

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
Fakulta strojního inženýrství  
Ústav materiálového inženýrství – odbor slévárenství

**Ing. Pavel Boucník**

**SIMULACE MIKROSTRUKTURY S OHLEDEM NA  
DOSAŽENÍ POŽADOVANÝCH VLASTNOSTÍ ODLITKŮ**

**SIMULATION OF MIKROSTRUCTURE WITH A VIEW TO  
OBTAINING REQUIRED PROPERTIES OF CASTINGS**

ZKRÁCENÁ VERZE PHD THESIS

Obor: Strojírenská technologie

Školitel: Doc. Ing. Jaroslav ČECH, CSc.

Oponenti: Prof. Ing. Jaroslav Exner, CSc., FS TU Liberec

Prof. Ing. František Havlíček, CSc., VŠB TU Ostrava

Doc. Ing. Jan Lukeš, CSc., VA v Brně

Datum obhajoby: 11. 9. 2002

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

simulace mikrostruktury, simulace teplotního pole, termofyzikální vlastnosti, měření rychlosti ultrazvuku, obrazová analýza

## **KEY WORDS**

simulation of microstructure, computer simulation of temperature field, thermophysical datas, measurement of ultrasonic waves, picture analysis

## **MÍSTO ULOŽENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE**

oddělení pro vědu a výzkum FSI VUT v Brně

# 1 OBSAH PRÁCE

1	OBSAH PRÁCE .....	3
2	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....	5
3	CÍLE PRÁCE .....	6
4	ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ .....	7
4.1	Volba experimentálního materiálu .....	7
4.2	Měření teploty na odlitcích .....	8
4.3	Měření rychlosti ultrazvuku, tvrdosti a chem. složení .....	8
4.4	Počítačová simulace teplotního pole a struktury .....	10
4.5	Obrazová analýza parametrů grafitu .....	10
5	Hlavní výsledky práce .....	10
5.1	Statistická analýza v kontrole odlitků z LKG .....	10
5.2	Korekce naměřených dat .....	14
5.3	Zpětná simulace .....	15
5.4	Simulace teplotního pole .....	18
5.5	Simulace mikrostruktury .....	19
5.6	Simulace dalších strukturních vlastností .....	20
6	ZÁVĚR .....	21
7	SUMMARY .....	24
8	POUŽITÁ LITERATURA .....	25
9	SEZNAM AUTOROVÝCH PUBLIKACÍ .....	27
10	AUTOROVO CURRICULUM VITAE .....	30



## 2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Modelování nejen technických, ale i biologických, ekonomických či společenských jevů je podmíněno snahou o jejich předpověď do budoucna. V obecnější rovině se jedná o získání věrohodných výsledků o fungování systému na základě již známých faktů a to o systémech, které buď ještě nejsou vůbec vytvořeny či jsou vytvořeny jen zčásti. Účelem modelování - simulace je dosažení předpovědi s co možná největší přesností, a tím ušetření času a finančních prostředků při řízení, ovládní, vývoji a výrobě. Do obecného systému, jakými jsou i slévárenské procesy při lití, tuhnutí a chladnutí odlitků, vstupují podněty v podobě vstupního vektoru, který se prostřednictvím vnitřní převodní funkce transformuje na výstupní vektor [1].

Vstupní i výstupní vektor z takového systému se snažíme popsat. Pomocí popisné statistiky provádíme analýzu dat a pomocí matematické statistiky se snažíme pochopit vnitřní mechanismus tohoto procesu. Následně, při znalosti vnitřního mechanismu a jeho transformační funkce, určíme (pravdě - podobné) výsledky při zadání nového vstupního vektoru hodnot.

Každý děj probíhající v systému látek je však ovlivňován velkým množstvím faktorů a v podstatě jej nelze kvalitativně popsat ze všech hledisek současně. Stávající programy obvykle sledují jen některé vybrané parametry, přičemž z vnějších vlivů jsou uvažovány jen ty nejdůležitější. Velká většina reálných objektů z pevných látek není tvořena homogenní hmotou, která má v libovolném místě stejné vlastnosti a stejnou strukturu [2].

Modelování fyzikálních a posléze konkrétních inženýrských problémů v technické praxi bylo umožněno nejen lepším pochopením podstaty jevů, které jsou pozorovány v přírodě, ale hlavně nasazením výpočetní techniky. Tím bylo možné začlenit již dříve vyvinuté algoritmy a nové algoritmy vyvíjet na jejich základě. Stejně jako i v jiných inženýrských aplikacích, i ve slévárenství, se postupem času vyvinuly a našly uplatnění simulační programy [3].

Prvním jejich úkolem byl popis teplotního pole odlitku, formy a obklopujícího prostředí. Tento proces byl již po matematické stránce dobře zvládnut. Omezením se stává dostupnost termofyzikálních dat, které by teplotní pole simulovaných látek popisovaly. Chování látek při různých teplotách je dobře experimentálně a teoreticky zpracováno jen pro čisté látky. U slitin, které tvoří převážnou většinu používaných látek, jsou vlastnosti určovány jako komplexní vliv všech těchto prvků. Odlévané součásti však nejsou obecně chemicky homogenním materiálem a to ani při mikropohledu, natož při makropohledu. Výsledné termofyzikální vlastnosti součásti nejsou však jen prostým obrazem o jejich chemickém složení. Jedná se o komplexní charakteristiku, která v sobě zahrnuje další vlivy související s utvářením materiálů.

Programy na řešení simulace mikrostruktury odlitků jsou dalším pokračováním ve vývoji modelování slévárenských procesů. Od počátku 80 let, kdy nastoupila éra

numerické simulace a modelování, došlo hlavně v posledním desetiletí k nárůstu aktivit a prací v této oblasti. Tento proces byl umožněn i nasazením výkonného počítačového vybavení [4].

První přístup k řešení predikce mikrostruktury je postaven na „klasickém“ postupu, kdy software řeší pro každý element sítě modelovaného odlitku průsečík mezi vypočtenou ochlazovací křivkou a vloženými daty z příslušného diagramu ARA. Do počítače jsou vložena data charakterizující příslušný graf a po výpočtu získáváme informace o struktuře celého odlitku [5].

Na základě takového postupu určíme druh a množství strukturní součásti (např. feritu a perlitu). Výhodou je jednoduchost a rychlost výpočtu. Lze takto získat i další informace, jako je výsledná tvrdost či pevnost. Takového postupu lze využít i pro řešení kritériálních funkcí. Nevýhodou je, že ochlazovací diagram je vyhotoven jen pro jedno chemické složení slitiny. Celý děj odlévání je však silně stochastický, místně a časově proměnný a velmi citlivý na změny. Dalším omezením je nedostatek vhodných dat. Podobně jako u termofyzikálních dat se i v této oblasti potýkáme s omezeným množstvím údajů.

Dalším typem nepřesnosti při modelování je odchylka chemického složení mezi modelovaným odlitkem a vzorkem, na kterém byla určena vstupní data do výpočtu. Rozdíl je dán i vlivem nehomogenního rozložení chemických prvků tj. odmíšením v odlitku během lití (gravitační) a v procesu tuhnutí (mikro a makroodmíšení). Mnohdy již nelze, pro určení struktury výpočtem, použít řešení jako průsečík křivek chladnutí s jedním vloženým diagramem. Řešením je přímý výpočet struktury, což je zatím záležitost specializovaných pracovišť.

### 3 CÍLE PRÁCE

Disertační práce se zabývá hodnocením mechanických, strukturních a chemických vlastností na několika typech odlitků zhotovených převážně z litiny s kuličkovým grafitem, které jsou odlévány jednou technologií, ze stejné slitiny a ve stejné slévárně. Cílem práce je:

- experimentálně zjistit mechanické a strukturní vlastnosti na statisticky významném počtu vzorků a na významném počtu míst na každém jednom typu odlitku a hodnotit tyto vlastnosti s ohledem na teplotní pole při tuhnutí a chladnutí. Cílem je určit možnost statisticky podchytit závislosti mezi jednotlivými naměřenými parametry a porovnat je mezi skupinami odlitků (a místy na jednom typu odlitku) navzájem,
- určovat strukturní a geometrické charakteristiky jako je tvar a velikost, popřípadě i četnosti a kruhovitost grafitu u litin s kuličkovým grafitem pomocí spojení metod obrazové analýzy a simulace teplotního pole,
- hodnotit rozložení chemického složení v odlitcích se zřetelem na průběh tuhnutí a teplotního pole při chladnutí,

- experimentálně určit a analyzovat průběh teploty na vybraných odlitcích i s ohledem na možné nepřesnosti při použití termočlánků. Cílem je navrhnout prakticky použitelnou metodu pro korekci naměřených dat zatížených případnou chybou v důsledku podmínek měření a tu prakticky ověřit.
- Protože základem každé simulace teplotního pole jsou kvalitní termofyzikální data, je cílem disertační práce vypracovat ucelenou databázi potřebných údajů pro simulace odlitků z litiny, zejména s kuličkovým grafitem. Takto budovaná databanka může sloužit jako zdroj ověřených volných dat pro simulace teplotních polí, při použití v libovolném simulačním programu.
- Popsat jednotlivé vlivy, které vstupují do procesu modelování a simulace odlitků a pokusit se určit jejich přínos k přesnosti při simulacích. Analyzovat rozdíly v termofyzikálních datech slitin s ohledem na chemické složení vzorků, na kterých byly měřeny. Hodnotit, jak se rozdíl v datech projeví na výsledném teplotním poli modelovaného odlitku a to nejen v rozdílu teploty, ale i v čase, kdy je příslušné teploty dosaženo. Pro simulace, kde nejsou k dispozici potřebná termofyzikální data, navrhnout jednoduchou a rychlou metodu pro zjišťování (ověření) těchto dat a tu experimentálně potvrdit.
- Shromáždit na základě literárního přehledu potřebná termofyzikální data pro simulace mikrostruktury odlitků z litiny s kuličkovým grafitem. Analyzovat tato data s ohledem na dosahovanou přesnost při modelování. Navrhnout a ověřit metodu na jejímž základě lze určovat i parametry grafitu, které mají klíčový význam pro výsledné mechanické vlastnosti odlitků.

## 4 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

Výsledná jakost odlitku se skládá z mnoha činitelů. Jedním z nich je i dosažení požadovaných mechanických vlastností, které jsou určovány jak výslednou mikrostrukturou (tvarem a rozložením grafitu v litinách), tak i podobou základní kovové hmoty. Všechny tyto faktory jsou rovněž podmíněné chemickým složením, které je, mimo jiné, určeno odvodem tepla a podmínkami při lití [6].

### 4.1 Volba experimentálního materiálu

Pro technickou praxi je velmi důležitá možnost určovat jednu vlastnost na základě měření vlastnosti druhé. Ve slévárenské praxi je to například určování kvality odlitků (struktury matrice, pevnosti) na základě měření rychlosti podélných ultrazvukových vln. Tato metoda představuje rychlou nepřímou zkoušku, která dovoluje stanovit například pevnost ve stěnách litinových odlitků [7]. Proto se první část experimentálních prací zabývala ověřením míry (ne)stejnorodosti chemických, mechanických a strukturních vlastností na odlitcích a aplikace vztahů pro popis struktury a mechanických vlastností na základě měření rychlosti.

Měření bylo provedeno na pěti typech odlitků, které byly lité stejnou technologií (vyjma odlitku válce litého do kokily) v jedné slévárně - Motor JIKOV, slévárna litiny a.s. České Budějovice, z taveb o předepsaném chemickém složení pro litinu EN-GJS-500-7 (ČSN 42 23 05). Celkem byly zhotoveny tyto odlitky: Přilité tyče určené pro tahovou zkoušku [8], komerčně lité odlitky Třmenů (obr. 1. a 2.), kde jsem prováděl měření na místech označených jako čelo, ramena a na místech měření rychlosti ultrazvuku v provozu. Dále to byl odlitek Experimentálního válce litý do kokily, odlitky Držáku a Páky.

Tím jsem vytvořil dostatečný počet vzorků pro statistickou analýzu. Díky tomu můžeme sledovat změny parametrů, které jsou ovlivněny z velké části jen konstrukcí odlitku, resp. návrhem slévárenské formy. Pro statistické vyhodnocení bylo použito programu Statgraphics a pro část výsledků i software QC Expert [9].

Dále bylo v disertační práci použit odlitek Motocyklového kola z hořčíkové slitiny [10], který byl odlit ve slévárně ČKD Hradec Králové - závod Plotiště a experimentální válec z Mg slitiny zhotovený ve školní slévárně VUT FSI Brno.

## **4.2 Měření teploty na odlitcích**

Měření teploty bylo provedeno na čtyřech typech odlitků. A to odlitku třmene, odlitku válce, odlitku motocyklového kola a válce z Mg slitiny. Pro první dva typy odlitků bylo použito slitiny ze stejné tavby (litina s kuličkovým grafitem), u druhé dvojice se jednalo o stejnou slitinu, která byla znovu přetavena (AZ91HP).

Signál z měřících termočlánků byl veden do vyhodnocovací jednotky v notebooku TAQ book 100 přes AD převodník. Zpracování proběhlo pomocí software TAQ View od firmy Omega. Analýza naměřených dat byla provedena pomocí softwarového balíku Mathcad a MS Excel. Termočlánky byly typu Pt-PtRh10 (pro měření v litinách) a Ni-NiCr (pro měření v Mg slitině).

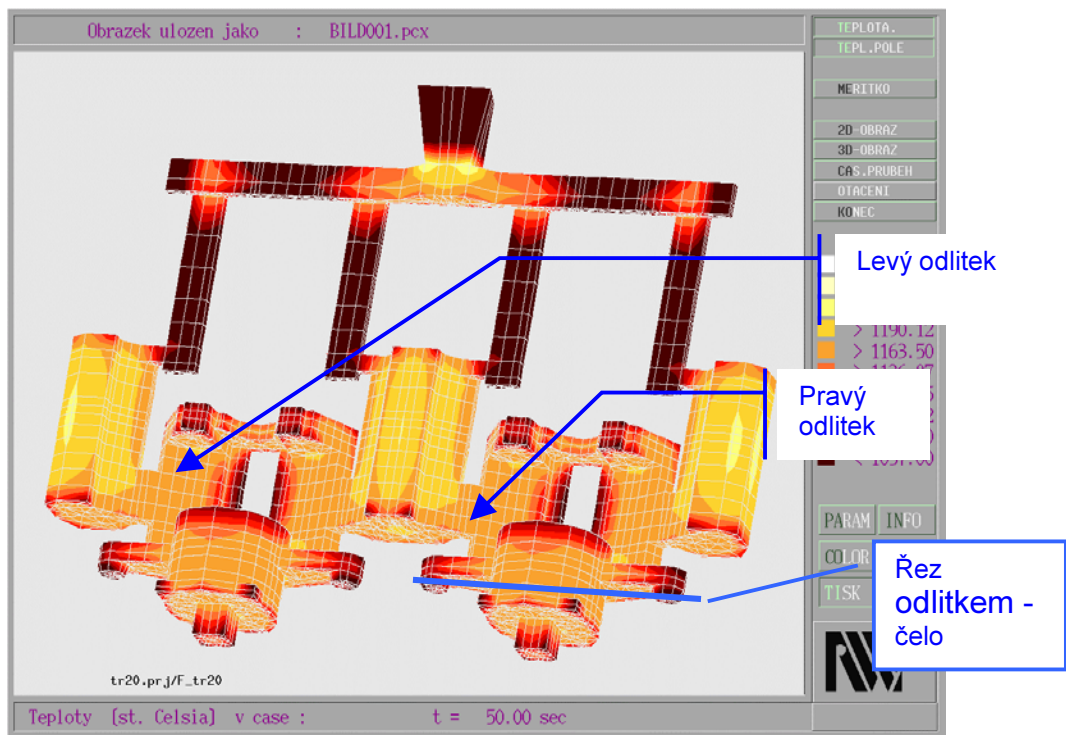
## **4.3 Měření rychlosti ultrazvuku, tvrdosti a chem. složení**

Na vzorcích byla určována absolutní rychlost ultrazvuku a tvrdost, popřípadě i struktura matrice a chemické složení. Odlitky byly obrobeny na pracovišti odboru slévárenství a měření tvrdosti bylo provedeno na tvrdoměru MP 250. Před měřením tvrdosti a třikrát v jeho průběhu byla přesnost tvrdoměru kontrolována pomocí vtisku do etalonu. Vždy se prokázala jeho schopnost k správnému měření (rozdíl od etalonu byl do 1 HB).

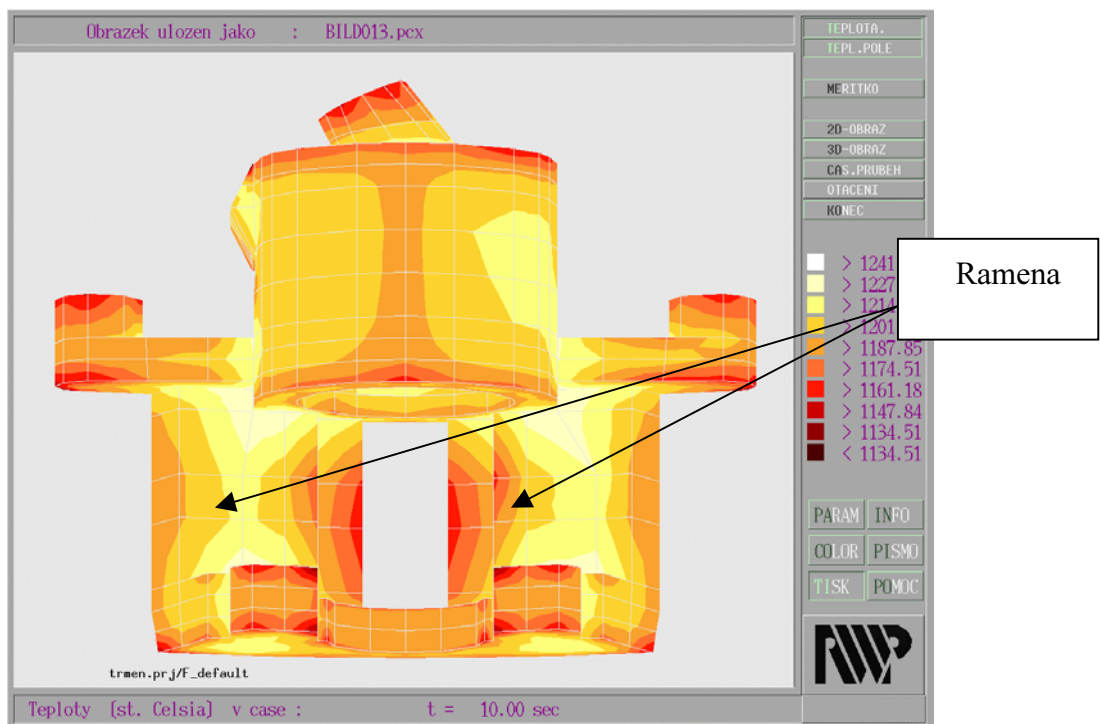
Byla snaha dodržet stejná místa pro jednotlivé druhy měření (tvrdost dle HB měřena na stejných místech jako absolutní rychlost ultrazvuku a parametry struktury, popřípadě složení).

Měření rychlosti ultrazvuku probíhala rovněž na pracovišti odboru slévárenství za použití přístroje Echometru 1060, sonda HB2-10 MHz o průměru 10 mm, akustická vazba - olej. Plochy byly obrobeny tak, aby byly rovnoběžné s protilehlou stranou.





Obr. 1: Slévárenská sestava třmene s vyznačením míst měření na ploše označovaného jako „čelo“ a „ramena“



Obr. 2: Vyznačení míst odběru vzorků – ramen

Na vzorcích z odlitků třmene, válce, motocyklového kola jsem provedl chemickou analýzu a to vždy na několika místech na odlitku, abych potvrdil či vyvrátil domněnku o nehomogenním chemickém složení na ploše odlitků.

Odlitky ze slitiny s kuličkovým grafitem byly hodnoceny v laboratořích slévárny Motor JIKOV České Budějovice, a.s. - kvantometr ARL a část vzorků analyzovali i na pracovišti VUT FSI - odbor OSFA (Energiově disperzní rentgenový analyzátor EDAX ZAF).

#### **4.4 Počítačová simulace teplotního pole a struktury**

Po experimentální části následovalo simulování procesu tuhnutí a chladnutí. Geometrie odlitku a formy byla zhotovena dle technické dokumentace a konkrétního odlitku. Výpočty byly provedeny na pracovních stanicích Hewlett-Packard Apollo 712/80 a 715/50 s operačním systémem HP UNIX v. 9.0, za použití modelovacího programu SIMTEC od firmy RWP Aachen.

Simulace teplotního pole jsem provedl u odlitku třmene, válce a motocyklového kola. Při této práci je třeba vycházet z termofyzikálních údajů pro danou slitinu získaných z dostupné literatury, popřípadě z databanky simulačního programu SIMTEC. Následuje simulace výsledné mikrostruktury odlitků a to opět programem SIMTEC.

#### **4.5 Obrazová analýza parametrů grafitu**

Pro analýzu parametrů grafitů na odlitcích třmenů bylo použito metod obrazové analýzy, protože pro naše účely je hodnocení grafitu dle metodik daných stávajícími normami málo přesné. Snímání vzorků probíhalo na metalograficky připravených oblastech, které byly upraveny metodami klasické metalografie. Vyhodnocování bylo uskutečněno mikroskopem Neophot s připojenou digitální snímací CCD kamerou. Analýza scanované plochy byla provedena programem Lucia na pracoviště ÚMI - FSI, odbor Strukturní a fázové analýzy - OSFA.

## **5 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE**

### **5.1 Statistická analýza v kontrole odlitků z LKG**

Přestože se ve všech případech odlitků z LKG jednalo o stejnou litinu s kuličkovým grafitem (ČSN 42 23 05), odlitky byly odlévané v jedné slévárně (jednou technologií) a do jednotné bentonitové formovací směsi (vyjma lití do kovové kokily), prokázalo se, že pro každý typ vznikly samostatné statistické soubory rychlosti ultrazvukových vln, tvrdosti, popřípadě dalších vlastností.

Oblast tyčí pro tahovou zkoušku se vyznačuje nejnižší tvrdostí (od 170 HB) a nejnižší rychlostí ultrazvuku - od 5410 ms<sup>-1</sup>. Avšak rychlosti šíření ultrazvuku odpovídající nejnižším hodnotám tvrdosti „zasahují“ až do oblasti hodnot rychlosti ultrazvuku, která by spíše odpovídala kokilovému lití válce (max. 5710 ms<sup>-1</sup>), a tudíž

i vyšším hodnotám tvrdosti. Rozpětí hodnot rychlosti podélných ultrazvukových vln je  $300 \text{ ms}^{-1}$ .

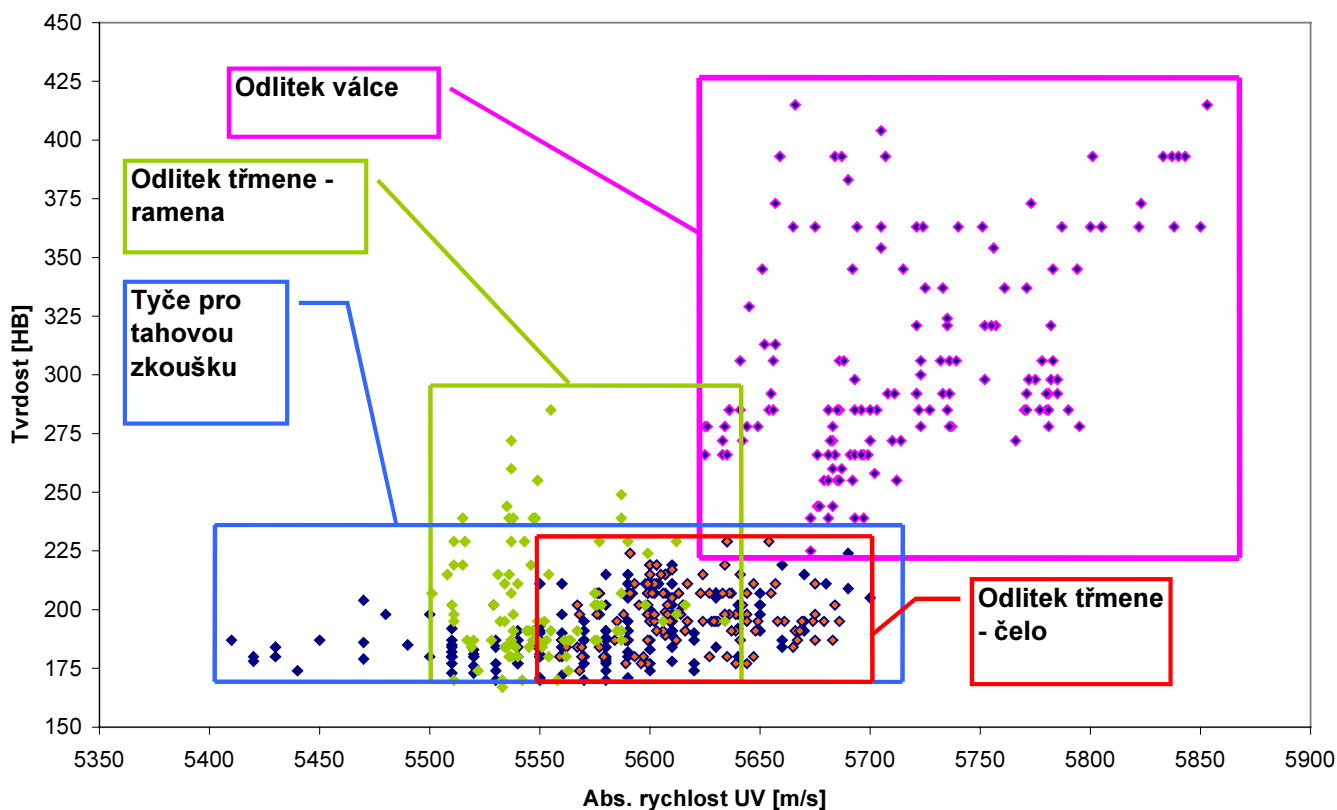
Na odlitku třmene jsem prováděl v laboratořích odboru slévárenství měření na dvou oblastech - čelo a ramena (viz. obr. 1 a 2) a výsledkem jsou dva statistické soubory. V oblasti Odlitek třmene - čelo je tvrdost od 174 HB do 229 HB a rychlost ultrazvuku od  $5529$  do  $5686 \text{ ms}^{-1}$  (rozdíl je  $157 \text{ ms}^{-1}$ ), zatímco v oblasti Odlitek třmene - ramena je vyšší rozptyl rychlosti ultrazvuku (od  $5387$  do  $5634 \text{ ms}^{-1}$  - rozdíl je  $247 \text{ ms}^{-1}$ ) a vyšší tvrdost - až do hodnoty 285 HB. Je zřejmé, že se jedná o samostatné statistické soubory, které byly utvářeny rozdílným tuhnutím a teplotním polem – obr. 3. Potvrzení, že hodnoty tvrdosti a rychlosti ultrazvuku jsou závislé na poloze na odlitku, resp. na rozdílném teplotním poli, dokazuje i průběh obsahu perlitu a průměrný počet grafitu po třmení. Tento poměr rovněž koresponduje s průměrným počtem pravidelného grafitu.

Lze konstatovat, že pro jednotlivá místa měření tvrdosti a rychlosti ultrazvuku vznikají samostatné statistické soubory, ke kterým je možné přiřadit teplotní pole. Teplotní pole ovlivňuje i strukturu, která následně působí na tvrdost a rychlost průchodu ultrazvukových vln.

Z měření je patrné, že rychlost ultrazvukových vln popisující chování ve stěně odlitku vykazuje obecně menší relativní rozptyl hodnot než měření tvrdosti HB. Například hodnoty tvrdosti pro místo 1 na ramenech třmene (obr. 3) jsou mezi 170 až 285 HB, což je rozdíl 115 HB  $\Rightarrow$  procentuální podíl z průměrné hodnoty je přes 50 %! Rovněž v místě měření 2 je tento poměr přes 30 %, podobně jako v místě 3. Naproti tomu je u měření rychlosti ultrazvuku na stejných místech relativní poměr rozdílu maximální a minimální hodnoty ku průměrné hodnotě mnohem menší. Pro místo 1 je rozdíl  $247 \text{ ms}^{-1}$ , což je jen 4,5 %. V místě 2 je to 2 % a v místě 3 přes 2 %. K podobným závěrům dospějeme i u dalších měření. Z toho vyplývá, že měření rychlosti ultrazvuku vykazuje řádově menší rozptyl relativních hodnot. Soubory dat jsou i blíže k normálnímu rozdělení.

Je pochopitelné, že pro porovnání obou metod měření a následného uznání této metody jako zkušební by bylo vhodné provést podstatně více měření na více druzích materiálů a na srovnatelných k tomu navržených typech odlitků. Takový experiment je však časově a finančně značně náročný.

Rychlosti ultrazvukových vln u měření na třmenech v provozu (neobrobené plochy) jsou od  $5677 \text{ ms}^{-1}$  do  $5790 \text{ ms}^{-1}$ , s průměrnou hodnotou  $5729 \text{ ms}^{-1}$ . Zde byla všechna měření provedena jen na jednom místě odlitku a rozptyl hodnot je  $247 \text{ ms}^{-1}$ , což je 4,3 % z průměrné hodnoty. Oproti obrobené ploše na třmenech je tento rozptyl větší o cca 2 %.



Obr. 3: Závislost mezi abs. rychlostí ultrazvuku a tvrdostí HB u několika typů odlitků a tyčí z LKG

Za účelem komplexní analýzy souboru dat z odlitků Přilítých tyčí jsem použil metody hlavních komponent, tab. 1.

Tabulka. 1. Výsledky analýzy hlavních komponent

Komponenta	Podíl [%]	Kumulativní podíl [%]
Pevnost Rm [MPa]	48,02	48,02
Tvrдост [HB]	16,78	64,80
Tažnost A <sub>5</sub> [%]	14,19	78,98
Obsah C [%]	9,06	88,04
Obsah Si [%]	4,71	92,75
Obsah Mn [%]	3,39	96,14
Obsah P [%]	2,30	98,44
Obsah S [%]	1,32	99,76
Obsah Cu [%]	0,24	100,00

Z tabulky 1 je zřejmé, že pro vysvětlení chování rychlosti ultrazvuku u tohoto typu odlitku je nutné brát do úvahy první čtyři komponenty tj. vedle meze pevnosti Rm a tvrdosti HB také hodnotu tažnosti A<sub>5</sub> a obsah uhlíku.

Rozmezí hodnot tvrdosti u odlitku Držáku je od 179 do 219 HB (rozdíl je 40 HB, tj. 20 % z průměrné hodnoty), rychlost ultrazvuku je od 5379 po 5721 ms<sup>-1</sup> (rozdíl je 342 ms<sup>-1</sup>, tj. 6,2 % z průměrné hodnoty). Větší rozptyl hodnot u tohoto měření než na třmenech v provozu je vlivem měření na několika místech na odlitku. Ukazuje se tedy, že vliv místa měření má podstatnější vliv na rozptyl hodnot, než vliv obrobené/neobrobené plochy.

Rychlosti ultrazvukových vln u měření na odlitku Páky jsou od 5530 ms<sup>-1</sup> po 5890 ms<sup>-1</sup>, s průměrnou hodnotou 5646 ms<sup>-1</sup>. Předcházející závěr dokazují i tyto výsledky, kde je procentuální rozptyl hodnot přes 6 % z průměrné hodnoty (rozdíl je 360 ms<sup>-1</sup>).

Dalším vzorkem je odlitek Válce. Vzhledem k tomu, že se jednalo o lití do kokily, dosahuje tvrdost nejvyšší hodnoty (až 415 HB) a tomu i odpovídající rychlosti  $c_L$  (max. 5853 ms<sup>-1</sup>). Ale jak svojí dolní hranicí tvrdosti (min. 225 HB), tak rychlostí ultrazvuku (min. 5625 ms<sup>-1</sup>) „zasahuje“ do oblastí pro odlitky lité do bentonitu.

I zde platí, že co oblast na odlitku to samostatný statistický soubor, lišící se svým teplotním polem, chemickým složením, výslednou strukturou, tvrdostí a rychlostí ultrazvukových vln – obr. 3.

Válec byl rozdělen po výšce na čtyři vzorky A až D. U válce je rozptyl hodnot tvrdosti v řezu A přes 45 % z průměrné hodnoty. V řezu B je to 48 %, v řezu C 46 % a v dolním vzorku řezu D je to přes 62 %. Tento značný rozptyl je jednoznačně dán značně nehomogenním teplotním polem při chladnutí odlitku v kokile a rovněž chemickou nestejnorodostí, zvláště na ploše řezu D, která je u dna kokily. To jsem potvrdil analýzou chemického složení po výšce a přes průřez válce. U měření rychlosti ultrazvuku je maximální rozdíl hodnot 1,8 % v řezu A, 1,5 % v řezu B, 1,6 % v řezu C a 2,5 % v řezu D.

Z těchto experimentů vyplývá, že hodnoty zjištěné v tenké vrstvě u vzorků (HB, chemické složení, ...) mají větší rozptyl hodnot, protože popisují jen povrchovou vrstvu. Vlivem toho jsou citlivé na místní odlišnosti vlastností, zatímco měření přes celou tloušťku stěny odlitku (rychlost ultrazvuku) zahrnuje příspěvek od celé stěny, díky čemuž jsou naměřené hodnoty méně náchylné k místním nehomogenitám. Z toho vyplývá jejich mnohem menší rozptyl.

Přestože zde naměřená data pocházejí z odlitků ze slitiny EN-GJS-500-7 (ČSN 42 2305) o přibližně stejném chemickém složení, není možné nalézt funkci, která by, byť jen pro tento jeden typ materiálu a formovací směs (a tudíž i rychlost odvodu tepla), popisovala dostatečně spolehlivě (s vysokým korelačním koeficientem) chování rychlosti podélných ultrazvukových vln v závislosti na tvrdosti. Je to dáno charakterem měření tvrdosti a rozptylem hodnot. Schopnost popsat rychlost šíření ultrazvukových vln za použití analýzy hlavních komponent jsem u vzorků přilitých tyčí přišel k závěru, že pro dostatečný popis rychlosti ultrazvuku je potřeba použít kombinace alespoň čtyř veličin: pevnosti v tahu, tvrdosti, tažnosti a obsahu uhlíku.

Proto vždy před zavedením ultrazvukové metody do výstupní kontroly odlitků je třeba provést přímé měření vlastností na statisticky významném počtu vzorků

a teprve následně považovat tuto metodu za věrohodnou a průkaznou pro zjišťování stavu kvality odlitků, s periodicky se opakujícími přímými kontrolami pro ověření trendu vlastností.

Zároveň nelze přenášet korelační vztahy zjištěné na jednom typu odlitku na druhý, ba ani v rámci jednoho odlitku z GJS (LKG) z jedné oblasti na oblast druhou, jak dokázal případ Třmenů - ramen, kdy i v rámci velmi blízkého okolí získáváme odlišné statistické soubory. Protože by bylo nutné dodržet stejnou tloušťku materiálu, stejné rychlosti chladnutí ve formě a přibližně stejné chemické složení, což v provozních podmínkách není možné.

Zároveň se prokázalo, že statistické soubory většinou nepocházejí z normálního rozdělení, což signalizuje na další nepodchycené parametry ovlivňující měření a to i v laboratorních podmínkách (tab. 2). Soudím na odlišnosti struktury, lokálního chemického složení, parametrů grafitu, ... a samozřejmě i na chyby měření.

*Tabulka. 2 Testování hypotéz o normálním rozdělení a homogenitě souborů ze vzorků Přilíých tyčí*

<b>Proměnná</b>	<b>Normální rozdělení</b>	<b>Homogenita</b>
Abs. rychlost ultrazvuku	Zamítnuto	Zamítnuta
Pevnost Rm	Zamítnuto	Zamítnuta
Tvrдость HB	Zamítnuto	Zamítnuta
Tažnost A5	<i>Přijato</i>	Zamítnuta
Obsah C	Zamítnuto	Zamítnuta
Obsah Si	Zamítnuto	Zamítnuta
Obsah Mn	Zamítnuto	Zamítnuta
Obsah P	Zamítnuto	Zamítnuta
Obsah S	Zamítnuto	Zamítnuta
Obsah Cu	<i>Přijato</i>	<i>Přijata</i>
Zastoupení perlitu	Zamítnuto	Zamítnuto
Zastoupení feritu	Zamítnuto	Zamítnuta
Zastoupení cementitu	Zamítnuto	Zamítnuta

Pozornost, kterou jsme věnovali kontrole normálního rozdělení a homogenitě naměřených souborů dat, byla založena na snaze analyzovat jednotlivé procesy a jejich ovlivnění dalšími faktory, které nejsou podchyceny. Výsledky testů většinou nepotvrzují normální rozdělení, souhrnně v tab. 2.

## **5.2 Korekce naměřených dat**

Způsobem, jak hodnotit správnost počítačové simulace teplotního pole, je její porovnání s výsledky měření teploty na chladičném odlitku. Hodnoty teploty změřené pomocí termočlánků však nelze vždy považovat za správné a přesně zaznamenávající skutečnost. Vedle chyb termočlánků a měřicích souprav, které lze dopředu předvídat a měření korigovat, a to ještě před jejím začátkem či v jeho

průběhu, jsou problémem při měření i nepřesnosti vzniklé teplotním gradientem po délce termočlásku. Kromě toho v důsledku značného gradientu teploty ve stěně odlitku se i velmi malé odchýlení polohy termočlásku od stanoveného místa významně projeví na výsledku měření. Proto se má vždy odlitek rozříznout v místě konce termočlásku a přesně určit jeho polohu ve stěně.

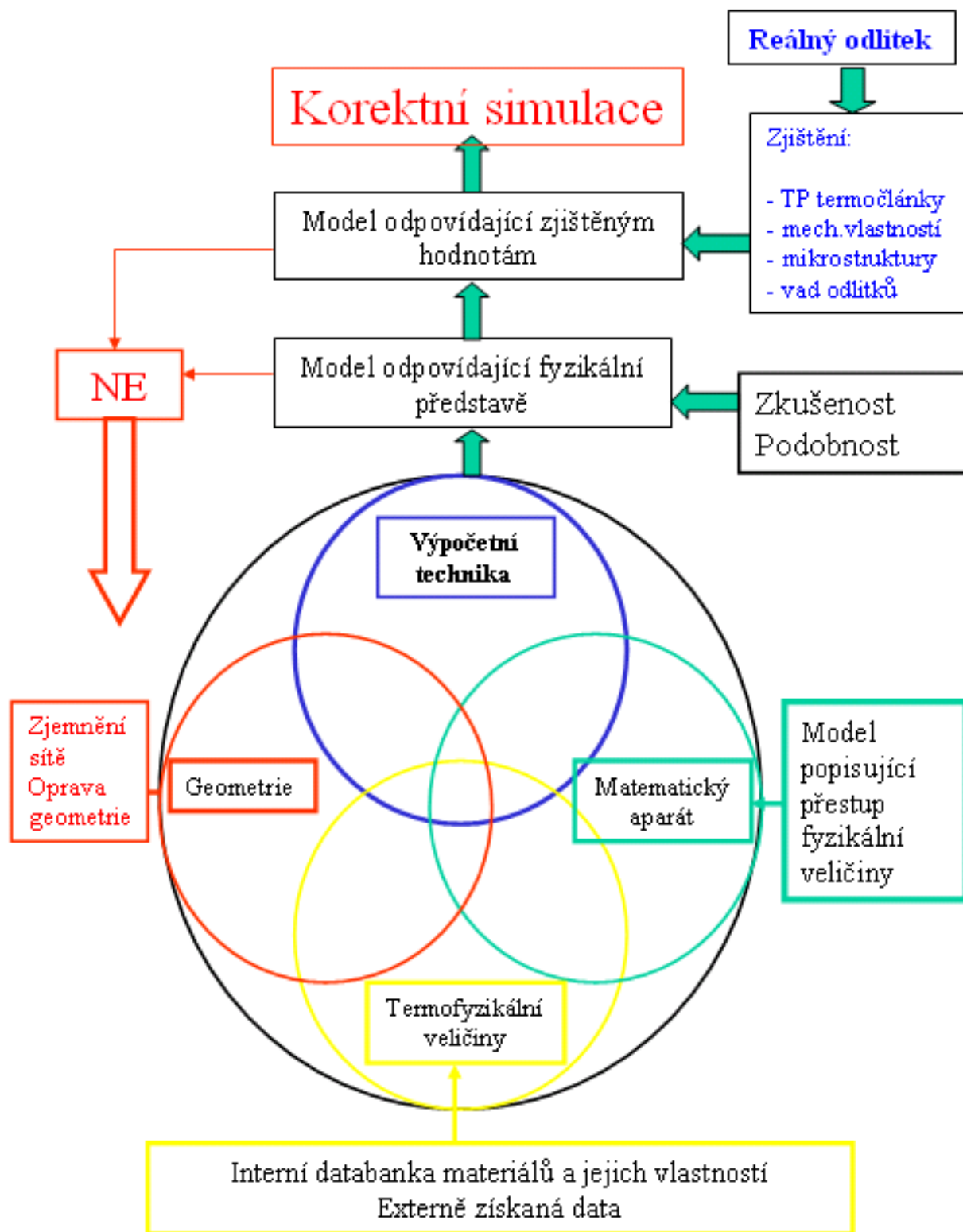
Je proto vhodné, aby konec termočlásku byl ve stěně litého kovu alespoň několik centimetrů (ze zkušenosti doporučuji v tepelné ose a v hloubce dvou cm – pro lití do nekovové formy. Ale pozor na možné nečistoty v ose). V praxi je však tato zásada mnohdy nespílitelná, neboť tloušťka stěn u odlitků bývá někdy jen několik milimetrů. Naměřené hodnoty jsou proto nižší, než je tomu ve skutečnosti. U navržené korekce dat vycházím z předpokladu, že rozdíl mezi skutečným teplotním polem a tím, které bylo změřeno termočlásky, je ovlivněno teplotním spádem. Nejmenší chyba je tudíž při teplotách na konci chladnutí odlitku, kde se tento rozdíl limitně blíží k nule. Na druhou stranu se můžeme opřít o známé teploty fázových přeměn.

Experimentální ověření tohoto postupu bylo provedeno na odlitku motocyklového kola z hořčíkové slitiny MgAZ91. Tento postup je univerzální a volba této slitiny s relativně nízkou teplotou lití usnadnila provádění ucelené experimentální části. Provedl jsem měření teplotního pole na odlitku válce, který byl ze stejné slitiny jako motocyklové kolo. Z grafu naměřených hodnot teploty určíme fázovou přeměnu. První měření odlitku válce bylo do litinové kokily a druhé do bentonitové formy. Zaústění termočlásku do stěny odlitku kola bylo max. 6 mm, ale u odlitku válce 100 mm. Proto byla přesnost měření teploty na odlitku válce vůči měření na odlitku motocyklového kola mnohem větší, zvláště při lití do bentonitové formy. U tohoto válce bylo totiž pomalejší tuhnutí než v kokile a proto podmínky (z více důvodů) umožňují ještě přesnější měření.

Na základě měření teploty na válci, určení teploty likvidu a eutektické přeměny, došlo k opravě naměřených hodnot teploty z měření na odlitku motocyklového kola. Zde byl původní rozdíl teploty eutektické přeměny  $38^{\circ}\text{C}$  a mezi teplotami likvidu dokonce  $68^{\circ}\text{C}$ . Je pochopitelné, že optimálním řešením by bylo u odlitku kde předpokládáme zatížení chybou opakování měření. Mnohé experimenty však opakovat z technologických či finančních důvodů nelze a nebo (což je častější případ) i při opakovaném měření nejsme schopni zajistit vhodnější podmínky.

### **5.3 Zpětná simulace**

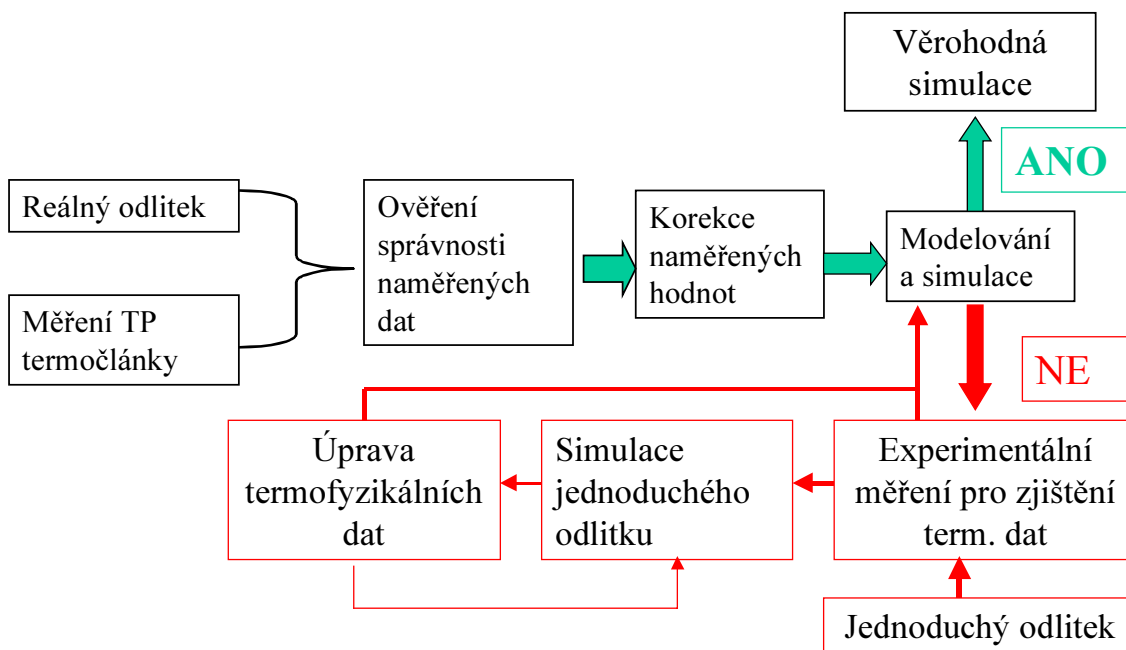
Ve slévárenské praxi je předmětem modelování soustava odlitek - forma - obklopující prostředí. Proces modelování a simulace je komplexní proces sestávající se z několika etap. Znázorníme si jej dle obr. 4. Za vstup do počítačové simulace lze považovat Geometrii, Výpočetní techniku, Matematický aparát a Termofyzikální veličiny. Výstup z procesu simulace je model reálného děje, který vždy hodnotíme z hlediska jeho správnosti. Budou-li výsledky odpovídat námi modelované situaci, lze považovat modelování a simulaci za korektní.



Obr. 4: Proces simulace jako komplexní děj

Jediným efektivním způsobem jak zvýšit přesnost při modelování a simulacích je použití přesnějších termofyzikálních dat popisujících jednotlivé materiály v řešené sestavě za rozdílných teplot a přestupy tepla mezi nimi.





Obr. 5: Schématické zobrazení postupu zpětné simulace

Navrhl jsem experiment, který slouží ke zpřesnění termofyzikálních údajů pro potřeby simulace. Při tzv. zpětné simulaci - obr. 5 - nejprve provádíme měření teploty na jednoduchém odlitku (např. válci) odlitém ze stejné slitiny jako měřený odlitek. Odlévání provádíme za stejných podmínek. Vyhodnotíme měření teploty, včetně fázových přeměn. Následně provedeme simulaci teplotního pole tohoto jednoduchého odlitku a porovnáme ji s naměřenými daty. Pokud se křivky chladnutí zjištěné ze simulace a z experimentu neshodují, opakovaně provádíme změny vstupních termofyzikálních dat z databanky materiálů v simulačním programu vstupujících do výpočtu tak, aby při dalším výpočtu teplotního pole odpovídalo dostatečně přesně experimentálně zjištěným hodnotám u tohoto jednoduchého odlitku.

Tento cyklus provádíme do okamžiku, kdy výsledek ze simulace a z experimentálního odlitku válce se shodují. Ze zkušenosti postačí tři cykly. Poté přeneseme takto upravená termofyzikální data na výpočet pro původní odlitek. Pokud jsme pracovali správně, je následná simulace teplotního pole, již bez úpravy dat, korektní.

Navržený postup byl aplikován na odlitku motocyklového kola. Prvotní simulace teplotního pole odlitku kola za využití dostupných termofyzikálních dat obsažených v databance programu SIMTEC nebyla dost přesná. Nejprve jsem provedl simulaci teplotního pole odlitku válce v bentonitové směsi a ve dvou krocích upravil termofyzikální data, konkrétně součinitele tepelné vodivosti kovu vstupující do výpočtu. Ty jsem již bez úprav použil k opětovné simulaci složitějšího odlitku motocyklového kola. Na závěr bylo dosaženo velmi dobré shody (do 15°C) mezi

simulací a experimentem. Je jasné, že takové úpravy lze provádět jen v reálných mezích, které odpovídají změně termofyzikálních vlastností s měnícím se chemickým složením slitiny.

## 5.4 Simulace teplotního pole

Chování modelování látek v průběhu simulace je určováno termofyzikálními daty, které se mění nejen s teplotou, ale i složením slitin. I průběhy vlastností u čistých prvků naznačují, že schopnost popisu a matematického vyjádření hodnot termofyzikálních parametrů materiálů je značně obtížná [např. 11, 12, 13]. Při uvažování dvousložkové slitiny a teploty vzniká pro popis tří dimenzionální graf. Přitom každá slévárenská slitina obsahuje mnohem více složek, a tím se i celý děj posouvá z prostorové úlohy k  $(n+1)$  - dimenzionálnímu řešení, kde „ $n$ “ je počet prvků ve slitině a „ $1$ “ vyjadřuje teplotu. Navíc se potýkáme s nedostatkem dat, který by takový popis umožnil. U vícefázových slitin přispívají k teplotním vlastnostem i karbidy, grafit či další strukturní součásti. Teplotní parametry jsou samozřejmě i funkcí struktury matrice.

V praxi jsme s chemickým složením modelovaného odlitku vždy mimo tabelovaná data a je třeba hodnotit, jak velké chyby se můžeme dopustit, pokud použijeme termofyzikální údaje pro slitiny o chemickém složení, mezi nimiž se nalézají i složení námi modelované součásti. Hodnocení a vzájemné porovnávání termofyzikálních parametrů je nutné vždy s ohledem na řešený problém, protože porovnání rozdílů v samotných číslech nám neposkytuje jasnou představu o tom, co tyto rozdíly znamenají při použití ve výpočtech v simulačních programech.

Uskutečnil jsem počítačové simulace, kdy jsem porovnával, jak se mění výsledné teplotní pole šesti slitin z materiálové skupiny litiny s kuličkovým grafitem, při ochlazování v šesti různých formovacích směsích. Účelem výpočtu bylo zjistit křivky chladnutí pro vybraná místa na odlitku za použití dat pro výpočet jednoho typu formovací směsi a šesti slitin litiny s kuličkovým grafitem. Ve vybraných časech jsem určil rozdíly mezi maximální a minimální teplotou v daném místě. Totéž bylo provedeno i při zvolené teplotě -  $800^{\circ}\text{C}$  - kdy jsem určil rozdíl v čase, kdy bylo této teploty na jednotlivých místech dosaženo.

Takto jsem získal pohled na rozdíl v křivkách chladnutí při zachování jedné formovací směsi, ale rozdílných dat pro materiál simulovaného kovu. Jinými slovy, získal jsem odpověď na otázku, jak termofyzikální data ovlivňují teplotní pole na konkrétním odlitku. Na základě analýzy křivek chladnutí zjistíme, jak velké maximální chyby se můžeme dopustit a zda je tato chyba pro nás ještě přijatelná.

Navržený postup ukázal, že i při použití blízkých dat pro jednu materiálovou skupinu (v rámci disertační práce pro LKG), lze získat rozdílné výsledky v teplotě v řádu až desítek  $^{\circ}\text{C}$  a čase v řádu až minut. Tak například pro případ ochlazování ve směsi bentonitu byl pro navržený odlitek maximální rozdíl  $93^{\circ}\text{C}$  pro tenkou stěnu, resp.  $82^{\circ}\text{C}$  pro silnou stěnu (120 mm).

Tento postup je zvlášť důležitý pro praxi, kdy máme konkrétní tvar odlitků a k dispozici termofyzikální hodnoty pro slitiny o blízkých chemických složeních od modelovaného odlitku. I zde je třeba hodnotit, jak maximálně velké chyby se můžeme dopustit a jak tato chyba ovlivní výslednou simulaci.

## 5.5 Simulace mikrostruktury

Podobně jako při hodnocení termofyzikálních vlastností vstupujících do výpočtu teplotního pole odlitku, je i při simulaci mikrostruktury potřeba zadat data, která byla naměřena na vzorcích o co nejbližším chemickém složení jako má modelovaná součást. Porovnání hodnot transformačních diagramů dvou či více slitin opět neposkytuje zcela jasnou představu o rozdílech ve vypočtené struktuře. Je proto nutné provést simulace mikrostruktur za použití dat z více slitin o blízkém chemickém složení od složení simulovaného odlitku.

Navíc v literatuře [např. 14] uváděné transformační diagramy ARA resp. IRA obvykle neobsahují informace o tvorbě strukturních součástí, které jsou potřeba pro výpočty v simulačních programech. Většina volně publikovaných transformačních diagramů obsahuje jen znázornění transformačních křivek, popřípadě křivek odpovídající výsledné tvrdosti a chybí procentuální vyjádření obsahu příslušných fází. Pro účely simulačních výpočtů musí být rovněž obsažena data o procentuálním podílu vyloučených fází v čase [15].

Zajímalo mě, jak se mění simulované množství strukturních složek v závislosti na změně vstupních transformačních dat při zachování ostatních vstupních parametrů (včetně teplotního pole). Na odlitku třmene jsem proto provedl deset výpočtů mikrostruktury za použití diagramů ARA pro slitiny LKG. Pro zjednodušení jsem ponechal pro rozdílné chemické složení slitin LKG stejná termofyzikální data pro výpočet teplotního pole. Přesto jsem se při výpočtu podílu struktury nedopustil chyb v řádu větším než několik procent. Na druhou stranu mi tento postup umožnil porovnávat jednotlivé transformační diagramy při jinak stejných podmínkách (stejný odlitek, stejné podmínky chladnutí a stejná rychlost chladnutí).

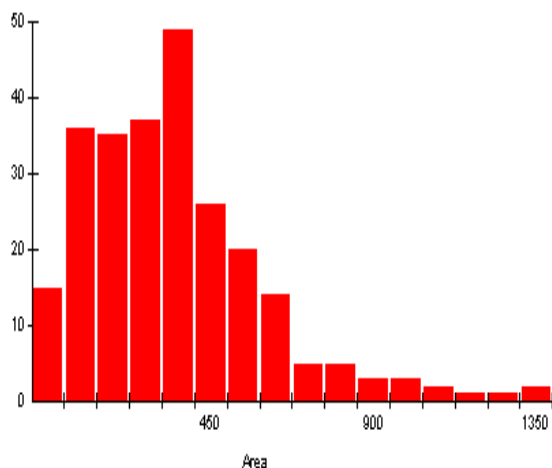
Zjistil jsem, že při použití dat získaných pro slitiny o odlišném chemickém složení, byť pro jednu materiálovou skupinu – jako zde litiny s kuličkovým grafitem – získáváme rozdíl v podílu jednotlivých složek v řádu až desítek procent.

U simulovaných hodnot tvrdosti se navíc zobrazuje pro celý odlitek třmene jen omezený interval tvrdostí. To neodpovídá experimentálně zjištěným hodnotám. Je zřejmé, že pro lepší výpočty je třeba zadávat přesnější data popisující tvrdost v závislosti na čase transformace. Tvrdost je rovněž závislá na více faktorech – nejen na rychlosti chladnutí, které nejsou při tomto výpočtu podchyceny.

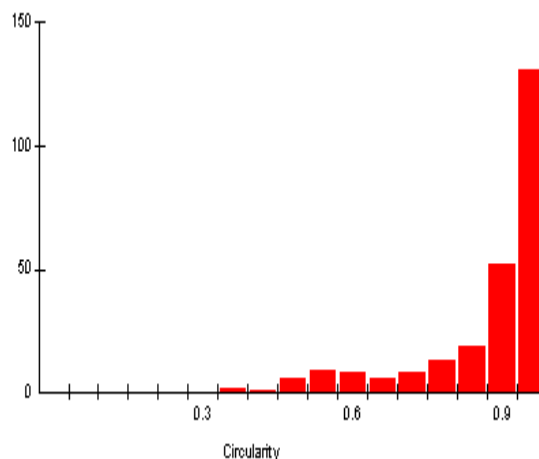
## 5.6 Simulace dalších strukturních vlastností

V rámci komplexního posuzování kvality odlitků jsem provedl na plochách čela odlitků Třmene (ČSN 42 2305) vyhodnocení množství grafitu a jeho tvarových charakteristik pomocí obrazové analýzy. Cílem bylo využít takto zjištěné výsledky spolu se simulací teplotního pole pro další místa, kde tvarové charakteristiky grafitu ještě nebyly zjišťovány, a pokusit se je určit jen na základě simulace teplotního pole. Na závěr výsledky charakteristik grafitu opět porovnat s obrazovou analýzou.

Výsledkem je zjištění průměrné velikosti grafitů na ploše, jeho minimální a maximální velikost a rovněž směrodatné odchytky. U kruhovitosti je spočtena její střední hodnota ze všech objektů, minimální a maximální kruhovitost, včetně směrodatné odchytky. Důležitou charakteristikou jsou histogramy rozdělení četnosti grafitů podle jeho plochy a kruhovitosti. Ukázky vyhodnocení parametrů grafitů jsou na obrázcích 6 a 7.



Obr. 6: Histogram plochy [ $\mu\text{m}^2$ ]



Obr. 7: Histogram kruhovitosti grafitu

Teplotní pole na čele třmene (obr. 1) bylo určeno pomocí počítačové simulace programem SIMTEC. Z předcházející analýzy známe parametry grafitu pro čtyři místa a teplotní pole ze simulace pro celý odlitek třmene. Přistoupil jsem k predikci parametrů grafitu i pro další místa a to na základě znalosti teplotního pole ve všech částech odlitku a znalosti charakteristik grafitu na vybraných místech.

Odhad parametrů grafitu jsem určil jako aritmetický průměr ze dvou sousedních hodnot. Je zřejmé, že mnohem větší váhu by měla analýza provedená z většího počtu měření. Vycházíme ale z technologických omezení, kdy ani v praxi nepředpokládám provedení většího množství analýz.

Bylo prokázáno, že spojení počítačové simulace teplotního pole a vyhodnocování matrice pomocí obrazové analýzy může přinést mnohem komplexnější pohled na odlitek.

Tab. 3: Srovnání experimentálně zjištěných hodnot a predikce pro jedno vybrané místo

Parametr	Počet zrn grafitu	Plošné zastoupení	Průměrná plocha	Průměrná kruhovitost
	[1]	[%]	[ $\mu\text{m}^2$ ]	[1]
Experimentálně zjištěná hodnota	69	10,54	466,80	0,8345
Predikce	65	10,60	519,61	0,8861
Abs. rozdíl	4	0,06	52,81	0,0516
Rel. rozdíl [%]	5,8	0,6	11,3	6,2

Ukázalo se, že počítačová simulace dokáže zachytit rozdíly v teplotním průběhu jak jednotlivých oblastí na povrchu odlitku, tak i po průřezu stěnou, která byla v tomto případě silná 8 mm. Průběh křivek chladnutí navíc dobře korespondoval s teoretickými předpoklady o tvorbě grafitu (pomalejší chladnutí = menší počet grafitu a větší zrna a naopak) a to opět jak po ploše odlitku třmene, tak i po průřezu stěnou.

Obrazová analýza nám nemůže poskytnout úplný obraz o struktuře celého odlitku (ať již z technologických či finančních důvodů). V takovém případě lze využít podobnosti a na základě průběhu teplotního pole v dalších částech odlitku určit, alespoň přibližně, sledované parametry.

Přestože se daný příklad zabýval parametry grafitu, lze daný postup aplikovat i na jiné veličiny (strukturu nebo mechanické vlastnosti). Je pochopitelné, že takový postup lze použít jen pro stejný typ odlitku, resp. stejné podmínky ochlazování, a nelze tyto výsledky odpovědně přenášet na zcela odlišný druh odlitku. Přes toto omezení poskytuje tento postup rozšíření možností počítačové simulace i do oblastí, pro kterou doposud nebyly zhotoveny vhodné matematické algoritmy.

## 6 ZÁVĚR

**Disertační práce přispívá k rozšíření těchto teoretických poznatků oboru:**

- 1) Analyzuje nepřesnosti vzniklé teplotním gradientem po délce termočlánku.
- 2) Navrhuje metodu korekce naměřených dat zatížených chybou při měření.
- 3) Uplatňuje metodu pro zpřesnění termofyzikálních dat, tzv. zpětnou simulaci.
- 4) Popisuje predikci grafitu pomocí obrazové analýzy.

**Okamžitý přínos práce pro praxi:**

- 1) Je sestavena ucelená databáze termofyzikálních údajů pro litiny, zvláště litinu s kuličkovým grafitem pro použití v simulačních programech sloužících pro výpočet teplotního pole
- 2) Termofyzikální údaje převzaté od jednotlivých autorů jsou navzájem porovnány

- 3) V práci je zpracována souhrnná databáze transformačních diagramů pro LKG, včetně číselných hodnot zadávaných pro výpočet struktur v libovolném simulačním programu sloužících pro výpočet mikrostruktury odlitků
- 4) Je zde provedena důkladná analýza měření rychlosti ultrazvuku jako kontrolní metody pro hodnocení vlastností odlitků.

Experiment založený na měření vlastností matrice odlitků z LKG o stejném chemickém složení, které se liší jen svým tvarem, a tudíž rychlosti odvodu tepla prokázal, že nelze nalézt spolehlivou regresní funkci rychlosti průchodu ultrazvukových vln vůči strukturním, resp. mechanickým vlastnostem. Důsledkem tohoto faktu je, že nelze před započítím měření rychlosti ultrazvuku stanovit, jaké jí mají odpovídat hodnoty tvrdosti, pevnosti, tažnosti či dalších vlastností matrice odlitku. Proto, vždy před zavedením této kontrolní metody měření do provozu je třeba provést přímé měření strukturních a mechanických vlastností na statisticky významném počtu vzorků. Znovu vytvořit kontrolní meze, a teprve následně považovat tuto metodu za věrohodnou a průkaznou pro zjišťování stavu kvality odlitků, s periodicky se opakujícími kontrolami ověření trendů vlastností.

Zároveň nelze aplikovat korelační vztahy zjištěné na jednom typu odlitku z GJS (LKG) na druhý, a to ani v rámci jednoho odlitku, z jedné oblasti na oblast druhou. To dokázal případ třmenů, kdy i v rámci velmi blízkého okolí získáváme odlišné statistické soubory.

Naměřené statistické soubory většinou nepocházejí z normálního rozdělení. To signalizuje na další nepodchycené parametry ovlivňující měření a to i v laboratorních podmínkách. Předpokládám, že se jedná o vliv lokální nehomogenity chemického složení, stavu struktury matrice, parametrů grafitu a rovněž i vlivu metodiky měření. Prokázalo se, že hodnoty zjištěné v povrchové vrstvě vzorků (HB, chemické složení, ...) mají větší relativní rozptyl, neboť popisují u vzorků jen vrstvu v řádu mm do hloubky. Vlivem toho jsou taková měření citlivější na místní odlišnosti vlastností. Zatímco měření přes celou stěnu odlitku (rychlost ultrazvuku) zahrnují příspěvek od celé stěny, díky čemuž jsou méně náchylná k místním nehomogenitám. Z toho vyplývá jejich mnohem menší relativní rozptyl.

Hodnoty teploty změřené pomocí termočlánků nelze vždy považovat za správné a přesně zaznamenávající skutečnost. Vedle chyb termočlánků a měřících souprav, které lze korigovat, jsou problémem při měření i nepřesnosti vzniklé teplotním gradientem po délce termočlánku. Navržený způsob korekce dat vychází z porovnání naměřeného průběhu teplot a jeho charakteristických teplot s tabelovanými daty, nebo s průběhem teplot na odlitku ze stejné slitiny, kde byl splněn požadavek na omezený teplotní gradient po délce termočlánku.

Prokázal jsem, že jediným efektivním způsobem, jak zvýšit přesnost při simulacích lití a chladnutí odlitků, je použití přesnějších termofyzikálních dat popisujících jednotlivé materiály v řešené sestavě za rozdílných teplot. Navrhl jsem experiment, který slouží k zpřesnění termofyzikálních údajů pro potřeby simulace -

Zpětnou simulaci. Tento postup jsem experimentálně potvrdil jako použitelný pro praxi a sloužící pro zpřesnění počítačových simulací teplotního pole.

Pro praktické použití jsem sestavil ucelenou databázi termofyzikálních hodnot zvláště pro GJS (LKG) vstupujících do simulačních výpočtů a porovnal jsem hodnoty pocházející od různých autorů.

V praxi jsme s chemickým složením modelovaného odlitku vždy mimo tabelovaná data, ze kterých byla určena příslušná termofyzikální data, vstupující do výpočtu. Proto je třeba hodnotit, jak velké chyby se můžeme dopustit. Možným způsobem, jak porovnávat tato data, je provést výpočet za použití dat pro více slitin o blízkém chemickém složení. Následný rozdíl v teplotě je dán jak termofyzikálními vlastnostmi slitin, tak i geometrii samotného odlitku a teplotními vlastnostmi formy. Navržený postup ukázal, že i při použití blízkých dat pro jednu materiálovou skupinu (v rámci disertační práce pro GJS), lze získat rozdílné výsledky v teplotě v řádu desítek °C a času v řádu až minut.

Rovněž porovnání vstupních hodnot pro výpočet struktury odlitků v simulačních programech neposkytuje zcela jasnou představu o procentuálním rozdílu struktury po výpočtu. Při použití dat získaných pro slitiny o odlišném chemickém složení, byť pro jednu materiálovou skupinu (zde litiny s kuličkovým grafitem), získáváme rozdíl v podílu jednotlivých složek v řádu až desítek procent. Takový výpočet je nepoužitelný v praxi. Proto je nutné použít i zde co nejpřesnější data pocházející z transformačních diagramů. Za tím účelem jsem do práce zahrnul ucelenou databázi vstupních transformačních diagramů pro GJS (LKG) a jim příslušejících hodnot určených pro použití v simulačních programech.

Prokázal jsem jako použitelný postup určování parametrů grafitu na základě spojení obrazové analýzy a teplotního pole určeného ze simulace. Takové spojení může přinést mnohem komplexnější pohled na odlitek. Navíc průběh křivek chladnutí získaný ze simulace dobře korespondoval s teoretickými předpoklady o tvorbě grafitu. Přestože se daný příklad zabýval parametry grafitu, lze daný postup aplikovat i na jiné veličiny, které zatím nejde přímo simulovat v provozní praxi (struktura, mechanické vlastnosti a podobně).

## 7 SUMMARY

### **Simulation of microstructure with a view to obtaining required properties of castings**

The experiment based on measuring the matrix properties of ductile iron (GJS) castings of the same chemical composition but of differing shapes and thus of different rates of heat removal has shown that it is not possible to find a reliable regression function of the speed of the passage of ultrasonic waves with respect to structural or mechanical properties. A result of this fact is that before beginning to measure the speed of ultrasound it is not possible to determine what values of hardness, strength, ductility or other matrix properties of the casting should correspond to this speed. Before introducing this control measuring method into operation it is therefore necessary to carry out direct measurement of structural and mechanical properties on a statistically significant number of specimens, to set again control limits and only then can this method be regarded as reliable and conclusive in establishing the quality of castings. The direct measurements must be repeated periodically in order to check the trend in properties.

The correlation relations established on one type of GJS casting cannot, however, be applied to another type of GJS casting and even within one casting such relations holding for one area cannot be applied to another area of the casting since we obtain different statistical sets. Of particular consequence can be regarded the finding that the statistical sets measured do not mostly come from normal distribution, which points to some non-recognized parameters that affect the measurement, even in laboratory conditions.

It has been shown that the values established for the surface layer of specimens (HB, chemical composition, etc.) have a large scatter since they describe in the specimens only a layer whose depth is in the order of mm. As a result, such measurements are sensitive to local differences in properties. Measurements through the whole wall of the casting (speed of ultrasound) include the effect of the whole wall, due to which the measurement of the speed of ultrasound is less sensitive to local inhomogeneities.

The temperature values obtained with the aid of thermocouples cannot always be regarded as correct and accurately reflecting the reality. In addition to errors of thermocouples and measuring sets, which can be foreseen and corrected, the greatest problem occurring during measurement are the inaccuracies caused by the temperature gradient along the thermocouple length. The most accurate measurement can be obtained if the temperature gradient along the thermocouple length is as low as possible; this means that it is convenient if the thermocouple tip is at least a few centimetres in the wall of the metal being poured. In practice, however, this requirement is often impossible to meet. The proposed method of data correction starts from a comparison of the temperature course measured and its characteristic temperature points with tabulated data or with the temperature courses



in a casting of the same alloy, where the requirement for a limited temperature gradient along the thermocouple length has been fulfilled.

It has been shown that the only effective way of increasing the accuracy of computer simulations of pouring and cooling castings is using more accurate thermophysical data. I have therefore proposed an experiment that serves to make thermophysical data more accurate for the simulation needs - which I refer to as reverse simulation.

For practical application, I have set up an integral database of thermophysical values (for GJS in particular) that are used in simulation computations and I have compared values reported by different authors.

An evaluation and mutual comparison of thermophysical parameters is always necessary with respect to the problem under solution since comparing the difference in numbers alone does not give a clear idea of what these differences mean when used in the calculations in simulation programs. One possibility how to compare these data is to perform the calculation using data for several alloys.

The comparison of input values for the computation of the structure of castings in simulation programs does not give a sufficiently clear idea of the percentage difference of structure after computation. When using data obtained for alloys of different chemical composition (be it for one materials group - as ductile irons in our case) we obtain a difference in the proportion of individual components in the order of as much as tens of per cent points. Such computation is unusable in practice. Therefore it is necessary to use here as accurate data as possible from TTT diagrams. For this purpose I have included in the work an integral database of input TTT diagrams for GJS and the corresponding values designed for use in simulation programs.

It has been shown that combining the computer simulation of temperature field and the matrix evaluation via picture analysis can bring a much more complex view of a casting. It has also been found that computer simulation is able to capture differences in the temperature course both at individual points on the casting and along the wall section. Moreover, the course of cooling curves was in good agreement with theoretical assumptions about graphite formation, again both along the section of yoke casting and through its wall.

## 8 LITERATURA

- [1] KOUTSKÁ, J. Přínos modelování k optimalizaci procesů tváření a tepelného zpracování. *Ve sborníku přednášek sekce Juniormat a Materiálové vědy na prahu 3. milénia*. Brno : Vysoké učení technické FSI Brno, 1999. s. 119-125. ISBN 80-214-376-X.
- [2] MOCHNACKI, B., SUCHY, J., S. *Numerical methods in Computations of Foundry processes*. Kraków : Polish Foundrymen's Technical Association, 1995.

- [3] PEHLKE, R., D. Strategies and Structures for Computer-Aided-Design of Casting. Ve sborníku 60<sup>th</sup> *World Foundry Congress*. Hague, 1993.
- [4] LONGA, W. Solidification of Casting in a Sand Mold, Slask, Katowice : 1973.
- [1] LUDWIG, A., BÜHRING, POLACZEK, A. Simulace slévárenských procesů (1. pokračování), *Slévárenství*. Brno : 1997, ročník XLV, no. 2 - 3, s. 110 - 111.
- [6] ROUČKA, J. *Metalurgie litin*. Brno : VUT FSI. Skripta, PC-DIR Real, s.r.o., 1998.
- [7] ČECH, J. *Measuring the mechanical properties of cast iron by NDT methods*. NDT International. Velká Británie, Vol. 23, No. 2, 1990, s. 93-102.
- [8] ZEMANOVÁ, Š. QFD - *Nová metoda řízení jakosti ve slévárenství*. [Disertační práce]. Brno : Vysoké učení technické - FS, 1998.
- [9] KUPKA, K. *Analýza dat pro řízení jakosti a ekonomiku*. Pardubice : TriloByte Statistical Software, 1998.
- [10] Technická dokumentace ČKD MOTORY, a.s. slévárna Plotiště. Hradec Králové, výkres No. BW 1468.4.
- [11] *Metals Handbook*, Second Edition. Desk Edition. USA : ASM International, The Materials Information Society, 1998.
- [12] *The On-line Materials Information Resource* (Přehled termofyzikálních vlastností prvků) [online]. 1999, poslední revize 31. května 2000. [cit. 1999-04-25] Dostupné z: <<http://www.matweb.com/GetCompMatls.asp>>.
- [13] PEHLKE, R. D., JEYARAJAN, A., WADA, H. *Summary of Thermal properties for casting alloys and mold materials*. National Science Foundation applied research division. USA : National Technical Information Service. Grant No. DAR78-26171, 1982.
- [14] ARBOR, A. *Continuous cooling transformation diagrams for Ductile Irons*. Michigan, USA : Research laboratory, Climax Molybdenum Co. of Michigan, AMAX Inc.
- [15] KLUAS, R., FAIRHURST, W. *Heat Treatment of Nodular Cast Iron, Transformation Diagrams*. Germany : Giesserei-Verlag G.m.b.H., VDG-Taschenbuch 6, Edited by Verein Deutscher Giessereifachleute, 1979.

## 9 SEZNAM AUTOROVÝCH PUBLIKACÍ

- (1) Boucník, P., Čech, J., Boček, J. Optimalizace výroby odlitků se zaměřením na simulaci tuhnutí. Ve sborníku konference *Perspektivy slévárenství*. Plzeň : Vědecko technická společnost ZČ, 1997.
- (2) Čech, J., Boček, J., Boucník, P. Výroba zdravých odlitků se zaměřením na simulaci tuhnutí. Sborník konference *II. Mezinárodní zliovárenská konferencia - "Zvyšovanie akosti v zliovárenstve"*, Žilina : Žilinská Univerzita, 1997.
- (3) Čech, J., Boček, J., Boucník, P., Mikula, J. Optimalizace slévárenské produkce a predikce struktury simulací tuhnutí. Sborník konference *International conference Technology '97*, Bratislava : Slovak Univesity of Technology, 1997.
- (4) Boucník, P., Čech, J., Juříčka, I. Použití hořčíkových slitin ve slévárenství. Sborník konference *5. Medzinárodna vedecká konferencia CO-MAT-TECH*, Trnava : Trnavská univerzita, 1997.
- (5) Boucník, P., Čech, J., Juříčka, I. Hořčíkové slitiny - jejich vlastnosti a použití. Sborník konference *XI. Miedzynarodowe sympozjum "Metody oceny struktury oraz wlasności materialów i wyrobów"*, Svratka : Wyzsa Szkola Inżynierska w Opolu, Vysoké učení Technické v Brně, 1997.
- (6) Čech, J., Boucník, P., Zemčík, L., Ursacher, R. Modelování tuhnutí a struktury odlitků z tvárné litiny. Sborník konference *13. Celostátní konference - Výroba a vlastnosti oceli na odlitky a tvárné litiny*. Brno : VUT, 1998.
- (7) Boucník, P., Čech, J., Ursacher, R. Možnosti počítačového modelování v současném slévárenství. Ve sborníku „*Slévárna a jejich konkurenceschopnost*“ Plzeň : Sborník konference VTS ZČ, 1998.
- (8) Boucník, P., Rusín, K. Možný způsob hodnocení kinetiky fyzikálních a chemických dějů pomocí histogramů. *Slévárenství*, 1999, ročník XLVII, číslo 4, 1999, s. 229 – 230.
- (9) Boucník, P., Čech, J. Computer simulation of the Microstructure and Mechanical Properties of GGG Casting as the Follow-Up of the Simulation of the Thermal field. Sborník konference *International Conference „Junior-Euromat*“ Lausanne, Switzerland : 2000. s. 470.
- (10) Boucník, P., Rusín, K., Jiříkovský, K., Skálová, Z. Hodnocení stability vlastností vratných formovacích směsí. *Slévárenství*, 2000, ročník XLVIII, číslo 9, s. 441 - 443.

- (11) Boucník, P., Čech, J. Souvislost mezi měřením rychlosti ultrazvuku a tvrdosti litiny jako nástroj výstupní kontroly. *Slévárství*, 2000, ročník XLVIII, číslo 11-12, s. 590 - 592.
- (12) Boucník, P., Čech, J. Analýza vstupních termofyzikálních dat - předpoklad pro dosažení dobrého výsledku při simulaci mikrostruktury. Sborník konference *XV Miedzynarodowe Sympozium. Metody oceny struktury oraz własności materialow i wyrobów*, Politechnika Opolska. Brno a Opole : Nr. 263/2000 s. 63, ISSN 1429-6055
- (13) Čech, J., Boucník, P., Rusín, K., Ursacher, R., Zemčík, L. Simulation of Automobile Wheels Cast of Magnesium Alloys - Simulation and Experimental Measurement. Sborník konference *Materialica - Materials Week*, Munchen : Poster, Symposium B2 - Automotive, 2000.
- (14) Čech, J., Boucník, P., Rusín, K. Simulation and experimental measurement of internal stresses during solidification of motorcycle wheels cast of Mg-alloys. Sborník konference *Proceedings of 10th International Metallurgy and Materials Congress*, Istanbul : 2000, ISBN 975-395-382-8.
- (15) Boucník, P., Čech, J. Zpětná simulace - možností a omezení korekce naměřených dat. Sborník *Pedagogicko-vědecký konference u příležitosti 100. výročí založení fakulty strojního inženýrství*, II. sborník příspěvků doktorandů, Brno : VUT FSI, 2000, s 33-36.
- (16) Boucník, P. Informační systémy ve slévárnách představené na veletrhu FOND-EX 2000. Časopis *Slévárství*, 2001, ročník XLIX, číslo 1, s. 28 - 30.
- (17) Boucník, P., Čech, J., Jiřikovský, K. Prediction of Graphite Parameters Based on Computer Simulation. Sborník konference *TRNSCOM 2001*, Žilina : 4th European Conference of young research and science workers in Transport and Telecommunications, 2001. Subsession 5A: material engineering s. 143-146. ISBN 80-7100-850-8.
- (18) Boucník, P., Čech, J. Statistická analýza naměřených hodnot z výstupní kontroly odlitků z LKG, jejich stabilita a normalita, možnosti regresní analýzy. Sborník konference *JUNIORMAT '01*, mezinárodní konference. Brno : FSI VUT, 2001. s. 142-143, ISBN 80-214-1885-0.
- (19) Boucník, P. Přesnost počítačové simulace teplotního průběhu v odlitcích s ohledem na složení materiálů a jejich termofyzikální parametry. Sborník konference *METAL 99*, 8. *Mezinárodní metalografický veletrh a symposium*, Ostrava : Sborník přednášek I. Díl, 1999, s. 167-170, ISBN 80-85988-35-6.
- (20) Boucník, P., Zemanová, Š., Čech, J. Analýza strukturních a mechanických vlastností u odlitků z LKG pomocí ultrazvukové defektoskopie. Sborník mezinárodní konference *Slévárství do třetího tisíciletí*. Plzeň : 1999, s. 145-150 .

- (21) Boucník, P., Čech J. Relation between materials chemical composition, their thermophysical parameters and computation of thermal field accuracy upon computer simulation. *Sborník 3-rd European Conference of Young Research and Science Workers in Transport and Telecommunications - TRANSCOM 99*, Žilina : University of Žilina, 1999. Section 6, s. 35 - 38, ISBN 80-7100-615-7.
- (22) Boucník, P., Čech, J. Effect of chemical composition of materials on thermophysical data of cast materials used in computers simulations of temperature fields. *Sborník 7. medzinárodnej konferencie TECHNOLÓGIA 99*, Slovak University of Technology. Bratislava : 1999.
- (1) Boucník, P., Zemanová, Š., Čech J. Predikce výsledných vlastností odlitků na základě simulace teplotního pole a metalografie. *Sborník konference Materiálové vědy na prahu 3. milénia*. Brno : VUT. 1999, s. 102-103, ISBN 80-214-1378-X.
- (24) Boucník, P., Čech J. Analýza vstupních termofyzikálních dat - nutný předpoklad pro dosažení optimálního výsledku při simulaci teplotních dějů. *Sborník konference Materiálové vědy na prahu 3. milénia – poster*. Brno : VUT FSI. 1999, s. 104-105, ISBN 80-214-1378-X
- (25) Boucník, P. Počítačové modelování slévárenské soustavy odlitek - forma - okolí jako nástroj pro dosažení zdravého a kvalitního výrobku. *Sborník Medzinárodné vedeckej konferencie pre doktorandov, školiteľ'ov a pracovníkov z praxe: DOKSEM 99' - Strojárske technológie - výrobná technika '99*, Súl'ov : 1999, s. 23-26, ISBN 80-7100-652-1.
- (26) Boucník, P., Čech, J. Prediction of Graphite Parameters Based on Computer Simulation. *Sborník konference Materialica - Materials Week*. Poster, Topic: M Analysis, Testing, Quality Assurance, *Symposium - M1 Nondestructive Characterisation of Materials*. Munchen : 2001.
- (27) Boucník, P., Čech, J. Využití počítačové simulace při predikci parametrů grafitu. *Sborník Vedeckej konferencie so zahraničnou účasťou TRANSFER 2001*. Trenčín : Trenčinská univerzita, 2001.
- (28) Boucník, P., Čech, J. Predikce parametrů grafitu na základě počítačové simulace. *Sborník konference Slévárenství ve třetím tisíciletí*. Plzeň : Vědecká technická společnost ZČ. 2001.
- (29) Boucník, P., Čech, J., Jiříkovský, K. Predikce parametrů grafitu na základě počítačové simulace, *Sborník 7. medzinárodná konferencia TECHNOLÓGIA 01*. Slovak University of Technology. Bratislava : 2001.

## 10 AUTOROVO CURRICULUM VITAE

**Jméno:** Ing. Pavel Boucník  
**Narozen:** 14. dubna 1973, Brno, Česká republika.  
**Rodinný stav:** Svobodný  
**E-mail:** [slevarenstvi@post.cz](mailto:slevarenstvi@post.cz)  
**Homepage:** <http://www.muweb.cz/veda/pavelb>

### Vzdělání:

1996 - 1999 Postgraduální doktorské studium na Vysokém učení technickém v Brně, Fakulta strojního inženýrství, obor slévárenství.

Státní doktorandská zkouška 1. 6. 1999.

#### **Téma disertační práce:**

Simulace mikrostruktury s ohledem na dosažení požadovaných mechanických vlastností odlitků.

1998 Školení pro jakost pořádanou ve spolupráci mezi VUT FS v Brně a Vídeňskou technickou univerzitou.

1991 - 1996 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, obor Materiálové inženýrství. Státní zkouška složena dne 20.6.1996.

Téma diplomové práce: Vliv doby izotermické transformace na únavové vlastnosti bainitické tvárné litiny.

1987 - 1991 Střední průmyslová škola strojní v Brně, obor Strojírenská technologie  
Maturitní zkouška složena dne 23. 5. 1991.

### Zaměstnání:

1999 Odborný pracovník v projekční kanceláři ve společnosti Kovoprojekta Brno

Od r. 1999 Marketingový pracovník a vedoucí elektronického publikování ve firmě CCB s.r.o.

### Činnost v organizacích a klubech

Česká společnost pro nové materiály a technologie

Syndikát novinářů České republiky

Česká slévárenská společnost

### Vědecké specializace:

Simulace teplotního pole a mikrostruktury, Statistické zpracování naměřených dat

### Experimentální zkoušení:

Mechanické a strukturní vlastnosti, měření a vyhodnocování teplotního průběhu v odlitcích, příprava kovových vzorků