

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2019**

**VÁCLAV  
ČERMÁK**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Čermák** Jméno: **Václav** Osobní číslo: **408649**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**  
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Racionalizace výroby ingotů ze silumínů**

Název bakalářské práce anglicky:

**The rationalization of Al-Si alloy ingot production**

Pokyny pro vypracování:

1. Úvod
2. Primární a sekundární výroba Al slitin
3. Typy slévárenských Al slitin
4. Popis a analýza procesu výroby ingotů
5. Zhodnocení a závěr

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **23.10.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **08.01.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.06.2018**

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

6.11.2018

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

## Poděkování

Děkuji panu doc. Ing. Aleši Hermanovi Ph.D. za odborné vedení a cenné rady s vypracováním této bakalářské práce a jeho nekonečnou trpělivost. Těž děkuji firmě Metal Trade Comax, a.s., za spolupráci a příležitost tuto práci vypracovat.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu. Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů.

V Kladně dne 7. 1. 2019



.....  
Václav Čermák

## Abstrakt

Práce se zabývá racionalizací hutní výroby ingotů ze slitin hliníku, které se deformují vlivem prudkého chlazení při zachování vysokých vnitřních teplot v důsledku nedostatečně chlazených kokil. Práce je zaměřená na slitinu hliníku AlSi12, u které byla vyzorována nejvyšší míra deformace. Cílem práce je analyzovat výrobu hliníkové slitiny AlSi12 a přijít s možnou racionalizací s pomocí numerické simulace v softwaru NovaFlow.

**Klíčová slova:** hliník, výroba hliníku, slévárenské slitiny hliníku, silumin, racionalizace, numerická simulace, termosnímek

## Abstract

This work deals with the rationalization of metallurgical production of aluminum alloy ingots, which are deformed due to rapid cooling while maintaining high internal temperatures due to insufficiently cooled molds. The work is focused on AlSi12 aluminum alloy, which has been observed the highest degree of deformation. The aim of this bachelor thesis is to analyze the production of AlSi12 aluminum alloy and to achieve acceptable rationalization with the help of numerical simulation in NovaFlow software.

**Keywords:** aluminum, aluminum production, aluminum alloys casting, silumin, rationalization, numerical simulation, thermalpicture

# Obsah

<b>1. Úvod .....</b>	<b>2</b>
1.1 Cíle práce .....	2
<b>2. Primární a sekundární výroba hliníku .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Primární výroba hliníku.....</b>	<b>3</b>
2.1.1 Výskyt hliníku v přírodě .....	3
2.1.2 Čistota vytěženého bauxitu .....	5
2.1.3 Rozdělení technologií výroby hliníku.....	5
2.1.3.1 Bayerova metoda .....	5
2.1.3.2 Hallův-Héraultův postup .....	7
2.1.3.3 Rafinace hliníku .....	8
2.2 Sekundární výroba hliníku .....	9
<b>3. Typy slévárenských hliníkových slitin .....</b>	<b>12</b>
3.1 Slitina Al-Si (Silumin).....	12
3.1.1. Rozdělení Al-Si slitin: .....	13
3.2 Slitiny Al-Cu (Dural) .....	14
3.3 Slitiny Al-Mg (Hydronalium) .....	16
3.4 Slitiny Al-Zn.....	17
<b>4. Experimentální část .....</b>	<b>19</b>
4.1 Proces odlévání .....	20
4.2 Použité měřicí a vyhodnocovací vybavení.....	23
4.3 Analýza skutečného odlévacího procesu .....	25
4.4 Racionalizace procesu - návrh možného řešení .....	36
4.5 Mechanický obraceč.....	45
4.5.1 Výsledek mechanického obraceče .....	45
<b>5. Závěr.....</b>	<b>48</b>
<b>Použitá literatura .....</b>	<b>51</b>
<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>54</b>
<b>Seznam tabulek.....</b>	<b>56</b>
<b>Přílohy .....</b>	<b>57</b>

# 1. Úvod

V této bakalářské práci bude analyzována výroba hutních polotovarů z hliníkových slitin v závodě Metal Trade Comax, a.s. Po rekonstrukci tavrny a vybudování nové linky na odlévání ingotů z přetavovaných hliníkových odpadů se zjistilo, že se ingoty výrazně deformují, resp. prohýbají, vlivem prudkého zachlazení, při zachování vysokých vnitřních teplot. Nejvýraznější deformace je patrná na hliníkové slitině s označením EN AB-44100 resp. EN-AB-Al Si12, dále jen slitina AlSi12 od druhého až třetího cyklu lití do litinových kokil.

Toto pak vytváří problémy v následné přepravě štosů ingotů, kdy do jednoho štosu je vyskládaná cca. 1 tuna ingotů. Následnou přepravou, vlivem špatného stavu vozovek se na korbě kamionu celý štos rozsype a je nutné přepravu zastavit, zavolat pracovníky z hutního závodu a ručně vše přeskládat. Tím vznikají nežádoucí vícenáklady.

## 1.1 Cíle práce

- Analýza výroby ingotů ze slitiny hliníku AlSi12
- Příčiny vzniku deformací a následné možnosti jejich eliminací.

## 2. Primární a sekundární výroba hliníku

### 2.1 Primární výroba hliníku

#### 2.1.1 Výskyt hliníku v přírodě

V přírodě se v ryzí formě hliník obvykle nevyskytuje, jeho sloučeniny jsou rozptýleny v zemské kůře. Obsah hliníku v zemské kůře činí zhruba 7,47 – 8,3 % hmot. Hliník je tedy třetím nejrozšířenějším prvkem zemské půdy a zároveň nejpoužívanějším kovem. [1]

V mořské vodě je koncentrace hliníku velmi nízká, zhruba 0,01mg hliníku na litr vody. [2]

Nejvýznamnější minerály hliníku jsou **boehmite**  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (obsah hliníku je 44,98 %), **gibbsit**  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  (obsah hliníku je 34,6 %), **kryolit**  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  (obsah hliníku 12,85 %) a **korund**  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (nejvyšší podíl hliníku mezi minerály a to 52,93 %), celkový počet obdobných minerálů s obsahem hliníku je okolo 1200. [3]



Obr 1.: Minerál Boehmite [4]



Obr 2.: Minerál Gibbsit [5]





Obr 3.: Minerál Kryolitu [4]



Obr 4.: Minerál Korund [6]

Všechny tyto významné i méně významné minerály, se stopovým obsahem hliníku, tvoří v přírodě v tropických oblastech, chemickým zvětráváním, základních vyvřelin horninu zvanou bauxit.

Bauxit je nejvýznamnější ekonomicky využitelnou rudou pro výrobu hliníku. [3]

Žebříček zemí, k roku 2017, co by nejvýznamnější země v těžbě bauxitu: Austrálie 83Mt, Čína 68Mt, Brazílie 36Mt, Indonésie 27Mt. Každá z těchto zemí disponuje dostatkem rezerv na mnoho let těžby dopředu. [7]



Obr 5.: Mapa bauxitových dolů ve světě [8]

## 2.1.2 Čistota vytěženého bauxitu

Efektivnost výroby hliníku je závislá nejen podle obsahu  $Al_2O_3$ , ale též na bauxitovém (křemíkovém) modulu M:

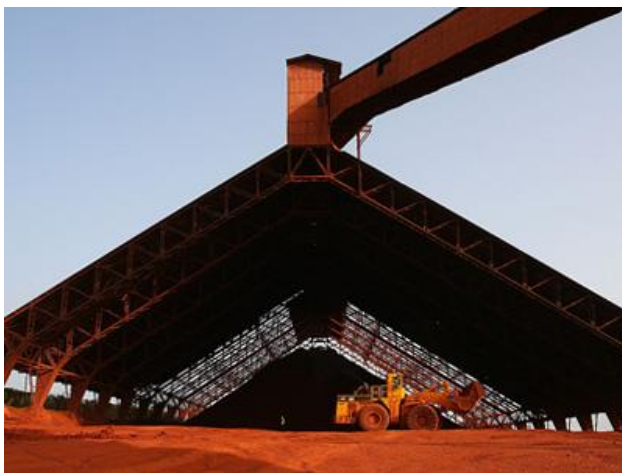
$$M = \frac{W_{Al_2O_3}}{W_{SiO_2}} [\text{hmot}\%]$$

Bauxitový modul jakosti, je poměr oxidu hlinitého a oxidu křemičitého, jež sleduje čistotu bauxitu a rozhoduje o výběru technologie pro výrobu oxidu hlinitého. Pokud má bauxit modul jakosti  $M = 10$ , jedná se o vysoce kvalitní bauxit, vhodný ke zpracování Bayerovou metodou, pokud  $M > 5 < 8$ , je bauxit méně kvalitní a je vhodný spíše pro spékací nebo kombinovanou výrobu oxidu hlinitého, a jestliže je bauxitový modul menší než 5, není bauxit vhodný pro výrobu oxidu hlinitého, ale jen pro výrobu cementu, jelikož se v něm nachází prvky jako je železo, fosfor a křemík, které jsou nežádoucí při následné výrobě elektrolytického hliníku (2.1.3.2). Vzhledem k současné situaci nedostatku vysoce kvalitního bauxitu, tj. s modulem  $M = 10$ , zpracovává se Bayerovou metodou i bauxit s modulem  $M = 6-7$ . [3]

## 2.1.3 Rozdělení technologií výroby hliníku

### 2.1.3.1 Bayerova metoda

Tato metoda vznikla rakouským chemikem Karlem Josefem Bayerem v 19. století v Rusku a hlavním cílem bylo získat čistou formu oxidu hlinitého  $Al_2O_3$  z bauxitové rudy, za použití hydroxidu sodného NaOH. Na výrobu 1 tuny čistého hliníku je zapotřebí 2 až 4 tun bauxitu. [9]



Obr 6.: Bauxitový důl [10]



Obr 7.: Vytěžený surový bauxit [10]

Proces: [9, 10, 11]

1. Úprava bauxitu – Bauxit je drcen, mlet a proplachován vodou, aby se bauxit oddělil od jílu, dále je sušen a s malým množstvím vody smíchán a přeměněn až v hustou pastu, jež se v nádobách ohřívá párou a tím se odstraňuje přítomný křemík.
2. Takto upravený bauxit se smíchá s louhem, a to konkrétně vápnem a hydroxidem sodným a přečerpá se do velkých tlakových nádob zvaných autoklávy.
3. Za působení teplot a tlaku v autoklávech dochází k louhování. Teplota i tlak je různá, podle typu bauxitové rudy (tab.1). Cílem je separace oxidu hlinitého od oxidů železa a křemíku.

Typ bauxitové rudy	Operační teplota [°C]	Operační tlak [atm]
Gibbsitické bauxity	135–150	1
Boehmitické bauxity	205-245	1

Tabulka 1.: Operační hodnoty pro louhování podle typu bauxitu. [11]

4. Působením hydroxidu sodného vzniká hlinitan sodný, který je rozpustný ve vodě, proto se oddělí následnou filtrací oxid železitý a oxid křemičitý – vznik červené usazeniny (kalu). Tento kal je po další úpravě vrácen zpět do oběhu.
5. Následně se ochlazený roztok přenesse do rozkladových nádrží, kde se naočkuje krystalovým zárodkem hydroxidu hlinitého.
6. Nastává krok zvaný kalcinace, při které se při teplotě 1200°C převede hydroxid hlinitý na oxid hlinitý. Proces kalcinace je prováděn v rotačních pecích nebo stacionárních kalcinátorech. Celý proces kalcinace je popsán chemickou rovnicí:  
$$Al(OH)_3 \rightarrow AlOOH \rightarrow \gamma Al_2O_3 \rightarrow \alpha Al_2O_3$$



Obr 8.: Čistý oxid hlinitý -  $Al_2O_3$  [10]

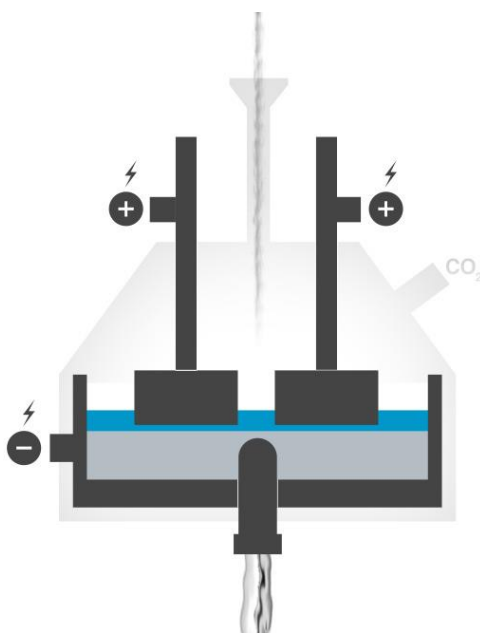
### 2.1.3.2 Hallův-Héroutův postup

Jedná se o metodu výroby primárního hliníku z oxidu hlinitého -  $Al_2O_3$ , který získáme Bayerovým procesem, jak je uvedeno v kapitole 2.1.3.1.

Jedná se o elektrolytickou přeměnu  $Al_2O_3$  v hliník s čistotou až 99,9%.

Proces: [8, 12]

1. Základem je ocelová vana o rozměrech 9-14m na délku, 3-4m na šířku a 1-1,2m na výšku. Vana je zevnitř obložená žáruvzdorným materiálem a uhlíkovou vyzdívkou. Elektrolyt ve vaně se používá takzvaný kryolit  $Na_3[AlF_6]$ . Elektrický proud 400kA je přiveden z vrchu za pomoci kladných anod a zesponu zápornou katodou. To vše pracuje pod teplotou 950°C



Obr 9.: Elektrolytická vana [8]

2. Čistý oxid hlinitý  $Al_2O_3$  je sypán do elektrolytické vany do lázně kryolitu. V důsledku dodávání elektrického proudu kolem anodami dochází k tomu, že chemická vazba mezi hliníkem a kyslíkem se rozpadá.
3. Roztavený hliník se usazuje na dně vany a kyslík reaguje s oxidem uhličitým -  $CO_2$ , který produkuje kladné uhlíkové anody.
4. Čistý vyprodukovaný hliník, z tohoto elektrolytického procesu, se drží na dně vany, kde působí záporná katoda, následně je hliník odléván například do ingotů.



Obr 10.: Primární hliník odlitý do ingotů [10]



Obr 11.: Hliníkové slitky [13]

### 2.1.3.3 Rafinace hliníku [3]

Elektrolytický hliník dosahuje čistoty okolo 99,5 – 99,9%, někdy je zapotřebí jeho čistotou zvýšit až na 99,999% například pro elektrotechnické účely.

Většina nečistot usazená v primárním hliníku je přenesená z elektrod a elektrolytu z procesu elektrolytické výroby hliníku, jak je popsáno v kapitole 2.1.3.2.

Mezi takové nečistoty z elektrod pochází například křemík – Si, železo – Fe, Vanad – V, mangan – Mn nebo měď – Cu. Z elektrolytu, tedy z kryolitu potom sodík – Na, lithium – Li nebo hořčík – Mg. Ze samotné vsázky oxidu hlinité to jsou Titan – Ti nebo zinek – Zn. V roztaveném hliníku se mohou nacházet i rozpuštěné plyny a kovy.

Technologie: *rafinace solemi, filtrace, vakuová rafinace*, to jsou základní možné a velmi často využívané technologie pro odstranění základních nečistot, jako pokrokové metody se využívají *frakční krystalizace, třívrstvá elektrorafinace* nebo *elektrolýza v organických médiích*, tyto metody zvýší čistotou hliníku až na 99,999% [1]

## 2.2 Sekundární výroba hliníku

Sekundární výroba nebo také recyklace hliníkových odpadů, při kterém může být hliníkový odpad znovu přetaven, slit do ingotů a opětovně využit při výrobě hliníkových produktů.

Přední výhodou výroby sekundárního hliníku je, že energetická náročnost je 5 % z celkové náročnosti výroby primárního hliníku z bauxitu. Zabraňuje vyčerpání hodnotné komodity bauxitu až o 5 %. Zabraňuje uvolňování oxidu uhličitého do ovzduší z procesu druhé fáze výroby primárního hliníku. Poslední výhodou je, že hliník je nekonečně recyklovatelný. [26]

Následující popsaný proces výroby sekundárního hliníku, jsou moje vlastní poznatky, jež jsem načerpal ve firmách, které se zabývají výrobou z recyklovaného hliníku.

Proces:

1. Výkup a třídění hliníkového šrotu – prvním krokem sekundární výroby hliníku je výkup hliníkového šrotu. Společnosti, které se zabývají tímto směrem kovohutnictví svůj hliníkový šrot mohou vykupovat od předem smluvených zákazníků, jako například automobilky nebo obráběcí firmy. Tento způsob výkupu usnadní třídění samotného odpadu, jelikož předem vědí, co vykupují. Mohou to být například: špony z obráběcích nebo zbytky z lisovacích procesů.



Obr 12.: Hliníkový odpad (litá kola) [27]



Obr 13.: Hliníkový odpad (profily) [28]



*Obr 14.: Hliníkové špony [29]*

2. Lisování hliníkového šrotu – natříděný hliníkový odpad se následně zpracuje tím, že se velké kusy zredukuje na menší a vše se slisuje do velkých kvádrů. Samostatný neslisovaný odpad by v tavicí peci totiž shořel.



*Obr 15.: Slisovaný hliníkový odpad [30]*

3. Tavení hliníkového šrotu – tavení probíhá například v plynové rotační bubnové peci, kde se šrot roztaví a odlévá se do ustalovací pece, kde dochází k homogenizaci a čištění taveniny dusíkem a dále chemické a technologické úpravě taveniny. To znamená, že se leguje na požadované složení konkrétně vyráběné slitiny.



*Obr 16.: Rotační pec ve firmě Metal Trade Comax, a.s. [31]*

4. Lití – takto legovaná tavenina je přelévána na lící pás lící linky a tavenina je odlévána do bloků nebo ingotů.



*Obr 17.: Odlité slitiny hliníku do ingotů ve firmě Metal Trade Comax, a.s.*

Celková dostupnost sekundárního hliníku je velmi nízká, povede se uspokojit světově cca. 40 % poptávek. Nejvyšší míra recyklace hliníku je ve stavebnictví a to o přibližně 92-98 %, v automobilovém průmyslu to je 95 %, v obalovém 50 %.



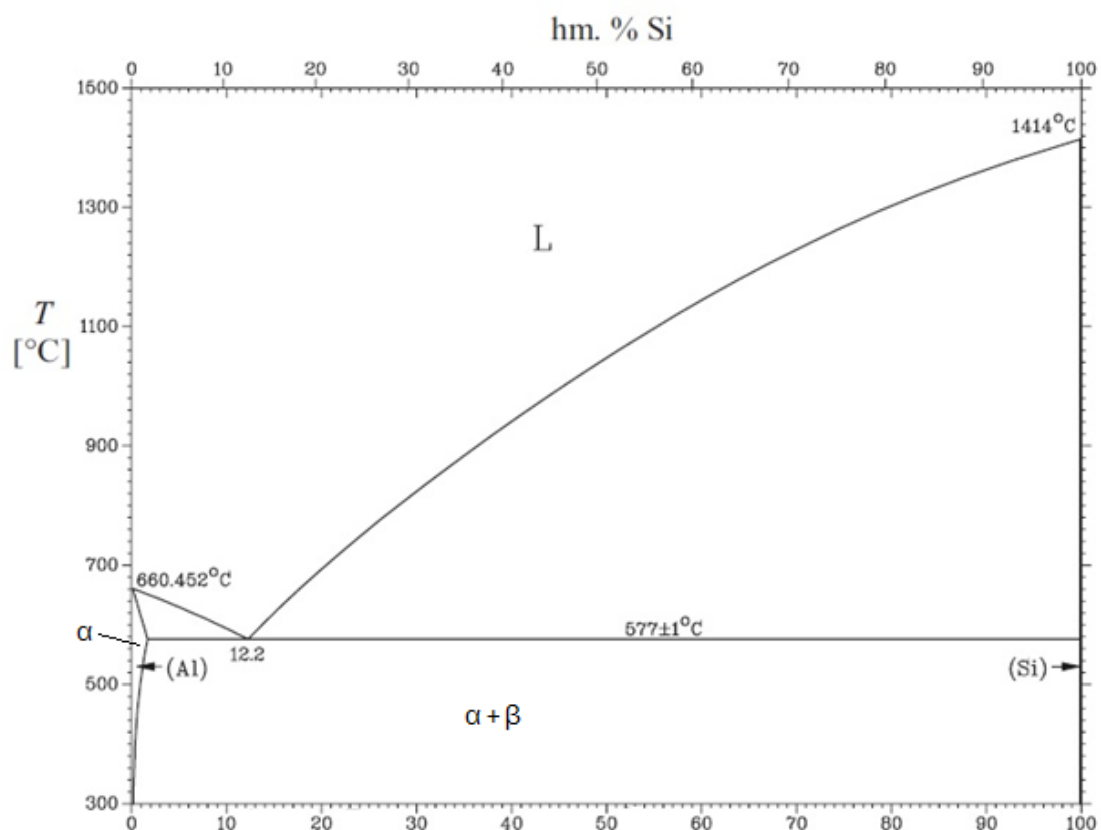
### 3. Typy slévárenských hliníkových slitin

#### 3.1 Slitina Al-Si (Silumin)

Významná slévárenská slitina, jejíž významná vlastnost je vysoká zabíhavost s nízkým sklonem k tvorbě staženin při lití. Dále se jedná o slitinu hliníku, která je vhodná ke svařování či pájení.[3]

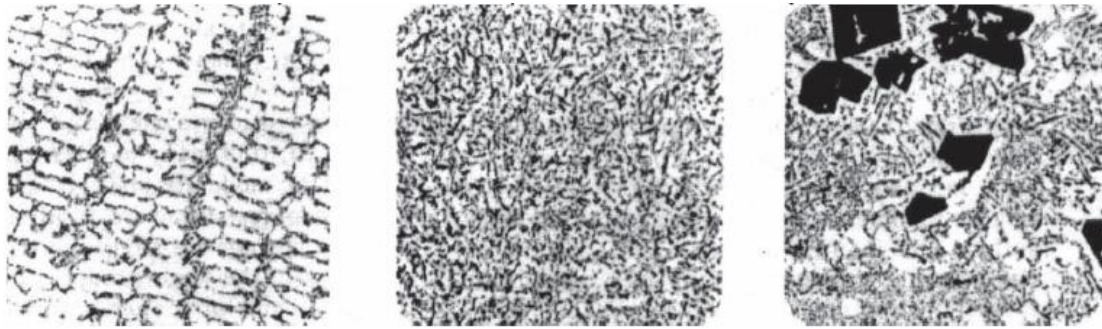
Slitina EN AC 44xxx resp. Al-Si je odlehčená slitina s odolností proti korozi a vysokou tepelnou vodivostí a je proto díky svým vlastnostem rozšířená v automobilovém průmyslu na různé aplikace jako například písty spalovacích motorů, držáky motorů, bloky motorů, hlavy válců nebo litých kol automobilů. Vlastnosti této slitiny mohou být výrazně zlepšeny její modifikací jiným prvkem nebo tepelným zpracováním. [14]

Soustava Al-Si má eutektický bod při 577°C a obsahu 12,2% Si, maximální rozpustnost křemíku v hliníku je 1,65 % při 577°C, eutektikum je tvořeno  $\alpha$  fází hliníku a tvrdou křehkou fází  $\beta$  křemíku.[15]



Obr 18.: Fázový diagram slitiny Al-Si [3]

Obr 19.a.), b.), c.) Mikrostruktura slitiny Al-Si v závislosti na obsahu křemíku [3]



a.) 8% Si

b.) 12% Si

c.) 22% Si

### 3.1.1. Rozdělení Al-Si slitin:

#### 1. Binární Al-Si slitiny: [15]

a.) PODEUTEKTICKÉ slitiny – Jejich obsah křemíku je do 10%, jejich struktura je tvořena dendrity  $\alpha$  hliníku a eutektikem  $\alpha+\beta$  (Al+Si), v této části diagramu mají slitiny Al-Si menší pevnost, vyšší tažnost horší slévárenské vlastnosti, jako například sklon k porezitě nebo horší zabíhavost. Jejich použití je vhodné k tvarově jednodušším odlitkům.

b.) EUTEKTICKÉ slitiny – jejich obsah křemíku je od 10 do 13%, mají nejvyšší pevnost, dobrou zabíhavost, úzký interval tuhnutí, sklon k soustředěným staženinám a nízký sklon k tvorbě porezí a trhlin.

c.) NADEUTEKTICKÉ slitiny – jejich obsah křemíku je nad 13%, struktura je tvořena primárními krystaly křemíku a eutektikem  $\alpha+\beta$  (Al+Si), mají nízkou teplotní roztažnost, vyšší tvrdost a malou obrobiteľnosť. Nadeutektické slitiny Al-Si se používají pro velmi namáhané odlitky, jako například písty spalovací motorů.

#### 2. Modifikované Al-Si slitiny: [15]

a.) Slitiny Al-Si-Mg – díky přítomnému hořčíku je možné slitinu Al-Si vytvrdit, bez ovlivnění jiným slévárenských vlastností. Vytvrzováním se zvýší mez kluzu a pevnost na 220 až 280MPa, zlepší se obrobiteľnosť, ale sníží tažnost. Nejčastěji se hořčíkem legují slitiny AlSi7Mg a AlSi10Mg, čím vyšší podíl křemíku ve slitině, tím zlepšují její slévárenské vlastnosti.

b.) Slitiny Al-Si-Cu – Měď ve slitině Al-Si zvyšuje tvrdost, pevnost, zlepšuje obrobiteľnosť a tepelnou vodivost, na druhou stranu však nepříznivě ovlivňuje tvárnost a sklon ke vzniku

trhlin a zhoršuje odolnost proti korozi při obsahu mědi nad 2 %, pak je nutné použít povrchovou úpravu.



Obr 20.: Blok motoru ze slitiny Al-Si [16]

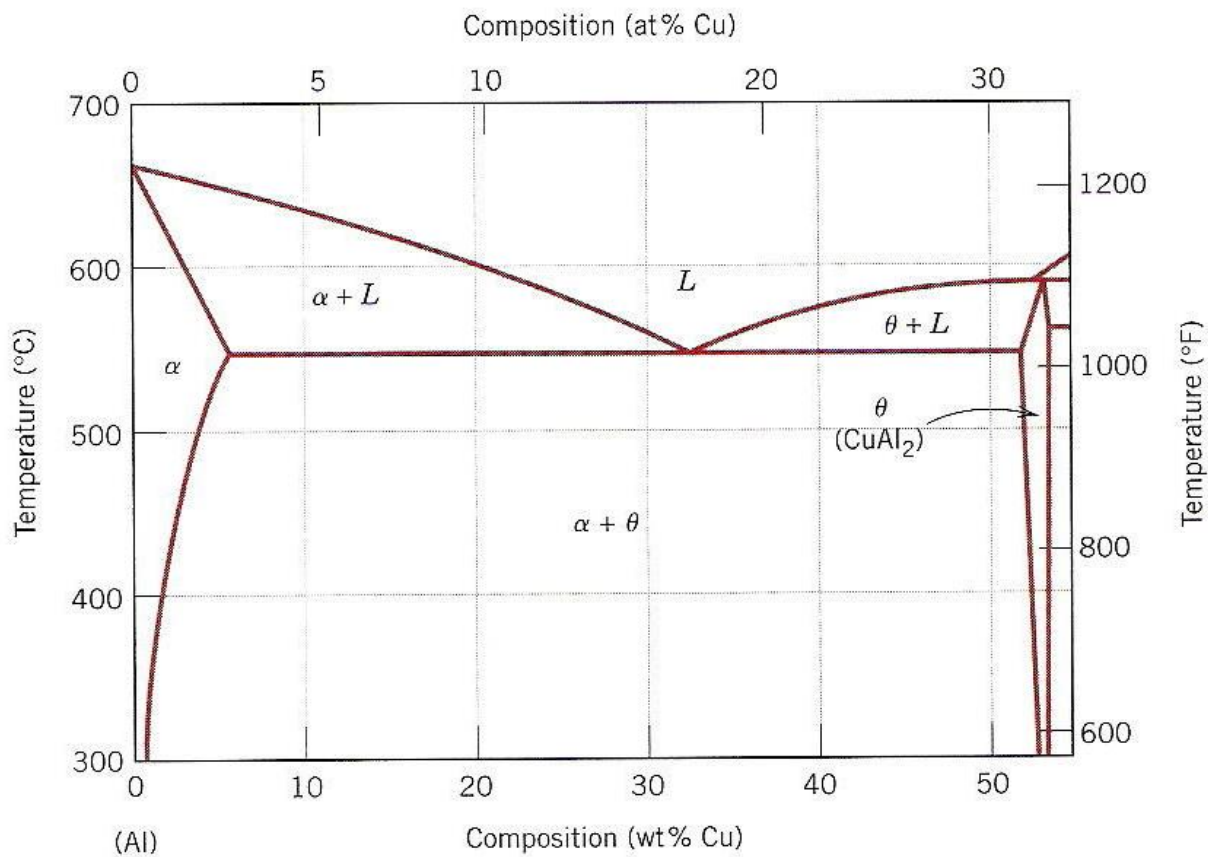


Obr 21.: Píst ze slitiny Al-Si [17]

### 3.2 Slitiny Al-Cu (Dural)

Slitina EN AC-21xxx je poměrně pevná, tvárná a lehká slitina s dobrou odolností proti opotřebení, obrobiteľností, ale s horší odolností vůči korozi. Díky tvárnosti je snadno válcovatelná, kovatelná nebo vytlačovaná do různých tvarů. Tepelným zpracováním vytvrzováním za studena je možné dosáhnout mechanických vlastností jako u nízkouhlíkových nelegovaných ocelí. [18]

Slitiny Al-Cu jsou nejčastěji používány v oblasti automobilismu, jako části motorů (hlavy válců), rámy automobilů a motorových člunů, v letectví nebo oběžných kolech proudových motorů. [19]



Obr 22.: Část fázového diagramu slitiny Al-Cu [20]

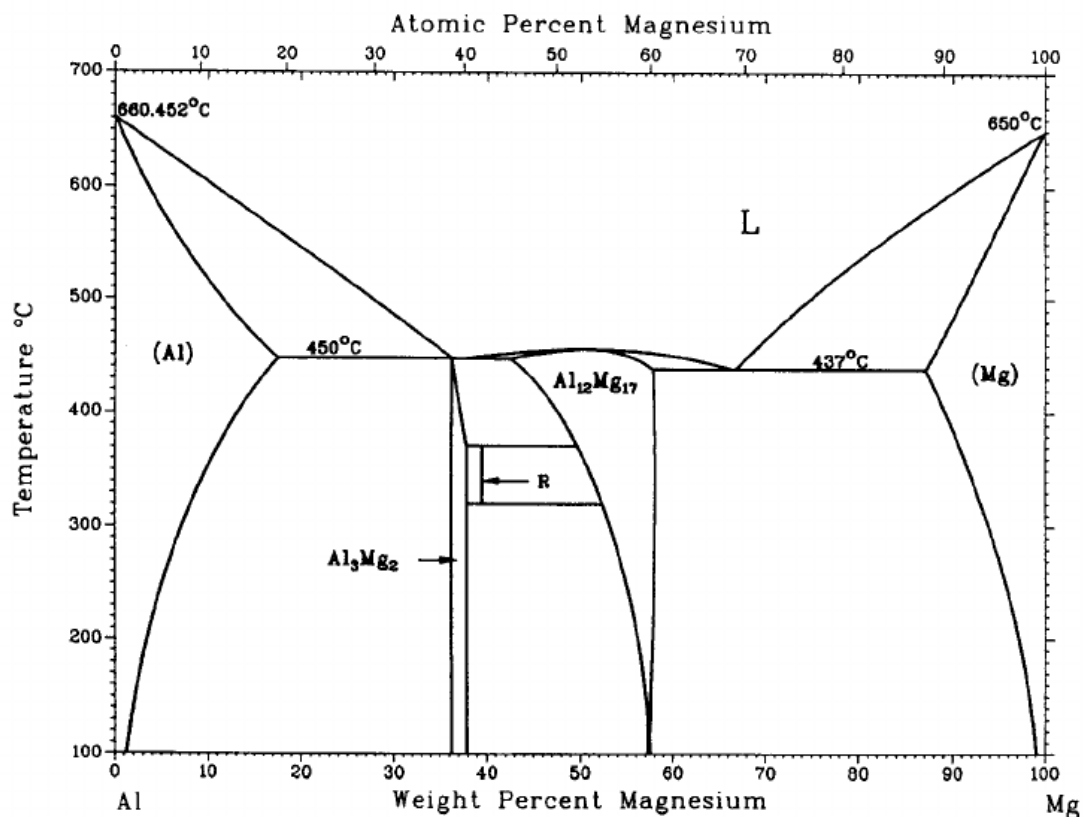
Maximální rozpustnost mědi v hliníku 5,7 % při teplotě 548°C.



Obr 23.: Použití slitiny Al-Cu u hlavy válců motoru [21]

### 3.3 Slitiny Al-Mg (Hydronalium)

Slitina EN AC-51xxx resp. Al-Mg patří do skupiny nevytvrditelných hliníkových slitin. Ze všech slitin hliníku mají nejlepší odolnost proti korozi. Pro zachování této vlastnosti mají ze všech slitin hliníku nejnižší obsah železa a křemíku, namísto železa se používá mangan a chrom. Na druhou stranu slitiny Al-Mg nemají dobré slévárenské vlastnosti, jsou náchylné na naplynění a oxidaci, nemají dobrou zabíhavost ani tekutost. Se zvyšujícím se obsahem hořčíku se rozšiřuje interval tuhnutí, což vede ke vzniku staženin a trhlin. Ke zlepšení slévárenských vlastností se používá 0,5 - 2,5 % křemíku. [15]



Obr 24.: Fázový diagram slitiny Al-Mg [22]

Rozpustnost hořčíku v hliníku je 14,9 % při eutektické teplotě 451°C, eutektikum je tvořeno fázemi  $\alpha$  (Al) a  $\beta$  ( $Al_8Mg_5$ ), pokud je přítomen ve slitině i křemík, lze slitinu Al-Mg vytvrzovat.

Vzhledem k vysoké odolnosti proti korozi, našla tato slitina mimo jiné uplatnění v mořských oblastech, v cyklistickém a dále v automobilovém průmyslu, jako pedály, řadicí páky nebo části podvozku. [23]



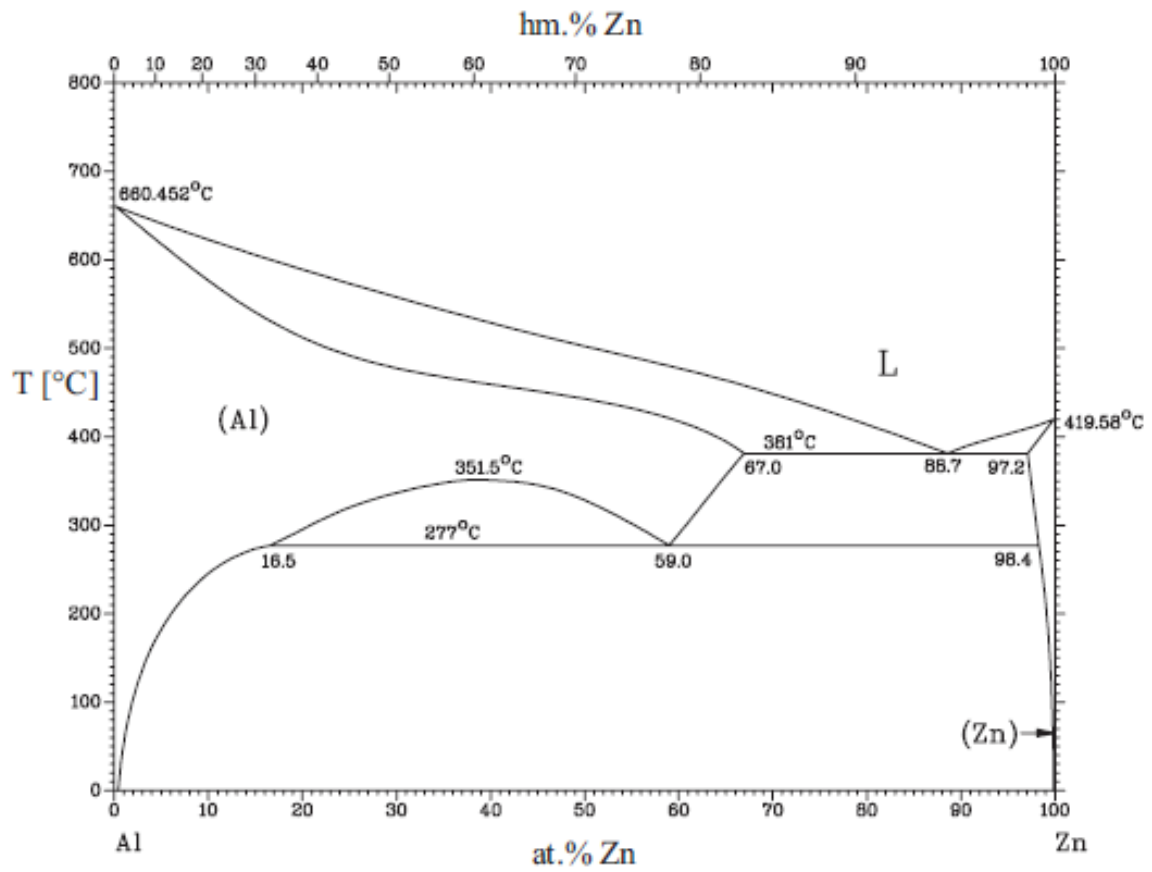
Obr 25.: Použití slitiny Al-Mg u cyklistických pedálů [24]

### 3.4 Slitiny Al-Zn

Slitina EN AC-71000 resp. Al-Zn patří mezi vytvrditelné slitiny hliníku. Vyznačuje se velkou rozměrovou stabilitou, dobrou obrobiteľnosť a odolnosť proti korozi. Slitina Al-Zn má výborný povrch a po obrobení je vhodná k pájení nebo svařování. Pod napětím tato slitina svoje korozivzdorní vlastnosti ztrácí, stejně tak svojí pevnost se vzrůstajícím teplem. Slévárenské vlastnosti má tato slitina také špatné a to konkrétně sklon ke vzniku staženin a prasklin. [15]

Slitiny pro technické aplikace obsahují kolem 5 až 7 % Zn a do 1 % Mg. V kombinaci zinku s hořčíkem umožňují po odlití slitině vytvrzení přirozeným stárnutím a to vede ke zlepšení mechanických vlastností až na 250MPa pevnosti v tahu a tvrdosti 70HB. [15]

Legující prvky pro zvýšení pevnosti u slitiny Al-Zn jsou například měď, chrom či titan. [15]



Obr 26.: Fázový diagram slitiny Al-Zn [3]

Slitina nachází své uplatnění v leteckém, automobilovém průmyslu a díky povrchu i v oblasti mobilní telefonů a příslušenství.

## 4. Experimentální část

V první části je práce zaměřena na analýzu hutní výroby hliníkových ingotů ze slitin AlSi12 ve firmě Metal Trade Comax, a.s. U těchto odlitých ingotů dochází k velkému pnutí, respektive k prohnutí, v důsledku vysokých vnitřních teplot ingotů a následně jejich zchlazení. Tato deformace je výrazně viditelná od třetího cyklu odlévacího procesu. Následkem toho jsou nestabilně seskládané štosy odlitých ingotů, které vytváří komplikace při manipulaci a přepravě.



*Obr 27.: Nestabilně seskládaná paleta odlitých ingotů*

V druhé části je práce zaměřena na možnou racionalizaci hutní výroby hliníkových ingotů pomocí nasimulovaných odlévacích procesů se zakomponovaným chlazením kokil v softwaru NovaFlow. Cílem práce je zjistit příčinu vznikajících pnutí, respektive prohýbání ingotů a nalézt možné řešení k eliminaci těchto deformací a racionalizovat hutní výrobu hliníkových slitin.



## 4.1 Proces odlévání

Firma Metal Trade Comax, a.s. se zabývá, mimo dalších strojírenských odvětví, předně výrobou hliníkových předslitin Al-Si, Al-Mg, Al-Cu, Al-Zn a jejich následným legováním. Slitiny vyrábí především pro automobilový, letecký, chemický, elektrotechnický, potravinářský a obecně strojírenský průmysl.

K výrobě používají moderní rotační plynové pece s kapacitou 12 a 16 tun, vanovou plynovou pec či indukční elektrickou pec. Velikost jedné tavby se pohybuje od 500 až do 24 000 kg. Velikost expedovaných štosů činí od 500 do 1200 kg.

Proces odlévání 16 tunové pece trvá přibližně 4 hodiny. Délka pásu je 21 metrů a čas jednoho cyklu, tj. od nalití k nalití trvá cca 14 minut. Dávkovací čas jedné kokily je přibližně 3,8 sekund. Počáteční teplota litinových kokil je 50°C, licí teplota zkoumané slitiny hliníku AlSi12 je 750°C

Samotný proces odlévání začíná dávkováním do licího kola, které přelévá taveninu do litinových kokil, jež jsou v řadě za sebou na pásu.

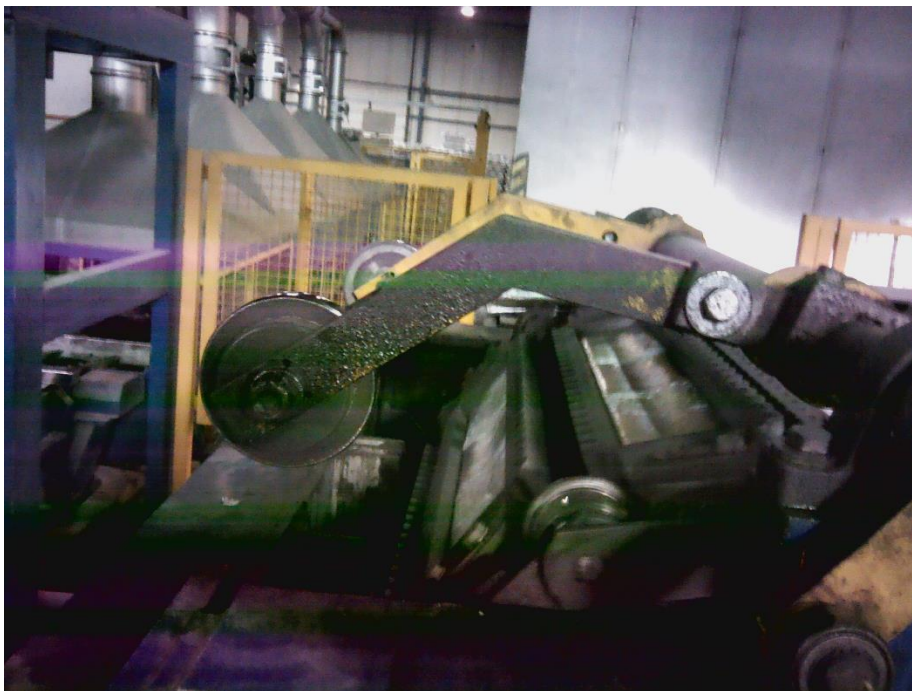


*Obr 28.: Licí kolo linky*

Následuje proces tuhnutí, kde na délce 21 metrů tuhne tavenina v kokile 7 minut. Kokily s tuhnoucí taveninou projíždí dvěma ventilátory o rychlosti proudění cca. 12m/s a průtočným množstvím cca 40.000m<sup>3</sup>/hodinu, pak je následně ingot vyklepnut ven z kokily. Prázdné kokily míří zpět k lícímu kolu a chladnou pasivně na vzduchu.



*Obr 29.: Snímek naplněných chladioucích kokil*



*Obr 30.: Proces vyklepávání ingotu z kokil*

Výroba ingotu končí v chladicím médiu - vodě a následným skládáním do štosu.



*Obr 31.: Vyklopené ingoty míří do chladicího média*



*Obr 32.: Pohled na vanu chladicího média*



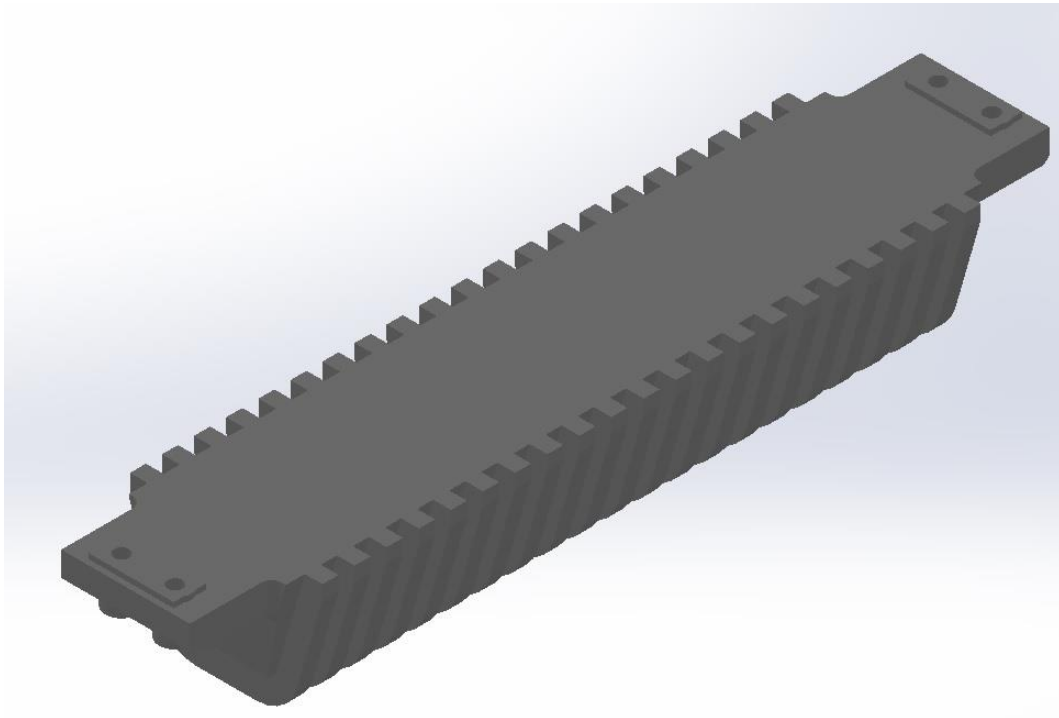
*Obr 33.: Naskládané ingoty k expedici*

## 4.2 Použité měřicí a vyhodnocovací vybavení

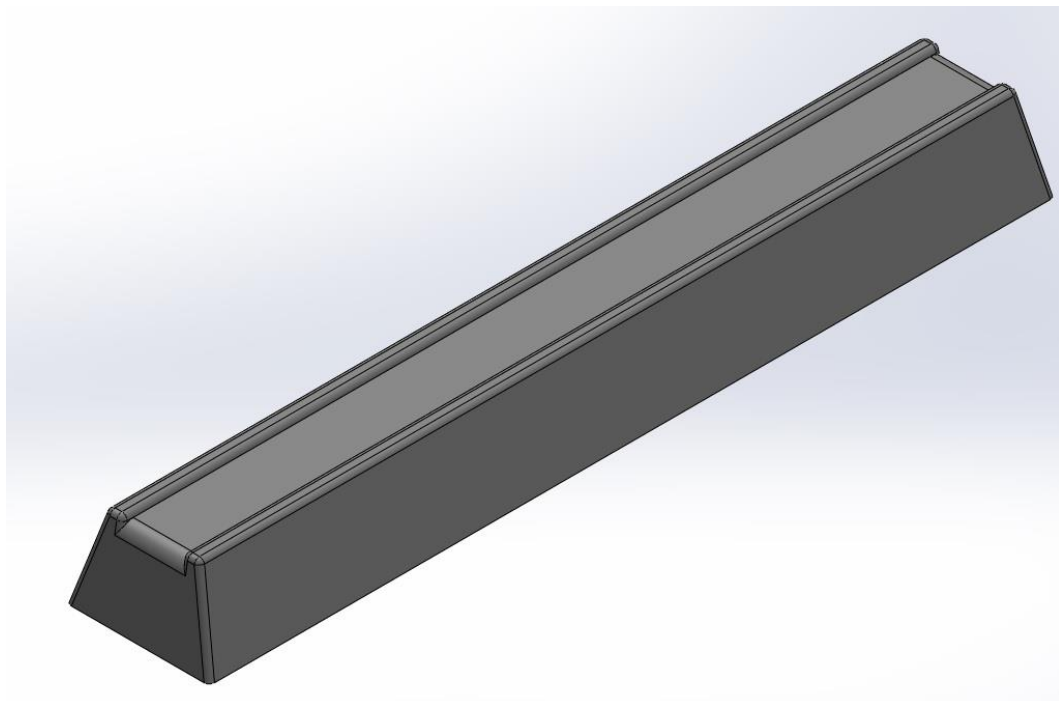
K měření bylo využito následující kalibrované zařízení:

- Termokamera FLIR T640 a vyhodnocovací software TOOLS+
- Kontaktní teploměr AhlbornTherm 2420 s termočlánkem FT 106
- Časoměřič
- Software pro simulace NovaFlow&Solid

Pro simulace byly vytvořeny 3D modely kokily a odlévaného ingotu v softwaru Solidworks, podle technické dokumentace poskytnuté firmou Metal Trade Comax, a.s.



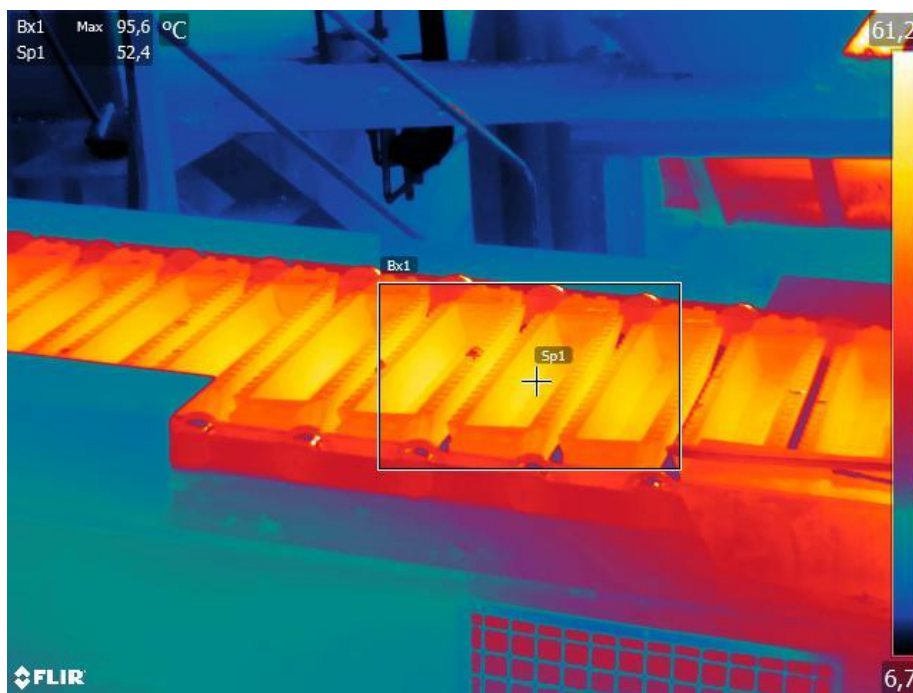
*Obr 34.: 3D model kokily*



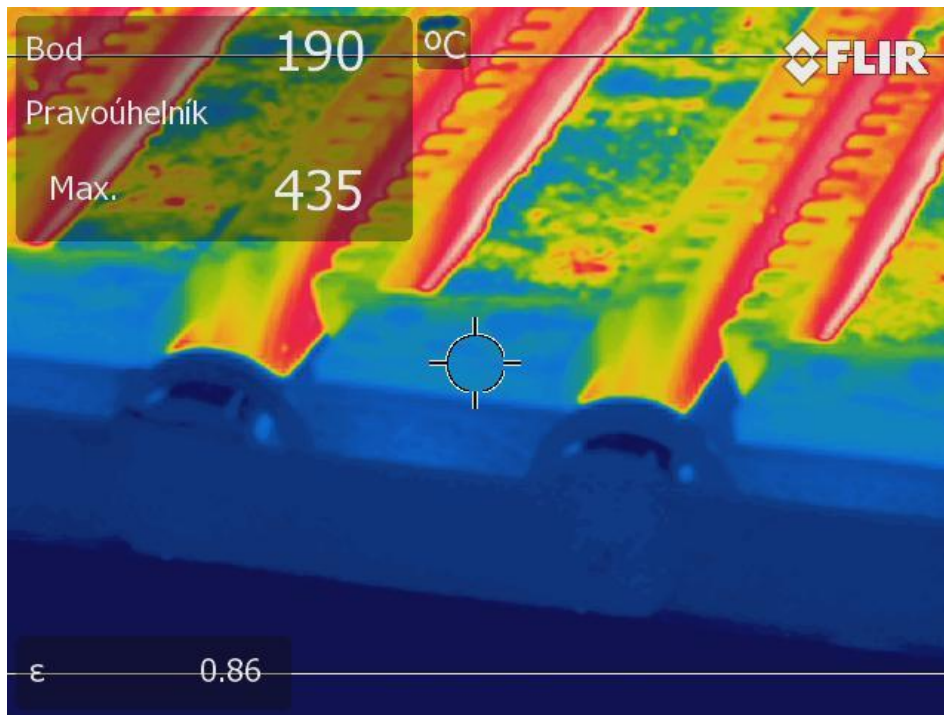
*Obr 35.: Model odlévaného ingotu*

### 4.3 Analýza skutečného odlévacího procesu

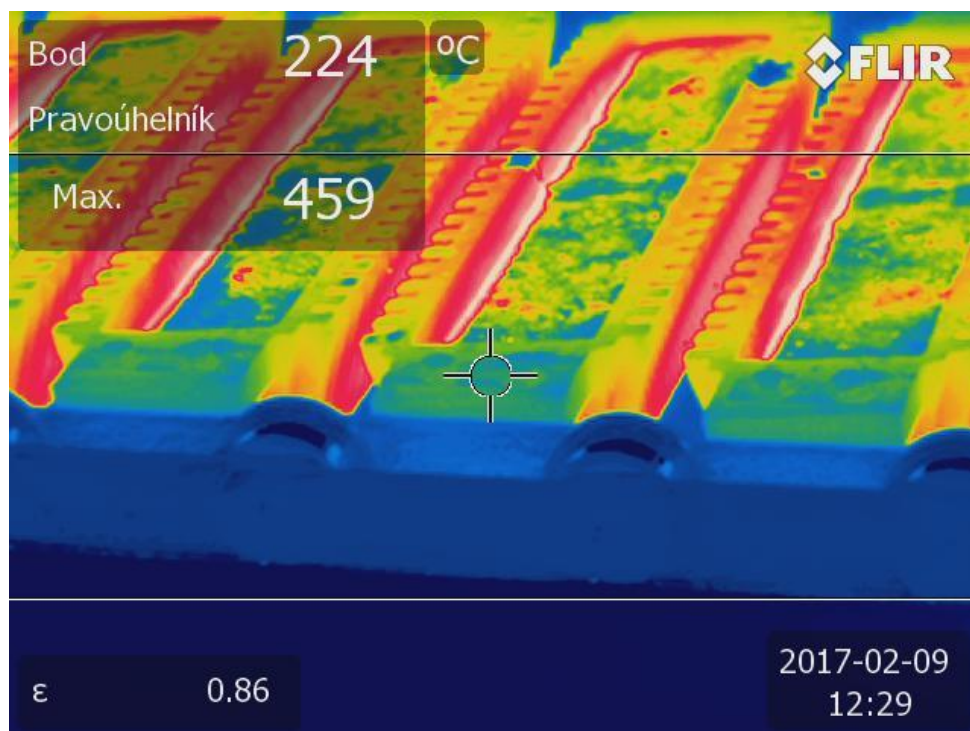
Sledoval jsem ve firmě celý odlévací proces problematické slitiny hliníku AlSi12 od začátku do konce. Na samotném začátku jsem nasnímal termokamerou prázdné litinové kokily a pro porovnání sebral teplotní hodnoty i kontaktním teploměrem a to hodnoty z úchyty, žebra a středu dutiny kokily. Na základě toho byla nastavena i emisivita na termokameře. Každých 30 minut jsem zachytil termosnímek dutiny kokily, těsně před nalitím taveniny, abych pozoroval, jak se kokila s přibývajícými licími cykly zahřívá a jakou si v dutině udržuje teplotu. Současně jsem sledoval stav odlitých ingotů a pozoroval jejich deformace.



Obr 36.: Termosnímek kokil na začátku odlévacího procesu

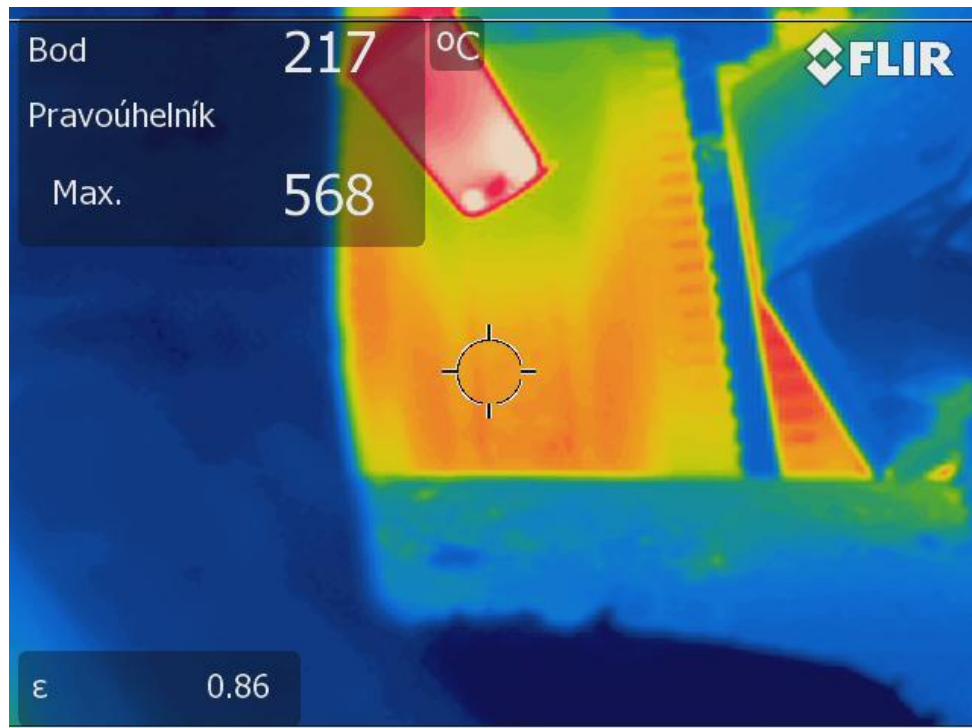


Obr 37.: Termosnímek úchytu kokily při prvním cyklu lití

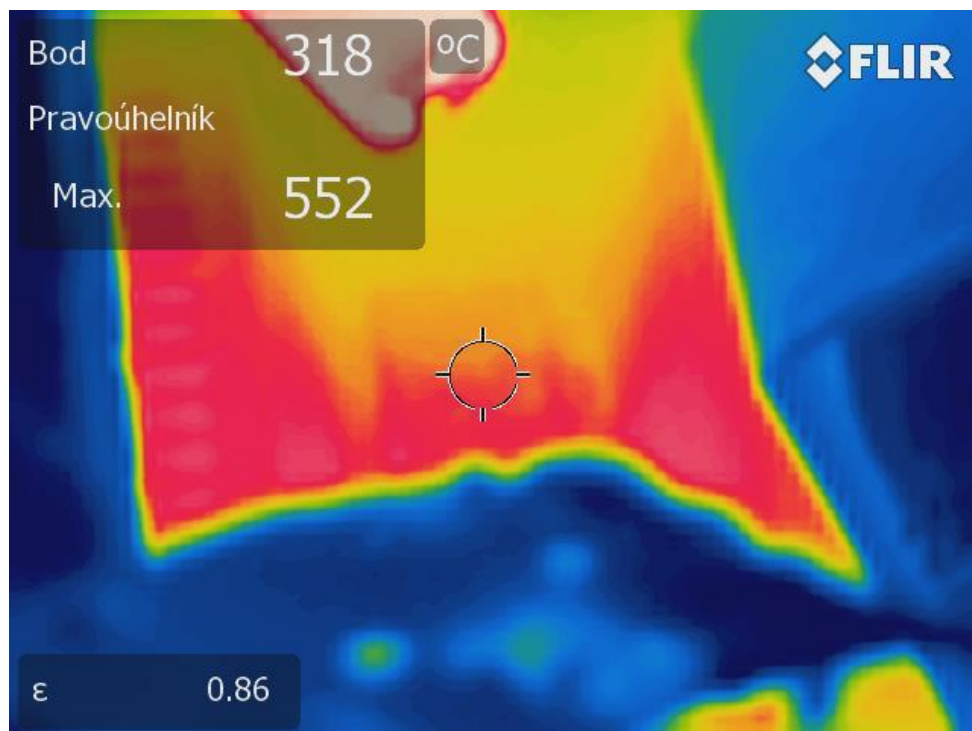


Obr 38.: Termosnímek úchytu kokily od třetího cyklu lití

Následující série termosnímků 39 až 44 zachycuje teplotu uvnitř dutiny kokily, těsně před nalitím taveniny. To znamená, že se jedná o teplotu dutiny po chladícím procesu. Snímky byly pořizovány od druhého cyklu do posledního ve 30ti minutovém intervalu.

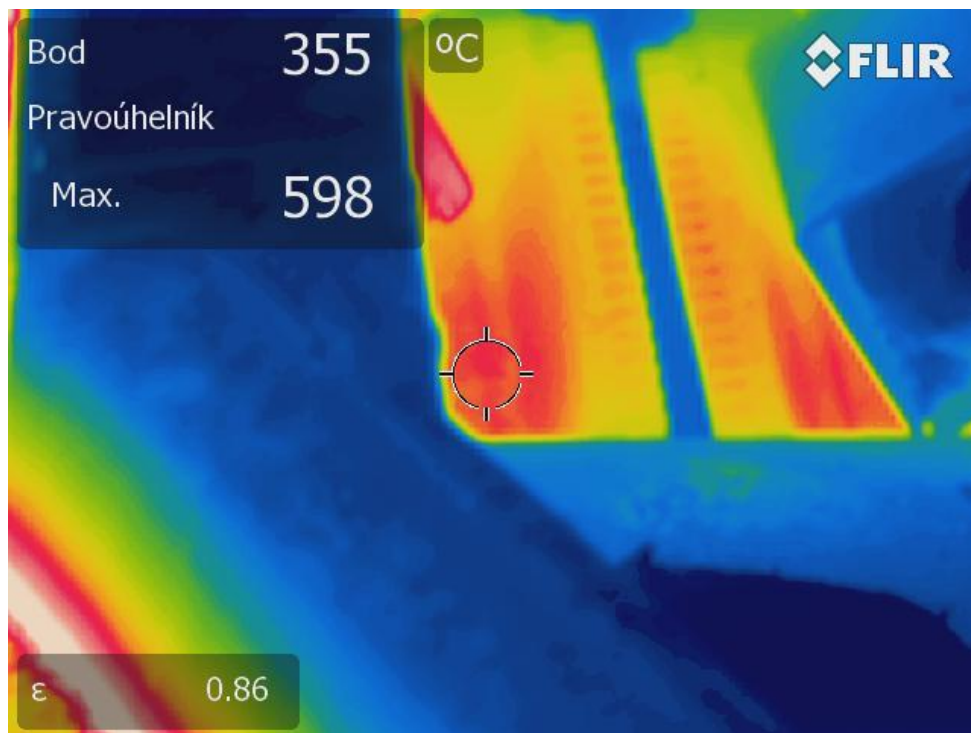


Obr 39.: Termosnímek dutiny těsně před naplněním kokily druhého cyklu lití

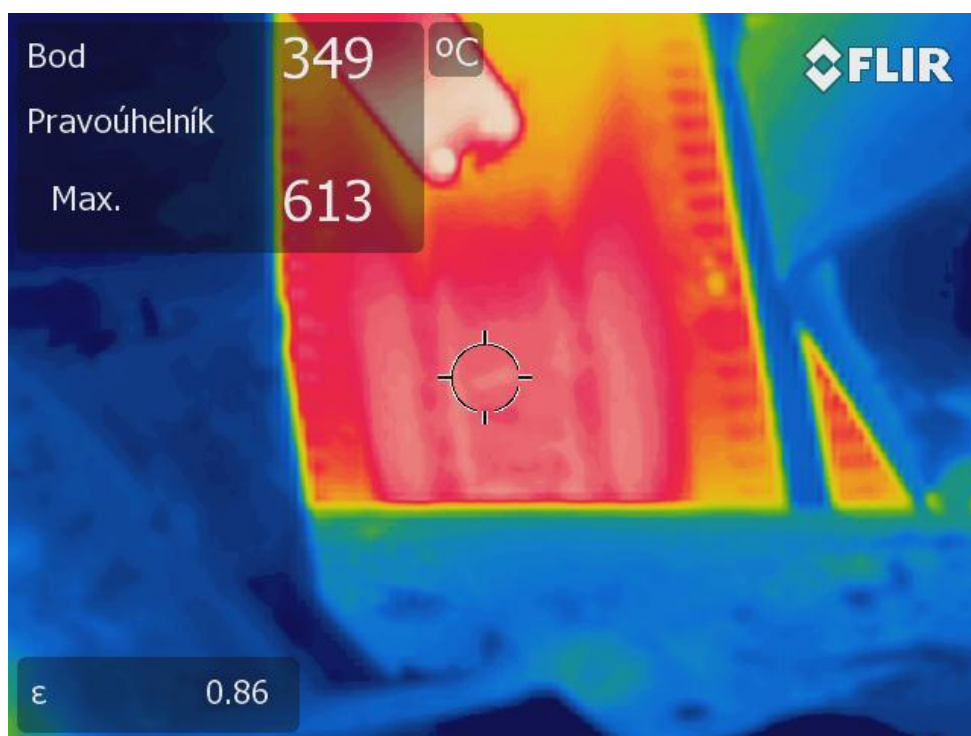


Obr 40.: Termosnímek dutiny těsně před naplněním kokily třetího cyklu lití

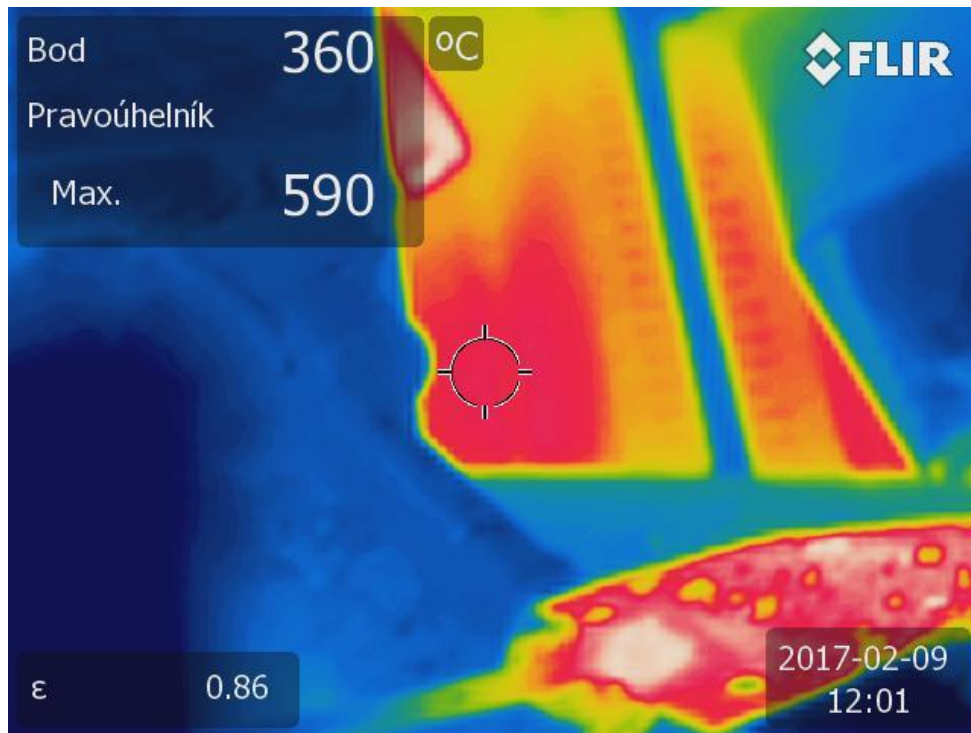




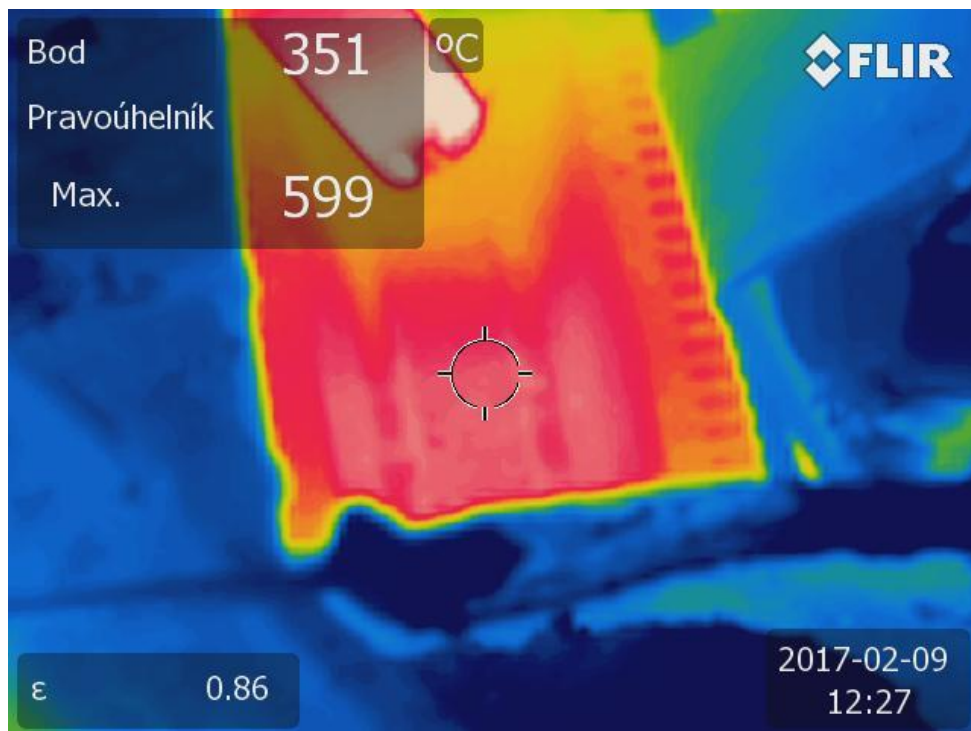
Obr 41.: Termosnímek dutiny těsně před naplněním kokily po třetím cyklu



Obr 42.: Termosnímek dutiny těsně před naplněním kokily 2 hodiny po začátku



Obr 43.: Termosnímek dutiny těsně před naplněním kokily 2,5 hodiny po začátku



Obr 44.: Termosnímek dutiny těsně před naplněním kokily (poslední cyklus)

Po analýze snímků z termokamer a pozorováním odlitých ingotů se přišlo na problém, že deformace - prohnutí ingotů, je přímo úměrná na počtech odlitých cyklů, respektive s přibývajícimi licími cykly se deformace zvyšuje. Ze série termosnímků 39 až 44 je patrné, že teploty uvnitř dutiny kokil, se od zhruba třetího až čtvrtého cyklu odlévání pohybují okolo 350 - 360°C. Pozorované ingoty vykazují výrazné deformace též od třetího až čtvrtého cyklu odlévání a nadále zůstávají stejné.



*Obr 45.: Zdeformovaný (prohnutý ingot)*

Na obrázku 45. je možné sledovat deformaci odlitého ingotu. Samotná deformace má za následek, že takto na sebe naskládané ingoty se opírají jen o dva opěrné body (červeně naznačeno) a celý takto na sebe naskládaný náklad má za následek problém, jež je popsán v úvodu experimentální části této práce.

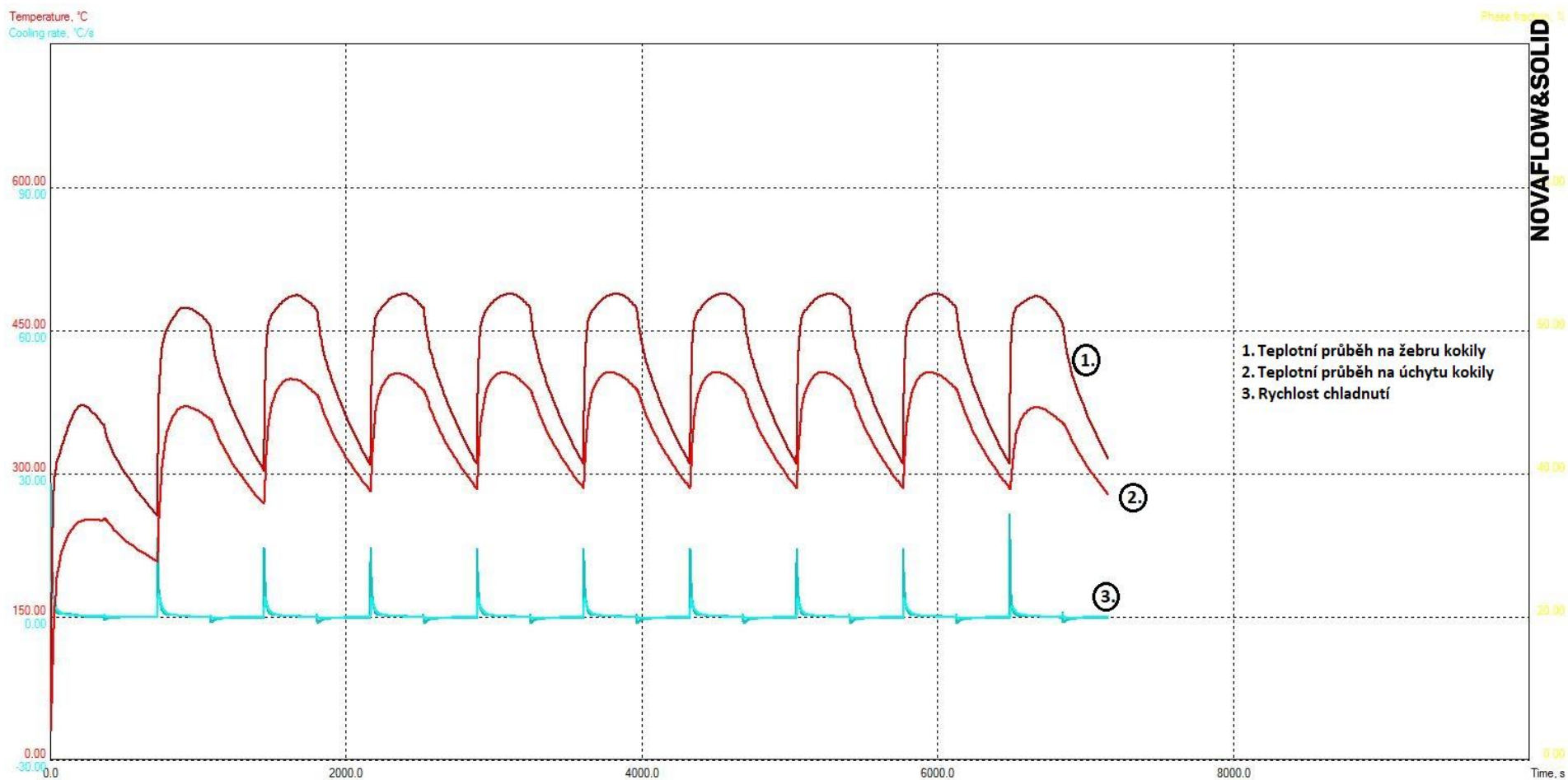
## Simulace odlévacího procesu

Dále bylo zapotřebí nasimulovat odlévací proces a vytvořit graf licího cyklu výrobní linky.

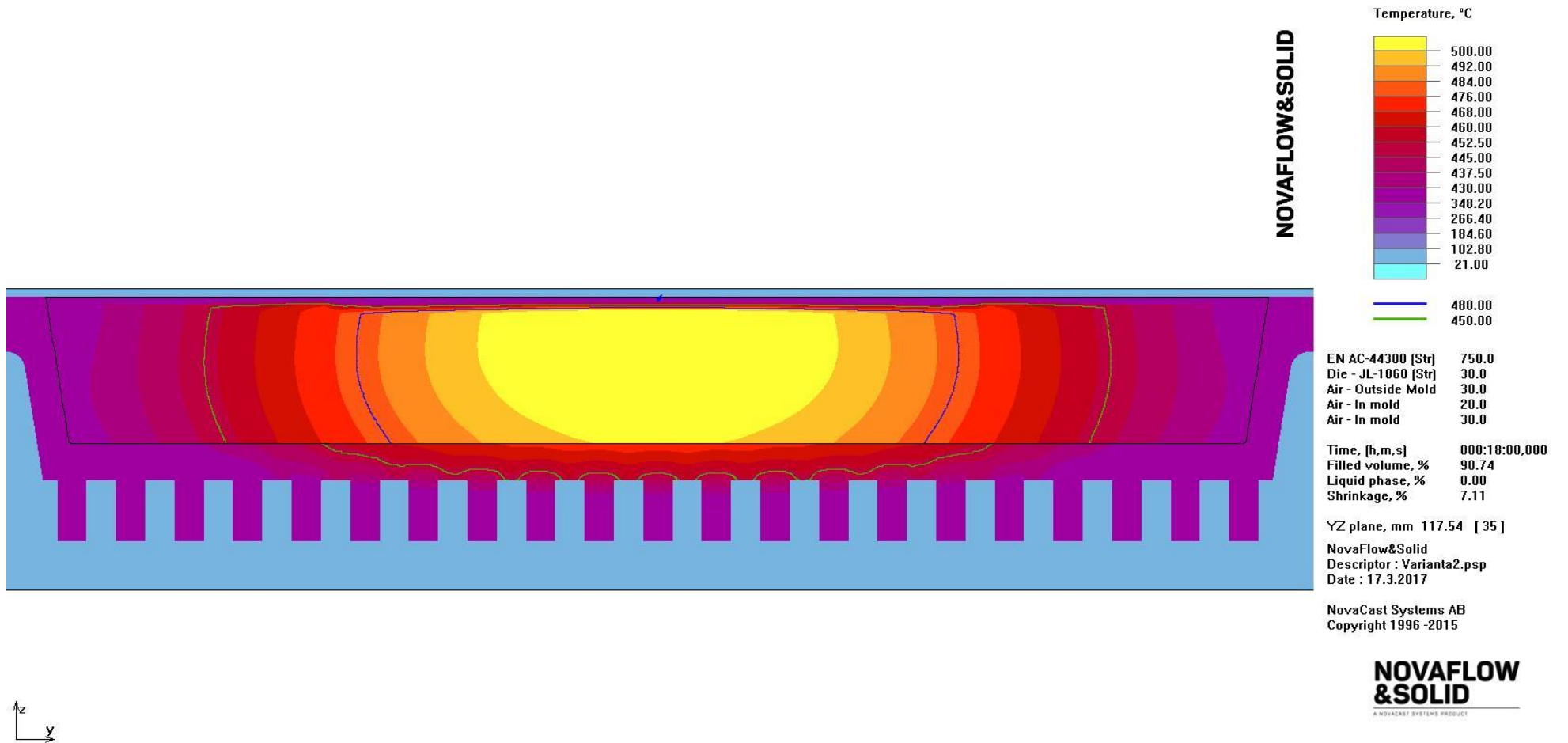
Pro simulaci bylo zapotřebí těchto vstupních parametrů:

Simulační parametr	Hodnota
Délka linky	21m
Délka tuhnutí taveniny	10,5m
Délka chladnutí kokil	10,5m
Čas jednoho licího cyklu	14minut
Doba tuhnutí taveniny	7minut
Doba chladnutí kokil	7minut
Doba dávkování jedné kokily	3,8s
Materiál kokily	litina
Přesné chemické složení odlévané slitiny	AlSi12
Teplota odlévané slitiny	750°C
Teplota okolí	20°C
Vlhkost vzduchu v okolí linky	40%
Rychlost proudění ventilátoru 1. a 2.	12m/s
Průtočné množství za 1 hodinu ventilátorů	40.000m <sup>3</sup> /hodinu
Médium ve ventilátorech	Vzduch
Doba strávená ve ventilátorech	2 x 2 minuty

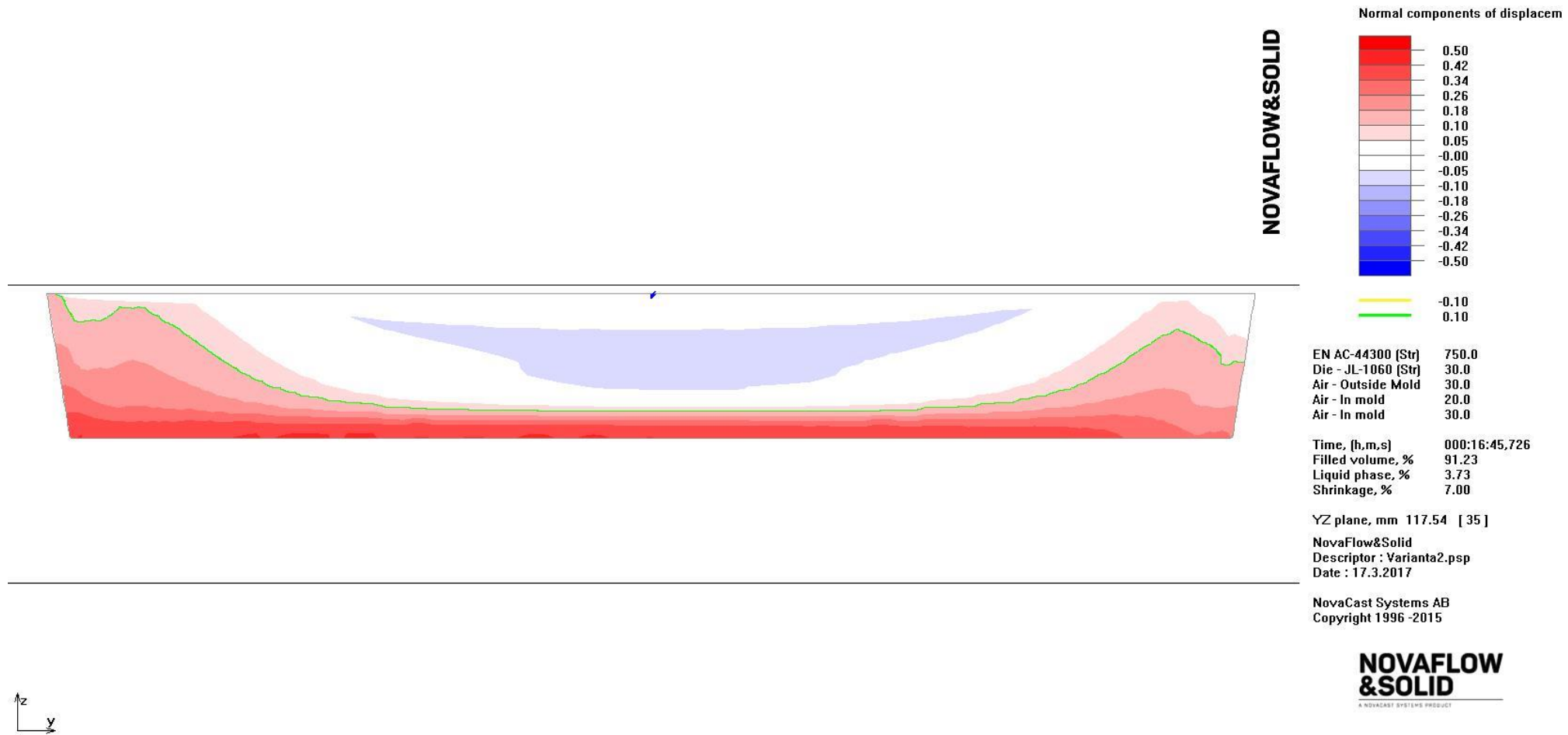
Tabulka 2.: Nastavení simulačních parametrů



Obr 46.: Graf průběhu teplot na kokile liciho cyklu výrobní linky



Obr 47.: Výsledek simulace – teplotní pole ingotu slitiny AlSi12 před jeho vyklopením z formy (konec 3 cyklu)



Obr 48.: Výsledek simulace – deformační pole ingotu

## Vyhodnocení simulace

Do simulace byly nastaveny všechny parametry z tabulky 2 a na 3D model kokily rozmístěny v simulaci 2 termočlánky, kterým byla sledována v průběhu jednotlivých licích cyklů teplota. Licích cyklů bylo nastaveno 10.

Výsledkem jsou 2 průběhy teplot v rámci 10 licích cyklů a jeden průběh rychlosti chladnutí [v grafu průběh (3)]. Průběh (1) je teplotní průběh na žeburu kokily, kde je možné vidět, že maximální teplota žebra (okamžik naplnění kokily) je od třetího cyklu okolo 486°C, v momentu těsně před naplněním (vychladnutá kokila) je teplota okolo 317°C.

Průběh (2) je teplotní průběh na úchytu kokily, kde je možné vidět, že teplota v okamžik po naplnění dosahuje teploty 405°C v momentu po vychladnutí, resp. těsně před naplněním je teplota okolo 284°C. Z grafu je patrné, že teploty na kokile mají symetrický průběh od třetího cyklu odlévání.

Obrázek 47. ukazuje teplotní pole odlitého a ztuhlého ingotu po 7 minutovém chladnutí pouze na vzduchu v kokile těsně před jeho vyklopením od třetího cyklu lití. Je tedy patrné, že kokila nedokáže s přibývajícím cykly odvést teplo a ingot uvnitř nemá ještě pevnou strukturu.

Následkem je, že po zasetí do chladicího média se vlivem prudkého ochlazení, při zachování vysokých vnitřních teplot ingot zkroutí, číselné hodnoty deformací jsou vidět na obrázku 48.

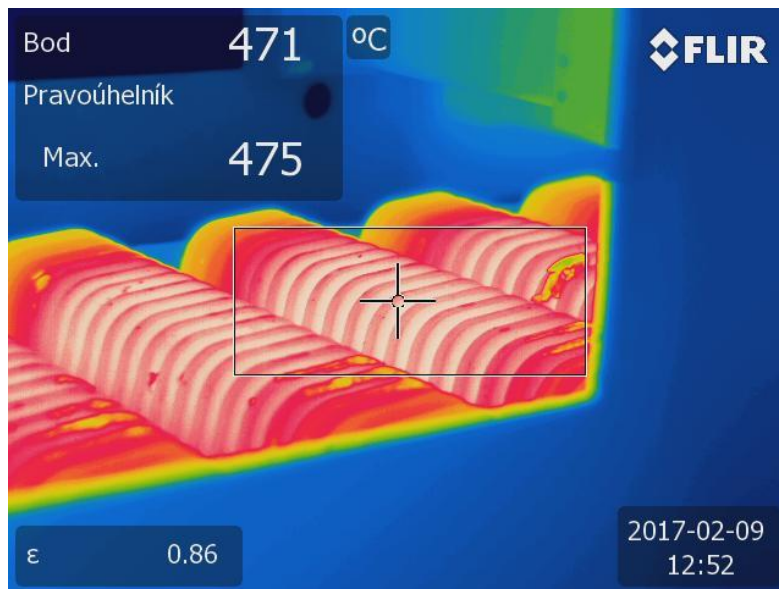
Výsledek simulace, pozorování skutečného odlévacího procesu a sledování deformací ingotů mne svedlo na myšlenku, že se kokily přehřívají a nestačí se dostatečně vychladit před jejich dalším naplněním. Tavenina potom nemá dostatek času a prostoru odvést do kokily svoje teplo.



#### 4.4 Racionalizace procesu - návrh možného řešení

Po pozorování odlévacího procesu a z výsledků simulace bylo jasné, že kokily nemají dostatek prostoru a času k vychladnutí před jejich dalším naplněním. To má za následek, že tavenina nemá možnost odvést do kokily dostatek tepla a její tepelné pole lze pozorovat na obrázku 47.

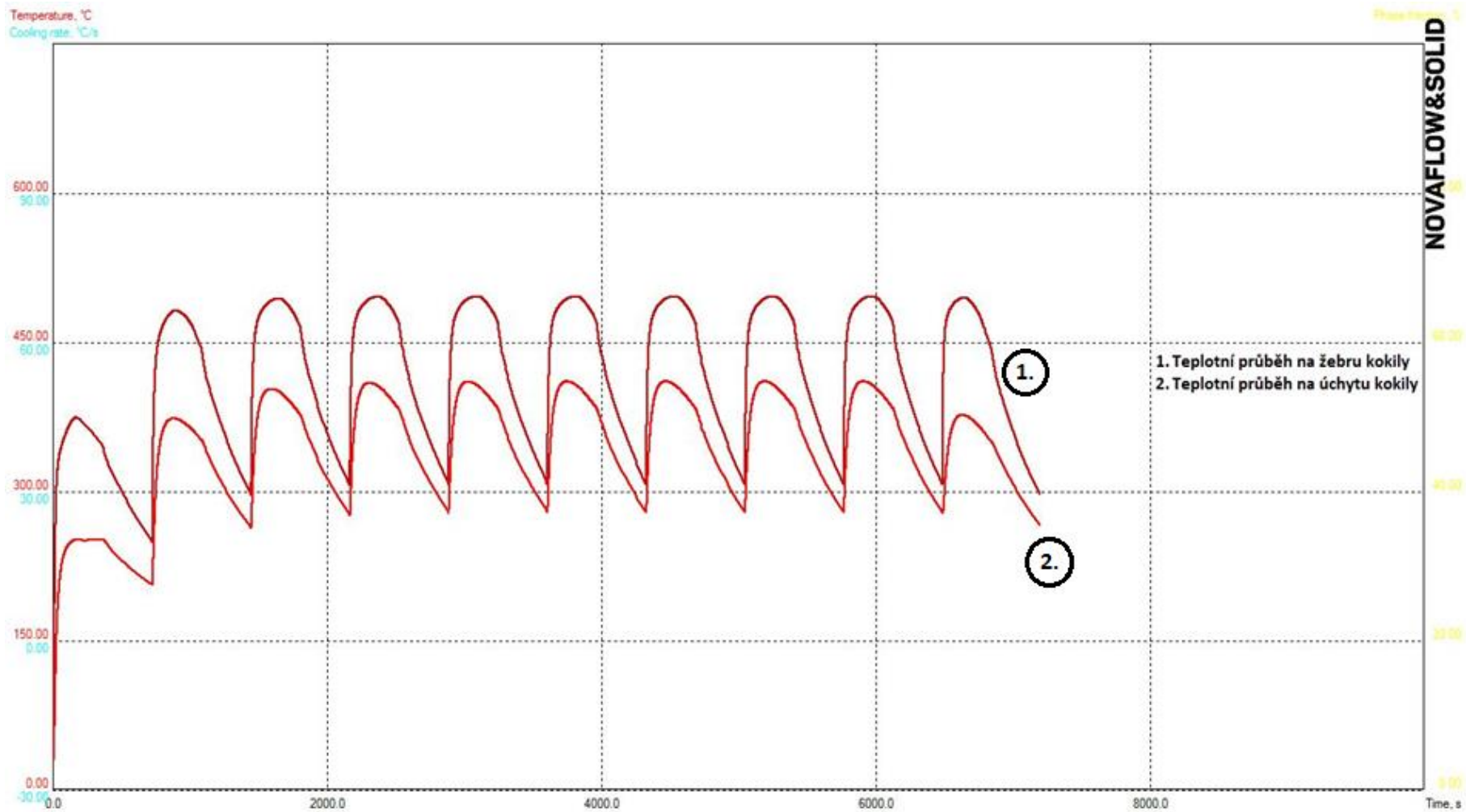
Přišel jsem tedy s návrhem, že by se kokily eventuálně mohly chladit při jejich cestě zpět k licímu kolu. Kokily po páse jedou pod linkou dutinou k zemi, jak je vyobrazeno na obrázku 49. Chladicí zařízení by bylo umístěno pod linkou a chladilo by dutiny kokil. V následujících simulacích bylo navrženo několik variant.



Obr 49.: Prázdné kokily pod linkou mířící zpět po páse k dávkovacímu kolu

#### Simulace chlazení – foukání vzduchu

V podkapitole 4.1 bylo zmíněno, že licí cyklus od naplnění kokily přes vyklopení ingotu k jejímu dalšímu naplnění trvá 14 minut, tj. 7 minut tuhnutí, kdy v kokile tuhne tavenina a 7 minut kdy kokila chladne pasivně na vzduchu. Těchto 7 minut chladnutí jsem v simulaci rozložil na 4 minuty pasivního chlazení na vzduchu a 3 minuty foukání vzduchem s průtokem 0,5l/s zesponu do dutiny kokily. Termočlánky zůstaly na stejném místě jako v simulaci skutečného odlévacího procesu (žebro, úchyt). Graf simulace je možné sledovat na obrázku 50.



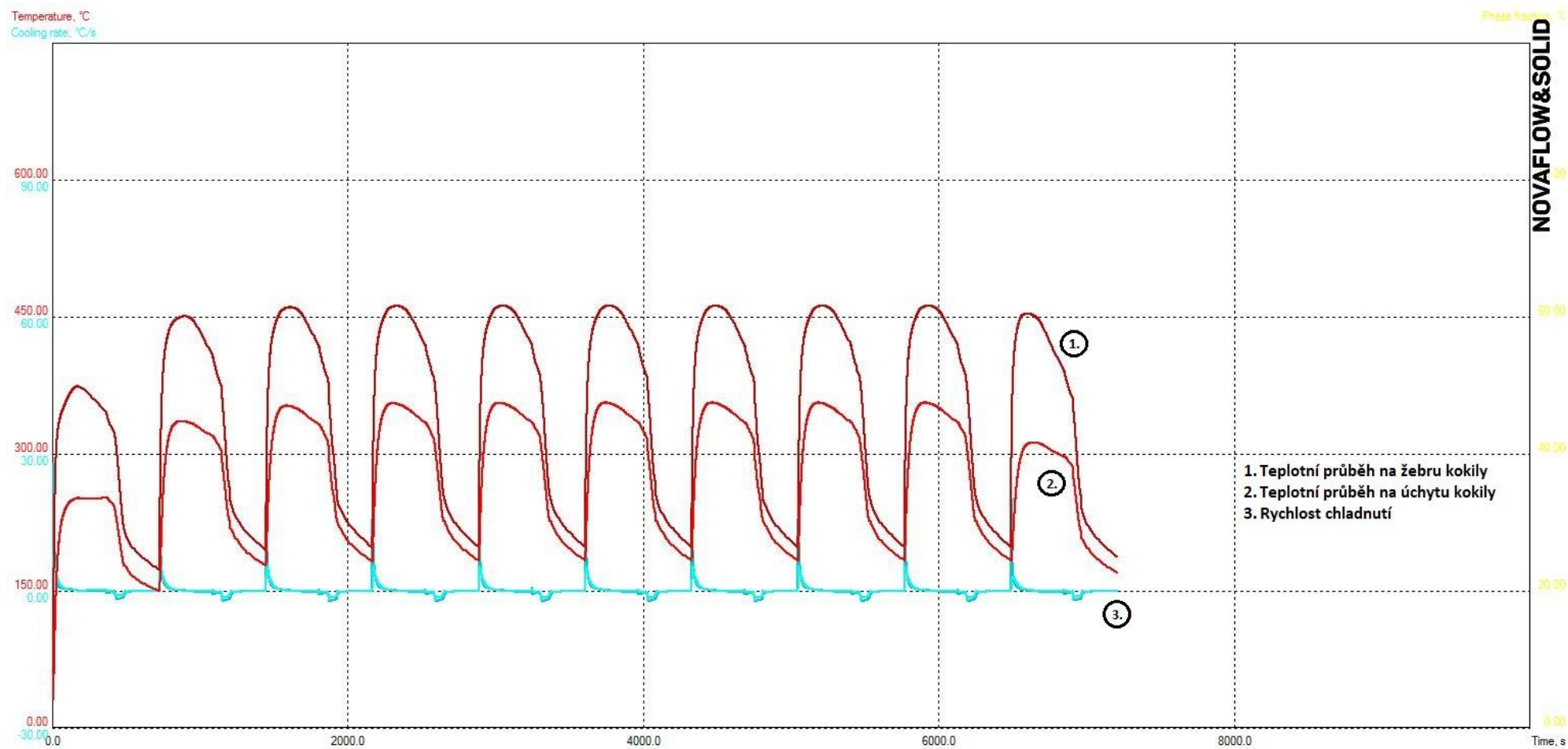
Obr 50.: Graf průběhu teplot na kokile líčho cyklu s nasimulovaným chlazením - foukání vzduchu

## Zhodnocení simulace

Z porovnání grafů simulace s nastaveným chlazením a s grafem simulace běžného licího cyklu nejsou vidět žádné markantní změny. Dutina i po 3 minutém foukání vzduchem s průtokem 0,5l/s si drží stále vysokou teplotu a před naplněním taveniny je zanedbatelně nižší oproti běžnému licímu cyklu.

## Simulace chlazení – foukání vzduchu + 1 minuta vodní mlhy

V simulaci bylo rozloženo 7 minut chlazení, na 2 minuty pasivního chladnutí na vzduchu, 3 minuty foukání vzduchu při průtoku 0,5l/s, 1 minuta chlazení vodní mlhou při průtoku 0,5l/s a zbylá minuta pasivní chladnutí na vzduchu. Termočlánky na kokile zůstaly na stejném místě, tedy žebro a úchyt. Graf průběhu teplot na kokile jsou vyobrazeny na obrázku 51.



Obr 51.: Graf průběhu teplot na kokile licího cyklu s nasimulovaným chlazením - foukání vzduchu + 1 minuta vodní mlha

## Zhodnocení simulace

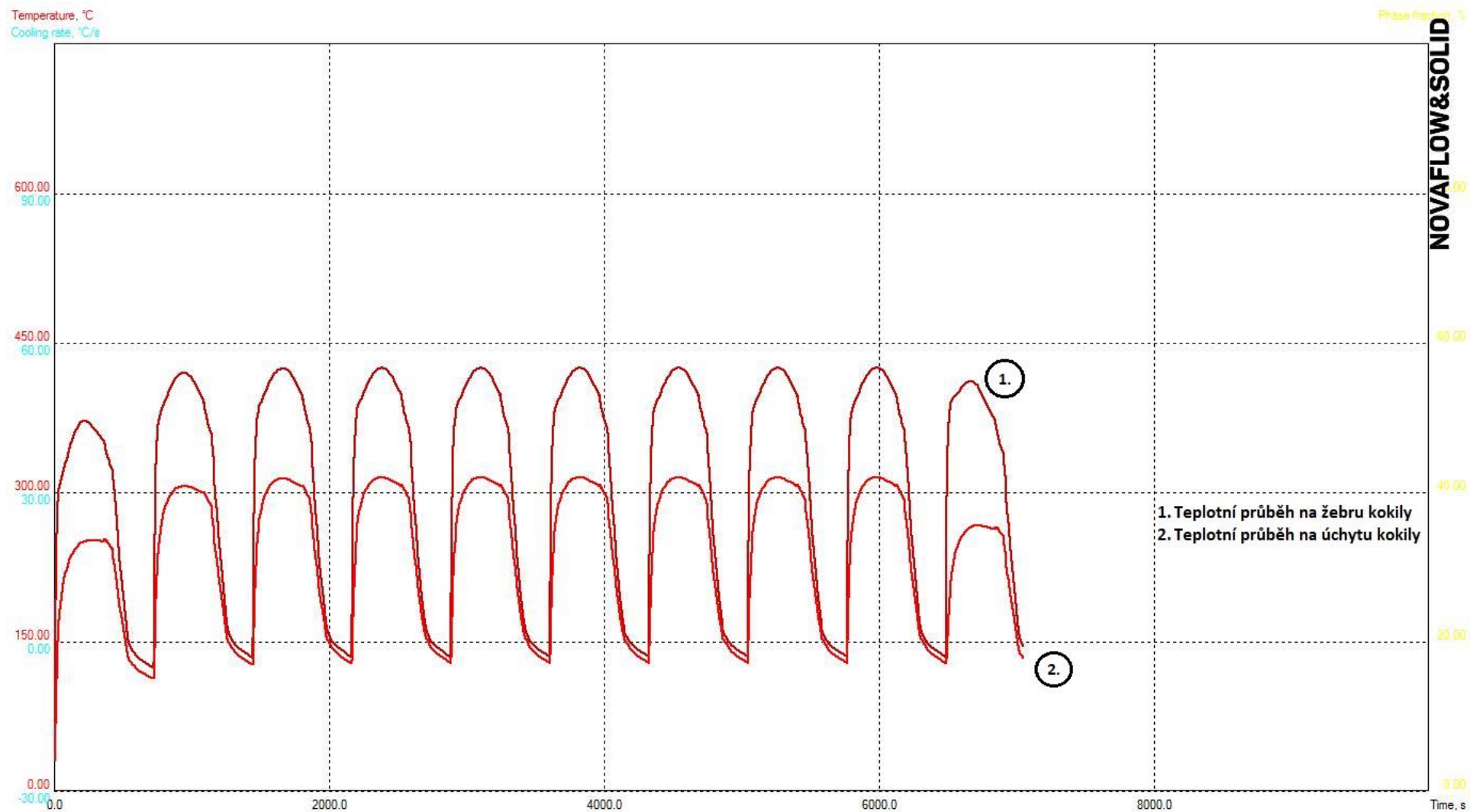
Porovnáním grafů této simulace a simulace běžného stavu, tedy jen s pasivním chlazením jsou vidět, na první pohled, veliké teplotní rozdíly v bodě, kde dochází k naplnění kokily, tedy v minimech obou průběhů.

Průběh (1) znázorňuje průběh teploty na žeburu kokily. V okamžiku před naplněním, tedy po chladicím procesu je  $210^{\circ}\text{C}$ , což je o  $107^{\circ}\text{C}$  méně než v případě licího procesu bez chlazení.

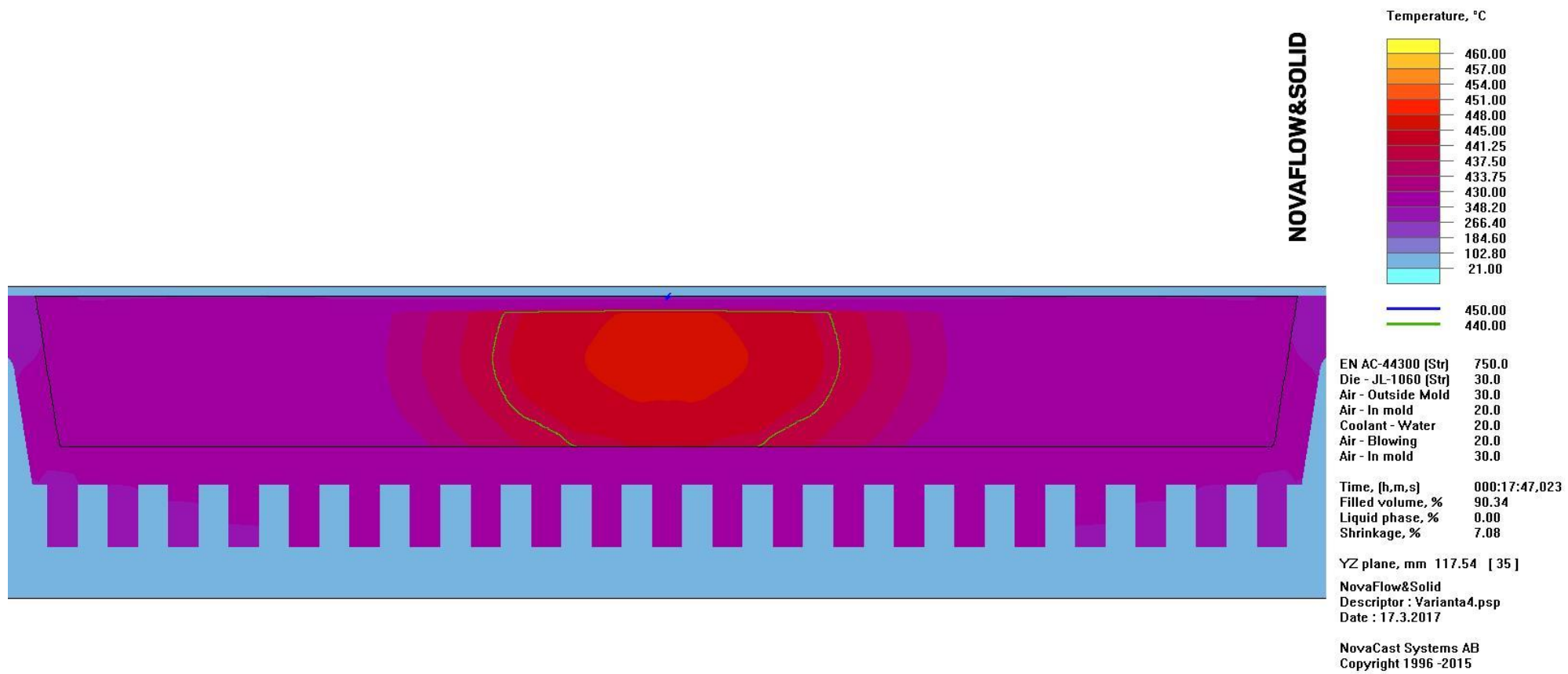
Průběh (2) znázorňuje průběh teploty na úchyty kokily. Teplota po chladicím procesu je  $186^{\circ}\text{C}$ , což je o zhruba  $100^{\circ}\text{C}$  méně než v případě bez chlazení.

## Simulace chlazení – foukání vzduchem + 2 minuty vodní mlhy

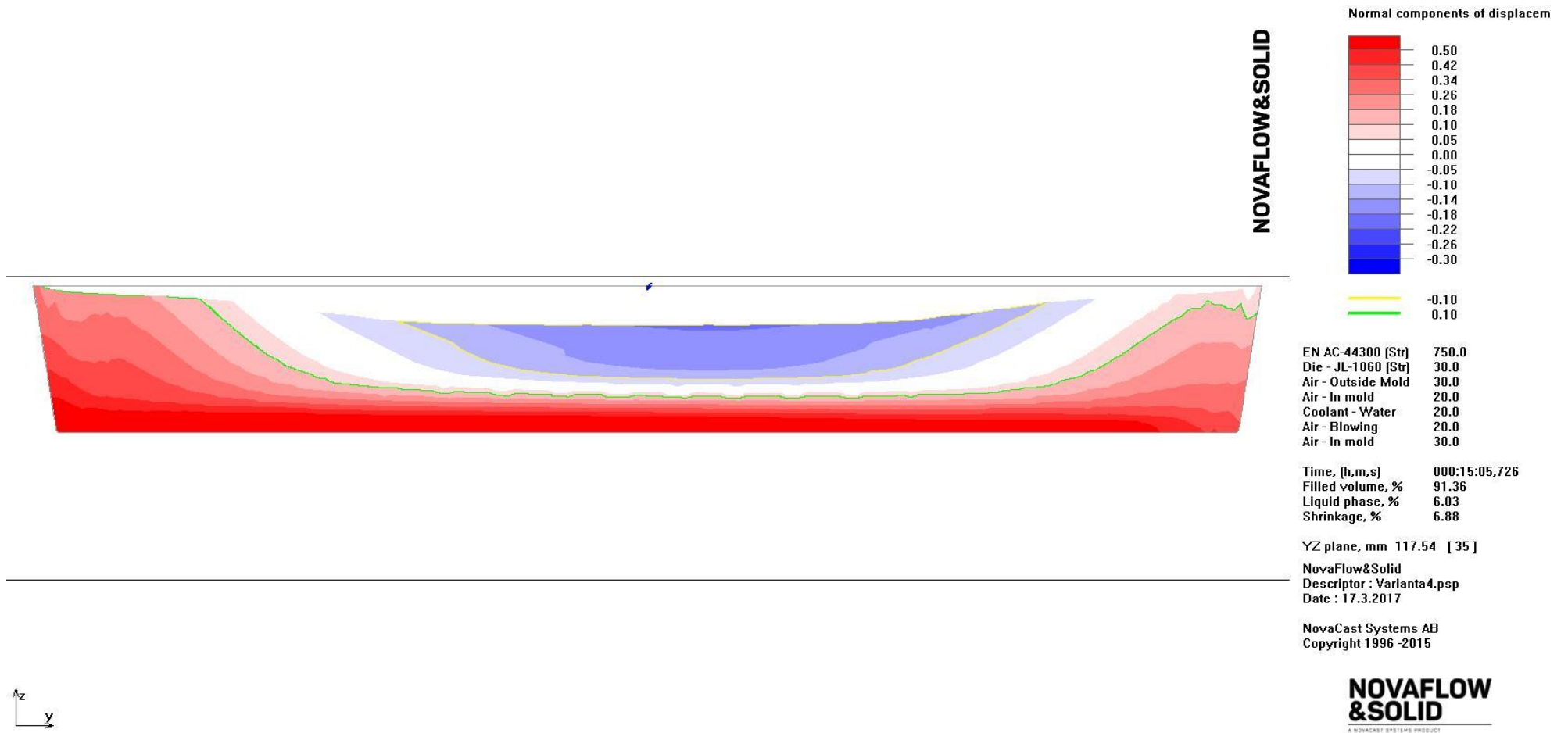
V poslední simulaci bylo nataveno minutové chladnutí kokil pasivně na vzduchu, 2 minutové chlazení vodní mlhou při průtoku  $0,5\text{l/s}$ , 3 minuty foukání vzduchem při průtoku  $0,5\text{l/s}$  a minutové chlazení, opět pasivně na vzduchu. Výsledky této simulace jsou vyobrazeny na průběhu teplot v grafu na obrázku 52., teplotní pole ingotu na obrázku 53. a pole deformací ingotu na obrázku 54.



Obr 52.: Graf průběhu teplot na kokile s nasimulovaným chlazením – foukání vzduchu + 2 minuty vodní mlhy



Obr 53.: Teplotní pole ingotu slitiny AlSi12 po jeho vyklopení po konci třetího cyklu lití



Obr 54.: Deformační pole ingotu s nasimulovaným chlazením



## Zhodnocení simulace

Z výsledků porovnání poslední simulace s nastaveným chlazením, jsou oproti běžnému odlévacímu procesu bez chlazení, na kokile vidět markantní teplotní rozdíly.

Průběh (1), tedy teplotní průběh na žeburu kokily ukazuje, že v místě plnění resp. po chladícím procesu bude teplota na žeburu 140°C, to je tedy o 177°C méně než v případě odlévacího procesu s pasivním chlazením kokil.

Průběh (2), tedy teplotní průběh na úchytu kokily ukazuje, že v momentu naplnění, tedy po chladícím procesu bude teplota na úchytu 130°C, což je o 154°C méně, než v případě původního stavu bez chlazení.

Takové, již nezanedbatelné teplotní rozdíly s tímto chladícím procesem, mají za následek evidentní změnu teplotního pole ingotu, které je možné sledovat na obrázku 53.

Takto vychladnutý ingot po najetí do chladicí kapaliny, již nemá takovou tendenci k deformacím resp. k prohnutí, jelikož jeho vnitřní teplota je nižší a struktura pevnější. Možné deformace je vidět na obrázku 54.

Tato poslední situace s nasimulovaným procesem chladnutí se jeví jako dostatečná k tomu, aby se ingoty nedeformovaly a problém byl vyřešen.

## 4.5 Mechanický obraceč

Po sérii procesů s nasimulovaným chlazením se došlo k závěru, že přestavba linky a provozní náklady na chlazení kokil by byly vysoké a proto bylo nutné vymyslet jiné řešení.

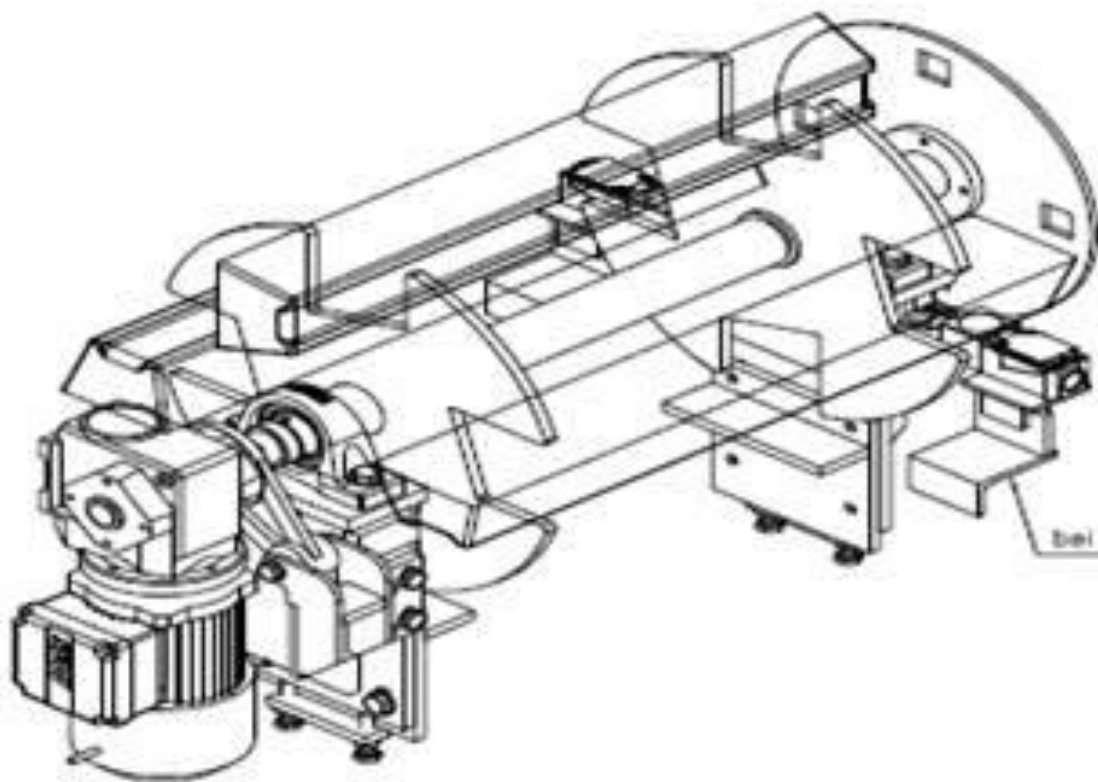
Na konci pásu v místě, kde již vyklopené ingoty vjíždí do chladicího média, se vyzkoušel pokus, že se ingot převrátil na jeho delší stranu resp. podstavu, to znamená, jak je vidět z teplotního pole v obrázku 47. na podstavu, kde ingot byl nejchladnější. Výsledek po vyjetí z chladicího média byl vidět okamžitě.



*Obr 55.: Ukázka ingotu ze slitiny AlSi12 po zachlazení s převrácením.*

### 4.5.1 Výsledek mechanického obraceče

Jak je vidět z obrázku 55., problém s deformací resp. prohýbáním ingotů byl vyřešen, firma zadala výrobci odlévací linky návrh na obraceč ingotů, který byl v roce 2017 zakomponován mezi vyklápěcí mechanismus a vanu chladicího média.



*Obr 56.: Vizualizace mechanického obraceče ingotů*



*Obr 57.: Mechanický obraceč umístěný před zachlazovací lázeň*



*Obr 58.: Mechanický obraceč v provozu*

## 5. Závěr

Cílem práce bylo analyzovat výrobu hliníkových slitin s označením EN AB-44100 resp. EN AB-Al Si12, dále jen slitina AlSi12 a zjistit příčinu vzniku deformací respektive prohnutí hliníkových ingotů a za pomoci simulace v softwaru NovaCast navrhnout možné racionalizace odlévacího procesu.

Nejprve byl celý reálný licí proces se vstupními parametry podle tabulky 2. nasimulován a v reálném procesu za pomoci termokamery i sledován. Výsledky obou těchto experimentů ukázaly, že se od třetího cyklu odlévacího procesu kokily přehřívají a v důsledku toho nemá tavenina prostor a čas k přenosu tepla do kokily. Relativně ještě zahřátý a nevychladlý ingot (viz obr 47.: Teplotní pole ingotu) je vyklepnut z kokily a chlazen v chladicím médiu – vodě, a vlivem vysokých vnitřních teplot zdeformován respektive prohnut.

Bylo evidentní, že je podceněn proces chlazení kokil od dodavatele linky a proto byly v softwaru NovaCast provedeny tři simulace odlévacího procesu s nasimulovaným chlazením kokil.

První simulace spočívala v rozložení času chlazení kokil pasivně na vzduchu na čas, kdy budou kokily ofukovány zesponu linky, tedy přímo do jejich dutin vzduchem o objemu 0,5l/s po dobu třech minut. Výsledek této simulace nebyl nikterak ohromující, teploty na kokilách se podařilo srazit cca o jednoty °C.

Druhá simulace spočívala též v rozložení času chlazení kokil a to konkrétně na čas dvou minut pasivního chlazení na vzduchu, tři minuty foukání vzduchu při objemu 0,5l/s, minuta chlazení vodní mlhou při objemu 0,5l/s a zbylá minuta opět pasivního chladnutí na vzduchu. Výsledky byly oproti předešlé simulaci výrazné. Vzhledem k časové náročnosti simulace neexistuje teplotní a deformační pole těchto prvních dvou simulací.

Třetí a poslední simulace byla rozložena na minutové pasivní chlazení vzduchem, dvou minutové chlazení vodní mlhou při objemu 0,5l/s, tří minutové foukání vzduchem o objemu 0,5l/s a poslední minutové chladnutí pasivně na vzduchu. Výsledky a hodnoty oproti výsledkům reálného licího cyklu, potažmo první simulace jsou markantní.

Firma Metal Trade Comax, a.s. po zhodnocení investic do chladicího zařízení a propočtech ročních provozních nákladů variantu s chladicím systémem kokil zamítla. Bylo proto nutné přijít s levnější, přesto stejně účinnou variantou.

Byl tedy vyzkoušen experiment s otáčením vyklopených ingotů na jejich delší podstavu a takto otočený ingot poslán do chladicího média. Myšlenka spočívala v tom, že strana s vysokou teplotou ingotu zůstane po zjetí do chladicího média nahoře (viz obr 47.: Teplotní pole ingotu) a vlastní váha mu nedovolí se prohnout.



*Obr 59.: Rozdíl odlitých ingotů před a po otáčení*

Po prvním pokusu byly výsledky vidět okamžitě, jak je možné vidět na obrázku 59. Firma Metal Trade Comax, a.s. byla s touto variantou optimalizace spokojená a zadala výrobci linky návrh na mechanický obraceč ingotů a od roku 2017 byl mechanický obraceč zakomponován do linky.



*Obr 60.: Rozdíl naskladněných ingotů připravených k expedici před a po otáčení*

## Použitá literatura

- [1] TOTTEN, G; MACKENZIE, D. *Handbook of aluminium*. Boca Raton: CRC Press, 2003. ISBN 08- 247-0896-2
- [2] AL INVEST Břidličná, a.s., Bruntálská 167, 793 51 Břidličná, Česká republika. [online]. [cit. 2018-12-15]. Dostupné z: <https://www.alinvest.cz/hlinik/hlinik-v-prirode>
- [3] MICHNA A KOL., *Encyklopedie hliníku*, Adin, s.r.o., Prešov 2005 ISBN 80-89041-88-4
- [4] BARTHELMY, David. Mineral Species containing Aluminium. In: *Mineralogy database* [online]. 2010 [cit. 2018-12-15]. Dostupné z: <http://webmineral.com/chem/Chem-Al.shtml>
- [5] VÁCLAV VÁVRA, Ústav geologických věd, Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita [online]. [cit. 2018-12-15]. Dostupné z: <http://mineraly.sci.muni.cz/oxidy/gibbsit.html>
- [6] Institut geologického inženýrství Hornicko-geologická fakulta, Katedra staveních hmot a hornického stavitelství fakulta stavební, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Sbírka Muzea východních Čech v Hradci Králové, foto J. Jirásek [online]. 2007 [cit. 2018-12-15]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/nerudy/korund.html>
- [7] HOBART M. KING Ph.D., *Almost all of the aluminum that has ever been producer has been made from bauxite*, článek [online]. [cit. 2018-12-15]. Dostupné z: <https://geology.com/minerals/bauxite.shtml>
- [8] Svein Richard Brandtzæg President and CEO Oslo, *Aluminium, environment and society*, 2012, [online]. 2016. [cit. 2018-12-16]. Dostupné z: <https://www.hydro.com/en/about-aluminium/Aluminium-life-cycle/Bauxite-mining/>
- [9] A. R. Hind, S. K. Bhargava, Stephen C. Grocott, *“The surface chemistry of Bayer process solids: a review”*, *Colloids and Surfaces A : Physicochem. Eng. Aspects*, 146 (1999) pp. 359–374
- [10] World’s largest aluminium producers. [online]. [cit. 2018-12-16]. Dostupné z: [https://www.aluminiumleader.com/production/aluminum\\_production/](https://www.aluminiumleader.com/production/aluminum_production/)
- [11] CHIA CHENG CHEN, *The Aluminium Production Process*, Técnico Lisboa, [online]. [cit. 2018-12-16]. Dostupné z: [https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563568428765216/Aluminium%20Process\\_C%20Chen.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563568428765216/Aluminium%20Process_C%20Chen.pdf)
- [12] The Hall-Héroult Process Basics - The Aluminum Smelting Process. *Aluminum*



- Applications - Aluminum Smelting Process* [online]. Copyright © 2009 aluminum [cit. 12-20-2018]. Dostupné z: [http://www.aluminum-production.com/process\\_basics.html](http://www.aluminum-production.com/process_basics.html)
- [13] Offshore Direct Metals, Inc, 190 Escambia Lane, Unit 501, Cocoa Beach, Florida 32931, USA [online]. 2018. [cit. 2018-12-17]. Dostupné z: <http://www.odmetals.com/aluminum-billet.html>
- [14] D. Anantha Padmanaban, Gulshan Kurien, *Silumins: The Automotive Alloys*, St. Josephs College of Engineering Chennai, India. [online]. 2018. [cit 2018 12- 18]. Dostupné z: [https://www.asminternational.org/documents/10192/1902651/amp\\_17003p28.pdf/14e9057a-08cd-4e3f-bac1-2d95e8209cac/AMP17003P28](https://www.asminternational.org/documents/10192/1902651/amp_17003p28.pdf/14e9057a-08cd-4e3f-bac1-2d95e8209cac/AMP17003P28)
- [15] DRASTÍK, František. *Strojnická příručka: vývoj, výpočty, konstrukce, technologie, výroba*. [Svazek 4]. Praha: Dashöfer, 2002-2011. ISBN 80-86229-65-3.
- [16] 919 Auto Plaza Dr. Green Bay, WI 54302 [online]. 2018. [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: <https://www.gmperformancemotor.com/parts/12651877.html>
- [17] Autodíly MJauto, Brno, Vančurova 5, 61500. [online]. 2018 [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: <http://www.mjauto.cz/tezky-zivot-motorovych-pistu>
- [18] Duralumin - Chemical Composition, Mechanical Properties and Common Applications. [online]. [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8073>
- [19] Chemistry Learner It's all about Chemistry, Duralumin. [online]. [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: <http://www.chemistrylearner.com/duralumin.html>
- [20] CheggStudy, Al-Cu Phase diagram. [online]. [2018-12-18]. Dostupné z: <https://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/3-shown-portion-al-cu-phase-diagram-heated-alloy-containing-8-wt-cu-700oc-30-points-total-q2443155>
- [21] Rapid-Racer. [online]. [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: <http://www.rapid-racer.com/car-engine-upgrades.php>
- [22] THOMAS WIENCEK, Development and compatibility of magnesium matrix fuel plates clad with 6061 aluminum alloy. [online]. [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Al-Mg-phase-diagram\\_fig3\\_240615441](https://www.researchgate.net/figure/Al-Mg-phase-diagram_fig3_240615441)
- [23] MIRKO SCHOENITZ, EDVARD L. DEIZIN, *Structure and properties of Al–Mg mechanical alloys*, New Jersey Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, University Heights, Newark, New Jersey 07102, 2003. [online]. [cit. 2018-12-19]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/5644/37684c08024428c85724a211adea11dcfe4d.pdf>

- [24] Evans Cycles. [online]. [cit. 2018-12-19]. Dostupné z: <https://www.evanscycles.com/dmr-vault-super-light-magnesium-ti-flat-mountain-bike-pedal-EV214591>
- [25] ELIZABETH MARTÍNEZ-FLORES AND GABRIEL TORRES-VILLASENOR, *Hibrid Materials Based on Zn-Al Alloys*, 2011. [online]. [cit. 2018-12-20]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/metal-ceramic-and-polymeric-composites-for-various-uses/hibrid-materials-based-on-zn-al-alloys>
- [26] AFECO HEATING SYSTEMS, *Aluminium Scrap Recycling Process Plant*. [online]. [cit. 2018-12-21]. Dostupné z: <http://www.afecoheating.com/aluminium-scrap-recycling-plant.php>
- [27] ASM METAL RECYCLING. [online]. [cit. 2018-12-21]. Dostupné z: <http://www.asm-recycling.co.uk/scrap-metal/alloy-wheel-recycling.html>
- [28] INDUSTRIAL MATERIAL, *Aluminium, Recycle scrap aluminium so it can be used again*. [online]. [cit. 2018-12-21]. Dostupné z: <https://www.industrialmetals.ca/buy-sell/aluminum/>
- [29] AB METAL RECYCLING. [online]. [cit. 2018-12-21]. Dostupné z: <http://abmetalrecycling.cz/sluzby/vykup-a-zpracovani-kovovych-odpadu/>
- [30] RECYCLETRADERS. [online]. [cit. 2018-12-22]. Dostupné z: <https://www.recycletraders.com/listing-category/aluminium/>
- [31] METAL TRADE COMAX A.S., *Příprava a transport tekutého kovu*, 2017. [online]. [cit. 2018-12-22]. Dostupné z: [http://www.mtcomax.cz/sites/default/files/priprava\\_a\\_transport\\_tekuteho\\_kovu\\_0.pdf](http://www.mtcomax.cz/sites/default/files/priprava_a_transport_tekuteho_kovu_0.pdf)

## Seznam obrázků

<i>Obr 1.: Minerál Boehmite [4]</i>	
<i>Obr 2.: Minerál Gibbsit [5].....</i>	<i>3</i>
<i>Obr 3.: Minerál Kryolitu [4]</i>	
<i>Obr 4.: Minerál Korund [6] .....</i>	<i>4</i>
<i>Obr 5.: Mapa bauxitových dolů ve světě [8].....</i>	<i>4</i>
<i>Obr 6.: Bauxitový důl [10]</i>	
<i>Obr 7.: Vytěžený surový bauxit [10] .....</i>	<i>5</i>
<i>Obr 8.: Čistý oxid hlinitý - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [10] .....</i>	<i>7</i>
<i>Obr 9.: Elektrolytická vana [8].....</i>	<i>7</i>
<i>Obr 10.: Primární hliník odlitý do ingotů [10]</i>	
<i>Obr 11.: Hliníkové slitky [13] .....</i>	<i>8</i>
<i>Obr 12.: Hliníkový odpad (litá kola) [27]</i>	
<i>Obr 13.: Hliníkový odpad (profily) [28].....</i>	<i>9</i>
<i>Obr 14.: Hliníkové špony [29] .....</i>	<i>10</i>
<i>Obr 15.: Slisovaný hliníkový odpad [30] .....</i>	<i>10</i>
<i>Obr 16.: Rotační pec ve firmě Metal Trade Comax a.s. [31].....</i>	<i>10</i>
<i>Obr 17.: Odlité slitiny hliníku do ingotů ve firmě Metal Trade Comax a.s.....</i>	<i>11</i>
<i>Obr 18.: Fázový diagram slitiny Al-Si [3] .....</i>	<i>12</i>
<i>Obr 19.a.), b.), c.) Mikrostruktura slitiny Al-Si v závislosti na obsahu křemíku [3].....</i>	<i>13</i>
<i>Obr 20.: Blok motoru ze slitiny Al-Si [16]</i>	
<i>Obr 21.: Píst ze slitiny Al-Si [17].....</i>	<i>14</i>
<i>Obr 22.: Část fázového diagramu slitiny Al-Cu [20].....</i>	<i>15</i>
<i>Obr 23.: Použití slitiny Al-Cu u hlavy válců motoru [21] .....</i>	<i>15</i>
<i>Obr 24.: Fázový diagram slitiny Al-Mg [22].....</i>	<i>16</i>
<i>Obr 25.: Použití slitiny Al-Mg u cyklistických pedálů [24].....</i>	<i>17</i>
<i>Obr 26.: Fázový diagram slitiny Al-Zn [3] .....</i>	<i>18</i>
<i>Obr 27.: Nestabilně seskládaná paleta odlitých ingotů.....</i>	<i>19</i>
<i>Obr 28.: Licí kolo linky.....</i>	<i>20</i>
<i>Obr 29.: Snímek naplněných chladnoucích kokil .....</i>	<i>21</i>
<i>Obr 30.: Proces vyklepávání ingotu z kokil .....</i>	<i>21</i>
<i>Obr 31.: Vyklopené ingoty míří do chladicího média.....</i>	<i>22</i>
<i>Obr 32.: Pohled na vanu chladicího média.....</i>	<i>22</i>
<i>Obr 33.: Naskládané ingoty k expedici .....</i>	<i>23</i>

<i>Obr 34.: 3D model kokily .....</i>	<i>24</i>
<i>Obr 35.: Model odlévaného ingotu.....</i>	<i>24</i>
<i>Obr 36.: Termosnímek kokil na začátku odlévacího procesu .....</i>	<i>25</i>
<i>Obr 37.: Termosnímek úchytu kokily při prvním cyklu lití.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr 38.: Termosnímek úchytu kokily od třetího cyklu lití .....</i>	<i>26</i>
<i>Obr 39.: Termosnímek dutiny těsně před naplněním kokily druhého cyklu lití .....</i>	<i>27</i>
<i>Obr 40.: Termosnímek dutiny těsně před naplněním kokily třetího cyklu lití.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr 41.: Termosnímek dutiny těsně před naplněním kokily po třetím cyklu.....</i>	<i>28</i>
<i>Obr 42.: Termosnímek dutiny těsně před naplněním kokily 2 hodiny po začátku.....</i>	<i>28</i>
<i>Obr 43.: Termosnímek dutiny těsně před naplněním kokily 2,5 hodiny po začátku.....</i>	<i>29</i>
<i>Obr 44.: Termosnímek dutiny těsně před naplněním kokily (poslední cyklus) .....</i>	<i>29</i>
<i>Obr 45.: Zdeformovaný (prohnutý ingot) .....</i>	<i>30</i>
<i>Obr 46.: Graf průběhu teplot na kokile licího cyklu výrobní linky.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr 47.: Výsledek simulace – teplotní pole ingotu slitiny AlSi12 před jeho vyklopením z formy (konec 3 cyklu) .....</i>	<i>33</i>
<i>Obr 48.: Výsledek simulace – deformační pole ingotu .....</i>	<i>34</i>
<i>Obr 49.: Prázdné kokily pod linkou mířící zpět po páse k dávkovacímu kolu .....</i>	<i>36</i>
<i>Obr 50.: Graf průběhu teplot na kokile licího cyklu s nasimulovaným chlazením - foukáním vzduchu</i>	<i>37</i>
<i>Obr 51.: Graf průběhu teplot na kokile licího cyklu s nasimulovaným chlazením - foukáním vzduchu + 1 minuta vodní mlha .....</i>	<i>39</i>
<i>Obr 52.: Graf průběhu teplot na kokile s nasimulovaným chlazením – foukání vzduchu + 2 minuty vodní mlhy .....</i>	<i>41</i>
<i>Obr 53.: Teplotní pole ingotu slitiny AlSi12 po jeho vyklopení po konci třetího cyklu lití.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr 54.: Deformační pole ingotu s nasimulovaným chlazením.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr 55.: Ukázka ingotu ze slitiny AlSi12 po zchlazení s převrácením. ....</i>	<i>45</i>
<i>Obr 56.: Vizualizace mechanického obraceče ingotů .....</i>	<i>46</i>
<i>Obr 57.: Mechanický obraceč umístěný před zchlazovací lázeň .....</i>	<i>46</i>
<i>Obr 58.: Mechanický obraceč v provozu .....</i>	<i>47</i>
<i>Obr 59.: Rozdíl odlitých ingotů před a po otáčení .....</i>	<i>49</i>
<i>Obr 60.: Rozdíl naskladněných ingotů připravených k expedici před a po otáčení .....</i>	<i>50</i>

## Seznam tabulek

Tabulka 1.: Operační hodnoty pro louhování podle typu bauxitu. [12] .....	6
Tabulka 2.: Nastavení simulačních parametrů .....	31

## Přílohy

### Obsah CD:

- Václav Čermák BP.pdf – PDF verze dokumentu
- Václav Čermák BP.docx – docx verze dokumentu
- Výsledky simulace/ - výsledky simulací z NovaFlow