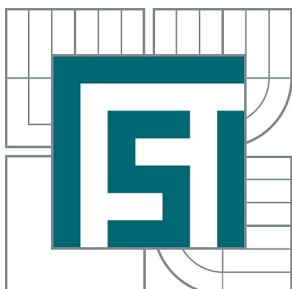


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ŘÍZENÍ KVALITY ODLITKŮ ZE SLITIN HLINÍKU ODLÉVANÝCH GRAVITAČNĚ DO KOVOVÝCH FOREM

QUALITY CONTROL OF CASTINGS FROM ALUMINIUM ALLOYS CAST BY GRAVITY CASTING
INTO METAL MOULDS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JIŘÍ KOPLÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JAROMÍR ROUČKA, CSc.

BRNO 2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jiří Koplík

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

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

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

Řízení kvality odlitků ze slitin hliníku odlévaných gravitačně do kovových forem

v anglickém jazyce:

Quality control of castings from aluminium alloys cast by gravity casting into metal moulds

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na analýzu průběhu procesu výroby odlitků ze slitin hliníku gravitačním litím do kovových forem. Práce zahrnuje tvorbu výkresové dokumentace odlitku, návrh technologie odlitku, konstrukce forem a provedení zkoušek odlévání a vyhodnocení jakosti odlitků.

Cíle bakalářské práce:

Tvorba 3D modelu odlitku a konstrukce formy, vytvoření výkresové dokumentace. Navržení technologie odlitku. Odlití zkušebních odlitků a vyhodnocení jejich kvality a přesnosti.

Seznam odborné literatury:

1. Aluminium Casting Technology Handbook. Edited by DL Zalensas. 2th ed. Des Plaines: AFS, 1993. 350 p. ISBN 0-87433-157-9.
2. CAMPBELL, J. Castings. Oxford: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2006. ISBN 0-7506-4790-6.
3. MICHNA, S., aj. Encyklopedie hliníku. Děčín: ALCAN, 2005. 699 s. ISBN 80-89041-88-4.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 14.11.2014

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na komplexní technologickou přípravu výroby odlitku SUPPORT T160 pro konkrétního zákazníka. Přípravu, konstrukci a výrobu kovové formy, experimentální zkoušky odlévání ve slévárně, měření a kontrolu odlitku. Při práci bylo postupováno využitím výpočetní techniky při tvorbě odlitku, konstrukci formy, simulaci lití, tuhnutí odlitku a teplotních polí formy.

Klíčová slova

Gravitační lití, odlitky ze siluminu, kovová forma, technologická příprava, simulace lití a tuhnutí odlitku, experimentální odzkoušení ve slévárně.

ABSTRACT

My thesis was focused on the complex technological preparation of the production of a cast SUPPORT T160 for a client. The thesis is divided in the following parts; preparation, construction and production of the metal mold, experimental test of casting foundry, measurement and casting control. A computer software was used as a help in the creation of the cast, construction of the mold, simulation of casting, solidification and temperature.

Key words

Gravity casting, castings from silumin, metal mold, technological preparation, simulation of casting and solidification, experimental tests in the foundry.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOPLÍK, Jiří. *Řízení kvality odlitků ze slitin hliníku odlévaných gravitačně do kovových forem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 46 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Řízení kvality odlitků ze slitin hliníku odlévaných gravitačně do kovových forem vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, které jsou částí této práce.

.....
Datum

.....
Koplík Jiří

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji:

Doc. Ing. Jaroslavu Roučkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

Společnosti MOOD International, s.r.o. za výrobu formy.

Společnosti KOVOLIT Česká, s.r.o. za experimentální odzkoušení odlití formy, provedení zkoušky měření chemického složení a měření rozměrů odlitku.

Obsah

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
1. Úvod	9
2. Technologická a technická příprava výroby odlitku	10
2.1 Výkres odlitku.....	10
2.2 Materiál odlitku	11
2.3 Tepelné zpracování.....	11
2.3.1 Vytvrzování.....	12
2.3.2 Žihání	13
2.4 Technologie odlévání do kovových forem.....	13
2.4.1 Gravitační lití.....	14
2.5 Konstrukce formy	15
2.5.1 Zásady návrhu formy	15
2.5.2 Konstrukce formy pro odlitek SUPPORT T160.....	16
2.5.3 Stroj pro odlévání a tuhnutí	18
2.5.4 Konstrukce formy	19
2.6 Numerická simulace	20
2.6.1 Plnění dutiny formy kovem	22
2.6.2 Teplotní režim formy a odlitku	23
2.6.3 Cyklování	24
2.6.4 Predikce možných vnitřních vad – staženiny.....	25
2.7 Výroba formy.....	26
2.8 Vady odlitků.....	27
2.8.1 Stručný popis nejčastěji se vyskytujících vad	27
2.8.2 Posuzování vad	29
2.8.3 Kontrola rozměrů	29
2.9 Tavení a odlévání.....	31
2.10 Čištění a apretura odlitku	31
2.10.1 Čištění odlitku.....	31
2.10.2 Apretura odlitku	31
3. Experimentální zkoušky ve slévárně.....	31
3.1 Tavení materiálu a jeho metalurgická úprava	32

3.2	Odlévání odlitku SUPPORT T160	32
3.3	Měření teplotního pole formy a odlitku.....	33
3.4	Porovnání experimentálního měření teplot formy s průběhy teplot zjištěnými simulací ...	38
4	Kontrola odlitku.....	39
4.1	Kontrola chemického složení.....	39
4.2	Kontrola měření teploty taveniny	40
4.3	Kontrola rozměrů	40
4.4	Kontrola vnitřní homogenity – řediny	41
	Závěr.....	42
	Seznam použitých zdrojů.....	43
	Seznam tabulek	43
	Seznam použitých symbolů a zkratk.....	44
	Seznam obrázků	45
	Přílohy.....	46

1. Úvod

Výroba odlitků ze slitin hliníku do kovových forem, je významnou technologií výroby hliníkových odlitků, která našla užití v celé řadě průmyslových odvětví, jako je automobilový průmysl, elektrotechnika, přístroje, zboží široké spotřeby a podobně.

Výroba odlitků ze slitin hliníku je realizovaná v cca 50% tlakovým litím, 40 – 45% gravitačním a nízkotlakým litím a 5 – 7% litím do písku. Každá z těchto metod výroby odlitků má určité specifické podmínky, vedle všeobecných podmínek, jako je například tavení, tepelné zpracování, čištění a apretura odlitku.

Bakalářská práce byla zadaná firmou MOOD International s.r.o. (dále jen MOOD) s praktickým výstupem výsledku práce pro slévárnu KOVOLIT Česká s.r.o. (dále jen KOVOLIT). V této slévárně jsem provedl i zkoušky při odlévání odlitku. Ve společnosti MOOD podle mé konstrukce, byla vyrobena forma. Pro posouzení mé práce jsem provedl měření rozměru odlitku, prověrku vnitřní jakosti odlitku a zhodnocení vzorku odlitku s požadavky zákazníka KOVOLIT zadaným výkresem odlitku.

Na základě měření a hodnocení odlitku, zjištěných výrobních časech odlitku slévárna technologicky uvolnila odlitek pro sériovou výrobu. Pro povolení sériové výroby odlitků zákazník odsouhlasí odlitek. Na základě vyjádření zákazníka, bude povolena sériová výroba a budou vystaveny objednávky.

Při práci jsem vycházel z teoretických poznatků mně dostupné literatury a zkušeností společnosti MOOD a slévárny KOVOLIT.



Obr. 1: Odlitek SUPPORT T160

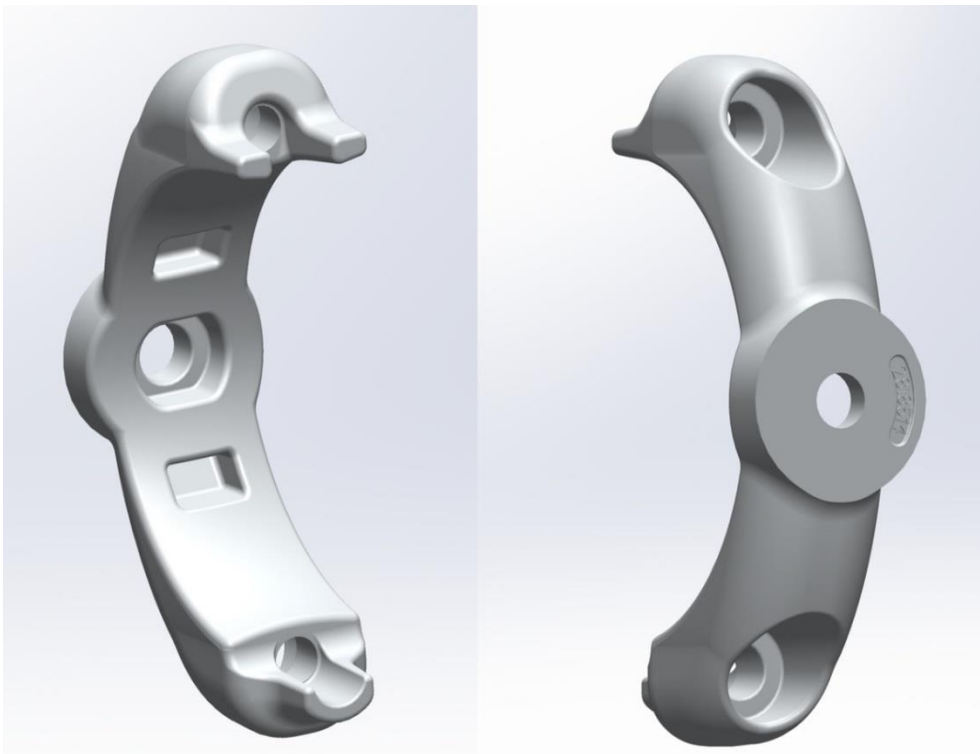
2. Technologická a technická příprava výroby odlitku

Technologická a technická příprava výroby odlitku byla rozplánována do jednotlivých kroků:

- Výkres odlitku.
- Materiál odlitku a případné tepelné zpracování.
- Technologie odlévání.
- Technologie odlitku.
- Numerická simulace.
- Konstrukce formy.
- Vady odlitku.
- Výroba formy.
- Tavení a odlévání.

2.1 Výkres odlitku

Zadáním pro mou práci byl výkres a 3D model výrobku. Navrhování modelu a následně veškerou výkresovou dokumentaci jsem prováděl v programu SolidWorks. Proto při technologických úpravách odlitku se vycházelo přímo ze zadaného 3D modelu výrobku, který se dále měnil v daném programu SolidWorks. U zadaného modelu se zvětšil objem o obvyklé smrštění odlitku 0,8%. Podle technologa KOVOLIT odpovídá toto procento smrštění kovu po ztuhnutí odlitku i dlouhodobým zkušenostem slévárny. Na odlitku nebylo potřeba žádných dalších technologických úprav (zkosení stěn, zaoblení hran, přídavky na obrábění a jiné), jelikož při navrhování daného výrobku se již počítalo se sériovou výrobou odlévání, proto již ze zadání tvary modelu technologicky vyhovovaly. Veškeré stěny byly na výrobku navrženy tak, aby se odlitek dal lehce vyjmout z formy. Na základě vytvarovaného 3D modelu se dále vytvořil výkres odlitku Příloha č. 1.



Obr. 2: 3D model odlitku ze dvou pohledů

2.2 Materiál odlitku

Pro daný výrobek byl výkresem stanoven materiál odlitku, označen EN AC-Al Si7Mg0,6, který má vhodné jak chemické, tak i mechanické vlastnosti pro danou součást a byl stanoven způsob výroby a to gravitačním odléváním do kovové formy.

Označení materiálu odlitku:

EN AC – 42200

Skupina – AlSi7Mg

Chemické označení – EN AC-Al Si7Mg0,6

Tabulka č. 1. [3]

Chemické složení - EN AC-Al Si7Mg0,6

Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	Zn [%]	Ti [%]
6,5 – 7,5	0,19	0,05	0,10	0,45 – 0,70	0,07	0,08 – 0,25

Mechanické vlastnosti				
Stav	Pevnost v tahu R _m MPa min.	Mez 0,2 R _{p 0,2} MPa min.	Tažnost A _{50mm} %	Tvrдость podle Brinella HBS min.
T6	320	240	3	100
T64	290	210	6	90

Charakteristické vlastnosti a použití materiálu AlSi7Mg0,6:

Již v základním odlitém stavu slitina vykazuje vysokou pevnost, vysokou mez kluzu a tažnost. Je vhodná pro náročné použití, jako jsou letadla, vysoko rychlostní dmychadla, motorové součástky, ventilátory a lopatky turbín. Slitina AlSi7Mg0,6 se vyznačuje výbornou odolností vůči namáhání tlakem (těsností proti úniku kapalin a plynů), tekutostí při lití, dále malým smrštěním kovu při tuhnutí a odolností proti vzniku trhlin. Materiál je dobře obrobitelný, všemi nástroji. Slitinu je možné svařovat všemi dostupnými metodami. Pájení se nedoporučuje. Materiál je korozivzdorný a případnou dodatečnou ochranou proti korozi lze nanášet chemickými povlaky a nátěry barev [1].

2.3 Tepelné zpracování

Účelem tepelného zpracování hliníkových slitin je zejména zvýšení mechanických vlastností, snížení vnitřního pnutí v odlitcích nebo ovlivnění způsobu rozložení prvků ve struktuře. Lze rovněž zlepšit obrobitelnost eventuálně dosáhnout změnu i jiných technologických vlastností nebo korozní odolnost. Převážná část odlitků z hliníkových slitin se používá v tepelně nezpracovaném stavu [2].

Případné tepelné zpracování hliníku a jeho slitin můžeme rozdělit do dvou základních skupin:

- Vytvrzování.
- Žihání [4].

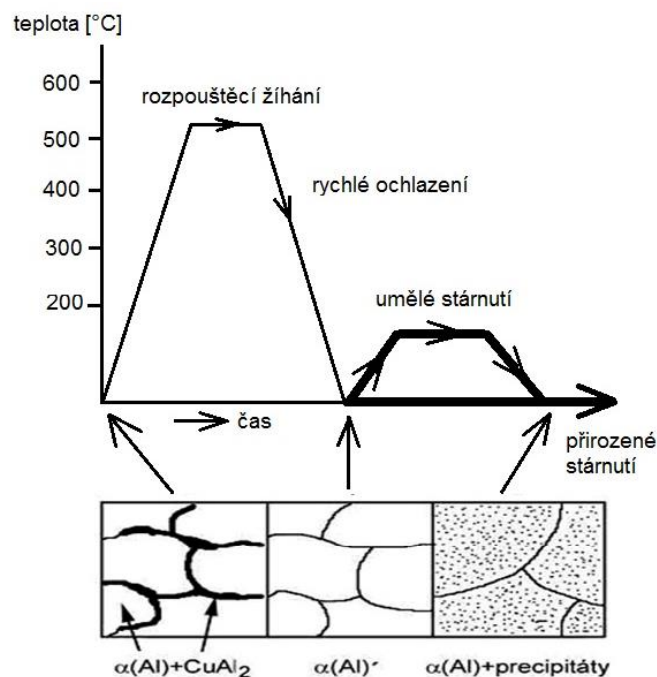
2.3.1 Vytvrzování

Vytvrzování je nejdůležitějším způsobem tepelného zpracování hliníkových slitin. Tímto tepelným zpracováním se dosahuje podstatného zvýšení meze pevnosti R_m meze $R_{p0,2}$ a tvrdosti. Tažnost slitin se obvykle poněkud snižuje. Vytvrzování se používá zejména u odlitků litých do pískových forem, do kovových forem gravitačně nebo nízkotlakým litím. U tlakově litých odlitků se vytvrzování používá méně často [2].

Vytvrzováním se dají ve značném rozsahu měnit mechanické, fyzikální i technologické vlastnosti slitin. Podmínkou pro vytvrzování je přítomnost přísadového prvku, který má dostatečně výraznou změnu rozpustnosti v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$. Takovými prvky jsou zejména Cu a Mg. Případně Ni nebo Zn [2], [4].

Vytvrzování se skládá ze dvou technologických úkonů, které na sebe navazují a vzájemně souvisí do té míry, že každé dílčí provedení ovlivňuje konečný výsledek. Jedná se o:

- Rozpouštěcí žíhání – je ohřev na vhodnou rozpouštěcí teplotu, výdrž na této teplotě po dobu nutnou k převedení jedné nebo více intermetalických fází do tuhého roztoku a následující rychlé ochlazení kritickou nebo nadkritickou rychlostí k získání nasyceného tuhého roztoku α [4].
- Stárnutí – je proces, při kterém dochází ke změně substruktury a v důsledku toho i ke změně mechanických, fyzikálních i technologických vlastností. Může se realizovat buď za pokojové teploty (přirozené stárnutí), nebo za zvýšených teplot (umělé stárnutí). Někdy se z technologických důvodů realizuje stupňovité stárnutí, což je proces tepelného zpracování po rozpouštěcím žíhání uskutečněný při dvou nebo více teplotách, které se zvyšují během tohoto žíhacího cyklu [4].



Obr. č. 3: Režim tepelného zpracování. [5]

2.3.2 Žihání

U odlitků se používají tyto hlavní způsoby žihání:

a) Rekrystalizační žihání

Je způsob tepelného zpracování za studena tvářeného kovu, přičemž dochází z původně deformované struktury ke vzniku nové rekrystalizované struktury. Rekrystalizačním žiháním se mění vlastnosti materiálu. Snižují se pevnosti a zvyšují se plastické vlastnosti. V praxi se nejběžněji aplikují teploty v rozmezí 250 - 500°C [4].

b) Žihání na odstranění vnitřního pnutí

Vnitřní pnutí u odlitků vzniká nestejně rychlým ochlazováním různých oblastí odlitků nebo vlivem brzděného smršťování v nepoddajné formě nebo tuhou konstrukcí odlitku. Žihání se provádí při teplotách 200 – 250°C po dobu 6-8 hod. s následujícím pomalým ochlazováním v peci nebo na vzduchu. Tento způsob tepelného zpracování se provádí jen u vybraných odlitků [2], [6].

c) Stabilizační žihání

Provádí se u odlitků, které pracují za vyšších teplot, nebo když dochází ke kolísání teplot. Cílem žihání je rozměrová stabilizace velmi přesných výrobků, případně stabilizace mechanických vlastností. Teplota žihání jde nad provozní teplotu v rozsahu 240-350°C, čímž se zabrání dodatečnému vytvrzení, změně mechanických vlastností a rozměrů součásti za provozu. Ochlazování probíhá na vzduchu [2], [6].

d) Žihání na měkko

Uplatňuje se jen výjimečně a to u slitin, které byly jakýmkoliv způsobem vytvrzeny a u nichž se má zpětně dosáhnout rovnovážného stavu. Teplota žihání se volí v rozmezích 350-450°C, následuje pozvolné ochlazování v peci na teplotu alespoň 200°C, dále na vzduchu [2].

2.4 Technologie odlévání do kovových forem

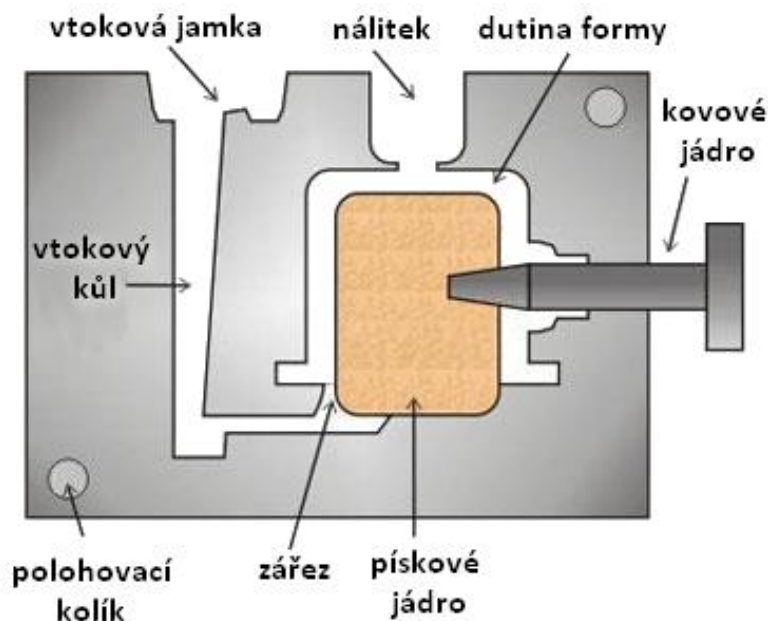
Do trvalých kovových forem se odlévají především odlitky menších až středních rozměrů. Účelnost použití kovových forem je limitována především náklady na jejich zhotovení. Ty jsou, obzvláště při tlakovém lití, velmi vysoké a ekonomická efektivita je podmíněna vysokou sériovostí výroby [2].

Pro navržený odlitek byla vybrána technologie gravitačním litím do kovové formy, jelikož se jedná o jednoduchý odlitek, bez žádných komplikovaných tvarů, či příliš tenkých stěn. Při řešení odlitku SUPPORT byly vyloučeny další možné, ale dražší technologie odlévání. Jaké jsou například: sklopné lití, nízkotlakové a vysokotlakové odlévání.

2.4.1 Gravitační lití

Gravitační lití do kovových forem patří k poměrně jednoduchým, ale produktivním a progresivním způsobům výroby odlitků ze slitin hliníku [4]. Formy jsou dvou nebo vícedílné. Jádra mohou být kovová nebo písková. Písková jádra se používají zejména v těch případech, kdy kovová jádra nelze z dutiny odlitku vytáhnout. Formy bývají připevněny na kokilových strojích (obr. č. 5), které zajišťují skládání a rozebírání forem, vyjímání odlitků z formy pomocí vyhazovačů. Mohou manipulovat s jednotlivými volnými částmi forem. Formy bývají řešeny se svislou (obr. č. 4) nebo vodorovnou dělicí rovinou. Kovové formy musí být přehřáté na provozní teplotu kolem 200-250 °C.

Minimální tloušťka stěn odlitků gravitačně litých bývá kolem 4 - 5 mm, obvykle však bývá větší. Hlubší otvory se předlévají od průměru přibližně 10 mm. Hmotnost odlitků je od několika gramů do cca 20-30 kg, výjimečně i více [2].



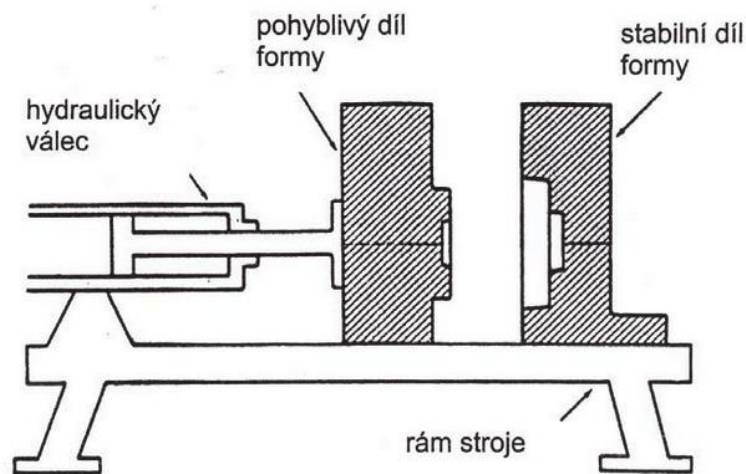
Obr. č. 4: Schéma kovové formy s jádrem [7]

Výhody metody gravitačního odlévání do kovových forem:

- Výrazně se zvětšuje ochlazovací účinek slévárenské formy, který se projeví na pozitivním zvýšení hodnot mechanických vlastností odlitku.
- Umožňuje dosáhnout vysokou hladkost povrchu odlitku, která je dána nejen hladkostí líce formy, ale také hladkostí vrstvy postřiku, který chrání formu a je nositelem konečné hladkosti povrchu odlitku.
- Umožňuje dosáhnout vyšší přesnosti odlitku, snížit toleranci rozměrů.
- Snížení přídavek na mechanické obrábění.
- Výhodné použití tepelně izolačních a exotermických obkladů náleků [4].

Nevýhody metody gravitačního odlévání do kovových forem:

- Metodu lze uplatnit jen v případech výroby většího množství odlitků.
- Kompletní finanční náklady na výrobu formy a jader musí být uhrazeny v ceně vyrobených odlitků.
- Výroba se realizuje zpravidla ve speciálních slévárnách vybavených kokilovými licími stroji s veškerým příslušenstvím (obr. č. 5).
- Metoda je vhodná pro odlévání slitin s nižší licí teplotou tj. slitiny Al, Zn, Cu, Sn, Pb a podobně a také lze odlévat všechny druhy litin, kde tepelné zatížení formy není příliš vysoké.
- Je nutno počítat s tím, že kovová forma a kovová jádra kladou odpor při smršťování odlitku v době jeho tuhnutí a ochlazování.
- Kovová forma není prodyšná a je nutno konstrukčně řešit odvodu vzduchu [4].



Obr. č.5: Kokilový stroj s dvoudílnou formou [2]

2.5 Konstrukce formy

2.5.1 Zásady návrhu formy

Zásadním technologickým krokem při výrobě kvalitních odlitků ze slitin hliníku je vhodné umístění odlitku v dutině formy a správně navržený vtokový systém s nálitky [1].

Vtoková jamka, licí kůl, rozváděcí kanály, zářezy, případně filtry jsou stanoveny obecnými zásadami a postupy slévárenské technologie [2].

Požadavky vtokové soustavy:

- Roztavený kov by měl postupovat vtokovou soustavou, nejlépe bez turbulentního proudění, aby se zabránilo vzniku oxidu z hliníku, což podporuje i zachycení vzduchových bublin na formě a jádře.
- Vtokový systém by měl být navržen tak, že slévač, či odlévací zařízení může rychle zaplnit celý vtokový kanál, který po celou dobu odlévání bude plný.
- Vtokový systém by měl být navržen tak, aby se dal snadno oddělit od odlitku [1].
- Dalším úkolem vtokové soustavy je odloučení a zachycení strusky a dalších nekovových nečistot z taveniny tak, aby nebyly vneseny do odlitku; u náročných odlitků jsou zabudovány do vtokové soustavy filtry [6].

Vtoková jamka:

Vtoková jamka je na začátku rozšířená tak, aby se veškerý kov z licí pánve, či licího stroje vлил snadno do formy bez rozstříků a přelítí. A dále, aby co nejrychleji umožnila zaplnit licí kůl. Nevhodné navržení licí jamky a vtokové soustavy může způsobit problémy. Licí jamka, licí kůl a zářezy musí být dimenzovány tak, aby zaplnění bylo optimální [1].

Vtokový kanál:

Vtokový kanál má tvar vertikálního kůlu, kterým je kov dopravován z licí jamky do formy. Návrh vtokového kanálu stanovují fyzikální vlastnosti volně padajícího proudu kovu. Padající kov má tendenci se formovat do kužele. Nejlepší variantou je proto zužující se vtokový kůl s nejužším ústím vtokového kanálu ve spodu[1].

Nálitky:

Objemové změny odlitků při tuhnutí taveniny a následné ochlazování jsou eliminovány nálitky. Větší objemové změny se projevují zejména v místech většího nahromadění materiálu v odlitku, nerovnoměrným tuhnutím kovu a rozdílem mezi materiálem formy a materiálem odlitku. Typickým místem jsou spoje dvou nebo více stěn a lokální zvětšení tloušťky stěny odlitku. Tato místa nazýváme tepelnými uzly, a právě místa tepelných uzlů je nutno nálitkovat. Obecnou zásadou při navrhování konstrukce odlitku je požadavek, aby stěny odlitku zvětšovaly svou tloušťku směrem k nálitku při zvolené poloze odlitku ve formě. Odlitek musí přecházet do tuhého skupenství postupně od nejnižších částí formy směrem nahoru a změny objemu při tuhnutí musí mít možnost vyrovnávat taveninou z nálitků. Proto jsou nálitky umísťovány co nejvýše a plní funkci zásobníku taveniny po celou dobu tuhnutí [3]. Nálitky proto splňují následující podmínky:

- Doba tuhnutí nálitku musí být větší než doba tuhnutí odlitku.
- V nálitku musí být až do ukončení tuhnutí odlitku zásoba tekutého kovu.
- Podmínky v nálitku musí umožňovat proudění kovu z nálitku do odlitku.
- Je nutno určit všechny tepelné uzly daného odlitku a uplatňovat u nich pravidlo takzvané vepsané koule [6], [3].

2.5.2 Konstrukce formy pro odlitek SUPPORT T160

Při konstrukci formy vycházíme z rozměrů odlitku a jeho požadovaného smrštění. Odlitek je s vtokovou soustavou vhodně umístěn ve formě. V programu SolidWorks byla rozdělena forma na dvě hlavní části (pohyblivá a pevná polovina), kde jejich rozdělení kopíruje dělicí rovinu stanovenou podle 3D modelu odlitku. Na jednotlivých polovinách formy byla navržena vtoková soustava s nálitkem tak, aby byl odlitek dostatečně zásobován při tuhnutí. Vedlejší funkcí nálitku je i výfuk vzduchu z dutiny formy. Forma byla konstruována bez jader. Funkci jednotlivých „jader“ nahradily kovové vložky, které jsou přišroubované v pevné a pohyblivé polovině formy. Konstrukce dělení kovových vložek je daná jejich složitým tvarem, který by se obtížně vyráběl v jednom celku s formou. Členité tvary více trpí mechanicko tepelným namáháním taveninou, jsou tedy dříve opotřebovány a lze je tak snadno vyměnit. Odvzdušnění formy je provedeno výfukem a malými kanálky v dělicí rovině.

Vtoková jamka:

Při navrhování vtokové jamky (obr. č. 6) jsem vycházel z tvarů používaných pro kové formy ve firmě MOOD a KOVOLIT. Tvar licí jamky je volen tak, aby vyjímání odlitků z formy bylo co nejsnadnější. Stěny jamky jsou zkoseny vůči dělicí rovině a přechody zaobleny.

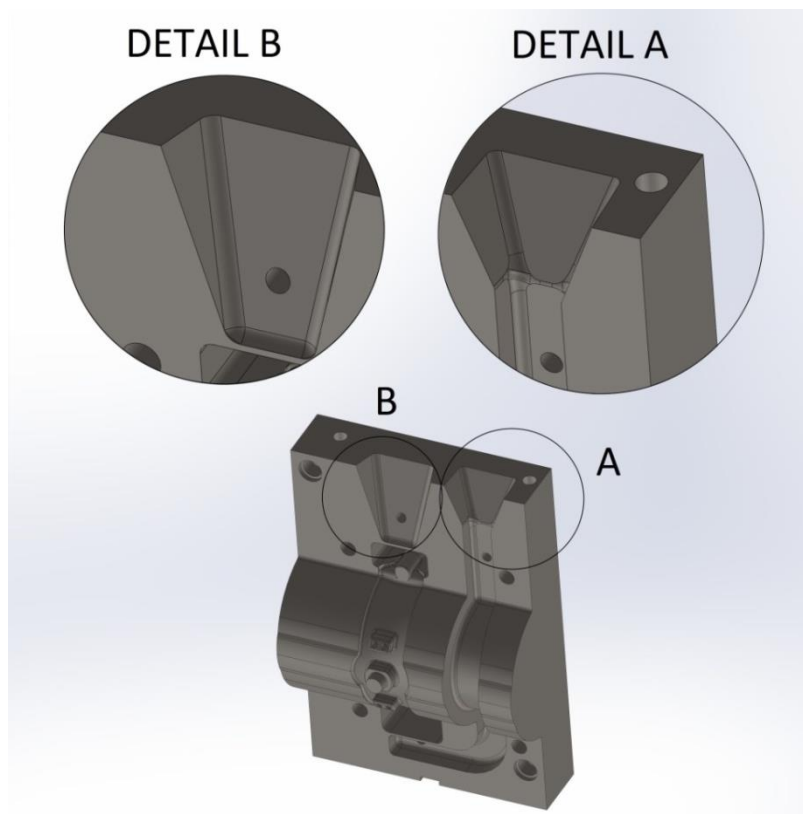
Vtokový kanál:

Rozměry vtokového kanálu lze vypočítat podle obecných fyzikálních vztahů, ale zpravidla se postupuje dle zkušeností. Při užití simulace lze zkontrolovat podle rychlostních a tlakových poměrů.

Při návrhu vtokového kanálu (obr. č. 6, detail A) bylo postupováno podle výše zmíněných pravidel. Pro zjednodušení výroby je vtokový kanál navržen, jako hranol se zkosenými stěnami a dostatečně zaoblenými rohy, které se mají přibližovat tvaru kruhového průřezu. Velký úhel zkosených stěn ulehčuje vyjímání odlitku z formy. Vtokový kanál byl navržen na základě zkušeností získaných ve firmě MOOD. Vtokový kanál musí být také navržen tak, aby nedocházelo následně k turbulentnímu proudění, ale bylo dosaženo co nejklidnějšího plnění vzhledem k potlačení vzniku vměstků. Rychlost proudění taveniny se dá ovlivnit změnou rozměrů vtokového kanálu a jeho zaústěním do odlitku, zářezem. Použitím SW QuickCAST můžeme ověřit, zda plnění dutiny probíhá poklidně a v jakém tlakovém režimu.

Nálitky

Odlitek SUPPORT bude osazen jedním atmosférickým otevřeným nálitkem (obr. č. 6, detail B), který je polohován na střed souměrnosti odlitku. Takovéto umístění nálitku v nejvyšší poloze je logické a díky tomu je předpoklad, že bude kov dostatečně dosazován do tuhajícího odlitku.



Obr. č. 6: Detail vtokové jamky, kanálu a nálitku

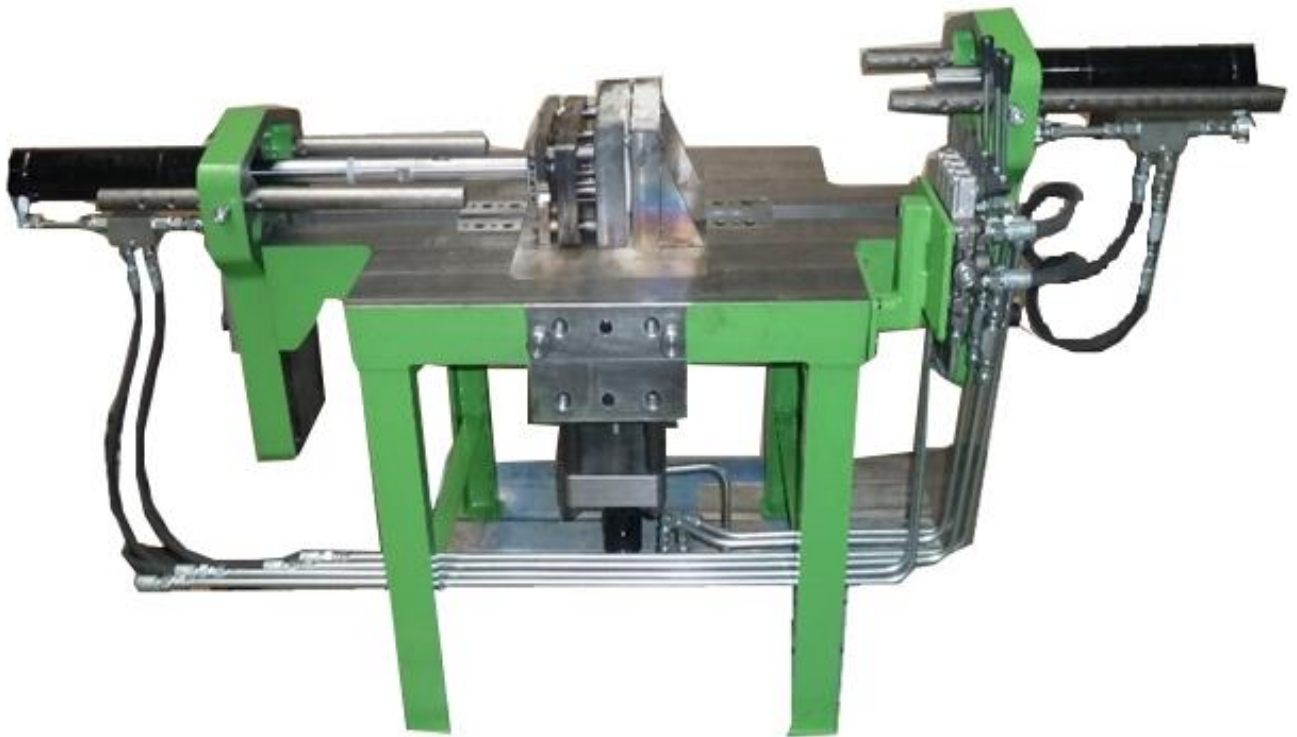
2.5.3 Stroj pro odlévání a tuhnutí

Odlitek je odléván ve formě, která umožňuje sevření a otevření formy. Při otvírání formy vyhazovače uvolní odlitek z kokily. Pro tento typ výroby odlitků je vhodný stacionární kokilový stroj KS-2 (obr. č. 7) se třemi možnými tahy, z nichž bude využit pouze jeden tah.

Základem stroje je deska z tvárné litiny, na které jsou připevněny stavitelné nosníky s hydraulickými válci pro základní tahy. Do vybrání základní desky stroje je umístěna základní deska kokily s přišroubovanou kokilou. Na spodní část základové desky je přišroubován nosič hydraulického válce pro spodní tah kovového jádra. Na základovou desku stroje je možné přišroubovat stavitelné nosníky s hydraulickými válci pro boční tahy kovových jader.

Na stavitelných nosnících jsou umístěny stavitelné vyhazovací trny pro vytlačení odlitku z pohyblivé části kokily.

Základová deska je usazena na nohách. Hydraulické ovládání – ruční rozvaděč se čtyřmi sekcemi a pojistným ventilem je připevněn ke stroji.



Obr. č. 7: Kokilový licí stroj KS-2

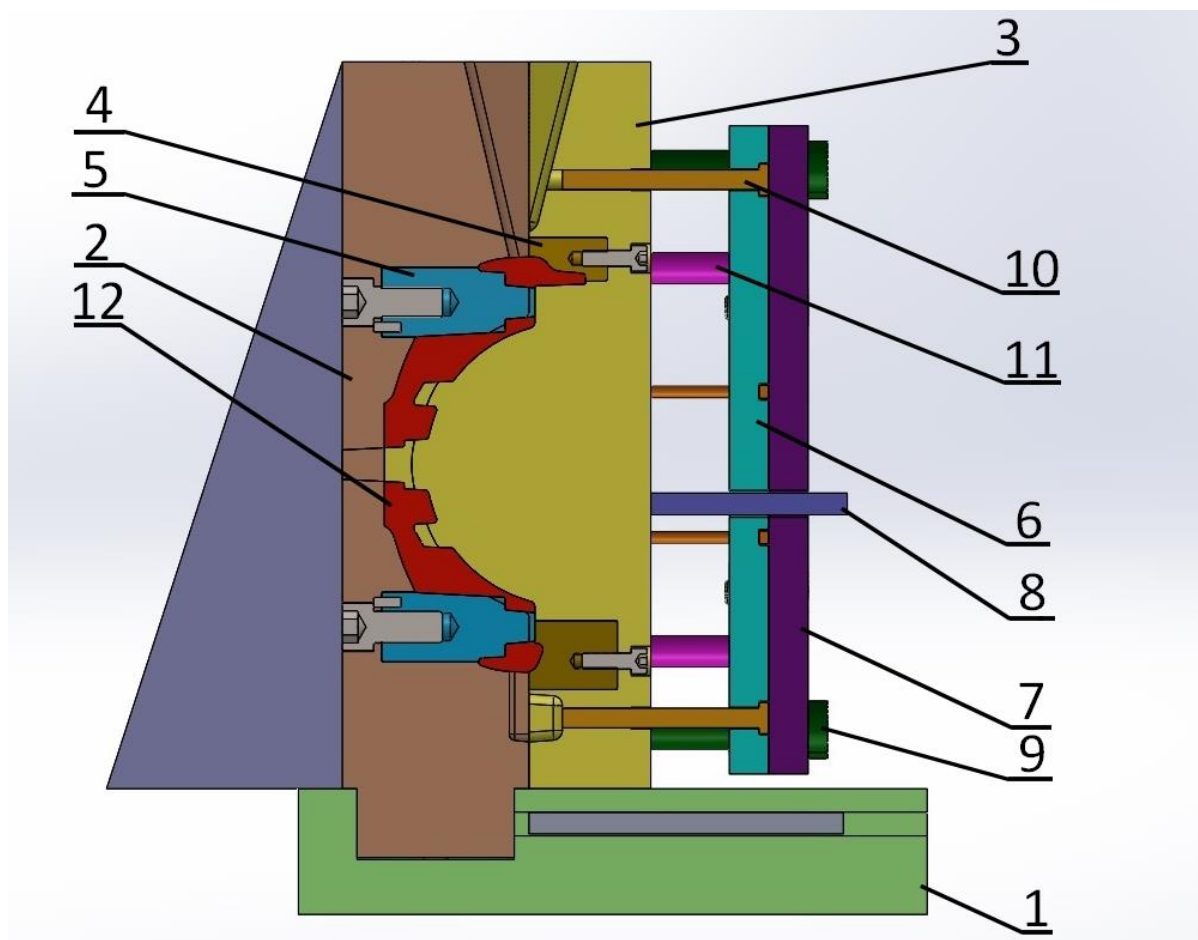
2.5.4 Konstrukce formy

Forma je navržena pro lící stroj KS-2. V zásadě se forma skládá z nosné části, pevné části formy, pohyblivé části formy ovládané hydraulickým válcem a vyhazovači.

Popis formy:

- Základní deska (pozice č. 1).
- Pevná polovina s výztuhou zadní stěny formy (pozice č. 2).
- Pohyblivá polovina (pozice č. 3).
- Vložka pohyblivé poloviny (pozice č. 4).
- Vložka pevné poloviny (pozice č. 5).
- Deska vyhazovačů (pozice č. 6).
- Opěrná deska vyhazovačů (pozice č. 7).
- Táhlo (pozice č. 8).
- Vodící sloupek (pozice č. 9).
- Vyhazovače (pozice č. 10).
- Odrážecí kolík (pozice č. 11).
- Odlitek (pozice č. 12).

Jednotlivé díly kokily, byly vytvořeny jako 3D modely. Následně ze všech modelů byla vytvořena sestava. Poté byla vytvořena sestava s úplnou výkresovou dokumentací formy (Příloha č. 2-17).



Obr. č. 8: Řez 3D sestavou kokily

2.6 Numerická simulace

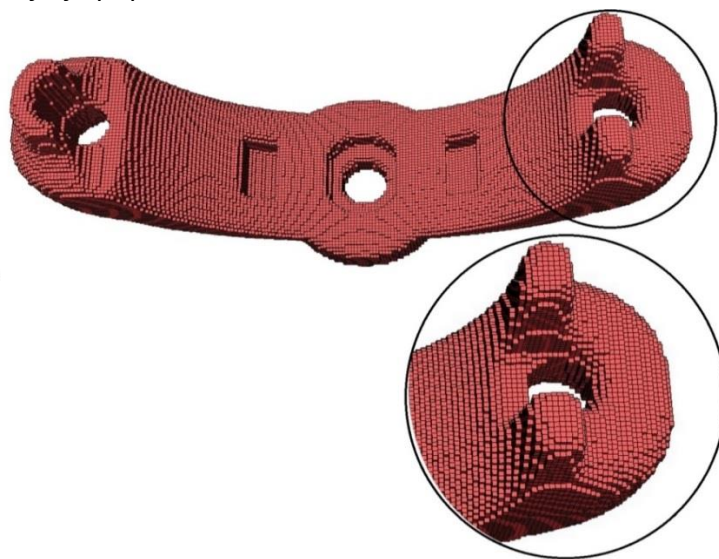
Numerická simulace umožňuje jedinečnou šanci, díky které můžeme pozorovat virtuální lití roztaveného kovu do dutiny formy a následné tuhnutí v čase. V zobrazené simulaci můžeme vyhodnotit, zda se v odlitku mohou nacházet nějaké vady typu staženiny, řediny, či pomezita. Podle toho se dále pracuje s navrženou vtokovou soustavou, zda nálitky dostatečně dosazují kov. Odhalením vad v odlitku pomocí numerické simulace nám umožní včas provést změny v konstrukci kokily a tím snížit následné náklady, které by vznikly při odhalení vad po odlití a následné kontrole odlitku. Zabrání se tak výrobě mnoha zmetků, zkrátí se doba přípravy následnými úpravami formy po provedených zkouškách a sníží se vícenásobné náklady spojené s výrobou formy.

Pro zpracování simulací byl použit program QuickCAST francouzské firmy ESI-Group. Program je schopen při vhodném nastavení vstupních dat zahrnout ve výpočtech všechny fáze lití a tuhnutí což jsou:

- Plnění dutiny formy kovem; rychlosti a vektory proudění; charakter proudění.
- Odvzdušnění formy.
- Teplotní režim formy.
- Teplotní režim odlitku.
- Cyklování – opakované odlévání.
- Předpokládané vnitřní vady – staženiny.

Jednotlivé simulace a jejich výsledky pro jejich rozsáhlost jsou uloženy v archívu na CD – Příloha č. 18. Ve vlastní textové části uvádím pouze ilustrační fotografie některých uzlových bodů simulace - viz dále.

Program QuickCAST pracuje dle metody FDM (Finite Differences Method) neboli metoda konečných diferencí. Podstatou metody konečných diferencí je pokrytí oblasti, v níž hledáme řešení diferenciální rovnice a sítě, která se skládá z konečného počtu uzlových bodů. Modelované těleso se skládá ze základních elementů ve tvaru krychle, čím více elementů je použito, tím detailnější je popis odlitku [8].



Obr. č. 9: 3D model vytvořený metodou FDM

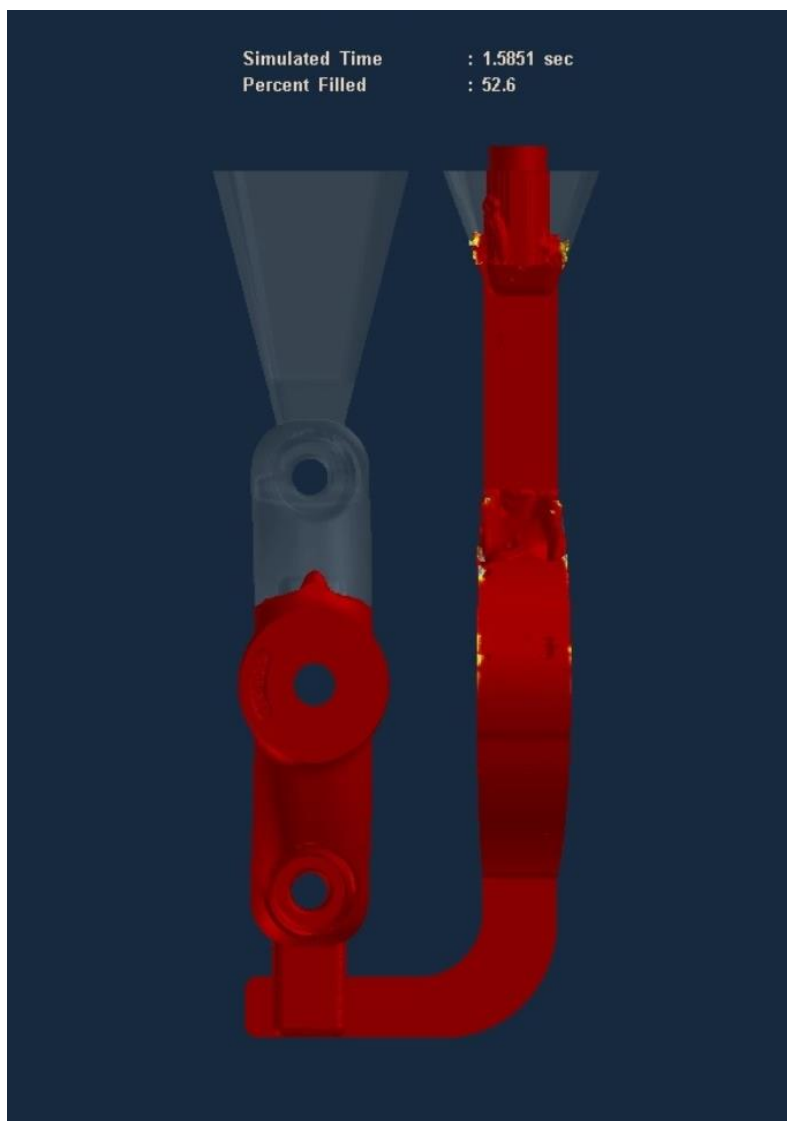
Do programu QuickCAST byly naimportovány 3D modely, z programu Solid Works. Dále se na jednotlivých modelech vytvořila síť s různými velikostmi jednotlivých elementů, tak že na odlitku byla velikost krychliček menší, aby výpočet byl přesnější a průběh lití kontinuální. Na jednotlivé plochy, jak odlitku, tak i části forem se nastavily vstupní podmínky, které celý průběh ovlivňují a výsledek simulace co nejvíce přibližují k realitě, to je výsledek provedených výpočtů. Při simulaci bylo využito vlastních zkušeností z předešlých simulací výroby odlitků, které jsem již v minulosti pro firmu MOOD provedl. Týká se to především, nastavení materiálu formy, prodyšnosti, průměr proudu z lící pánve a rychlost proudění. Ovlivnění okolí, tlak na povrchu kovu, drsnost povrchu formy.

Tabulka č. 2 - Vstupní podmínky simulace

Materiál odlitku	AlSi7Mg0,6 EN AC - 42200
Doba lití [s]	3 [s]
Teplota kovu na počátku lití [°C]	730 [°C]
Teplota okolí při lití a tuhnutí [°C]	25 [°C]
Nátěry (místo, typ, tloušťka)	Klasický šedý – tloušťka cca 0,4 mm voda = 50 dílů šedý mastek= 2 – 3 díly Aquanet= 8 – 10 dílů vodní sklo= 25 dílů
Otevření formy (doba od začátku cyklu) [s]	Cca 180s
Vyhození odlitku (doba od začátku cyklu) [s]	Cca 190s
Počátek postřiku (doba od začátku cyklu) [s]	Cca 195s
Doba postřiku [s]	Cca 10s (každé 5 nalití)
Celková doba cyklu [s]	Cca 210s
Doba otevření kokily mezi cykly [s]	Cca 30s

2.6.1 Plnění dutiny formy kovem

Simulace umožňuje virtuálně sledovat plnění dutiny formy taveninou v závislosti na čase. Umožňuje virtuálně znázornit pohyb kovu ve formě, stanovit rychlosti proudu, jeho charakter (laminární a turbulentní), vektory pohybu proudu. Kontrolovat odvzdušnění formy a zabíhavost kovu – správné zaplnění všech prostor dutiny formy. Umožňuje posouzení lící soustavy, zda jde o tlakový nebo podtlakový systém. Při této analýze simulace odhalí kritická místa, kde může vzniknout vada. Po analýze simulace proudění se dají změnit jednotlivé parametry lící a odvzdušňovací soustavy a provést opětovnou kontrolu simulací. Výsledkem je minimalizace vzniku vad, na které bychom stejně ve skutečnosti přišli až po odlití odlitku a následné kontrole. Hledání místa vzniku vady bez simulace je obvykle velmi obtížné a většinou je stanoveno na základě zkušeností technologa slévárny – tj. metodou „pokus - omyl“.

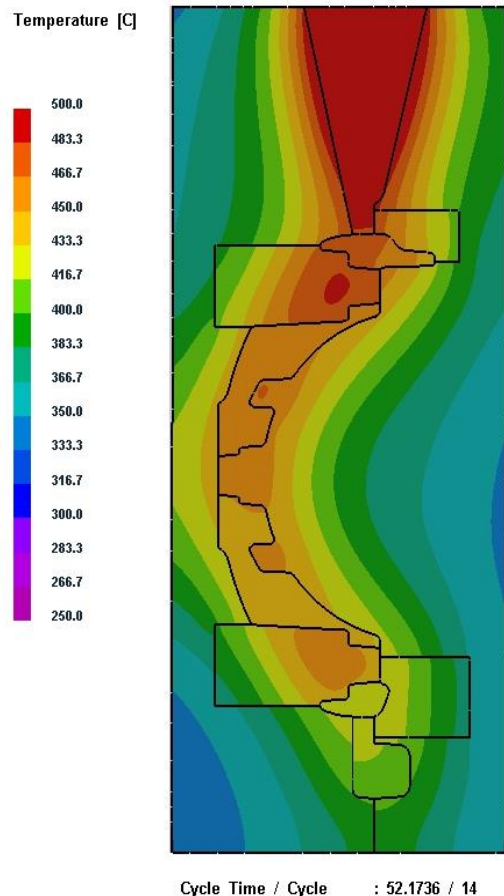


Obr. č. 10: Ukázka ze simulace plnění formy

2.6.2 Teplotní režim formy a odlitku

Po naplnění dutiny formy kovem dochází k přenosu tepla z odlitku na formu. Simulací lze zobrazit teplotní pole, jak formy, tak i odlitku v čase. Tím lze získat údaje, jak tuhne odlitek, kde se mohou nacházet teplotní uzly a při jaké teplotě (čase) může být forma otevřena a odlitek vyjmut. Okamžik vyjmutí odlitku je velmi důležitý z hlediska brzděného tuhnutí a přesnosti odlitku. V místě teplotních uzlů je předpoklad vzniku ředin.

Teplotním polem formy lze určit požadované přehřátí formy, a v průběhu chladnutí odlitku stanovit průběh teploty formy v různých místech. Lze tak předpokládat, kde může docházet k přehřátí formy, kde teplo nahromaděné ve formě ovlivňuje vznik tepelných uzlů na odlitku. Lze tak i stanovit, kde je potřeba formu chladit (konstrukčně vytvořit vzduchové nebo vodní kanály), případně použít materiálu formy, který má vyšší koeficient tepelné akumulace (například Cu a jeho slitiny).



Obr. č. 11: Simulace teplotního pole formy a odlitku při ustálené teplotě



Úpravou konstrukce podle simulace teplotního režimu formy a odlitku lze dosáhnout, že bude předpoklad dosažení „zdravého odlitku“ a formy, která vydrží větší množství cyklu odlévání.

Na obr. č. 12 je zachycen okamžik v průběhu tuhnutí odlitku, kdy oranžovou barvou jsou znázorněny teplotní uzly. V těchto teplotních uzlech kov tuhne později, kdy okolní odlitek je již v pevné fázi a je tedy předpoklad vzniku staženin. Tyto staženiny se potvrdily i po rozřezání odlitku viz 3.2.5 Kontrola vnitřní homogenita – řediny.

Obr. č. 12: Simulace znázornění míst teplotních uzlů

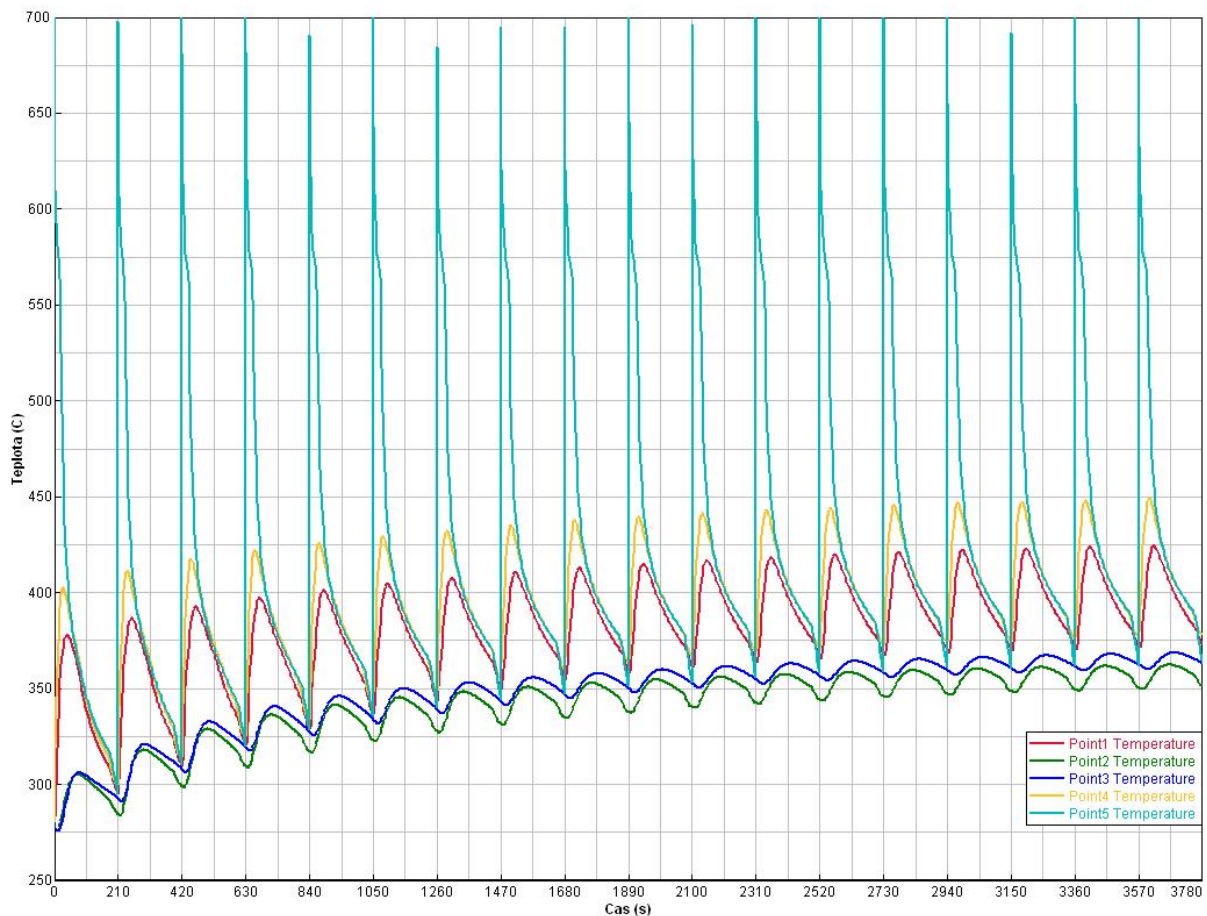
2.6.3 Cyklování

Jednou z dalších velmi důležitých předností simulačního programu je zobrazení teplotních polí formy v průběhu opakujících se licích cyklů. Zobrazení průběhu teplot nám ukazuje, jak je forma tepelně namáhána a po kolikátém odlití se teplota formy ustálí. Dále program znázorní průběh provozní teploty a lze posoudit, zda forma nepotřebuje další ohřev mezi jednotlivými cykly nebo naopak vhodně navrhnout chladicí systém v teplotních uzlech tak, aby bylo dosaženo usměrněného tuhnutí.

Cyklus byl nastaven zadáním teploty přehřevu formy a licí teploty, doby k otevření formy, vyjmutí odlitku, začátek a konec postřiku ochranným povlakem a následné uzavření formy. Dále si program sám přebírá data z předešlého cyklu teplotního rozložení pole formy.

Na obr. č. 13 Graf teplot při cyklování - jsou znázorněny tyto teploty:

- Bod 1. – Vnější povrch formy v nejtenčím místě (červená křivka)
- Bod 2. – Vnější povrch formy na boku formy pevné části formy (zelená křivka)
- Bod 3. – Vnější povrch formy na boku formy pohyblivé části formy (modrá křivka)
- Bod 4. – Vnitřní povrch formy na ploše pevné části formy (žlutá křivka)
- Bod 5. – Teplota odlitku (tyrkysová křivka)



Obr. č. 13: Graf teplot při cyklování

Místa pro predikci teplot bod 1 – 5 byla zvolena z hlediska charakteristiky procesu lití a možnosti jejich měření při plánovaném experimentálním zkoušení odlévání odlitku.

Komentář k průběhu teplot

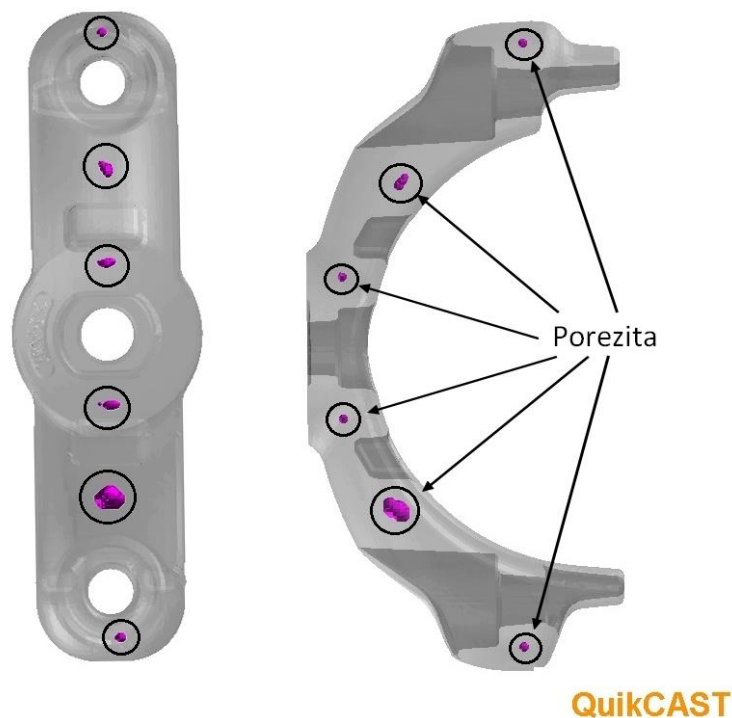
- Cyklováním se postupně zvyšují teploty formy - po cca 9 - 10 cyklech dojde k ustáleným teplotním poměrům.
- V našem případě výrobě odlitků SUPPORT není třeba formu přehřívat ani chladit.
- Teplota vnější stěny formy (bod 1) a vnitřní plochy formy (bod 4) velmi těsně koreluje s rozdílem cca 30°C. Teplota v těchto bodech se velmi rychle zvyšuje po nalití taveniny na 450°C na vnitřní ploše formy a 420°C na vnější stěně formy. Naopak teplota těchto bodů poměrně rychle klesá v bodě 1 na cca 365°C a v bodě 4 na 375°C
- Teplota v bodě 2 a 3 je značně ovlivněna „masou“ materiálu formy. To znamená, že nárůst teploty a následný její pokles je menší cca 45°C v počátku cyklu a 20°C v ustáleném teplotním režimu.
- Zmíněných průběhů teplot lze výhodně využít, jak pro umístění teplotních čidel, pro měření teploty odlitku ve formě, tak i pro umístění termočlánků, nebo chladicího systému.

2.6.4 Predikce možných vnitřních vad – staženiny

Simulací průběhu tuhnutí lze předpokládat místa vzniku staženin. Simulací odlitku SUPPORT je s velkou pravděpodobností zobrazen možný výskyt staženin, který je znázorněn na obr. č. 14 fialovou barvou. Tyto oblasti upozorňují na vady v usměrněném tuhnutí odlitku. Při návrhu odlitku musíme těmto bodům věnovat zvýšenou pozornost jak při plnění formy, tak i při úpravě teplotního režimu formy a chladnutí.

V případě odlitku SUPPORT nebyla požadována vysoká vnitřní homogenita, a proto jsem se tomuto problému zvláště nevěnoval.

Pro ověření případného vzniku ředin byl proveden řez v kritickém místě možného výskytu porezity, to je osou odlitku. Viz odstavec 4.4 Kontrola vnitřní homogenity – řediny.



Obr. č. 14: Simulace míst vzniku porezity

2.7 Výroba formy

Konstrukce formy je daná výkresovou dokumentací (viz Příloha č. 2 - 17). Podle výrobní dokumentace technolog firmy MOOD navrhl výrobní technologické postupy, které byly zadány do informačního systému používaného firmou MOOD (od společnosti TD-IS Easy Technology), který řídí veškeré výrobní kroky. Zásobovač firmy MOOD podle systému TD-IS zajistí materiál. Mistr kovodílny podle technologických postupů a výkresové dokumentace naplánuje výrobu na zadaných pracovištích. Veškeré odvedené práce, či jednotlivé úkony na strojích, jsou zaznamenávány v informačním systému a identifikovány čárovým kódem. V systému je vypočten náklad na jednotlivé operace a celou výrobu lze ekonomicky vyhodnotit z hlediska plánovaných a skutečných nákladů.

Technologická příprava výroby tvarových částí formy na CNC strojích, se provádí v oddělení konstrukce a programování. Podle vytvořených 3D modelů se následně pracuje. Jednotlivým tvarům je přiřazena strategie obrábění, nástroje a řezné podmínky. Výsledkem jsou CNC data pro obrábění, informace s řeznými podmínkami, seznam nástrojů pro jednotlivé operace a doby obrábění. Současně celý proces obrábění lze simulací zkontrolovat, zda nemůže dojít ke kolizi nástroje s materiálem při reálném obrábění. Tyto údaje jsou umístěny opět v informačním systému, kde operátor CNC stroje tento úkol převezme. Veškeré díly formy byly vyrobeny a smontovány ve firmě MOOD.



Obr. č. 15: Pohled na vyrobenou pevnou polovinu formy upevněnou na základní desce



Obr. č. 16: Pohled na vyrobenou pohyblivou polovinu formy

2.8 Vady odlitků

2.8.1 Stručný popis nejčastěji se vyskytujících vad

a) studené sváry

Jedná se o souvislý povrchový vrub, orientovaný obvykle téměř kolmo k podélné ose proudění taveniny. Hloubka vrubu může být i několik milimetrů.

Příčina vady je pomalá rychlost lití, nízká teplota taveniny, nesladění rychlosti lití a teploty taveniny, nerovnoměrný přítok taveniny [4].

b) trhliny

Brání-li volnému smršťování kovu kovová jádra nebo vystupující části kokily, mohou vzniknout trhliny, anebo se odlitek může z bortit. Při lití do kokil je třeba používat zařízení k rychlému vyjímání jader. Ve správný okamžik vyjmout odlitek z formy a umožnit tak volné chladnutí odlitku. Dále trhliny často vznikají v zaobleních, nemají-li tato zaoblení dostatečný poloměr. Také se mohou tvořit za tepla při nepřesném nebo předčasném vyjmutí ne zcela ztuhlého odlitku z kokily. Odlitek je nutné ponechat po určitou dobu v kokile a pak teprve z ní vyjmout [9].

c) nezaběhnutí

Nezaběhnutí vzniká při nízké teplotě přehřátí formy a při nízké lící teplotě. Tavenina ve formě rychle zhoustne a nevyplní zcela dutinu formy [2].

d) naplynění – porezita

Pórovitost (často nazývaná porezita) jako slévárenská vada, vzniká během tuhnutí, kdy se rozpustnost vodíku prudce snižuje. Porezita bývá způsobena kombinací tvorby mikrostaženin a bublin. O čistých plynových bublinách a o čistých mikrostaženinách můžeme hovořit jen zřídka [2].

e) vměstky

Nekovové vměstky jsou částice, které se vyskytují v objemu ztuhlého kovu. Narušují souvislost kovové matrice a svou přítomností snižují mechanické vlastnosti slitiny, zhoršují slévárenské vlastnosti, chemickou odolnost, těsnost, obrobitelnost, možnost povrchové úpravy a ovlivňují další vlastnosti [2].

Nekovové vměstky v hliníkových slitinách mají dvojí původ:

Exogenní vměstky jsou částice, které se do taveniny dostávají zvenčí během tavení a odlévání [2].

Endogenní vměstky vznikají oxidací hliníku a dalších prvků, vzájemnými chemickými reakcemi mezi jednotlivými prvky v samotné tavenině [2].

f) staženiny, řediny,

Příčinou staženin je nestejnoseměrné tuhnutí částí odlitku, k němuž dochází tehdy, má-li odlitek různé tloušťky stěn, nahromadí-li se kov v jednotlivých úsecích odlitku a má-li odlitek náhlé přechody tlustých a tenkých stěn. Není-li možno se vyhnout náhlým přechodům a nahromadění kovu v jednotlivých průřezích odlitku, je nutno po čas tuhnutí odlitku vytvořit podmínky pro doplňování materiálu do těchto prostor tekutým kovem, kde by mohly vzniknout staženiny [9].

g) rozstřík kovu

K rozstříkům kovu dochází, vystříkne-li kov z pánve a napadají-li jednotlivé jeho kapky do formy, zde ihned ztuhnou a dostanou tvar bročků, které se již neroztaví ve styku s postupujícím proudem kovu. Proto je třeba dávat pozor, aby před začátkem lití kov nevystříkl z pánve do formy [9].

h) znečištění

Tento druh zmetků se vyskytuje při používání pískových jader nebo tehdy, dostanou-li se cizí látky zároveň s kovem do kokily. Aby při lití kovu nepadal písek z jader, je třeba jádra důkladně ofoukat stlačeným vzduchem. Písková jádra musí být dostatečně tuhá a musí odolávat tavenině [9].

2.8.2 Posuzování vad

Povrchové vady se z pravidla posuzují pohledem. Při posuzování vnitřních vad je odebrán vzorek materiálu z odlitku a na tomto odlitku jsou provedeny potřebné zkoušky. Vnitřní vady jsou zkoumány metalografickými a fyzikálními metodami.

Příprava vzorků pro posuzování vnitřních vad:

- Uříznutí vzorku v podélném nebo příčném řezu.
- Opracování zkoumané plochy frézováním, soustružením, elektroerozivním řezáním, broušením.
- Případné leptání zkoumané plochy, a to nejčastěji mořením v hydroxidu sodném nebo ve směsi kyselin [4], [10].

2.8.3 Kontrola rozměrů

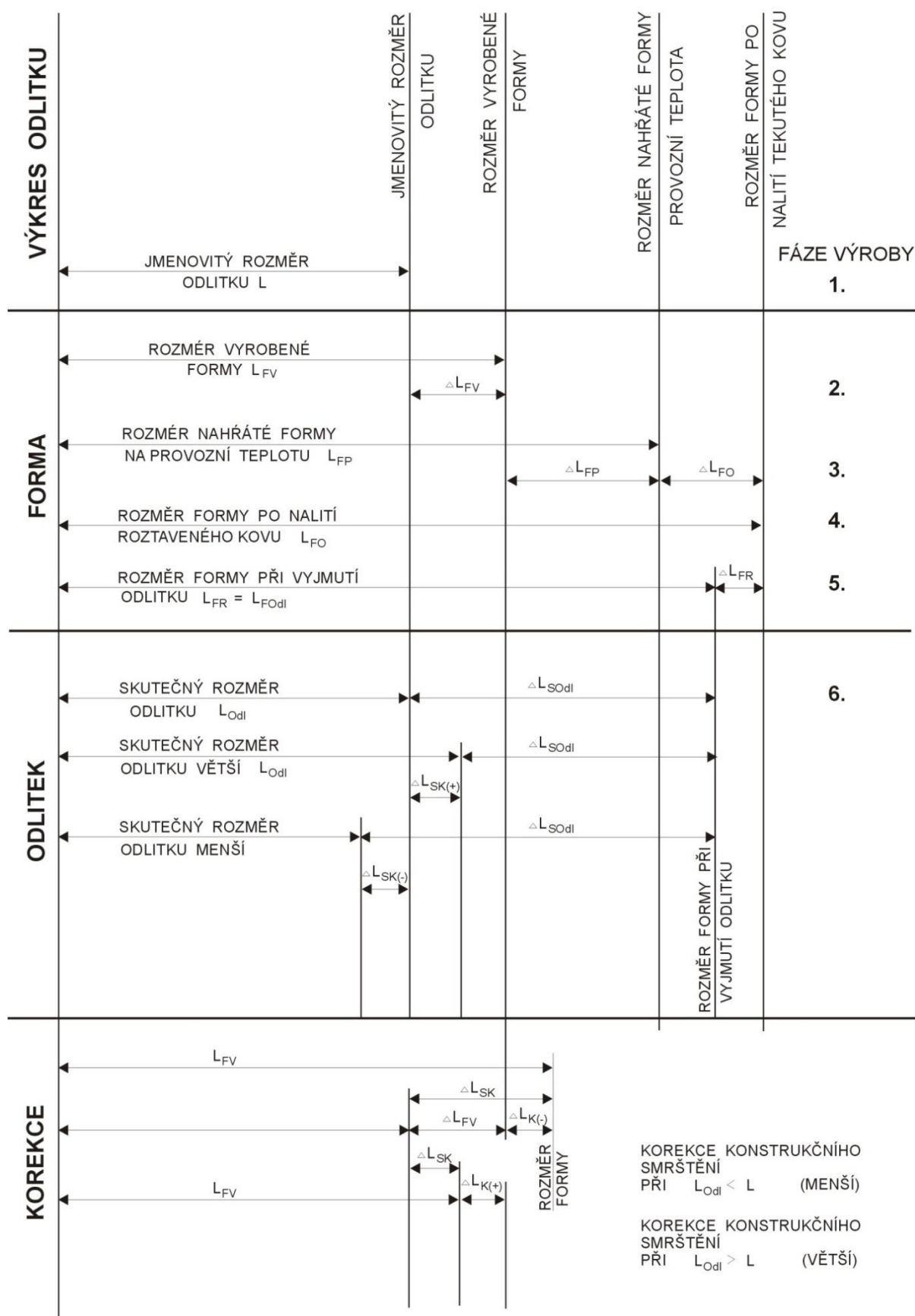
Rozměry odlitků v kovových formách jsou ovlivněny následujícími faktory:

- Konstrukce dutiny formy je upravena o smrštění odlitku, které je především dáno druhem materiálu; v našem případě u slitin Al se používá 0,7 – 0,8%. V našem případě bylo použito smrštění podle zkušenosti slévárny KOVOLIT 0,8%.
- Forma je vyráběná za normální teploty tj. 20°C.
- Pro odlévání je forma předehřátá na 240 – 270°C, což znamená další teplotní změny a do takto teplé formy je nalit kov o teplotě cca 700°C. Forma se opět ohřeje a změní své rozměry.
- Při tuhnutí se jinak smršťuje odlitek (v našem případě slitina Al) a jinak pracuje ocelová forma. Rozdíly smrštivosti odlitku a tepelná dilatace formy způsobují zpravidla brždění smršťování odlitku a tím jeho deformaci. Významný vliv na smrštění odlitků mají kovová jádra anebo výstupky ve formě podobného charakteru. Dalším důležitým činitelem je doba, ve které je odlitek vyjmut z formy.
- Po vyjmutí odlitku z formy tento odlitek již volně chladne a tedy i rozměry odlitku odpovídají volnému smršťování.

Z výše popsaných fází výroby odlitku je vidět složitost celé problematiky při snaze o dosažení požadovaných rozměrů odlitku. Pro přehlednost problematiky rozměrů odlitků je na obr. č. 17 uvedena analýza rozměrových změn formy a odlitku, při konstrukci formy (smrštění), výrobě formy, předehřevu formy, odlévání, tuhnutí a chlazení, vyjímání odlitků a vychlazení odlitků na teplotu okolí.

Analýzu rozměrů formy a odlitku lze využít pro výpočet potřebných rozměrů formy při její výrobě. V současné době je obvyklé, že tyto teplotní průběhy nejsou respektovány a při výrobě formy se používá, jako jediná korekce jen univerzální smrštění. Nerespektování těchto teplotních rozdílů a z toho vyplívajících změn rozměrů formy způsobuje rozdíly ve výrobě odlitků, které je nutné korigovat opravou již vyrobených forem. Opravy formy jsou nákladné a někdy i zdlouhavé. Analýzy rozměrů formy a odlitku lze i využít při výpočtu korekce, či úpravách rozměrů v různých směrech [11], [12].

Analýza rozměrových změn formy a odlitku



Obr. č. 17: Analýza rozměrových změn formy a odlitku [11]

2.9 Tavení a odlévání

Kvalita taveniny je daná především požadovaným chemickým složením, co nejnižším obsahem oxidických i neoxidických vměstků a nízkým naplyněním.

O kvalitě kovu rozhodují zejména:

- Vsázkové suroviny.
- Typ a konstrukce tavicích a udržovacích pecí.
- Způsob vedení metalurgického procesu.
- Metalurgické zpracování taveniny a způsob lití [2].

Volba vsázkových surovin je typickým kompromisem mezi kvalitou a ekonomikou. Někdy použitím dražších ale kvalitních surovin bývá ekonomicky výhodnější, jelikož je menší riziko zmetkovitosti, než zdánlivá úspora při použití levnější, ale nekvalitní vsázky [2].

Požadavky na tavicí agregáty pro tavení hliníku a jeho slitin. Množství potřebného tepla je dáno teplotou přehřátí. Maximální teplota přehřátí hliníku a jeho slitin by měla být co nejnižší a obvykle se pohybuje kolem 750°C podle složení. Tavení má probíhat intenzivně, s maximální energetickou účinností použitého tavicího agregátu a minimálními ztrátami. Zdrojem energie pro tavení kovů a slitin je elektrická energie nebo spalování pevných, kapalných nebo plyných paliv. Rozlišujeme tedy pece elektrické a pece palivové [4].

2.10 Čištění a apretura odlitku

2.10.1 Čištění odlitku

Gravitačně odlévané odlitky do kovových forem, jsou tryskáním broky čištěny vnitřní prostory od pískových jader, případně po apretuře je „sjednocován“ vzhled povrchu odlitku.

2.10.2 Apretura odlitku

Z hrubého odlitku jsou ořezáním na pásové pile odstraněny vtoky a nálitky a broušením odstraněny přelitky v dělicí rovině formy a zaústění kovových jader. Případně jsou opraveny vady povrchu odlitku broušením, zavařováním nebo tmelením.

3. Experimentální zkoušky ve slévárně

Podle zvyklosti slévárny KOVOLIT byl zpracován technologický pasport odlitku (viz příloha č. 19.) V technologickém pasportu jsou uvedeny základní údaje o odlitku - materiál, postřiky kokily, teplota přehřevu formy, předpokládané technologické časy a teploty při výrobě odlitku.

Pro ověření správnosti technologie a konstrukce formy byly dohodnuty se slévárnou KOVOLIT ověřovací zkoušky, které stávaly z:

- Tavení materiálu a jeho metalurgické úpravy.
- Odlévání odlitku SUPPORT T160 na kokilovém stroji KS-2.
- Měření teploty formy a odlitku.

3.1 Tavení materiálu a jeho metalurgická úprava

Ve slévárně KOVOLIT je výroba taveniny provedena ve dvou krocích:

- a) Natavení materiálu z housek a vratného materiálu v plynové peci.

V plynové peci je materiál taven ve větším množství i pro jiná pracoviště podle druhů (chemického složení) a pro jeho natavení jsou zpracovány metalurgické postupy.

Z plynové pece je tavenina v pánvi přelita do udržovací elektrické odporové pece.

- b) Elektrická odporová pec je zapuštěna v podlaze slévárny. Teplota je udržovaná podle zabudovaného teploměru v požadované výši. Při zkoušce byla teplota taveniny v peci udržovaná na 750°C. Tavenina v peci byla upravena dle technologického pasportu (viz příloha č. 19). Příměsi byly do taveniny ponořeny zvonem a tavenina byla promíchána. Po odeznění metalurgické reakce byla stažena struska z povrchu hladiny taveniny a byla změřena teplota roztaveného kovu v peci ponorným teploměrem.

Z udržovací pece byl odebrán vzorek taveniny pro chemický rozbor složení viz kapitola 3.2.2. Kontrola chemického složení. Na základě zkoušky chemického složení spektrometrem byla tavenina uvolněna k výrobě odlitků.

3.2 Odlévání odlitku SUPPORT T160

Forma byla upevněna na kokilový licí stroj KS-2 (obr. č. 18). Forma byla nahřata plynovým hořákem na provozní teplotu 240°C a na líc formy byl nanesen ochranný nátěr pneumatickou lakýrnickou pistolí podle technologického pasportu. Ochranný nátěr chrání kokilu proti působení taveniny, usnadňuje zaplnění dutiny a vyjímání odlitku z formy.

Po prvním upravení formy nástřikem ochranného povlaku byla forma znovu dohřata na požadovanou teplotu. Na povrchu byla naměřena teplota 267°C. Povrchové měření teploty formy bylo prováděno dotykovým teploměrem.

Běžnou praxí ve slévárně KOVOLIT Česká je, že pracovník využívá svých zkušeností s nahřátím formy pro začátek odlévání a dobu chladnutí odlitku odhaduje poklepem do nálitku.

Při experimentálních zkouškách jsme však měřili teploty formy dotykovým teploměrem, abychom byli schopni stanovit co nejpřesněji teplotní poměry ve formě, chladnutí odlitku, otevírání formy, vyjímání odlitku a teplotu vyjmutého odlitku v závislosti na čase. Čas jsme měřili mechanickými stopkami.

Pracovník licí ruční pánví odstranil oxidovanou vrstvu kovu v kelímku pece a nabral potřebné množství kovu pro zaplnění dutiny formy. Doba lití trvala cca 4 sekundy. Při každém cyklu, který začínal nalitím kovu do formy, byla provedená jednotlivá měření teplot. Slévač poklepáním tyčí do nálitku vyzkoušel, zda je již odlitek v tuhém stavu. Následně pomocí hydraulického systému na stroji KS-2 otevřel formu a vyhazovači byl automaticky vysunut odlitek z dutiny formy. Pracovník pomocí kleští odebral odlitek a opět posunutím ovladače na hydraulickém rozvaděči zavřel formu na doraz. Podle technologického pasportu měl pracovník každý 5 cyklus provádět nástřik formy ochranným sprejem (ošetření formy), ale prováděl to podle zkušeností. Při měření povrchu formy byly zaznamenány teplotní výkyvy, které nejsou pravidelné – viz označení ošetření formy na diagramu (obr. č. 20, 21).



Obr. č. 18: Upevněná a otevřená forma na kokilovém licím stroji KS-2

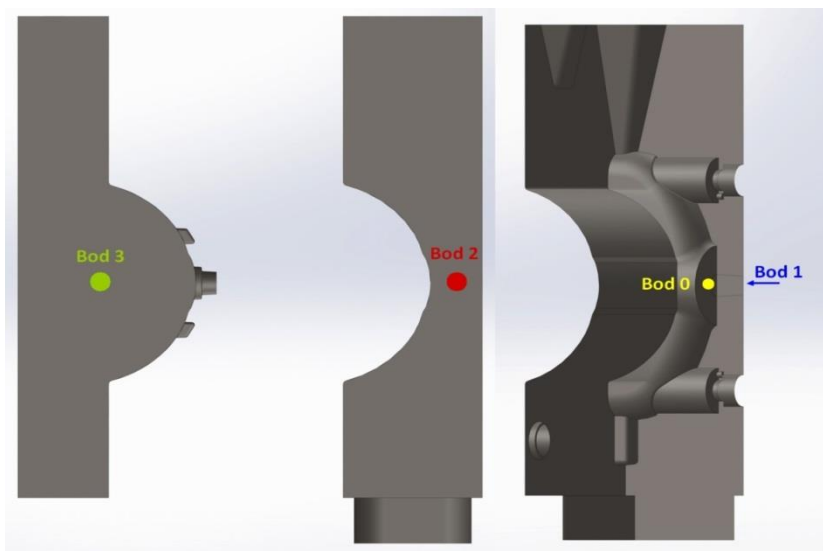
3.3 Měření teplotního pole formy a odlitku

Na formě byla vybrána vhodná místa pro měření teploty formy (obr. č. 19), tak aby charakterizovala průběh teploty formy:

- Teplota 0. (žlutá) - teplota líce formy – charakterizuje teplotu líce formy před vlitím roztaveného kovu.
- Teplota 1. (modrá) – charakterizuje teplotu formy na povrchu v místě nejbližším roz-taveného kovu, aby bylo možno zachytit přenos teploty taveniny na formu v čase v místě odlitku.
- Teplota 2. (červená) – charakterizuje teplotu formy na povrchu z boku v nejbližším místě licího kanálu, aby bylo možno zachytit přenos teploty taveniny na formu v čase a v místě lití taveniny do formy.
- Teplota 3. (zelená) - charakterizuje teplotu formy na povrchu z boku v místě největšího soustředění objemu materiálu formy, aby bylo možno zachytit přenos teploty taveniny na formu v čase.
- Teplota odlitku – charakterizuje teplotu vyjmutého odlitku z dutiny formy.

Při zkoušce byly změřeny teploty na různých místech formy. Pro základní vyrovnání teplot byly provedeny 3 cykly odlití bez zaznamenání dosažených hodnot pro jejich značné kolísání.

Obr. č. 19: Označená místa měření teploty formy



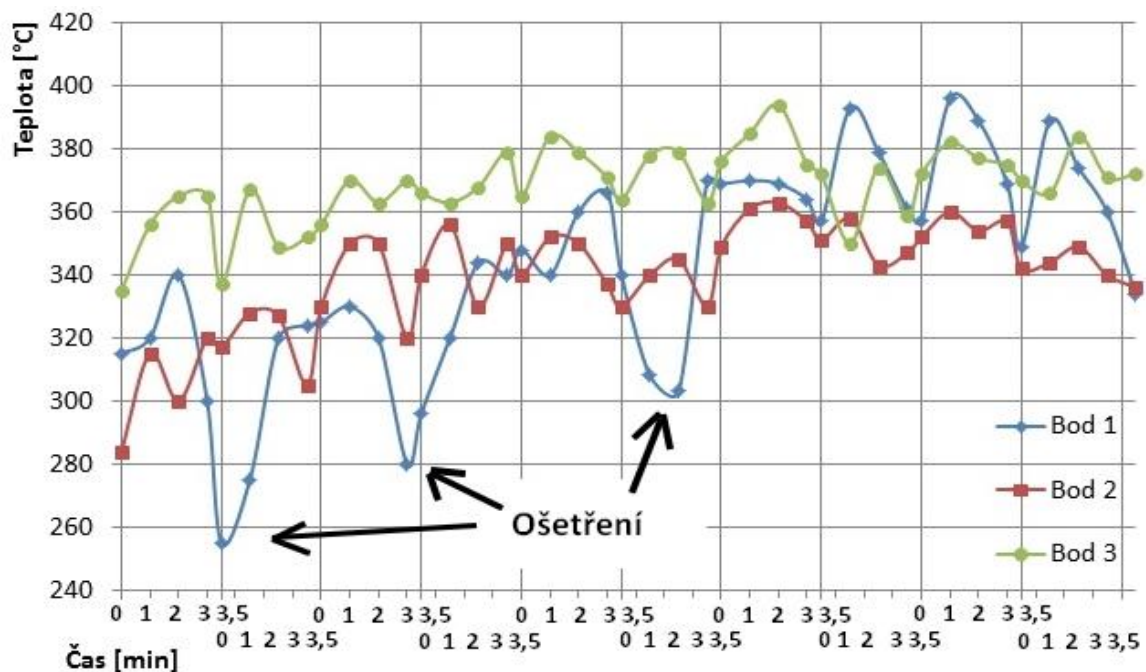
Tabulka č. 3 - Naměřené hodnoty teplot formy v čase

Číslo odlitku	Čas [s]	Teplota bodu 1 [°C]	Teplota bodu 2 [°C]	Teplota bodu 3 [°C]	Číslo odlitku	Čas [s]	Teplota bodu 1 [°C]	Teplota bodu 2 [°C]	Teplota bodu 3 [°C]
1	0	315	284	335	10	1890	349	342	370
	60	320	315	356		1950	389	344	366
	120	340	300	365		2010	374	349	384
	180	300	320	365		2070	360	340	371
2	210	255	317	337	11	2130	334	336	372
	270	275	328	367		2190	374	354	372
	330	320	327	349		2250	388	363	382
	390	324	305	352		2310	375	355	378
3	420	325	330	356	12	2340	345	353	378
	480	330	350	370		2400	384	357	381
	540	320	350	363		2460	388	370	380
	600	280	320	370		2520	382	360	384
4	630	296	340	366	13	2550	355	352	366
	690	320	356	363		2610	391	357	373
	750	344	330	368		2670	390	351	385
	810	340	350	379		2730	362	344	369
5	840	348	340	365	14	2760	369	355	377
	900	340	352	384		2820	400	363	369
	960	360	350	379		2880	394	355	385
	1020	366	337	371		2940	371	352	374
6	1050	340	330	364	15	2970	362	359	381
	1110	308	340	378		3030	378	364	391
	1170	303	345	379		3090	397	345	391
	1230	370	330	363		3150	382	368	391
7	1260	369	349	376	16	3180	330	364	372
	1320	370	361	385		3240	385	363	382
	1380	369	363	394		3300	375	372	390
	1440	364	357	375		3360	374	366	383
8	1470	357	351	372	17	3390	340	348	375
	1530	393	358	350		3450	373	363	393
	1590	379	343	374		3510	376	375	391
	1650	361	347	359		3570	395	369	394
9	1680	357	352	372	18	3600	355	350	385
	1740	396	360	382		3660	378	358	381
	1800	389	354	377		3720	402	365	396
	1860	369	357	375		3780	364	358	391

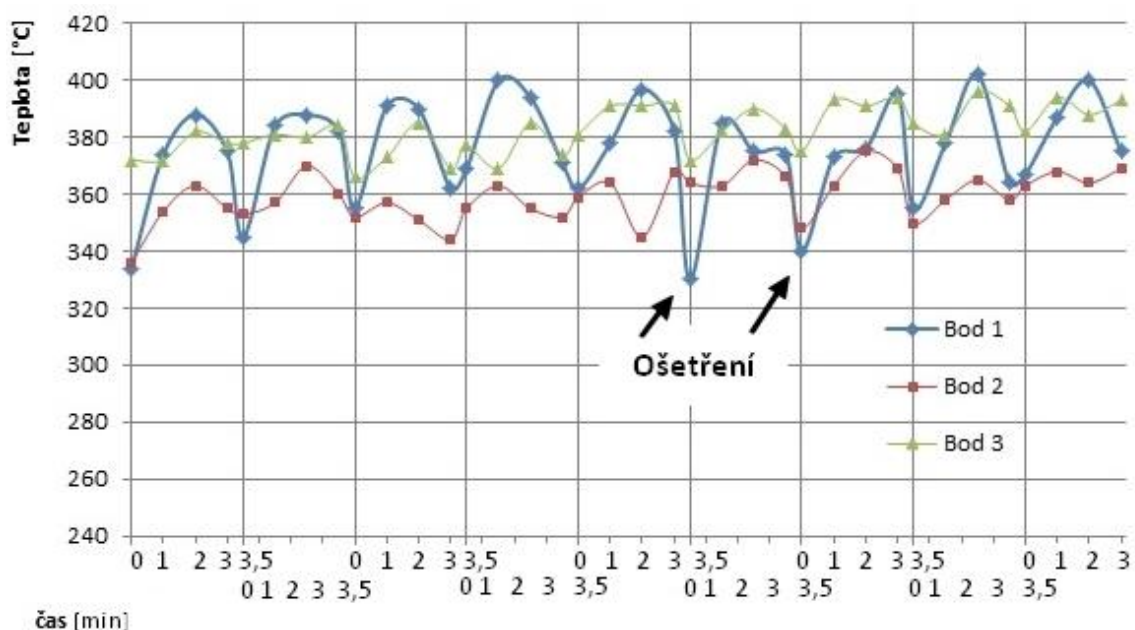
Průběh měření teploty na vyznačených bodech v čase:

Na obr. č. 20 jsou v grafu znázorněny průběhy teplot formy v časech 0, 1, 2, 3 a 3,5 minuty. V bodech 1, 2, 3 pro odlitky 1 – 10 a v pokračování záznamu pro odlitky 11 – 18 na obr. č. 21.

- V čase 0 byla forma odlita.
- V čase 1, 2, 3 byly měřeny průběžné teploty formy na vyznačených bodech 1, 2, 3.
- V čase 3,5 minuty byla forma otevřena, odlitek vyjmut a byla změřena teplota líce formy a teplota odlitku.
- Ošetřování formy prováděl pracovník na otevřené formě podle toho, jak probíhalo vyjímání odlitku.



Obr. č. 20: Průběh měření teploty formy v jednotlivých cyklech výroby odlitku 1- 10



Obr. č. 21: Průběh měření teploty formy v jednotlivých cyklech výroby odlitku 11- 18

Komentář:

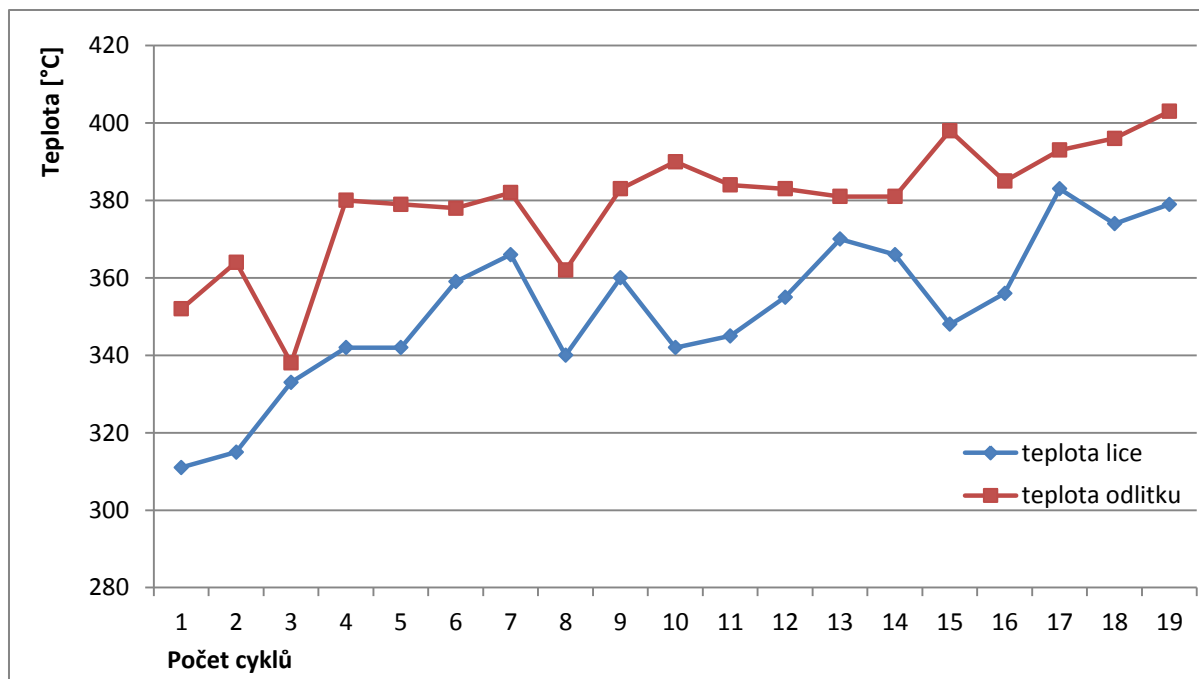
V průběhu teploty formy je zřetelně zaznamenáno:

- Nárůst teploty formy po nalití kovu, především v intervalu 0 – 1 minuta – přenos tepla z taveniny do materiálu formy.
- Nárůst teploty formy v čase 1 – 2 minuty – pokračování přenosu tepla z odlitku do materiálu formy.
- V intervalu 2 – 3 minuty – ustálení teploty v měřených místech; pokračování přenosu tepla do dalšího materiálu formy.
- V intervalu 3 – 3,5 minuty – pokles teploty formy při otevření kokily
- Průběh teploty v bodě 1. tj. v nejužším místě ukazuje největší závislost teploty formy na nalité tavenině. Z toho důvodu jsou patrné největší výkyvy teploty.
- Průběh teploty v bodě 3. Naopak ukazuje největší akumulaci tepla (v místě největšího objemu materiálu formy) a tím i nejmenšího kolísání teploty formy.
- Na průběhu teplot v jednotlivých cyklech se výrazně projevilo (poklesem teploty) i ošetřování formy postřikem.

Průběh teploty vnitřní plochy dutiny na pevné polovině formy a teploty odlitku:

Na obr. č. 22 Teploty líce formy a odlitku je znázorněn graf průběhu teplot líce formy a odlitku měřeného po otevření formy (v čase 3,5 minuty).

Poznámka: pro přehlednost naměřených hodnot byly propojeny jednotlivé naměřené teploty, což ovšem neodpovídá skutečnému průběhu teplot, který není kontinuální.



Obr. č. 22: Průběh teploty líce formy a odlitku

Měření teploty líce formy bylo velmi obtížné vzhledem k sálavému teplu formy a krátké vzdálenosti mezi držadlem a aktivní částí teploměru. Při měření bylo nutné dodržet úplné dosednutí aktivní plochy čidla teploměru na měřený objekt. Tím zřejmě vznikly i větší odchylky měření v průběhu výroby odlitku 1 – 18.

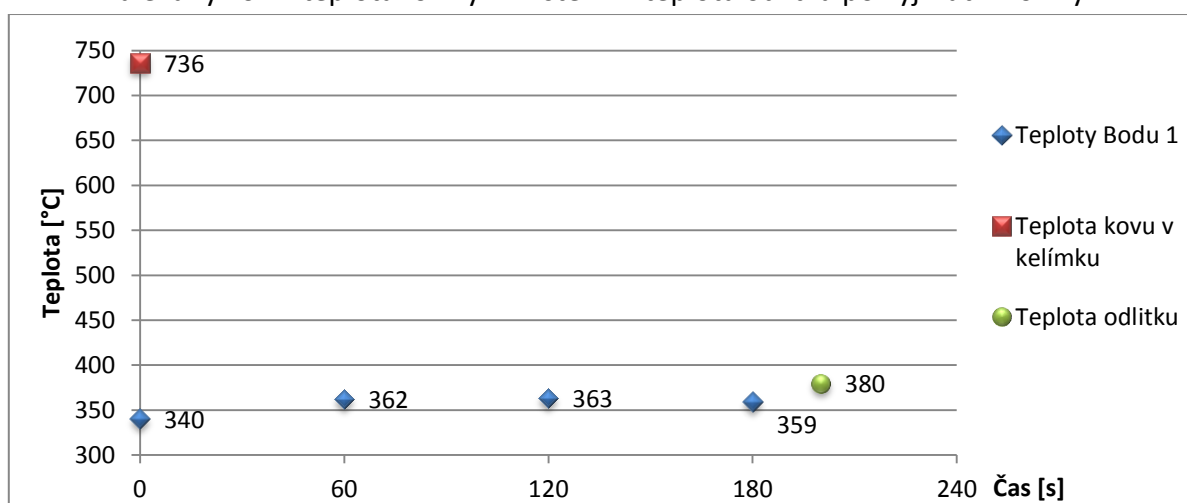
V zásadě však lze vyhodnotit, že teplota odlitku je v průměru o cca 11,5 °C vyšší než je teplota líce formy.

Průběh teploty líce formy vyjadřuje postupný nárůst teploty formy a současně i okamžiky, kdy byl povrch líce formy ošetřován a teplota poklesla vlivem otevření formy i nástřikem povlaku.

Průběh teploty v bodě 1:

Na obrázku je znázorněn teplotní režim:

- Nalévaný kov – teplota formy v místě 1. – teplota odlitku po vyjmutí z formy

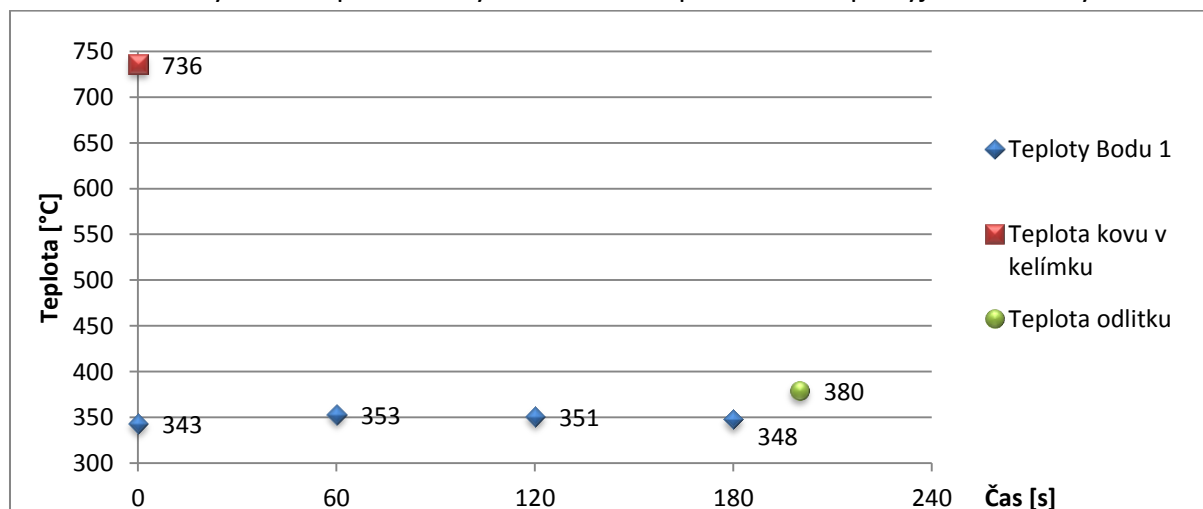


Obr. č. 23: Průběh teploty v bodě 1

Průběh teploty v bodě 2:

Na obrázku je znázorněn teplotní režim:

- Nalévaný kov – teplota formy v místě 2. – teplota odlitku po vyjmutí z formy

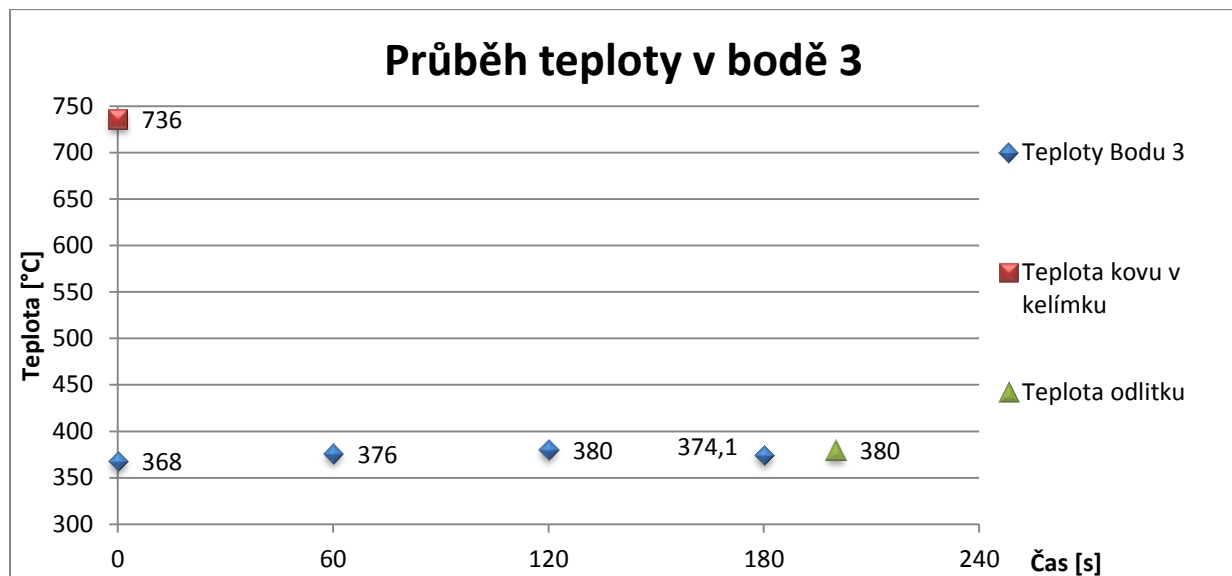


Obr. č. 24: Průběh teploty v bodě 2

Průběh teploty v bodě 3:

Na obrázku je znázorněn teplotní režim:

- Nalévání kov – teplota formy v místě 3. – teplota odlitku po vyjmutí z formy



Obr. č. 25: Průběh teploty v bodě 3

3.4 Porovnání experimentálního měření teplot formy s průběhy teplot zjištěnými simulací

V průběhu cyklování odlévání jak u simulace obr. č. 13, tak i při měření teplot se projevilo postupný nárůst teploty a jeho ustálení při 9 – 10 cyklu což lze pozorovat na obrázcích č. 20 a 21. U experimentálního měření jsme první 3 cykly vynechali, protože byl nanesen nátěr, který byl vysušován.

V tabulce č. 4 jsou uvedené hodnoty pro porovnání naměřených hodnot vůči teplotám určené simulací. Hodnoty uvedené v tabulce jsou pro 14 cyklus, kde forma byla již v ustáleném stavu. Vzniklé rozdíly jsou minimální a v rámci prakticky přijatelných rozdílů.

Tabulka č. 4 - Porovnání naměřených a simulovaných teplot

Bod	Naměřená teplota [°C]	Stanovena teplota simulací [°C]	Rozdíly teplot [°C]
1	391	423	32
2	357	358	1
3	373	372	1
4	366	445	79
5	381	360	21

4 Kontrola odlitku

Kontroly, které byly provedené při provozu a následně po odlití na zkušebních vzorcích:

- Kontrola chemického složení.
- Kontrola teploty taveniny.
- Kontrola rozměrů.
- Kontrola vnitřní homogenity – řediny.

4.1 Kontrola chemického složení

Spektrální analýza byla prováděna přístrojem SPECTROMAX (v. č. 14878). Spektrometr je kontrolován a udržován firmou SPECTRO CS. Kontrolu chemického složení pravidelně zajišťuje sama slévárna. Výsledky z měření jsou uvedeny v tabulce č. 5.

Tabulka č. 5 - Protokol spektrální analýzy

Vzorek: DS-5-1		Jakost: AlSi7Mg0,6		Datum a čas: 29.4.2015, 6:56:14		
Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	Zn [%]	Ni [%]
7,50	0,144	0,00990	0,0125	0,620	0,0124	<0,00160
Sn [%]	Ti [%]	Ag [%]	B [%]	Be [%]	Bi [%]	Ca [%]
<0,0240	0,103	0,00140	<0,00020	0,00020	<0,00250	0,00040
P [%]	Sr [%]	Li [%]	Zr [%]	Co [%]	V [%]	Ga [%]
0,00060	<0,00	0,00010	0,00090	<0,00110	0,00980	0,0128
Cr [%]	Pb [%]	Cd [%]	Na [%]	Al [%]		
0,00580	<0,00170	<0,00030	0,00010	91,6		

Tabulka č. 6 - Vyhodnocení naměřeného chem. složení porovnané s normou EN AC – 42200

Norma						
Si [%]	Fe [%] Max	Cu [%] Max	Mn [%] Max	Mg [%]	Zn [%] Max	Ti [%]
6,5 – 7,5	0,19	0,05	0,10	0,45 – 0,70	0,07	0,08 – 0,25
Naměřeno						
Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	Zn [%]	Ti [%]
7,50	0,144	0,00990	0,0125	0,620	0,0124	0,103

Vzhledem k tomu, že zkouškou se především prokazovala rozměrová přesnost odlitku, byly odchylky v chemickém složení uvedené v normě a naměřenými hodnotami považovány za přijatelné.

4.2 Kontrola měření teploty taveniny

Teplota kovu byla během celého procesu několikrát kontrolována měřicím přístrojem CIE MODEL 307P Digital Thermometer s rozsahem měření $-50^{\circ}\text{C} - 1300^{\circ}\text{C}$ a přesností 0,3%. Teplota byla udržována na stále teplotě 750°C a to v elektrické odporové peci. Pro měření teploty přístroj používá termočlánky NiCr-Ni.

4.3 Kontrola rozměrů

Pro kontrolu rozměrů a tvarů odlitku jsou obecně používána různá měřidla - mikrometry, ruční či automatická měřidla a tři rozměrné automatické digitální měřicí přístroje.

Pro měření rozměru odlitku byla použita tato měřidla:

Tabulka č. 7 – Použitá délková měřidla

Název	Typ	Rozsah [mm]	Přesnost [mm]
Výškoměr Digitální	HDS DIGMATIC 570 304	0 – 600	0,01
Posuvné měřidlo digitální	DIGMATIC CALIPER	0 – 150	0,01
Posuvné měřidlo analog	KINEX	0 – 500	0,02

Měření vybraných (důležitých) rozměrů odlitku SUPPORT T160

V tabulce jsou uvedeny důležité rozměry jejich jmenovitá a naměřená hodnota a hodnocení rozměrů. Zbytek naměřených hodnot je uveden v příloze č. 20 zároveň s výkresem, na kterém jsou označena (okapkováná) jednotlivá místa měření.

Tabulka č. 8 - Výběr naměřených hodnot pro zkušební odlitek

Číslo Pozice	Jmenovitá hodnota [mm]	Naměřená hodnota [mm]	Splnění podmínek	
			Ano	Ne
1	$210 \pm 1,4$	209,8	x	
6	$\varnothing 16,5 \pm 0,85$	$\varnothing 16,4$	x	
10	$48 \pm 0,5$	47,4		x
11	$\varnothing 16,5 \pm 0,85$	$\varnothing 16,6$	x	
14	$\varnothing 60 \pm 1$	$\varnothing 59,7$	x	
41	82 ± 1	82	x	
41	82 ± 1	82	x	
57	$80,5 \pm 0,8$	81	x	
60	$\varnothing 14,5 \pm 0,5$	$\varnothing 15,2$		x

Vyhodnocení naměřených délkových hodnot

V tabulce č. 8 naměřených vybraných hodnot vidíme, že téměř všechny hodnoty splňují předepsaný jmenovitý rozměr, nebo jsou v rozsahu tolerance. U rozměrů, které nesplňují podmínky, navrhuje upravit rozměr formy, aby vyhovoval toleranci $\pm 0,5$.

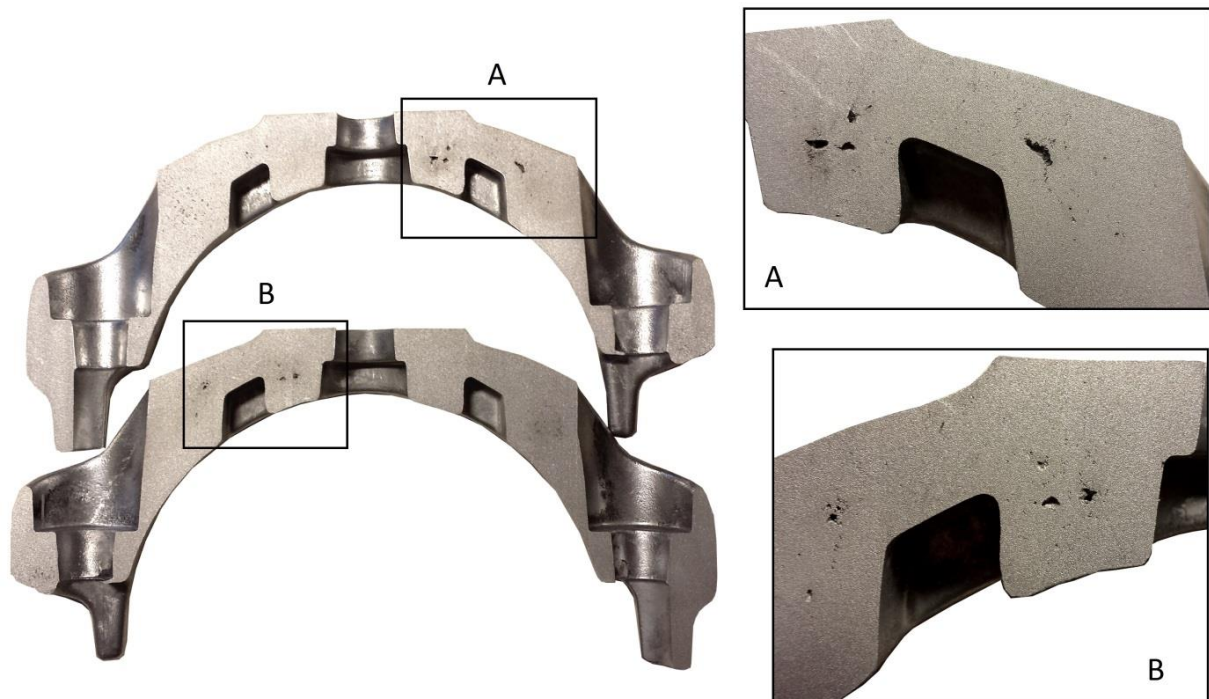
V případě pozice číslo 11 a 60 se projevilo „bržděné smršťování“ na kruhovém výstupku pohyblivé poloviny formy. V těchto případech je vhodné již s tímto bržděným smrštěním počítat a výstupek (případně jádro) již vyrobit s redukováným rozměrem – viz analýza rozměrových změn.

Konstruktéři forem zanedbávají problematiku různého smršťování materiálů formy, používají proto jednotné procentuální smrštění a difference v rozměrech odlitku upravují až po provedené zkoušce lití. Tím vznikají značné finanční a časové ztráty při přípravě výroby odlitku.

4.4 Kontrola vnitřní homogenity – řediny

I když u tohoto odlitku nebyla požadovaná vnitřní homogenita – porezita, byla provedena prověrka pro porovnání výsledků simulace se skutečnou vnitřní jakostí odlitku. Opravou odhalených vad (porezit) jsem se dále nezabíral, jelikož vnitřní homogenita nebyla požadovaná.

Simulace (obr. č. 14) signalizovala možnost vzniku ředin v místech barvy fialové. Proto byl proveden řez elektroerozivním drátkem (vzhledem k jeho kvalitě řezu). Na obr. č. 26 jsou označena místa, kde byly objeveny porezity. Tato místa jsou shodná s oblastmi, kterou nám predikovala simulace.



Obr. č. 26: Řez odlitkem v podélné ose

Závěr

V bakalářské práci je dokumentována příprava výroby, postup výroby formy a odlévání odlitku SUPPORT T160 pro zákazníka KOVOLIT.

Postup práce odpovídal procesu technologické a technické přípravy, výroby formy a zkoušce odlévání, jako nejprůkaznějšího způsobu ověření jakosti odlitku.

Splnění požadavků na rozměrovou přesnost bylo prokázáno rozměrovou kontrolou, kdy všechny rozměry vyhověly, až na dva, které byly následně upraveny na formě.

Mimo požadavek vnitřní jakosti odlitku byl proveden i podélný řez elektroerozivním drátkem přes riziková místa, která potvrdila výsledky simulace. Vznikající řediny u tohoto odlitku nejsou na závadu funkčnosti odlitku a zákazníkem nebyla požadována vnitřní jakost. Forma i její technologie byla předána slévárně KOVOLIT k sériové výrobě.

Provedenými teoretickými, praktickými a experimentálními pracemi ve firmě MOOD International, s.r.o. a ve slévárně KOVOLIT Česká s.r.o. bylo splněno zadání a cíle bakalářské práce.

Seznam použitých zdrojů

1. ZALENSAS, Reviewed and rev. by John L. Jorstad ... Ed. by Donna L. *Aluminum casting technology*. 2. ed., reprint. Des Plaines, Ill: American Foundrymen's Society, 2001. ISBN 0874331579.
2. ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 148 s. ISBN 8021427906.
3. *Slévárenská ročenka*. Brno: Česká slévárenská společnost, 2008, XXXV. ISSN 0231-7087. Ročenka.
4. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005, 700 s. ISBN 8089041884.
5. VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, 185 s. ISBN 8070806001.
6. BERNÁŠEK, Vladimír a Jan HOREJŠ. *Technologie slévání*. 3., upr. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2006, 175 s. ISBN 8070434910.
7. Aluminium Casting Techniques - Sand Casting and Die Casting Processes. In: *AZO Materials* [online]. AZoM.com - An AZoNetwork Site, May 3, 2002, Updated: Jun 11, 2013 [cit. 2015-03-18]. Dostupné z: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID>
8. ŠOLC, Petr. *Využití simulace pro predikci vad a hodnocení odlitků z Al slitin*. Brno, 2008. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
9. KOVVI, Konstantin Georgijevič a V PLJACKIJ. *Vady odlitků ze slitin neželezných kovů: určeno slévačům, mistrům, technologům a pracovníkům OTK*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1956, 129 s., obr. příl. Řada strojírenské literatury.
10. ČECH, Jaroslav. *Vady a kontrola odlitků*. 2., přeprac. vyd. Brno: VUT, 1991, 140 s. ISBN 80-214-0278-4.
11. ROUČKA, Jaromír a Radovan KOPLÍK. *Výzkum a vývoj procesu řízeného lití a plnění forem a usměrněného tuhnutí odlitků ze slitin Al odlévaných do kokil.: Experimentální zkoušky*. Brno, 2008.
12. ROUČKA, Jaromír a Radovan KOPLÍK. *Výzkum a vývoj procesu řízeného lití a plnění forem a usměrněného tuhnutí odlitků ze slitin Al odlévaných do kokil.: Analýza vad odlitků ze slitin Al odlévaných do kokil*. Brno, 2006.

Seznam tabulek

Tabulka č. 1 - Chemické složení.

Tabulka č. 2 - Vstupní podmínky simulace.

Tabulka č. 3 - Naměřené hodnoty teplot formy v čase.

Tabulka č. 4 - Porovnání naměřených a simulovaných teplot.

Tabulka č. 5 - Protokol spektrální analýzy.

Tabulka č. 6 - Vyhodnocení naměřeného chemického složení a porovnání s normou EN.

Tabulka č. 7 - Použitá délková měřidla.

Tabulka č. 8 - Výběr naměřených hodnot pro zkušební odlitek.

Seznam použitých symbolů a zkratek

Zkratka	Jednotka	Název
A _{50mm}	[%]	Tažnost
Al	[-]	Hliník
AlSi7Mg0,6	[-]	Slitina hliníku
Ag	[-]	Stříbro
B	[-]	Bor
Be	[-]	Beryllium
Bi	[-]	Bismut
Ca	[-]	Vápník
Cd	[-]	Kadmium
CNC	[-]	Computer Numeric Control
Co	[-]	Cobalt
Cr	[-]	Chrom
Cu	[-]	Měď
Fe	[-]	Železo
Ga	[-]	Galium
HBS	[-]	Tvrdost podle Brinella
Li	[-]	Lithium
Mg	[-]	Hořčík
Mn	[-]	Mangan
Na	[-]	Sodík
Ni	[-]	Nikl
P	[-]	Fosfor
Pb	[-]	Olovo
R _m	[MPa]	Pevnost v tahu
R _{p0,2}	[MPa]	Mez kluzu
Si	[-]	Křemík
Sn	[-]	Cín
Sr	[-]	Stroncium
s.r.o.	[-]	Společnost s ručením omezené
SW	[-]	Software
Ti	[-]	Titan
V	[-]	Vanad
Zn	[-]	Zinek
Zr	[-]	Zirkonium
α	[-]	Nasyčený tuhý roztok

Seznam obrázků

- Obr. č. 1: Odlitek SUPPORT T160
- Obr. č. 2: 3D model odlitku ze dvou pohledů 1
- Obr. č. 3: Režim tepelného zpracování. [8]
- Obr. č. 4: Schéma kovová forma s jádry [4]
- Obr. č. 5: Kokilový stroj s dvoudílnou formou
- Obr. č. 6: Detail vtokové jamky, kanálu a nálitku
- Obr. č. 7: Kokilový licí stroj KS-2
- Obr. č. 8: Řez 3D sestavou kokily
- Obr. č. 9: 3D model vytvořený metodou FDM
- Obr. č. 10: Ukázka ze simulace plnění formy
- Obr. č. 11: Simulace teplotního pole formy a odlitku při ustálené teplotě
- Obr. č. 12: Simulace znázornění míst teplotních uzlů
- Obr. č. 13: Graf teplot při cyklování
- Obr. č. 14: Simulace míst vzniku poretivity
- Obr. č. 15: Pohled na vyrobenou pevnou polovinu formy upevněnou na základní desce
- Obr. č. 16: Pohled na vyrobenou pohyblivou polovinu formy
- Obr. č. 17: Analýza rozměrových změn formy a odlitku
- Obr. č. 18: Upevněná a otevřená forma na kokilovém licím stroji KS-2
- Obr. č. 19: Označená místa měření teploty formy
- Obr. č. 20.: Průběh měření teploty formy v jednotlivých cyklech výroby odlitku 1- 10
- Obr. č. 21: Průběh měření teploty formy v jednotlivých cyklech výroby odlitku 11- 18
- Obr. č. 22: Průběh teploty líce formy a odlitku
- Obr. č. 23: Průběh teploty v bodě 1
- Obr. č. 24: Průběh teploty v bodě 2
- Obr. č. 25: Průběh teploty v bodě 3
- Obr. č. 25: Analýza rozměrových změn formy a odlitku
- Obr. č. 26: Řez odlitkem v podélné ose

Přílohy:

1. Výkres odlitku SUPPORT T160
2. Základní deska – 150138-00-01
3. Pevná polovina – 150138-00-02
4. Pohyblivá polovina – 150138-00-03
5. Pohyblivá polovina vložka 1 – 150138-00-04
6. Pohyblivá polovina vložka 2 – 150138-00-05
7. Pevná polovina vložka – 150138-00-06
8. Deska vyhazovačů – 150138-00-07
9. Deska vyhazovačů opěrná – 150138-00-08
10. Upínací trn – 150138-00-09
11. Vodící pouzdro – 150138-00-10
12. Vodící sloup – 150138-00-12
13. Vodící kámen – 150138-00-13
14. Zaváděcí pouzdro – 150138-00-14
15. Zaváděcí kolík – 150138-00-15
16. Stabilizátor – 150138-00-16
17. Podpěra – 150138-00-17
18. CD – Simulace: plnění, teplota odlitku (tuhnutí, místa předpokládaných vad), teplota formy, cyklování
19. Technologický pasport odlitku
20. Výkres s vyznačením měřených hodnot odlitku
21. Tabulka naměřených délkových hodnot