

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

Ústav strojírenské technologie slévání, tváření a svařování

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Racionalizace výroby odlitku turbodmychadla**

Vypracoval: Bc. Michal Křeček

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

Praha 2016

**Tento list bude vyjmut a nahrazen listem s vytištěným zadáním!**

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou 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 (autorský zákon).

V Praze dne .....

.....

podpis

**Poděkování:**

Děkuji své rodině a svým blízkým za podporu při studiu. Děkuji za odbornou pomoc vedoucímu diplomové práce Ing. Aleši Hermanovi, Ph.D. Poděkování si zaslouží také pracovníci společnosti Metaz Týnec a.s. a to konkrétně pán Tomáš Filip a Pavel Nejedlo za poskytnutí potřebných podkladů k tvorbě této práce.

## **Anotace**

|                          |                                 |     |  |
|--------------------------|---------------------------------|-----|--|
| Jméno autora:            | Bc. Michal Křeček               |     |  |
| Název diplomové práce:   | Návrh odlitku dmyhadlové skříně |     |  |
| Vedoucí diplomové práce: | Ing. Aleš Herman, Ph.D.         |     |  |
| Ústav:                   | Ústav strojírenské technologie  |     |  |
| Akademický rok:          | 2015/2016                       |     |  |
| Rozsah práce:            | Počet stran:                    | 115 |  |
|                          | Počet tabulek:                  | 19  |  |
|                          | Počet obrázků:                  | 98  |  |
|                          | Počet grafů:                    | 1   |  |
|                          | Počet příloh (stran):           | 0   |  |
|                          | Počet příloh (CD)               | 1   |  |

**Klíčová slova:** Nízkotlaké lití, simulace lití, simulace tuhnutí, metalografie, dmyhadlová skříně

### **Anotace:**

Předmětem této diplomové práce je návrh formy pro odlitek dmyhadlové skříně turbodmyhadla a analýza výrobního procesu odlévání. Jedná se o trvalou formu pro nízkotlaké lití. Po návrhu formy se práce zaměřuje na kontrolu stávajícího výrobního procesu, který se potýká s potížemi. Analýza proběhla v provozu slévárny a také pomocí simulačního softwaru lití a tuhnutí Nova Flow and Solid. Zkouškám byl také podroben odlitek ze zkušební výrobní série, konkrétně metalografické zkoušce a vyhodnocení porosity. Na základě odhalených obtíží jsou v této práci uvedeny návrhy a doporučení pro snížení problémů vyskytujících se při výrobě. Tato práce vznikla ve spolupráci se slévárnou Metaz Týnec a.s., pro kterou je tato problematika řešena v rámci této diplomové práce.

## **Annotation**

|                          |  |     |
|--------------------------|--|-----|
| Author:                  | Bc. Michal Křeček                        |     |
| Title of diploma thesis: | Design of casting the compressor housing |     |
| Supervisor:              | Ing. Aleš Herman, Ph.D.                  |     |
| Department:              | Department of Manufacturing Technology   |     |
| Academic year:           | 2015 / 2016                              |     |
| Extent:                  | Number of pages:                         | 115 |
|                          | Number of tables:                        | 19  |
|                          | Number of images:                        | 98  |
|                          | Number of charts:                        | 1   |
|                          | Number of attachments (pages):           | 0   |
|                          | Number of attachments (CD):              | 1   |

Keyword: Low pressure die casting, LPDC, simulation of filling and solidification, metallography

### Annotation:

The topic of this diploma thesis is a design of a permanent mould for casting of a compressors house, which belongs to the turbocharger and analysis of an existing manufacturing process. This permanent mould is used for low pressure die casting. After designing the permanent mould, this work focuses on analysis of existing manufacturing process which has problems with quality of the castings. The analysis was held in a foundry and there were used simulations of filling and solidification. The simulation software was Nova Flow & Solid. The cast from testing series was also tested for a metallographical exam and a porosity test. The guided suggestions and recommendations are based on discovered problems and are to help to solve those problems and improve the quality of casts. This diploma thesis was created in cooperation with foundry Metaz Inc., for whom this issue is solved.

## Obsah

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Úvod.....   | 1  |
| 1.1   | Představení slévárny.....                         | 1  |
| 1.2   | Cíle práce .....                                  | 2  |
| 2     | Popis dmychadlové skříně .....                    | 3  |
| 2.1   | Materiály turbodmychadla .....                    | 5  |
| 2.1.1 | Materiály rotoru [19] .....                       | 6  |
| 2.1.2 | Materiály turbínové skříně.....                   | 8  |
| 2.1.3 | Materiály kompresorové skříně [19].....           | 10 |
| 2.1.4 | Materiály ložiskové skříně.....                   | 11 |
| 2.2   | Tepelná zpracování hliníkových slitin .....       | 11 |
| 2.2.1 | Princip tepelného zpracování Al slitin [33] ..... | 12 |
| 3     | Technologické možnosti výroby odlitků .....       | 14 |
| 3.1   | Gravitační lití .....                             | 14 |
| 3.2   | Vysokotlaké lití .....                            | 15 |
| 3.3   | Nízkotlaké lití.....                              | 17 |
| 3.3.1 | Skladba zařízení nízkotlakého lití.....           | 17 |
| 3.3.2 | Princip nízkotlakého lití.....                    | 18 |
| 3.3.3 | Přednosti nízkotlakého lití .....                 | 19 |
| 3.3.4 | Nevýhody nízkotlakého lití.....                   | 19 |
| 3.3.5 | Nízkotlaké lití v současnosti .....               | 20 |
| 3.4   | Povlaky.....                                      | 22 |
| 3.4.1 | Povlaky trvalé [10].....                          | 22 |
| 3.4.2 | Povlaky netrvalé [11].....                        | 22 |
| 3.5   | Výroba jader .....                                | 23 |
| 3.6   | Modelování a simulování procesů obecně [13] ..... | 24 |
| 3.6.1 | Členění modelů .....                              | 26 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 3.6.2 | Matematické modelování.....                               | 26 |
| 3.6.3 | Nova Flow & Solid .....                                   | 29 |
| 4     | Konstrukčně technologická příprava formy a jaderníku..... | 31 |
| 4.1   | Technologičnost konstrukce.....                           | 31 |
| 4.1.1 | Problematika odlitků a nežádoucí jevy.....                | 32 |
| 4.1.2 | Výběr materiálu odlitku .....                             | 34 |
| 4.1.3 | Dimenzování odlitku dle namáhání .....                    | 36 |
| 4.1.4 | Konstrukce odlitku a formy .....                          | 38 |
| 4.2   | Technologická a konstrukční příprava formy .....          | 40 |
| 4.2.1 | Analýza 3D modelu a jeho úpravy pro tvorbu formy.....     | 41 |
| 4.2.2 | Návrh formy.....  | 42 |
| 4.2.3 | Volba materiálu formy.....                                | 44 |
| 4.2.4 | Návrh jaderníku .....                                     | 45 |
| 5     | Výroba náradí a příprava formy pro zkušební sérii .....   | 47 |
| 5.1   | Výroba jaderníku.....                                     | 47 |
| 5.2   | Výroba formy pro nízkotlaké lití.....                     | 50 |
| 5.2.1 | Technologická příprava CAM obrábění .....                 | 51 |
| 5.2.2 | Popis frézovacího centra a obrobení formy .....           | 53 |
| 5.2.3 | Spasování formy pro nízkotlaké lití.....                  | 55 |
| 5.3   | Příprava formy a lití zkušební série .....                | 56 |
| 5.3.1 | Typ použitého povlaku .....                               | 56 |
| 5.3.2 | Problematika nanášení povlaku .....                       | 57 |
| 5.3.3 | Postup aplikace .....                                     | 58 |
| 5.3.4 | Kontrola povlaku .....                                    | 59 |
| 5.3.5 | Lití zkušební série.....                                  | 61 |
| 5.3.6 | Licí stroj NTL 350 Kovopol [31] .....                     | 61 |
| 5.3.7 | Parametry stávajícího licího cyklu.....                   | 63 |



|        |   |    |
|--------|---|----|
| 5.3.8  | Výsledky vzorkování .....   | 64 |
| 5.4    | Technologický potup tepelného zpracování T4 EN AC 45 400 (AlSi5Cu3).....                                    | 68 |
| 5.5    | Simulace licího procesu .....   | 68 |
| 5.5.1  | Základní nastavení simulace .....   | 68 |
| 5.6    | Simulace bez tepelně izolačního povlaku .....   | 74 |
| 5.6.1  | Průběh plnění .....   | 74 |
| 5.6.2  | Simulace pro plnicí tlak 30 kPa .....   | 75 |
| 5.6.3  | Simulace pro plnicí tlak 25 kPa .....   | 76 |
| 5.6.4  | Simulace pro plnicí tlak 20 kPa .....   | 77 |
| 5.7    | Simulace s lepším tepelně izolačním povlakem.....   | 78 |
| 5.7.1  | Simulace s plnicím tlakem 30 kPa a povlakem $0,20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .....  | 79 |
| 5.7.2  | Simulace s plnicím tlakem 30 kPa a povlakem $0,25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .....  | 80 |
| 5.7.3  | Simulace s plnicím tlakem 30 kPa a povlakem $0,30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .....  | 81 |
| 5.7.4  | Simulace s plnicím tlakem 25 kPa a povlakem $0,25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .....  | 82 |
| 5.7.5  | Simulace s plnicím tlakem 20 kPa a tepelně izolačními povlaky.....  | 82 |
| 5.7.6  | Porovnání teplotních polí formy v závislosti na povlaku .....   | 83 |
| 5.8    | Simulace s reálným povlakem CA CG 555 .....   | 84 |
| 5.8.1  | Simulace s plnicím tlakem 30 kPa s povlakem $11,74 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ..... | 85 |
| 5.8.2  | Simulace s plnicím tlakem 25 kPa s povlakem $11,74 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ..... | 87 |
| 5.8.3  | Simulace s plnicím tlakem 20 kPa s povlakem $11,74 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ..... | 88 |
| 5.9    | Simulace dodatečného odvzdušnění formy.....   | 88 |
| 5.10   | Cyklování licího procesu v simulaci .....   | 90 |
| 5.10.1 | Simulace 1 s cyklováním .....   | 90 |
| 5.10.2 | Simulace 2 s cyklováním .....   | 92 |
| 5.11   | Metalografická zkouška a zkoušky materiálu tavby .....  | 94 |
| 5.11.1 | Metalografická zkouška a vyhodnocení porosity .....   | 94 |
| 5.11.2 | Spektrografická zkouška.....  | 98 |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 5.11.3 | Zkouška mechanických vlastností .....      | 99  |
| 6      | Simulace návrhů pro zlepšení .....         | 100 |
| 6.1    | Návrh zvýšení plnicího tlaku .....         | 100 |
| 6.2    | Návrh úpravy geometrie formy .....         | 101 |
| 6.3    | Ověření plnicího tlak.....                 | 104 |
| 6.4    | Ekonomické zhodnocení výroby odlitku ..... | 105 |
| 7      | Závěr a doporučení .....                   | 106 |
| 7.1    | Doporučení.....                            | 108 |
| 8      | Zkratky a slovník .....                    | 110 |
| 9      | Použitá literatura .....                   | 111 |
| 10     | Seznam elektronických příloh .....         | 115 |

## 1 Úvod

Diplomová práce řeší problematiku slévárenství a to konkrétně pro účely automobilového průmyslu. Slévání je technologie pro toto odvětví průmyslu nenahraditelná, pomocí které lze získat výrobky – odlitky se složitými obecnými tvary. Tvarově složitě odlitky jsou popsány 3D matematickými modely pomocí CAD (počítačem podporované projektování) softwarů. Tyto 3D matematické modely jsou využívány v dnešní době pro CAM (počítačová podpora obrábění) a také pro numerické simulace aspektů slévání. CAD, CAM a numerické simulace jsou kombinací řešení pro zhotovení odlitků, na které jsou kladeny velké nároky týkající se geometrie, mechanických vlastností a bezvadnosti.

Hlavním předmětem je zpracování zakázky kompresorové skříň turbodmyhadla nákladního automobilu ve slévárně Metaz Týnec a. s. Odlitek má být z materiálu dle chemického značení  $AlSi5Cu3$  (EN AC 45 400) a tepelně zpracovaný ve stavu T4. Toto tepelné zpracování složené z precipitačního vytvrzení a přirozeného stárnutí, je požadováno pro zvýšení pevnosti a tvrdosti materiálu odlitku. V této práci je popsán postup, jak byla zpracována kompresorová skříň a členění kapitol tomuto faktu odpovídá. Bylo užito komplexního CAD / CAM řešení a numerických simulací pro docílení vhodného výstupu.

### 1.1 Představení slévárny

Slévárna Metaz Týnec a.s. je českou slévárnou s historií od roku 1931. Firma dodává odlitky na tuzemský trh a také zhotovuje zakázky na export v rámci Evropy, ale také pro Asii. Výrobní portfolio slévárny se skládá z odlitků hliníkových slitin a odlitků z litiny s kuličkovým grafitem, legované oceli až korozivzdorných ocelí. V součtu poskytuje slévárna možnost využít zhruba 140 slitin pro přání zákazníka. Provozy sléváren jsou schopny vyrábět odlitky od hmotnosti 0,25 kg až po hmotnosti 500 kg.

Tato slévárna disponuje gravitační a nízkotlakou technologií pro lití hliníkových slitin a slévárnou oceli pro gravitační lití. Společnost má vlastní obrobnu s CNC a konvenčními stroji pro tvorbu nástrojů a přípravků. Slévárna dále disponuje pracovištěmi dřevomodelárnou, jádrovnou s technologií COLDBOX pro střílení pískových jader, mechanizovaným provozem výroby pískových forem pro každou slévárnu zvlášť a také možností Rapid - Prototypingu s využitím 3D tisku [1].

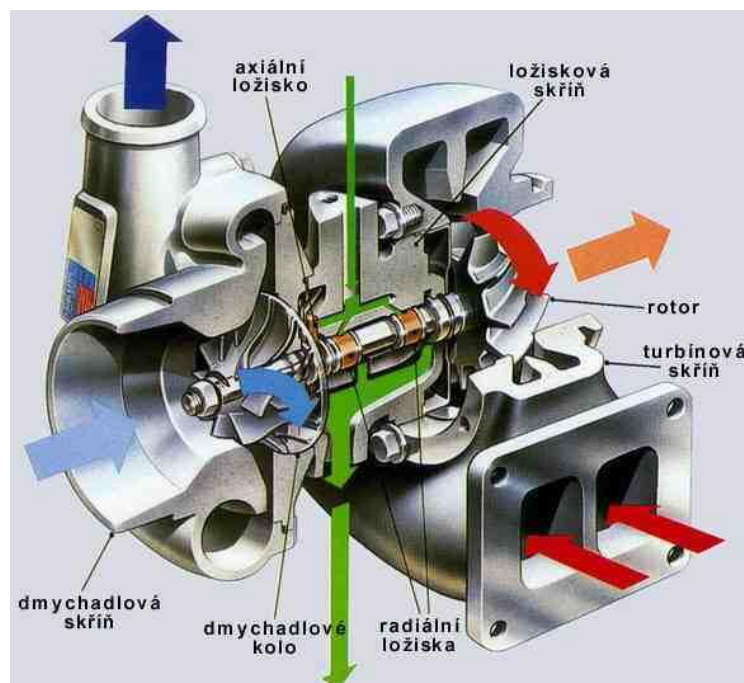
## 1.2 Cíle práce

- Navrhnout a vyrobit trvalou formu odlitku dmyhadlové skříně na základě poskytnutých 3D dat zákazníkem pro technologii nízkotlakého lití.
  - Analyzovat navrženou výrobu odlitku pomocí simulací a verifikací ve výrobě.
  - Na základě odhalených nedostatků vytvořit návrhy pro odstranění vad a tyto návrhy ověřit pomocí simulací.

## 2 Popis dmyhadlové skříně

Předmětem této práce je zhotovení dmyhadlové skříně turbodmyhadla. Trend dnešní doby vychází z aplikace přeplňování motorů ať již benzinových tak samozřejmě dieselových. Benzinové motory využívají přeplňování z důvodu snížení velikosti motoru respektive jeho pracovního objemu, ale také především kvůli snížení spotřeby paliva, při zachování požadovaného výkonu. Dieselové motory využívají turbodmyhadla pro zvýšení výkonu, krouticího momentu a celkové dynamiky motoru vůči atmosférické variantě. Turbodmyhadla pro benzinové a dieselové motory se liší v používaných materiálech, protože teplota spalin u benzinového motoru se pohybuje okolo  $1000^{\circ}\text{C}$ . Oproti tomu teplota spalin u dieselového agregátu se pohybuje okolo  $850^{\circ}\text{C}$ . Pro rotorové části jsou využívány slitiny titanu nebo slitiny niklu [15].

U turbodmyhadla dochází odvodem výfukových plynů ze spalovací komory, k přenesení kinetické energie na turbínu v turbínové části. Turbínové kolo je spojeno pomocí hřídele s dmyhadlovým kolem, které provádí kompresi vzduchu, jež dále postupuje do spalovací komory. Schématicky lze znázornit provedení turbodmyhadla jako celku na obrázku č. 2.1.



Obrázek 2.1 Řez turbodmyhadlem [16]

Pracovní otáčky rotoru dnešních turbodmychadel jsou v rozmezí 230 000 až 300 000  $ot \cdot min^{-1}$ . Tato skutečnost klade vysoké nároky na vyváženost rotoru, aby byl umožněn co nejdelší bezvadný chod turbodmychadla.

Skříň turbínové části musí zvládat vysoké pracovní teploty a tomu odpovídají používané materiály. Turbínová skříň je nejčastěji odlitkem z litiny, pro speciální aplikace jsou využívány žáruvzdorné slitiny. Dmychadlová část pracuje se vzduchem s teplotou okolí. Následně je stlačené medium schlazeno v příslušném chladiči nazývaném intercooler. Chlazením media se docílí zvýšení jeho hustoty a jeho následná komprese zvyšuje podíl vzduchu ve spalovací komoře, oproti atmosférickému motoru. Pro zachování správného stechiometrického poměru a tedy vhodného chodu motoru je nutno zvýšit také objem paliva ve spalovací komoře [17]. Velikost turbodmychadel se odvíjí od požadovaného výkonu daného motoru. Velikost lze demonstrovat na aplikaci v osobním automobilu, nákladním automobilu, motoru pro loď nebo motoru pro důlní nakladač.



Obrázek 2.2 Porovnání velikosti dmychadel [18]

Jak již bylo zmíněno, dmychadlová část pracuje se vzduchem, který má teplotu okolí. Proto je dmychadlová skříň nejběžněji zhotovována ze slitin hliníku, pro dosažení co nejmenší hmotnosti turbodmychadla. Ve speciálních případech bývá využíváno i dalších slitin vyhovujících daným pracovním podmínkám.

Z principu turbodmychadla vyplývají požadavky na dmychadlovou skříň, které jsou z pohledu technologie a zaručení funkčnosti uvedeny zde:

- Rozměrová přesnost. Nutno dodržet poměr šnekovité spirály a tím dané průtočné plochy skříně. Při nedodržení kompresního poměru, ať zvýšením nebo snížením, dochází k negativním účinkům. V případě zvýšení kompresního tlaku dojde k přetěžování rotoru a pro případ snížení daného tlaku nastane pokles výkonu daného motoru.
- Požadavek na povrch vnitřní stěny skříně. Nevhodný povrch může mít obdobné následky jako rozměrová nepřesnost.
- Jedná se o tenkostěnný odlitek, pro zachování co nejmenší možné hmotnosti instalované na dané zařízení pro zachování ekonomičnosti provozu.
- Těsnost skříně. Tato skutečnost souvisí s tenkostěnností odlitku. Jelikož jakýkoli odlitek není nikdy bez žádné vady a na dmychadlovou skříň lze pohlížet částečně jako na tlakovou nádobu, kdy pracovní tlak například u nákladních automobilů dosahuje hodnot okolo 0,3MPa. K určitým ztrátám dochází již vlivem kluzného uložení hřídele, k němuž jsou připevněny turbíny. Takže další tlakové ztráty jsou nepřijatelné

## 2.1 Materiály turbodmyhadla

Druh spalovacího motoru ovlivňuje skupinu materiálů, které se používají pro turbodmyhadla. Při základním zjednodušení bez speciálních aplikací lze rozdělit skupiny materiálů turbodmychadel na dvě kategorie. První kategorií jsou materiály pro zážehové spalovací motory. Druhá kategorie materiálů je pro vznětové spalovací motory. Speciální kategorizací mohou být materiály pro závodní vozy například formule 1 a jim podobné aplikace. Tato kategorizace je učiněna na základě teplot spalin, které odchází ze spalovací komory. U zážehových motorů výstupní teplota spalin dosahuje hodnoty 1050°C, vznětové motory mají teplotu spalin o poznání nižší a to 850°C. Volba materiálů musí také korespondovat s tepelnou roztažností jednotlivých materiálů, ze kterých je turbodmyhadlo sestaveno, jinak mohou vznikat pnutí a deformace, jež povedou k poruše zařízení. V kapitole 2 a obrázku 2.1 byl schematický řez turbodmyhadla. Tento obrázek znázorňuje základní rozdělení částí turbodmyhadla, které jsou zhotoveny z rozdílných materiálů. Výběr materiálu probíhá dle kategorizace uvedené výše a pak konkrétněji podle konkrétních pracovních podmínek jednotlivých částí, což je především provozní teplota. Součásti musí plnit svou funkci za daných pracovních podmínek, zpracovatelnost materiálu součástí je také limitací a v neposlední řadě cena materiálu hraje významnou roli. Turbodmyhadlo se skládá z následujících částí:

- Rotor
  - Turbína
  - Kompresor
  - Spojovací hřídel
- Kompresorová skříň
- Ložisková skříň rotoru
- Turbínová skříň

### 2.1.1 Materiály rotoru [19]

**Kompresorová kola** se zhotovují především ze slitin hliníku. Al slitiny postačují svojí pevností zatepla, protože kompresorová část turbodmychadla nedosahuje tak vysokých provozních teplot jako turbínová část. Používaný materiál podle ČSN 42 4380 (AlSi5Cu1Mg)

Tabulka 2.1 Chemické složení AlSi5Cu1Mg

|         | Si  | Cu  | Mg  | Fe  | Ti  | Mn  | Zn  | Ni   |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Min [%] | 4,5 | 1,0 | 0,4 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    |
| Max [%] | 5,5 | 1,5 | 0,6 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,05 |

Mechanické vlastnosti:

Mez pevnosti  $R_m = 270 \text{ MPa}$

Tažnost  $A \geq 0,5 \%$

Tvrdość dle Brinella 95

**Turbínová kola** jsou vystavována větším provozním teplotám. S tímto ohledem se výběr materiálu zaměřuje na skupinu žáruvzdorných materiálů. Nabízí se slitiny na bázi niklu nebo žáruvzdorné (žárupevné) oceli. Níže budou popsány materiály pro turbínové kolo a to konkrétně niklová slitina a žáruvzdorná ocel. Niklové slitiny nebo titanové slitiny se používají pro zážehové motory, kde je vyšší teplota, kterou musí materiál vydržet.

- **Niklová slitina**

Tabulka 2.2 Chemické složení Inconel 713C

|         | Cr    | Mo   | Nb + Ta | Al   | Ti   | C    | B     | Zr   | Si   |
|---------|-------|------|---------|------|------|------|-------|------|------|
| Min [%] | 12,00 | 3,80 | 1,80    | 5,50 | 0,50 | 0,08 | 0,005 | 0,05 | -    |
| Max [%] | 14,00 | 5,20 | 2,80    | 6,50 | 1,00 | 0,20 | 0,015 | 0,15 | 0,50 |



Mechanické vlastnosti:

|                      |                              |
|----------------------|------------------------------|
| Smluvní mez kluzu    | $R_{p0,2} = 677 \text{ MPa}$ |
| Mez pevnosti         | $R_m = 745 \text{ MPa}$      |
| Tažnost              | $A \geq 3,5 \%$              |
| Tvrdość dle Brinella | 350                          |

- **Žárupevná ocel**

Tabulka 2.3 Chemické složení oceli X30WC+V9 - 3

|         | C    | Mn   | Si   | Cr   | W    | V    | P     | S     |
|---------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Min [%] | 0,25 | 0,25 | 0,15 | 2,25 | 8,00 | 0,30 | -     | -     |
| Max [%] | 0,35 | 0,40 | 0,30 | 2,80 | 9,00 | 0,40 | 0,035 | 0,035 |

Mechanické vlastnosti:

|                      |                          |
|----------------------|--------------------------|
| Mez pevnosti         | $R_m = 1600 \text{ MPa}$ |
| Tvrdość dle Brinella | 240                      |

**Rotorová hřídel** spojující turbínovou a kompresní část, vytváří samotné srdce turbodmyhadla. Na hřídel jsou kladeny nároky na rozměrovou přesnost a rozměrovou stabilitu při mechanickém a teplotním namáhání, které jsou na jejich koncích rozdílné. Jako příklad použitého materiálu může být:

- **Korozivzdorná ocel**

Tabulka 2.4 Chemické složení oceli X6CrNiTi 18 - 10

|         | C    | Mn   | Si   | Cr    | Ni    | Ti   | P     | S     |
|---------|------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|
| Min [%] | -    | -    | -    | 17,00 | 9,00  | 0,40 | -     | -     |
| Max [%] | 0,08 | 2,00 | 1,00 | 19,00 | 12,00 | 0,70 | 0,045 | 0,015 |

Mechanické vlastnosti:

|                      |                              |
|----------------------|------------------------------|
| Smluvní mez kluzu    | $R_{p0,2} = 220 \text{ MPa}$ |
| Mez pevnosti         | $R_m = 620 \text{ MPa}$      |
| Tažnost              | $A \leq 40 \%$               |
| Tvrdość dle Vickerse | 148                          |

### 2.1.2 Materiály turbínové skříně

Turbínová skříň z pohledu aplikace v provozních podmínkách musí zvládat tepelné namáhání, které je svým charakterem proměnné. Samotná skříň z provozně ekonomického hlediska musí být co nejlehčí, což se promítne do samého odlitku z pohledu technologičnosti jako tenkostěnný odlitek. Nejvíce používané materiály pro turbínové skříně jsou na základě tvárné litiny s austenitickou strukturou. Úpravami chemického složení se docílují vhodných charakteristik slitiny pro danou aplikaci k danému spalovacímu motoru [20].

#### Diesellové motory

V tomto případě dosahují spaliny teplot okolo 850°C, čemuž odpovídají creepové vlastnosti používaných materiálů s daným chemickým složením. I přes uvedenou teplotu spalin se využívají slitiny s menší teplotou použitelnosti, kdy jsou garantovány určité mechanické vlastnosti. To způsobuje fakt, že zařízení je chlazeno prouděním vzduchu v motorovém prostoru a kapalným chlazením, které se nachází v ložiskové skříně, ke které je turbínová skříň připevněna [20].

- **Tvárná litina** [21]

Tabulka 2.5 Chemické složení litiny EN - GJS - AX NiCr20 2 (ASTM A439 D2)

|         | C    | Cr   | Mn   | Ni    | P    | Si   |
|---------|------|------|------|-------|------|------|
| Min [%] | -    | 1,75 | 0,70 | 18,00 | -    | 1,50 |
| Max [%] | 3,00 | 2,75 | 1,25 | 22,00 | 0,08 | 3,00 |

Mechanické vlastnosti:

|                      |                              |
|----------------------|------------------------------|
| Smluvní mez kluzu    | $R_{p0,2} = 210 \text{ MPa}$ |
| Mez pevnosti         | $R_m = 400 \text{ MPa}$      |
| Tažnost              | $A \leq 8 \%$                |
| Tvrdość dle Vickerse | 178                          |

- **Tvárná litina** [22]

Tabulka 2.6 Chemické složení litiny EN - GJS - AX Ni 35 (ASTM A 439 D5)

|         | C    | Cr   | Mn   | Ni    | P    | Si   |
|---------|------|------|------|-------|------|------|
| Min [%] | -    | -    | -    | 34,00 | -    | 1,00 |
| Max [%] | 2,60 | 0,10 | 1,25 | 36,00 | 0,08 | 2,80 |

Mechanické vlastnosti:

|                      |                              |
|----------------------|------------------------------|
| Smluvní mez kluzu    | $R_{p0,2} = 210 \text{ MPa}$ |
| Mez pevnosti         | $R_m = 380 \text{ MPa}$      |
| Tažnost              | $A \leq 10 \%$               |
| Tvrdość dle Vickerse | 164                          |

### **Benzinové motory**

Pro turbínové skříně benzinových motorů s teplotami spalin okolo 1050°C je nutno užit odolnější žáruvzdorné materiály. Tvárné litiny nabízejí řešení v podobě materiálu podle normy EN - GJS - AX NiSiCr 35 5 2. Pokud již litina nepostačuje z hlediska creepových vlastností tak dalším materiálem, který lze použít jsou chromniklové oceli. Chromniklová ocel na odlitky snáší provozní teploty okolo 1200°C .

- **Tvárná litina** [21]

Tabulka 2.7 Chemické složení litiny EN - GJS - AX NiSiCr 35 5 2

|         | C    | Cr   | Mn   | Ni    | Cu   | Si   |
|---------|------|------|------|-------|------|------|
| Min [%] | -    | 1,25 | -    | 34,00 | -    | 4,90 |
| Max [%] | 2,30 | 2,25 | 1,00 | 37,00 | 0,50 | 5,50 |

Mechanické vlastnosti:

|                      |                              |
|----------------------|------------------------------|
| Smluvní mez kluzu    | $R_{p0,2} = 207 \text{ MPa}$ |
| Mez pevnosti         | $R_m = 449 \text{ MPa}$      |
| Tažnost              | $A \leq 10 \%$               |
| Tvrdość dle Brinella | 162                          |

- **Chrom - niklová ocel na odlitky** [23]

Tabulka 2.8 Chemické složení oceli GX40NiCrSi3819 (ČSN 42 2955)

|         | C    | Mn   | Si   | Cr    | Ni    | P+S   | P     | S     |
|---------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Min [%] | 0,20 | -    | 1,00 | 20,00 | 37,00 | -     | -     | -     |
| Max [%] | 0,60 | 1,50 | 2,00 | 22,00 | 40,00 | 0,075 | 0,045 | 0,040 |

Mechanické vlastnosti:

|                      |                                 |
|----------------------|---------------------------------|
| Smluvní mez kluzu    | $R_{p0,2} \geq 196 \text{ MPa}$ |
| Mez pevnosti         | $R_m \geq 539 \text{ MPa}$      |
| Tažnost              | $A \geq 10 \%$                  |
| Tvrdość dle Brinella | 200                             |

### 2.1.3 Materiály kompresorové skříně [19]

U kompresorových skříní dosahuje provozní teplota stlačeného vzduchu okolo 150 °C spíše méně, kdy hlavní zdrojem teplota jsou okolní součásti v motorovém prostoru. Skříně musí plnit podmínky rozměrové přesnosti a stálosti, dále těsnosti a co nejmenší možnou hmotnost. K tomuto účelu se využívají především slitiny hliníku s následným tepelným zpracováním odlitku. Uvedené slitiny níže jsou vhodné podle normy ČSN EN 1706 pro lití do kovových forem.

- **Hliníková slitina AlSi5Cu3**

Tabulka 2.9 Chemické složení AlSi5Cu3 (EN AC 45 400)

|         | Si   | Fe   | Cu   | Mn   | Mg   | Zn   | Ni   | Sn   | Pb   | Ti   |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Min [%] | 4,50 | -    | 2,80 | 0,20 | -    | -    | -    | -    | -    | 0,05 |
| Max [%] | 6,00 | 0,60 | 3,80 | 0,60 | 0,05 | 0,15 | 0,15 | 0,05 | 0,10 | 0,15 |

Mechanické vlastnosti po tepelném zpracování T4:

|                      |                              |
|----------------------|------------------------------|
| Smluvní mez kluzu    | $R_{p0,2} = 110 \text{ MPa}$ |
| Mez pevnosti         | $R_m = 230 \text{ MPa}$      |
| Tažnost              | $A_5 = 5 \%$                 |
| Tvrdość dle Brinella | 75                           |

- **Hliníková slitina AlSi5Cu3Mg**

Tabulka 2.10 Chemické složení AlSi5Cu3Mg (EN AC 45 100)

|         | Si   | Fe   | Cu   | Mn   | Mg   | Zn   | Ni   | Sn   | Pb   | Ti   |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Min [%] | 4,50 | -    | 2,60 | 0,55 | 0,15 | -    | -    | -    | -    | -    |
| Max [%] | 6,00 | 0,60 | 3,60 | 0,55 | 0,45 | 0,20 | 0,10 | 0,05 | 0,10 | 0,25 |

Mechanické vlastnosti po tepelném zpracování T4:

|                      |                              |
|----------------------|------------------------------|
| Smluvní mez kluzu    | $R_{p0,2} = 180 \text{ MPa}$ |
| Mez pevnosti         | $R_m = 270 \text{ MPa}$      |
| Tažnost              | $A_5 = 2,5 \%$               |
| Tvrdość dle Brinella | 85                           |

Význam tepelného zpracování je uvedeno v kapitole 2.2 popisující tepelná zpracování, která se používají pro Al slitiny.

### 2.1.4 Materiály ložiskové skříňě

Ložisková skříň jako hlavní spojovací článek skříni dmychadla, turbíny a celého rotoru musí zachovat rozměrovou stabilitu. Ložisková skříň obsahuje mazací kanály a také chladicí okruh ať již olejový nebo vodní, z toho vyplývá směrodatná tloušťka stěny. Jelikož rotor dosahuje velkých pracovních otáček, tak uložení musí tlumit vibrace. Materiálem vyhovující těmto požadavkům je litina.

- **Litina EN ČSN GJL 200** [24]

Tabulka 2.11 Směrné chemické složení litiny s lupínkovým grafitem EN GJL 200

|         | C    | Si   | Mn   | P    | S    |
|---------|------|------|------|------|------|
| Min [%] | 3,25 | 1,80 | 0,65 | 0,30 | -    |
| Max [%] | 3,45 | 2,00 | 0,85 | 0,45 | 0,15 |

Mechanické vlastnosti:

|                      |                      |
|----------------------|----------------------|
| Mez pevnosti         | Rm = 200 MPa         |
| Tažnost              | A5 = 1,5 % maximálně |
| Tvrdość dle Brinella | 220                  |

## 2.2 Tepelná zpracování hliníkových slitin

Siluminy, což jsou slitiny hliníku – křemíku a dalších legujících prvků lze tepelně zpracovávat mnoha způsoby. Ty nejzákladnější budou uvedeny níže a konkrétní tepelné zpracování odlitku T4 precipitační vytvrzování s přirozeným stárnutím bude rozebráno podrobněji.

Tepelné zpracování siluminů a jejich označení [32]:

- F – litý stav
- 0 – Žihání pro odstranění vnitřních pnutí
- T4 – Rozpouštěcí žihání a vytvrzování zastudena
- T5 – Umělé stárnutí při nízkých teplotách bez předchozí homogenizace
- T6 – Rozpouštěcí žihání, rychlé ochlazení a vytvrzování zatepla
- T7 – Rozpouštěcí žihání, rychlé ochlazení a umělé přestárnutí

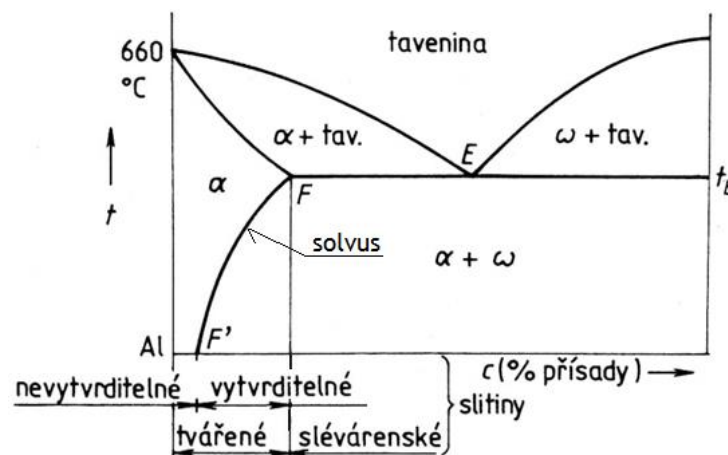
Precipitační vytvrzování se provádí za účelem získání vyšších mechanických vlastností, které nemá materiál odlitku v litém stavu. Obecným předpokladem pro precipitační

vytvrzování je rozpustnost legujícího prvku popřípadě prvků v tuhém roztoku  $\alpha$  hliníku. Samotná rozpustnost musí dosahovat určité hodnoty což je důsledkem množství legujících prvků, které jsou rozpustné v tuhém roztoku.

### 2.2.1 Princip tepelného zpracování Al slitin [33]

Precipitační vytvrzení materiálu se skládá ze základních tří činností, při kterých se ve struktuře materiálu odehrávají změny. Tyto tři základní činnosti jsou:

1. Rozpouštěcí žíhání
2. Ochlazení materiálu
3. Stárnutí materiálu



Obrázek 2.3 Diagram Al - X slitiny [34]

**Rozpouštěcí žíhání** se provádí při teplotě, která se pohybuje nad křivkou solvu. Při tomto žíhání se dosáhne homogenního tuhého roztoku  $\alpha$ , kdy se rozpustí intermediální fáze vyloučené po hranicích zrn. Pro hliníkové slitiny se žíhací teploty pohybují v intervalu 470°C až 530°C.

Rozpouštěcím žíháním se intermediální fáze rozpustily v tuhém roztoku a tento stav, kdy jsou složky rovnoměrně rozloženy v celém objemu je nutno zachytit a to se děje pomocí **rychlého ochlazení**, kdy intermediální složky nemají čas se vyloučit. Tím vznikne přesycený tuhý roztok  $\alpha'$ , kdy obsah legujících prvků v roztoku  $\alpha'$  vytvářející intermediální fáze, je větší než rovnovážná rozpustnost.

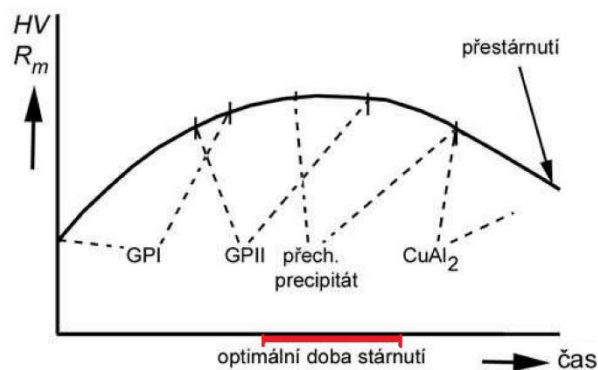
Po rychlém ochlazení následuje **proces stárnutí**, který se rozděluje na umělé a přirozené. Při stárnutí se rozpadá přesycený tuhý roztok  $\alpha'$  a tento proces se nazývá precipitace. Při precipitaci dochází k vylučování částic intermediálních fází rovnoměrně v celém objemu a

ne jen po hranicích zrn, které se nazývají precipitáty. Precipitáty vytvářejí překážky pro pohyb dislokací, což se projevuje nárůstem pevnosti a tvrdosti materiálu.

Umělý proces stárnutí probíhá za zvýšení teploty rámcově 150°C až 200°C. Kdy proces precipitace má několik stádií a stěžejní parametrem tohoto procesu je čas:

1. Tvorba zón GP I precipitátu
2. Tvorba zón GP II precipitátu
3. Tvorba přechodového precipitátu
4. Tvorba rovnovážného precipitátu

GP je zkratka pro Guinier – Prestonovy zóny. Tyto zóny vytváření pnutí v okolní mřížce a jejich růst je podmíněn nižší aktivační energií, než je aktivační energie rovnovážného precipitátu. GP zóny vytvářejí koherentní precipitát a růst GP zón představuje růst překážek pro pohyb dislokací, tím se zvyšují hodnoty dosaženého vytvrzení. Žádoucí je koherentní precipitát, ale při delším časovém vystavení materiálu zvýšené teplotě vzniká semikoherentní (přechodový) a poté nekoherentní (rovnovážný) precipitát. Tento stav je označován jako přestárnutí materiálu a takovýto stav je z pohledu mechanických vlastností nežádoucí [33].



Obrázek 2.4 Průběh umělého stárnutí s jednotlivými stadii [33]

Přirozené stárnutí neprobíhá za zvýšených teplot, ale při teplotě okolí a celý proces je velmi časově náročný od několika desítek hodin až po stovky hodin. Výsledné mechanické vlastnosti při přirozeném stárnutí nedosahují takových hodnot jako při umělém stárnutí. Ovšem odpadají náklady na ohřev materiálu.

### 3 Technologické možnosti výroby odlitků

Slévárství patří mezi nejstarší výrobní technologie naší civilizace, kdy je využíváno základních principů i v dnešní moderní době. S rozšiřující se automatizací a regulací slévárenských zařízení dochází k neustálému zlepšování samotných technologií. V tomto důsledku sledování procesů lze zkoumat a upravovat technologie s dopadem na metalurgické vlastnosti materiálu odlitku a docílovat tak požadovaných vlastností. Mezi nejčastěji používané technologie slévání patří:

- **Gravitační lití**
- **Vysokotlaké lití**
- **Nízkotlaké lití**
- **Odstředivé lití** - Tato metoda je užitá pro složité tvary, kdy vlivem odstředivé síly rotující kovové formy tavenina zatíká do dutin formy. Odstředivá síla má pozitivní vliv na mechanické vlastnosti, zlepšení zabíhavosti taveniny. Technologií odstředivého lití se vytvářejí především rotačně symetrické odlitky a truby [2].
- **Plynulé lití** – Tavenina vytéká z udržovací pece přes krystalizátor, který určuje výsledný průřez.
- **Lití ve vakuu** – Veškeré vybavení potřebné pro odlití je umístěno ve vakuové komoře. K samotné tavně slitiny dochází v této komoře respektive ve vakuu.

Pro vytvoření si celkového obrazu o technologiích, které se používají pro lití do trvalých forem, a mohly by být alternativně použity pro odlití daného výrobku, budou stručně popsány níže.

#### 3.1 Gravitační lití

Principiálně nejjednodušší metodou slévání je gravitační lití do netrvalých forem například pískové formy nebo do trvalých forem - kokil. Tato technologie využívá principu gravitace, kdy tavenina vyplňuje dutinu formy dle způsobu zavtokování. Na taveninu nepůsobí žádná jiná síla nežli gravitační. Při srovnání lití do kokily a do pískové formy, je nutno u lití do kokily zvýšit tloušťku stěny odlitku, aby tavenina zatekla. To je zapříčiněno vyšší rychlostí tuhnutí taveniny v kokile. Výhodou pískových forem je nenáročnost formování, kdy náklady na formu jsou podstatně nižší v porovnání s náklady na kokilu. Pískové formy při ručním formování můžeme využít pro kusovou nebo pro malosériovou výrobu. Se vzrůstající sériovostí lze použít u pískových forem mechanizovaná či



automatizovaná zařízení, jako jsou střešovací stroje nebo lisy. Kokilové lití je používáno pro sériovou výrobu a hromadnou výrobu. Životnost kokil je odvozena od slitiny odlitku respektive její lici teploty a hmotnosti odlitku. Pro litinové těžké odlitky je životnost kokily zhruba 100 cyklů a u drobných odlitků z nízkoteplotně tavitelných slitin okolo 500 000 cyklů [2].

### 3.2 Vysokotlaké lití

Tato technologie je známa od první poloviny 19. století, kdy s jejím využitím byly tvořeny tiskařské nástroje. Koncem 18. století se vysokotlaké lití rozšířilo do strojírenství. V českých zemích tuto technologii uvedl Ing. Polák v roce 1928, který patentoval vysokotlaký lici stroj s vertikální komorou. V dnešní době se užívá především horizontálního uspořádání, které bylo zavedeno ve Spojených státech amerických v roce 1934 [2].

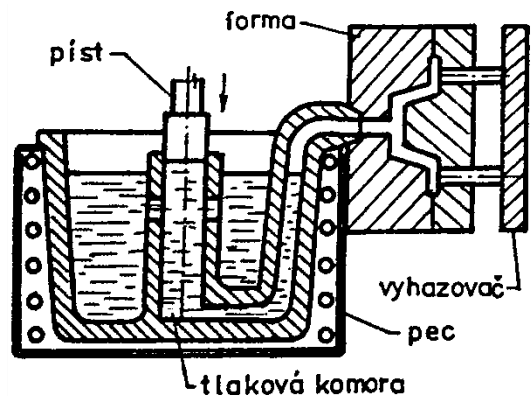
Pro vysokotlaké lití se využívají slitiny zinku, hliníku, mědi, olova, cínu, hořčíku ale také i oceli nebo litiny. Zmíněné poslední dva příklady jsou jen okrajovou záležitostí. Využívají se především slitiny s nízkou teplotou tavení. Odlitky vytvořené touto technologií mají jemnozrnnou strukturu bez výrazných vnitřních vad a dosahuje se dobrého povrchu a mechanických vlastností. Vysokotlaké lití je velmi produktivní metodou s kvalitním výstupem, který reprezentují tenkostěnné odlitky (tloušťka stěny 1 – 2mm) se složitým tvarem [2] [3]. Tavenina v tomto případě vniká do dutiny formy pod vysokým tlakem v rozmezí 20 – 600MPa. Tavenina při tomto tlaku dosahuje poměrně vysokých rychlostí v řádech desítek  $m \cdot s^{-1}$ . Formy jsou ocelové, pro méně namáhané části je používána legovaná ocel 1.2311. Pro velmi tepelně exponované části se užívá ušlechtlejšího materiálu a to vysokolegovaných ocelí například 1.2343. Používání jádra pro tvorbu dutin jsou ocelové jako materiál samotné formy. Výše uvedené fakty předurčují, že vysokotlaké lití je také velmi přesná technologie s minimem přídatku na výrobku. U této technologie se předlévají otvory od průměru 1mm [4]. Většina výhod byla popsána v textu výše a mezi negativa této metody lze zařadit vysokou cenu tlakových forem, což vypovídá o aplikaci pro velkosériové lití. Pořizovací cena liciho stroje taky poměrně vysoká. Vady odlitků u této technologie jsou především porezita, popřípadě nedolití, bubliny, deformace [5].

V posledních dvaceti letech se u této metody začalo využívat metalurgických poznatků. Jedná se především o rheocasting a thixocasting, kdy hlavní vývoj těchto technologií byl v 70. letech dvacátého století. Obě tyto metody využívají vpravení směsi taveniny a již

částečně ztuhlých složek do formy pro vysokotlaké lití. Částečně ztuhlá fáze obsahuje globulární zárodky, které jsou v tavenině homogenně rozloženy. Tento stav směsi umožňuje vstřík materiálu do formy pomocí tlakového lití. Rozdíl mezi rheocastingem a thixocastingem je v přípravě materiálu pro vstříknutí. Rheocasting využívá vzniku směsi z taveniny jejím ochlazováním, čímž se docílí polo ztuhlého materiálu s globulárními zárodky. Thixocasting využívá ohřev tuhého materiálu s globulární strukturou do požadovaného stavu pro vstříknutí. Metoda rheocasting je výhodnější z důvodu, že odpadájí požadavky na speciální polotovary, lze používat běžné slitiny a neomezeně je přetavovat. Rheocasting také umožňuje používat slitiny, které jsou jinak technologií vysokotlakého lití nezpracovatelné [6].

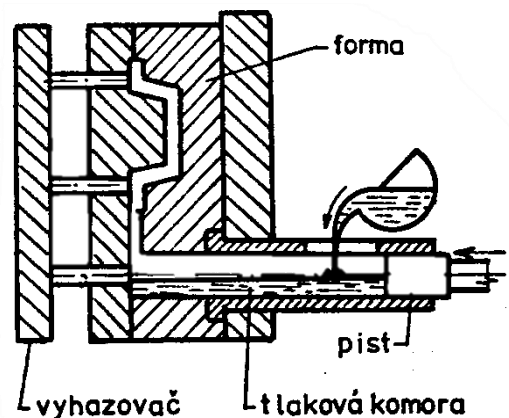
U vysokotlakého lití rozlišujeme stroje podle konstrukce a v ní umístění vstříkovací komory:

- **Tlakové lití s teplou komorou** – Při této metodě je ponořena vstříkovací sestava do kelímku s taveninou, z toho vyplývá vysoké teplotní namáhání vstříkovacího mechanismu a jeho poškození. Z důvodu tepelného namáhání je tato metoda vhodná pro slitiny s nízkou teplotou tavení jako jsou slitiny Mg, Zn, Pb, Sn a dalších [2].



Obrázek 3.1 Tlakové lití s teplou komorou [2]

- **Tlakové lití se studenou komorou** – Tavenina o určitém množství je nalita do vstříkovací komory a po té vstříknuta do formy. Oproti metodě s teplou komorou je zde menší tepelné namáhání vstříkovací soustavy. Takže se tato metoda uplatňuje pro vstříkování slitin s vyšší teplotou tavení, jako jsou především slitiny Al, Cu, dokonce oceli a další [2].



Obrázek 3.2 Tlakové lití se studenou komorou [2]

### 3.3 Nízkotlaké lití

Nízkotlaké lití je zvolenou technologií, pomocí které se bude realizovat výroba dmyhadlové skříně. Technologie nízkotlakého lití začala být využívána před druhou světovou válkou v zemích, jako je USA a Velká Británie. V Čechách tuto technologii uvedl do provozu Josef Lát po druhé světové válce. Ten postavil první nízkotlaký lící stroj u nás po vzoru těch, které se vyskytovaly ve Velké Británii. Slévárny vycítily potenciál této technologie, na což zareagoval národní podnik Vihorlat Snina, ale jejich zařízení byla nízké kvality a tak nízkotlaké lití v tehdejší Československu zažilo dekadenci. Národní podnik ani neuspěl s prodejem zařízení na dalších trzích a tak následovalo ukončení výroby těchto zařízení. Úpadek nízkotlakého lití zapříčinil také nástup nové technologie vysokotlakého lití. Změna nastala po převratu v roce 1989, kdy se otevřel trh a na ten vstoupili noví výrobci nízkotlakých zařízení a také vznikly nové poptávky, které bylo možno realizovat technologií nízkotlakého lití. Tyto poptávky byly především z automobilového průmyslu pro odlitky, jako jsou [2] [5]:

- Hlavy válců motorů
- Brzdové bubny
- Oběžná kola převodovek
- Skříně zařízení
- Spojkové kotouče

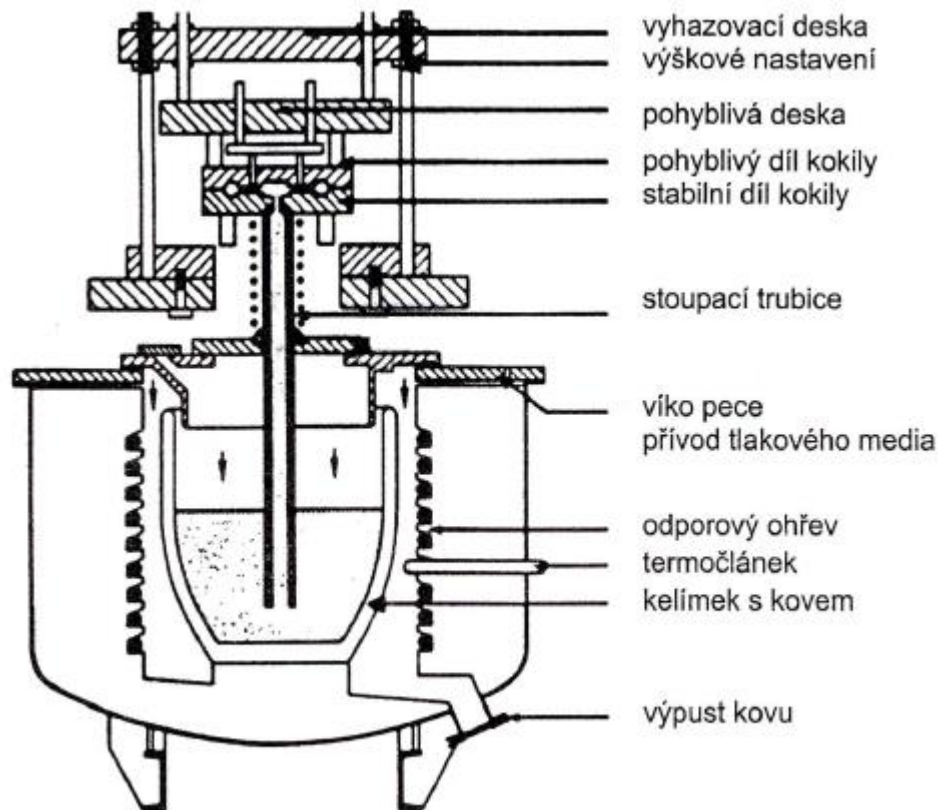
Tato technologie se ujala především pro lití hliníkových, hořčikových slitin do forem pro nízkotlaké lití a ve speciálním případě i pro lití vagonových kol do grafitových forem.

#### 3.3.1 Skladba zařízení nízkotlakého lití

Zařízení se skládá z těchto základních funkčních částí:

1. Pec
2. Kelímek
3. Plnicí trubice (stoupací trubice)
4. Pracovní roviny
5. Forma pro nízkotlaké lití (stabilní a pohyblivá část)
6. Dorazy a vyhazovače
7. Ovládací systém

Pec obsahující kelímek bývá většinou umístěna pod úrovní podlahy, ve speciálně vytvořené díře pro úsporu prostoru. Pec slouží jako udržovací, tavba se provádí na tavicí peci. Do kelímku je pevně umístěna plnicí trubice, jejíž vstup se umístí kousek ode dna daného kelímku. Plnicí trubice vyústí do pracovní roviny, kde je provedeno těsné spojení s trvalou formou.



Obrázek 3.3 Nízkotlaký lící stroj [5]

### 3.3.2 Princip nízkotlakého lítí

Po nalití taveniny do kelímků pomocí vysokozdvížného vozíku nebo jeřábu, následuje uzavření tlakové nádoby a přivedení tlakového media do prostoru s kelímkem. Tlakové medium působí na taveninu a vytlačuje ji přes plnicí trubici do formy. Tlak media je proměnný, jak v průběhu jednoho lícího cyklu, ale také se tlak zvyšuje s ubývajícím objemem taveniny v kelímku právě pro kompenzaci klesajícího objemu taveniny po každém lícím cyklu. Po vyplnění dutiny formy je zvýšen tlak na taveninu, dokud odlitek neztuhne. Po ztuhnutí odlitku se uvolní tlak na taveninu, tavenina z plnicí trubice vyteče zpět do kelímku. Forma pro nízkotlaké lítí se otevře pomocí daného mechanismu. Při otvírání dochází k vytlačení odlitku pomocí vyhazovačů a pomocných vyhazovacích

desek. Odlitek je odebrán z pracovního prostoru stroje. Po následném ošetření formy může začít nový lící cyklus.

Jako medium pro vyvození tlaku na taveninu se využívá nejčastěji stlačeného vzduchu, který by měl být vysušený. Ve speciálních případech je využíváno také argonu. Obvyklé pracovní tlaky se pohybují v rozmezí  $0,01 - 0,3 \text{ MPa}$ . Rychlost plnění formy taveninou dosahuje řádu  $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Využití materiálu u této technologie dosahuje přes 90%, což v kombinaci s dobou cyklu v řádech jednotek minut je poměrně produktivní metoda. Touto technologií můžeme vytvářet, jak již bylo zmíněno, širokou škálu odlitků, kdy největší rozměr udává pracovní prostor lícího stoje, ale je možno odlévat i rozměrově malé odlitky. Tato skutečnost koresponduje s faktem, že je možno odlévat odlitky s relativně malou tloušťkou stěny zhruba  $4 \text{ mm}$  až po velké tloušťky stěny, kdy s rostoucí tloušťkou stěny narůstá výrazně doba pracovního cyklu. Z principu navození přetlaku v kelímku při plnění formy vychází, že kelímek musí být těsně uzavřen, což zabraňuje vniku atmosféry do jeho prostoru a tavenina je tak chráněna před oxidací [2] [4] [5].

### 3.3.3 Přednosti nízkotlakého lití

- Menší nároky na formy pro nízkotlaké lití vůči vysokotlakému lití
- Automatizace procesu
- Klidné a řízené plnění
- Vysoké využití materiálu
- Tavenina nepřichází do styku s atmosférou
  - Tavenina neoxiduje
  - Zlepšení pracovního prostředí
- Kvalitní povrch odlitku
- Malý výskyt vnitřních vad v odlitku
- Usměrněné tuhnutí od vrchních částí odlitku po dolní části u vtoku

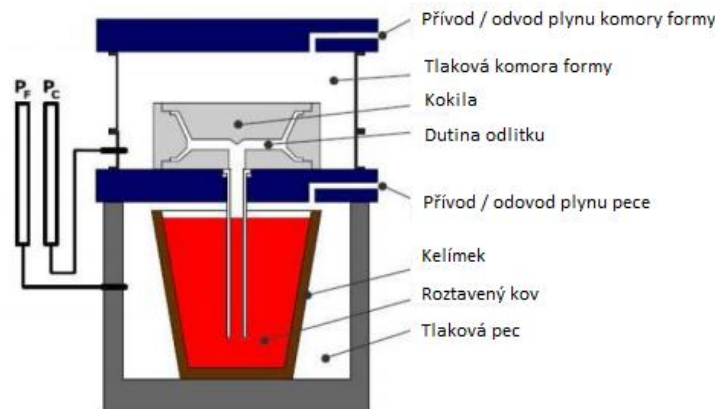
### 3.3.4 Nevýhody nízkotlakého lití

Tato technologie je závislá na mnoha faktorech, které jsou navzájem provázané.

- Vhodná konstrukce a materiál formy – tepelné namáhání
- Aplikované povlaky ba funkční ploch forem
- Správné pracovní podmínky (teplota taveniny, plnicí tlak, dotlak, čas tuhnutí atd.)

### 3.3.5 Nízkotlaké lití v současnosti

Nízkotlaké lití dalo podnět k vývoji technologie nízkotlakého lití s protitlakem. Tato metoda má základ v tom, že tlakové medium je přivedeno do pece s kelímkem a také do prostoru a okolí formy. Takže ve výchozím stavu natlakování pece a prostoru s formou nedochází k plnění. Z toho vyplývá požadavek na těsnost nejen nádoby kelímku s taveninou, ale také na těsnost komory, v níž je umístěna forma.



Obrázek 3.4 Nízkotlaký lící stroj protitlak [7]

Použitím protitlaké technologie lití se snižuje pórovitost v odlitku, značně eliminuje smrštění a průvodní vady typu makro pórovitost a kavit. Lepší přestup tepla a zvýšení mechanických vlastností odlitku. Plnění taveninou je poměrně klidného charakteru bez turbulencí. Řízení tuhnutí odlitku pomocí variabilní rychlosti plnění formy. Zlepšení pracovních podmínek pro obsluhu, protože nedochází vlivem uzavřeného pracovního prostředí k znečištění vzduchu. Komora, v níž je umístěna trvalá forma může být také použito ochranné atmosféry. U této technologie lze využívat také pískových forem [7].

#### Automatizace pro nízkotlaké lití

Automatizace patří mezi další prvky, které technologii nízkotlakého lití rozvíjí. Základním prvkem automatizace u této technologie je aplikace na tlakovou jednotku, která zajišťuje plnění formy taveninou. Řídicí a kontrolní jednotka vyhodnocuje aktuální stav procesu pomocí snímačů a díky aktivním členům pneumatického systému upravuje hodnoty na požadovaný stav, pro dosažení kvalitního odlitku. Realizace řídicí jednotky se provádí nejčastěji pomocí PLC, které jsou umístěny ve skříni, která dále obsahuje nejčastěji LCD panel pro zobrazení informací pro obsluhu a také ovládací prvky pro zásah od obsluhy. Tyto skříně jsou umístěny v blízkosti nízkotlakého lícího stroje. Jednak pro to, aby obsluha měla blízko ovládací prvky pro případ nějaké krizové situace, ale také protože k řídicí skříni bývá přidruženo aktivní zařízení pro nastavování pracovního pneumatického cyklu.

PLC vyhodnocuje aktuální stavy a popřípadě je upravuje pomocí předpřipraveného algoritmu, do kterého obsluha nastaví požadované parametry pracovního cyklu [8]:

- |                 |     |                         |       |
|-----------------|-----|-------------------------|-------|
| • Náběh lití    | [s] | • Kompenzační tlak      | [kPa] |
| • Lití          | [s] | • Tlak plnění           | [kPa] |
| • Náběh dotlaku | [s] | • Tlak dotlačování      | [kPa] |
| • Dotlak        | [s] | • Max. teplota taveniny | [°C]  |
| • Tuhnutí       | [s] |                         |       |

Ovládací skříň může být připojena do počítačové sítě. Jelikož se jedná o průmyslový počítač, může do něho být přístupováno pomocí sítě a parametry pracovního cyklu mohou být nastaveny vzdáleně. S ohledem na softwarové řešení lze provádět sběr pracovních dat a tyto data ukládat. Uložené data mohou složit jako zpětná vazba, zda byly dodrženy požadované podmínky procesu. Na základě takto získaných dat lze vytvářet také jistá opatření v rámci zlepšování či jiných požadavků.

Výzkumné projekty z oblasti automatizace se snaží o plnou automatizaci lícího procesu. K tomu je zapotřebí mít aplikované snímací zařízení na veškeré veličiny, které jsou podstatné pro samotný lící proces, ošetření formy a následnou manipulaci s odlitkem po odlití a ztuhnutí (kinematika pohybů). Snímané veličiny jsou parametrizovány příslušnými rovnicemi, se kterými následně pracuje výpočetní technika. Podmětem pro automatizaci, jak již bylo zmíněno, je snaha o zlepšení pracovního prostředí pro obsluhu, snižování rizik úrazů zaměstnanců. Postupným vývojem byl utvořen model založený na kontrole procesu lití. Tento model umožňuje, že se obsluha nemusí učit celý proces lití. Postačuje jí znalost ovládání modelu. Závěry několika studií a vlastního výzkumu shrnuje článek - Automation of the Casting Process using a model-based NC Architectur, který popisuje tvorbu výpočetního programu – modelu. Tento program vytváří výstupy na bázi NC kódu, jež využívá zpětnovazebního řízení. V současnosti s použitím dané dispozice senzorů a zpětnovazebního řízení, je systém nestabilní, kdy nastává neočekávané chování. S dalším rozvojem měřících a senzorických zařízení nastane zlepšení stability systému. Výpočetní technika nabízí dostatečný výkon pro řízení v reálném čase a systém by měl být ve výsledku snadno naprogramovatelný. Mezi hlavní přínosy tohoto řešení lze zahrnout flexibilitu systému, přesunutí slévače do bezpečné zóny, ekonomičnost procesu, snížení času výroby a zajištění co nejvíce shodných technologických podmínek při lití odlitků [9].

### **3.4 Povlaky**

Povlaky nástrojů v tomto případě trvalých forem a popřípadě i trvalých jader mají mnoho variant a vlastností, pro které jsou využívány. O volbě povlaku rozhoduje technologie, ale také nákladovost, zda se daný povlak vyplatí z pohledu nákladů. Úkoly povlaků spočívají ve snižování tření pohyblivých částí formy, korozní ochraně, snížení abrazivního opotřebení prouděním taveniny, úprava interakce taveniny s formou, zlepšení separačních vlastností a tepelná izolace.

Povlaky slévárenských nástrojů lze dělit z hlediska jejich životnosti avšak způsobů, jak lze povlaky dělit je mnoho, například dle technologie zhotovení povlaku nebo chemického složení.

#### **3.4.1 Povlaky trvalé [10]**

Povlaky trvalého charakteru jsou zhotovovány pomocí PVD a CVD technologií. Tyto povlaky slouží především pro velkosériové lití, kdy se jimi docílí zvýšení životnosti forem a to především díky jejich vlastnostem jako jsou korozní ochrana, snížení tření, tepelná odolnost a anti abrazivní účinek. Jejich tloušťky se pohybují v řádech jednotek mikrometrů. Označení povlaku jako trvalé je ovšem jistá nadsázka, při práci jsou tyto povlaky zatěžovány a dochází tak k jejich opotřebení, ale zvýšení životnosti je zjevné a snížení odstávek na údržbu náradí se taktéž snižuje.

#### **3.4.2 Povlaky netrvalé [11]**

Povlaky netrvalé využívají mnoha způsobů aplikace na povrch nástrojů. Životnost netrvalých povlaků se těžko určuje, ale pohybuje se zhruba okolo 100 licích cyklů a je velmi individuální. Netrvalé povlaky jsou vhodné pro kusovou, ale i velkosériovou výrobu, příznivé jsou náklady těchto povlaků oproti trvalým. V této práci je využito povlaků, jejichž aplikace je založená na následujícím postupu:

- Předehřátí formy na požadovanou teplotu 200°C
- Nanesení povlaku stříkací pistolí na povrch formy
- Aktivace povlaku po určitý čas

Jelikož se jedná o povlaky většinou založené na vodném roztoku, tak aktivace spočívá v odpaření vody z povlaku. Forma určená pro dmychadlovou skříň je ještě ošetřena separačním povlakem pro snadnější uvolnění odlitku z formy. Separační povlak je aplikován hned po aktivaci termo izolačního povlaku a je taktéž založen na vodném



roztoku. Problematika netrvalých povlaku spočívá především v kvalitě procesu nanášení a ve výsledné tloušťce povlaku, kdy jsou zaručeny požadované vlastnosti. Tloušťky se pohybují od desítek až po stovky mikrometrů.

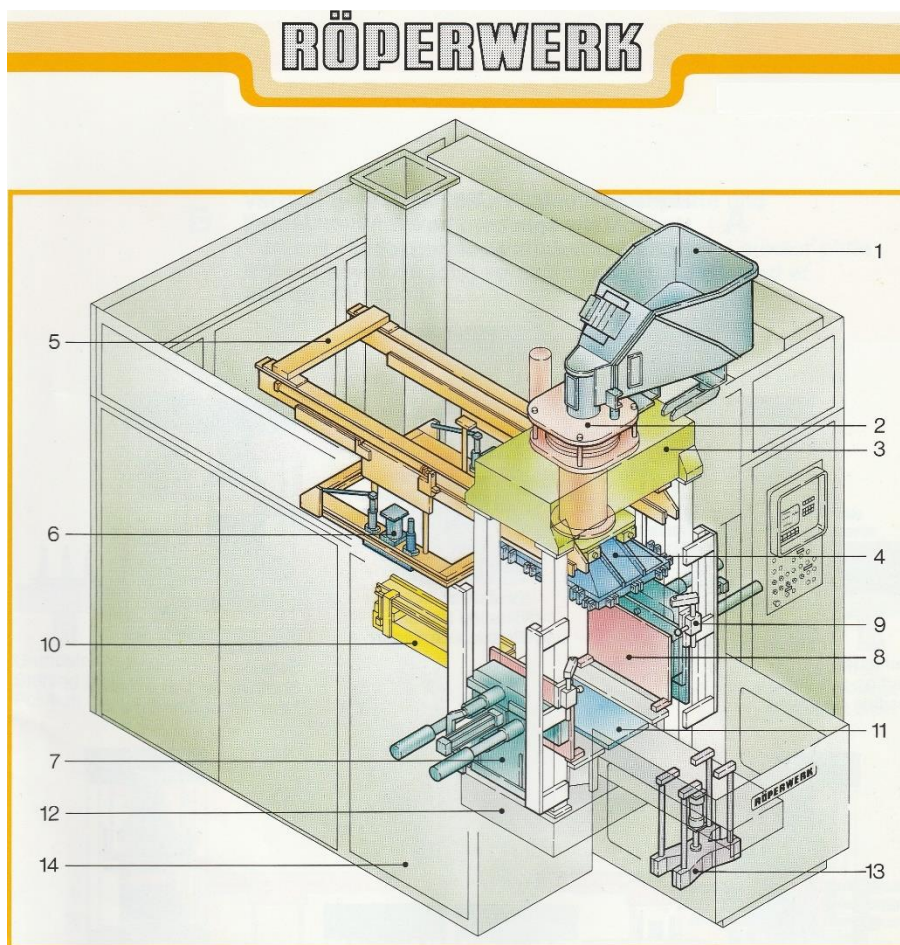
Jak je vidět jednotlivé povlaky se mezi sebou kombinují, protože jeden povlak neobsáhne všechny vlastnosti, které jsou požadovány. Nekombinují se ovšem jen netrvalé povlaky, ale netrvalým povlakem lze zlepšit podmínky v kombinaci s trvalými povlaky.

### **3.5 Výroba jader**

Úkolem jádra je vytvářet v odlitku dutinu. Jádra mohou být dělena podle dvou kritérií a to na pravá – nepravá a trvalá – netrvalá. Pro zhotovování netrvalých jader se využívá několik dostupných technologií, kdy je nutno přihlídnout k velikosti jádra, nákladů na výrobu jádra a výhody nevýhody. Pro výrobu netrvalého jádra pro odlitek dmychadlové skříně se užilo vstřelovací technologie Cold – Box. Obdobně k této technologii existuje metoda Hot – Box a Warm - Box. Dalšími technologiemi výroby netrvalých jader jsou ruční nebo strojní formování ST směsí a použití foukacích strojů.

Metoda Cold – Box je založena na principu vstřelení jádrové směsi do jaderníku. Po vstřelení následuje vytvrzení pomocí vhodného katalyzátoru odvozeného od pojiva směsi. Použitá směs obsahuje jako ostřívo křemenný písek, pojivo a požadovanou vlhkost směsi zajišťuje voda (malý obsah). Křemenný písek je konkrétně z lokality Šajdíkové Humence, jež lze zařadit mezi písky naváté s kulatým pravidelným zrnem a s vyšším obsahem živců. Pojivo směsi reaguje na katalyzátor – plyn CO<sub>2</sub> a dojde k jeho vytvrzení řádově během několika sekund. Alternativou k vytvrzování u Cold - Box metody může být použití jiného pojiva a katalyzátoru. Jako pojivo se používá směs fenolové pryskyřice a polyizokyanát a jako katalyzátor mlhovina aminu. U aplikace daných katalyzátorů je nutno dbát na bezpečnost a ekologickou likvidaci daných katalyzátorů.

Společnost Metaz a.s. disponuje vstřelovacím zařízením H16H - K pro Cold – Box technologii vstřelování jader od společnosti RÖPERWERK [12]:



Obrázek 3.5 Schéma vstřelovacího zařízení Cold Box

- |  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| 1. Násypka vibrátoru                         | 8. Nosné desky jaderníku / vyhřívané |
| 2. Vstřelovací pístová jednotka              | 9. Držáky                            |
| 3. Horní díl                                 | 10. Dolní polohovací zařízení        |
| 4. Vstřelovací hlava                         | 11. Kluzné lože                      |
| 5. Horní polohovací zařízení                 | 12. Spodní část se stolem            |
| 6. Horní vstřelovací systém                  | 13. Dolní vstřelovací systém         |
| 7. Uzavírací a rozevírací zařízení jaderníku | 14. Ochranný kryt                    |

### 3.6 Modelování a simulování procesů obecně [13]

Simulace patří do experimentálního procesu, který je založen na modelování. Modelování spočívá v náhradě zkoumaného systému modelem (opět systém, který znázorňuje originální systém), kdy se pomocí pokusů (simulací) na modelu získají informace o původním systému. Systém je množina prvků, které mají mezi sebou vazby za nějakým účelem. Důvodem modelování a následného simulování je snadnější, rychlejší a méně nákladné získání informací.

Jednoduché modely systémů, lze parametrizovat matematickými vztahy. V těchto vztazích vystupují parametry modelu jako proměnné a výsledky jsou stanoveny matematickou cestou.

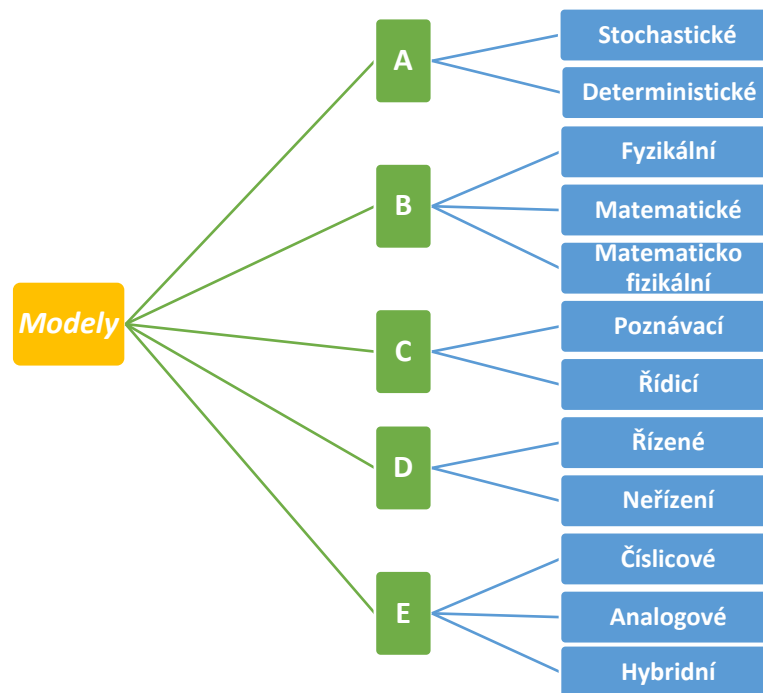
Složité systémy nelze matematicky parametrizovat ve všech aspektech, protože vlastnosti daného systému jsou příliš komplikované nebo jsou informace o systému neúplné, popřípadě systém vykazuje dynamické chování a vztahy prvků jsou složité. Při takové situaci se modelování uskutečňuje v několika etapách:

- I. Abstraktní model je vytvořen pomocí účelového a zjednodušeného popisu originálního systému
- II. Simulační model vzniká na základě abstraktního modelu formou algoritmizace a zápisem programovacího jazyka
- III. Simulování provádí pokusy na simulačním modelu, kdy je zapotřebí analyzovat chování systému na základě vstupních veličin a jejich konkrétních hodnotách. Simulace je založena na opakování, kdy se zkoumá vliv vstupních parametrů na chování systému, dokud se nezíská dostatečný objem informací nebo se nedosáhne požadovaného chování, které má originální model (systém).

Při vytváření simulačního modelu mohou vznikat chyby, které je potřeba odstranit verifikací simulačního modelu. Verifikací se zkontroluje, zda nedošlo k systematické chybě v programu či zda je použito vhodné numerické metody. Kontrola informací o originálním systému se nazývá validace modelu. Tímto ověřování validity se získává simulace správným a aktuálním modelem. Takže simulace je technika, která je založena na nahrazení dynamického systému modelem. Tento model je využíván k pokusům za účelem získání informací o původním dynamickém systému. Samotný simulační model vzniká dvěma způsoby, přičemž první způsob je fyzikální a druhý je matematický. V problematice slévání je úlohou modelování pomoci v otázkách: Dynamických vlastností systému, vlivu okrajových podmínek systému, optimalizace metalurgických či dalších systémů a jejich podmínek, doporučit optimalizaci rozměrů a dalších technických parametrů.

### 3.6.1 Členění modelů

Matematické a fyzikální modelování nejsou jedinými způsoby jak přehlížet k modelům systémů. Podle literatury [13] se vyskytují pro účely simulací tyto uvedené modely (obrázek 2.6). Softwary řešící problematiku slévárnství používají matematické modely v kombinaci se zvolenou výpočtovou metodou. Existuje mnoho způsobů jak modely hodnotit a členit. Schéma na obrázku 3.6 znázorňuje pro ilustraci způsoby dělení modelů



Obrázek 3.6 Dělení modelů [13]

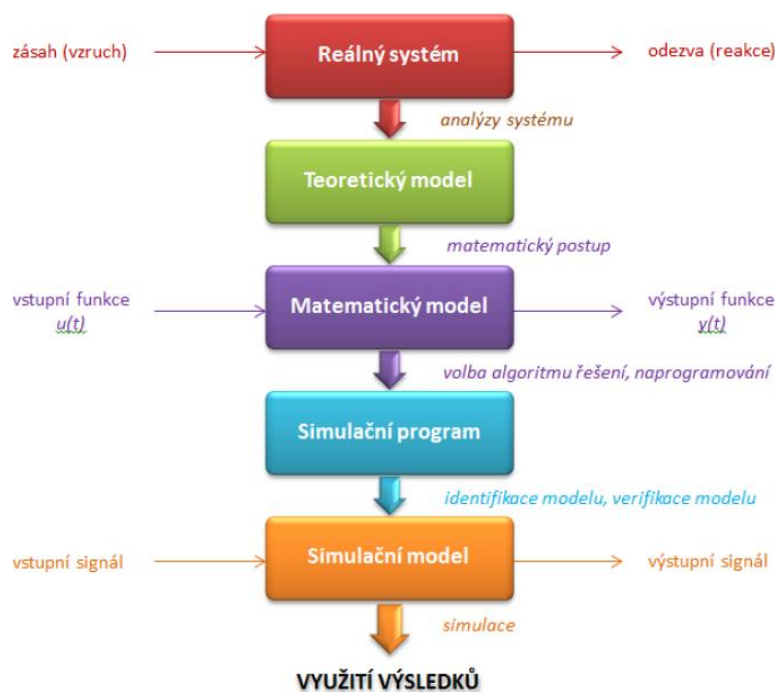
### 3.6.2 Matematické modelování

Matematické modelování obsahuje experimentálně statistické a analytické modely. Tento přístup staví na matematické podobnosti dvou rozdílných procesů. Jevy odlišné fyzikální povahy jsou matematicky shodné, pokud jsou definovány stejnými základními rovnicemi. Matematická podobnost udává úměru mezi korespondujícími si veličinami analogických jevů.

Matematický model je založen na abstraktním systému matematických vztahů, jež popisují zásadní vlastnosti původního systému. Matematický model tak obsahuje popis podstatných faktorů a vytváří vazby mezi prvky originálního systému. Při popisování originálního systému je nutno určit, které veličiny jsou relevantní a charakterizují jeho chování. Přiřazení vazeb modelu určité situaci nebo jevu se vytváří matematický model, který popisuje chování systému na změnu vstupu a jeho reakci na výstupu. Popis systému a jeho

jednoznačné přiřazení danému procesu nazýváme identifikací systému, kdy vytváříme model s požadavkem, aby odpovídal dané oblasti zkoumání a využívání.

V původních originálních systémech probíhají procesy, které jsou řízeny danými zákonitostmi (fyzikální, chemické, fyzikálně chemické). Tyto zákonitosti mají matematická vyjádření, která se využívají pro sestavení deterministického modelu. Pokud se podaří popsat a využít všech zákonitostí, tak se deterministický model stává složitým a jeho řešení není konečné. Ve skutečnosti se většinou nedosáhne úplného popisu zkoumaného modelu, protože dané informace prostě nejsou známy. Úplného popisu se taktéž nepoužívá v praxi z důvodu, že nepožadujeme zcela exaktní výsledky. Podstatné je vytvořeným modelem obsáhnout důležité chování systému, proto některé nepodstatné zákonitosti bývají zanedbávány a zjednodušovány. Důležitým kritériem vytvořeného modelu je souhlasné chování jako reálného popisovaného systému.



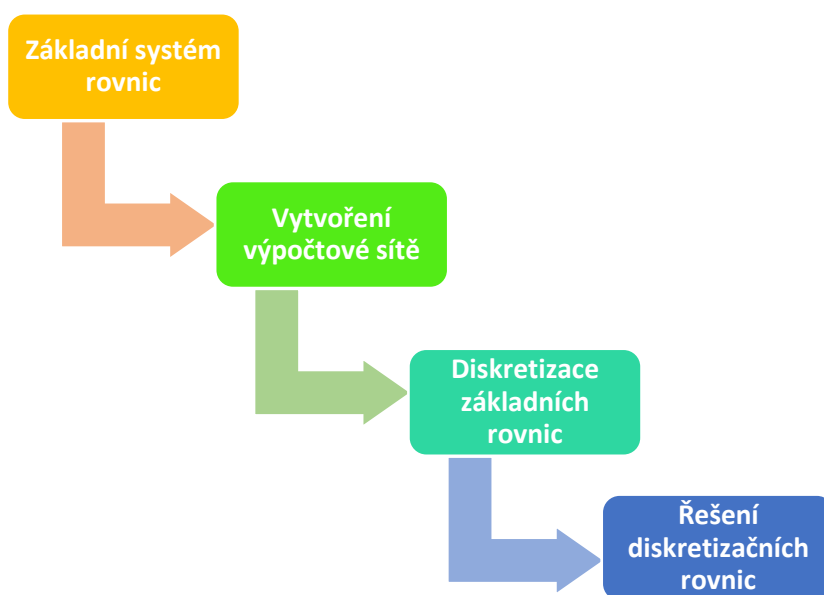
Obrázek 3.7 Schéma tvorby matematického modelu [13]

- Fáze tvorby teoretického modelu. Tento model neobsahuje veškeré vazby a necharakterizuje přesně skutečnost, je jednoduchý a přehledný.
- Fáze tvorby matematického modelu. Vytváří se matematicky popis procesu, kdy se vybírají matematické charakteristiky daných zákonitostí v teoretickém modelu. Vzniknou tak modelové rovnice, které se zjednodušují a matematicky upravují a stanovují se podmínky řešení. Tyto podmínky se určují pro dané rovnice a v případě diferenciálních rovnic se jedná o počáteční a okrajové podmínky řešení.

Modelové rovnice vycházejí ze zákonů fyziky, chemie, mechaniky tekutin a dalších zákonů charakterizující danou problematiku.

- Fáze tvorby simulačního programu. Tato fáze spočívá ve volbě metody řešení modelových rovnic a jejich zpracování danou metodou, čímž se vytvoří algoritmus řešení.
- Fáze simulačního modelu. Je to souhrn algoritmických řešení daného modelu, což je zkráceně program, který je možno využívat pro řešení. Aby byl program schopný provádět výpočty, musí se provést identifikace modelu, kdy jsou zadány vstupní hodnoty parametrů modelu. Následuje verifikace samotného řešení a analýza výsledků, pro ověření správnosti výsledků řešení v celém modelu a posouzení vhodnosti modelu pro daný účel.

Analytické metody řešení matematických výrazů získají výsledek dané proměnné jako funkci prostorových souřadnic a času. Řešení odpovídá podmínkám jednoznačnosti a dané rovnici. V technické praxi se matematický model zjednodušuje, aby byl systém řešitelný. Zjednodušení se musí provádět tak, aby byla zachována věrohodnost řešení.



Obrázek 3.8 Postup řešení konkrétního modelu [13]

Počáteční a okrajové podmínky jsou nedílnou součástí matematického modelu, kdy jejich počet je určen počtem diferenciálních rovnic a nejvyšší derivací dané rovnice. Získání těchto podmínek je pro některé případy patrné ze samotného zadání, jiné se musí získat složitějšími postupy.

Numerické metody zakládají na diskretizaci proměnných a díky tomuto principu lze tyto metody řešit pomocí výpočetní techniky. Řešením numerických metod se získá konečný počet diskrétních míst určité diferenční sítě nebo sítě konečných prvků. Numerické metody dělíme na:

- FDM – Finite Difference Method – metoda konečných diferencí
- FVM – Finite Volume Method – metoda konečných objemů
- FEM – Finite Element Method – metoda konečných prvků
- BEM – Boundary Element Method – metoda okrajových prvků

Pro účely slévárenských simulací se nejvíce užívá metody konečných diferencí FDM a metody konečných prvků FEM, které využívá i software Nova Flow & Solid.

### 3.6.3 Nova Flow & Solid

Simulační software Nova Flow & Solid svým poměrně přívětivým uživatelským rozhraním nabízí uživateli - technologovi užitečný nástroj pro podporu a racionalizaci slévárenských procesů. Prvním modul, se kterým uživatel přijde do styku, slouží pro import a úpravu 3D geometrie modelu většinou v přenosovém formátu \*.STL. Po úspěšném importu geometrie uživatel poměrně snadno vytvoří pomocí funkce MESH výpočtovou síť (uzly) pro výpočetní metodu konečných diferencí (FDM). Nově na místo výpočtové sítě se vytvářejí výpočetní objemové elementy, jež se aplikují na importované 3D data modelu odlitku, formy a dalších importovaných 3D dat. Výpočtové objemové elementy jsou nově užity pro výpočetní metodu konečných objemů (FVM). Tato metoda je v softwaru Nova Flow & Solid nazývána CVM – Control Volume Mesh. Po aplikaci Mesh – zasíťování nebo rozčlenění na objemové elementy importované geometrie, následuje volba technologie, která má být simulovaná a vyplnění příslušných počátečních a okrajových podmínek – parametrů technologie. Tento software umožňuje zanést do simulace tepelně izolační povlaky a zkoumat jejich vliv na lící procesu [14].

Nova Flow & Solid 6.0 nabízí simulace pro technologie [14]:

- Gravitační lití do pískových forem
- Gravitační lití do trvalých forem
- **Nízkotlaké lití**
- Vysokotlaké lití
- Lití metodou ztraceného vosku

- Lití spalitelného modelu
- Odstředivé lití
- Speciální technologie – tilt pouring a counter gravity casting

Nová verze tohoto software s použitím výpočetní metody interně nazývané CVM přináší nové možnosti z pohledu práce se softwarem. Pro většinu simulovaných technologií je snížen výpočetní čas o 10%. Během výpočtu je možno upravovat MESH – počet objemových elementů. Zvyšuje se výpočtová přesnost užitím této metody. Samotný proces MESHe se zjednodušil a zkrátil se jeho čas aplikace na 3D data. Díky metodě CVM lze simulovat pnutí jak v odlitku, tak i ve formě a jeho dopady na deformace odlitku [14].

Nova Flow & Solid obsahuje širokou databázi materiálů pro odlitky, ale také pro formy. V případě, že databáze neobsahuje potřebný materiál, není problém jej doplnit. Databáze materiálu obsahuje skupiny materiálů, jakou jsou litiny s lupínkovým a kuličkovým grafitem, oceli na odlitky, hliníkové, zinkové, hořčíkové slitiny a slitiny mědi. Systém může používat veškeré typy forem, exotermických materiálů, chladítek a sítok [14].

Nova Flow & Solid umožňuje simulovat vady odlitků. Simulované vady odlitku jako jsou: inkluze oxidu turbulentním prouděním, podchlazení taveniny, staženiny, porozita. Dané vady mohou být sekvenčně vizualizovány. Simulace vad zobrazují vhodnost návrhu vtoků a odvodušnění formy. Díky simulacím může být optimalizována vtoková soustava a odvodušnění formy pro dosažení lepších výsledků.

---

Možnosti u nové verze [14]:

- U litin je možné simulovat výslednou mikro strukturu a formu uhlíku – grafit / cementit.
- U litin s lupínkovým grafitem simulace umožňují predikovat smrštění grafitu a jeho důsledek na odlitek



## 4 Konstrukčně technologická příprava formy a jaderníku

Slévárenství potažmo odlitky zhotovuje díly, které jsou tvarově velmi složité a často jsou vystaveny velkému namáhání. Na odlitky je někdy nahlíženo skepticky jako na nespolehlivé, kvůli jejich vnitřním vadám, složité přípravě výroby a nutnosti zásahů do konstrukce výrobků, špatnou jakostí povrchu a přesnosti. V dnešní době technologie spolu s metalurgií a kvalitní příprava výroby umožňuje navrhnout taková řešení, která většině problémů předejde nebo je eliminuje na nejmenší možnou míru tak, aby vyhovovaly přání zákazníků.

### 4.1 Technologičnost konstrukce

Odlitky nabízejí možnost zhotovit výrobek, který složen z obecných vnějších a vnitřních ploch s určitým omezením. Toto omezení vychází z podmínek a je nutné stanovit priority jednotlivých podmínek ve vztahu slévárny a odběratele odlitků. Existuje mnoho slévárenských technologií, ale je nutno zvážit jejich aplikovatelnost na daný výrobek v zjednodušeném pohledu konstrukce odlitku, požadovaného materiálu, jakosti a požadovaného množství. Veškeré zvažované aspekty se promítnou do ekonomičnosti výroby, protože veškeré činnosti musí vést k požadované ziskovosti.

Materiál dmyhadlové skříně je slitina hliníku a ta patří k slitinám s „nižší teplotou tavení“ ve srovnání s litinami nebo ocelmi. Proto bývá často užíváno trvalých ocelových forem, ale v závislosti na sériovosti výroby. Lití do trvalých - ocelových forem poskytuje větší odvod tepla respektive větší rychlost tuhnutí v porovnání s netrvalými pískovými formami. Rychlejší odvod tepla vede k dosažení jemnější struktury materiálu, což se projeví na pevnostních vlastnostech odlitku. Výroba trvalé formy v porovnání s výrobou modelového zařízení pro netrvalé formy dosahuje vyšších nákladů. Vyšší výrobní náklady předurčují využití trvalých forem na větší série, kdy dojde k diverzifikaci nákladů mezi plánovanou sérií lití. Parametry, které vstupují pro volbu technologie lze zařadit:

- materiál, respektive žádaná slitina
- tvarová náročnost odlitku a složitost odlitku
- životnost formy v porovnání s plánovanou produkcí odlitku
- nároky tykající se jader
- dodatečné zpracování odlitku v kontextu jakosti nebo obrábění
- pro danou technologii způsoby automatizace
- doba výroby nástroje a jeho příprava spolu s licím zařízením

- samotná technologie a její energetická náročnost, hygiena práce, požadavky na odbornost obsluhy, nákladovost s produktivitou

#### **4.1.1 Problematika odlitků a nežádoucí jevy**

Technologie odlévání se odlišuje od jiných technologií ve způsobu tvorby produktu. V jiných technologiích se často pracuje s již vytvořeným polotovarem - materiálem, který se dále zpracovává dalšími technologiemi. Oproti tomu odlitky vznikají tak, že struktura materiálu a tvar odlitku se vytvářejí najednou v určitém časovém úseku, kdy v naprosté většině případů není možnost do tohoto děje zasahovat. Do kvality odlitku zasahuje konstrukce samotného odlitku, která se projeví v modelovém zařízení respektive na tvaru trvalé formy, důležitý je také stav těchto nástrojů. Důležitým stránkami technologičnosti jsou vlastnosti dané slitiny a formovacích směsí pro jádra a jejich vzájemná interakce. Zanedbání nebo neznalost těchto záležitostí vede k zhoršení jakosti či vzniku nepřijatelných vad odlitku. Slévárny by měly takovýmto stavům předcházet důkladnou přípravou výroby a průběžně kontrolovat samotnou výrobu a její důležité fáze obzvlášť. Výpočetní technika dnes nabízí mnoho vhodných nástrojů, které lze uplatňovat v přípravě výroby pro predikci možných vad ve zvoleném řešení a na základě odhaleného problému dané řešení upravit nebo otestovat a zvolit jinou variantu řešení. Veškeré úpravy konstrukce výrobku – odlitku z pohledu technologie je nutno ze strany slévárny konzultovat se zákazníkem i výběr materiálu je nutno prodiskutovat, protože nároky zákazníka nemusejí korespondovat s cílenými požadavky na odlitek a slévárna často disponuje zkušenostmi a může zákazníkovi poradit. Tímto přístupem se pomáhá zabránit mnoha budoucím problémům, které jsou pro obě dvě strany nežádoucí, avšak zamezit úplnému výskytu nelze. Problémy, které se mohou vyskytnout z pohledu konstrukce, technologie či jiných zdrojů [25]:

- Změny tloušťky stěn odlitku se projevují v nestejném tuhnutí a následném chladnutí. Dalším projevem změny tloušťky stěn je rozdílná struktura materiálu, pnutí, které se může projevit deformacemi.
- Velká tloušťka stěn odlitku doprovází pomalé chladnutí, jež přispívá k vytvoření hrubozrnné struktury a odmíšenin. To vede ke snížení mechanických vlastností v průřezu dané tloušťky. Tento problém se může projevit při obrábění odlitku.

- Uvažovaný stejný odlitek z té samé slitiny, odlitý různými technologiemi nikdy nebude mít totožné vlastnosti. Tento fakt je třeba mít na paměti při změnách technologie slévání.
- Hodnoty v materiálových listech a v normách jsou vytvářeny na vzorcích, které mají standardizované parametry a byly vytvořeny ověřeným způsobem. Odlitky nejsou vytvářeny stejnými způsoby jako zkušební vzorky, což vede k rozdílům a odchylkám od normovaných hodnot a hodnot uváděných v materiálových listech.
- Tepelným zpracováním lze docílit zlepšení struktury materiálu odlitku a tím mechanické vlastnosti. Ovšem tepelné zpracování nelze aplikovat na všechny slitiny. Podmínkou pro tepelné zpracování je vznik přesycených tuhých roztoků, ale výchozí struktura materiálu nesmí vykazovat rozrušení například jako litina s lupínkovým grafitem. Grafit ve formě lupínků rozruší výchozí strukturu, že následné tepelné zpracování sice lze provést, ale jeho účinek je eliminován právě lupínky grafitu.
- Úpravami konstrukce odlitku podle požadavků technologie lze omezit na minimum výskyt vnitřních vad, jako jsou staženiny a porezita popřípadě další vady. Dosazovací schopnosti nálitků a vhodné odvzdušnění formy je nutno mít také na mysli při konstrukci odlitku respektive formy či modelového zařízení.
- Jedna z vlastností slitin, která významně ovlivňuje technologičnost konstrukce je její smrštění materiálu. Smrštění má negativní vliv, musí být kompenzováno a využívat příslušná řešení, které nabízí daní technologie například nálitkování, dotlaky či působení jiných fyzikálních sil. Smrštění každé slitiny je rozdílné a výběr vhodné slitiny z tohoto pohledu do značné míry ovlivňuje konstrukci odlitku. Výběr vhodné slitiny musí také korespondovat s mechanickými požadavky odlitku.
- Zabíhavost slitiny hraje důležitou roli pro tenkostěnné odlitky, kdy nejvýhodnější bývá pro eutektické slitiny. Není vhodné vytvářet tenkostěnné velké souvislé plochy vyskytující se na odlitku.
- Výsledné řešení technologičnosti odlitku má klást minimální nároky na další zpracování odlitku z pohledu obrábění, kvůli přesnosti odlitku. A tím důkladněji u odlitku, jejichž slitina je pevná a tvrdá.

#### 4.1.2 Výběr materiálu odlitku

Výběr vhodného materiálu odlitku je jedním z klíčových faktorů ovlivňující splnění požadavků od daného produktu, ale také jeho ekonomickou náročnost. Vhodný materiál musí splňovat mnoho kritérií, kdy přínosy zvoleného materiálu uspokojí většinu požadavků.

##### **Mechanické vlastnosti**

Mechanické vlastnosti daného materiálu se liší od uváděných hodnot v normách a materiálových listech, protože u odlitku sehrává výraznou roli vliv technologie – metalurgie, podmínky lití a chladnutí odlitku, tepelné zpracování odlitku. Pevnostní charakteristiky určuje průřez materiálu a tepelné pole formy. Vyšších pevnostních charakteristik dosahují tenkostěnné odlitky lité do trvalé formy než silnostěnné odlitky, kdy je odvod tepla v ocelové formě větší. Ovšem rychlé chladnutí v menších průřezech stěn odlitku a pomalejší chladnutí ve větších průřezech stěn vede k rozdílnému smršťování a tak ke vzniku vnitřních pnutí [25].

Pro prvotní výběr materiálu lze použít kombinaci materiálových vlastností z pohledu namáhání a to mez pevnosti, mez kluzu a tažnost. Tento pohled nám vytyčí určitou sortu slitin, kterou je třeba dále podrobit určitému hodnocení a to zda je možno z vybrané slitiny odlít danou technologií požadovaný odlitek. Splňuje - li slitina další speciální požadavky a je daná slitina ekonomicky přípustná, tak se jedná o vhodnou volbu materiálu [25].

##### **Mechanické vlastnosti za zvýšených teplot**

Tyto charakteristiky bývají někdy uváděny pro některé materiály. Ovšem je důležité, zda hodnoty byly zjišťovány za krátkodobých zkoušek nebo při dlouhodobých zkouškách. Hodnoty získané krátkodobými zkouškami nelze aplikovat při návrhu odlitku vystaveného namáhání za zvýšených teplot po dlouhý časový úsek. Při těchto podmínkách dochází k tečení materiálu takzvanému creepu. K hodnocení vlastností materiálu za zvýšených teplot se nejčastěji používají dvě creepové charakteristiky a popřípadě další [25]:

- Mez pevnosti při tečení (nastalo tečení a dojde k lomu materiálu)
- Mez tečení (napětí, které při zvýšené teplotě způsobí deformaci – začátek creepu)
- Růst (změny krystalických mřížek a tepelná roztažnost)
- Okujení (oxidace povrchu materiálu)

### Fyzikální vlastnosti

Speciální požadavky na materiál popisují fyzikální vlastnosti materiálu. Nebývají často blíže uváděny v normách nebo materiálových listech a je potřeba některé vlastnosti dohledávat zvlášť. Hlavní fyzikální parametry slitin [25]:

- **Měrná hustota** slitiny není konstantní, ale ovlivňuje ji několik parametrů a to: Chemické složení, čistota, lící teplota a následné chladnutí. Další vliv má odměšování, porozita, staženiny, bubliny, tepelné zpracování a fázové přeměny.
- **Modul pružnosti** v případě slitin odlitků závisí na celistvosti struktury odlitku a méně závisí na odchylkách chemického složení slitiny. Modul pružnosti je spojen s tuhostí odlitku, ale také určuje velikost vnitřních pnutí a deformace při změnách teploty. Tepelně exponované díly bývají z materiálu, který mívá menší modul pružnosti, protože pnutí způsobené změnou teploty má menší hodnotu.
- **Součinitel tepelné roztažnosti**. Tuto fyzikální vlastnost materiálu lze do jisté míry ovlivňovat chemickým složením. Teplotní roztažnost materiálu má vliv na vnitřní pnutí materiálu, což může být problém u pevných spojení v prostředí s proměnlivou teplotou. Materiály odpovídají na proměnlivou teplotu změnou rozměru. Montované sestavy z dílu rozličných materiálu by měli korespondovat svojí teplotní roztažností, aby nedocházelo k problémům vycházejícím z rozdílné tepelné roztažnosti.
- **Součinitel tepelné vodivosti + měrná tepelná kapacita** spolu s hustotou vytvářejí součinitel tepelné vodivosti, který popisuje teplotní pole odlitku. Je-li hodnota součinitele tepelné vodivosti vyšší, tak teplotní gradient je nižší. V důsledku nižších teplotních gradientů klesají vnitřní pnutí od tepelného namáhání odlitku.
- **Tlumení** se rozumí schopnost materiálu pohlcovat energii pružných deformací. Je to poměrová logaritmická charakteristika amplitud kmitů. Větší hodnota tohoto součinitele znamená lepší schopnost materiálu tlumit kmity a tato schopnost se projevuje u heterogenních struktur materiálu.

### Technologické vlastnosti

Technologické vlastnosti z pohledu slévání se označují komplexně jako slévatelnost. Slévatelností se popisuje vhodnost chování slitin při tavně, lití, tuhnutí a chladnutí. Slitiny mají rozmanitou slévatelnost, kdy jeden typ slitiny je pro konkrétní druh lití problémový, druhý typ slitin nemusí způsobovat větší potíže a tak předchází náročným opatřením. Jelikož odlitím odlitku vznikne ve většině případu polotovár pro další zpracování, musí se

technologické vlastnosti hodnotit i podle dalšího zpracování. Výběr vhodného materiálu představuje kompromis často protichůdných požadavků. Pro první přiblížení, jak vybrat správný materiál, lze sestavit nároky technologické, technické a ekonomické [25]:

- Tavitelnost, metalurgická náročnost a lící teploty
- Zabíhavost a možnosti lití tenkostěnných a složitých odlitků
- Stahování, potřeba nálitkování a využití kovu
- Smršťování, sklon ke vzniku trhlin a vnitřních pnutí
- Náročnost čištění odlitku
- Tepelné zpracování
- Obrobitelnost a přídavky na obrábění
- Svařitelnost
- Náklady na kov
- Náklady na zpracování
- Cena odlitku
- Odolnosti proti opotřebení
- Odolnost proti rázům,
- Odolnost proti korozi
- Vhodnost aplikace do vysokých teplot

#### **4.1.3 Dimenzování odlitku dle namáhání**

##### **Statické zatížení**

Konstrukce odlitku a jeho úprava geometrie odpovídá provoznímu zatížení. Exponovaná místa jsou zesílena a naopak místa bez větších zatížení se zeslabují. Tímto postupem lze zvyšovat využití materiálu. Pro snižování tahových napětí při zatížení odlitku v korespondenci s konstrukcí je na místě využívat nesymetrických profilů, zesílených v exponovaných místech tahem. Konstrukce odlitku, která má mít co nejvyšší pevnost z pohledu ohybového namáhání, tak volba profilu průřezu má co nejvyšší průřezový modul v ohybu  $W_o$ . Vysoké tuhosti odlitku odpovídá hodnota momentu setrvačnosti  $I$ , která by měla být co nejvyšší. Úpravy konstrukce odlitku nabízejí volnost řešení, kdy není limitace na pevný tvar odlitku, plynulé napojení tvarů - profilů (stěn) a lokální změna tloušťek stěn. Veškeré tyto úpravy konstrukce odpovídají předpokládání zvýšení intenzitě napětí [25].

### **Bezpečné a dovolené namáhání**

Bezpečné namáhání není odvozováno od hodnoty pevnosti materiálu, která je uvedena v normě. Výsledná pevnost a tedy bezpečné namáhání udává historie procesu výroby (jeho parametrů) a ta se skládá z volby materiálu, způsobu lití, rychlosti chladnutí, zušlechťování a zpracování odlitku. Ve výsledku se proces výroby promítne do meze pevnosti, meze kluzu, meze únavy a meze tečení. Na základě těchto parametrů se určí součinitel bezpečnosti  $k$  - pro dovolené bezpečné namáhání. Hodnoty součinitele bezpečnosti mají běžné rozpětí hodnot 1,3 – 3. Pokud jsou nároky na bezpečnost odlitků větší, tak tomu bude odpovídat i velikost součinitele bezpečnosti [25].

### **Tuhost odlitku**

Při provozním zatížení, které má většinou cyklický charakter, nehrozí velká deformace popřípadě lomové porušení, je požadována tuhost odlitku. Provozní napětí má způsobovat minimální deformace. Odlitky ve většině případů jsou vystavovány namáhání na ohyb či krut. Odlitky vystavované ohybovému namáhání by měli být co nejkratší a příčné rozměry co největší, jak je jen umožňuje konstrukce. Druhořadým aspektem jsou modul pružnosti a tloušťka stěn. Ohybu nejlépe odolávají profily, které mají rozloženou hmotu dále od neutrální osy. Namáhání krutem u profilů s plným průřezem se dosahuje větší odolnosti, a čím je příčný rozměr větší, tím lépe. Mezi přídavné konstrukční prvky, které zvyšují tuhost, patří žebrování popřípadě klenby. Z pohledu hospodárnosti a dostatečné tuhosti se využívají duté profily s vyztužením, popřípadě s žebry, které zlepšují rozložení napětí. Ovšem je nutné mít na paměti, že dané vyztuhy a žebra zapříčiňují vznik trhlin při tuhnutí odlitku [25].

### **Odolnost odlitku proti rázovému zatížení**

Rázové namáhání zapříčiňuje křehké porušení materiálu, kterému se předchází dimenzování a toto konstrukční řešení není optimální. Problematické je určit skutečné rázové namáhání a zanést jej do výpočtů. Nalezení materiálu, který je kompromisem mezi houževnatostí a pevnostními charakteristikami je hlavním předmětem pro výběr slitiny. Houževnaté materiály se zpravidla při rázovém namáhání nepoškozují křehce, ale deformují se. Zkouška rázem v ohybu ve výsledku udává houževnatost daného materiálu, ale neexistují přímé vztahy, které by s touto hodnotou pracovaly při dimenzování odlitku. Houževnatost obsáhne součinitel bezpečnosti, který bere v potaz, zda se materiál poškozují křehce a vady struktury. Účinek dynamických sil na danou součást může být

posuzován podle energie, kterou součást – odlitek může pojmout, aby nedošlo k jeho poškození. Na základě energetických rozborů lze učinit jisté závěry [25]:

- Materiály s vysokou mezí kluzu snášejí rázové namáhání lépe.
- Namáhán by měl být co největší objem a to maximálním dovoleným napětím materiálu. Namáhání rozložit nejlépe do celé konstrukce, což není vždy možné
- Uzpůsobení geometrie konstrukce tak, aby se příčný průřez měnil s požadavkem na maximální dovolené napětí v krajních vláknech.
- Eliminace co největšího počtu vrubů (otvory, zářezy, změny průřezů, svary a vady)
- Používání vhodného uložení, které pomáhá tlumit rázy.

### Únava materiálu odlitku

Únavovou odolnost materiálu ovlivňuje technologie slévání, při níž vzniká struktura a její vady. Strukturu materiálu ovlivňuje jeho čistota a následné tepelné zpracování. Vady materiálu snižující únavovou odolnost jsou nehomogenita, vměstky, poruchy souvislosti, odlišnost strukturních složek a další. Pro dimenzování a navrhování odlitku se využívá Wöhlerových křivek popřípadě Smithových diagramů. V případě odlitku však tyto podklady nejsou často k dispozici a jejich použití je pouze pro hrubé přiblížení. Vzorok, které posloužily pro tvorbu daných podkladů, vznikly za vhodných podmínek. Další aspekty zasahující do únavové odolnosti jsou [25]:

- vruby
- schopnost tlumení kmitů amplitudy napětí
- stav povrchu odlitku
- stav povrchu ve vztahu k pevnosti materiálu
- průběh napětí v součásti

#### 4.1.4 Konstrukce odlitku a formy

Lití do trvalých forem nachází uplatnění pro menší odlitky z materiálu s nízkými teplotami tavení, jako jsou **slitiny Al**, Mg, Zn, Sn, Pb. Složitost odlitku a nároky na jádra určují nákladovou náročnost, což určuje vhodnost lití do trvalých forem pro série čítající alespoň jednotky tisíc kusů, pro materiály s nízkou teplotou tavení. Životnost formy může u těchto materiálů dosahovat sériovost až 500 000. Návrh odlitku a následné formy pro slévání má své specifika a řídí se následujícími fakty pro dosažení nejlepšího výstupu [25]:

- Volba dělicí roviny má nabídnout snadné vyndání ztuhlého odlitku. Dělení formy volit pokud je to možné ve formě jedné roviny, ale ne vždy je to možné. Odlitky



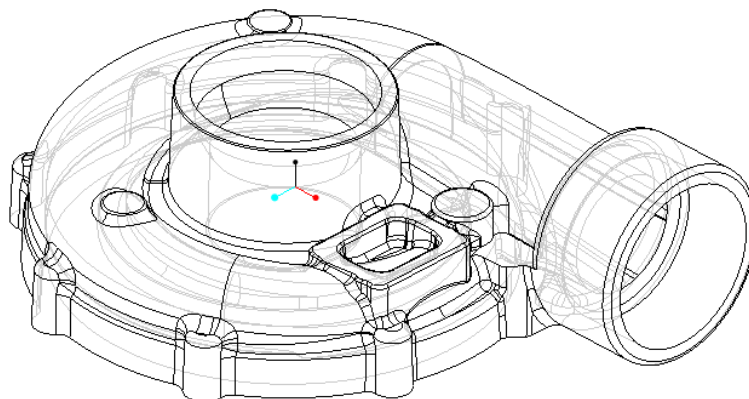
složitějších tvarů rozdělit na několik částí a následně tyto části spojit pomocí jiného řešení.

- Odlitek a jeho tvar má vést k využití co nejmenšího počtu volných částí.
- Rozměrný odlitek se promítne do velikosti formy, kdy s velkými rozměry forem rostou nároky na manipulaci a také roste čas pro zaplnění dutiny formy.
- Odlitek na vnějších stěnách má být s nejmenším možným počtem výstupků a prohlubní, které zapříčiňují vady a brání smršťování. Pokud to konstrukce a tvar umožňují, je lepší umístit žebra dovnitř odlitku pomocí jádra.
- Vnitřní tvary a dutiny se vytvářejí pomocí trvalých nebo netrvalých jader, kdy je potřeba vhodně zvolit jejich zakládání a také promyslet jejich odstranění z odlitku. Pokud tvar odlitku umožňuje použít trvalá jádra pro slitiny s nižší teplotou tavení, tak se tím zlepší kvalita povrchu, pracnost a těsnost odlitku.
- Trvalá – kovová jádra mají být co nejjednodušší s rovnou osou a dostatečný úkos. V případě, kdy je trvalé jádro složeno z několika částí, vzrůstá pracnost a riziko vzniku zateklin.
- Tloušťky stěn odlitku mají být pokud možno co nejrovnoměrnější, plynulé přechody mezi rozdílnými tloušťkami a co možná největší zaradiusování hran a přechodů.
- Přechod tloušťky stěny větší jak 20% nutno vytvořit plynulým přechodem s úkosem minimálně 1:4.
- Vodorovné plochy odlitku nutno eliminovat co nejvíce, protože takové místa vedou ke vzniku vad, jako jsou bubliny, vměstky a zavaleniny.
- Ostré hrany odlitku špatně zabíhají. Tento problém se řeší vhodným zaoblením, které předchází také zachytávání bublin. Špatné zaoblení ovšem komplikuje výrobu samotné formy a také mohou vést u dělicí roviny ke vzniku přesazenin a zateklin. Tenkostěnné odlitky pro použití vhodného zaoblení využívají zesílení pomocí lemu. Při napojení dvou stěn by poloměr zaoblení  $r$  měl vycházet ze vztahu  $r = 0,5 * (s_1 + s_2)$ , kde  $s_1$  a  $s_2$  představují tloušťky stěn.
- Předlévané otvory a jejich velikost se liší podle typu slitiny odlitku. U hliníkových slitin se předlévají otvory a dutiny od průměru  $d = 8 - 12 \text{ mm}$  a mezní délka  $l$  je od  $l = 6 * d$ .
- Úkosity a jejich velikost ovlivňuje typ slitiny odlitku, ale v zásadě, lze určit, že vnější úkosity se volí v rozmezí  $0,5^\circ - 10^\circ$  a vnitřní úkosity se pohybují v rozmezí  $1,5^\circ$

- 20°. Dolní hranice v praxi zapříčiňují špatné vyjímání odlitků z formy. Některé odlitky, ve speciálních případech a požadavcích zákazníka je možno lít i bez úkosů.
- Orientace funkčních ploch ve formě má být soustředěna do jedné její části a dalším požadavkem na funkční plochy odlitku a provedení formy je umístění dělicí roviny, nálitků, vtoků a vyhazovačů co nejdále od těchto funkčních ploch.
  - Při lití do trvalých forem je možné zalévat vložky, které v odlitku zajišťují speciální požadavky (pístní kroužky, výztuže, čepy) na odlitek jako celku.
  - U odlitků litých do trvalých forem při dodržení výrobního postupu a veškerých podmínek dosahují odlitky stupně přesnosti až 1. i 2. podle normy ČSN 01 4470. Přesnost odlitku je dána přesností formy, která je ovlivňována faktory jako přesnost výroby obrábění, spasování formy, nečistoty v dělicích rovinách, tloušťky a druhy povlaků, teplota přehřátí a provozní teplota formy, teplota vyjímání odlitku a opotřebení formy. Na základě těchto se odvíjí volba přídatku na obrábění, kdy u neželezných slitin může být volen přídatek menší jak 1mm, ale jeho volba je ovlivňována charakteristickým rozměrem odlitku.
  - Lití do trvalých – ocelových forem ovlivňuje značně výslednou strukturu materiálu odlitku. To je zapříčiněno poměrně rychlým odvodem tepla. Výběr materiálu, výsledné chemické složení a specifické vlastnosti nelze požadovat podle norem a je nutno se dohodnout se zákazníkem na kompromisu.

## 4.2 Technologická a konstrukční příprava formy

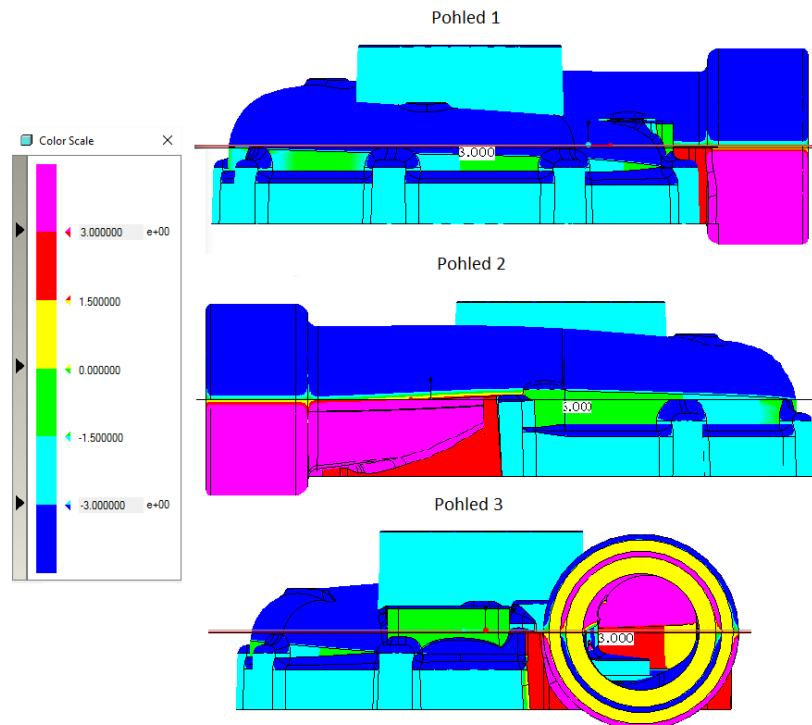
Na základě uzavření smlouvy mezi slévárnou Metaz Týnec a.s. a zákazníkem, jejímž obsahem bylo poskytnutí 3D modelu 1:1 dmychadlové skříňe, mohly započít přípravné konstrukční práce. Jak již bylo zmíněno, dmychadlová skříň se bude odlévat technologií nízkotlakého lití, kvůli své tloušťce stěn a faktem, že další technologii vhodnou pro lití takového typu odlitku slévárna nedisponuje. Mezi další faktory vhodnosti této technologie patří sériovost výroby 5 000 kusů a také, že zákazník požaduje výrobu nízkotlaké formy, která se stane jeho majetkem, na které proběhne v rámci smlouvy lití.



Obrázek 4.1 Drátový model přijatých 3D dat

#### 4.2.1 Analýza 3D modelu a jeho úpravy pro tvorbu formy

Veškeré činnosti týkající se kontroly a modifikace geometrie 3D dat, proběhly v CAD softwaru PTC Pro/ENGINEER Wildfire 4.0. Přijatá 3D od zákazníka bylo nutno importovat a ověřit, zda jsou kompletní a nedošlo k jejich poškození. 3D data byly uloženy v přenosovém formátu \*. STL. Import 3D dat, jejich následná analýza neodhalila žádný problém a mohlo se přejít k uložení dat do nativního formátu CAD softwaru Pro/ENGINEER. Pomocí analýzy úkosů 3D dat (obrázek 4.2) se vycházelo pro návrh dělicí roviny. Nedostatečné úkosy a zaoblení v oblasti hrdla se dodělaly podle požadavků na vyjímání odlitku z formy a dané úpravy byly odeslány ke schválení zákaznickovy. Ten dané modifikace akceptoval.



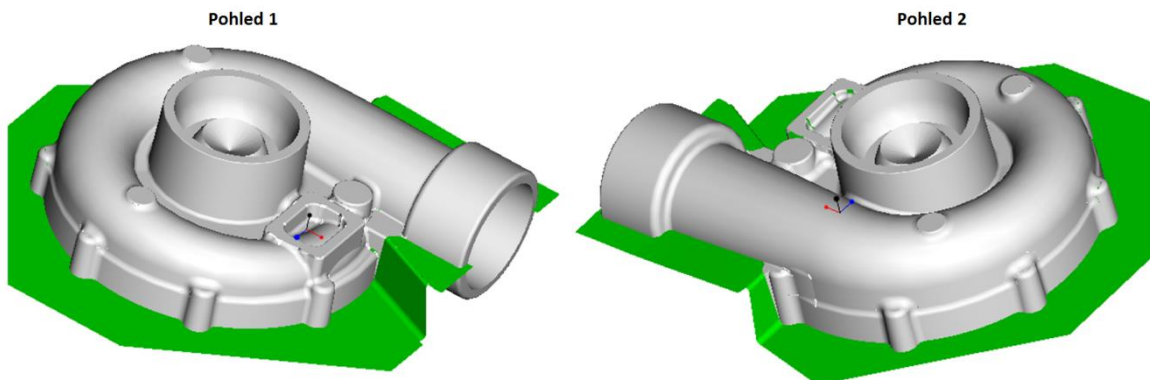
Obrázek 4.2 Analýza původních úkosů

#### 4.2.2 Návrh formy

Dělicí plocha odlitku v tomto případě nebyla vytvořena v jedné rovině. Vytvořené dělení vychází z válcové oblasti hrdla, kdy koresponduje s horizontálními kvadranty dané válcové oblasti. Toto dělení vede podle zesílení pro následný otvor (obrázek 4.3 - pohled 2), kde je dělení sníženo po spodní hranu odlitku. Pohled 1 na obrázku 4.3 ukazuje, kudy povede dělení na druhé straně, aby dělicí plocha opět vedla ke spodní hraně odlitku. Po provedené analýze se přešlo k návrhu dané dělicí plochy, vytvoření úkosů v oblasti hrdla a také bylo nutné dané 3D model odlitku zvětšit o smrštění dané slitiny. Objemové smrštění dle zvyklostí slévárny bylo zvoleno 0,7 %

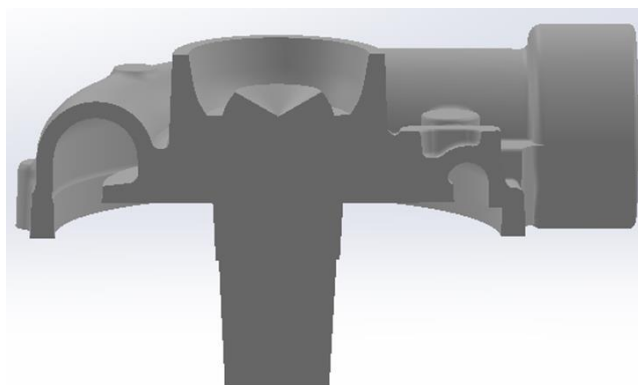
Dalším krok spočíval ve vymodelování vtoku. Vtok odlitku byl určen ze spodu hlavním axiálním směrem odlitku. Rozměry vtoku jsou určeny především použitým vtokovým pouzdem. Do výběru vtokového pouzdra zasahuje rozměr formy, který je odstupňován rámy licího stolu a počtem pozic odlitků ve formě. Takže do výběru vtokového pouzdra zasáhl půdorysný rozměr formy 520 x 340 mm a fakt, že forma pro nízkotlaké lití bude obsahovat dvě pozice odlitků. Na konkrétním tvaru vtoku se podepsala takové volba středního jádra, průduchů a odvzdušení.

Návrhy ostatních prvků (počet a umístění vyhazovačů a odvzdušnění) potřebných k tvorbě modelu formy obsahuje postupový výkres, který ovšem není v digitální podobě a není ani oficiálním dokumentem. Slouží pouze jako informativní podklad pro 3D návrh formy.



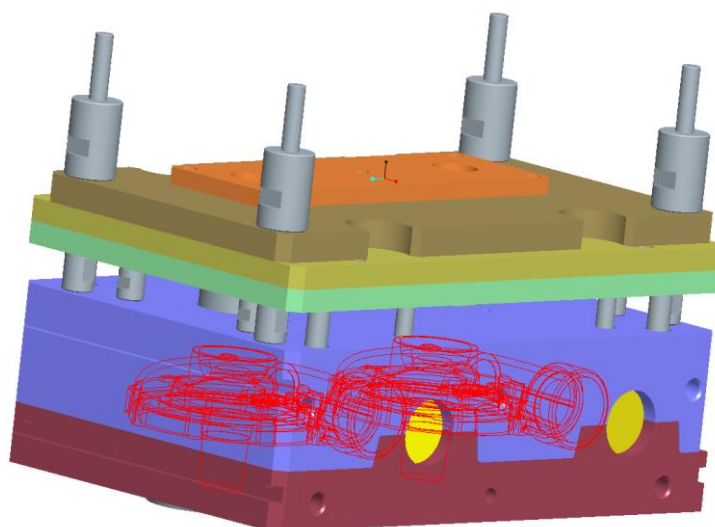
Obrázek 4.3 Dělicí rovina odlitku

Obrázek 4.3 znázorňuje, kudy vede dělení pro návrh formy s odsazením kolem válcového hrdla skříně. Obrázek 4.4 zobrazuje řez odlitkem, kde je vidět vytvořený vtok, který koresponduje se zvolenými vtokovými pouzdry.



Obrázek 4.4 Řez odlitkem se vtokem

Po vytvoření a ověření 3D dat odlitku s dělicí plochou mohlo být přistoupeno k tvorbě samotné formy. Důvodem proč je kladen velký důraz na bezchybnost 3D dat odlitku včetně všech technologických aspektů je fakt, že model formy je vytvářen v CAD softwaru jako solid (objemové modelování). A protože se jedná o solid tak pomocí booleovských operací s objemy těles v 3D sestavách vytváříme model formy, který je výstupem jak pro výkresovou dokumentaci, tak CAM podporu výroby formy obráběním a také pro simulace procesu slévání.



Obrázek 4.5 Kompletní sestava formy

Obrázek 4.5 zobrazuje kompletní sestavu formy včetně všech vyhazovačů, dorazů, tahačů a jader, kterým bude věnována pozornost dále. Výkres sestavy s pozicemi jednotlivých částí bude uveden pouze v příloze na CD z důvodu ochrany da zákazníka. Jak již bylo zmíněno výše tyto 3D data formy poslouží k dalším účelům.

#### 4.2.3 Volba materiálu formy

Ve smlouvě se zákazníkem byl zvolen materiál náradí - formy, který měl hlavní kritérium co nejnižší možnou cenu a s danou volbou materiálu zákazník souhlasil. Pro tento účel byl zvolen materiál formy dle normy ČSN EN S355J0 (ČNS 11 523). Tento materiál je jemnozrnná nelegovaná konstrukční ocel vhodná pro svařování. Mezi vlastnosti této oceli patří z pohledu výroby formy dobrá obrobitelnost. Obrobitelnost materiálu ovlivňuje náklady výroby trvanlivostí nástrojů a časem nutným pro zhotovení formy.

Tabulka 4.1 Chemické složení materiálu dle EN ČSN S355J0 [26]

|         | C    | Mn   | Si   | P     | S     | N     |
|---------|------|------|------|-------|-------|-------|
| Min [%] | 0,20 | -    | -    | -     | -     | -     |
| Max [%] | 0,20 | 1,60 | 0,55 | 0,030 | 0,030 | 0,012 |

Mechanické vlastnosti [26]:

- Smluvní mez kluzu  $R_{p0,2} = 355 \text{ MPa}$
- Mez pevnosti  $R_m = 520 - 628 \text{ MPa}$
- Tažnost  $A \geq 20 \%$
- Tvrdost dle Brinella 274

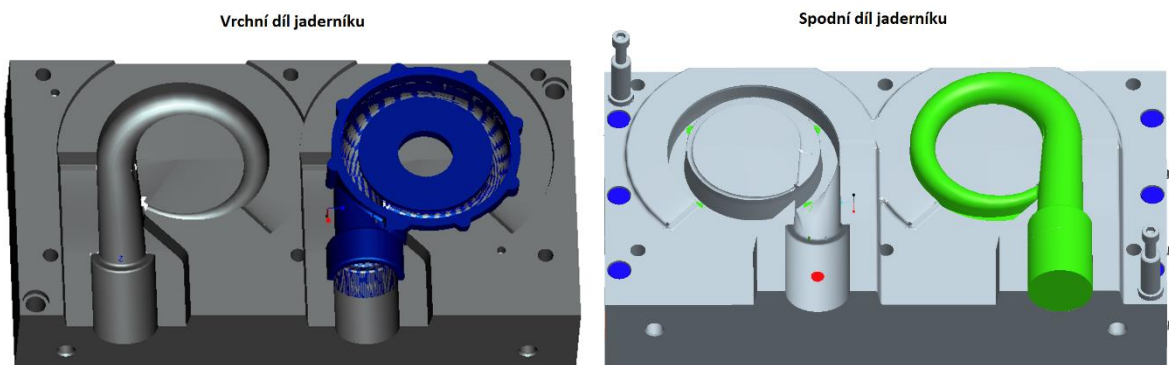
## Tepelné zpracování materiálu S355J0

Tabulka 4.2 Tepelné zpracování oceli S355J0

| Typ tepelného zpracování | Teplota ohřátí [°C] | Způsob ochlazování    |
|--------------------------|---------------------|-----------------------|
| Normalizační žihání      | 870 – 900           | Ochlazovat na vzduchu |
| Žihání na měkko          | 680 – 710           | Ochlazovat v peci     |
| Žihání ke snížení pnutí  | 600 – 650           | Ochlazovat v peci     |
| Popouštění               | 670 – 700           | Ochlazovat na vzduchu |

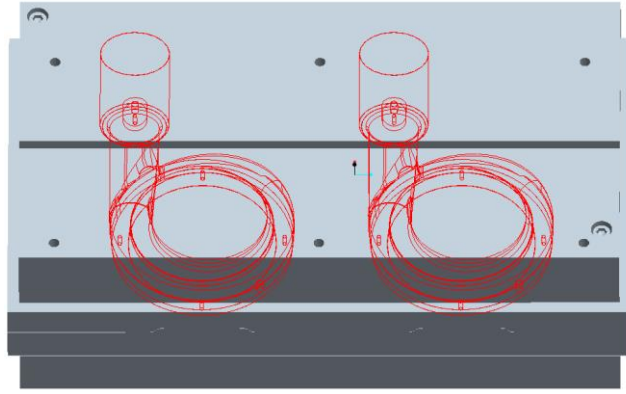
### 4.2.4 Návrh jaderníku

Pro návrh jaderníku se využily již zkontrolované 3D data odlitku dmychadlové skříně. Zde se projevuje opravdová důležitost bezchybného 3D modelu odlitku, kdy pomocí jednoho 3D modelu se vytvářejí další a další sestavy pro výrobu potřebných komponent. Návrh jaderníku spočívá ve zkopírování tvaru vnitřní dutiny odlitku, který je reprezentován na obrázku 4.6 modrou barvou.



Obrázek 4.6 Vrchní a spodní díl jaderníku

Jak ukazuje obrázek 5.6, návrh jaderníku obsahuje dvě pozice pro vstřelování jader. Při konstrukci jaderníku je třeba zvážit možnosti pracovního prostoru vstřelovacího stroje, jeho vytížení a spotřebu jader při lití. Jaderník musí také obsahovat odvodušnění pro únik vzduchu při vstřelení směsi do dutiny jaderníku. V tomto případě vytvářejí odvodušnění dutiny a sítky v horní části jaderníku. Model odlitku dmychadlové skříně musel být modifikován, aby kompenzoval smrštění jádra. To znamená, že model musel být proporcionálně zvětšen o 1,1 %. Spodní část jaderníku vytváří známku jádra a také obsahuje vyhazovače pro uvolnění vstřeleného a vytvrzeného jádra. Samotné jádro je také vymodelováno ve 3D pro účely simulací a pro CAM přípravu výroby. Obráběním se získá maketa jádra a spolu s podložkou se daným postupem vyrábí jaderník, jehož postup výroby bude popsán dále.



*Obrázek 4.7 Sestava jaderníku*

Výkresová sestava jaderníku bude uvedena v příloze pouze na CD s daným seznamem součástí v kusovníku. Konstrukčně technologická příprava výroby je zodpovědná a v některých aspektech velmi náročná činnost, která ovlivňuje náklady a termín dodávek odlitků. Což poukazuje, že by neměla být podceňována a měla by ji být věnována potřebná pečlivost a čas.



## 5 Výroba náradí a příprava formy pro zkušební sérii

Tato kapitola obsahuje popis výroby formy a jaderníku. Následuje příprava formy pro lití zkušební série a simulace licího procesu. Výsledky zkušební série a příslušných simulací jsou v této kapitole také uvedeny včetně metalografické zkoušky.

### 5.1 Výroba jaderníku

Jaderníky a jejich dutiny se ve firmě zhotovují z pryskyřice. Tento způsob výroby se osvědčil ohledně životnosti jaderníku. Ostatní materiály se neosvědčily, protože vlivem vstřelování formovací směsi docházelo k velkému abrazivnímu opotřebení dutiny jaderníku. Výroba pryskyřicové dutiny jaderníku (negativ jádra) si žádá složitější postup výroby než přímá výroba dutiny pomocí obrábění. V principu lze výrobu rozdělit do dvou kroků:

- Výroba makety jádra a příslušných tvarů jaderníku (pozitiv tvar)
- Zalít makety do ocelového bloku, čímž vznikne jaderník (negativ tvar)

První krok výroby makety jádra zahrnuje přípravu 3D dat popsanou v kapitole 4.2.4, kdy je kompenzováno smrštění 1,1%. Maketa jádra se zhotovuje pomocí frézování, takže 3D data jsou použita jako vstup do partprogramu CAM modulu softwaru Pro/ENGINEER. NC kód - program je přenesen do tříosého frézovacího centra DMG 100 T2 s řídicím systémem Heidenhain. Materiál makety jádra je volen tak, aby byla jeho obrobiteľnosť a následné opracování co nejsnazší.



Obrázek 5.1 Obrábění makety jádra

Po obrobení makety jádra dřevomodelárna zhotoví celý pozitivní tvar jaderníku, který slouží v druhém kroku jako kopyto pro zalití pryskyřicí. Dřevomodelárna odstraní nedokonalosti na povrchu makety přebroušením povrchu, aby se odstranily stopy po

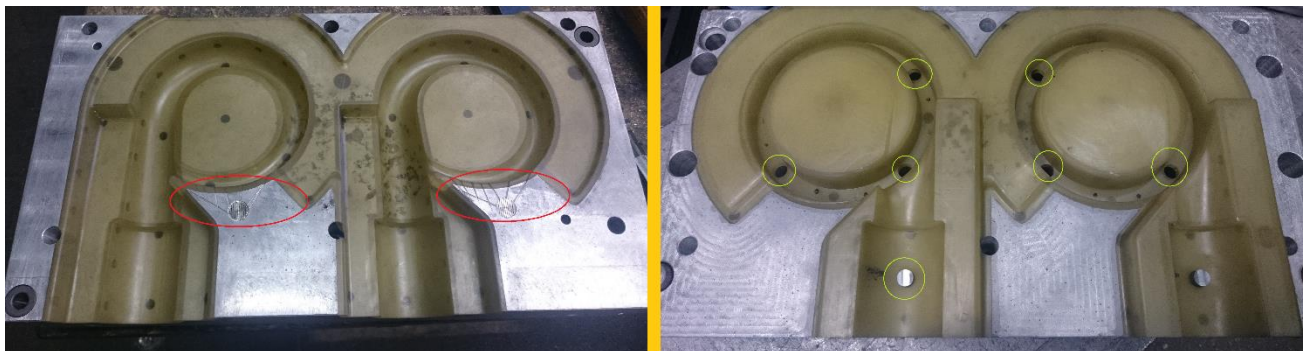
nástroji z obrábění. V případě, že by maketa obsahovala vlivem nedokonalosti materiálu nějakou vadu, tak se toto chybné místo vybrousí, zaplní tmelem a po jeho vytvrzení následuje přebroušení povrchu. Tak to opravené místo musí lícovat s původním povrchem.



Obrázek 5.2 Pozitivní tvar pro horní část jaderníku

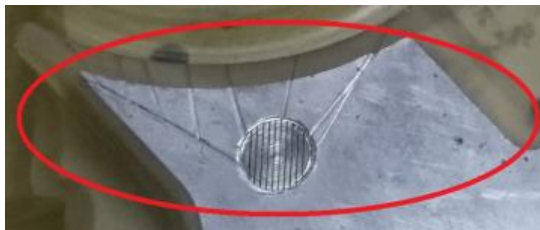
Takto připravená pozitivní část jaderníku se ošetří separačním prostředkem, aby pryskyřice napevno nepřilnula k povrchu podložky a makety jádra. Po ošetření obou částí se může přejít k druhému kroku postupu výroby jaderníku.

Druhá fáze výroby jaderníku obsahuje obrobení ocelového bloku s příslušnými rozměry. Tímto obráběním se získá vybrání v ocelovém kvádru, kdy přiložením pozitivního tvaru vznikne mezera, do které se nalije pryskyřice.



Obrázek 5.3 Jaderník - horní a spodní část

Na obrázku 5.3 se nacházejí poloviny jaderníku, kdy vlevo je horní část a vpravo je spodní část jaderníku. Červené zvýraznění představuje umístění odvětrání, které je v detailu vidět na obrázku 5.4. Žlutě zvýrazněná místa na pravé části obrázku představují umístění vyhazovačů pro uvolnění vstřeleného jádra.



Obrázek 5.4 Detail odvzdušnění jaderníku

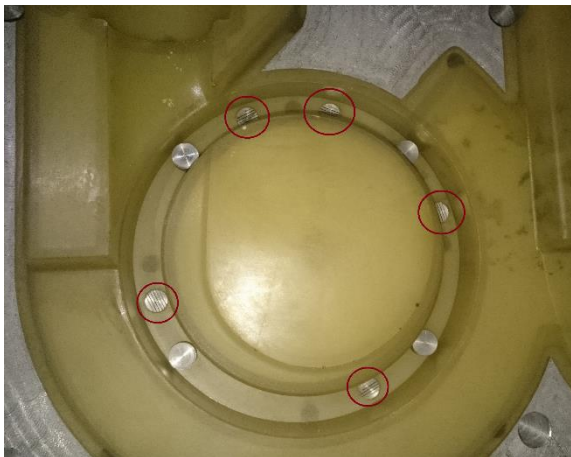
Jak již bylo zmíněno, pryskyřice se používá díky svým vlastnostem, které zvyšují životnost jaderníku. Životnost jaderníku závisí na abrazivní odolnosti materiálu. Použitá pryskyřice je dvousložková polyuretanová licí hmota červenohnědé barvy. Mezi její přednosti patří vysoká pevnost v tahu, nízká viskozita a dobré zpracování.

Při vstřelování zkušební série jader, byl odhalen problém. Jak ukazuje obrázek 5.5, jádra se v horní části drolila. Drolení jader způsobuje nevytvzení formovací směsi, což je důsledkem špatného průchodu vytvrzovacího katalyzátoru formovací směsí.



Obrázek 5.5 Vada na jádru

Jádra obsahující vadu byla vyspravena pomocí tmelu, který se nanasl do míst, kde byla formovací směs nezpevněna a vydrolena. Pro další vstřelování jader ovšem musel být učiněn zásah do jaderníku, aby tento stav nenastával. Dodatečná kontrola a výprava jader je nákladově a časově náročná.



*Obrázek 5.6 Dodatečné odvodušnění jaderníku - spodní část*

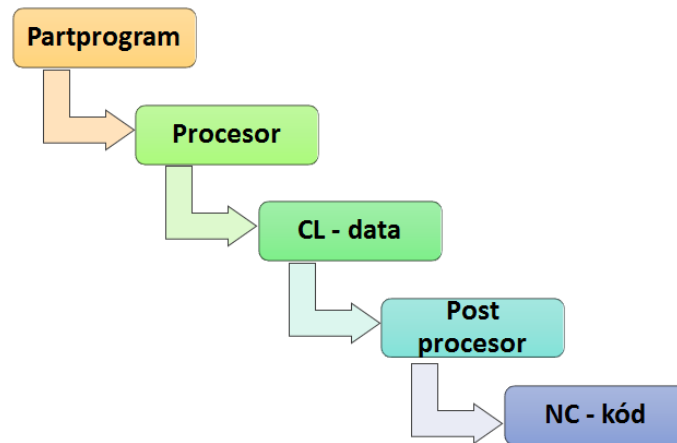
Náprava problému s nevytvrzenými jádry si žádala zásah do jaderníku. Úprava spočívala v přidání odvodušnění jaderníku, které se umístilo do spodní části jaderníku, jak ukazuje obrázek 5.6. Červeně zvýrazněná body ukazují 5 míst, kam bylo přidáno odvodušnění.

## **5.2 Výroba formy pro nízkotlaké lití**

V kapitole 5.1.1 byla popsána analýza 3D dat a návrh modelu formy. 3D Modelu formy se využilo pro vstup do partprogramu CAM softwaru. Tato kapitola popíše technologickou přípravu výroby z pohledu obrábění, spasování formy a zařízení, na kterém proběhla výroba formy.

### 5.2.1 Technologická příprava CAM obrábění

Technologická příprava obrábění pomocí CAM podpory vytváří určitý sériový řetězec činností a úloh, které musí být splněny pro dosažení obrobení formy.



Obrázek 5.7 Řetězec CAM softwaru

Partprogram obsahuje dvě části. První z nich je geometrická část, která obsahuje data z CAD softwaru jako obrobek, polotovár, souřadný systém. Druhá je technologická část, což jsou navržené dráhy a technologické podmínky.

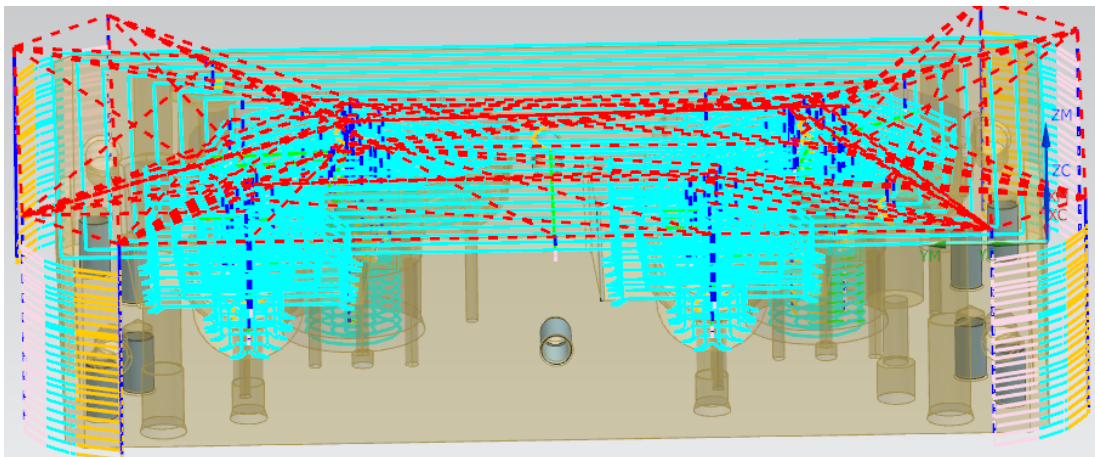
Procesor představuje technologii, respektive matematický model technologie, což definuje operace, které bude moci technolog použít pro práci.

CL data jsou dráhy virtuálního nástroje obsahující již technologické informace o obrábění. CL data mají universální charakter, ale jsou specifická pro daný CAM software. To znamená, že z jediného CAM softwaru můžeme získat různé zápisy NC kódu, dle použitého postprocesoru.

Postprocesor je překladačem CL dat konkrétní kombinace CAM softwaru alias CL dat a řídicího systému stroje. Postprocesor není universální záležitostí a lze říci, že je unikátním řešením překladače CL Dat pro konkrétní řídicí systém. Neplatí zde pravidlo, že veškeré řídicí systémy od jednoho dodavatele budou kompatibilní s daným postprocesorem. Postprocessing CAM přípravy výroby patří mezi největší problém tohoto řetězce a je zdrojem většiny problémů.

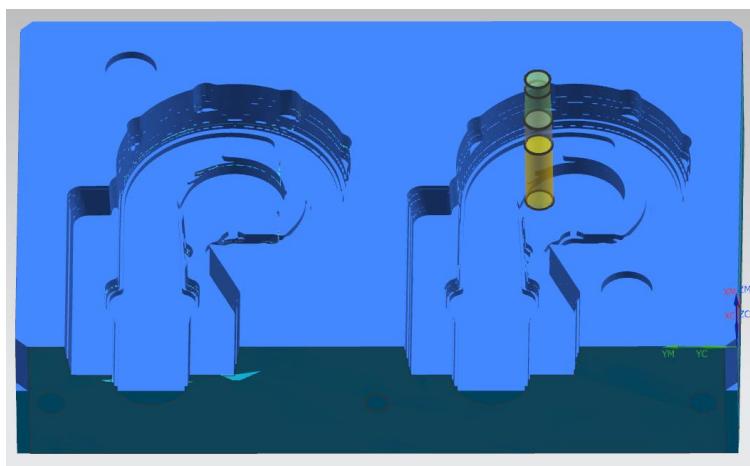
NC kód tvoří soubor geometrických a technologických informací, které vyžaduje řídicí systém obráběcího stroje reprezentující skutečné pohyby nástroje. Program se skládá z jednotlivých bloků (řádků, vět), které mají své vlastní číslo. Geometrické informace udávají způsob pohybů nástrojů, dráhu nástroje, která může být úsečka, či křivka.

Technologické informace určují technologii obrábění s ohledem na optimální řezné podmínky (řezná rychlost, posuvy, hloubka řezu). Pomocné informace jsou doplňující k technologickým informacím např. zapnutí a vypnutí přívodu řezné kapaliny, regulace otáček, konec nebo stop programu. Ostatní informace slouží pro orientaci v programu a jsou to třeba čísla bloků a poznámky.



Obrázek 5.8 Drátové zobrazení drah obrábění

Obrázek 5.8 zobrazuje navržené dráhy pro obrábění horní části formy. V tomto stavu jsou již zadány řezné podmínky obráběcího procesu a posuzuje se vhodnost použitých drah. Vhodností se rozumí například u hrubování co největší možný úměr materiálu, u polodokončování zejména sjednotit přídavek pro dokončovací operace a pro obrábění načisto se jedná o dosažení co nejlepšího povrchu v co možná nejkratším čase.



Obrázek 5.9 Simulace obrábění na úrovni CL dat

Pro ověření navržených strategií obrábění se využívá simulací obrábění, což je vidět na obrázku 5.9. Simulace se využívají pro odhalení kolizí obráběcího nástroje či jiných nežádoucích stavů, kterým lze tímto způsobem ve většině případů předejít. Po verifikaci a

ubezpečení se, že většina nežádoucích stavů byla odstraněna, se může pokračovat k dalšímu kroku a to CL datům. Zápis CL dat, která jsou posléze přeložena externím postprocesorem na NC kód v dané podobě pro řídicí systém obráběcího stroje Heidenhain.

Prostředky, kterými firma disponuje, nejsou podle dnešních standardů aktuální a realizace přípravy výroby pomocí CAM je poněkud problematická. Komplikace vyplývají ze skutečnosti, že CAM modul softwaru Pro/ENGINEER, který se používá je z roku 2006. Technologické možnosti tohoto CAM jsou sice dostačující, ale problém nastává s dalším článkem řetězce a to postprocesorem. Postprocessor není interní a implementovaný do CAM softwaru. Problém postprocesoru vychází z jeho staří a faktu, že běží na úrovni konzole MS - DOS. Takovýto postprocessor již není podporován v novějších operačních systémech Windows vyšších jak verze XP. Současné řešení tohoto problému spočívá ve zkopírování CL dat do textového editoru MS WORD, spuštění postprocesoru na jiné stanici nebo na virtuálním PC obsahující Windows XP a překopírování CL dat do postprocesoru. Po přeložení CL dat následuje zkopírování NC kódu získaného postprocesorem a návrat pod aktuální operační systém, kde je NC kód simulován. Obrovský zdroj možných chyb spočívá v cestě přenosu CL dat do postprocesoru, kdy MS WORD může CL data ovlivnit a celý tento proces je časově náročný. Pružnost ohledně ověřování NC kódu a jeho rychlá úprava v tomto případě nenastává.

### **5.2.2 Popis frézovacího centra a obrobení formy**

Společnost Metaz disponuje frézovacími obráběcími centry od společnosti DMG Mori a HAAS. Od společnosti DMG Mori to jsou dvě tříosá frézovací centra s označením DMU 100 T2 a jedním pětiosým frézovacím centrem. Od společnosti HAAS je to čtyřosé frézovací centrum s označením EC – 500. Pro výrobu forem pro nízkotlaké lití slouží tříosá centra. Pětiosé a čtyřosé centrum se používá pro obrábění odlitku, dle požadavků zákazníka. Obrobení formy proběhlo na frézovacím centru DMG DMU 100 T2, které má tyto charakteristiky [28]:

Tabulka 5.1 Parametry frézky DMG - DMU 100 T2

|                              |                    |       |
|------------------------------|--------------------|-------|
| Upínací plocha stolu         | 1500 x 800         | mm    |
| Pojezd osy X                 | 1250               | mm    |
| Pojezd osy X                 | 700                | mm    |
| Pojezd osy X                 | 700                | mm    |
| Otáčky vřetene               | 18 000             | min-1 |
| Upínací kužel vřetena        |                    | SK 40 |
| Chlazení středem             |                    | NE    |
| Počet řízených os            |                    | 3     |
| Řídicí systém                | Heidenhain TNC 530 |       |
| Výkon hlavního elektromotoru | 26                 | kW    |
| Maximální zatížení stolu     | 1100               | kg    |
| Zásobník nástrojů            |                    | ANO   |
| Počet pozic v zásobníku      |                    | 32    |
| Rozměry zařízení             | 6100 x 5200 x 2700 | mm    |
| Hmotnost                     | 9600               | kg    |



Obrázek 5.10 Snímek DMG - DMU 100T2



Obrázek 5.11 Pracovní prostor obráběcího stroje

Obrázky 5.12 a 5.13 zachycují obrábění dolní a horní poloviny formy na daném stroji. Při obrábění polovin formy nedošlo k žádným potížím, navržené dráhy a následný NC kód



neobsahoval žádné chyby stejně jako simulace obrábění v CAM softwaru. Z obrobny byly obě části převezeny na kovomodelárnu, kde následovalo spasování formy.



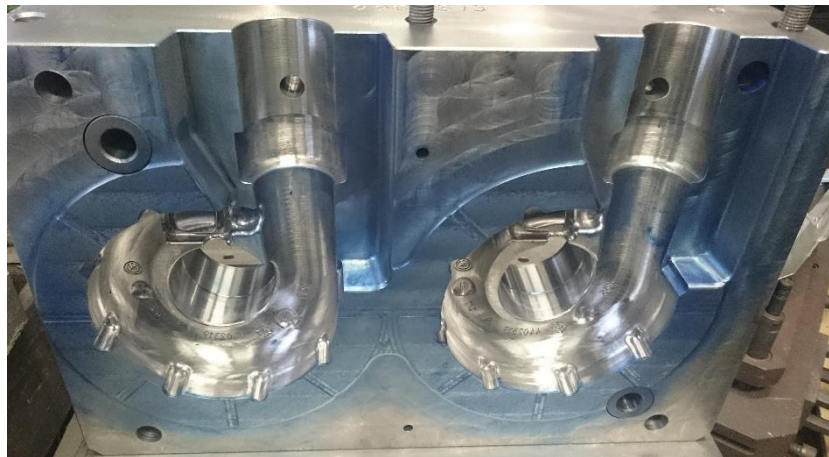
Obrázek 5.12 Spodní část formy – obrábění



Obrázek 5.13 Horní část formy – obrábění

### 5.2.3 Spasování formy pro nízkotlaké lití

Kovomodelárna provádí kompletaci formy, což znamená osazení polovin forem vložkami a naváděcími kolíky. Po osazení vodících prvků se provede spasování formy, které bude blíže popsáno dále. Po spasování následuje osazení formy všemi zbývajících komponenty, které obsahuje celá sestava. Tyto komponenty jsou například další vložky pro dorazy a vyhazovače, samotné vyhazovače s dorazy. Kompletní seznam instalovaných komponent obsahuje kusovník sestavy výkresové dokumentace uvedený v příloze na CD.



*Obrázek 5.14 Spasování formy pomocí indikačního nářezů*

Spasování formy má za účel odhalit případné nedokonalosti vzniklé při obrábění. Jelikož obrábění probíhá v určitých výrobních tolerancích, dochází vlivem přiblížení ke krajním rozměrům těchto tolerancí k určitým přebytkům materiálu nebo naopak materiál chybí. Přebytečný materiál se projeví při spojení obou polovin formy k zadírání při samotném zavírání a otevírání formy. Popřípadě na sebe nedosedá přesně dělicí rovina a docházelo by tak při lití k zaběhnutí taveniny do takto vzniklých prostor, což by vedlo ke vzniku zateklin. Pro předejetí takového stavu se forma kontroluje pomocí nanesení indikačního povlaku, který při zavření a následném otevření formy odhalí tato problematická místa s přebytky materiálu. Indikace proběhne tak, že se v inkriminovaných místech povlak sedře a pracovník provádějící tuto činnost odhalí riziková místa. Nevyhovující místa označí a ta se následným přebroušením opraví. Tento proces probíhá tak dlouho, dokud tato činnost odhaluje problémy. Po spasování a osazení formy všemi komponenty je forma poslána na další pracoviště pro přípravu k lití.

### **5.3 Příprava formy a lití zkušební série**

Formu je nutno před umístěním na lící stroj opatřit příslušnými povlaky, pro zlepšení lících podmínek a zvýšení životnosti formy. Forma se také před litím musí předežhřát na stanovenou teplotu. Příprava formy a tedy aplikace daných povlaků bude rozebrána níže.

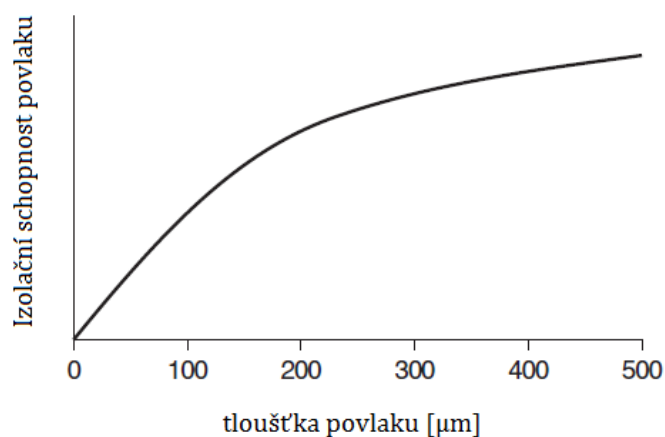
#### **5.3.1 Typ použitého povlaku**

Výsledná povrchová vrstva se skládá ze dvou podle funkce rozdílných povlaků, jak je popsáno v kapitole 3.4.2. Z pohledu lícího procesu a tuhnutí odlitku je významný termoizolační povlak, který zde bude popsán.

Použitý izolační povlak se obchodně nazývá obchodně BONDERITE L - CA CG 555 (původní název DAG 193T). Povlak je založen na suspenzi vody a vermikulitu s tepelnou vodivostí  $11,74 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Charakteristika tepelné vodivosti povlaku má také význam pro numerické simulace lití a tuhnutí odlitku. Pro aplikaci povlaku se používá tlaková stříkáčková pistole, tento konkrétní povlak je také možno nanášet pomocí štětce. Životnost povlaku se pohybuje okolo 32 hodin provozu, kdy po této době je nutné starý povlak odstranit a nanést novou vrstvu. Klíčová pro funkčnost a dosažení požadovaných vlastností povlaku je samotná depozice povlaku [11].

### 5.3.2 Problematika nanášení povlaku

Kvalita povlaku a tedy tepelně izolační vlastnosti se odvíjejí od způsobu a preciznosti nanášení povlaku. U povlaku na vodní bázi se vytvářejí tepelně izolační vlastnosti vypařením vody z povlaku, kdy vznikne pórovitost v dané vrstvě. Pórovitost dosahuje hodnot v závislosti na kvalitě provedení okolo 30 – 60 % [29]. K vypaření vody dochází vlivem předehřátí formy na specifickou teplotu. Výrobce udává rozmezí teplot  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ , při kterých má být povlak nanášen, aby byly zaručeny dané vlastnosti a koherence povlaku. Vhodný ohřev formy má být proveden na horní hranici tohoto rozmezí, protože vlivem nanášení povlaku dochází k ochlazení formy a účinnost vytvářené pórovitosti klesá. Naopak při velkém předehřevu formy je účinnost tvorby pórů veliká, což je žádoucí stav, ale při velké teplotě předehřevu se zhoršují vlastnosti povlaku jako je životnost, přilnavost a koherence povlaku. Z výše uvedeného textu je tedy zřejmé, že kontrola teploty formy při aplikaci povlaku má významný vliv na získané tepelně izolační vlastnosti povlaku [29].



Obrázek 5.15 Izolační schopnost povlaku podle jeho tloušťky [29]

Dalším úskalím při nanášení povlaku je jeho tloušťka. Charakteristika izolační schopnosti povlaků na jejich tloušťce na obrázku 5.15 říká, že mezní tloušťka povlaku se pohybuje okolo 200  $\mu\text{m}$ . Pod touto tloušťkou povlaky ztrácí své tepelně izolační vlastnosti a naopak povlaky s tloušťkou větší jak 300  $\mu\text{m}$  mají náchylnost k porušení souvislosti povrchu. Dané hodnoty se odlišují podle konkrétních povlaků. Obecně lze říci, že doporučená tloušťka povlaků se pohybuje v rozmezí 150  $\mu\text{m}$  – 250  $\mu\text{m}$  [29].

### 5.3.3 Postup aplikace

Příprava povlaku spočívá v naředění povlakové hmoty vodou, protože je dodávána jako koncentrát. BONDERITE L - CA CG 555 se ředí v poměru 1 ku 2 – 5 dílů. Hustotu směsi volí obsluha podle potřeby, aby bylo možno využít stříkací tlakové pistole. Na tepelně izolační povlak se nanáší také separační grafitový povlak DYCOTE 36 pro snižování tření a zlepšení vyjímání odlitku [30].

Samotná forma se předehřívá na teplotu 175°C a její teplota nesmí klesnout pod 150°C, jinak nedochází k dostatečné tvorbě pórovitosti. Samotná aplikace připraveného povlaku se musí řídit několika zásadami, aby bylo dosaženo termo izolačních vlastností povlaku [30]:

- Stříkací tlaková pistole musí procházet údržbou, aby nedocházelo k jejímu zanášení a následně ke špatnému nanášení povlaku
- Pracovní tlak pistole ovlivňuje hustota směsi, ale směrodatné rozmezí tlaku se pohybuje okolo 0,4 – 0,5 MPa
- Prováděný postřik má být prováděn ze vzdálenosti 20 – 30 cm od formy k trysce stříkací pistole. Vzdálenosti se ovlivňuje tloušťka povlaku, jeli vzdálenost malá tak výsledná tloušťka povlaku bude velká a obdobně při velké vzdálenosti vznikne tenký povlak.
- Povlak se nanáší od kraje dutiny formy do jejího středu nepřerušovaní nástřikem. Mezi nanášením jednotlivých vrstev je nutno udělat pauzu, aby se voda měla dostatečný čas se vypařit.
- Pro zabránění stínovému efektu při aplikaci povlaku musí pracovník měnit svou pracovní pozici, aby došlo k pokrytí celého povrchu dutiny formy.
- Pracovní čas depozice povlaku musí být co nejkratší, protože při delší době práce forma vychladne a výsledná kvalita povlaku klesá.

Aplikace tepelně izolačního povlaku na dutinu formy je kritický proces pro zaručení jeho funkčnosti. V současné době ve slévárně není ten to proces nijak kontrolován, proces je řízen subjektivním dojmem příslušných pracovníků a je potenciálním zdrojem problémů. Představa, že je povlak aplikován a měl by z této podstaty fungovat a ovlivňovat teplotní pole formy nemusí být v reálném provedení pravda. Proces depozice povlaku musí být kontrolován a řízen. Teplota formy, která se předeřívá pro aplikaci povlaku, musí být měřena například pomocí pyrometrů, termočlánků nebo jiného rychlého způsobu měření. Tloušťka naneseného povlaku taky není v současné době kontrolována a přitom její hodnota má obrovský vliv na účinnost povlaku. Tloušťku lze měřit například tloušťkoměry pro feromagnetické základní materiály, protože materiál formy je ocel.

#### **5.3.4 Kontrola povlaku**

V rámci ověření dodržení tloušťky povlaku a získání také reálných podkladů pro numerické simulace, bylo provedeno měření tloušťky povlaku formy pomocí zapůjčené měřicí sondy. Měření teploty formy pro aplikaci povlaku nemohlo být provedeno kvůli absenci technických prostředků ve slévárně. K měření tloušťky povlaku byla použita sonda pro feromagnetický základní materiál. Měření je v principu velmi jednoduché a rychlé. Prvním krokem je kalibrace samotné sondy pomocí kalibračních folií, které se přiloží na očištěný základní materiál, na kterém se bude měřit tloušťka povlaku. Druhým krokem spočívá ve výběru vhodných a dostupných oblastí pro měření, které charakterizují kvalitu procesu nástřiku a mají dobrou vypovídající schopnost o tloušťce povlaku. Třetím krokem je samotné měření ve vybraných místech a záznam hodnot. Výsledky změřených hodnot shrnuje tabulka 5.3, kdy úplná výsledná hodnota tloušťky izolačního povlaku vyšla 37  $\mu\text{m}$ . Tento výsledek je oproti doporučenému rozmezí hodnot 150  $\mu\text{m}$  – 250  $\mu\text{m}$  opravdu špatný. Při takovéto reálné tloušťce není vůbec možné požadovat tepelně izolační vlastnosti povlaku a to ještě v kombinaci s faktem, že není ověřena podmínka tepelného rozmezí 150°C – 170°C nanášení povlaku pro vytvoření izolačních vlastností. Důsledkem takového povlaku je pouze zhoršení přesnosti odlitku. Tento výsledek bude zahrnut do návrhu opatření pro zlepšení současné situace.

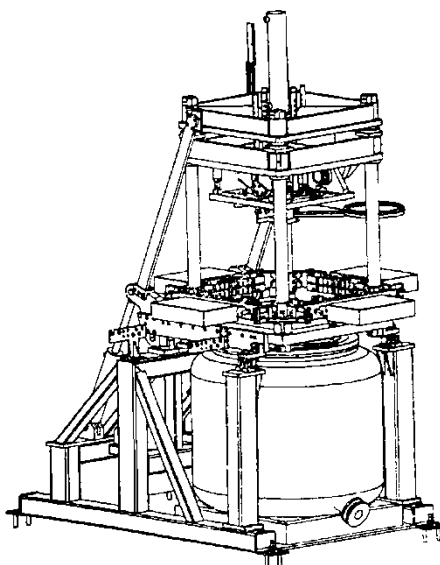
Tabulka 5.2 Výsledky měření tloušťky povlaku

| Měření tloušťky povlaku |                      |                    |                           |                    |
|-------------------------|----------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|
| poloha<br>č.m.          | Termo povlak         |                    | Termo + lubrikační povlak |                    |
|                         | Horizontální<br>[μm] | Vertikální<br>[μm] | Horizontální<br>[μm]      | Vertikální<br>[μm] |
| 1                       | 37                   | 36                 | 50                        | 44                 |
| 2                       | 40                   | 43                 | 48                        | 40                 |
| 3                       | 38                   | 29                 | 44                        | 42                 |
| 4                       | 50                   | 28                 | 64                        | 36                 |
| 5                       | 40                   | 22                 | 73                        | 20                 |
| 6                       | 39                   | 34                 | 71                        | 43                 |
| 7                       | 45                   | 39                 | 45                        | 41                 |
| 8                       | 30                   | 41                 | 48                        | 32                 |
| 9                       | 31                   | 48                 | 57                        | 38                 |
| $\bar{x}$               | <b>38.89</b>         | <b>35.56</b>       | <b>55.56</b>              | <b>37.33</b>       |
| $s \pm$                 | <b>6.21</b>          | <b>8.20</b>        | <b>11.22</b>              | <b>7.50</b>        |
| x max                   | 50                   | 48                 | 73                        | 44                 |
| x min                   | 30                   | 22                 | 44                        | 20                 |

### 5.3.5 Lítí zkušební série

Před realizací vzorkování je potřeba stanovit podmínky lícího procesu, které vycházejí především z technologie konkrétního lícího zařízení a použité slitiny. Za tímto účelem bude v kapitole 5.3.6 popsáno lící zařízení

### 5.3.6 Lící stroj NTL 350 Kovopol [31]



Obrázek 5.16 Schéma lícího stroje NTL 350

Hlavní technické údaje lícího stroje:

- Obsah kelímku: 350kg nebo 500kg Al slitiny
- Jmenovitá teplota: 1000°C
- Jmenovité napětí: 3PEN 50Hz 400V
- Topný příkon pece: 36Kw
- Max. provozní tlak: 0,1MPa
- Prostředí pece: oxidační
- Krytí pece: IP 40
- Hmotnost pece bez kelímku: 3000kg

Stroj NTL nízkotlakého lití se skládá z vlastní pece, kde je udržovaná zásoba tekutého hliníku a z nadstavby, která je vybavena komponenty zajišťující otevření a zavření formy. Lící stroj dále disponuje měřicími elementy pro kontrolu technologických parametrů. Prostor pece s kelímkem je hermeticky uzavřen, kdy je při lícím procesu přiveden stlačený vzduch, který vytlačí taveninu stoupací trubicí do prostoru nadstavby a tam je příslušnými vtoky formy tavenina vtačena do formy. Lící stroj obsahuje zařízení pro kontrolu a

regulaci teploty až v šesti místech formy podle potřeby při licím cyklu. Po ukončení plnění formy poklesne tlak v peci, aby poklesla hladina taveniny na požadovanou hodnotu, forma se otevře a odlitek je vyjmut.

Řídicí systém se skládá z Programovatelného automatu (PLC) FX3U od společnosti Mitsubishi. Řídicí systém stroje a silová část je situována v rozvaděči, který je uzpůsoben pro řízení dvou licích strojů. Řídicí systém je možno připojit k dispečerskému PC pro archivaci technologických veličin.

Licí zařízení je uzpůsobené pro variabilitu litého portfolia bez nutnosti servisního zásahu k úpravě stroje. Daný stroj umožňuje použít až šesti dílných forem. Jak již bylo zmíněno, licí stroj disponuje možností použít šest snímačů teploty pro kontrolu procesu, které lze propojit případně s chladicími okruhy. Licí stoj nabízí možnost použít 6 chladících okruhů, kde 4 z nich jsou vzduchové a zbylé dva jsou vodní.

Tlakování pece a nastavení plnicího tlaku se používá proporcionální regulátor tlaku, který umožňuje nastavení plnicího tlaku v rozmezí 0 – 100 kPa. Přírůstek tlaku za čas se pohybuje v počátečních fázích okolo  $1\text{kPa} \cdot \text{s}^{-1}$ , v případě potřeby většího nárůstu tlaku lze použít obtok regulátor a přírůstek se zvýší na hodnotu  $5\text{kPa} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Řídicí systém kontroluje hladinu taveniny v kelímku a indikuje aktuální stav na displeji, který je umístěn na rozvaděči. Licí stroj pracuje ve dvou režimech, kdy první z nich je „ruční ovládání“ a obsluha nastavuje a zajišťuje veškeré veličiny licího procesu online. Druhý režim je automatický, kdy obsluha zajistí potřebné záležitosti k odlití výrobku (například vložení jádra a vyčištění dutiny formy). Po zajištění náležitostí pro pracovní cyklus stroje pracovník stiskne tlačítko pro spuštění automatického pracovního cyklu. Pracovní cyklus končí uvolněním odlitku a jeho vypadnutí na vynášecí ruku, která je poháněna hydraulicky. Následuje opětovná příprava pro další licí cyklus.



### 5.3.7 Parametry stávajícího licího cyklu

Pro odlití odlitku musí být nastaveny parametry licího stroje tak, aby došlo k vyplnění taveniny formou. Parametry, které je nutno zadat určuje řídicí systém stroje, ale konkrétní hodnoty veličin určuje technolog. Stanovené hodnoty licího procesu:

- Teplota taveniny 700 – 730 °C
- Plnicí tlak 0,02 – 0,03 MPa
- Teplota předehřevu formy 300 – 380 °C
- Doba otevření formy 6 s
- Vyjmutí odlitku 90s
- Doba ošetření formy 27 - 40 s
- Doba lití 145 s
- Doba tuhnutí 90 s

Časy výrobního cyklu byly dodatečně změřeny stopkami, pro vytvoření reálného obrazu o celém procesu lití. Příprava formy na další licí cyklus probíhá umístěním jádra a sítka, čišťením dutiny formy respektive dělicí roviny stlačeným vzduchem po ukončení předchozího licího cyklu. Čas přípravy formy na další licí cyklus se liší případ od případu. Čas přípravy formy je ovlivněn zručností obsluhy, ale také kvalitou vytvrzení usazovaných COLD BOXových jader. Hůře vytvrzená jádra uvolňují více písek a obsluha pak musí více kontrolovat a ofukovat polovinu formy. Obrázky 5.17 až 5.24 zachycují jednotlivé fáze licího cyklu na licím stroji.



Obrázek 5.17 Předehřev formy



Obrázek 5.18 Rozevření formy



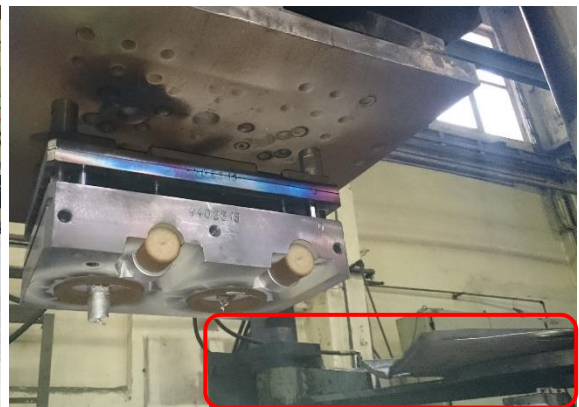
Obrázek 5.19 Založení jader do formy



Obrázek 5.20 Zavření formy, plnění a dotlak



Obrázek 5.21 Otevření formy po odlití



Obrázek 5.22 Příprava ramena na vypadnutí odlitku



Obrázek 5.23 Vyhození odlitků na táč



Obrázek 5.24 Přesunutí odlitků pomocí ramena

### 5.3.8 Výsledky vzorkování

Po spasování formy, aplikaci tepelně izolačního a separačního povlaku a umístění formy na lící stroj se mohlo přijít k lití zkušební série. Forma byla předehřáta na požadovanou teplotu a na rozvaděči lícího stroje nastaveny parametry lícího procesu, které jsou shrnuty v kapitole 5.3.7. Odlitek a materiál tavby z této zkušební série se využily k metalografické

zkoušce, spektrografické kontrole chemického složení a také byly odlity vzorky pro tahovou zkoušku. Snímky výsledků lití zkušební série shrnují obrázky níže v této kapitole.



*Obrázek 5.25 Zavaleniny a nedolítí 2*

Výsledky vzorkování, které jsou na obrázcích 5.25 a 5.26 ukazují vady, které vznikly při lití zkušební série. Tyto snímky byly pořízeny v stadiu, kdy se očekávalo, že nastavený proces povede k odlití skříně dmychadla bez takovýchto závažných vad. Očekávaná zmetkovitost na začátku lící série se podle zvyklostí slévárny určuje na 6 %. Tuto očekávanou zmetkovitost způsobuje zejména ustalování teplotního pole formy a dalších aspektů jako je povlak a teplota okolí.



*Obrázek 5.26 Nedolítí a vyznačené zavaleniny*

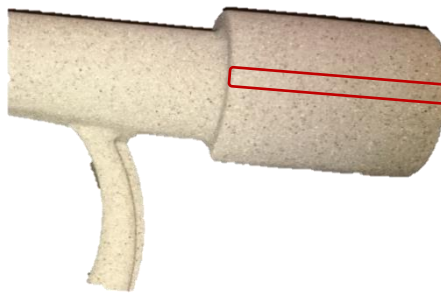
Detail vady ukazuje ve vyznačených místech zavaleniny, které vznikají důsledkem zchlazení a ztuhnutí taveniny, ale vlivem tlaku a postupem taveniny se před ztuhlá místa dostává další tavenina, která proudí do formy. Tavenina, která se dostala před ztuhlá místa

podle své teploty, rychlosti toku ztuhne poblíž již ztuhlého místa nebo se zalije celý objem dutiny, ale vznikne tak na povrchu znatelná drážka. V tomto případě tavenina zatuhla dříve, než stíhala vyplnit dutinu formy a vznikly příslušné zavaleniny, které jsou charakteristické svými ostrými přechody. Tyto přechody jsou na obrázku 5.26 zvýrazněny žlutými ovály. Jelikož přetrvával stav, kdy většina odlitku obsahovala tyto nepřijatelné vady, učinila obsluha zásah do lícího procesu a navýšila pracovní tlak stroje, čímž došlo ke zvýšení rychlosti plnění formy.



*Obrázek 5.27 Zavalenina a problém s odvzdušněním*

Zvýšením plnicího tlaku respektive zvýšení plnicí rychlosti formy se odstranily potíže s předčasným ztuhnutím taveniny a stěna šnekovice nevykazovala tak závažnou vadu jak při plnění s nižším plnicím tlakem. Avšak zvýšení plnicího tlaku vedlo k výskytu vady u hrdla dmyhadlové skříně (obrázek 5.27) zapříčiněné špatným odvzdušněním formy a opětovného chladnutí taveniny doprovázeného vznikem zavalenin. Tento problém přetrvával a bylo nutno učinit zásah do formy a v tomto kritickém místě přidat odvzdušnění. Taková to úprava by znamenala přerušení lití zkušební série, což by bylo nepřijatelné s ohledem na vytvořený plán. Pro účely vzorkování bylo učiněno dočasné řešení, které spočívalo ve vytvoření drážky v pískovém jádru, kudy mohl vzduch unikat do známky jádra.



Obrázek 5.28 Oblast drážky dočasného odvodu vzduchu

Takto upravené jádro a zvýšení plnicího tlaku (rychlosti plnění) umožnilo odlít na pohled odlitek bez vad a dutina formy byla úspěšně vyplněna taveninou. Samotným zásahem do jader vznikly na odlitcích nepatrné výstupky ve formě přídatku materiálu, které nezpůsobovaly potíže, protože se hrdlo v těchto místech obrábí pro dosažení jakostnější plochy.



Obrázek 5.29 Odlití bez zavalenin a předčasně ztuhlé taveniny

Vzorkování odhalilo problémy: Nedošlo k zaplnění formy taveninou v důsledku malé teploty formy pro nízkotlaké lití. Dočasné řešení zvýšením licího tlaku zlepšilo daný problematický stav, ale vznikl nový problém v oblasti hrdla dmyhadlové skříně, který se vyřešil pro odlití zkušební série, vytvořením drážek v jádrech. Po odlití zkušební série, byla nízkotlaká forma odeslána na kovomodelárnu pro vytvoření dodatečného odvodu vzduchu, aby se předešlo problémům s odvodu vzduchu a odvozeným vadám odlitku. Ze zkušební série bylo odesláno zákazníkovi 10 vzorků dmyhadlových skříní pro tlakovou zkoušku, které bylo nutno ještě tepelně zpracovat dle požadavku zákazníka.

## 5.4 Technologický potup tepelného zpracování T4 EN AC 45 400 (AlSi5Cu3)

Tepelné zpracování tohoto konkrétního materiálu se skládá z rozpouštěcího žíhání a přirozeného stárnutí.

- Rozpouštěcí žíhání se provede na teplotu  $520 \pm 5$  °C a výdrž na této teplotě musí být 6 hodin.
- Ochlazení do vody o teplotě 60 – 80 °C. Přesun z pece do kalící kádě s vodou musí proběhnout maximálně do 20 s.
- Doba přirozeného stárnutí je 120 hodin.

Nejnižší mechanické hodnoty z odlitku:

- Mez kluzu  $R_{p0,2}$  110 MPa
- Pevnost v tahu  $R_m$  230 MPa
- Tažnost A 6 %
- Tvrdost dle Brinella 75HB

## 5.5 Simulace licího procesu

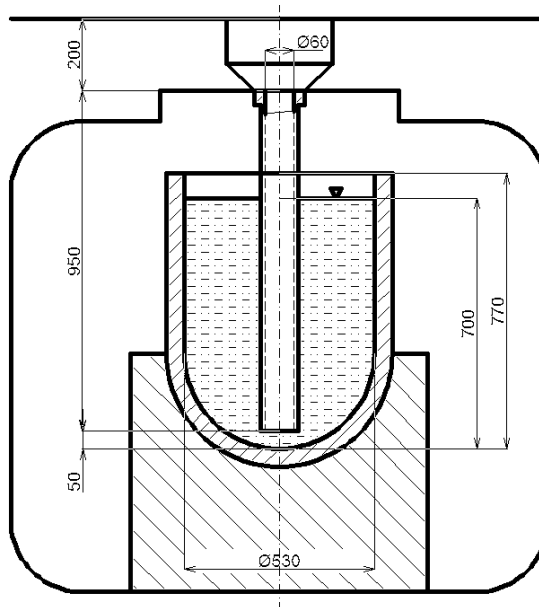
Simulace licího procesu byla provedena pro analýzu problémů, které vznikly lití zkušební série, jak popisuje kapitola 5.3.8. Předmětem analýzy byly potíže ze samotného vzorkování a také odhalené problémy zákazníkem, který prováděl provozní zkoušky a to zatížení skříně dmychadla pracovním tlakem. Zákazníková zkouška odhalila problémy s těsností skříní.

K simulaci bylo použito softwaru Nova Flow and solid verze 4.6r5, kdy specifikace simulačního softwaru a jeho představení je v kapitole 3.6.3. Před začátkem simulací bylo nutné zajistit vstupní data, ze kterých lze vycházet. Tyto vstupní data se skládají z 3D dat modelů uložených ve formátu \*.STL, okrajových a počátečních podmínek dané technologie (teploty, tlaky, izolační povlak, časy cyklu, druhy materiálů částí sestavy).

### 5.5.1 Základní nastavení simulace

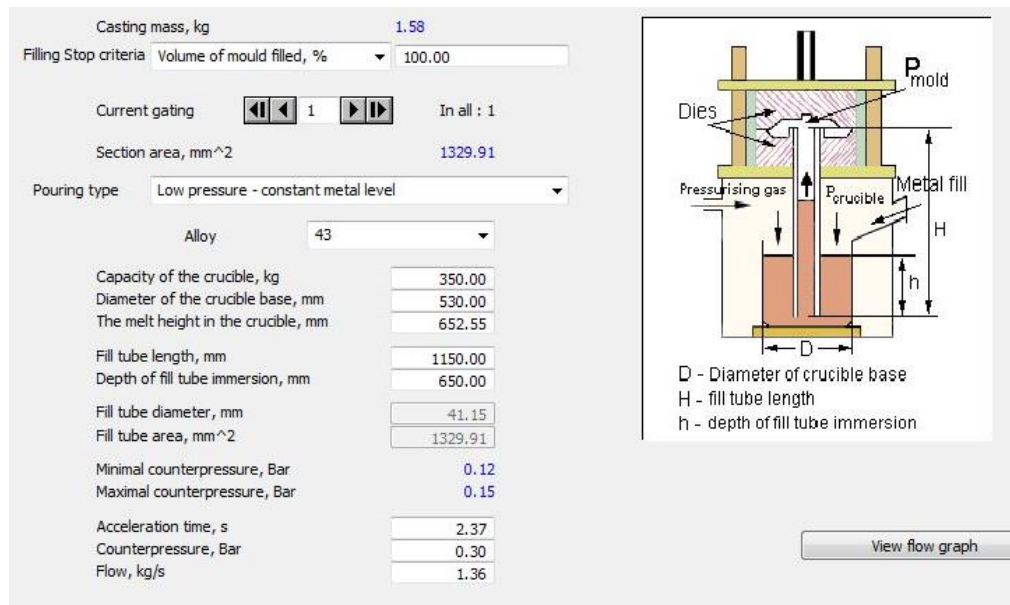
Vstupní parametry pro nastavení simulací vycházely z požadavků ze zvolené technologie, která má být řešena. Zjednodušený postup nastavení simulace spočívá v importu potřebných 3D dat, provedení Mesh operace, kterou se zadávají výpočetní uzly ve 3D modelech, výběr technologie, která má být simulována, a nastavení počátečních a okrajových podmínek dané technologie a daného provedení. Správnost počátečních podmínek silně ovlivňuje kvalitu výsledků získaných simulací. Zadání nesprávných a

nepřesných počátečních podmínek vede k získání špatných výsledků, které se vzdalují od reality. Proto byla věnována velká pozornost získaným počátečním podmínkám a jejich správnost byla ověřována.



Obrázek 5.30 Schéma udržovací pece

Schéma a popis rozměrů udržovací pece na obrázku 8.1 jsou jedním druhem počátečních podmínek, které je nutno zadat do nastavení simulace. Plnicí tlak se určuje pomocí daných rozměrů udržovací pece a hustoty taveniny. Následuje nastavení okrajových podmínek, které je uvedeno na obrázku 5.31. Okrajové podmínky také definují umístění vtoku a odvodu vzduchu, které se určují pro provedení MESH operace 3D dat.



Obrázek 5.31 Příklad nastavení okrajových podmínek simulace

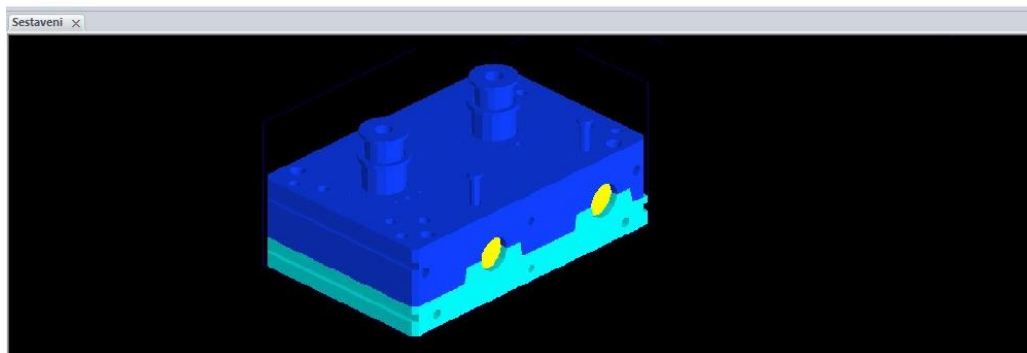
Počáteční podmínky technologie stanovují parametry stávajícího cyklu, které byly popsány v kapitole 5.3.7, se nadále využívají jako vstupní informace do simulačního softwaru. Problém byl se získáním informací ohledně tepelně izolačního povlaku, takže prvotní série simulací proběhly bez nastavení tepelně izolačního povlaku.

Počáteční podmínky simulace se zadávají stylem, že importovaná data, na kterých proběhl MESH, jsou uvedena v seznamu a uživatel jim připisuje charakteristiky, o jaký díl se jedná, jakého je materiálu, jakou má teplotu. Definuje se také teplota okolí a teplota vzduchu uvnitř formy pro nízkotlaké lití.



| Solids names   | Material type  | Initial temperature, °C | Replacement | Volume, cm <sup>3</sup> | Mass, kg |
|--|----------------|-------------------------|-------------|-------------------------|----------|
| <input checked="" type="checkbox"/> Casting            |                |                         |             |                         |          |
| <input checked="" type="checkbox"/> Die - Carbon Steel | Mould material | 355.00                  | No          | 9262.15                 | 68.48    |
| <input checked="" type="checkbox"/> Core - Cold Box    | Mould material | 100.00                  | No          | 1272.15                 | 1.97     |
| <input checked="" type="checkbox"/> 43                 | Alloy          | 730.00                  | No          | 1321.76                 | 3.20     |
| <input checked="" type="checkbox"/> Mold - Ceramic     | Mould material | 100.00                  | No          | 163.75                  | 0.62     |
| <input checked="" type="checkbox"/> Die - Carbon Steel | Mould material | 355.00                  | No          | 15353.47                | 113.51   |
| <input checked="" type="checkbox"/> Other              |                |                         |             |                         |          |
| <input type="checkbox"/> Air - Outside Mold            | Mould material | 50.00                   | No          | 17673.26                | 0.02     |
| <input checked="" type="checkbox"/> Air - In mold      | Cavity medium  | 355.00                  | No          | 0.00                    | 0.00     |

bez nátěru a hmotnostní tok 3,2/20 = 0,16kg/s



Obrázek 5.32 Příklad nastavení počátečních podmínek




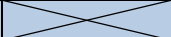
Simulační software nabízí mnoho dodatečných možností, jako je nastavení zmíněného tepelně izolačního povlaku, průtokoměrů, teplotních snímačů a dalších vlastností a analytických nástrojů, které jsou pro technologii důležité.

Simulacím, které mají určitou vypovídající schopnost, předcházely pokusy, kde byla testována hustota výpočetních uzlů a ověřování počátečních podmínek. Ověřování počátečních podmínek ukázalo velký vliv na výsledky simulací a v důsledku těchto informací musely být změřeny hodnoty týkající se rozměrů v udržovací peci, které jsou na obrázku 5.30 a tyto hodnoty důsledně zadat do simulací. Testovacích simulací bylo provedeno 18. Na jejich základě bylo učiněno rozhodnutí, že pro výpočty simulací bude použita pouze polovina formy, protože forma vykazuje symetrický charakter a výpočty pro obě pozice by prodlužovaly výpočetní čas simulací.

Tabulka 5.3 Seznam provedených simulací

| Číslo simulace | Plnicí tlak [kPa] | Teplota taveniny [°C] | Teplota formy [°C] | Tloušťka povlaku [μm] | Tepelná vodivost povlaku [W*m <sup>-1</sup> *K <sup>-1</sup> ] | Poznámka                               |
|----------------|-------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|--|--|
| 1              | 30                | 730                   | 355                |                       |  | Ověřování vstupů a okrajových podmínek |
| 2              | 30                | 720                   | 355                |                       |  | Ověřování vstupů a okrajových podmínek |
| 3              | 30                | 710                   | 355                |                       |  | Ověřování vstupů a okrajových podmínek |
| 4              | 30                | 700                   | 355                |                       |  | Ověřování vstupů a okrajových podmínek |
| 5              | 30                | 690                   | 355                |                       |  | Ověřování vstupů a okrajových podmínek |
| 6              | 30                | 680                   | 355                |                       |  | Ověřování vstupů a okrajových podmínek |
| 7              | 25                | 730                   | 355                |                       |  | Ověřování vstupů a okrajových podmínek |

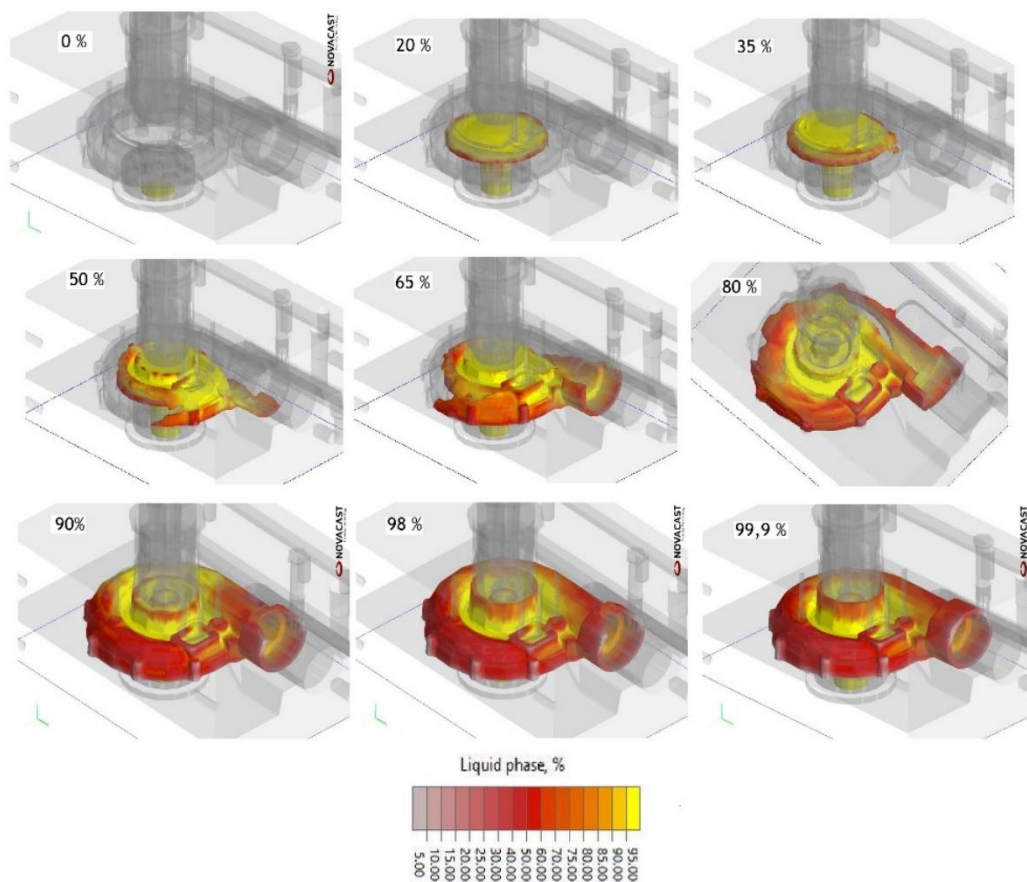
| Číslo simulace | Plnicí tlak [kPa] | Teplota taveniny [°C] | Teplota formy [°C] | Tloušťka povlaku [μm] | Tepelná vodivost povlaku [W*m <sup>-1</sup> *K <sup>-1</sup> ] | Poznámka                               |
|----------------|-------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|--|--|
| 8              | 25                | 720                   | 355                |                       |  | Ověřování vstupů a okrajových podmínek |
| 9              | 25                | 710                   | 355                |                       |  | Ověřování vstupů a okrajových podmínek |
| 10             | 25                | 700                   | 355                |                       |  | Ověřování vstupů a okrajových podmínek |
| 11             | 25                | 690                   | 355                |                       |  | Ověřování vstupů a okrajových podmínek |
| 12             | 25                | 680                   | 355                |                       |  | Ověřování vstupů a okrajových podmínek |
| 13             | 20                | 730                   | 355                |                       |  | Ověřování vstupů a okrajových podmínek |
| 14             | 20                | 720                   | 355                |                       |  | Ověřování vstupů a okrajových podmínek |
| 15             | 20                | 710                   | 355                |                       |  | Ověřování vstupů a okrajových podmínek |
| 16             | 20                | 700                   | 355                |                       |  | Ověřování vstupů a okrajových podmínek |
| 17             | 20                | 690                   | 355                |                       |  | Ověřování vstupů a okrajových podmínek |
| 18             | 20                | 680                   | 355                |                       |  | Ověřování vstupů a okrajových podmínek |
| 19             | 30                | 730                   | 355                |                       |  | Simulace bez povlaku                   |
| 20             | 30                | 720                   | 355                |                       |  | Simulace bez povlaku                   |
| 21             | 30                | 710                   | 355                |                       |  | Simulace bez povlaku                   |
| 22             | 30                | 700                   | 355                |                       |  | Simulace bez povlaku                   |
| 23             | 30                | 690                   | 355                |                       |  | Simulace bez povlaku                   |
| 24             | 25                | 730                   | 355                |                       |  | Simulace bez povlaku                   |
| 25             | 25                | 720                   | 355                |                       |  | Simulace bez povlaku                   |
| 26             | 25                | 710                   | 355                |                       |  | Simulace bez povlaku                   |
| 27             | 25                | 700                   | 355                |                       |  | Simulace bez povlaku                   |
| 28             | 25                | 690                   | 355                |                       |  | Simulace bez povlaku                   |
| 29             | 20                | 730                   | 355                |                       |  | Simulace bez povlaku                   |
| 30             | 20                | 720                   | 355                |                       |  | Simulace bez povlaku                   |
| 31             | 20                | 710                   | 355                |                       |  | Simulace bez povlaku                   |
| 32             | 20                | 700                   | 355                |                       |  | Simulace bez povlaku                   |
| 33             | 20                | 690                   | 355                |                       |  | Simulace bez povlaku                   |
| 34             | 30                | 730                   | 355                | 37                    | 0,20   | Simulace s ideálním povlakem           |
| 35             | 30                | 715                   | 355                | 37                    | 0,20   | Simulace s ideálním povlakem           |
| 36             | 30                | 700                   | 355                | 37                    | 0,20   | Simulace s ideálním povlakem           |
| 37             | 30                | 730                   | 355                | 37                    | 0,25   | Simulace s ideálním povlakem           |
| 38             | 30                | 715                   | 355                | 37                    | 0,25   | Simulace s ideálním povlakem           |
| 39             | 30                | 700                   | 355                | 37                    | 0,25   | Simulace s ideálním povlakem           |
| 40             | 30                | 730                   | 355                | 37                    | 0,30   | Simulace s ideálním povlakem           |
| 41             | 30                | 715                   | 355                | 37                    | 0,30   | Simulace s ideálním povlakem           |
| 42             | 30                | 700                   | 355                | 37                    | 0,30   | Simulace s ideálním povlakem           |
| 43             | 20                | 730                   | 355                | 37                    | 0,20   | Simulace s ideálním povlakem           |
| 44             | 20                | 715                   | 355                | 37                    | 0,20   | Simulace s ideálním povlakem           |
| 45             | 20                | 700                   | 355                | 37                    | 0,20   | Simulace s ideálním povlakem           |
| 46             | 20                | 730                   | 355                | 37                    | 0,25   | Simulace s ideálním povlakem           |
| 47             | 20                | 720                   | 355                | 37                    | 0,25   | Simulace s ideálním povlakem           |
| 48             | 20                | 700                   | 355                | 37                    | 0,25   | Simulace s ideálním povlakem           |

| Číslo simulace | Plnicí tlak [kPa] | Teplota taveniny [°C] | Teplota formy [°C] | Tloušťka povlaku [ $\mu\text{m}$ ]  | Tepelná vodivost povlaku [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]          | Poznámka                                |
|----------------|-------------------|-----------------------|--------------------|---|--|---|
| 49             | 20                | 730                   | 355                | 37  | 0,30   | Simulace s ideálním povlakem            |
| 50             | 20                | 715                   | 355                | 37  | 0,30   | Simulace s ideálním povlakem            |
| 51             | 20                | 700                   | 355                | 37  | 0,30   | Simulace s ideálním povlakem            |
| 52             | 25                | 720                   | 355                | 37  | 0,25   | Simulace s ideálním povlakem            |
| 53             | 30                | 730                   | 355                | 37  | 11,74  | Simulace s reálným povlakem a tloušťkou |
| 54             | 30                | 720                   | 355                | 37  | 11,74  | Simulace s reálným povlakem a tloušťkou |
| 55             | 30                | 710                   | 355                | 37  | 11,74  | Simulace s reálným povlakem a tloušťkou |
| 56             | 30                | 700                   | 355                | 37  | 11,74  | Simulace s reálným povlakem a tloušťkou |
| 57             | 25                | 730                   | 355                | 37  | 11,74  | Simulace s reálným povlakem a tloušťkou |
| 58             | 25                | 720                   | 355                | 37  | 11,74  | Simulace s reálným povlakem a tloušťkou |
| 59             | 25                | 710                   | 355                | 37  | 11,74  | Simulace s reálným povlakem a tloušťkou |
| 60             | 25                | 700                   | 355                | 37  | 11,74  | Simulace s reálným povlakem a tloušťkou |
| 61             | 20                | 730                   | 355                | 37  | 11,74  | Simulace s reálným povlakem a tloušťkou |
| 62             | 20                | 720                   | 355                | 37  | 11,74  | Simulace s reálným povlakem a tloušťkou |
| 63             | 20                | 710                   | 355                | 37  | 11,74  | Simulace s reálným povlakem a tloušťkou |
| 64             | 20                | 700                   | 355                | 37  | 11,74  | Simulace s reálným povlakem a tloušťkou |
| 65             | 25                | 730                   | 355                | 100   | 11,74  | Reálný povlak a doporučená tloušťkou    |
| 66             | 25                | 720                   | 355                | 100   | 11,74  | Reálný povlak a doporučená tloušťkou    |
| 67             | 25                | 710                   | 355                | 100   | 11,74  | Reálný povlak a doporučená tloušťkou    |
| 68             | 25                | 700                   | 355                | 100   | 11,74  | Reálný povlak a doporučená tloušťkou    |
| 69             | 25                | 725                   | 355                | 37  | 11,74  | Reálný povlak a doporučená tloušťkou    |
| 70             | 22                | 720                   | 360                |  |  | Cyklování 5x bez povlaku                |
| 71             | 28                | 720                   | 360                | 100   | 11,74  | Cyklování 5x                            |
| 72             | 22                | 720                   | 360                | 37  | 11,74  | Cyklování 5x                            |
| 73             | 22                | 720                   | 360                | 100   | 11,74  | Cyklování 5x                            |
| 74             | 28                | 720                   | 360                | 37  | 11,74  | Cyklování 5x                            |
| 75             | 28                | 720                   | 360                | 100   | 11,74  | Cyklování 5x                            |
| 76             | 30                | 720                   | 360                |  |  | Cyklování 5x                            |
| 77             | 30                | 720                   | 360                | 37  | 11,74  | Cyklování 5x                            |

## 5.6 Simulace bez tepelně izolačního povlaku

Prvotní série simulací byla provedena bez nastavení tepelně izolačního povlaku. Tato série obsahuje celkem 15 simulací bez cyklování. Předmětem zkoumání byla změna teploty taveniny z výchozí teploty 730 °C na 690 °C, kdy jednotlivé simulace byly rozděleny po 10 °C. Odstupňování teploty proběhlo při plnicích tlacích 0,03 MPa, 0,025 MPa a 0,020 MPa. Nastavení předehřevu formy pro nízkotlaké lití se stanovilo na 355 °C, teplota bezprostřední blízkosti formy na 50 °C. Z výsledků první série bude níže popsán průběh plnění, který je shodný pro většinu simulací až na simulace obsahující cyklování.

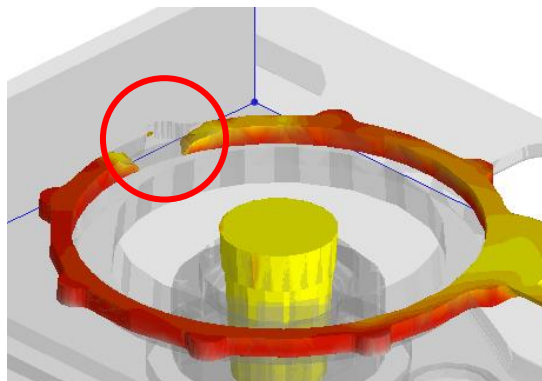
### 5.6.1 Průběh plnění



Obrázek 5.33 Průběh plnění formy

Zachycené jednotlivé podíly tekuté fáze ukazují procentuální vyplnění dutiny formy, které je vyznačeno vlevo nahoře u jednotlivých snímků na obrázku 5.33. Nastavené parametry dané simulace jsou: Plnicí tlak 30 kPa, teplota taveniny 730 °C, předehřev formy 355 °C. Podíl tekuté fáze při vyplnění formy na 99,9 % vychází podle podmínek této simulace na 80 %.

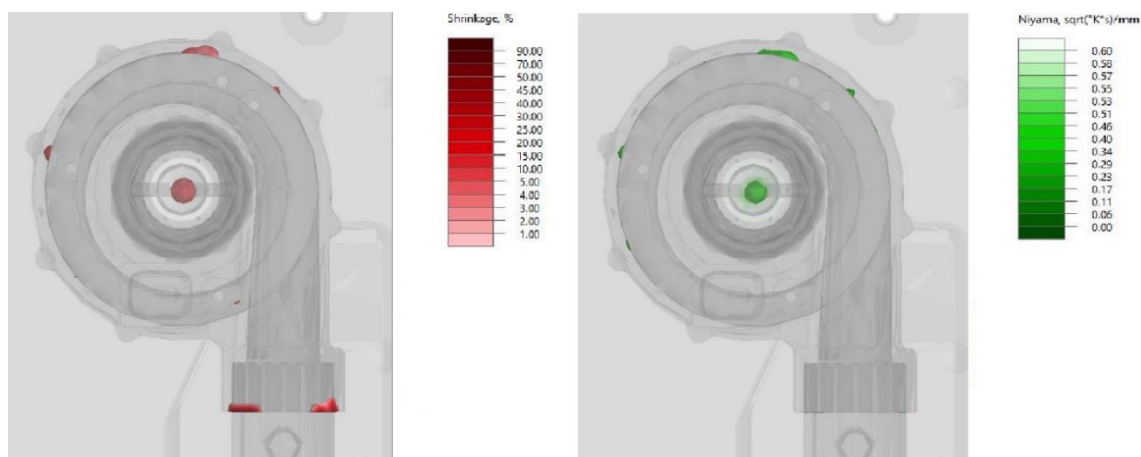
Analýza plnění odhalila potencionální místo vzniku možných vad odlitku (obrázek 5.34). Toto místo je uvedeno na obrázku níže. Příčina potencionálních vad spočívá v tom, že tavenina při plnění dutiny vystoupá do úrovně, nejnižšího místa pískového jádra v oblasti hrdla a začne se přelívat do nižších prostorů formy a dále postupuje dutinou dvěma směry a vyplňuje tak obvod skříně. Nebezpečí nastává v případě, kdy podmínky licího procesu a to konkrétně teplota taveniny nebo plnicí tlak - rychlost klesne, a při setkání postupujících proudů taveniny má již tavenina nízkou teplotu.



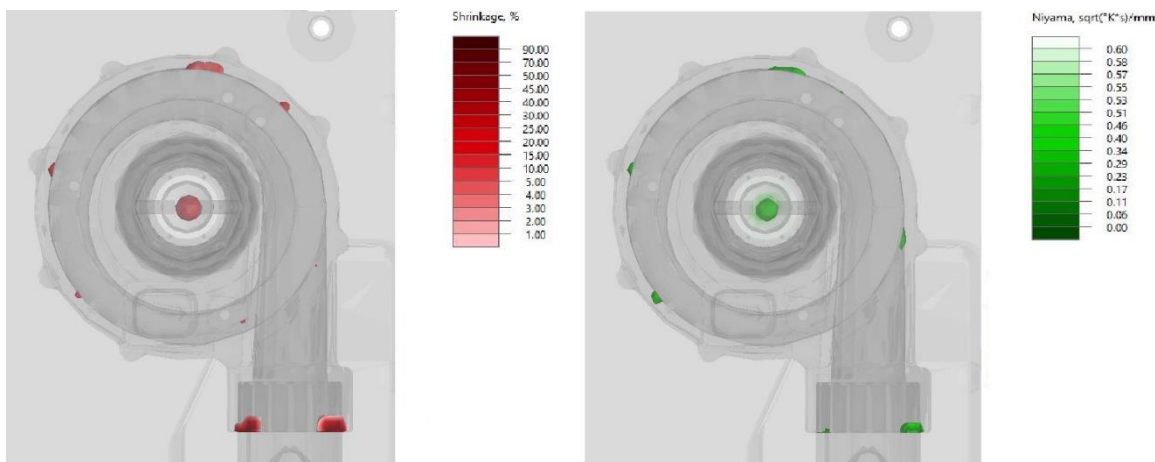
Obrázek 5.34 Potencionální místo vad

### 5.6.2 Simulace pro plnicí tlak 30 kPa

Licí proces byl simulován pro daný plnicí tlak a předehřev formy byl stanoven na 355 °C. Teplota taveniny v jednotlivých simulacích byla 730 °C, 720 °C, 710 °C, 700 °C, 690 °C. Nejlepší výsledky simulací byly zaznamenány pro teploty 710 °C a 700 °C. Naopak nejhorší stav nastal pro nejvyšší a nejnižší teplotu.



Obrázek 5.35 Dosažení výsledky pro  $p=30\text{kPa}$ ,  $T=700^\circ\text{C}$

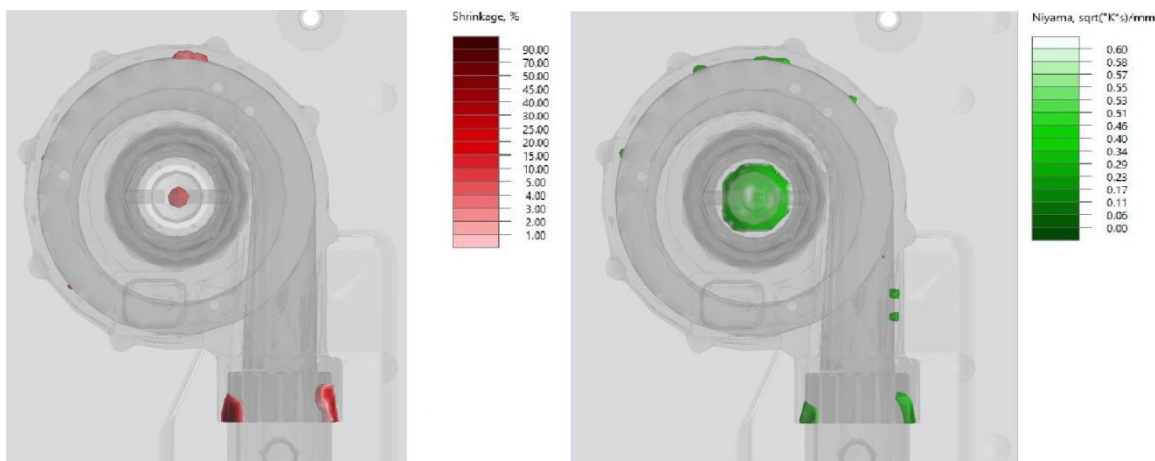


Obrázek 5.36 Dosažené výsledky pro  $p=30\text{kPa}$ ,  $T=690^\circ\text{C}$

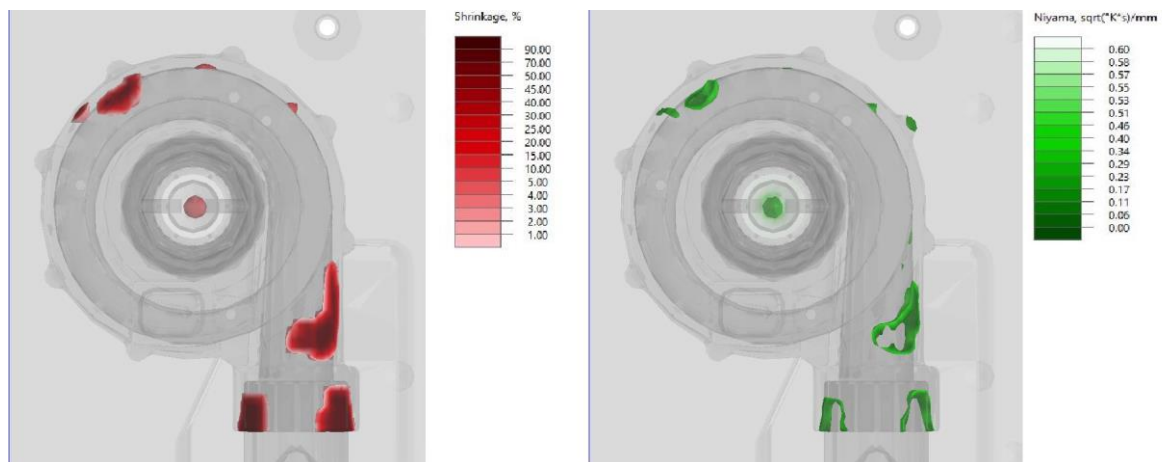
Obrázky 5.35 a 5.36 zobrazují predikci vad staženin a kritérium niyama. Staženiny jsou reprezentovány červenou barvou a niyama je zobrazena pomocí zelené barvy. Výskyt obou těchto složek ve stejných místech odlitku předpovídá vznik vad v reálném odlitku.

### 5.6.3 Simulace pro plnicí tlak 25 kPa

Pro daný plnicí tlak byla odstupňována teplota taveniny od  $730^\circ\text{C}$  do  $690^\circ\text{C}$  po  $10^\circ\text{C}$ . Účel této simulace opět mířil k získání nejlepších výsledků při určité kombinaci teplot. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při teplotě  $720^\circ\text{C}$ , nejhorší stav nastal při  $690^\circ\text{C}$ .



Obrázek 5.37 Dosažené výsledky pro  $p=25\text{kPa}$ ,  $T=720^\circ\text{C}$

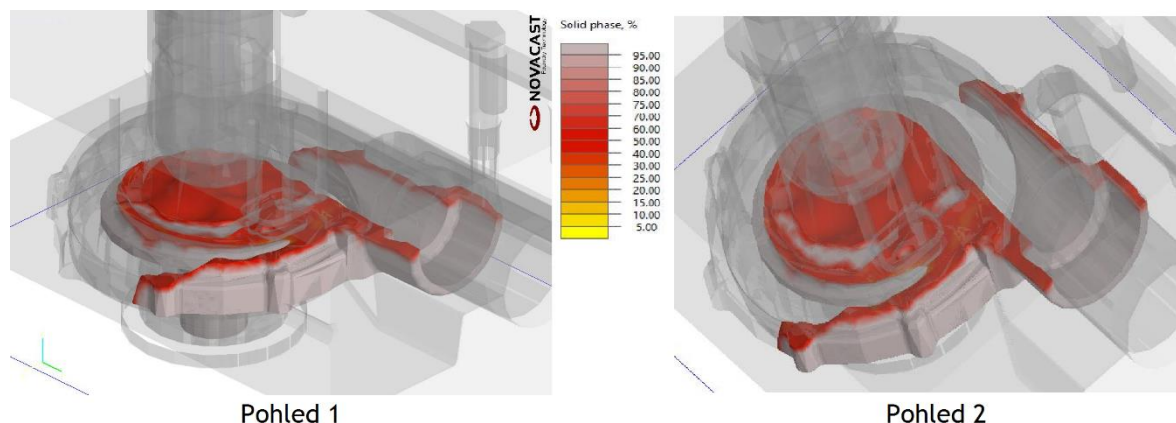


Obrázek 5.38 Dosažené výsledky pro  $p=25\text{kPa}$ ,  $T=690^\circ\text{C}$

Simulace ukázala problém pro teplotu  $690^\circ\text{C}$ , kdy již nedochází k vyplnění dutiny formy v oblasti hrdla a podchlazení taveniny na danou teplotu je již velmi kritický stav. Naopak pro teplotu  $720^\circ\text{C}$  se výskyt vad v obvodové části podstatně snížil. Ve všech případech se projevuje problém s chladnutím kovu a odvodu vzdušného vaku v horní části hrdla.

#### 5.6.4 Simulace pro plnicí tlak 20 kPa

Rozmezí teplot pro tento plnicí tlak byl  $730^\circ\text{C}$  až  $690^\circ\text{C}$  po  $10^\circ\text{C}$ . Výsledek první simulace již ukázal, že při tomto tlaku i při použití nejvyšší teploty taveniny není možné vyplnit dutiny formy, obdobné výsledky byly dosaženy i pro nižší teploty taveniny. Plnění formy taveninou dosáhlo hodnoty 50,221 %. Malý plnicí tlak vede ke snížení rychlosti plnění formy, což zvýší čas plnění formy a tavenina pak vychladne a ztuhne.



Obrázek 5.39 Dosažený výsledek pro  $p=20\text{kPa}$ ,  $T=730^\circ\text{C}$

Výsledek zobrazený na obrázku 5.39 zachycuje stav, kdy se tavenina přelila přes jádro v jeho nejnižší části a vyplnila malou přední část odlitku. Varianta s plnicím tlakem 20 kPa bez použití tepelně izolačního povlaku není tedy použitelná pro žádnou ze zvolených teplot taveniny.

## 5.7 Simulace s lepším tepelně izolačním povlakem

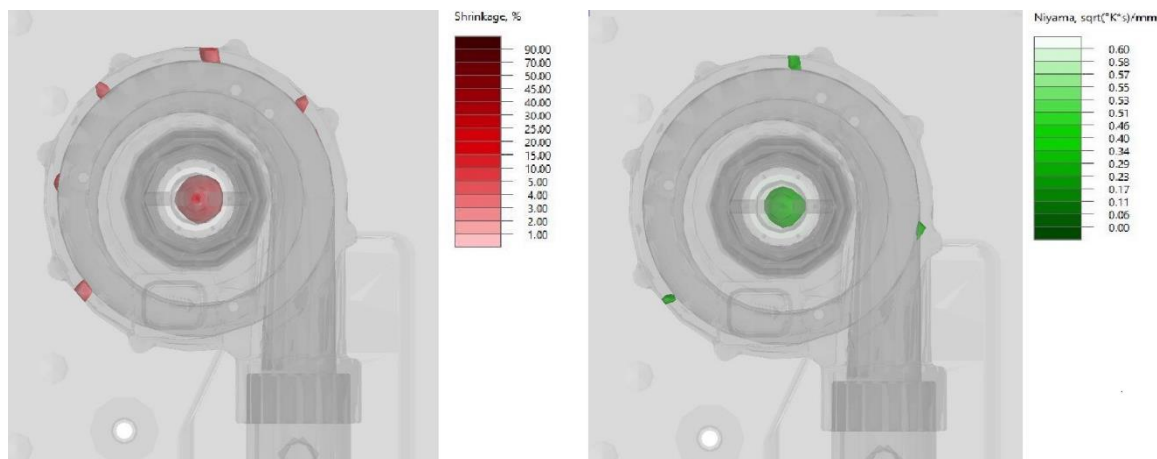
Podmínky lícího procesu jsou ovlivňovány tepelně izolačním povlakem, který slouží mimo jiné jako ochrana před abrazivním účinkem taveniny, ale hlavně jako tepelná bariéra přestupu tepla mezi taveninou a samotnou formou pro nízkotlaké lití. Tepelná bariéra tedy slouží pro zvýšení času, kdy je tavenina v tekutém stavu. Bylo tedy namístě zanést tuto podmínku do simulací. Vlastním měřením jsem určil tloušťku povlaku, která se reálně vyskytuje na formách a to 37  $\mu\text{m}$ . Problém ovšem nastal s dalším parametrem nezbytným pro simulaci a to je tepelná vodivost daného povlaku. Pro účely této série simulací byla použita tepelná vodivost 0,20  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ; 0,25  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ; 0,30  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Tyto hodnoty tepelné vodivosti vycházely z literatury a článku, které se této problematice věnují [35] [36], protože hodnota tepelné vodivosti pro používaný povlak ve slévárně nebyla zatím k dispozici. Tepelná vodivost používaného izolačního povlaku byla získána od dodavatele daného povlaku až po provedení těchto simulací, kdy konkrétní hodnota tepelné vodivosti povlaku disponuje hodnotou 11,74  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Porovnání tepelných vodivostí povlaků ukazuje, že v literatuře jsou používány povlaky, které patří k těm lepším, jež jsou k dispozici na trhu v této oblasti. Takže tyto simulace slouží jako ověření výpočtu jak daný software pracuje s tepelně izolačními povlaky. Také musí být věnována pozornost povlakům s menší tepelnou vodivostí, která se pohybuje v řádech desetin, s tepelnou vodivostí povlaku používaného v provozu s řádově 50 x větší hodnotou.

Tato série obsahuje 19 jednotlivých simulací, kdy byl zkoumán účinek tepelně izolačního povlaku s kombinacemi maximálního plnicího tlaku 0,030MPa a minimálního plnicího tlaku 0,020MPa, s teplotami taveniny 730 °C, 715 °C a 700 °C. Teplota přehřevu formy pro nízkotlaké lití byla nastavena na 355 °C pro všechny simulace v této sérii.

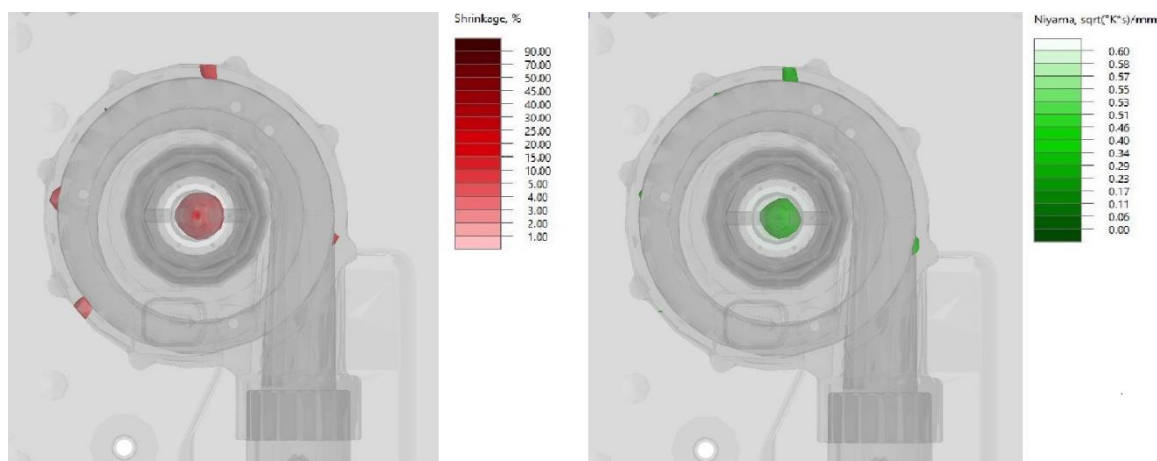


### 5.7.1 Simulace s plnicím tlakem 30 kPa a povlakem $0,20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

S těmito parametry se provedly tři simulace a to pro teploty  $730 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  s krokem  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ . Parametry povlaku byly nastaveny, jak je zmíněno výše, a to vodivost, která vychází z publikací  $0,20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Tloušťka povlaku  $37 \text{ }\mu\text{m}$ , která byla změřena přímo ve slévárně.



Obrázek 5.40 Dosažené výsledky pro  $p=30\text{kPa}$ ,  $T=715^\circ\text{C}$

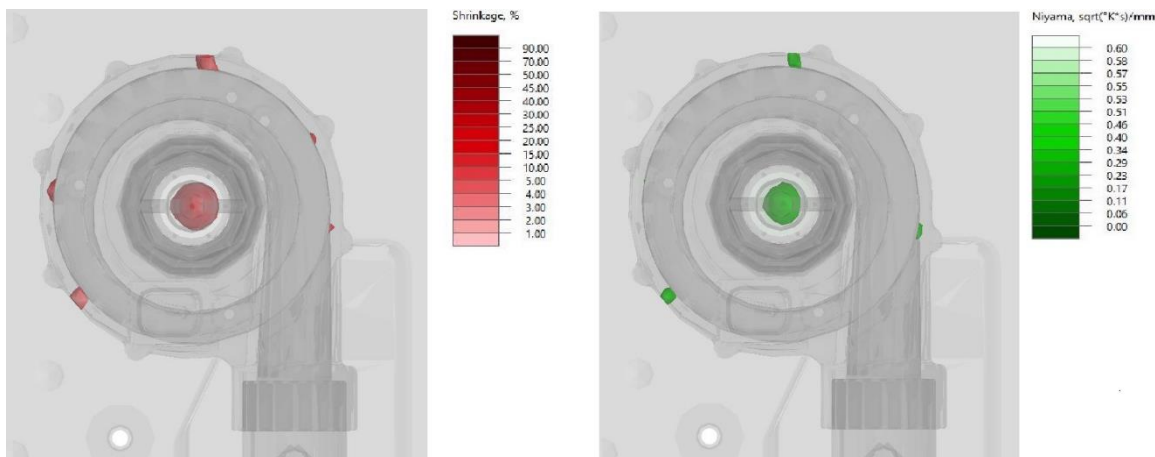


Obrázek 5.41 Dosažené výsledky pro  $p=30\text{kPa}$ ,  $T=700^\circ\text{C}$

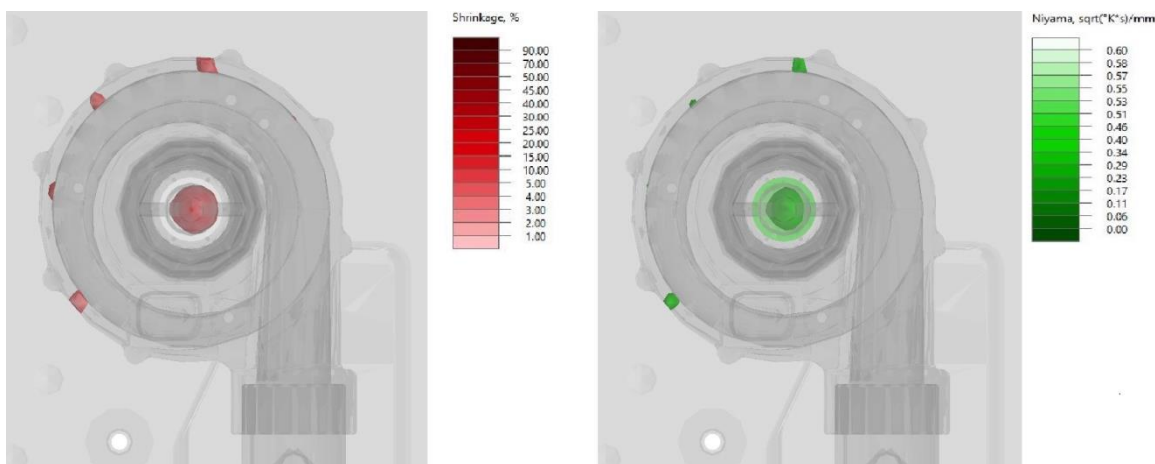
Výsledky simulace ukazují, že nejlepších výsledků bylo dosaženo pro teplotu taveniny  $715 \text{ }^\circ\text{C}$ . Co do počtu vad vyšla nejhůře simulace pro teplotu taveniny  $700 \text{ }^\circ\text{C}$ , kdy ovšem na obrázku 5.14 nejsou dobře vidět, ale při větším zvětšení jsou již tyto vady patrné. Snímky výsledků je možné si prohlédnout v příloze č. na CD. Teplota taveniny  $730 \text{ }^\circ\text{C}$  vykazovala výsledky pohybující se mezi teplotami  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $715 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 5.7.2 Simulace s plnicím tlakem 30 kPa a povlakem $0,25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Jako u předešlé simulace byly simulovány teploty tavení  $730^\circ\text{C} - 700^\circ\text{C}$ , teplota předehřevu formy  $355^\circ\text{C}$ . Změna proběhla v nastavení tepelné izolace daného povlaku na hodnotu  $0,25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , jehož tloušťka zůstala  $37 \mu\text{m}$ .



Obrázek 5.42 Dosažený výsledky pro  $p=30\text{kPa}$ ,  $T=715^\circ\text{C}$

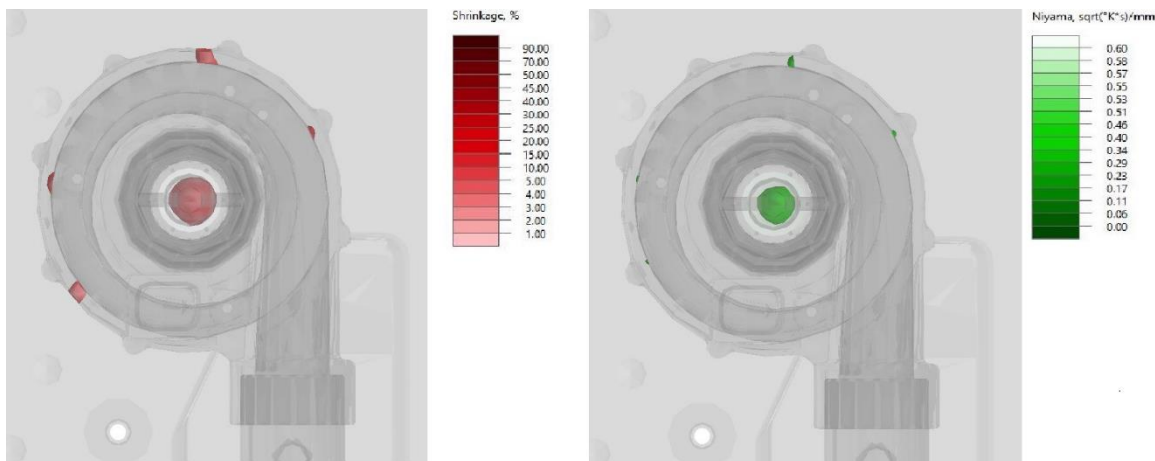


Obrázek 5.43 Dosažené výsledky pro  $p=30\text{kPa}$ ,  $T=730^\circ\text{C}$

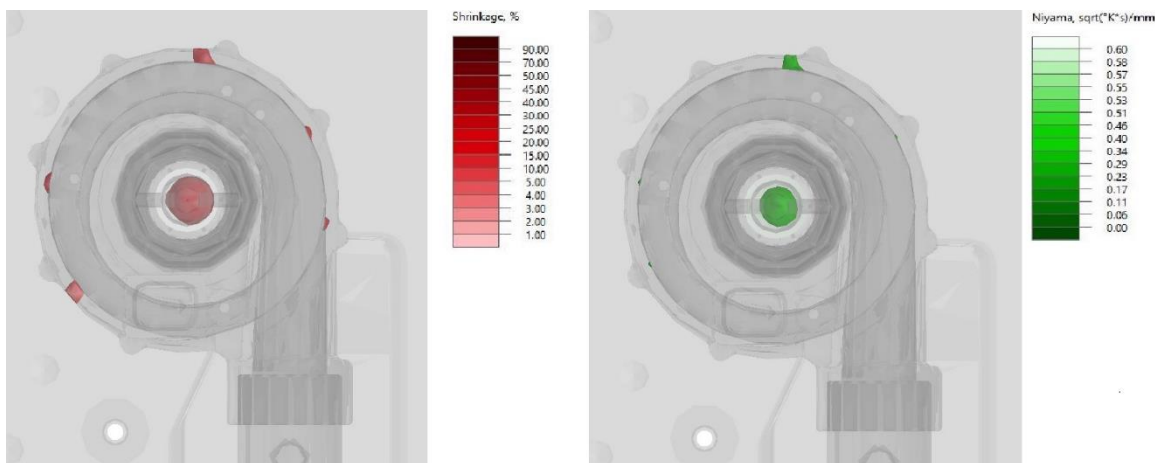
Nejllepší výsledek byl dosažen u teploty taveniny  $715^\circ\text{C}$ , kde vady vyskytující se v odlitku jsou o něco větší než u verze simulace na obrázku 5.40. Ze simulovaných variant s tímto povlakem nejhůře vyšla verze s teplotou taveniny  $730^\circ\text{C}$ . Zatím uvedené simulace vykazují vždy výskyt vad v oblasti, která je zmíněna v kapitole 5.6.1 a zobrazená na obrázku 5.33.

### 5.7.3 Simulace s plnicím tlakem 30 kPa a povlakem $0,30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Teplotní odstupňování taveniny zůstalo  $730 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  po  $15^\circ\text{C}$ . Veškeré parametry se shodují jako v předešlých kapitolách 5.7.1 a 5.7.2. Pozměněna byla tepelná vodivost na povlaku na hodnotu  $0,30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$



Obrázek 5.44 Dosažené výsledky pro  $p=30\text{kPa}$ ,  $T=700^\circ\text{C}$

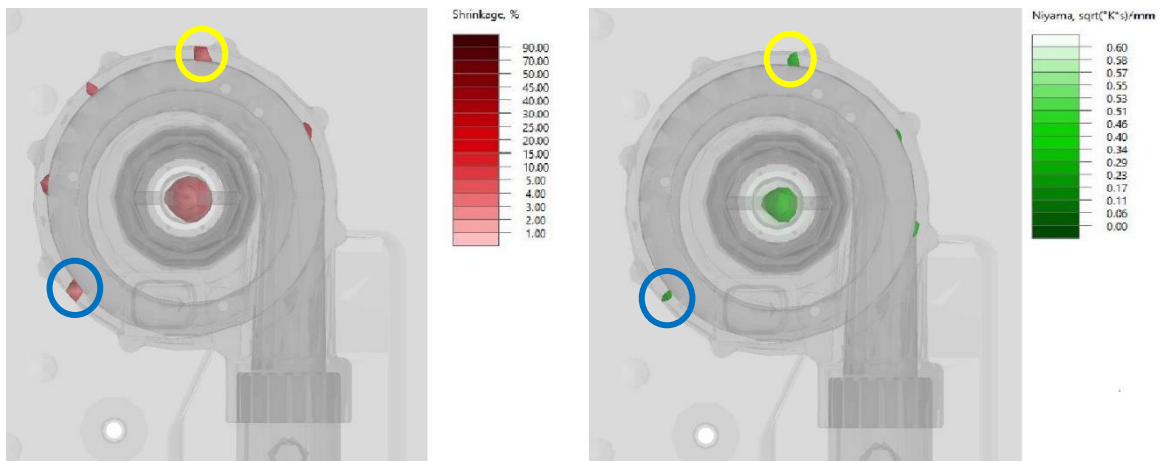


Obrázek 5.45 Dosažené výsledky pro  $p=30\text{kPa}$ ,  $T=730^\circ\text{C}$

Poslední simulace pro plnicí tlak 30 kPa přinesly výsledky, kdy nejlepší výstup byl zaznamenán pro kombinaci daného plnicího tlaku, teploty taveniny  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  a tepelné vodivosti povlaku  $0,30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Tento výsledek je nejlepším dosaženým výstupem ze všech simulací, kdy byl zkoumán vliv povlaku s malou tepelnou vodivostí a je zobrazen na obrázku 5.44. Ovšem vada v problematickém místě uvedeném na obrázku 5.33 přetrvává v menším nebo větším měřítku, jak ukazují jednotlivé výsledky simulací.

### 5.7.4 Simulace s plnicím tlakem 25 kPa a povlakem $0,25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Teplota taveniny byla nastavena na hodnotu  $720 \text{ }^\circ\text{C}$ , teplota předehřevu zůstala stejná jako v předešlých případech a to  $355 \text{ }^\circ\text{C}$ . Tato simulace má nastaveny všechny parametry na střední hodnoty, které mohou při lití nastat, až tedy na tepelnou vodivost povlaku, která je podstatně lepší a reprezentuje kvalitnější produkt.

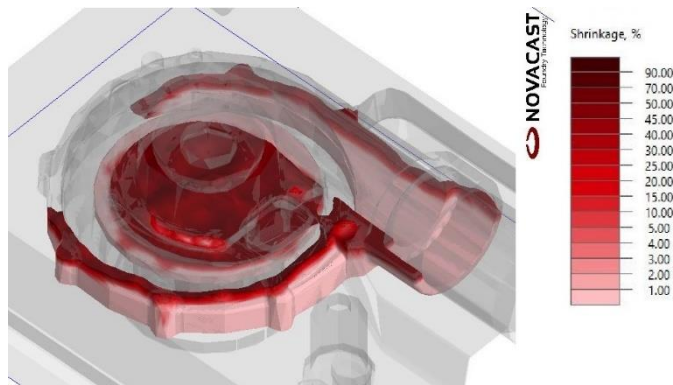


Obrázek 5.46 Dosažené výsledky pro  $p=25\text{kPa}$ ,  $T=720^\circ\text{C}$

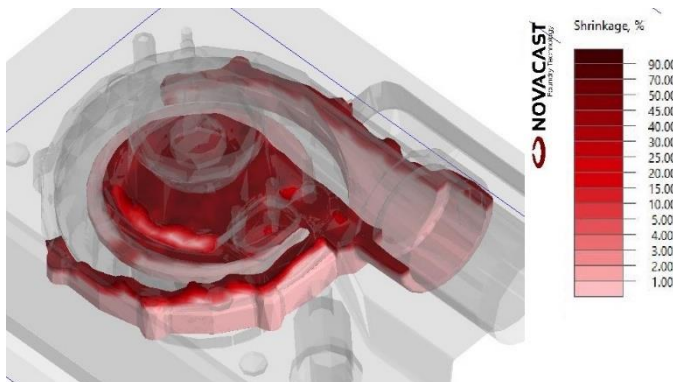
Tato simulace svými středními hodnotami parametrů plnění ukazuje, že se jedná o hodnoty, pod které by dané veličiny neměli klesnout v kontextu simulací, které následují dále v kapitole 5.7.5. Hodnoty kritéria niyama spolu se staženinami opět predikují vznik vady v oblast střetu proudů taveniny (žluté ovály na obrázku 5.46). Další problematické místo zvýšené rizikovosti pórovitosti dle výsledků simulace je zvýrazněno modrými kruhy (obrázek 5.46). Charakteristika vady, která je predikována v celé tloušťce stěny odlitku, by mohla způsobit výslednou pórovitost takové hodnoty, že by ovlivnila těsnost stěny dmychadlové skříně.

### 5.7.5 Simulace s plnicím tlakem 20 kPa a tepelně izolačními povlaky

Parametry jednotlivých simulací byly odstupňovány podle tepelně izolačních parametrů povlaku  $0,20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ;  $0,25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ;  $0,30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Dále byla každá charakteristika tepelně izolačního povlaku opět simulována pro tři teploty  $730 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $715 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $700 \text{ }^\circ\text{C}$ . Teplota předehřevu formy obdobně jako u předešlých simulací byla  $355 \text{ }^\circ\text{C}$ . Stěžejním parametrem byl plnicí tlak 20 kPa, který rozhodl jako v případě simulací (kapitola 5.6.4) o výsledku všech provedených simulací pro tento plnicí tlak.



Obrázek 5.47 Dosáhnuté výsledky pro  $T=730^{\circ}\text{C}$  a  $\text{vod.}=0,20\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$



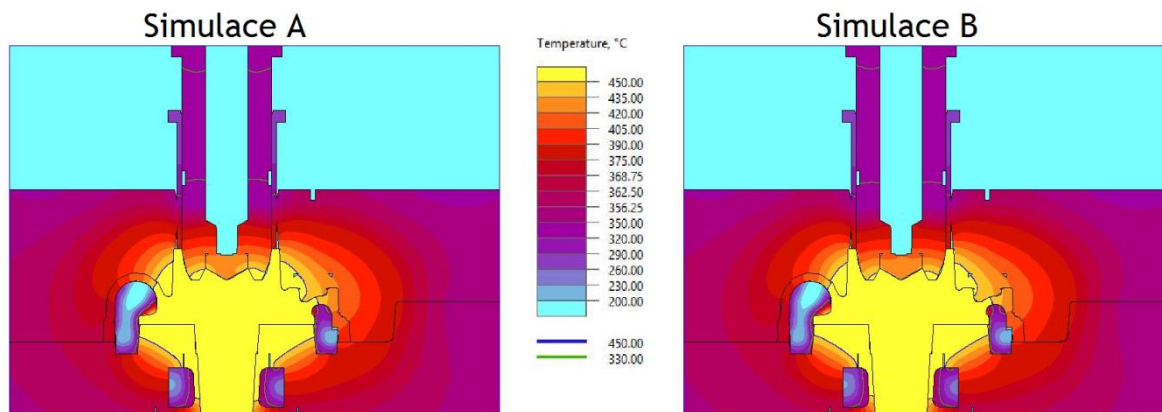
Obrázek 5.48 Dosáhnuté výsledky pro  $T=700^{\circ}\text{C}$  a  $\text{vod.}=0,30\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Veškeré simulace provedené pro dané kombinace teplot taveniny a izolačních vlastností povlaku vykazovaly podobný charakter pro plnicí tlak 20kPa. Rychlost plnění byla nízká a došlo tak k předčasnému ztuhnutí taveniny. Pro nejvyšší teplotu taveniny  $730^{\circ}\text{C}$  a nejlepší izolační vlastnost povlaku  $0,20\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  dosáhlo plnění dutiny formy hodnoty 50,4 % (obrázek 5.47). Pro nejnižší teplotu taveniny  $700^{\circ}\text{C}$  a nejhorší izolační vlastnost povlaku  $0,30\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  bylo výsledné plnění podle simulace 53,8 % (obrázek 5.48). Hodnota plnicího tlaku 20 kPa a z toho odvozená plnicí rychlost dutiny nízkotlaké formy je nedostačující.

### 5.7.6 Porovnání teplotních polí formy v závislosti na povlaku

Otázka rozdílu přestupu tepla a účinnosti povlaků lze získat pomocí zobrazení teplotního pole formy pro nízkotlaké lití. Pro tuto analýzu byly použity simulace s parametry:

- Teplota taveniny v obou případech  $730^{\circ}\text{C}$
- Plnicí tlak v obou případech 30 kPa
- Teplota předehřevu formy pro obě simulace  $355^{\circ}\text{C}$
- Tepelná vodivost povlaku simulace A  $0,30\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
- Tepelná vodivost povlaku simulace B  $0,20\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$



Obrázek 5.49 Porovnání teplotních polí dvou rozdílných povlaků

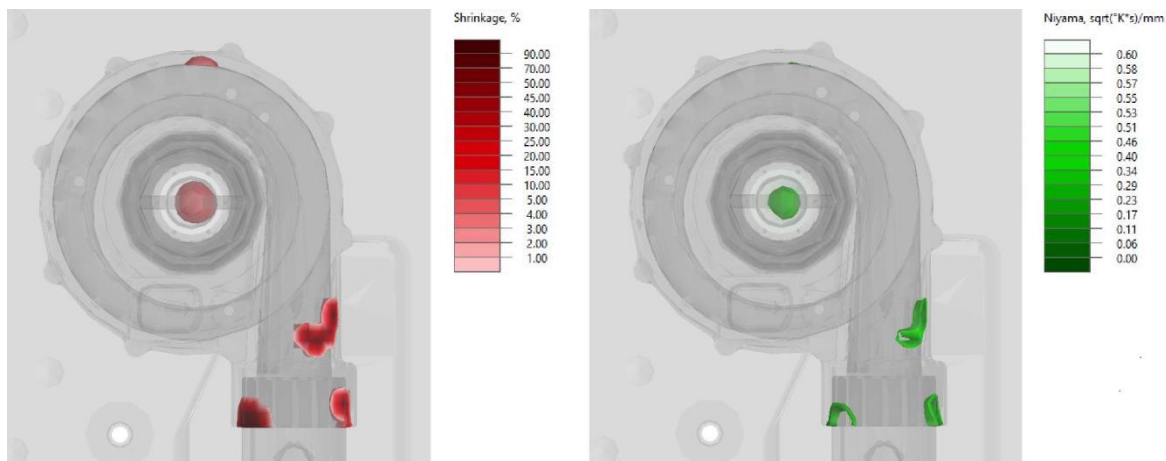
Při zkoumání byly pozorovány rozdíly v průběhu izoterm. Z této analýzy jsou pořízeny snímky simulací A a B zobrazujících tepelná pole formy. Varianta A s vyšší tepelnou vodivostí povlaku vykazuje větší příjem tepla do formy a posun modré izotermy směrem dále od odlitku. Interpretace posunu izotermy je taková, že čím blíže se nachází zkoumaný bod k odlitku v rámci formy varianty A, tím vyšší bude teplota v daném bodě oproti variantě B.

## 5.8 Simulace s reálným povlakem CA CG 555

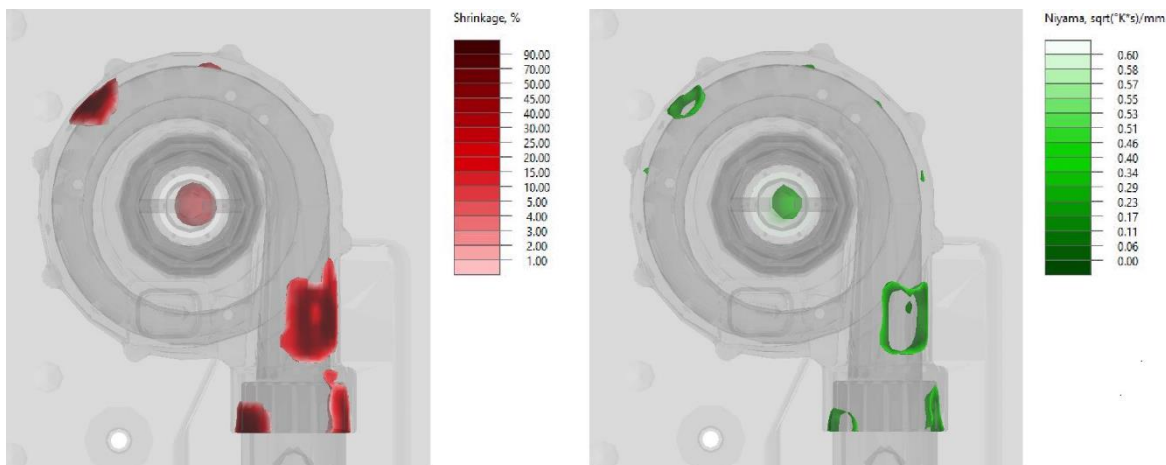
Po získání informace ohledně tepelné vodivosti povlaku BONDERITE L - CA CG 555 od dodavatele tepelně izolačního povlaku se mohlo přejít k simulacím, které nejvíce charakterizují reálný stav. Simulace s tímto povlakem byly provedeny v základu pro tři plnicí tlaky a to 30 kPa, 25 kPa a 20 kPa. Tloušťka povlaku odpovídá naměřené hodnotě 37  $\mu\text{m}$  a odstupňované teploty taveniny 730  $^{\circ}\text{C}$  – 700  $^{\circ}\text{C}$  po 10  $^{\circ}\text{C}$ . Dále byly uskutečněny simulace pro tloušťku povlaku 0,1 mm s plnicím tlakem 25 kPa a teplotou taveniny opět v rozmezí 730  $^{\circ}\text{C}$  – 700  $^{\circ}\text{C}$ . Také byla vypočtena simulace, kterou se ověřilo navržené odvodušnění v oblasti hrdla dmychadlové skříně. Celkem v této sérii simulací s tepelně izolačním povlakem bylo realizováno 17 simulací.

### 5.8.1 Simulace s plnicím tlakem 30 kPa s povlakem $11,74 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Teploty taveniny jsou v rozmezí  $730^\circ\text{C} - 700^\circ\text{C}$  po  $10^\circ\text{C}$ , teplota předehřevu formy byla nastavena na  $355^\circ\text{C}$ . Plnicí tlaky byly pro jednotlivé simulace stejné a to 30 kPa. Porovnávají byly mezi sebou čtyři simulace dle nastavené teploty taveniny.



Obrázek 5.50 Dosažené výsledky pro  $p=30\text{kPa}$ ,  $T=730^\circ\text{C}$



Obrázek 5.51 Dosažené výsledky pro  $p=30\text{kPa}$ ,  $T=700^\circ\text{C}$



Obrázek 5.52 Tuhá fáze pro  $T=730^{\circ}\text{C}$



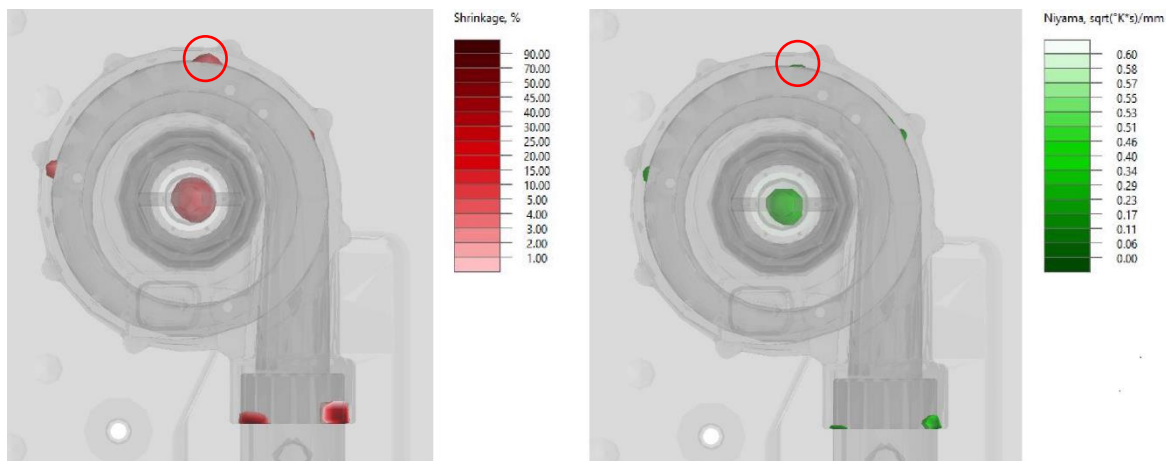
Obrázek 5.53 Tuhá fáze pro  $T=700^{\circ}\text{C}$

Výsledky simulací pro plnicí tlak 30 kPa nebyly příznivé ani pro jednu simulovanou teplotu taveniny. Vady vyskytující se v odlitku jsou důsledkem velké plnicí rychlosti formy, kdy vzniká problém s odvzdušněním. Získaná data ze simulací pro teploty  $720^{\circ}\text{C}$  a  $710^{\circ}\text{C}$  jsou obdobného charakteru a vady se zvětšují s klesající teplotou taveniny. Na obrázcích 5.50 až 5.51 jsou uvedeny snímky výsledků pro mezní teploty  $730^{\circ}\text{C}$  a  $700^{\circ}\text{C}$ .

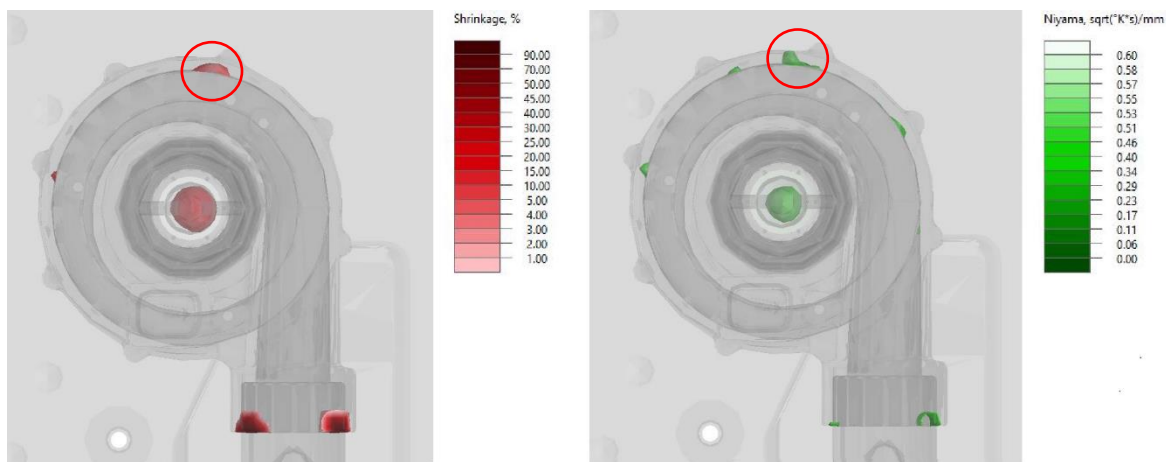


### 5.8.2 Simulace s plnicím tlakem 25 kPa s povlakem $11,74 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Tato simulace se svými nastavenými parametry nejvíce blíží realitě a to zejména právě díky plnicímu tlaku. Teploty taveniny pro jednotlivé simulace zůstávají v rozmezí  $730 \text{ }^\circ\text{C}$  až  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  a teplota předehřevu formy je také stejná a to  $355 \text{ }^\circ\text{C}$



Obrázek 5.54 Dosažené výsledky pro  $p=25\text{kPa}$ ,  $T=720^\circ\text{C}$

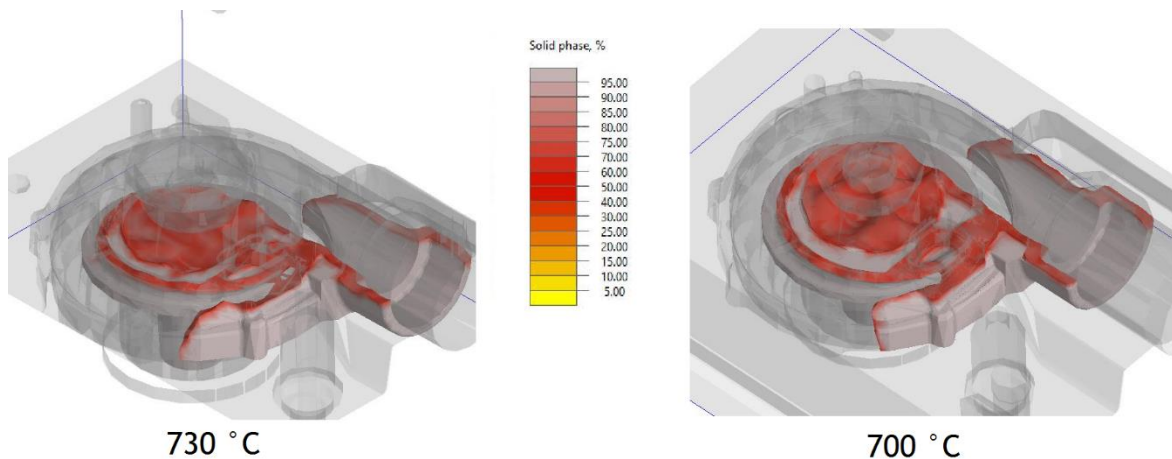


Obrázek 5.55 Dosažené výsledky pro  $p=25\text{kPa}$ ,  $T=700^\circ\text{C}$

Obrázky 5.54 a 5.55 zachycují nejlepší dosažený výsledek pro teplotu  $720 \text{ }^\circ\text{C}$  a nejhorší výsledek simulace pro teplotu taveniny  $700^\circ\text{C}$ . Při parametrech těchto simulací nedocházelo k masivnímu problému týkající se odvzdušnění jako v případě simulací v předcházející kapitole 5.8.1. Simulace stále vykazují problém v oblasti setkání proudu tavenin zvýrazněné červenými kroužky na daných obrázcích.

### 5.8.3 Simulace s plnicím tlakem 20 kPa s povlakem $11,74 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Pro plnicí tlak 20 kPa, jak již je patrné z předešlých simulací pro tento plnicí tlak, nedopadly výsledky simulací příznivě pro žádnou variantu teplot a daný tepelně izolační povlak. Použité teploty byly čtyři od 730 °C do 700°C po 10°C a tepelně izolační povlak s uvedenou vodivostí a tloušťkou 37 μm.

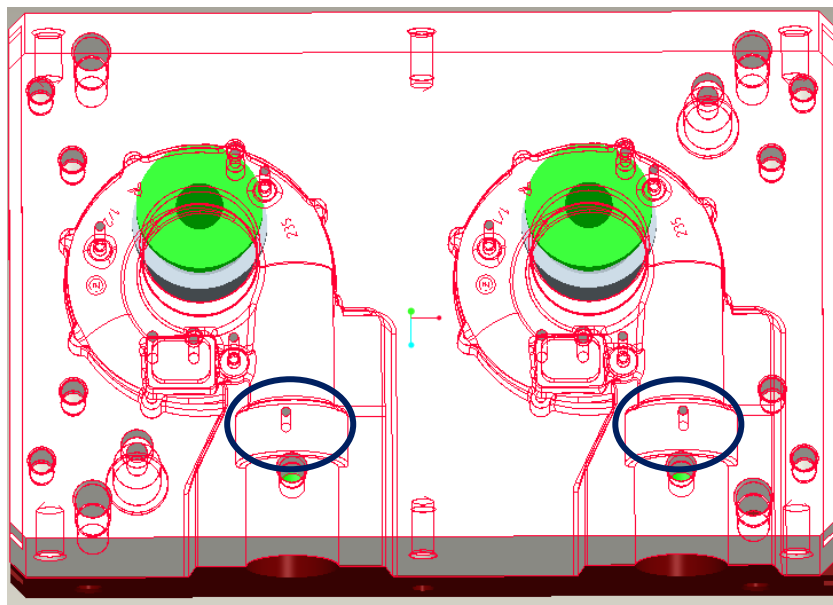


Obrázek 5.56 Dosažené výsledky pro  $p=20\text{kPa}$

Jak ukazuje obrázek 5.56 shrnující nejlepší (730 °C) a nejhorší (700°C) dosažené výsledky těchto simulací, tak v nejlepším případě byla forma vyplněna z 55% a v nejhorším případě z 52 %. Veškeré výsledky pro plnicí tlak 20 kPa jsou nepřijatelné bez rozdílu použití tepelně izolačních povlaků.

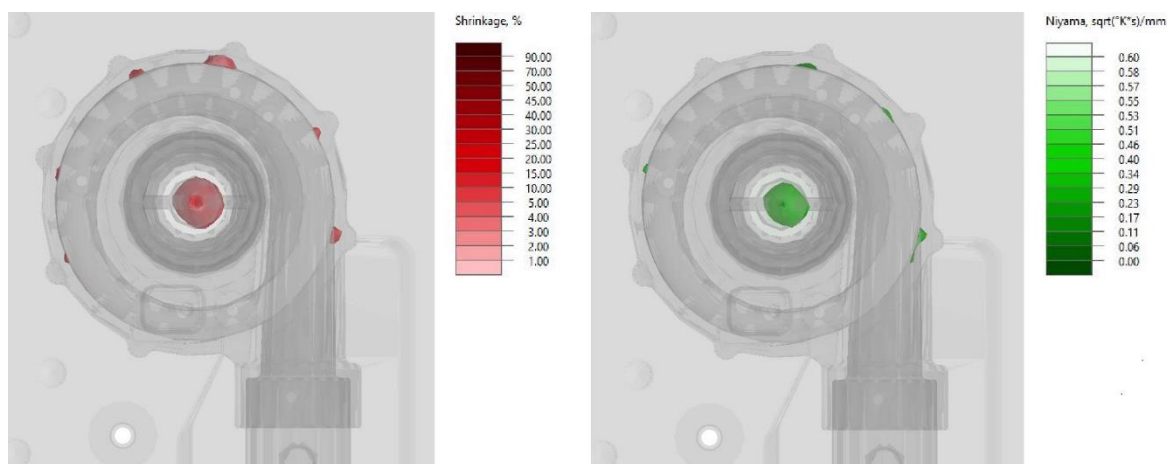
### 5.9 Simulace dodatečného odvzdušnění formy

Po celkové analýze provedených simulací a výsledků litých vzorků při zkušební sérii a zmapování problému byl proveden zásah do formy, který spočíval v odvzdušnění formy v horní části hrdla odlitku. Toto odvzdušnění je namístě, protože se jedná o nejvyšší oblast odlitku, která je svou geometrií uzavřená od odvzdušnění již provedeného na formě. Po načtení upravené geometrie do simulačního softwaru následovalo zadání počátečních a okrajových podmínek a informací o licím procesu pro započítání simulace a ověření dané úpravy. Upravená 3D data posloužila dále jako vstup pro simulace, využívající cyklování. Vytvořené odvzdušnění je zobrazeno na obrázku 5.57 a zvýrazněno v modrých oválech.



Obrázek 5.57 Navržené odvzdušnění formy

Pro simulaci byla zadána teplota taveniny 720 °C, plnicí tlak 25kPa, tepelně izolační povlak s teplotní vodivostí  $11,74 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , teplota předehřevu formy 355 °C. Jelikož je forma symetrická, mohly být simulace provedeny pro jednu pozici formy, což vedlo ke zkrácení výpočetní doby simulací. Tyto parametry byly zvoleny tak, aby nejvíce odpovídaly parametrům reálného lícího procesu.



Obrázek 5.58 Dosažené výsledky přidaného odvzdušnění

Výsledky reprezentované na obrázku 5.58 predikcí staženin a kritériem niyama pro predikci pórovitosti ukazují, že přidané odvzdušnění splnilo svůj účel a již nedochází ke vzniku problémů v oblasti hrdla dmychadlové skříně turbodmychadla. Predikce vad po obvodu skříně, respektive ve stěně odlitku ovšem setrvávají a pro jejich analýzu je třeba užít simulací využívajících cyklování lícího procesu.

## 5.10 Cyklování lícího procesu v simulaci

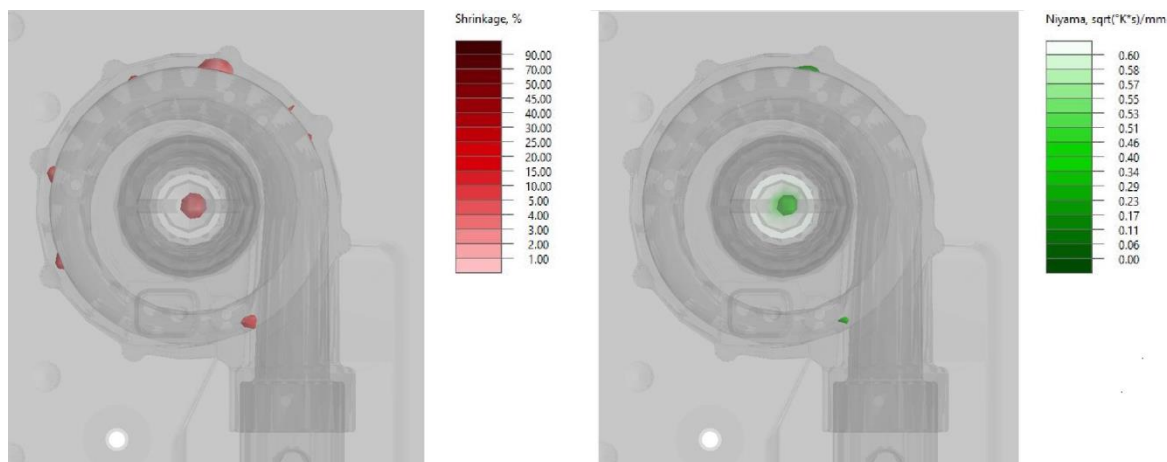
Díky cyklům v simulacích můžeme zohlednit další faktory, které ovlivňují lící proces, a následně můžeme i zlepšit kvalitu samotného odlitku. Simulace bez cyklování odhalí prvotní závažné problémy, jako je například výše popsané odvodušnění formy nebo parametry lícího procesu jako je plnicí tlak, při němž již není možné odlít odlitek. Absence cyklování také nezachytí teplotní vývoj na čase odlitku ani nářadí, kdy může docházet k teplotnímu přetěžování nářadí přestupem tepla z taveniny do formy. Z tohoto důvodu bylo nutné simulovat lící proces s využitím cyklování, aby byly odhaleny případné problémy.

### 5.10.1 Simulace 1 s cyklováním

Parametry této simulace s cyklováním vycházejí z hodnot stanovených výrobním postupem a ze změřených časů výrobního cyklu v provozu. Teplota taveniny 720 °C, plnicí tlak 25 kPa, tepelně izolační povlak s tepelnou vodivostí 11,74 W\*m<sup>-1</sup>\*K<sup>-1</sup> a tloušťkou 37μm, přehřev formy 350 °C. Cyklování bylo nastaveno do režimu, kdy proběhne požadovaných 9 tuhnutí odlitku včetně časů, kdy je forma otevřena a provádí se vyjímání odlitku a příprava formy na další cyklus, poslední desátá simulace proběhne včetně plnění a tuhnutí odlitku. Pro účel cyklování musel být výrobní cyklus rozdělen do dvou částí, kdy v první části je forma uzavřena a probíhá plnění, tuhnutí a dotlak, druhá část cyklu se skládá z jednotlivých fází a to otevření formy, vyjmutí odlitků, ošetření formy, založení jader a sítěk a uzavření formy. Určité fáze v rámci simulace šlo sjednotit a zadat jeden čas takže celkový počet zadaných fází do simulace byl zredukován na tři:

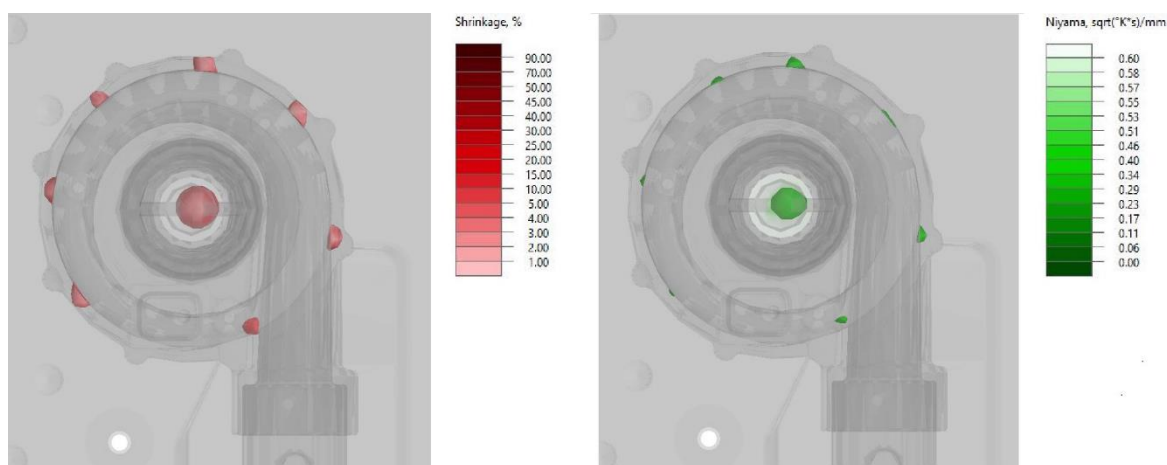
- Otevření formy a vyjmutí odlitku 96 s
- Ošetření formy 3 s
- Založení jader, sítěk a zavření formy 15 s

Ošetření formy spočívalo v ofuku spodní části formy stlačeným vzduchem pro odstranění písku z jader, aby byla dělicí plocha bez nečistot. Objemový průtok stlačeného vzduch byl stanoven na 1 l\*s<sup>-1</sup> a teplota stlačeného media 20 °C.



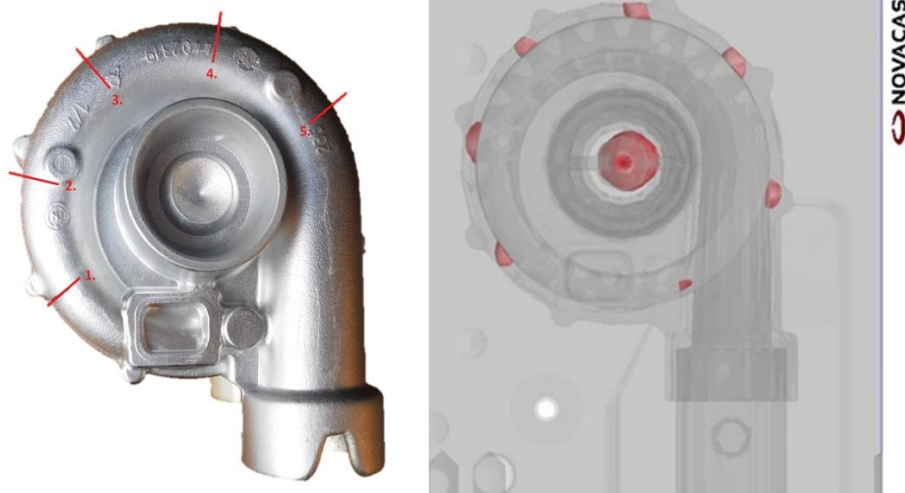
Obrázek 5.59 Výsledek prvního cyklování

Výsledek simulace s cyklováním zobrazuje predikci vad staženin a kritéria niyama na obrázků 5.59. Za zvolených podmínek licího cyklu jsou výsledky poměrně příznivé. Dané parametry licího cyklu jsou nejlepší, jakých lze dosáhnout, ale při skutečném lití jsou dané podmínky z různých důvodů málokdy dodrženy. Jedná se především o čas, kdy je forma otevřená. Přesto setrvává problém při střetu taveniny. Průběžné výsledky cyklů dosahují hodnot, které jsou reprezentovány jedním představitelem a to na obrázku níže.



Obrázek 5.60 Průběžné výsledky prvního cyklování

Na základě průběžných výsledků jednotlivých cyklů bylo rozhodnuto použít tyto výstupy pro vyznačení problematických míst, které budou podrobeny metalografické zkoušce a použity k vyhodnocení porosity ve vyznačených místech. Tato místa korespondující s výsledky simulace jsou vidět na obrázku 5.61.



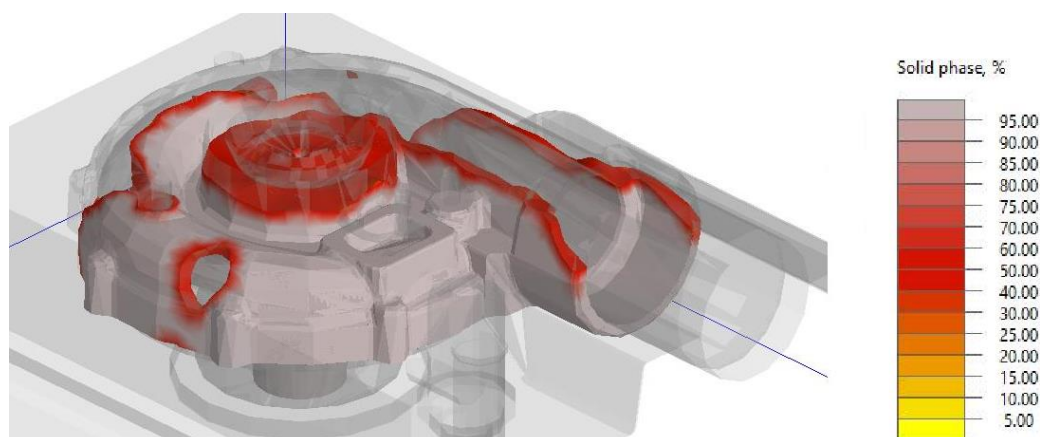
Obrázek 5.61 Vstup pro metalografii

### 5.10.2 Simulace 2 s cyklováním

Parametry této simulace jsou: Teplota taveniny 720 °C, plnicí tlak 22 kPa, teplota předehřevu formy 350 °C, tepelně izolační povlak s vodivostí  $11,74 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a tloušťkou 37  $\mu\text{m}$ , počet cyklů 5, kdy 4 počítají pouze tuhnutí odlitku a pátý cyklus počítá plnění i tuhnutí odlitku. Ofuk formy stlačeným vzduchem s objemovým průtokem  $1 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Tři fáze licího cyklu:

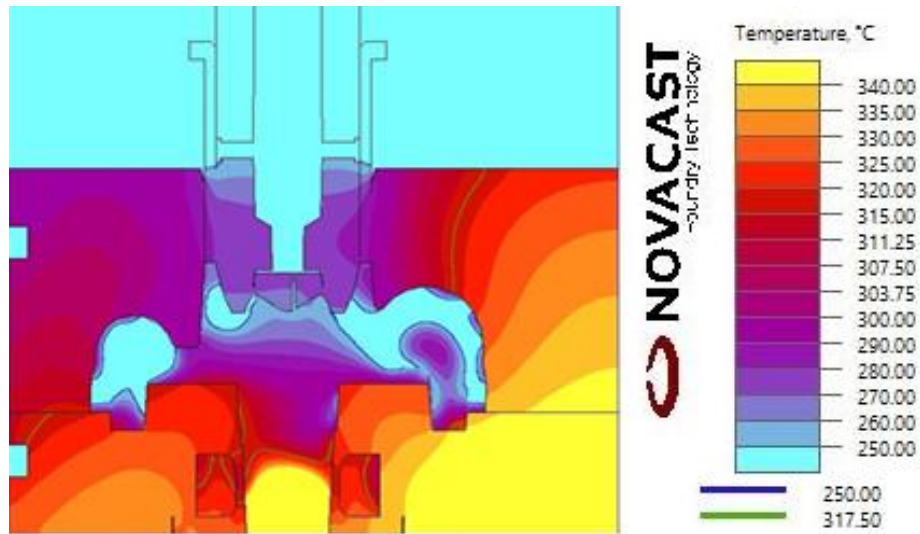
- Otevření formy a vyjmutí odlitku 136 s
- Ošetření formy 3 s
- Založení jader, sítěk a zavření formy 15 s



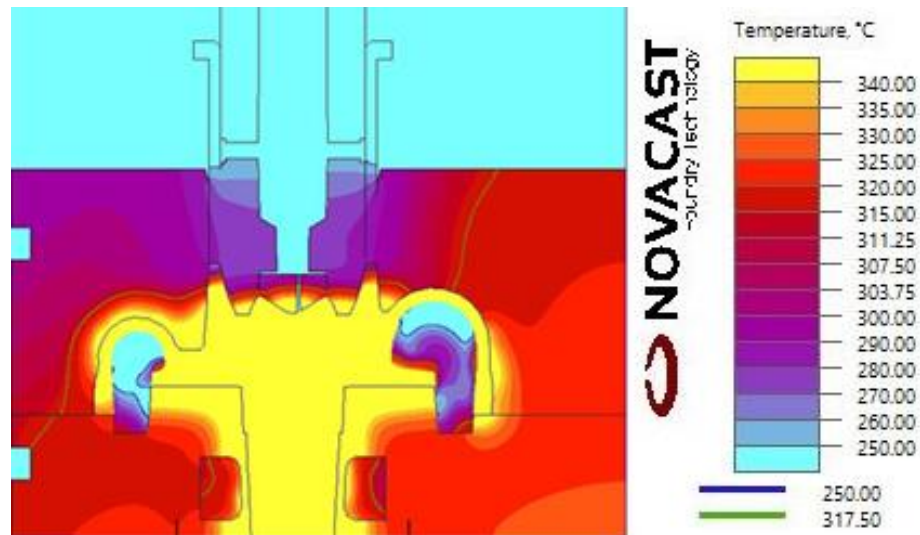
Obrázek 5.62 Výsledek simulace 2 s cyklováním

Simulace s cyklováním a danými parametry přinesla výsledky, které nejsou příznivé, protože došlo k předčasnému zchladnutí taveniny a dutina formy byla vyplněna pouze ze 73 %. Na základě tohoto obdržného výsledku byla provedena analýza teplotního pole formy této simulace a simulace popsané v kapitole 5.10.1.

**Teplotní pole simulace 2 s cyklováním**

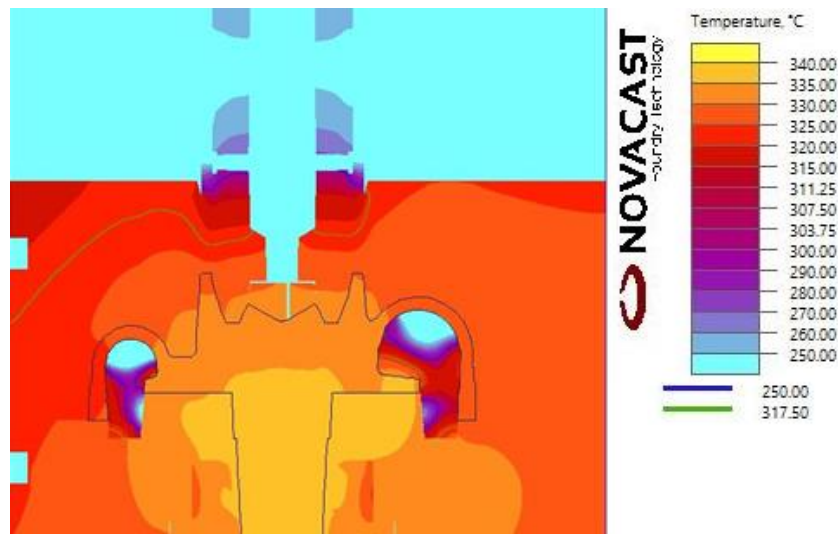


Obrázek 5.63 Teplotní pole při začátku plnění formy



Obrázek 5.64 Teplotní pole při ztuhnutí taveniny (73% vyplněno)

### ***Teplotní pole simulace 1 s cyklováním***



Obrázek 5.65 Teplotní pole při začátku plnění, kdy je dutina formy vyplněna

Analýza teplotních polí simulací s cyklováním ukázala vliv parametrů licího cyklu a to zejména čas, po který je forma otevřena a je připravována na další cyklus. Se zvyšující se dobou, kdy je forma otevřena, klesá její teplota v určitých místech až na 280 °C, což je nepřijatelný stav. Nízká teplota formy s kombinací nevhodného plnicího tlaku respektive plnicí rychlosti formy taveninou pak vede k předčasnému ztuhnutí taveniny, jak ukazují výsledky simulace 2 s cyklováním. Těmto podmínkám licího cyklu je tedy nutno předcházet, ale tento stav nenastal a nezvyšovala se zmetkovitost.

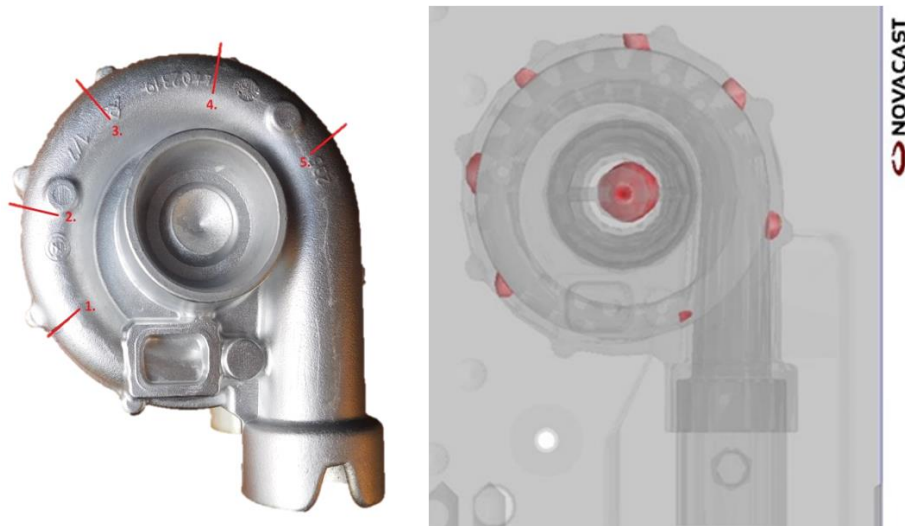
### **5.11 Metalografická zkouška a zkoušky materiálu tavby**

Zkoušky materiálu a samotného odlitku jsou nezbytnou součástí výroby, protože podávají zpětnou vazbu slévárně ohledně odvedené práce. V rámci slévárny se řeší zkoušky chemického složení tavby a také jsou kontrolovány mechanické vlastnosti materiálu pomocí tahové zkoušky. Před zahájením samotného lití se provede odlití zkušebních vzorků pro spektrografickou zkoušku a vzorky pro tahovou zkoušku. Metalografická zkouška včetně vyhodnocení porosity byla v rámci této práce provedena v laboratořích ČVUT v Praze na Ústavu strojírenské technologie.

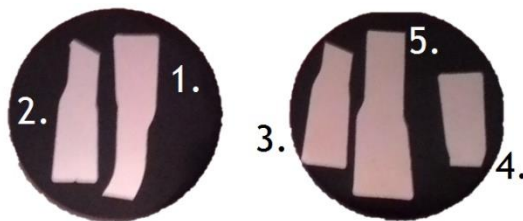
#### **5.11.1 Metalografická zkouška a vyhodnocení porosity**

Jedním z výstupů provedených simulací bylo určení míst řezů pro metalografické vzorky. Místa jednotlivých řezů jsou vidět na obrázku 5.66, kdy byly zhotoveny vzorky z odlitku a výbrusy byly vytvořeny kolmo na stěnu odlitku. Celkem se vyhodnocovalo 5 vzorků a to včetně porosity.





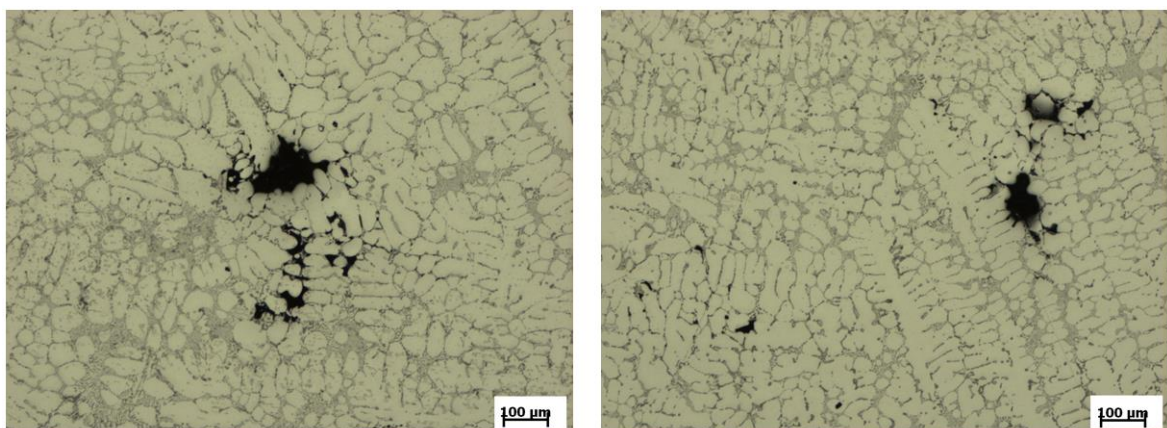
Obrázek 5.66 Určení míst pro metalografické vzorky



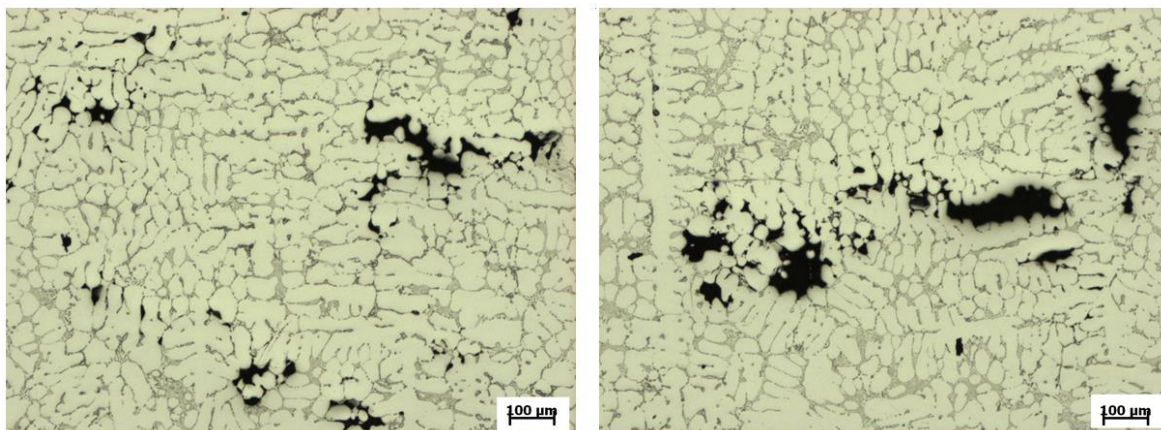
Obrázek 5.67 Metalografické výbrusy daných oblastí

Vzorky pro metalografii byly zalaty do polymerního držáku, který je uzpůsoben pro použití automatizovaného zařízení pro tvorbu výbrusů. Jak již bylo zmíněno metalografická zkouška a vyhodnocení porosity proběhly v laboratořích ČVUT v Praze na Ústavu strojírenské technologie.

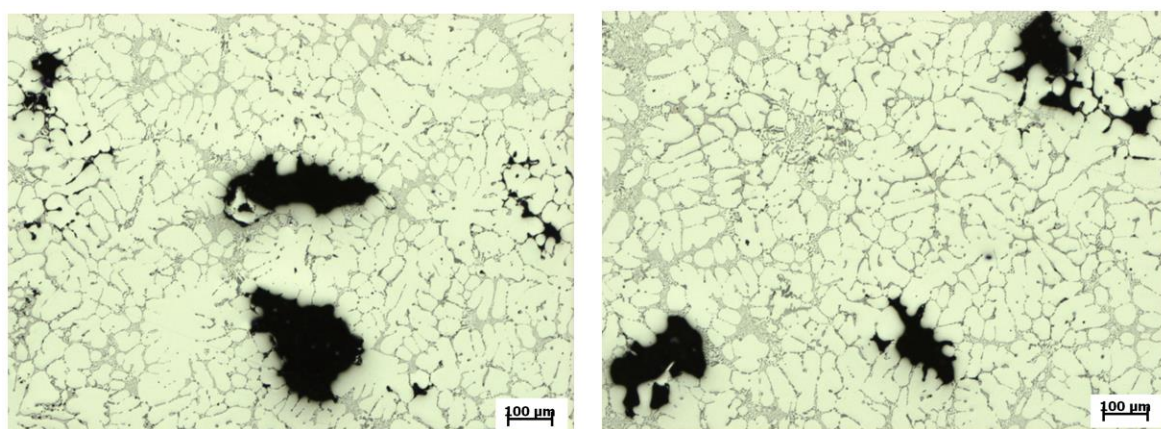
Snímky metalografických výbrusů z mikroskopu:



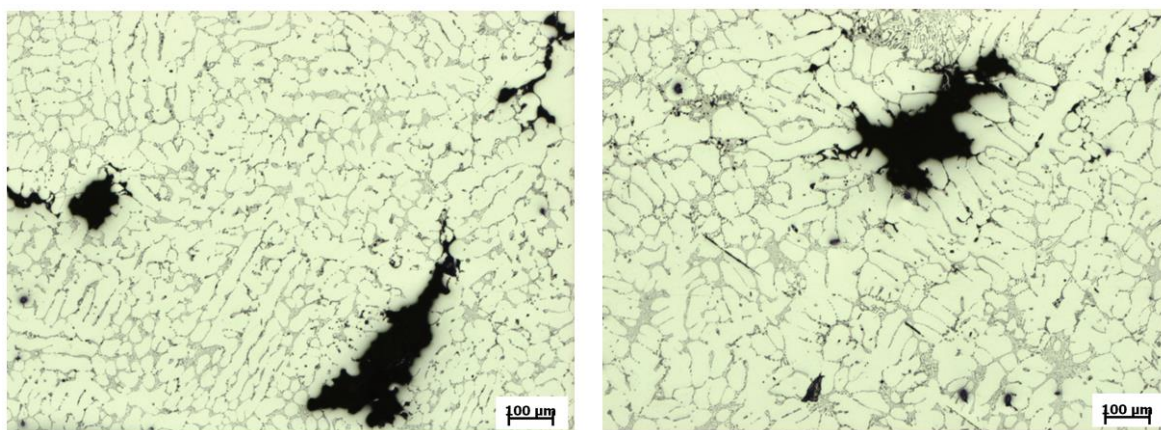
Obrázek 5.68 Snímky oblasti 1



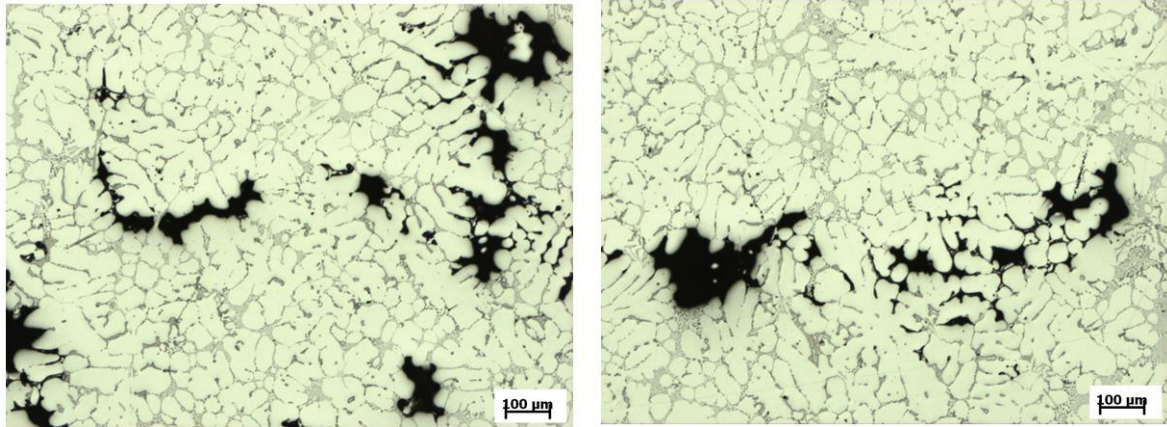
Obrázek 5.69 Snímky oblasti 2



Obrázek 5.70 Snímky oblasti 3



Obrázek 5.71 Snímky oblasti 4



Obrázek 5.72 Snímky oblasti 5

Metalografické výbrusy se provedly na odlitku, který nebyl tepelně zpracován, tomu odpovídá i struktura zachycená na snímcích, na kterých se velmi vyskytuje pórovitost. Kromě pórovitosti je vidět světlá část, která představuje tuhý roztok alfa hliníku, dále jsou patrné jemné tečky, což je eutektikum tvořené především křemíkem. Jelikož se jedná o příčný řez, tak se dané eutektikum jeví jako tečky, ve skutečnosti se jedná o tyčinkovité a vláknité útvary. Tvar eutektika na snímcích je důsledkem modifikace taveniny.

Vyhodnocení porosity proběhlo na daných metalografických vzorcích pomocí automatizovaného přístroje a PC softwaru, kterým disponují laboratoře ČVUT. Výsledky porosity shrnuje tabulka níže. Vyhodnocení jednoho vzorku proběhlo vždy na třech různých místech.

Tabulka 5.4 Vyhodnocení porosity

| Oblast | Porosita [%]  |
|--------|---------------|
| 1      | 1,486 ± 0,650 |
| 2      | 2,473 ± 1,517 |
| 3      | 4,460 ± 1,230 |
| 4      | 3,340 ± 1,580 |
| 5      | 5,490 ± 0,790 |

Porosita dosahuje maximálních hodnot v oblasti 5 a to až 6,230 %. Nejmenších hodnot dosahuje v oblasti 1 a nejmenší porosita oblasti dosahuje 0,836 %. Předpoklad vycházející ze simulací, že nejhorší stav (maximum pórovitosti) bude dosaženo v oblasti 4 se neprokázal, avšak pórovitost se v oblasti 4 také vyskytuje a je vysoká.

### 5.11.2 Spektrografická zkouška

Tato zkouška se provádí v rámci slévárny pro kontrolu chemického složení taveniny. Příprava vzorku pro tuto zkoušku spočívá v odlití jednoduchého odlitku – vzorku, který je ihned odeslán na kontrolu, která schválí, že daná tavenina může být použita pro lití.



Obrázek 5.73 Vzorek pro spektrografickou zkoušku

Podle tabulky 5.6 zobrazující výsledky spektrografické zkoušky daná slitina vyhovuje chemickému složení předepsané normou a smlouvou. Vyhovuje-li tavba chemickým složením, může se přejít k lití.

Tabulka 5.5 Výsledky chemického složení slitiny

| AlSi5Cu3 T4 |         |         |           |           |             |        |
|-------------|---------|---------|-----------|-----------|-------------|--------|
| Č.M.        | Název   | Zkratka | T-min [%] | T-max [%] | Změřeno [%] | Status |
| 1           | Křemík  | Si      | 4.5       | 6.00      | 5.240       | OK     |
| 2           | Železo  | Fe      | 0         | 0.60      | 0.350       | OK     |
| 3           | Měď     | Cu      | 2.6       | 3.60      | 2.890       | OK     |
| 4           | Mangan  | Mn      | 0         | 0.55      | 0.270       | OK     |
| 5           | Hořčík  | Mg      | 0         | 0.05      | 0.045       | OK     |
| 6           | Zinek   | Zn      | 0         | 0.20      | 0.097       | OK     |
| 7           | Nikl    | Ni      | 0         | 0.10      | 0.010       | OK     |
| 8           | Cín     | Sn      | 0         | 0.05      | 0.012       | OK     |
| 9           | Olovo   | Pb      | 0         | 0.10      | 0.019       | OK     |
| 10          | Titan   | Ti      | 0         | 0.25      | 0.110       | OK     |
| 11          | Ostatní |         | 0         | 0.15      | 0.000       | OK     |

### 5.11.3 Zkouška mechanických vlastností

Obdobným způsobem jakým byl vytvořen vzorek pro spektrografickou zkoušku, je odlit vzorek – tyčka pro tahovou zkoušku. Odlitá tyčka je po ztuhnutí následně obrobena na příslušné rozměry dané normou a provedena samotná tahová zkouška.

Tabulka 5.6 Výsledky mechanických zkoušek

| AlSi5Cu3 T4 |              |              |       |       |             |        |
|-------------|--------------|--------------|-------|-------|-------------|--------|
| Č.M.        | Název        | Zkratka      | T-min | T-max | Změřeno [%] | Status |
| 1           | Mez pevnosti | Rm [MPa]     | 230   | 0.00  | 233.0       | OK     |
| 2           | Mez kluzu    | Rp 0,2 [MPa] | 110   | 0.00  | 180.0       | OK     |
| 3           | Tažnost      | A [%]        | 6     | 0.00  | 6.3         | OK     |
| 4           | Tvrдост      | HBW          | 75    | 0.00  | 79.0        | OK     |

Tabulka 5.7 obsahující výsledky mechanických zkoušek ukazuje, že materiál splňuje pevnostní charakteristiky, tažnost a tvrdost. Tyto zkoušky proběhly stejně jako spektrografická zkouška v rámci slévárny.

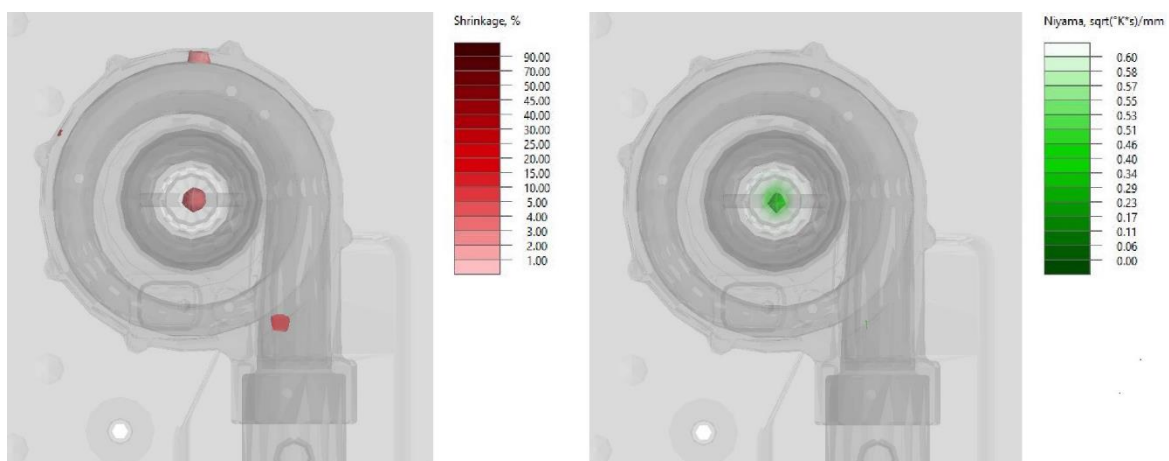
## 6 Simulace návrhů pro zlepšení

Na základě výsledků provedených simulací byly učiněny návrhy, které by měly zlepšit problematický stav u odlitku. Koncepty spočívaly v dodržení tloušťky tepelně izolačního povlaku pro obě plánované simulace. První návrh spočívá ve zvýšení plnicího tlaku. Druhý návrh vychází z problematiky střetu proudů taveniny, které vznikají přelitím taveniny v nejnižším místě jádra, a tavenina pak postupuje dvěma směry. Tvar odlitku a dané řešení určuje, že dojde k setkání těchto proudů taveniny. Tomuto stavu bude předcházet druhý návrh úpravou geometrie formy pro nízkotlaké lití. Oba dva koncepty úprav budou simulovány s cyklováním pro ověření účinnosti.

### 6.1 Návrh zvýšení plnicího tlaku

Simulace proběhla s následujícími parametry: Teplota taveniny 720°C, plnicí tlak 30 kPa, teplota předehřevu formy 360 °C, tepelně izolační povlak 11,74 W\*m<sup>-1</sup>\*K<sup>-1</sup> s tloušťkou 0,1 mm. Simulace proběhla s pětinasobným cyklováním, kdy první čtyři simulace slouží k ustálení teplotního pole formy (pouze tuhnutí) a poslední simulace proběhla včetně plnění a tuhnutí. Část, kdy je forma otevřena, byla rozdělena opět do tří fází s následujícími hodnotami:

- Otevření formy a vyjmutí odlitku 96 s
- Ošetření formy 3 s
- Založení jader, sítěk a zavření formy 15 s

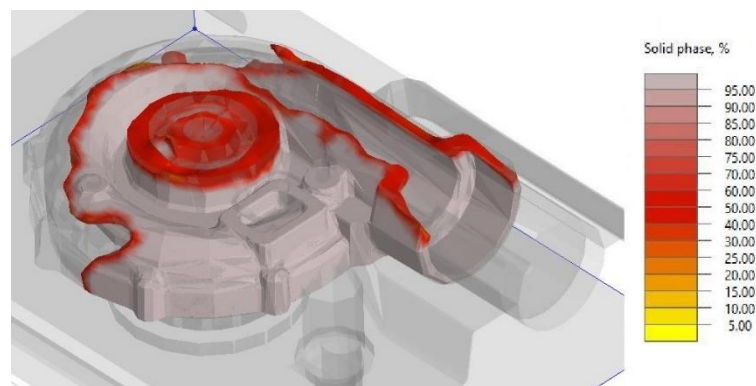


Obrázek 6.1 Výsledky cyklování a zvýšeného plnicího tlaku

Pokud je proces nastaven, tak jak udávají parametry simulace a jsou dodrženy časy fází cyklování, tak výsledek simulace ukazuje velmi příznivý výstup, což je vidět na obrázku 6.1. Predikce vad staženin a kritéria niyama naznačují, že zvýšením plnicího tlaku při

dodržení ostatních parametrů včetně tepelně izolačního povlaku dosáhne zlepšení kvality odlitku.

Pokud ovšem dojde k poklesu teploty taveniny, prodloužení času, kdy je forma otevřena, a poklesu plnicího tlaku nastane stav, kdy forma vychladne a zhorší se podmínky plnění. To má za následek předčasné ztuhnutí taveniny a vznikají zmetky, jak ukazuje obrázek 6.2.

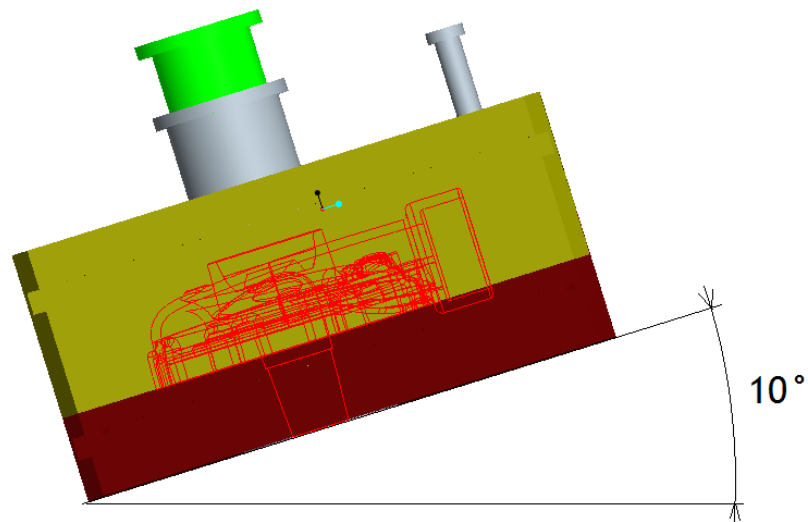


Obrázek 6.2 Následek zhoršení podmínek

Jedná se o obdobný stav jako při analýze simulace v kapitole 5.10.2. V důsledku změny podmínek dochází k chladnutí formy. Podle výsledků simulace lze určit, že proces je citlivý nejvíce na čas, po který je forma otevřená a dochází k přípravě formy na další lící cyklus. Tento čas je velmi individuální a závislý na lidském faktoru obsluhy. Další parametr, který významně ovlivňuje kvalitu odlitku, je plnicí tlak, od něhož se odvíjí plnicí rychlost dutiny formy. Velikost plnicího tlaku je závislá právě na teplotě formy, kterou ovlivňuje čas, po který je forma otevřená a chladne. Pro dosažení co nejlepší kvality odlitku vzniká požadavek na snížení časů vyjímání odlitku, přípravy formy na další cyklus, samotné pohyby lícího stroje a zručnost obsluhy.

## 6.2 Návrh úpravy geometrie formy

Myšlenka této úpravy vznikla z vyhodnocení dříve provedených simulací, kdy docházelo k přelívání taveniny v nejnižším místě jádra a ke vzniku dvou proudů, které vyplňují dutinu formy, až poté dojde k jejich střetnutí. V místě střetu pak často vznikaly vady, jak ukazovaly výsledky simulací. Podstata této úpravy vychází z naklonění formy, tak aby bylo potlačeno nejnižší místo jádra a tavenina se začala přelévat ze střední části do prostorů dutiny tvořící posléze obvodovou stěnu dmychadlové skříně turbodmychadla.

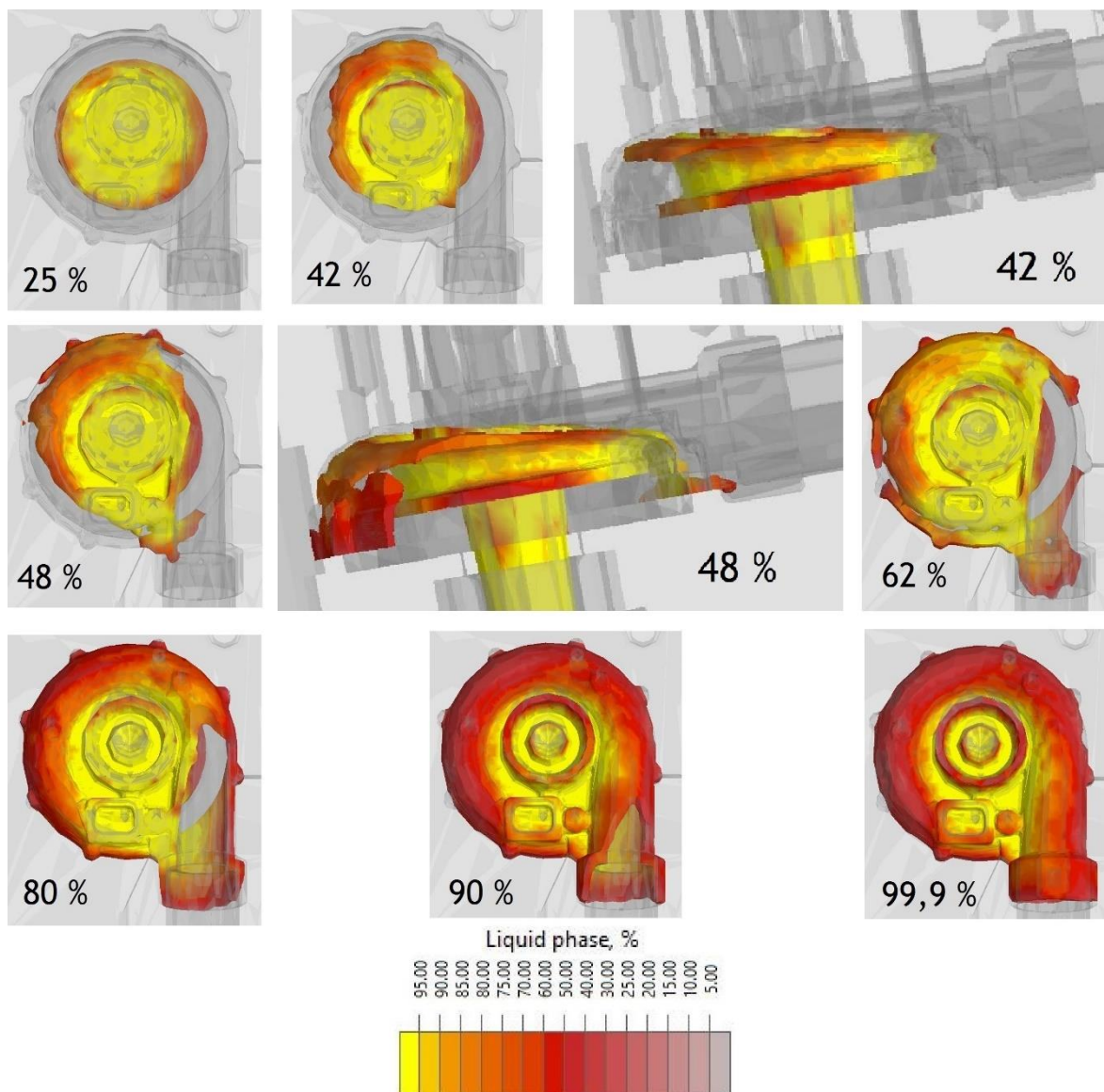


Obrázek 6.3 Schéma sklopení geometrie formy

Parametry simulace charakterizující lící proces byly nastaveny takto: Teplota taveniny 720 °C, plnicí tlak 28 kPa, tepelně izolační povlak  $11,74 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  s tloušťkou 0,1 mm, teplota předehřevu formy 360 °C. Cyklování bylo nastaveno na 5 simulací, z toho čtyři počítaly pouze tuhnutí pro vytvoření teplotního pole formy. Poslední pátá simulace proběhla s plněním a tuhnutím. Pozornost při této simulaci byla věnována průběhu plnění formy. Opět byly nastaveny tři fáze, při nichž je forma otevřena:

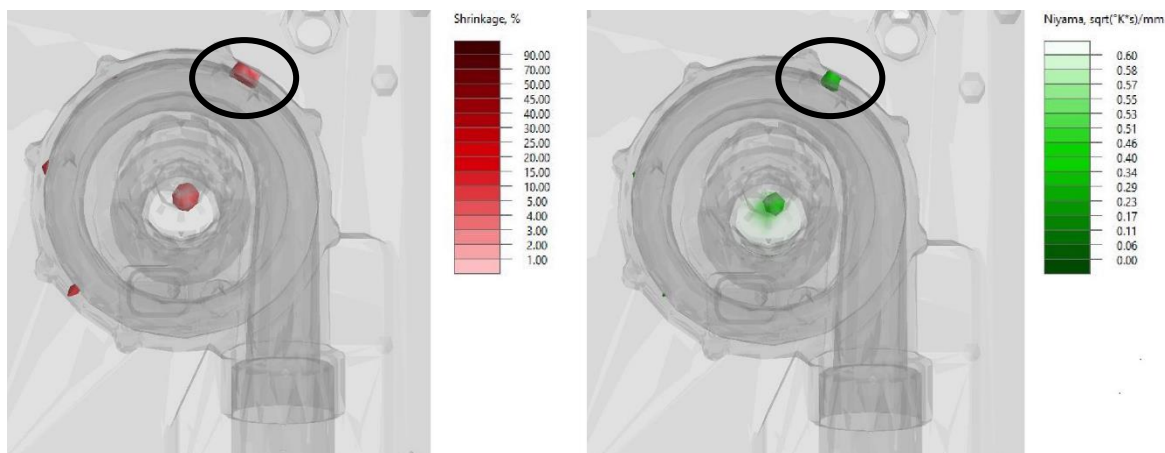
- Otevření formy a vyjmutí odlitku 96 s
- Ošetření formy 3 s
- Založení jader, sítěk a zavření formy 15 s





Obrázek 6.4 Průběh plnění při upravené geometrii

Na obrázku výše jsou uvedeny snímky průběhu plnění formy. Snímky dokládají, že tavenina vyplňuje střední část dutiny formy a až po dosažení výše hladiny odpovídající výšce pískového jádra dochází k přelití taveniny do obvodové části dmychadlové skříně, jak ukazuje snímek při plnění okolo 48 % objemu dutiny formy. Poznámka ke stupnici „Liquid phase“, procenta uvedená na snímcích popisují objem, který byl vyplněn taveninou, procenta na stupnici popisují podíl tuhé fáze a likvidu, takže tyto procenta nepopisují stejnou charakteristiku.



Obrázek 6.5 Výsledná predikce vad při úpravě geometrie

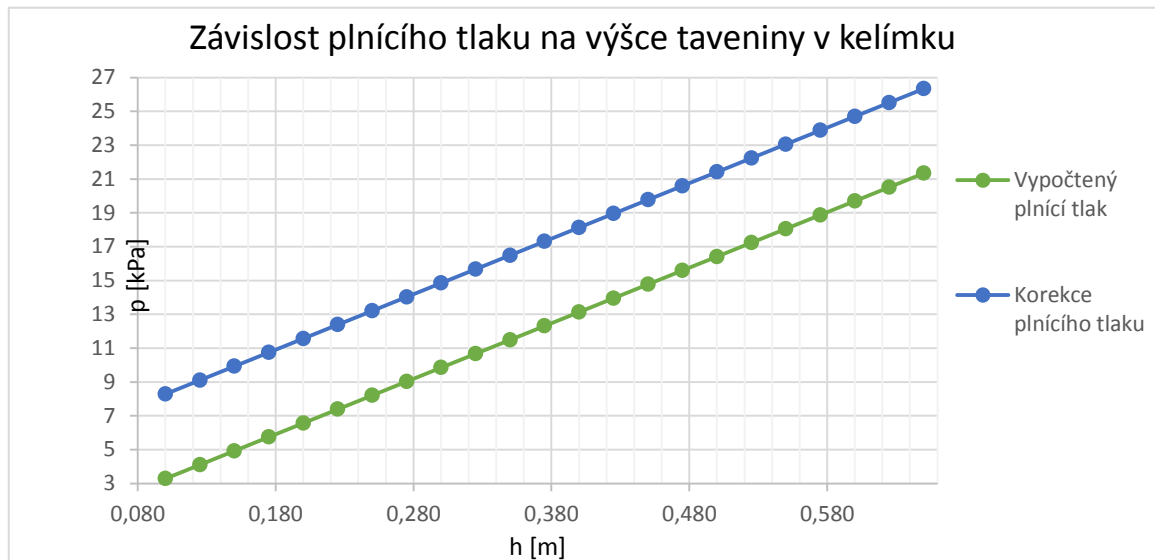
Vyhodnocení simulace z pohledu predikce staženin a kritéria niyama, již tak dobrých výsledků nedosáhlo. Vada zasahující z vnitřní plochy na vnější plochu stěny nepřináší zlepšení v porovnání s již provedenými simulacemi. Pro předejití vzniku vady by bylo na místě užít nálitku pro dané místo, popřípadě kdyby to technické možnosti licího stroje nabízely, tak nasadit temperační okruhy v problematických místech.

### 6.3 Ověření plnicího tlak

Simulace ukázaly, že hodnota plnicího tlaku je stěžejním parametrem pro získání kvalitního odlitku. Ovšem s ubývající taveninou v kelímku se musí měnit i plnicí tlak a to tak, že se jeho hodnota snižuje. To se děje v důsledku, že s ubývající taveninou také klesá objem, který musí plnicí tlak přetlačovat. Podle rovnice, rozměrů udržovací pece a hustoty lité slitiny získáme závislost uvedenou v grafu

$$p = \rho * g * \Delta h * \left(1 + \frac{d}{D}\right)^2 \quad [37]$$

|            |     |   |                       |
|------------|-----|---|-----------------------|
| $\rho$     | ... | hustota taveniny                            | [kg*m <sup>-3</sup> ] |
| $\Delta h$ | ... | výška hladiny taveniny od vstupu do trubice | [m]                   |
| $g$        | ... | gravitační zrychlení                        | [m*s <sup>-2</sup> ]  |
| $d$        | ... | průměr plnicí trubice                       | [m]                   |
| $D$        | ... | průměr kelímku                              | [m]                   |



Graf 6.1 Závislost plnicího tlaku na výšce hladiny taveniny

Výpočtem byla získána závislost plnicího tlaku na výšce hladiny taveniny v kelímku (zelená křivka), jenže tato hodnota je teoretického charakteru, protože při skutečném plnění vznikají ztráty, které je potřeba kompenzovat. Na základě simulací bylo určeno, že k pokrytí ztrát vlivem tření a změn průřezů, kudy tavenina teče, vyhovuje kompenzace plnicího tlaku okolo 5 kPa, kdy tato závislost je zobrazena modrou křivkou v grafu 6.1

#### 6.4 Ekonomické zhodnocení výroby odlitku

Výpočet kalkulace nákladů a poté určení prodejní ceny odlitku byl proveden pomocí postupu, který se používá v rámci firmy. Celý postup je uveden v příloze na CD. Výpočet kalkulace a uvedení konkrétních hodnot přímo zde nemůže být proveden, jelikož se jedná o interní data slévárny, která nepovoluje zveřejnění těchto interních dat.

Kalkulace nákladů výroby odlitku stanovená v podniku vykazuje náklady ve výši  $n_s = 1$ . Při provedení vlastního výpočtu na základě poskytnutých dat, byly určeny výrobní náklady odlitku o  $n_v = 1,14$  násobek vyšší.

Plánovaná série výroby je 5000 kusů, do nichž se nezapočítává výroba zkušební série čítající 100 kusů. Další položka, která se vyrábí v rámci slévárny, představuje samotný nástroj - forma pro nízkotlaké lití. Forma se stává majetkem zákazníka, který za ní uhradí příslušnou částku.

Výroba náradí – formy pro nízkotlaké lití obnášela vznik nákladů ve výši caa 400 000 Kč. Jak již bylo zmíněno, náradí se stává majetkem zákazníka, a tudíž nemusí být výrobní náklady náradí rozloženy do výrobní série odlitků, což snižuje výrobní náklady odlitků a tedy jejich cenu.

## 7 Závěr a doporučení

Teoretická část práce se zabývá v kapitole 2. materiály využívanými pro turbodmychadla. Pro součásti turbodmychadla, které se zhotovují pomocí technologie slévání, jsou používané technologie uvedeny v kapitole 3. Navrhnutí formy bylo provedeno podle poskytnutého 3D modelu odlitku zákazníkem v kapitole 4.2.2. Po vyrobení formy byla odlita zkušební série, kterou se zabývá kapitola 5.3.8, a zároveň byly provedeny simulace s parametry odpovídající podmínkám zkušební série, které jsou uvedeny v kapitole 5.5. Pro odstranění problémů, které se vyskytovaly u zkušební série a u výsledku simulace, byly provedeny tyto modifikace: úprava formy a zvýšení plnicího tlaku. Úprava formy spočívala ve vytvoření dalšího odzdušnění, čímž se odstranily problémy v oblasti hrdla odlitku (kapitola 5.9). Na základě odhalených problémů zkušební série a provedených simulací byla provedena metalografická zkouška s vyhodnocením pórovitosti na vzorku ze zkušební série. Metalografické snímky a procentuální vyhodnocení porosity jsou uvedeny v kapitole 5.11.1. Vyhodnocením porosity na odlitcích ze zkušební série se potvrdily výsledky simulací predikce vad a na základě tohoto odhaleného problému byly v kapitole 6. vytvořeny koncepty pro jejich odstranění. První koncept vycházel z možnosti zvyšování plnicího tlaku, respektive plnicí rychlosti dutiny formy. Druhý návrh byl vytvořen z analýzy simulace plnění dutiny formy (kapitola 5.6.1). Cílem bylo upravit geometrii formy, tak aby se změnil průběh plnění formy taveninou. Koncepty uvedené v kapitole 6. byly pro ověření simulovány a z pohledu nákladového hlediska je přijatelný návrh uvedený v kapitole 6.1 založený na zvyšování plnicího tlaku. Druhé navrhované řešení problému v kapitole 6.2 by si žádalo výrobu nové formy a z pohledu nákladů je toto řešení nevýhodné. Bližší informace jsou uvedeny v odstavcích níže nebo v uvedených kapitolách. Dále jsou také uvedena doporučení založená na celkovém zhodnocení výrobního procesu - kapitola 7.1.

Návrh formy pro nízkotlaké lití proběhl na základě poskytnutých 3D dat zákazníkem, které byly podrobeny kontrole. Analýza poskytnutých dat odhalila menší problém ohledně úkosu v oblasti hrdla, kdy musela proběhnout úprava úkosu z hodnoty  $1^\circ$  na hodnotu  $3^\circ$ . Tato úprava 3D dat odlitku se odeslala ke schválení zákazníkovi, který danou úpravu akceptoval. Schválením úpravy mohly začít konstrukčně technologické práce na návrhu 3D modelu formy. 3D data byla využita jako vstup pro CAM přípravu obrábění a také jich bylo užito jako vstup pro simulace procesu lití a tuhnutí.

Po vyrobení, spasování a ošetření formy tepelně izolačním a separačním povlakem mohlo být přistoupeno k lití zkušební série. Zkušební série odhalila problém týkající se odvodu horní části formy v oblasti hrdla odlitku dmychadlové skříně. Lící proces se při lití zkušební série ukázal jako velmi nestabilní, byla překročena zmetkovitost, se kterou se počítá v úvodních cyklech, než se ustálí teplotní pole formy. Vznikaly nedolité odlitky se zavaleninami v důsledku malého plnicího tlaku, nízké teploty formy a aplikovaného tepelně izolačního povlaku. Zkušební série byla nakonec odlita a to díky úpravě CB jádra pro odvodu oblasti hrdla a parametru lícího procesu a to plnicího tlaku. Odlitky ze zkušební série se potýkaly s problémy ohledně těsnosti skříně zjištěné tlakovou zkouškou, kterou prováděl zákazník. Tato skutečnost ukazovala na problematiku s pórovitostí ve stěně dmychadlové skříně.

Problémy se zkušební sérií a výrobním cyklem byly podrobeny analýze, kdy byly hledány možné příčiny vzniku vad. Za tímto účelem bylo provedeno měření času výrobního cyklu, dále byla změřena tloušťka tepelně izolačního povlaku. Pro získání hodnoty tepelné vodivosti izolačního povlaku bylo nutné kontaktovat dodavatele tohoto produktu. Na základě poskytnutých informací o izolačním povlaku mohlo být přistoupeno k simulacím lití a tuhnutí a také bylo nutné podrobit analýze proces, při němž je aplikován daný povlak.

V oblasti přípravy formy a jejího ošetření byly odhaleny dva problémy při nanášení tepelně izolačního povlaku. První vychází z tloušťky naneseného povlaku, výrobce garantuje tepelně izolační vlastnosti při tloušťce pohybující se okolo 0,1 mm. Vlastním měřením tloušťky povlaku na formách bylo změřeno, že střední tloušťka povlaku se pohybuje okolo průměrné hodnoty 37  $\mu\text{m}$ . Druhý problém týkající se tohoto tepelně izolačního povlaku vychází z podmínek teploty formy, kdy probíhá samotná depozice povlaku. Výrobce udává interval teplot 150 °C – 175 °C, při němž má dojít k nástřiku povlaku, aby vznikla vhodná porosita povlaku zajišťující požadované izolační vlastnosti. V reálných provozních podmínkách nedochází k měření tloušťky naneseného povlaku ani teplotních podmínek depozice povlaku. Nástřik povlaku a tedy jeho vlastnosti jsou závislé na subjektivním lidském faktoru.

Opatřením veškerých podkladů a ověřením informací v provozu byla získána věrohodná vstupní data pro simulaci lícího procesu. Provedené simulace bez cyklování zkoumaly vliv parametrů na plnění formy a ověřilo se jimi rozmezí vstupních parametrů, které lze použít pro cyklování. Simulacemi se potvrdily problémy týkající se špatného odvodu horní

části formy v oblasti hrdla odlitku dmychadlové skříně. Po úpravě odvzdušnění jak na skutečné formě, tak na 3D datech byl tento problém s odvzdušněním odstraněn. Simulace s cyklováním zkoumaly vliv času jednotlivých operačních úseků na licím stroji na kvalitu odlitku, respektive na tepelná pole formy. Fakt, že přehřev formy probíhá pomocí plynových hořáků, nebyl do simulací zahrnut. Nastavení simulace vycházelo z rovnoměrného přehřevu formy, což ovšem není v reálných podmínkách provozu zajištěno. Nicméně v rámci cyklování dochází ke kompenzaci tohoto problému. Výsledky simulací s cyklováním ukázaly, že licí cyklus je velmi citlivý na operace, při nichž je forma otevřená a dochází k jejímu chladnutí. Podle výsledků simulací s méně příznivými parametry docházelo v lokálních místech k zchladnutí formy na 280 °C.

Predikce vnitřních vad simulacemi byla ověřena metalografickou zkouškou s následným vyhodnocením porosity, která způsobovala potíže s těsností odlitku. Pro odstranění potíží byly vytvořeny koncepty, které byly zkoumány pomocí simulace, zda se docílí zlepšení problematické situace. První návrh spočíval ve zvýšení plnicího tlaku (30 kPa při plném kelímku) s použitím správně aplikovaného izolačního povlaku a odpovídající regulací plnicího tlaku, protože poklesu objemu taveniny v kelímku musí odpovídat snížení plnicího tlaku. Tato možnost se jeví z pohledu nákladů jako nejpříznivější. Druhý návrh spočíval ve výrobě nové formy pro nízkotlaké lití, která by měla upravenou geometrii, což je popsáno v kapitole 8.7.2. Ovšem tato varianta z nákladového pohledu nepřipadá v úvahu a ještě by si žádala další vylepšení formou nálitků.

## 7.1 Doporučení

Absence kontroly parametrů v oblasti aplikace tepelně izolačního povlaku by bylo žádoucí napravit použitím měřicí techniky. Nástřík povlaku má probíhat v teplotním intervalu 150 °C – 175 °C, měřit teplotu lze pyrometrem, termočlánky nebo bezdotykovým laserovým měřením teploty. Vhodné by bylo užití termokamery pro zachycení teploty na co největší ploše formy, na kterou má být aplikován povlak. Kontrolována musí být také tloušťka povlaku, k tomuto měření lze použít tloušťkoměr se sondou pro feromagnetický základní materiál. Kontrola teploty, při níž je povlak aplikován nástříkem, a sledování jeho tloušťky zaručí izolační vlastnosti, pro které je využíván. V současné době jsou izolační vlastnosti povlaku proměnlivé, což se negativně podepisuje na stabilitě licího procesu.

Vady odlitků ukazují na nestabilitu licího procesu, který musí být upravován obsluhou licího stroje. Nestabilita licího procesu je kombinací několika faktorů. Stěžejní parametr

licího procesu je plnicí tlak, který se podepisuje s teplotou formy na kvalitě odlitků. Teplota formy, jak odhalily simulace, je závislá především na době, po kterou byla forma otevřená (114 s až 136 s). Snižování času, kdy se otevřená forma vystavuje teplotě okolí, má klíčový význam pro kvalitu odlitku. Samotný čas, při kterém probíhají operace přípravy formy na další licí cyklus, je značně závislý na lidském faktoru obsluhy. Pro zlepšení tohoto stavu může posloužit:

- Proškolení a výcvik obsluhy pro snížení času operací, které se vykonávají pro přípravu formy pro další licí cyklus.
- Zvýšit rychlost vyjímání odlitku a samotné pohyby stroje, pokud to technické prostředky licího stroje umožňují. Případně přistoupit k modernizaci stroje, ve kterém by byly vyměněny pohonné jednotky za výkonnější. Dále v rámci modernizace přidat zařízení, které by zajišťovalo temperační okruhy ve formě pro ohřev studených míst. Ve stávajícím provedení stroj disponuje pouze chladícími okruhy.

## **8 Zkratky a slovník**

CAD ... Computer aided design – počítačem podporované rojektování

CAM ... Computer aided manufacturing – počítačová podpora obrábění

CNC ... Computer numeric control – číslicové řízení počítačem

NC ... Numeric control – číslicové řízení

PLC ... Programmable logic controller – programovatelný logický automat

LCD ... Liquid crystal display – displej z tekutých krystalů

PVD ... Physical vapor deposition – fyzikální napařování povlaků

CVD ... Chemical vapor deposition – chemické napařování povlaků

Rapid-Prototyping ... soubor technologií výroby prototypů využívající 3D tisk

CB jádro ... Cold Box – výroba pískových jader metodou studeného jaderníku



## 9 Použitá literatura

1. **Metaz Týnec, a.s.** Metaz.cz. *Profil společnosti*. [Online] 2011. [Citace: 27. Leden 2016.] <http://www.metaz.cz/profil.php>.
2. **Novotný, Jiljí, a další, a další.** *Technologie I*. Praha : Nakladatelství ČVUT, 2006. stránky 57-63. ISBN 80-01-0235-6.
3. **Jiří, Havel.** Bakalářská práce. *Tlakově lité odlitky z Al slitin pro automobilový průmysl*. [Online] 2010. [Citace: 30. Leden 2016.] Vedoucí práce: prof. Ing. Jaroslav Čech CSc.. [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=28313](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28313).
4. **Nováková.** Katedra strojírenské technologie. *Výroba odlitků ze slitin hliníku*. [Online] 24. Březen 2010. [Citace: 27. Leden 2016.] [http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/MV-cv\\_3.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/MV-cv_3.pdf).
5. **Lichý, Petr a Ebel, Tomáš.** Studijní podpora. *Speciální metody výroby odlitků*. [Online] 2008. [Citace: 25. Leden 2016.] [http://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/632/cs/studium/mag\\_st/skripta\\_specialni\\_mety.pdf](http://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/632/cs/studium/mag_st/skripta_specialni_mety.pdf).
6. **Bryksí, Vlastimil.** MM Průmyslové spektrum. *Rheocasting otevírá nové možnosti tlakově litých odlitků*. [Online] 12. Únor 2014. [Citace: 30. Leden 2016.] <http://www.mmspektrum.com/clanek/rheocasting-otevira-nove-moznosti-tlakove-litych-odlitku.html>.
7. Metal Technology group. *Counter pressure die casting*. [Online] 7. Říjen 2014. [Citace: 9. Únor 2016.] [http://www.mtgbg.com/uploads/documents/page/2/Counter\\_pressure\\_die\\_casting.pdf](http://www.mtgbg.com/uploads/documents/page/2/Counter_pressure_die_casting.pdf).
8. **Qiang, Li, Qitang, Hao a Wanqi, Jie.** Foundry world. *Pressurization control system for low pressure crucible casting*. [Online] 8. Prosinec 2011. [Citace: 10. Únor 2016.] <http://www.foundryworld.com/uploadfile/2011122940845821.pdf>.
9. **Birkhold, Friedrich a Lechler.** ScienceDirect. *Automation of the Casting Process using a model-based NC Architecture*. [Online] 15. Říjen 2015. [Citace: 9. Únor 2016.] [http://ac.els-cdn.com/S2405896315019783/1-s2.0-S2405896315019783-main.pdf?\\_tid=df2c5228-cf68-11e5-b7d3-00000aacb362&acdnat=1455048683\\_d7aac1d5c5f043c4f5001b6d4a8c12fe](http://ac.els-cdn.com/S2405896315019783/1-s2.0-S2405896315019783-main.pdf?_tid=df2c5228-cf68-11e5-b7d3-00000aacb362&acdnat=1455048683_d7aac1d5c5f043c4f5001b6d4a8c12fe).

10. **Gerstenberger, Jan.** Aplikace PVD na ošetření forem pro vstřikování plastů a lití hliníku. *MM Průmyslové spektrum*. [Online] 12. Září 2007. [Citace: 20. Květen 2016.] <http://www.mmspektrum.com/clanek/aplikace-pvd-na-osestreni-forem-pro-vstrikovani-plastu-a-liti-hliniku.html>.
11. Acheson. *Gravity Die Casting - Product Selector Guide*. [On request. [www.henkel.cz/automotive](http://www.henkel.cz/automotive).] 8. Červen 2007. [Citace: 19. February 2016.]
12. **RÖPERWERK.** Technické parametry vstřelovacího stroje H16H. [Firemní dokumentace]
13. **Beňo, Jaroslav a Špirutová, Nikol.** Počítačová podpora lití a tuhnutí odlitku. [Online] 2013. [Citace: 12.. Květen 2016.] [http://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/pocitacova-podpora-liti-a-tuhnuti-odlitku/Beno\\_Pocitacova-podpora-liti-a-tuhnuti-odlitku.pdf](http://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/pocitacova-podpora-liti-a-tuhnuti-odlitku/Beno_Pocitacova-podpora-liti-a-tuhnuti-odlitku.pdf).
14. **Novacast.** NovaFlow and Solid 6. [Online] 15. Červen 2015. [Citace: 5. Červen 2016.] [http://www.novacast.se/wp-content/uploads/2015/06/Produktblad\\_NFS-web-3p.pdf](http://www.novacast.se/wp-content/uploads/2015/06/Produktblad_NFS-web-3p.pdf).
15. **Frei, Martin.** Turbo přidá motoru sílu. *auto.idnes.cz*. [Online] 23. Prosinec 2010. [Citace: 4. Duben 2016.] [http://auto.idnes.cz/turbo-prida-motoru-silu-dosahuje-az-300-000-otacek-za-minutu-pei-/automoto.aspx?c=A101222\\_172626\\_automoto\\_fdv](http://auto.idnes.cz/turbo-prida-motoru-silu-dosahuje-az-300-000-otacek-za-minutu-pei-/automoto.aspx?c=A101222_172626_automoto_fdv).
16. ELUC. *Elektronická učebnice*. [Online] [Citace: 10. Duben 2016.] [https://eluc.kr-olomoucky.cz/uploads/images/12174/content\\_turbodmychadlo.jpg](https://eluc.kr-olomoucky.cz/uploads/images/12174/content_turbodmychadlo.jpg).
17. Auto Znalosti. *Turbodmychadlo I*. [Online] 06. Říjen 2008. [Citace: 10. Duben 2016.] <http://www.autoznalosti.cz/index.php/motor/8-turbodmychadlo.html>.
18. Speednik.com. [Online] [Citace: 10. Duben 2016.] [http://www.speednik.com/files/2014/05/Turbo\\_size.jpg](http://www.speednik.com/files/2014/05/Turbo_size.jpg).
19. **Metaz, Slévárna.** Interní katalog výrobků slévárny Metaa.a.s. [Firemní dokumentace] [Citace: 2016. Března 14.]
20. ASKCHEMICALS. *TURBOCHARGER CASTING*. [Online] 2016. [Citace: 1. Květen 2016.] <http://www.ask-chemicals.com/foundry-products/applications/turbocharger-casting.html>.

21. Nickel institute. *Properties and Applications of Ni - Resist and Ductile Ni - Resist Alloys*. [Online] [Citace: 1. Květen 2016.]  
[https://www.nickelinstitute.org/~media/Files/TechnicalLiterature/PropertiesandApplicationsofNi\\_ResistandDuctileNi\\_ResistAlloys\\_11018\\_.ashx](https://www.nickelinstitute.org/~media/Files/TechnicalLiterature/PropertiesandApplicationsofNi_ResistandDuctileNi_ResistAlloys_11018_.ashx).
22. MatWeb (D5). *ASTM A439 Austenitic ductile iron type D5*. [Online] 2016. [Citace: 1. Květen 2016.]  
<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=67b16e85179e4047900fc4af02ed14dc&ckck=1>.
23. Slévárna Chomutov, a.s. *Žárupevné oceli*. [Online] 2008. [Citace: 1. Květen 2016.]  
<http://www.slevarna-cv.cz/cz/odlitky/zarupevne.php#f>.
24. Němec, Milan, Bednář, Bohumír a Stunová, Barbora. *TEORIE SLÉVÁNÍ*. Praha : ČVUT, 2009. ISBN 978-80-01-04395-0.
25. Bednář, Bohumil, a další, a další. *Technologičnost konstrukce I*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 800103268X.
26. B2B Metal EU. *S355J0 STEEL GRADE, MECHANICAL PROPERTIES, CHEMICAL COMPOSITION, GRADE EQUIVALENT*. [Online] 2014. [Citace: 24. Květen 2016.]  
<http://www.b2bmetal.eu/en/pages/index/index/id/148/>.
27. Stejskal, Marek a Kebrt. Ebalta. *Pryskyřice GM 958*. [Online] 14. Prosinec 2007. [Citace: 20. Květen 2016.] <http://www.ebalta.cz/dokumenty/GM%20958.doc>.
28. Mori, DMG. Technická specifikace stoje DMG DMU 100 T2 a servisní doporučení. [Firemní dokumentace] 2007.
29. Brown, John. Foseco Non - Ferrous Foundryman's Handbook. [Online] 30. Říjen 2003. [Citace: 29. Květen 2016.] <http://www.eurospares.com/graphics/metalwork/Foseco-Non-Ferrous-Foundry-Man.pdf>. ISBN 0 7506 4286 6.
30. Pilař, Roman. BONDERITE L-CA CG 555 ACHESON (Deltacast CG-555). *Žárovzdorný nátěr na formy*. [Online] 17. Duben 2014. [Citace: 2016. Února 19.]  
Dostupné na požádání.
31. Hugo, Jiří. *Kovopol NTL 350,500 Řídicí systém - návod k obsluze*. Praha 4 : Atrua Control, [Firemní dokumentace],2007.

32. **Bryksí, Barbora Stunová.** *Metalurgie slitin Al.* 26. Květen 2010. [Citace: 9. Říjen 2016.] Studijní podpora předmětu Teorie slévání.
33. **Vojtěch, Dalibor.** *Kovové materiály.* Praha : Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
34. **Kříž, R. a Vávra, P.** *Strojírenská příručka 3. svazek.* Praha : Scientia, 1993. str. 254. ISBN 80 - 85827 - 23 - 9.
35. **Pehlke, R. D., Cookson, John M. a Prasad, Krishna.** Heat Transfer at the Mold - Metal Interface in Permanent Mold. [Online] 14. December 2001. [Citace: 17. Únor 2016.] <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/791727>.
36. **Zagorka Aćimović-Pavlović, Aurel Prstić, Ljubiša Andrić, Vladan Milošević and Sonja Milićević.** Ceramic Coating for Cast House Application. *Ceramic Coatings - Applications in Engineering, Prof. Feng Shi (Ed.).* [Online] 2012. <http://www.intechopen.com/books/ceramic-coatingsapplications-applications-in-engineering/ceramic-coatings-for-application-in-foundry>. ISBN: 978-953-51-0083-6.
37. **Polá, A. a Roberti, R.** Study of the effect of process parameters on the production of a non-symmetric low pressure die casting part. [Online] 02. Listopad 2009. [Citace: 28. Leden 2016.] [https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwihgredv-TNAhVEPhQKHXFkCNAQFggbMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.fracturae.com%2Findex.php%2Faim%2Farticle%2Fdownload%2F427%2F395&usg=AFQjCNEaWWRJf\\_RngcABFmBXIzFGHDIIMw&sig2=fm](https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwihgredv-TNAhVEPhQKHXFkCNAQFggbMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.fracturae.com%2Findex.php%2Faim%2Farticle%2Fdownload%2F427%2F395&usg=AFQjCNEaWWRJf_RngcABFmBXIzFGHDIIMw&sig2=fm).
38. MatWeb (D2). *ASTM A439 Austenitic ductile iron type D2.* [Online] 2016. [Citace: 1. Květen 2016.] <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=4b25d6ea7c9545cab3e133befdc1991&ckck=1>

## 10 Seznam elektronických příloh

1. Výkresová dokumentace
  - a. Forma pro nízkotlaké lití
  - b. Jaderník
2. NC kód
  - a. Pro formu
    - Horní díl
    - Spodní díl
    - Vložka rámečků
    - Trvalé jádro
  - b. Pro jaderník
    - Maketa jádra
    - Pevná polovina
    - Pohyblivá polovina
    - Podložka zalití
3. Snímky ze simulací
  - a. Série 1 Bez povlaku
  - b. Série 2 Ideální povlak
  - c. Série 3 Reálný povlak
  - d. Série 4 Cyklování
4. Kalkulace nákladů výroby odlitku