

VYUŽITIE SOFTVÉROVÝCH PROSTRIEDKOV MATLAB&SIMULINK A COMSOL MULTIPHYSICS PRI MODELOVANÍ A RIADENÍ PREDOHREVVU ZLIEVARENSKEJ FORMY

B. Barbolyas, C. Belavý

Ústav automatizácie, merania a aplikovanej informatiky, Strojnícka Fakulta,
Slovenská Technická Univerzita v Bratislave, Námestie Slobody 17, 812 31 Bratislava 1

Abstrakt

Článok pojednáva o modelovaní a riadení teplotných polí v kovovej zlievarenskej forme experimentálneho zariadenia riadeného procesu zlievania. Teplotné polia formy predstavujú systém s rozloženými parametrami. V telese formy zložitého tvaru je zabudovaných niekoľko výhrevných telies, zoskupených do 5 zón a tvoria riaditeľné vstupy systému. Podobne je v telese formy vhodne umiestnených 11 termočlánkov, ktoré predstavujú merateľné výstupy systému. Súčasťou zariadenia je aj komunikačné rozhranie na zber dát a realizáciu aktívnych experimentov.

Na zariadení riadeného procesu zlievania boli vykonané experimenty zónového ohrevu formy, z ktorých boli získané užitočné informácie o dynamike teplotných polí ako skúmaného systému, Obr. 1. Reálne experimenty sú energeticky a časovo náročné, preto v ďalšom vývoji riešenia úloh riadenia predohrevu je výhodné využívať prednosti modelovania a virtuálnej simulácie so zohľadnením výsledkov vykonaných experimentov.

V článku sú ukázané spôsoby využitia softvérových prostriedkov MATLAB & Simulink, DPS Blockset a COMSOL Multiphysics pri modelovaní a simulácii riadenia predohrevu kovovej zlievarenskej formy ako systému s rozloženými parametrami. Podrobne je popísaná identifikácia prechodových charakteristík teplôt formy s využitím MATLAB Identification Toolboxu, obvod riadenia na báze systémov s rozloženými parametrami, využívajúci DPS Blockset pre MATLAB & Simulink, ako aj možnosti COMSOL Multiphysics pri simulácii predohrevu na báze metódy konečných prvkov.

Na záver je dokumentovaný experiment odlievania hliníkových zliatin do kovovej zlievarenskej formy a spôsob zaznamenávania teplotných profilov na rozhraní forma/odliatok s využitím MATLAB & Simulink.

1 Teoretické východiská

Motiváciou pre riešenie procesu zlievania ako systému s rozloženými parametrami (ďalej SRP) je teória o modelovaní a riadení SRP, ktorá ako jedna z oblastí teórie riadenia je dlhodobo podrobne riešená na Ústave automatizácie, merania a aplikovanej informatiky (ÚAMAI) SJF STU v Bratislave. Základné teoretické východiská modelovania a riadenia SRP s demonštráciami riešenia rôznych úloh v prostredí MATLAB sú prezentované v monografii [1]. Veľmi zaujímavou prehľadovou štúdiou z oblasti SRP je publikácia [4], kde autori zhrňujú vývoj SRP od polovice 20. storočia do dnes a naznačujú možný vývoj v budúcnosti.

Ďalšou motiváciou je softvérové riešenie Distributed Parameter Blockset for MATLAB & Simulink (ďalej DPS Blockset), vyvinuté a aktualizované na UAMAI. Účelom tohto softvérového balíka je umožniť užívateľom simulovať úlohy riadenia SRP v prostredí Simulink. V článku je naznačený spôsob zostavenia spätnoväzobného riadiaceho obvodu s využitím DPS Blocksetu. Ukážka použitia DPS Blocksetu je aj v [2, 3], demonštračné ukážky a ďalšie informácie sú dostupné aj [11]. V

práci [3] sa autor zamerl na možnosti kosimulácie špecializovaného konečnoprvkového softvéru ProCAST a regulátora realizovaného v prostredí MATLAB.

Systémy s rozloženými parametrami (SRP) predstavujú systémy, ktorých vstupné, stavové a výstupné veličiny sú analyzované v časovej aj priestorovej závislosti. Ich vstupné a výstupné veličiny predstavujú polia veličín $X(\bar{x}, t)/Y(\bar{x}, t)$, kde $\bar{x} = (x, y, z)$ je vektor priestorových súradníc v 3D.

Vo všeobecnosti nemajú SRP konečný počet stavových veličín, preto sa na ich reprezentáciu používajú systémy so sústredenými vstupmi a rozloženým výstupom (SSR). Vzťah medzi vstupom a výstupom SSR definuje (1), kde $U_i(t)$ je vstup v časovej závislosti, t.j. jednorozmerný sústredený vstup, $Y_i(\bar{x}, t)$ je časovo-priestorovo rozložená výstupná veličina systému, $G_i(\bar{x}, t)$ je rozložená impulzná funkcia a $\otimes$ je symbol konvolutórneho súčinu. Konvolutórny súčin určuje hodnoty odozvy sústavy na základe impulznej charakteristiky. Ak $U_i(t)$ je jednotkový skok na výstupe dostávame rozloženú prechodovú charakteristiku $H_i(\bar{x}, t)$. Pre celkovú rozloženú odozvu (výstupnú veličinu) platí (2). Diskrétna analógia (1) je daná (3), kde $U_i(kT)$ je diskretný vstupný signál, H_i je tvarovač nultého rádu, T je perióda vzorkovania a $\oplus$ je symbol konvolutórneho súčtu [1].

$$Y_i(\bar{x}, t) = G_i(\bar{x}, t) \otimes U_i(t) \quad (1)$$

$$Y(\bar{x}, t) = \sum_{i=1}^n Y_i(\bar{x}, t) = \sum_{i=1}^n G_i(\bar{x}, t) \otimes U_i(t) \quad (2)$$

$$Y_i(\bar{x}, (k + \varepsilon)T) = GH_i(\bar{x}, (k + \varepsilon)T) \oplus U_i(kT) \quad (3)$$

Cieľom syntézy riadenia SRP je dosiahnutie minimálnej hodnoty kvadratickej normy odchýlky riadenia v ustálenom stave (4). Vzhľadom k časovo-priestorovému charakteru vstupnej a výstupnej veličiny sa syntéza regulačného obvodu realizuje pre časovú a priestorovú zložku individuálne. Priestorová syntéza rieši úlohu aproximácie rozloženej odchýlky riadenia (5) na množine ustálených hodnôt redukovaných prechodových charakteristík ${}_{\text{HHR}}_i(\bar{x}, \infty)$. Výsledkom riešenia je vektor aproximačných koeficientov $\tilde{\tilde{E}}(k) = \{\tilde{\tilde{E}}_i(k)\}_i$, ktorý vstupuje do bloku časovej syntézy riadenia ako odchýlka riadenia. V bloku časovej syntézy riadenia je n jednorozmerných regulačných obvodov s regulátormi $\{R_i(z)\}_i$, ktoré generujú akčné veličiny $\{U_i(k)\}_i$ tak, aby bola splnená základná úloha riadenia SRP, vyjadrená kritériom (4).

$$\min \|E(\bar{x}, \infty)\| = \min \|W(\bar{x}, \infty) - Y(\bar{x}, \infty)\| = \|\tilde{\tilde{E}}(\bar{x}, \infty)\| \quad (4)$$

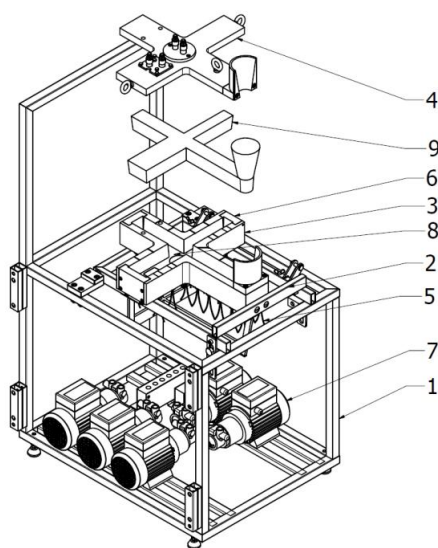
$$\min_{E_i} \left\| E(\bar{x}, k) - \sum_{i=1}^n E_i(k) {}_{\text{HHR}}_i(\bar{x}, \infty) \right\| = \left\| E(\bar{x}, k) - \sum_{i=1}^n \tilde{\tilde{E}}_i(k) {}_{\text{HHR}}_i(\bar{x}, \infty) \right\| \quad (5)$$

2 Popis riadenej technológie, experimentálneho zariadenia a východiská simulácie

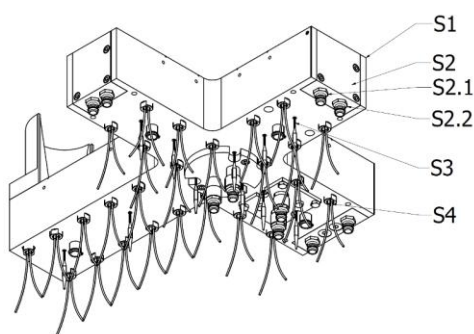
Fyzikálny model prezentovaný v článku ako SRP na báze SSR reprezentácie je kovová zlievarenská forma. Zlievarenská forma predstavuje tepelný systém, na ktorom sa dajú dobre ukázať možnosti riadenia SRP. Vo všeobecnosti sa jedná o modulárne zariadenie, so zabudovanou meracou technikou a tepelnými akčnými členmi, obrázok 1.

Merací okruh pozostáva z 11 termočlánkov a meracích kariet Advantech PCI-1710 a Humusoft AD 622. Sústava akčných členov zahŕňa aktívny chladiaci a vyhrievací okruh. Chladiaci okruh tvorí 7 medených chladičiek nalisovaných do telesa formy, rozvádzače a hadice pre distribúciu chladiacej kvapaliny, súbor objemových čerpadiel a frekvenčné meniče. Vyhrievací okruh tvorí 26 výhrevných odporových patrónov s vonkajším napájaním vývodov typ Backer Elektro 2303/360 rozdelených do 5 zón a ovládacie tyristory. Výhrevné telesá sú ovládané napäťovým signálom v rozsahu 0-10 V, obrázok 2.

Teleso formy so všetkými vstavanými prvkami tvorí riadený systém. Forma je rozdelená na 5 zón, ktoré reprezentujú riadené subsystémov. Akčné prvky obsiahnuté v jednej zóne predstavujú v súčte jeden zónový vstup. Celý riadený systém má 5 vstupov a 11 výstupov rozložených v priestore. Priestorová lokalizácia akčných a meracích prvkov umožňuje na zariadení aplikovať princípy teórie rozložených parametrov.



Obrázok 1: Schéma zostavy experimentálneho zariadenia: 1 - rám, 2 - unášač zlievarenskej formy, 3 - teleso trvalej zlievarenskej formy, 4 - veko formy, 5 - výhrevné teleso, 6 - chladič, 7 - čerpadlo chladiacej kvapaliny, 8 - merací bod s termočlánkom, 9 - odliatok



Obrázok 2: Schéma základnej časti kokily: S1 - základné teleso kokily, S2 - chladič, S2.1 - vstup chladiacej kvapaliny, S2.2 - výstup chladiacej kvapaliny, S3 - termočlánok, S4 - výhrevné teleso

Z technologického hľadiska sa jedná o dávkový proces voľného gravitačného liatia. Elektronika nainštalovaná na forme umožňuje variabilitu pracovných režimov, t.j. predohrevy, voľné liatia, aktívne chladenie a ich kombinácie. Odliatok môže voľne chladnúť a solidifikovať v dutine formy. Pre dosiahnutie bezchybného odliatku je vhodné ovplyvniť jeho tuhnutie riadeným teplotným poľom. Po

dosiahnutí žiadanej teploty sa odliatok vyberie a pozoruje sa jeho výsledná kvalita. Následne sa posudzuje efektívnosť nastaveného teplotného poľa na výslednú kvalitu.

Pod nekvalitným odliatkom možno rozumieť prítomnosť rôznych nedostatkov na výslednom produkte. Typickým príkladom je výskyt sústredených lokálnych stiahnutí v mieste tepelných uzlov, ako je to dokumentované na obrázku 3, alebo mechanických deformácií v dôsledku zmraštenia alebo vnútorných napätí.

Členitosť tvarov a rôzna hrúbka stien odliatku spôsobujú nerovnomernosť chladnutia odliatku, ktorá zabezpečí nesúčasnosť objemových zmien, brzdenie alebo urýchľovanie zmrašťovania. Endogénne vnútorné napätie (pochádzajúce z vnútra odliatku) môže vzniknúť aj na základe rozdielneho špecifického objemu ($m^3 kg^{-1}$), ktorý vzniká z teplotnej závislosti, pri rozdielnej rýchlosti ochladzovania hrubých a tenkých stien. Voľné zmrašťovanie nastáva, ak nie je brzdene a ani teplotne (rôzne rýchlosti chladnutia a zmrašťovanie jednotlivých častí odliatku). Ak dochádza k brzdeniu zmrašťovania odliatku, v odliatku vzniká vnútorné napätie, ktoré spôsobuje pružné alebo plastické deformácie [8].



Obrázok 3: Stuhnutý odliatok - stiahnutina v mieste tepelného uzla

Z fyzikálneho hľadiska na forme a jej jednotlivých častiach, prebieha pri predohreve, chladení formy alebo odlievaní prenos tepla popísaný parciálnou diferenciálnou rovnicou parabolického typu (6). Pri simulácii liatia je možné zohľadniť aj dynamiku plnenia dutiny formy, ktorá môže mať vplyv na vnútornú štruktúru výsledného odliatku.

$$\frac{\partial T(\bar{x}, t)}{\partial t} - \frac{\lambda}{\rho c} \nabla^2 T(\bar{x}, t) = \sum_{i=1}^5 Q_i \quad (6)$$

Kde:

T [$^{\circ}C$]	- teplota
t [s]	- čas
λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	- merná tepelná vodivosť (koeficient vodivosti)
ρ [$kg \cdot m^{-3}$]	- merná hmotnosť
c [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]	- špecifická tepelná kapacita
Q [J]	- tepelná energia

3 Riadený predohrev zlievarenskej formy

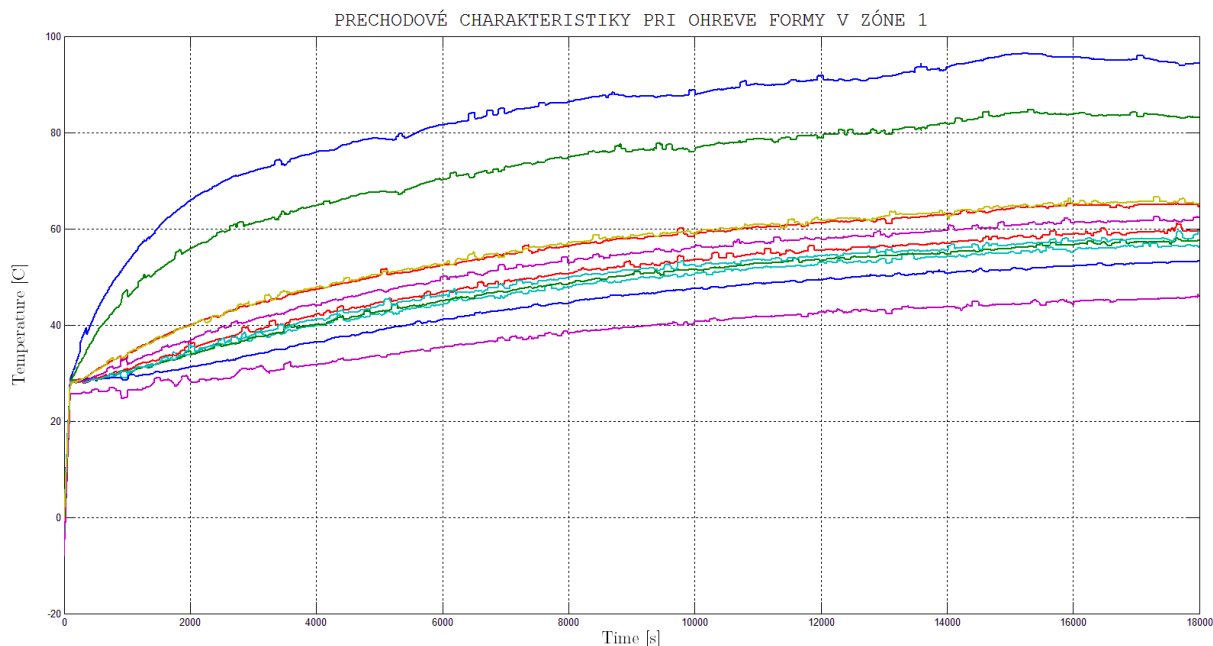
Teplotné pole zlievarenskej formy má priamy vplyv na jej životnosť a zároveň na výslednú kvalitu odliatku. Obvyklým spôsobom predohrievania v zlievarenskej praxi je vypaľovanie dutiny pieskovej formy plameňom, ktorý nie len vyhreje dutinu formy, ale aj prispieje k odňatiu prípadnej prebytočnej vlhkosti formy. V tomto prípade boli na predohrev telesa formy použité elektrické odporové vyhrevné telesá. Aj keď tento spôsob nie je v praxi úplne štandardný, je spoľahlivý, bezpečný a predovšetkým je jeho energetický výkon plne riaditeľný. To je rozhodujúci aspekt použitia vyhrevných odporových patrónov.

Význam predohrevu zlievarenských foriem dominuje hlavne v prípravnej fáze liatia. Podstata spočíva dodaní potrebného množstva tepelnej energie telesu zlievarenskej formy, čím sa dosiahne jej požadované teplotné pole na začiatku procesu liatia.

Výroba trvalých foriem je ekonomicky náročnejšia, odliatky majú vysokú presnosť. Svojimi vlastnosťami sú kokily vhodné pre $10\text{--}5 \cdot 10^3$ výrobných cyklov [7]. Aby sa zabezpečila predpokladaná životnosť kokily je vhodné pred liatím upraviť jej počiatočné teplotné pole. Úpravou teplotného poľa, resp. zvýšením teploty telesa formy, z teploty okolia na rádovo vyššiu teplotu (približujúcu sa teplote aspoň polovici teploty liatia) je možné zvýšiť životnosť kokily. Keďže sa minimalizuje vplyv tepelných rázov a šokov. Dosiahnuté teplotné pole, ktoré býva výsledkom predohrevu, závisí od zvoleného pracovného režimu, resp. operačného bodu, ktorý určuje teplota liatia odliatku.

Na fyzikálnom experimentálnom zariadení bolo zdokumentovaných niekoľko sérií riadených predohrevov. Boli testované rôzne pracovné režimy, kombinácie rôznych teplôt predohrevu a výkonovo aktívnej zóny formy.

Na obrázku 4 sú znázornené prechodové charakteristiky teplôt nameraných na 11 termočlánkoch, pri predohreve formy v 1. zóne aktivovanom 20% skokovou zmenou vyhrievacieho výkonu, t.j. ovládací vstupný signál mal hodnotu 2V. Experiment trval 18000 sekúnd (5 hodín), čo je čas potrebný pre ustálenie odozvy skúmaného systému na aplikovaný vstupný signál. Takto boli postupne samostatne aktivované vyhrievacie výkony aj v ostatných zónach formy a odmerané charakteristiky boli uložené do dátových súborov na ďalšie spracovanie



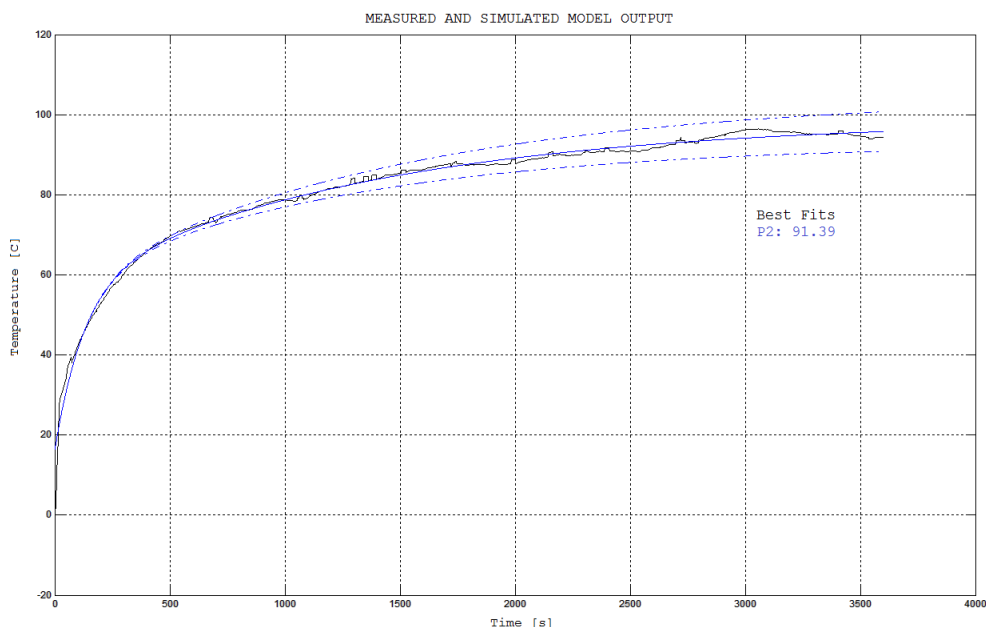
Obrázok 4: Prechodové charakteristiky pri ohreve formy v Zóne 1

4 Identifikácia formy a návrh syntézy riadenia prostredníctvom DPS Blocksetu

Namerané prechodové charakteristiky boli použité za účelom identifikácie. Vo všeobecnosti je výsledkom systémovej identifikácie matematický model, ktorý slúži pre simulačné účely rôznych pracovných režimov zariadenia.

Testovacie predohrevy kokily boli spúšťané pre každú zónu individuálne, aby bolo možné identifikáciou získať presný matematický model každej zóny. Pri predohreve jednej zóny sa tepelná energia šíri v celom telese kokily. Keďže nie je kokila symetrická, energia sa rozkladá nerovnomerne. Kvôli tomu pri zahrievaní jednotlivých častí termočlánky zaznamenávajú rozdielne hodnoty teploty. Postupnosť diskretných hodnôt, pri zvolenom vzorkovaní, dáva pri zakreslení na časovej osi prechodovú charakteristiku - odozvu systému na vstup pôsobiaci na vybratej zóne. Pre účel identifikácie každej zóny bola vybraná prechodová charakteristika s najrýchlejšou dynamikou, t.j. odozva s najvyšším zosilnením. Tá poskytuje najpresnejšiu informáciu o správaní vybranej zóny kokily. Identifikácia bola realizovaná pomocou špecializovaného MATLAB Identification Toolboxu. Na obrázku 6 je zobrazená identifikácia Zóny 1.

Uvažovaný matematický model (7) je 2. rádu. Zistené parametre matematických modelov sa využívajú pri syntéze regulátora v regulačnej slučke. V intenciách riadenia SSR, to znamená, že sa využívajú pri časovej syntéze riadenia. Parametre matematického modelu (7) zóny 1, ktoré sú výsledkom identifikácie v MATLAB-e sú (8). Obdobne boli prostredníctvom Identification Toolboxu identifikované parametre aj pre ostatné zóny.



Obrázok 5: Porovnanie identifikovaných a nameraných dát, zhoda 91,39%, modrá - identifikované, čierna - namerané dáta

$$G(s) = \frac{K_p}{(T_{p1}s + 1)(T_{p2}s + 1)} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} K_p &= 49.348 \\ T_{p1} &= 1351.6 \\ T_{p2} &= 125.79 \end{aligned} \quad (8)$$

Vykonávať simulácie predohrevu na fyzikálnom modeli je značne energeticky a časovo náročné. Z vykonaných experimentov bolo získaných dostatok užitočných informácií o dynamike

Syntéza riadenia SSR je dekomponovaná na časovú a priestorovú zložku. Priestorová syntéza je zabezpečená blokom DPS Space Synthesis, ktorý obsahuje odozvy pri známych podmienkach (napr. pri 20% výkone systému) v maticovom tvare. Časová syntéza je zabezpečená súborom jednorozmerných regulačných obvodov. Riadené systémy týchto obvodov reprezentujú elementárne subsystémy (napr. zóna 2), komplexne riadeného objektu s rozloženými parametrami (napr. telo zlievarenskej formy). Pre tieto elementárne subsystémy sa navrhujú jednorozmerné regulátory (obr. 6). Ich počet je rovný počtu sústredených akčných zásahov do riadeného systému (5 zón/5regulátorov). Navrhnuté regulátory sa ladia pre sústavy, ktorých parametre boli zistené identifikáciou. Riadená zóna je reprezentovaná blokom *Transfer function*. Blok *Saturation* bol použitý na ohraničovanie akčného zásahu do sústavy podľa reálne použitých vstupných signálov 0-10V. Obrázok 7 znázorňuje zapojenie časovej a priestorovej syntézy vo finálnej simulačnej schéme riadenia.

The diagram illustrates a closed-loop control system. The reference signal, labeled 'Step1', is fed into a summing junction. The output of this junction is the system's input, which passes through a 'Transfer Fcn1' block (representing the plant, $\frac{50.988}{den(s)}$). The output of the plant is monitored by 'Scope1'. This output is also fed into a second summing junction. A feedback signal is taken from the output of the second summing junction, passes through a 'PID Controller1' block (containing a PI controller, $PI(s)$), and then through a 'Saturation1' block before being fed back into the first summing junction. Additionally, a 'Constant' block with a value of 300 is fed into the second summing junction.

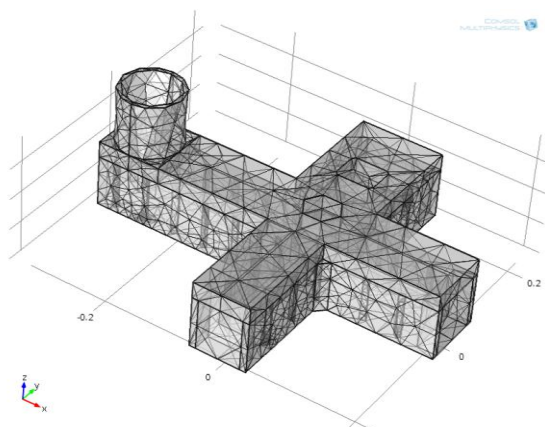
The schematic diagram illustrates a control system architecture. It begins with a reference input that enters a summing junction. The output of this junction is fed into a block labeled 'HLDS - Distributed Parameters System Representation of Mechatronics Foundry Mold'. The output of the HLDS block is fed back to the summing junction. The error signal is then processed by a 'DPS Space Synthesis' block, which outputs five parallel signals to five 'PI Controller - Zone' blocks (Zone 1 to Zone 5). Each PI controller's output is summed at a junction labeled 'DPS Time Synthesis'. The resulting signal is saturated and then fed back to the system input. The system output is also fed back to the summing junction. A 'Scope2' block monitors the system input, and a 'Scope1' block monitors the system output. A 'Norm' block calculates the norm of the error signal, which is also monitored by 'Scope1'.

Obrázok 7: Regulačný obvod SSR - simulácia predohrevu pomocou DPS Blockset v Simulinku

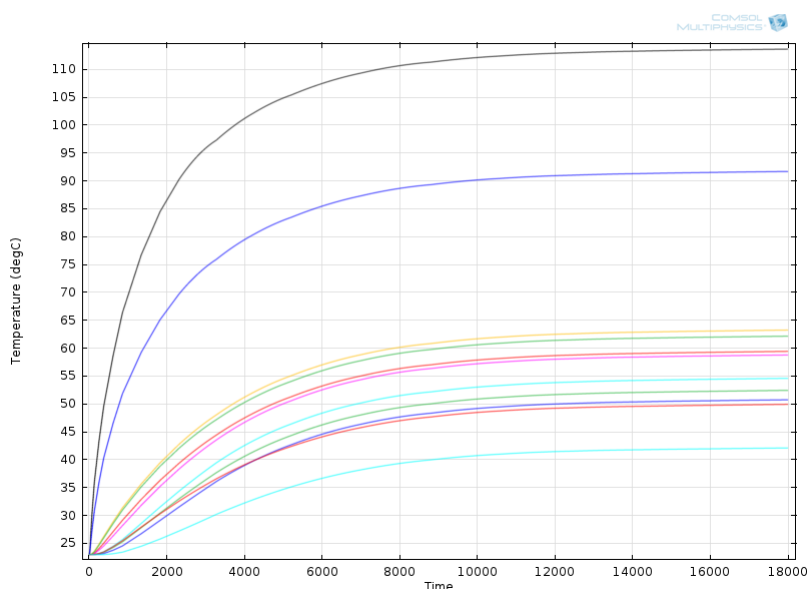
5 Simulácia predohrevu v Comsol Multiphysics

Pre fyzikálnu simuláciu procesných javov, ktoré sa vyskytujú na forme počas prevádzky sa dá využiť softvérové COMSOL Multiphysics. Tento produkt umožňuje modelovať multifyzikálne úlohy na báze metódy konečných prvkov (MKP). Rozširujúci modul COMSOL Livelink with MATLAB umožňuje využiť COMSOL využiť ho ako výpočtové jadro pri simulácii riadenia v MATLABe. V článku je naznačené využitie COMSOL Multiphysics pri riešení simulácie predohrevu. Podstata úlohy spočíva v numerickom riešení parciálnej diferenciálnej rovnice prestupu tepla (6), s definovanými hraničnými a začiatočnými podmienkami na danej množine konečných prvkov. V závislosti od zložitosti geometrického CAD modelu, môže byť úloha výpočtovo aj časovo náročná.

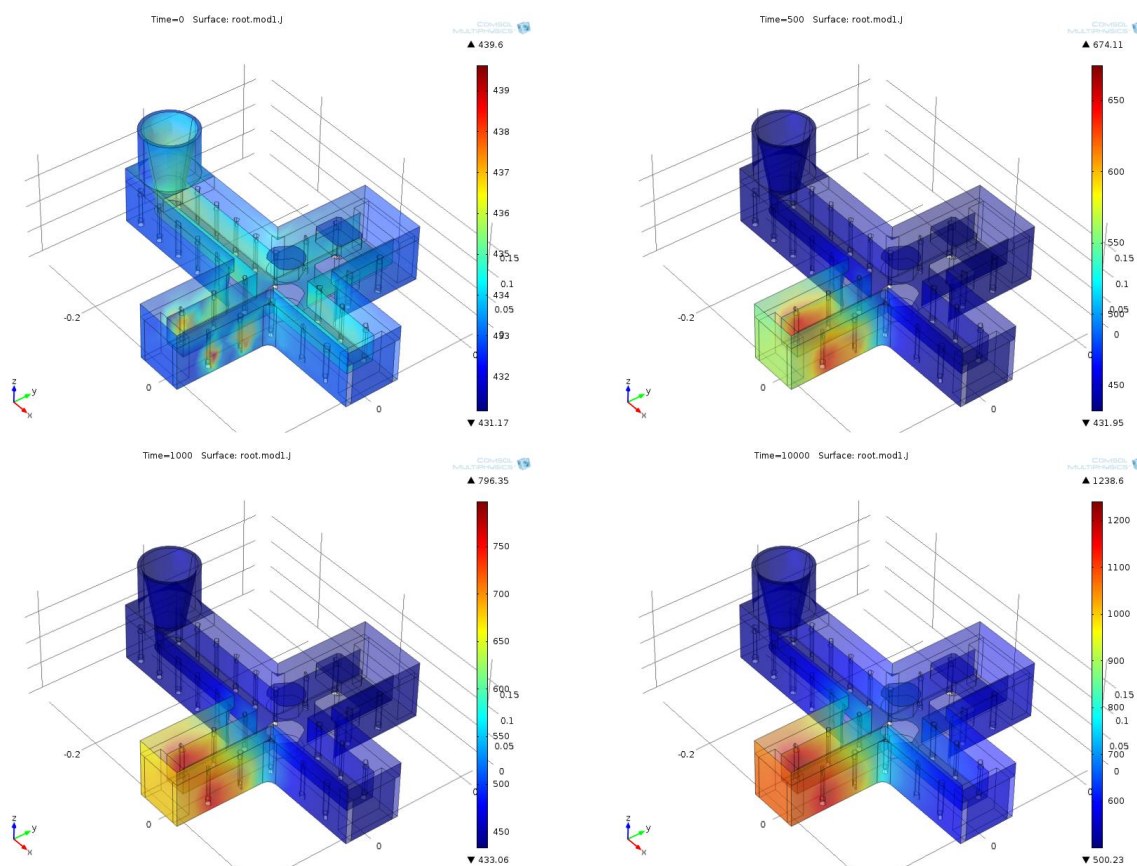
V COMSOL Multiphysics bola daná definovaná riešená fyzikálna úloha - prestup tepla vedením v tuhej látke. Následne bola importovaná geometria objektu, na ktorom je daná fyzikálna úloha riešená. Pre riešenie úloh pomocou COMSOL Multiphysics je potrebné definovať materiály, z ktorých je zložený vyšetrovaný objekt. COMSOL Multiphysics obsahuje knižnicu materiálov s určenými fyzikálnymi vlastnosťami, z ktorých sú pre úlohu vedenia tepla najdôležitejšie objemová hmotnosť, tepelná kapacita a tepelná vodivosť. Ďalej je potrebné definovať na danej geometrii zdroje tepla. Pre realizáciu MKP analýzy je potrebná diskretizácia geometrie modelovanej časti zariadenia, konečným počtom elementárnych prvkov, obrázok 8. Pre zadané vstupné hodnoty simulácie predohrevu pri aktivovanej zóne 1 s 20% výkonom boli získané prechodové charakteristiky zobrazené na obrázku 9. Teplotná mapa formy predohriatej v zóne 1, zodpovedajúca prechodovým charakteristikám z obrázku 9 je znázornená na obrázku 10.



Obrázok 8: Model formy v COMSOL Multiphysics, diskretizovaný sieťou MKP



Obrázok 9: Prechodové charakteristiky predohrevu v 1. zóne pri simulácii v COMSOL Multiphysics



Obrázok 10: Zobrazenie výsledkov simulácie v COMSOL Multiphysics, pri predohreve Zóny 1 s 20% výkonu

Z prechodových charakteristík na obrázku 9, je vidno, že simulačné výsledky sú primerané nameraným teplotným profilom zobrazených na obrázku 4. Mieru zhody simulácie s reálnym procesom je možné zvýšiť úpravou vstupných parametrov a fyzikálnych konštánt.

6 Experiment odlievania hliníkových zliatin

Na základe citácie z [8] o vnútorných napätiach spôsobujúcich pružné alebo plastické deformácie, vznikla motivácia otestovať popisovaný jav. Zásady pre liatie a tuhnutie odliatkov určujú, že najmenšia hrúbka steny odliatku musí zaručiť úplne vyplnenie formy kovom [6].

Pri odlievaní bol použitý materiál Al-Si7. Jedná sa o zliatinu hliníka (Al - aluminium) a kremíka (Si - silicium). Tento materiál bol použitý pre jeho dostupnosť a známe mechanické a technologické vlastnosti. Zliatiny Al-Si (siluminy) majú dobré zlievarenské vlastnosti, výbornú zabiehavosť, malé zmrštenie, malý sklon k tvoreniu trhlín a sústredených stiahnutí. Používajú sa hlavne pre zložité tenkostenné odliatky. Mechanické vlastnosti podeutektických a eutektických siluminov sa zlepšuje metalurgicky (tzv. modifikácia). Prísadami Na alebo Sr, nadeutektické siluminy sa zlepšujú očkovaním fosforom [5].

Teplota topenia hliníka je 658°C . Teplota liatia hliníkových zliatin sa v praxi pohybuje v intervale $650\text{--}780^{\circ}\text{C}$. Objemové zmrštenie hliníkových zliatin pri tuhnutí je 4-8% a lineárne zmrštenie v tuhom stave je 0,5-1,5%.

Na roztavenie Al-Si7 bola použitá keramická pec značky Rohde, obrázok 11, ktorej regulovateľný radiaci program umožňuje variabilne nastavovať tepelnú výdrž a nábehové krivky teplotných profilov. Teplota výhrevu pece bola nastavená na 750°C .



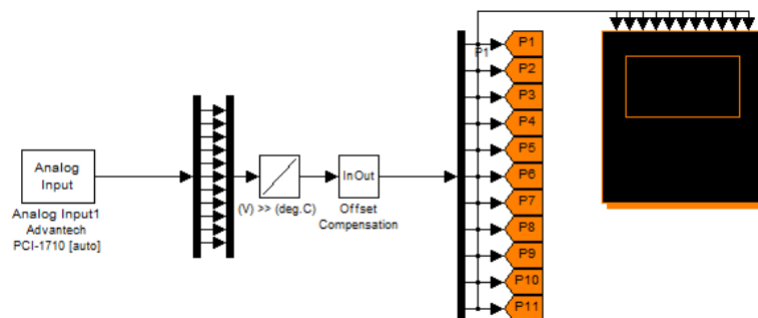
Obrázok 11: Prípravná fáza liatia, Al-Si7 pripravený na roztavenie v grafitových zlievarenských nádobách.

Na obrázku 3 možno vidieť odliatok s rozsiahlou sústredenou stiahnutinou. Odliatok na obrázku 3 vznikol úplným vyplnením dutiny formy, pri experimente s cieľom dosiahnuť priaznivý teplotný gradient tuhnutia, ktorý zabezpečí bezchybný odliatok. Odliatok bol ponechaný v dutine formy do úplného vychladnutia a po vyňatí z dutiny sa pozorovala jeho výsledná kvalita. V princípe predstavuje znázornený odliatok výsledok dávkového procesu liatia s časovým intervalom potrebným na prečkanie solidifikácie a vychladnutia odliatku. V protiklade s tvrdením predneseným v súvislosti s použitým materiálom Al-Si7, o menšej miere náchylnosti na tvorbu zlievarenských defektov, možno na výslednom odliatku pozorovať pomerne (v pomere k veľkosti samotného odliatku) rozsiahlu sústredenú stiahnutinu. Taktiež sa na odliatku vyskytujú malé, priestorovo rozmiestnené trhlinky. V [5] sa pri použití siluminov hovorí v súvislosti so zložitými tenkostennými odliatkami. Avšak pri výslednom produkte sa nejedná o tenkostenný odliatok. Výsledná stiahnutina vznikala v dôsledku dosadzovania roztaveného materiálu z tepelného uzla odliatku do oblastí, kde materiál solidifikoval skôr.

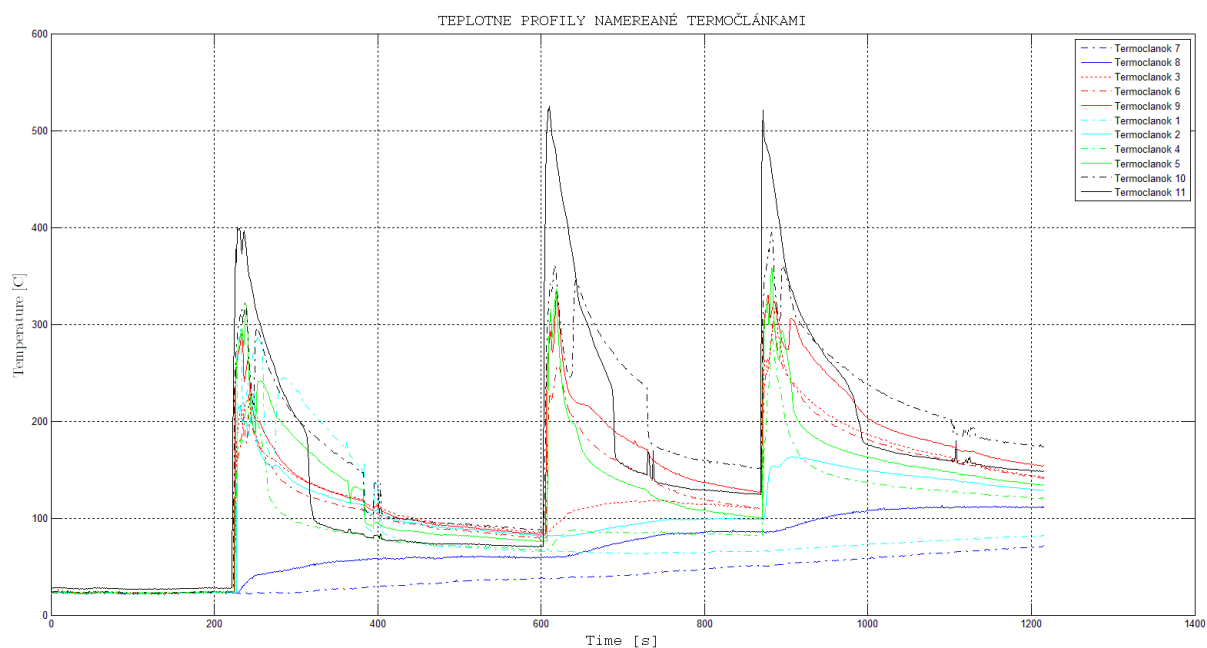
Z dôvodu lepšej manipulovateľnosti a opakovateľnosti experimentu v krátkom časovom intervale, bolo pri ďalšom pokuse uvažované použiť také množstvo materiálu, ktoré nevyplní celú dutinu formy. Východiskový predpoklad bol, že proces solidifikácie (pri uvažovaní zdravého odliatku) a chladnutie odliatku na teplotu vhodnú pre manipuláciu, bude menej časovo náročný dej. Uvažovaná bola tiež idea nasimulovania určitej miery kontinuity, resp. periodicity procesu liatia na špecifikovanom zariadení.

Očakávaný výsledok bol, získanie bezchybného tenko-stenného odliatku s hrúbkou steny cca 5mm. Rovnomerné rozliatie taveniny na celej ploche dna dutiny formy. Následne na hotových odliatkoch malo byť pozorované zmraštenie. Prípadne voľným okom viditeľné deformácie spôsobené uvažovaným vnútorným pnutím, ktoré vzniká ako sprievodný jav zlievarenskej technológie. Ďalším cieľom bolo získanie vedomosti o dynamike zlievarenského procesu. Alternatívne bolo cieľom tohto experimentu zistiť, ako sa správa tavenina pri odlievaní, s ohľadom na zabiehavosť, rýchlosť tuhnutia a tiež manipulačnú zručnosť operátora.

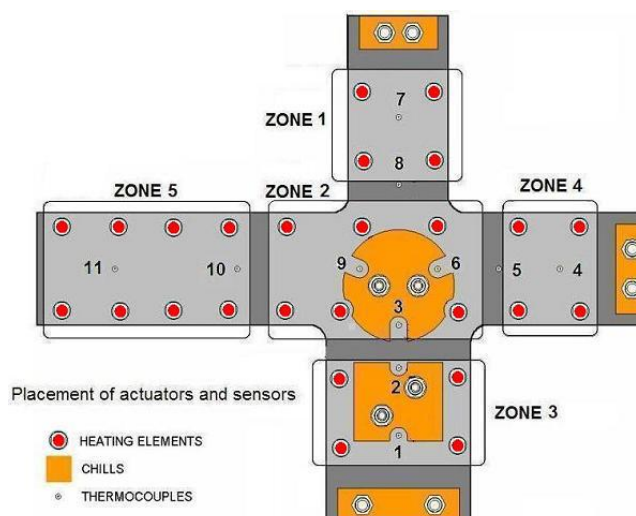
Plánovaná bola sekvencia 3 liati, do nepredohriatej kokily. Meranie teploty počas procesu liatia a voľného chladnutia bolo realizované pomocou sústavy termočlánkov popísaných v úvode. Merania teploty bolo realizované pomocou užívateľského rozhrania Simulink. Schéma na získavanie informácie o aktuálne nameranej teplote je na obrázku 12. Namerané teplotné profily, vidno na obrázku 13. Priebeh nameraného teplotného profilu má charakter všeobecného signálu, ktorý je výstupom sústavy, vybudenej vstupným signálom impulzného charakteru. Z pohľadu riadenia teplotného poľa formy má proces liatia charakter poruchovej veličiny.



Obrázok 12: Schéma zberu dát z experimentálneho zariadenia pomocou Simulinku



Obrázok 13: Teplotné profily namerané termoclánkami na rozhraní odliatok/forma pri liati



Obrázok 14: Umiestnenie výhrevných patrónov a termoclánkov (zdroj [3])

Odliatky chladnúce v dutine formy sú zobrazené na obrázkoch 15 a 16. Porovnanie hrubostenného a tenkostenného odliatku z liacej sekvencie je znázornené na obrázku 17. Na hotových tenkostenných odliatkoch možno pozorovať mierny konvexný profil. Z uvedených výsledkov je možné odvodiť ďalšie smerovanie riešenia úlohy pre dosiahnutie vyhovujúcejších výsledkov.



Obrázok 15: Odliatok č. 1



Obrázok 16: Odliatok č. 2



Obrázok 17: Porovnanie stuhnutých odliatkov

7 Záver

Prezentované experimentálne zariadenie riadeného procesu zlievania s kovovou zlievarenskou formou predstavuje systém s rozloženými parametrami. Dynamika takýchto systémov je vyšetrovaná v časovej aj v priestorovej závislosti. Z tohto dôvodu je teda možné presnejšie modelovať a riadiť popisovaný systém, na rozdiel od klasického systémového prístupu, kde dynamika systému je riešená iba v časovej závislosti. Proces predohrevu formy, proces tuhnutia odliatku sú zložité dynamické procesy, kde kvalita riadenia má podstatný vplyv na bezchybnosť výsledného produktu a tým aj na efektívnosť celkových nákladov.

Z informácií uvedených v článku vyplýva, že najmä v súvislosti s predohrevom, treba nájsť správny pomer teplotných profilov, ktoré podporujú efektívnosť zvoleného druhu zlievarenskej technológie. Pre nastavenie vhodných, resp. požadovaných teplotných profilov je dôležitý správne fungujúci chladiaci a vyhrievací okruh nainštalovaný na zariadení. Pri simulácii, verifikácii simulačných modelov a aplikácii metód riadenia, ktoré zohľadňujú časovo-priestorovú dynamiku riadeného systému, je veľmi významná softvérová podpora prostredím MATLAB&Simulink, DPS Blockset a COMSOL Multiphysics.

References

- [1] G. Hulkó, M. Antoniová, C. Belavý, J. Belanský, J. Szuda, P. Végh. Modelovanie, riadenie a návrh systémov s rozloženými parametrami s demonštráciami v prostredí Matlab. Vydavateľstvo STU v Bratislave, Bratislava, 1998.
- [2] P. Buček. Mechatronická zlievarenská forma ako systém s rozloženými parametrami, Dizertačná práca. Bratislava, 2010.
- [3] P. Noga. Modelovanie a riadenie procesov zlievania ako systémov s rozloženými parametrami, Dizertačná práca. Bratislava, 2011.
- [4] Radhakant Padhi, Sk. Faruque Ali. An account of chronological developments in control of distributed parameter systems. ELSEVIER, 2009.
- [5] P. Vávra. Strojírenská příručka, 7. svazek. Vydavatel'stvo SCIENTA, Praha, 1996.
- [6] F. Pišek, A. Plešinger, Z. Hostinský. Slévarenství II. Praha, SNTL, 1975.
- [7] M. Skarbinski, J. Skarbinski. Technologickosť konštrukcie strojov. Bratislava, Alfa, 1982.
- [8] L. Stanček. Technológia I, Zlievanie. Vydavateľstvo STU v Bratislave, Bratislava, 2006.
- [9] Matlab User Guide, DPS Blockset Help.
- [10] Comsol Multiphysics User Guide
- [11] Internetová stránka pre DPS Blockset. www.dpscontrol.sk

Boris Barbolyas
boris.barbolyas@stuba.sk

Cyril Belavý
cyril.belavy@stuba.sk