoupání hladiny svou prvotní teplotu. Tato skutečnost se u původní verze neobjevila. Další velmi patrné rozdíly byly zjištěny při simulaci tuhnutí odlitku, kde se v horní oblasti nálitku po začátku tuhnutí, vytvořily charakteristické srpy. Ty byly způsobeny postupným odvodem tepla z odlitku do stěn formy. Toto bylo možné pozorovat při reálné výrobě, kdy se tekutý kov začal po naplnění formy stahovat do nejteplejšího místa v nálitku přesně tak, jak naznačovala simulace s nově zadanými vstupními parametry.

Hlavní a nejdůležitější rozdíly, které se podařilo objasnit, se projevily v oblasti mikroporezity. Tyto výsledky byly porovnány se snímky pořízenými rentgenem. V

oblastech, kde byl na rentgenovém snímku patrný výskyt mikroporezity, se riziko tohoto vzniku v původních výsledcích simulace neobjevilo. Po aplikování naměřených vstupních parametrů bylo toto rizikové místo simulací odhaleno.

Díky výsledkům simulací a následnému porovnání se skutečnými rentgenovými snímky zkoušeného odlitku jsem dospěl k závěru, že výsledné získané parametry výrazně napomáhají ke zpřesnění výsledků simulace a tím přispívají k efektivnější predikci možných vad v odlitku.

SEZNAM ZDROJŮ A POUŽITÉ LITERATURY

[1] MICHNA, Štefan, Ivan KOVÁČ, Vladivoj OČENÁŠEK, Rudolf KOŘENÝ a Jaromír DRÁPALA. Encyklopedie hliníku. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 80-890-4188-4.

[2] ROUČKA, Jaromír. Metalurgie neželezných slitin. Brno: CER, 2004.

[3] HANÁK, Karel. Nízkotlaké lití hliníkových slitin. Týnec nad Sázavou, 1982.

[4] RYŠ, Přemysl a Mojmír CENEK. Nauka O materiálu I. 1. Praha: Nakladatelství České akademie věd, 1957.

[5] LAŠTOVICA, Petr. POUŽITÍ HLINÍKU A JEHO SLITIN VE SLÉVÁRENSTVÍ [online]. Brno, 2012 [cit. 2017-07-12]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=54581. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. MARKÉTA ŘÍHOVÁ.

[6] *DYCOTE MANUAL* [online]. In: , FOSECO. England, Staffordshire, 2011 [cit. 2017-07-12]. Dostupné z: https://www.vesuvius.com/../DYCOTE_e.pdf.downloadasset.pdf

[7] *PosiTector 6000 FHXS1* [online]. In: . [cit. 2017-07-12]. Dostupné z: http://www.defelsko.com/p6000/og/p6000.php?g=FHXS&m=1

[8] BONOLLO, Franco a Stefano ODORIZZI. *Numerical Simulation of Foundry Processes*. 1. Padova ITALY, 2001.

[9] Tesydo s.r.o. *Uživatelská příručka WIS*. 2. Praha, 2010.

[10] NĚMEC, Milan, Bohumír BEDNÁŘ a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. *Teorie slévání*. 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06026-1.

[11] PRŮCHA, Adam. *Měření teplot na slévárně přesného lití*. Praha, 2016. DIPLOMOVÁ PRÁCE. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE.

[12] Magmasoft: *MAGMA Committed to Casting Excellence* [online]. 2012 [cit. 2017-07-13]. Dostupné z: http://www.magmasoft.com/en/

[13] ČSN EN 1706. *Hliník a slitiny hliníku – Odlitky – Chemické složení a mechanické vlastnosti.* Praha : Český normalizační institut, 1999. 20 s.

[14] GRUZLESKI, J. E., CLOSSET, B. E. *The Treatment of Liquid Aluminium – Silicon Alloys*. Des Plaines : American Foundrymen´s Society, Inc., 1999.

[15] Foseco, *Non-Ferrous Foundryman's Handbook*. Eleventh edition. Foseco : Butterworth Heinemann, 2004.

[16] VOLF, Ivo, Miroslava JAREŠOVÁ a Miroslav OUHRABKA. *Přenos tepla* [online]. In: . s. 40 [cit. 2017-07-12]. Dostupné z: http://fyzikalniolympiada.cz/texty/texttz.pdf

[17] *Přenos tepla* [online]. In: . s. 10 [cit. 2017-07-12]. Dostupné z: http://kfy.zcu.cz/export/sites/kfy/dokumenty/FYSV/PrenosTepla.pdf

[18] *PosiTector 6000 FS1* [online]. Praha [cit. 2017-07-12]. Dostupné z: http://www.qtest.cz/defelsko/fs1.htm

[19] HERR, Tomáš. *MĚŘENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI* [online]. BRNO, 2013 [cit. 2017-07-12]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=69843. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Beneš, Ph. D.

[20] BITTNER, Jiří. *Měření tepelných vlastností materiálů* [online]. Zlín, 2006 [cit. 2017-07-12]. Dostupné z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/1810/bittner_2006_bp.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Petr Urbanec.

[21] ZHANG, X. H., et al. *Effect of modification treatment on the microstructure and mechanical properties of Al–0.35%Mg–7.0%Si cast alloy*. Materials & Design. 2010,. 4408 - 4413. ISSN 0261-3069.

[22] HOLEČEK, Stanislav; ŘEZNÍČEK, Pavel. *Slitiny AlSi : Jejich vlastnosti a zpracování.* Praha, 1996.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

apod.	A podobně
a.s.	Akciová společnost
atd.	A tak dále
č.	Číslo
hm.	Hmotnostních
např.	Například
obr.	Obrázek
tab.	Tabulka
tzv.	Takzvaný

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Gravitační lití

Obrázek 2: Izolační obklad nálitku

Obrázek 3: Udržovací odporové pece - kelímkové

Obrázek 4: Ruční zakládání jádra

Obrázek 5: Mechanizované odformování

Obrázek 6: Pískové jádro

Obrázek 7: Schéma nízkotlakého licího stroje

Obrázek 8: Nízkotlaký licí stroj

Obrázek 9: Mezikus

Obrázek 10: Schéma NTL formy

Obrázek 11: a) podeutektická, b) eutektická, c) nadeutektická struktura Al-Si

Obrázek 12: Fázový diagram systému Al – Si a charakteristiky mikrostruktur slitin Al – Si s různým obsahem křemíku

Obrázek 13: Posuv eutektického bodu a eutektické přímky po modifikování

Obrázek 14: Prostorový tvar hexagonální desky nemodifikovaného eutektického křemíku ve slitině Al-Si

Obrázek 15: Vícenásobné dvojčatní v hexagonálním krystalu

Obrázek 16: Přednostní růst krystalu křemíku ve směru <211>

Obrázek 17: Struktura různých druhů eutektika slitiny Al-Si

Obrázek 18: Částice křemíku v nemodifikovaném eutektiku (vlevo) a v modifikovaném eutektiku (vpravo)

Obrázek 19: Forma ošetřená základním nástřikem

Obrázek 20: Rozdíl mezi hladkým a drsným povrchem

Obrázek 21: Nanášení postřiku stříkáním

Obrázek 22: Bezkontaktní pyrometr

Obrázek 23: Zvyšování izolační hodnoty

Obrázek 24: Pomůcky pro určení hustoty

Obrázek 25: Hustoměr s racionální stupnicí Baumé

Obrázek 26: Nasávací pistole (rosenka)

Obrázek 27: Air – less systems

Obrázek 28: Elcometr 157

Obrázek 29: PosiTector 6000

Obrázek 30: Kryogenní tryskací zařízení

Obrázek 31: 3D model měřící formy

Obrázek 32: Začátek tuhnutí

Obrázek 33: Postup tuhnutí směrem do odlitku

Obrázek 34: Aktivace tepelného toku uvnitř válečku

Obrázek 35: Výsledná porezita

Obrázek 36: Finální podoba zkušební formy

Obrázek 37: Měřící aparatura verze_1

Obrázek 38: Zkouška vyjímání termočlánku

Obrázek 39: Měřící stanice WIS s převodníky

Obrázek 40: Termočlánek typu "K"

Obrázek 41: Schéma připojení termočlánků

Obrázek 42: Schéma zapojení termočlánků uvnitř etalonového válečku

Obrázek 43: Tryskaný povrch zkušební formy

Obrázek 44: Průběh předehřevu

Obrázek 45: Postup aplikace postřiku

Obrázek 46: Etanolový váleček

Obrázek 47: Stativ

Obrázek 48: Měřící soustava připravená pro měření

Obrázek 49: Příklad pořízeného záznamu

Obrázek 50: Vyhodnocení teplot

Obrázek 51: Finální aplikace dílu jako převodovka v automobilové myčce

Obrázek 52: Plnění 4%

Obrázek 53: Plnění 20%

Obrázek 54: Plnění 40%

Obrázek 55: Plnění 60%

Obrázek 56: Plnění 80%

Obrázek 57: Plnění 100%

Obrázek 58: Tuhnutí 2,17%

Obrázek 59: Tuhnutí 10,18%

Obrázek 60: Tuhnutí 20,59%

Obrázek 61: Tuhnutí 36%

Obrázek 62: Tuhnutí 87%

Obrázek 63: Podíl tuhé fáze 97%

Obrázek 64: Podíl tuhé fáze 87%

Obrázek 65: Podíl tuhé fáze 73%

Obrázek 66: Podíl tuhé fáze 56%

Obrázek 67: Podíl tuhé fáze 47%

Obrázek 68: Podíl tuhé fáze 29%

Obrázek 69: Tepelné uzly

Obrázek 70: Staženiny

Obrázek 71: Mikroporezita

Obrázek 72: Rentgenový snímek odlitku

Obrázek 73: Důsledek hrubého přehřátí formy

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Seznam používaných postřiků a jejich vlastnosti

Tabulka 2: Nejčastěji používané kombinace postřiků

Tabulka 3: Chemické složení použité slitiny

Tabulka 4: Parametry sondy "FS"

Tabulka 5: Výsledky měření tloušťek postřiku

Tabulka 6: Vyhodnocení součinitele přestupu teplo pro danou kombinaci postřiků

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P 1: Materiáloví atest použitého polotovaru

Příloha P 2: Chemická analýza etalonového materiálu

Příloha P 3: Certifikát o kalibraci měřící sondy PosiTector 6000

Příloha P 4: Technická dokumentace formy

Příloha P 5: Grafické záznamy z měření

Příloha P1

Materiáloví atest použitého polotovaru

ISD DUNAFERR

Test report

ISO 9001

Modification 0

A03 Statement No.: **0027283600/000008**

CHEMICAL INSPECTION		C71 C	C72 Mn	C73 Si	C74 S	C75 P	C76 N	C77 Al	C78 Cu	C79 Cr	C80 Ni	C81 V	C82 Nb	C83 Ti	C84 B	C85 Ca	C86 Mo	C87 O	C88 Zr	C89 As	C90 Sn	C91 W	C92 Co	C93 Cev	C94:				
Standard requirement min:	S235JR																												
Standard requirement max:	S235JR	0,17	1,40		0,045	0,045	0,009																						
Contract requirement min:																													
Contract requirement max:				0,030		0,025																							
Charge chemistry	719648	0,13	0,52	0,013	0,016	0,014	OK	0,042	0,013	0,025	0,054	0,004	0,005	0,002	0,0005	0,001	0,005							0,23					
	719654	0,13	0,49	0,012	0,013	0,010	OK	0,038	0,014	0,015	0,051	0,002	0,005	0,002	0,0005	0,001	0,005							0,22					
Finished product chemistry																													

MECHANICAL INSPECTION	C10		TENSILE TEST											BENDING TEST						IMPACT TEST								
			C01	C02	C04	C11 Yield point tip	C11 Yield point N/mm²	C12 Tens. N/mm²	C13 Elongation tip	C13 Elongation %	C13 Elongation tip	C13 Elongation %	C14 Contr. %	C15 Relv/Rm	C01	C02	C04	C51 Bend. rad. (mm)	C56 Bend angle	C52 Result	C44 Temp. °C	C01	C02	C04	C40-41 Type	C42 Impact 1 J	C42 Impact 2 J	C42 Impact 3 J	C43 Average J
Standard requirement min:	S235JR			4		REH	235	340	A5	24,0																			
Standard requirement max:	S235JR							470																					
Contract requirement min:						REH	235	340	A5	24,0																			
Contract requirement max:								470																					
SAMPLE (No.)	90000492913	2015521696	5	4	1	REH	320	424	A5	36,3				0,76															
	90000492913	2015521697													5	4	1	0A	180	stf									
	90000492914	2015521698	5	4	1	REH	316	419	A5	36,6				0,76															
	90000492914	2015521699													5	4	1	0A	180	stf									

Code according to EN 10168:2004

C10 Shape of sample: **The sample is a quadratic cross-section taken from sheet in every case.**

C01 Sample taken from: 5 = beginning of coil; 6 = end of coil; 7 = middle of coil; 8 = other

C02 Direction of samples: 3 = L = lengthwise; 4 = T = cross; 5 = Z = diagonal

C04 Status of samples: 1 = rolled; 2 = annealed; 9 = normalised

D01 Marking and identification, surface properties, shape and dimension properties:
Marking and identification, control of surface properties, form and measure properties are completed, the product complies with the contract requirements.

Z01 **The product complies with the contract requirements.**

D51 Supplementary information:
1. Radioaktivity: We verify that the produced and delivered products don't increase the radioactivity in environment, the radioactivity is under the normal value of 100 Bq/kg.
2. 1N/mm2=1MPa

ISD DUNAFERR Zrt.
Minőségügyi Főosztály
Csőke Gyöngyi
1048.

A05.1 Statement made by

Z03 Stamp of inspection representative

ISD DUNAFERR Zrt.
Minőségügyi Főosztály
Bogárné Nagy Magdolna
1044.

Příloha P2

Chemická analýza etalonového materiálu

6.3.2017 15:50:45

Q4 Tasman results

Popis vzorku			
Jakost	Vzorek	Meril	Poznamka

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.117	0.105	0.359	0.0067	0.024	<6.000	<0.0050	0.029	0.073	0.0027
2.	0.117	0.108	0.364	0.0073	0.026	<6.000	<0.0050	0.031	0.075	0.0035
3.	0.119	0.107	0.369	0.0074	0.026	<6.000	<0.0050	0.030	0.075	0.0025
⇑										
∅	**0.118**	**0.107**	**0.364**	**0.0071**	**0.025**	**<6.000**	**<0.0050**	**0.030**	**0.074**	**0.0029**
⇓										
σ	0.0012	0.0016	0.0050	0.00038	0.0012			0.00100	0.0012	0.00053
υ	1.017	1.495	1.374	5.352	4.800			3.333	1.622	18.28

	As	B	Co	N	Nb	Sn	Ti	V	W	Fe
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.011	<0.0010	0.0014	0.019	<0.0010	<0.00050	<0.0010	<0.0010	<0.020	93.22
2.	0.012	<0.0010	<0.0010	0.021	<0.0010	<0.00050	<0.0010	<0.0010	<0.020	93.21
3.	0.0097	<0.0010	<0.0010	0.021	<0.0010	<0.00050	<0.0010	<0.0010	<0.020	93.20
⇑										
∅	**0.011**	**<0.0010**	**0.0011**	**0.020**	**<0.0010**	**<0.00050**	**<0.0010**	**<0.0010**	**<0.020**	**93.21**
⇓										
σ	0.0012		0.00023	0.0012						0.0100
υ	10.91		20.91	6.000						0.011

Příloha P3

Certifikát o kalibraci měřící sondy PosiTector 6000

DeFelsko®

DeFelsko Corporation
802 Proctor Avenue
Ogdensburg, New York 13669-2205 USA

Certificate of Calibration

Certificate Number: 13-319901

Nomenclature: Coating Thickness Instrument
Manufacturer: DeFelsko Corporation
Model: PosiTector 6000 FS Probe
Probe Serial No: 213278
Note: Probe serial # on connector

Laboratory Environment
Temperature: 23 ± 5°C
Relative Humidity: Up to 95%

Date of Calibration: November 11, 2013

Test Method: This coating thickness instrument was calibrated to manufacturer's specifications according to procedure MP 2530 using Thickness Reference Standards calibrated by an accredited laboratory and traceable to NIST or PTB through certificates 3659 PTB 02, 66 PTB 05, 67 PTB 05, 4945 DKD-K-02301 05-09 and 01758 DKD-K-00305 05-05.

Reference Standard Serial #	Min	Reference Thickness * (microns)	Max	Instrument Reading (microns)
10386F	71.76	74.50	77.25	72
8944F	247.70	252.22	256.74	248
8623F	1480.22	1497.19	1514.16	1492

*Maximum uncertainty ± 0.43 microns

Calibration Performed by: Casey Petell

Casey Petell

Technician

DeFelsko Corporation operates under Management Procedures intended to implement the requirements of ISO 9001, ISO 10012-1, ISO 17025 and ANSI/NCSL Z540-1. This document certifies that the instrument met published specifications of:

0-50 microns ± (1.0 microns + 1% of reading)
>50 microns ± (2.0 microns + 1% of reading)

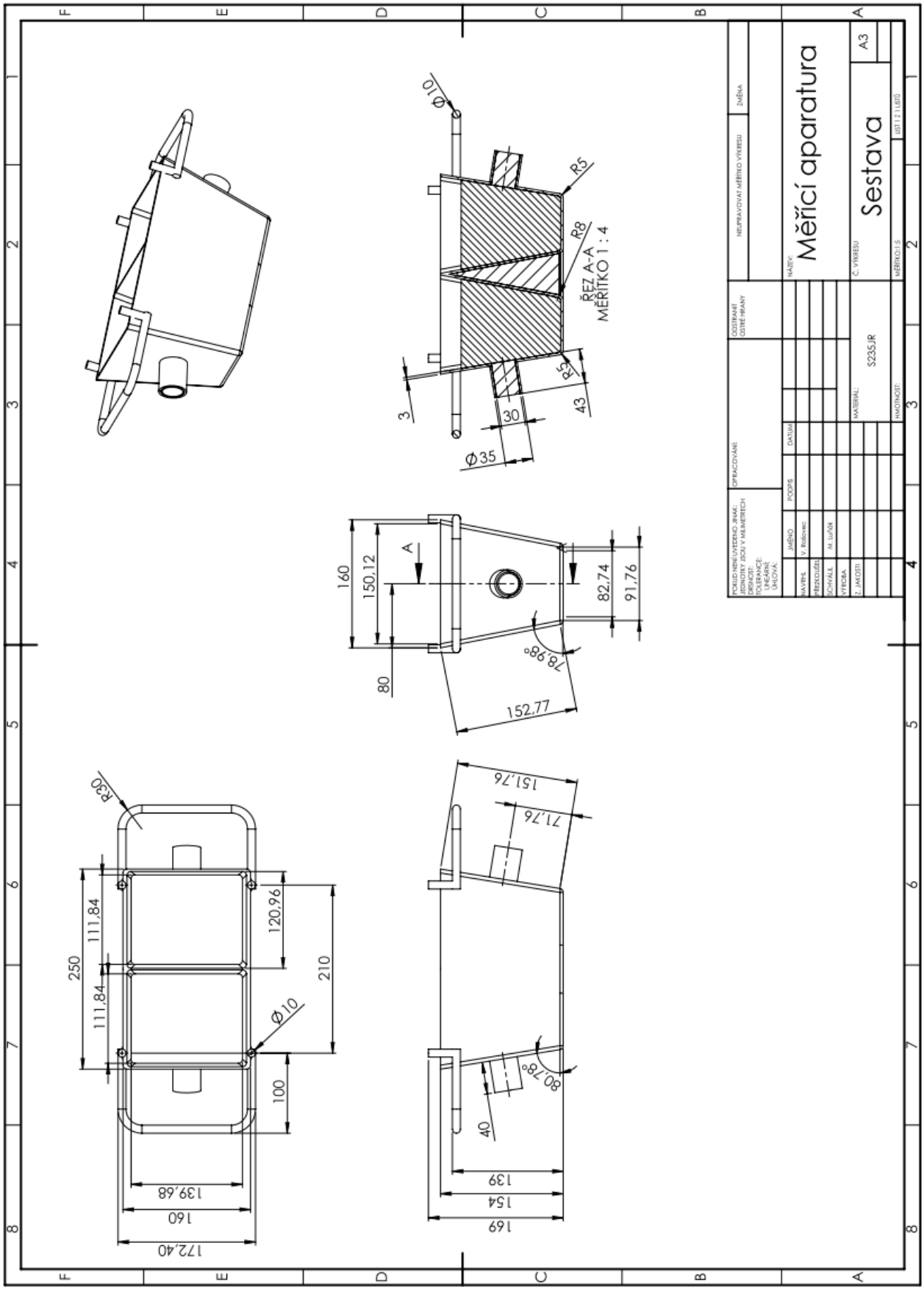
Calibration interval will vary based on usage, handling and storage conditions. This certificate shall not be reproduced, except in full, without the written approval of DeFelsko Corporation.

Page 1 of 1

Management Form 2007.02-7/2009

Příloha P4

Technická dokumentace formy

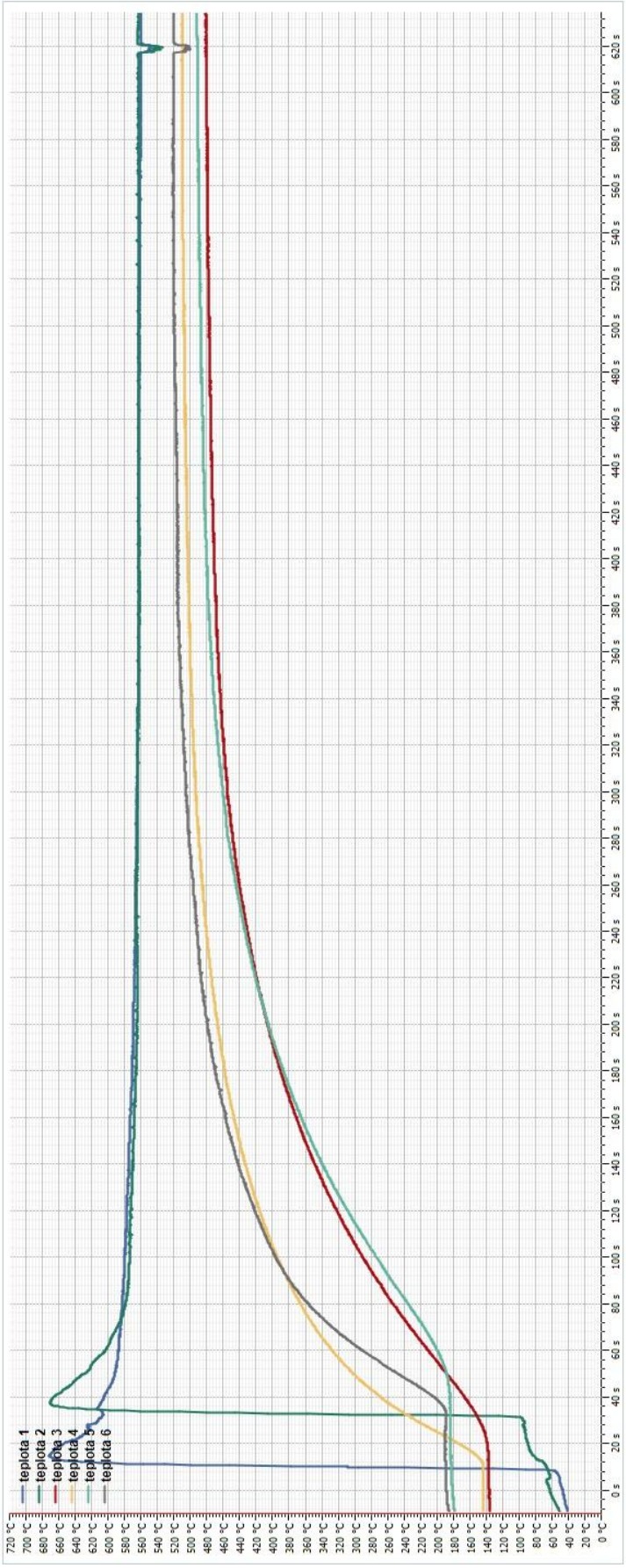

Měřící aparatura
Sestava
A3
S235JR
ŘEZ A-A
MĚŘÍTKO 1 : 4
R5
R8
R3
Ø10
Ø35
30
43
3
160
150,12
80
82,74
91,76
78,98°
152,77
A
R30
111,84
250
120,96
210
100
139,68
160
172,40
151,76
71,76
80,78°
40
139
154
169

Příloha P5

Grafické záznamy z měření

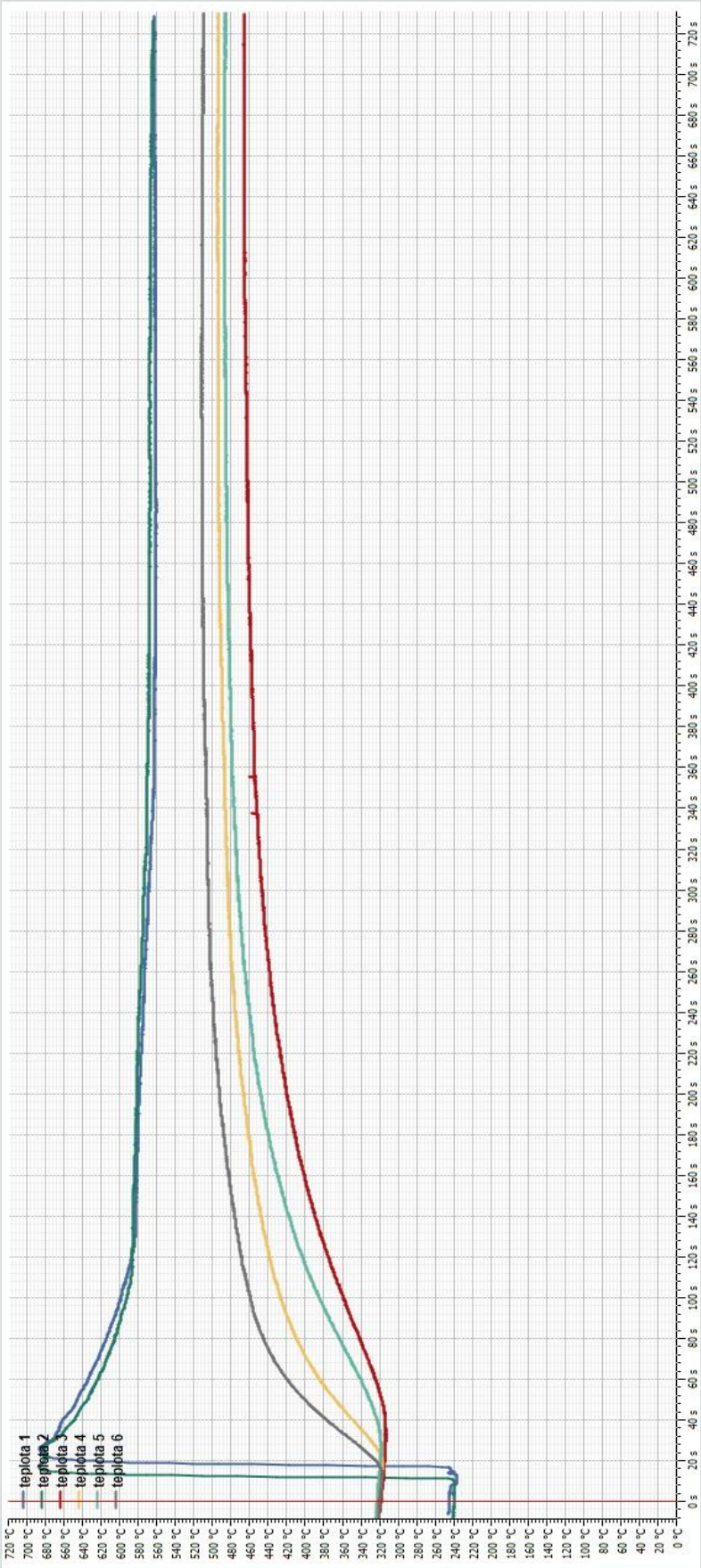
Dycote 34, Aquanet

Dycote 34



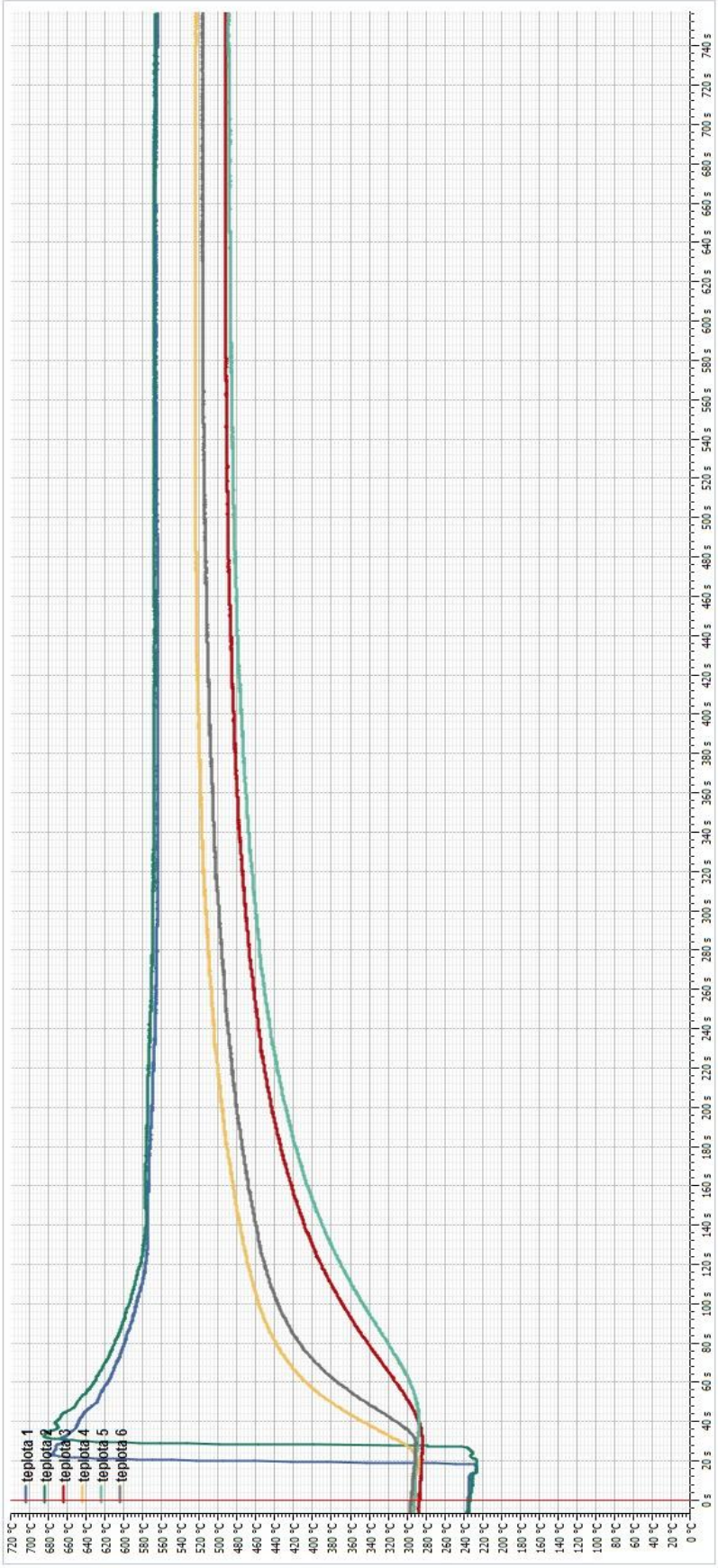
Cilollin 223G, Dycote 34, Aquanet

KS 92, Dag 193



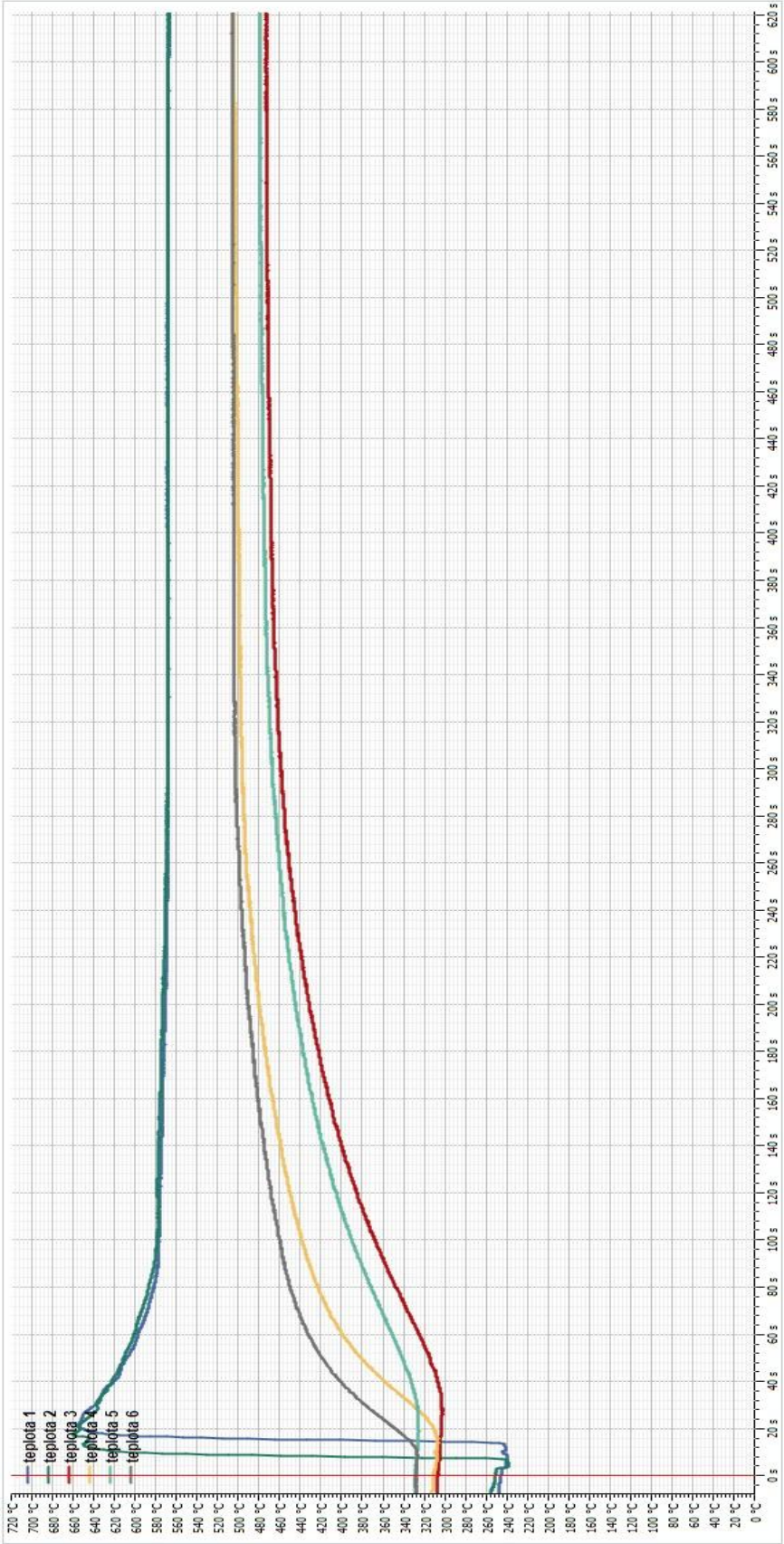
KS 92, Cilollin 223G

KS 92, Dycote 34



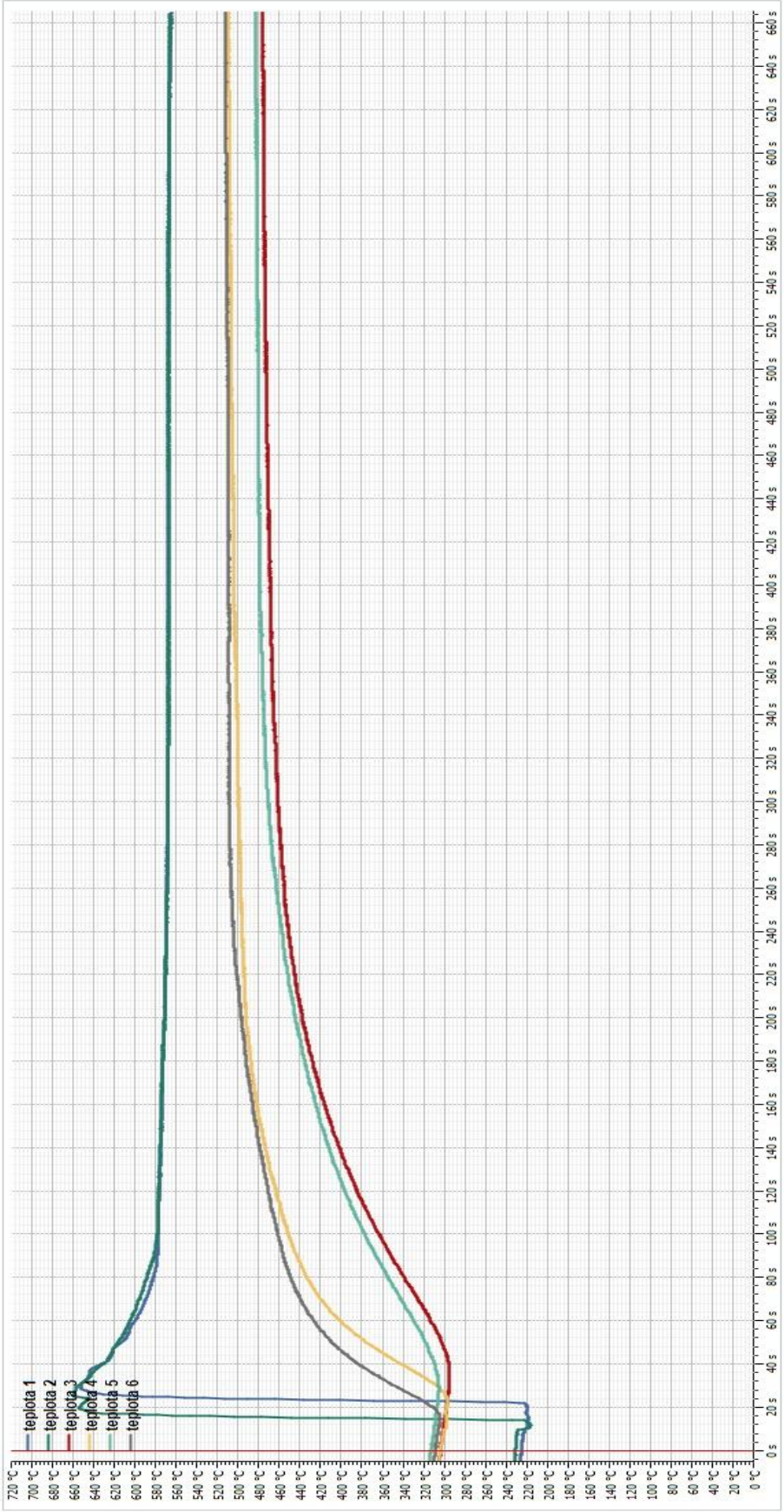
KS 92, Cilollin 223G, Aquanet

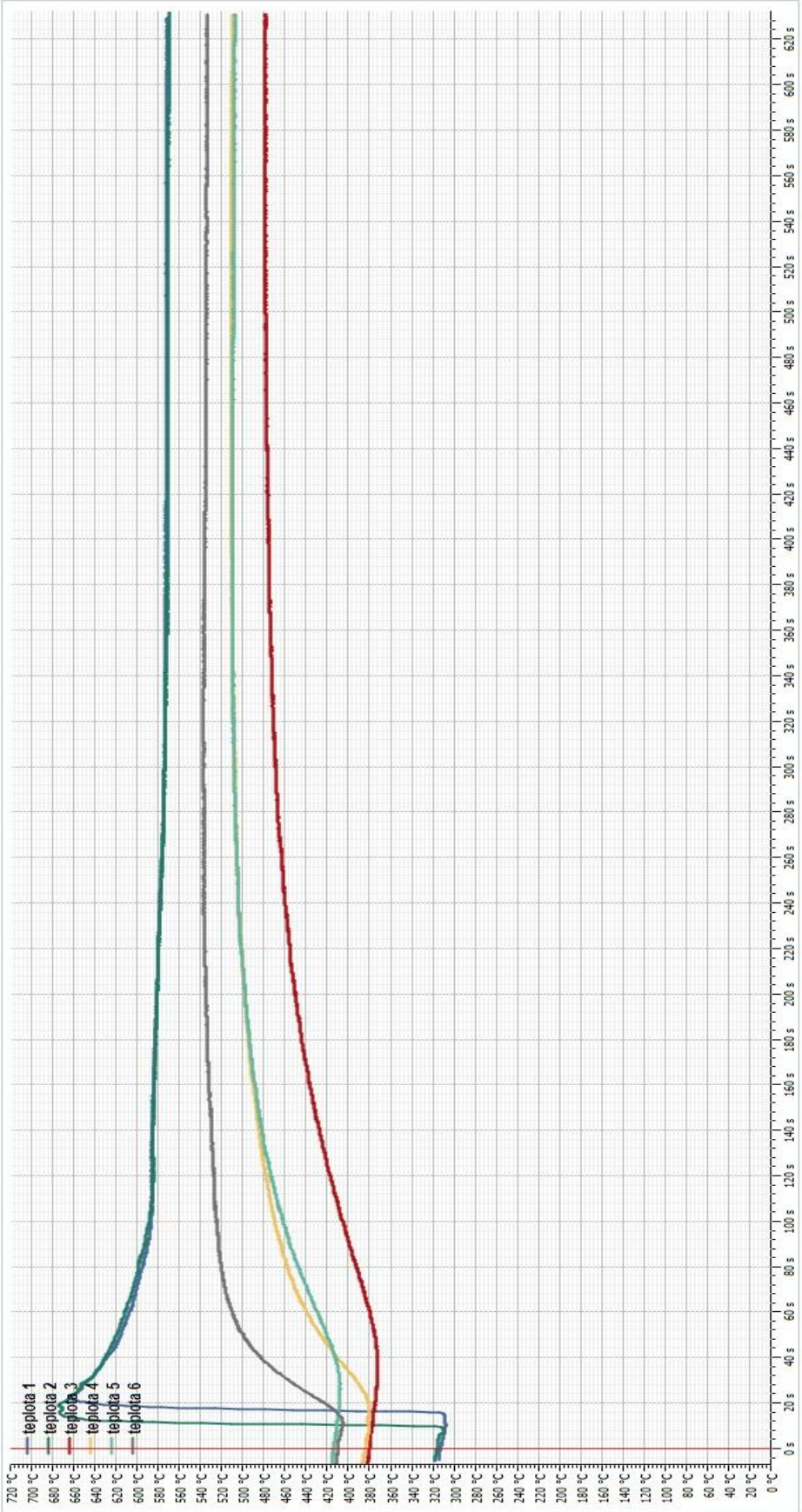
KS 92, Dycote 34, Aquanet



KS 92, Dag 193, Aquanet

Mix 34 a 39, Aquanet



Steiger Woho-výmaz

Aquanet