

16. Diskuse výsledků

Jako důležité se v inženýrském výzkumu materiálů ukázalo studium struktury a z toho odvození mechanických vlastností – například Lundback [48] a jeho tým. Podobné vztahy bychom našli i u jiných autorů [například 49, 50], kteří se zabývali problematikou určování výsledných mechanických a strukturních vlastností na základě chemického složení nebo rychlosti průchodu ultrazvukových vln. Jak je však vidět z přehledu korelačních vztahů (kap. 5), je i přes rozsáhlé výzkumy v této oblasti stále nutno uvažovat s materiálovými konstantami vzešlými z experimentu a představujícím popis určitého „nejasna“ v těchto rovnicích. S tím je zároveň spojena vždy jistá míra rizika nepřesnosti. To se přenáší i do simulačních programů.

Zde, po zadání vstupních termofyzikálních, materiálových a strukturních údajů o materiálech v řešené soustavě (forma – odlitek – okolí), počítáme výsledné teplotní pole, mechanické vlastnosti či strukturu. Přitom jen sofistikovaněji aplikujeme korelační vztahy vzešlé z předchozí experimentální činnosti. V těchto výpočtech při zachování stejné geometrie odlitku a vstupních dat pokaždé získáme stejný výsledek. Na rozdíl od experimentálních měření. Zde výsledný soubor, který pochází z měření stejných odlitků litých stejnou technologií a ze stejné slitiny, obsahuje různé hodnoty. To je způsobeno vlivem dalších nepodchycených faktorů.

Tuto skutečnost prokázal i provedený experiment v rámci této práce založený na měření vlastností matrice odlitků z litiny s kuličkovým grafitem o stejném předepsaném chemickém složení, které se liší jen svým tvarem, a tudíž rychlostí odvodu tepla. Výsledkem je, že nelze nalézt spolehlivou regresní funkci popisující rychlost průchodu ultrazvukových vln vůči strukturním, resp. mechanickým vlastnostem pro různé typy odlitků ze stejné slitiny, nebo pro různé části jednoho odlitku. Tento závěr je možné přenést i na měření jiných vlastností odlitků.

Jak správně již pan Skrbek ve svém článku [153] zdůrazňuje, rozhodujícím kritériem funkčnosti nedestruktivních kontrol ve výrobě je dosažení koeficientu korelace k . Sám autor požaduje jeho hodnotu větší jak 0,9. Pro dosažení tak vysoké hodnoty navrhuje kombinaci akustické a magnetické diagnostiky, popřípadě kombinace ultrazvukového měření s měřením tvrdostí HB. Takové opatření dovoluje zaměřit místa v odlitku nejcitlivější na změny v metalurgii. Závěrem mimo jiné vyzývá k publikaci výsledků popisující funkčnost vztahu fyzikálních veličin k parametrům struktury nebo k mechanickým vlastnostem na příkladech z praxe.

U ultrazvukových metod (včetně zahrnutí dalších nedestruktivních, či i destruktivních měření) je však výsledek velmi citlivý na změny materiálu.

Funkčnost takto získaných vztahů je zvláště u litin s kuličkovým grafitem silně omezena na stejný typ odlitku (podmínky chladnutí) a stejnou slitinu. Avšak i při splnění těchto podmínek nemusí být soubory dat normálního rozdělení a koeficienty korelace jsou slabé, jak bylo v této disertační práci dokázáno a to i při měření v laboratorních podmínkách.

Navíc se získané soubory dat a korelační funkce liší místo od místa i na jednom odlitku. Přejímat za takových podmínek funkční vztahy je velmi problematické a je nutné postupovat vždy s velkou péčí při jejich aplikování na novém typu odlitku. K takovému závěru je nutné přihlídnout i při počítačových simulacích a to u libovolné vlastnosti odlitku.

Avšak při splnění v této práci navrženého postupu – viz. závěry z kapitoly 11 – je takové třídění odlitků podle jejich struktury použitelné, jak dokazuje již i dřívější literatura. Například [154], kdy pomocí měření rychlosti průchodu ultrazvukových vln stěnou třídili odlitky na ty s (ne)vyhovující strukturou grafitu při komerční výrobě vozů Tatra. Na základě zjištěných výsledků potvrzených metalografickým rozbohem byl vybrán rozhodný poměr rychlosti šíření ultrazvukových vln pro dobré litinové odlitky.

Metody simulace slévárenských procesů v posledních letech velmi pokročily, ale pro správné výpočty je třeba zadat poměrně velké množství vstupních termofyzikálních parametrů. Jak konstatují například autoři [96], jsou data popisující tuhý stav materiálu snadno dosažitelná, avšak data pro popis stavu taveniny slitin jsou velmi vzácná a většinou ani neexistují. Data získaná z literatury ukazují v závislosti na metodě měření chyby v rozpětí 10 % až 100 % ! a tento stav omezuje dosahovanou přesnost při simulacích lití odlitků. Autor tuto skutečnost dokumentuje na příkladě rozptylu hodnot na slitině niklu i v tuhém stavu.

Hodnocení termofyzikálních veličin je, jak je v práci zdůrazněno, třeba vždy ve vztahu ke konkrétnímu řešenému problému. V disertační práci je tento způsob ukázán na příkladu modelového odlitku, který díky svým tvarovým charakteristikám a podobě formy, zvýraznil tyto rozdíly. Podobný problém řešili i autoři [89], kteří hodnotili systém odlitek – forma – jádro – okolí. Při svých výpočtech rovněž vyšli z Fourierovy rovnice, která mnou byla použita přes program SIMTEC. Výsledkem jejich citované práce je hodnocení vlivu termofyzikálních parametrů litého materiálu ve formě na celkový čas tuhnutí podle pořadí jejich důležitosti. Autoři ve svém příspěvku konstatují, že řešení teplotního přenosu a stanovení okrajových podmínek na rozhraní odlitek – forma je velmi obtížné.

Pro potřeby technické praxe se berou termofyzikální hodnoty popisující vlastnosti na makro úrovni. Z toho vyplývá, že to, co nazýváme termofyzikálními vlastnostmi, je určitá komplexní charakteristika zahrnující v sobě všechny výše uvedené případy, a podává nám obraz o průměrném vlivu všech těchto parametrů na součást. Při laboratorních měření (viz. kap. 9) se vychází ze vzorků, které jsou buď separovány z většího celku, nebo jsou odlity za laboratorních podmínek, které se však liší od provozní praxe [82]. Situace se dále komplikuje u přísadových prvků, které se projevují různě podle typu slitiny. Jestliže například vyneseme tepelnou vodivost takové slitiny v závislosti na objemovém procentu, nemůžeme očekávat lineární průběh – tento fakt potvrzují měření, například [86].

Snaha určit korelační vztahy mezi chemickým složením a termofyzikálními vlastnostmi nevede rovněž k uspokojivým výsledkům. Například výzkum pro slitiny železa vedl k tomu, že na základě měření byly hledány empirické vztahy pro vliv složení na tepelnou resp. elektrickou vodivost [například 86]. Tyto vztahy však platí jen pro jednu oblast materiálu a to ještě přibližně. I další autoři hledali vztahy, které by na základě chemického složení popisovali tepelnou vodivost materiálu. Vždy však byl jejich popis omezen jen na určitou třídu materiálu a nepřihlížel např. k tepelnému zpracování [například 87 nebo 88].

V praxi jsme však téměř vždy s chemickým složením námi modelovaného odlitku mimo tabelovaná data součásti, pro která byla určena příslušná termofyzikální data vstupující do simulačního výpočtu. Proto je třeba hodnotit, jak velké chyby se můžeme dopustit, když použijeme tato data pocházející ze slitin o blízkém chemickém složení. Hodnocení a vzájemné porovnávání termofyzikálních parametrů je nutné vždy s ohledem na řešený problém, neboť porovnání rozdílů v samotných číslech nám neposkytuje zcela jasnou představu o tom, co tyto rozdíly znamenají při použití ve výpočet v simulačních programech.

Tato oblast výzkumu je natolik rozsáhlá, že jsou pořádané konference, například fóra ECTP. Z přehledu příspěvků [155] však vyplývá, že hlavní úlohou je teoretické bádání, případně měření termofyzikálních vlastností pro určité, ve slévárenské praxi velmi okrajově zastoupené, slitiny.

Jednou z pomůcek nám sice mohou být programy, které začaly být vyvíjeny již před lety a dnes nám slouží především jako základní nástroj při optimalizaci návrhu nových slitin, méně nám však poskytují údaje o termofyzikálních vlastnostech konkrétní slitiny [156].

Jak bylo v této disertační práci prokázáno, jediným efektivním způsobem, jak zvýšit přesnost při simulacích lití a chladnutí odlitků, je použití přesnějších termofyzikálních dat popisujících jednotlivé materiály v řešené sestavě. Navržený experiment sloužící k zpřesnění termofyzikálních údajů pro potřeby simulace je tak jednou z možných cest, jak zvýšit přesnost výpočtů, s ohledem na obtíže spojené se získáváním potřebných termofyzikálních parametrů. Tento popsaný postup byl experimentálně potvrzen jako použitelný v praxi - viz. kap. 12.

Snaha o určování výsledných parametrů grafitu vedla k vývoji rozličných metod [159], které se snaží popsat tvorbu grafitu a jeho výsledné parametry a přikládají tu větší tu menší váhu jednotlivým podmínkám účastnícím se v procesu nukleace a dalšího růstu grafitu. Tyto postupy jsou však doposud jen omezeně aplikovatelné v každodenní technické praxi.

Počítačová predikce mikrostruktury litin zahrnující i parametry grafitu byla již pochopitelně mnohými autory provedena. Například [161] představují solidifikační model pro litiny s lupínkovým grafitem zahrnující výpočet podílu primárního austenitu, morfologii lamelárního grafitu a to při uvažování pohybu chemického složení. Výsledky autora se shodují s experimentem. Avšak autoři ve svých výpočtech používají materiálové konstanty získané na základě pozorování vzorků a sloužící pro tendenční úpravy vztahů. Takový postup je pak aplikovatelný jen na ten stejný a nebo velmi blízký

případ. Tohoto postupu však nelze užít v praxi, kde je častá změna slitiny a důraz je kladen na rychlost analýzy.

Hodnocení výsledných parametrů grafitu pomocí histogramu není věcí ničím novou. Vzpomeňme jen na práci [157], kde ji bylo užito na rozdělní četnosti částic grafitu v jednotlivých velikostních třídách. Rovněž určování struktury materiálu, včetně parametrů grafitu, pomocí obrazové analýzy je známá a používaná metoda [například 158]. Doposud však nebylo přistoupeno ke spojení takto získaných výsledků s teplotním polem určeným ze simulace, pro určování charakteristik materiálu i v dalších částech odlitku.

Tohoto postupu bylo v této disertační práci použito pro predikci grafitu, která byla v praxi ověřena. Tím bylo prokázáno, že při splnění určitých kritérií (viz. kap. 15) může takové spojení přinést mnohem komplexnější pohled na odlitek.

Dalším krokem v uplatňování simulace je výpočet tvorby struktury a mechanických vlastností. V této oblasti pokročil výzkum natolik, že se používá prvních modelů pro výpočet konstrukčních dílů i ve formě komerčních programů. Například práce Nastaca a Stefanescua [160] představují model růstu pro metastabilní a stabilní tuhnutí, do kterého je začleněn model mikroodmíšení. Lze konstatovat, že se obecně jedná o začlenění zpřesňujících modulů do simulačních programů. Přesnost takových výpočtů je opět silně závislá na vstupních termofyzikálních datech.

Jak bylo v kap. 3 zmíněno, první přístup k řešení predikce mikrostruktury je postaven na postupu, kdy software řeší pro každý element sítě modelovaného odlitku průsečík mezi vypočtenou ochlazovací křivkou a vloženými daty z příslušného diagramu. Výhodou je jednoduchost a rychlost výpočtu [146]. Nevýhodou je, že ochlazovací diagram je vyhotoven jen pro jedno chemické složení slitiny. Je samozřejmé, že experimentálně zjištěná data jsou přesnější, neboť při výpočtech je bráno do úvahy vždy omezené množství vstupních hodnot a používají se zjednodušující předpoklady [148 či 149]. Řešením uvedených nepřesností je přímý výpočet struktury, což je zatím záležitost specializovaných pracovišť.

Kvalitní kvantifikace podílů vyloučených fází v kovových slitinách v závislosti na výchozím stavu materiálu a na průběhu technologického zpracování je možné dosáhnout dvěma cestami – matematickým modelováním a analýzou dilatometrických měření. Autoři [74] použili kvaziizotermický model. Výsledkem pokusných výpočtů byly podíly strukturních složek po ochlazení podle režimů znázorněných v diagramu ARA. Jak však sami autoři konstatují, uspokojivých výsledků bylo dosaženo až po tendenční úpravě vstupních parametrů.

Závěrem [74] konstatují, že informace odečtené z publikovaných diagramů IRA a ARA nelze použít pro přesné modelování fázových přeměn. Diagramy mají pouze orientační charakter a nejsou dostatečně obecným popisem přeměn fází. Podstatný vliv na kinetiku fázových přeměn mají také další parametry výchozího strukturního stavu a podmínek experimentu. Autoři se domnívají, že pro popis fázových přeměn je třeba volit univerzálnější přístup, který by využíval aktuální možnosti měřené a numerických výpočtů.

Autoři [75] ve své práci zdůrazňují, že z numerického hlediska není konstrukce matematického modelu a vytvoření adekvátního programu simulujícího v odlitku tepelné pochody složitou věcí. Za účelem propojení průběhu křivek chladnutí ve vybraných bodech odlitku s TTT diagramem však musí být do programu vloženo rozmezí mikrostrukturních změn uvažovaného materiálu. Omezením jsou tak jednoznačně vstupní termofyzikální data, nikoliv matematický aparát – viz. kap. 6.

Proto je v této práci zahrnuta databáze vstupních transformačních diagramů pro litiny s kuličkovým grafitem a jim příslušejících hodnot určených pro použití v simulačních programech, které jsou prakticky ihned použitelné.

Všechny výše popsané metody nezahrnují pravděpodobnostní stránku řešeného problému. Domnívám se, že další vývoj popisů procesu nukleace, celkové kinetiky tuhnutí, rozdělení chemického složení, mikrostruktury a dalších jevů bude popisováno s využitím pravděpodobnostních vtažů – metodou Monte Carlo (první práce například [162]) a pomocí metody tzv. buněčných automatů (Cellular automata).

17. Závěr

Práce přispívá k rozšíření těchto teoretických poznatků oboru:

- 1) Analyzuje nepřesnosti vzniklé teplotním gradientem po délce termočlásku
- 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 odlitku

Experiment založený na měření vlastností matrice odlitků z GJS (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 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. Neboť by bylo nutné dodržet stejnou tloušťku materiálu, stejné rychlosti chladnutí ve formě a přibližně stejné chemické složení, což v provozních podmínkách není vždy možné.

Za zvlášť závažný výsledek považuji zjištění, že 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 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 rozptyl.

Hodnoty teploty změřené pomocí termočlásku nelze vždy považovat za správné a přesně zaznamenávající skutečnost. Vedle chyb termočlásku a měřících souprav, které lze dopředu předvídat a korigovat, jsou největším problémem při měření nepřesnosti vzniklé teplotním gradientem po délce termočlásku. Nejpresnějšího měření lze proto dosáhnout, pokud je po délce termočlásku co nejmenší teplotní spád. To znamená, že je vhodné, pokud je konec termočlásku ve stěně litého kovu alespoň několik centimetrů. V praxi je však tato zásada mnohdy nespílitelná.

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 termočlásku.

V práci jsem na příkladě odlitku motocyklového kola prokázal, že navržená metoda korigování naměřených dat je prakticky použitelná pro opravu dat získaná z měření zatížené chybou vlivem teplotního spádu po délce termočlásku. Tento případ se vyskytuje poměrně často, neboť jsme mnohdy nuceni měřit ve stěnách odlitků, které jsou tloušťek řádově milimetrů.

Dále jsem prokázal, 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 - zpětná simulace. 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 přesto 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. Hodnocení a vzájemné porovnávání termofyzikálních parametrů je nutné vždy s ohledem na řešený problém, neboť porovnání rozdílu v samotných číslech nám neposkytuje zcela jasnou představu o tom, co tyto rozdíly znamenají při použití ve výpočet v simulačních programech. Možným způsobem, jak porovnat tato data, je provést výpočet za použití dat pro více slitin. Následný rozdíl v teplotě je dán jak termofyzikálními vlastnostmi slitin, tak i geometrií samotného odlitku a teplotními vlastnostmi formy.

Na základě analýzy křivek chladnutí můžeme získat odpověď, jak velké maximální chyby se můžeme dopustit. 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 desítek minut. Tento postup je zvláště důležitý pro praxi, kdy máme konkrétní tvary odlitků a k dispozici termofyzikální hodnoty pro slitiny o blízkých chemických složeních od modelovaného odlitku.

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 (jako 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.

U simulovaných hodnot tvrdosti se zobrazuje pro celý odlitek třmene jedna hodnota tvrdosti či jen její omezený interval. To neodpovídá experimentálně zjištěným hodnotám. Je zřejmé, že pro lepší výpočty je třeba zadávat přesnější data popisující tvrdost v závislosti na čase transformace, než uvádějí současné transformační diagramy.

Prokázal jsem jako použitelný postup určování parametrů grafitu na základě spojení obrazové analýzy a teplotního pole určeného ze simulace. Tohoto výsledku jsem použil pro predikci grafitu, kterou jsem v praxi ověřil na vybraných místech odlitku. Bylo prokázáno, že spojení počítačové simulace teplotního pole a vyhodnocování matrice pomocí obrazové analýzy může přinést mnohem komplexnější pohled na odlitek. Ukázalo se, že počítačová simulace dokáže zachytit rozdíly v teplotním průběhu jednotlivých míst na odlitku. Průběh křivek chladnutí navíc dobře korespondoval s teoretickými předpoklady o tvorbě grafitu.

Přestože se daný příklad zabýval parametry grafitu, lze daný postup aplikovat i na jiné veličiny, které nejde zatím přímo simulovat (struktura, mechanické vlastnosti a podobně).

18. Summary

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.

19. Schlussfolgerungen

Das Experiment, das auf der Messung der Matrixeigenschaften von sich nur gestaltmässig und infolgedessen durch die Geschwindigkeit des Wärmeabfuhrs unterscheidenden GGG-Gußstücken mit der gleichen chemischen Analyse basiert, wies nach, dass eine zuverlässige Regressfunktion der Geschwindigkeit des Durchgangs der Ultraschallwellen gegenüber die Gefüge-, bzw. mechanischen Eigenschaften des GGG-Gußes nicht gefunden werden kann. Daraus folgt, dass es nicht möglich ist, vor dem Beginn der Ultraschallgeschwindigkeitsmessung festzulegen, welche Härte-, Festigkeits-, Dehnungs- und weitere Werte von Matrixeigenschaften ihr entsprechen sollen. Vor der Einführung dieser Kontrollmethode in die Betriebspraxis sind direkte Messungen von mechanischen und Gefügeeigenschaften an statistisch maßgebender Probezahl durchzuführen, neue Kontrollgrenzen festzusetzen und erst dann dieses Verfahren für zuverlässig und ausreichend beweiskräftig bei der Beurteilung des Zustandes der Gußqualität zu halten. Unabdingbar ist dabei die regelmäßige direkte Kontrolle zur Überprüfung des Trends von Eigenschaften.

Zugleich ist es nicht möglich, die an einem Typ des GGG-Gusses ermittelten Korrelationsbeziehungen auf einen anderen Gußtyp zu übertragen, und dies sogar nicht einmal von einem auf den anderen Bereich im Rahmen eines Gußstücks, weil man unterschiedliche statistische Datenfolgen bekommt. Für ein besonders schwerwiegendes Ergebnis halte ich die Feststellung, dass die gemessenen statistischen Datenfolgen überwiegend nicht der normaler Distribution abstammen, was auf weitere unerfasste Parameter hinweist, die die Messungen auch unter Laborbedingungen beeinflussen.

Es wurde nachgewiesen, dass die in der Oberflächenschicht der Proben ermittelten Werte (Brinellhärte, chemische Zusammensetzung ...) eine größere Streuung aufweisen, denn sie beschreiben bei den Proben, größenordnungsgemäß, nur eine millimetertiefe Schicht. Dadurch sind solche Messungen gegen lokale Abweichungen der Eigenschaften empfindlicher. Demgegenüber beinhalten die Messungen über den vollen Querschnitt (Ultraschallgeschwindigkeit) den Beitrag der gesamten Gußwand und neigen folglich weniger zu lokalen Unhomogenitäten.

Die durch Thermolemente gemessenen Temperaturwerte können nicht immer als richtig und genau die Tatsachen erfassend betrachtet werden. Neben den Fehlern der Thermolemente und Messanlagen, die vorausgesehen und korrigiert werden können, stellen die größten Probleme die Ungenauigkeiten dar, die bei der Messung durch den Temperaturgradienten entlang des Thermolements verursacht werden. Die maximale Messgenauigkeit kann dann erreicht werden, wenn es entlang des Thermolements möglichst niedrigen Temperaturgradienten gibt, d.h. dass es günstig ist, wenn das Ende des Thermolements wenigstens einige Zentimeter in der Wand des gegossenen Metalls steckt. In der Praxis ist jedoch dieser Grundsatz oft nicht erfüllbar. Das vorgeschlagene Verfahren der Datenkorrektur basiert auf dem Vergleich des gemessenen Temperaturverlaufs und dessen kennzeichnenden Temperaturpunkten mit den Tabellendaten oder mit dem Temperaturverlauf im aus gleicher Legierung gegossenen Gußstück, wo die Forderung auf den limitierten Temperaturgradienten entlang des Thermolements erfüllt wurde.

Es wurde bewiesen, dass die einzige effektive Art und Weise der Genauigkeitserhöhung bei den rechnerunterstützten Simulationen des Gieß- und Erstarrungsprozesses die Anwendung genauerer thermophysikalischer Daten ist. Ich habe ein Experiment entworfen, das zur Präzisierung von thermophysikalischen Daten für die Simulationszwecke dient - rückläufige Simulation.

Zur praktischen Anwendung habe ich eine in sich geschlossene Datenbasis thermophysikalischer Werte, vorzüglich für das Gusseisen mit Kugelgraphit zusammengestellt, die in die Simulationsberechnungen eingehen und Werte von verschiedenen Autoren verglichen.

Bei der Bewertung und dem gegenseitigen Vergleich thermophysikalischer Parameter muss das gelöste Problem immer berücksichtigt werden, denn der Vergleich der Unterschiede zwischen den Zahlen selbst liefert uns keine klare Vorstellung darüber, welche Bedeutung sie bei der Anwendung in den Berechnungen in Simulationsprogrammen haben. Eine der

Vergleichsmöglichkeiten dieser Daten ist, eine Berechnung mit Anwendung von Daten mehrerer Legierungen durchzuführen.

Auch der Vergleich von Eingangswerten zur Berechnung des Gußgefüges unter Anwendung der Simulationsprogramme ergibt keine klare Vorstellung über den prozentuellen Unterschied des Gefüges nach der Berechnung. Anwendet man die Daten, die für Legierungen mit der unterschiedlichen chemischen Analyse, wenn auch für eine Werkstoffgruppe - wie hier für die GGG-Qualitäten - ermittelt wurden, bekommt man den Unterschied im Anteil einzelner Komponenten, der sich in der Größenordnung von bis mehrerer Duzend Prozent bewegt. So eine Berechnung ist für die Praxis unbrauchbar. Auch hier müssen möglichst genaue Daten aus den Transformationsdiagrammen benutzt werden. Für diese Zwecke habe ich in die Arbeit die gesamte Databasis von Eingangs-Transformationsdiagrammen für das Gußeisen mit Kugelgraphit und zugehöriger, zur Anwendung in Simulationsprogrammen bestimmter Werte aufgenommen.

Es wurde nachgewiesen, dass die Verbindung der rechnerunterstützten Simulation des Temperaturfeldes mit der Auswertung der Matrix durch die Bildanalyse einen viel komplexeren Blick auf das Gußstück bringen kann. Wie sich zeigte, kann die rechnerunterstützte Simulation die Unterschiede im Temperaturverlauf erfassen, und dies sowohl auf den einzelnen Gußstellen, als auch im Wandquerschnitt. Der Verlauf der Erstarrungskurven stimmte darüber hinaus mit den theoretischen Voraussetzungen der Graphitbildung sehr gut überein, was wiederum sowohl für den Querschnitt durch den Bügelguß, als auch für seine Wand gilt.

20. Literatura

- [1] KOUTSKÁ, J.: Přínos modelování k optimalizaci procesů tváření a tepelného zpracování. In: Sborník přednášek sekce Juniormat a Materiálové vědy na prahu 3. milénia, ISBN 80-214-376-X Brno, 1999, pp. 119-125.
- [2] MOCHNACKI, B., SUCHY, J.S.: Numerical methods in Computations of Foundry processes, Polish Foundrymen's Technical Association, Kraków, 1995.
- [3] PEHLKE, R. D.: Strategies and Structures for Computer-Aided-Design of Casting. 60 World Foundry Congress, Hague, 1993.
- [4] KŘÍŽ, R., VÁVRA, P: Strojírenské příručka, Scientia, SNTL, Praha , 1992.
- [5] ČECH, J., BOČEK, J., BOUCNÍK, P.: Optimalizace výroby odlitků se zaměřením na simulaci tuhnutí. In. Perspektivy slévárenství. Konference, VTS ZČ, Plzeň, 1997.
- [6] LONGA, W.: Solidification of Casting in a Sand Mold, Slask, Katowice, 1973.
- /7/ FURSUND, K.: Das Eindringen von Stahl in Formsand Einfluss der Oberflächenreaktion und der Temperatur, Giesserei Techn. - wiss, Belh. No. 14, 1962, pp. 51 - 61.
- /8/ HENSEL, J. G., KEVERIAN, J.: Comparasion of Calculated and Measured Solidification Pattern in a Variety of Casting, AFS Cast Met. Res. J., 1, 1965 pp. 19 - 30.
- /9/ PEHLKE, R.D., Ho, K.: Transient Methods for Determination of Metal-Mold Interfacial Heat-Transfer: AFS Transaction, No. 61, 1983, pp. 61.
- /10/ DAVIES, V. de L., STOKKE, S., WESTBY, O.: Numerical Computations of Heat and Temperature Distribution in Castings, Br. Foundryman, No. 66, 1973, pp. 305 - 313.
- /11/ SAHM, P.R., HANSEN, P. N.: Numerical Simulation and Modelling of Casting and Solidification Processes for Foundry and Cast-House, CIATF Zurich, 1984.
- /12/ OHNAKO, I., AIZAWA, T., NAMEKAWA, K., KOMIYA, M., KAISO, M.: Computer Simulation of Solidification Processing, The Metals Society, 1987, pp. 268 - 270.
- /13/ BERRY, J.T., BOULET, J.A.M.: The Application of Geometric Modeling to Metal Casting Technology in Solid Modeling by Computer – From Theory to Application, Plenum Press, 1984, pp. 105 - 106.
- [14] LUDWIG, A., BÜHRING-POLACZEK, A.: Simulace slévárenských procesů (1. pokračování), Slévárenství, XLV (1997), No. 2 - 3, pp. 110 – 111.
- /15/ RAPPAZ, M.: Thévoz: Acta Metall., 35, 1987, pp. 1487 – 1497.
- /16/ RAPPAZ, M.: Thévoz: Acta Metall., 35, 1987, pp. 2929 – 2933.
- /17/ NASTAC, L., STEFANESCU, D.M.: Int. Conf. of Modelling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes VI, 1993, pp. 209 – 217 .
- /18/ SVENSSON, I. L., WESSEN, M., GONZALEZ, A.: Int. Conf. of Modelling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes VI, 1993, pp. 29 – 36.
- /19/ WESSEN, M., SVENSSON, I.L.: Int. Conf. of Modelling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes VI, 1993, pp. 71 – 78.
- /20/ WANG, C. Y., BECKERMANN, C.: Mat. Sci. Eng. A, 1993, pp. 199 – 211.
- [21] EXNER, H.E., KRAFT, T., POMPE, O., RETTENMAYR, M.: Cost 504, Conference Advanced Casting and Solification Technology, 1994, pp. 35 - 45.
- [22] ROÓSZ, A., EXNER, H.E.: Int. Conf. of Modelling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes VI, 1993, pp. 243 - 250.
- [23] VOLLER, V., SUNDARRAI, S.: Conf. of Modelling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes 1993, pp. 251 - 260.
- [24] SWAMINATHAN, C.R., VOLLER, V.R.: Int. Conf. of Modelling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes VI, 1993, pp. 365 - 372.
- [25] NASTAC, STEFANESCU: Proceedings of Cost 504 Conference Advanced Casting and Solidification Techology, 12. - 13. 9. 1994, Espoo, Finlandia, pp. 81 - 92.

- [26] PIWONKA, T.S.: Promotes and Realities of Casting Process Models, 62nd World Foundry Congress, Proceedings for Technical Forum, Philadelphia, Pennsylvania, USA 23 - 26. April, 1996, pp. 62 - 72.
- [27] STEFANESCU, D. M., PIWONKA, T.S. : Promises and Realities of Casting Process Models, sborník Proceedings of the Technical Forum, pp. 62 - 71, Illinois, USA, 1996.
- [28] Materials Algorithms Project Program Library: Program MAP Kinetic Graingrowth, URL: <http://www.msm.cam.ac.uk/map/kinetics/programs/graingrowth.html>.
- [29] DE BUSSAC, A., FARGEAS, S., VILLAIN, H., TOULET, F.: Modeling of Directional Solidification, 62nd World Foundry Congress, Philadelphia, Pennsylvania, no. 12, USA, 1996.
- [30] MAJCHRZAKOVÁ, E., LADYGOVÁ, E.: Simulace tuhnutí odlitků s využitím linearizovaného matematického modelu procesu., Slévárenství č. 4, 1996, pp. 277-280.
- [31] KOVAŘÍK, J., MAJER, J.: Počítačová simulace lití - prostředek optimalizace vtokových soustav. Slévárenství, číslo 5, 1995, pp. 327.
- [32] OTÁHAL, V.: Současný stav výroby českého slévárenství a jeho postavení v odvětví hutnictví a zpracování kovů, Slévárenství XLVII, 1999, č.1, pp. 100 až 103.
- [33] RUSÍN, K.: Perspektivy Českého slévárenství při globalizaci výroby odlitků. In: Konference Materiálové vědy na prahu 3.milénia. Brno, 30.8.- 2.9.1999, pp. 10-18.
- [34] ROUČKA, J.: Metalurgie litin, VUT FSI, vydal PC-DIR Real, s.r.o., Brno, 1998.
- [35] ELLIOTT, R.: Cast Iron Technology. 1. Cast iron – Metallurgy, British Library Cataloguing in Publication Data, ISBN 0-408-01512-8, Chapter 3, Butterworth and Co. Ltd., 1988.
- [36] BORKOWSKI, S.: Tvarové a fázové složení zrnitého grafitu, Slévárenství XLII (1994), No. 5, pp.311 - 313.
- [37] HAKEEN, A. EL., GAMMAL, T.E., HANSEN, P.: Přizpůsobování nové metody pro hodnocení nodularity litiny s kuličkovým grafitem., Slévárenství č. 5, 1994, pp. 309 - 311.
- [38] ASM Metals Handbook, Volume 1, Properties and Selection Iron and Steel, 1978.
- [39] STEFANESCU, D.M., LOPER, C.R., Jr., VOIGT, R.C. a CHEN I, G.: Cooling curve structure analysis of compacted / vermicular graphite cast irons produced by different melt treatments, A.F.S. Trans., 90, 333, 1982.
- [40] HEINE, R.W.: Liquidus and eutectic temperature solidification of white cast iron. A.F.S., Trans., 85, 537, 1977.
- /41/ EKPOOM, U., HEINE, R.W.: Metallurgical processing variables affecting the solidification of malleable base white cast iron, A.S.F. Trans. 89, 1, 1981.
- /42/ ALAGARSAMY, A., JACOBS, F.W., STRONG, G.R. and HEINE, R.W. Carbon equivalent vs. austenite liquides. What is the correct relationship for cast irons?, A.F.S Trans., 92, 871, 1984.
- [43] WOLLHÖVER, K., EIGENFELD, K.: Realistische Voraussetzungen zu modellierung und simulation dendritischer Strukturen in Metalischen systemen. In: 63rd World Foundry Congress, 12 - 18 September 1998, Budapest, Hungary, T37, No. 14.
- [44] DIANZHONG, L., SHIFANG, S., XUELUA, X., JUNQUING, W.: Modeling of Microstructure formation for Nickel-based Superalloy Turbine Blade casting. In: 61st World Foundry Congress, Beijing, China, No. 63, 1995.
- [45] MAMPAEY, F., ZHI AN XU: A model for Austenite Dendrite Growth in Cast Iron. In: 62nd World Foundry Congress, Philadelphia, No. 4, 1996.
- [46] BANERJEE, D.K., STEFANESCU, D.M.: Structural Transitions and Solidifications Kinetics of SG Cast Iron during Directional Solidification Experiments, AFS Transaction, 1991, pp. 747-759.
- [47] ZEMČÍK, L., STRÁNSKÝ, K., VŘEŠŤÁL, J.: Modely růstu grafitu v šedě tuhoucích litinách a jejich aplikace, VUT FS, Brno, Závěrečná zpráva projektu GA ČR reg. Č. 106/96/1293, 1998.
- [48] LUNDBACK, E. , SVENSSON, I.L.: Modeling of Metal Forming Processes, J.L. Chenot, E.Onde, Eds. Kluroer Academica, 1988, pp. 37-46.

- [49] ČECH, J.: Nové směry v nedestruktivní kontrole mechanických vlastností litin. Knižnice odborných a vědeckých spisů VUT v Brně, ročenka 1984, svazek B-102, 1984, pp. 209-238.
- [50] ČECH, J.: Measuring the mechanical properties of cast iron by NDT methods. NDT International, Volume 23, Number 2, April 1990, pp. 93-102.
- [51] KISSOCZY, Š., PAVLOVSKÝ, H.: Metóda konečných prvkov, Bratislava 174/ 1987.
- /52/ SZARGUT, J.: Numerical Methods in Thermal Computations of Industrial Furnaces, Šlask, Katowice, 1977.
- /53/ MOCHNACKI, B.: About the Methods of Solidification on Cooling Processes Computations. Solidification of Metals and Alloys, 1980, Vol, 2, pp 135 - 174.
- [54] KRÍŽEK, M.: Matematická metoda. In: MM průmyslové spektrum, Číslo 7-8, 1999, pp. 68.
- /55/ MITCHEL, A.R., WAIT, R.: The Finite Element Method in Partial Differential equations. J. Wiley and sons, Chichester, 1977.
- /56/ SUCHY, J.: The Alloy Components Segregation During Directional Solidification. Publ. of the Sil. Techn. Univ. , Mechanics, No. 76, Gliwice 1983.
- /57/ MAJCHRZAK, E., MOCHNACKI, B.: The Collocation Method of Solidification Front Determining in the Continuous Casting Volume. Bull. of the Pol. Ac. of Sc., Techn. Sc., Vol. 36, No 5-6, 1988, pp.129-308.
- [58] Source of Casting Modeling Software, Modern casting / October 1997, USA, pp. 27-29.
- [59] American Foundry Society, URL: <http://www.afsinc.org>.
- [60] ESI Group, Pam-Cast Simulor, URL: <http://www.esi.fr/pubs/talk/index.html>.
- [61] ESI Group, Pam-Cast Simulor, URL: <http://www.esi.fr/products/sim/>.
- [62] EKK, Metalcasting Process Simulation Software, URL: <http://ekkinc.com/>.
- [63] CT-Castech Inc. Oy, URL: <http://www.castech.fi>.
- [64] Jordan Company, URL: <http://www.jor.com/index.htm>.
- [65] Flow Science Inc., URL: <http://www.flow3d.com>.
- [66] Magma: URL: <http://www.magmaflow.com/>.
- [67] AlphaCast software Ltd., URL: <http://www.alphacast.demon.co.uk/>.
- [68] NovaCast AB, Soft Center, Sweden URL: <http://www.novacast.se>.
- [69] Technanalysis, URL: <http://www.technanalysis.com>.
- [70] UES, Inc., URL: <http://www.ues.com/procast/descript.htm>.
- [71] Simtec RWP Aachen, URL: <http://www.simtec-inc.com>.
- [72] National Center for Excellence in Metalworking Technology, URL: <http://www.ncemt.ctc.com/>
- [73] PÍŠEK, F., JENÍČEK, L., RYŠ, P. a kolektiv: Nauka o materiálu I - IV, Academica, Praha, 1975, NaM I/2, pp. 82-84.
- [74] MOTYČKA, P., NOVÝ, Z.: Kvantitativní stanovení produktů fázových transformací při ohřevu a ochlazování ocelí, Sborník přednášek a posterů, JUNIORMAT '97, Brno, 1997, ISBN 80-86122-04-02, pp. 183-184.
- [75] KRÓL, S., MOCHENCKI, B., SUCHY, J. S.: Numerická analýza tepelných pochodů v odlitku, Slévárenství č. 4, 1996, pp. 274 - 276.
- [76] ROHRING, K., FAIRHURST, W.: Heat Treatment of Nodular Cast Iron, Transformation Diagrams, Gieserei Verlag G.m.b.H. , Dusseldorf, 1979.
- [77] DORAZIL, E.: Nauka o materiálu I., přednášky, VUT Brno, 1989, ISBN – 80-214-1028-0.
- [78] BROŽEK, V.: Supertvrdé materiály, Sborník přednášek a posterů, JUNIORMAT '97, Brno, 1997, ISBN 80-86122-04-02, pp. 18-28.
- [79] ČSN EN ISO 6506-3 (42 0359) převzata překladem. Kovové materiály - zkouška tvrdostí podle Brinella. Česká státní norma, Český normalizační institut, Praha, 2000.
- [80] SKRBEK, B., VITEBSKY, M.: Třídění odlitků z šedé litiny ultrazvukem. NDT Welding bulletin, 1999, pp. 103 - 107.

- [81] JANOWAK J., ALAGARSAMY A.: The Growing Tension between Tensile and Brinell, Grede Foundries, Inc., Milwaukee, WI, USA, In: Modern casting, January 1990, pp. 44 – 47.
- [82] PÍŠEK, F., JENÍČEK, L., RYŠ, P.: Nauka o materiálu I, spoluautoři - CENEK, M., MAZANEC, K., HRBEK, A.: Železo a jeho slitiny, Academia, Praha, 1968, 2.svazek.
- [83] ATTERTON, D.V.: The Apperent Thermal Conductivities of Moulding Materials at High Temperatures, Journal of the Iron and Steel institute, pp. 203 and 204, July 1953.
- [84] ENENKEL, V., HLOUŠEK, J., JANOTKOVÁ, E.: Termomechanika, učební text vysokých škol, VUT Brno, 1983, pp.25.
- /85/ IVANOVA, J. V.: JVUZ Cvetnaja metallurgija 4 (1961), 45-52.
- [86] KITTEL, Ch.: Úvod do fyziky pevných látek, Academia, Praha, 1985.
- /87/ YENSEN, T.:Trans. Amer. Inst. Electr. Eng. 43 (1924), pp. 145.
- [88] National Phys. Lab.: JISI 154 (1946), pp. 83-121.
- [89] KAVIČKA, F., HLOUSEK, J., STETINA, J.: Calculation Analysis of the Influence of Thermodynamics Properties and Boundary Conditions on Calculation Accuracy of Solidification Thermokinetics. In: 62nd World Foundry Congress, 23-26 april 1996, Philadelphia, Pennsylvania, No. 9.
- [90] SKÁLOVÁ, Z.: Predikce fyzikálně – chemických změn formovacích směsí způsobených teplem tuhoucích odlitků. [Teze závěrečné práce], Vysoké učení technické, FSI, Brno, srpen 1999.
- [91] HOFMANN, F.: Giesserei, č.24, pp. 818-827, Německo, 1966.
- [92] ČSN EN 01 31-0 (01 1300) převzata překladem. Veličiny a jednotky, Část O: Všeobecné zásady., Český normalizační institut, Praha, vydáno 1994-12. ISBN 80-7283-039-2.
- [93] ČSN EN ISO 31-4 (01 1300) převzata překladem. Veličiny a jednotky. Část 4: Teplo, Český normalizační institut, Praha, vydáno 2001. ISBN 80-7283-039-2.
- [94] ČSN 01 1323 Veličiny a jednotky sdílení tepla a přenosu látek. Československý státní norma, Český normalizační institut, Praha, 1986. ISBN 80-7283-039-2.
- [95] Databanka termofyzikálních údajů v software SIMTEC. Výrobce RWP Aachen, Německo.
- [96] KASCHNITZ, E., BÚHRIG-POLACZEK, A., POTTLACHER, G.: Termophysical properties of casting materials. International Commission 3.5 „Computer Simulation of Casting Processes“, Workshop Computer in Foundry and Handbook for Simulation, Slovenia Foundrymen’s Society, Portorož, Slovenia, September 15 - 17, 1999.
- [97] ČSN 42 0461 Hodnocení metalografické struktury litin, Československé státní normy, Český normalizační institut, schváleno 1975-12-01, vydáno 1994.
- [98] BOUCNÍK P., ČECH J., ZEMANOVÁ Š.: Analýza strukturních a mechanických vlastností u odlitků z LKG pomocí ultrazvukové defektoskopie. Sborník z konference, Plzeň 1999.
- [99] ZEMANOVÁ, Š.: QFD - Nová metoda řízení jakosti ve slévárenství. [Disertační práce]. Vysoké učení technické, FS Brno, 1998.
- [100] KOSCHIN, F. a kolektiv: Statgraphics, Grada a.s., 1992, ISBN 80-85424-70-3, pp. 206-210.
- [101] Program QC Expert 2., TriloByte Ltd., Statistical Software,
- [102] KUPKA, K.: Analýza dat pro řízení jakosti a ekonomiku, TriloByte Statistical Software, 1998
- [103] Přehled termofyzikálních vlastností prvků: URL: <http://www.shef.ac.uk/chemistry/web-elements>.
- [104] ČECH, J. - BOUCNÍK, P. - URSACHER, R.: Bezpečné dosažení požadovaných mikrostruktur odlitků. Fakultní grant č. FP 379719, VUT FS Brno, 1997.
- [105] Technická dokumentace ČKD MOTORY, a.s. slévárna Plotiště, výkres No. BW 1468.4.
- [106] EN-MC - MgAl8Zn, Slitina hořčíku na odlitky, dříve norma ČSN 42 4911. 1999
- [107] MIKULČÁK, J. - BOHDAN, K. et al.: Matematické, fyzikální a chemické tabulky. SPN, Praha 1988
- [108] Metals Handbook. Desk Edition, Second Edition, ASM International, The Materials Information Society, USA, 1998.
- [109] KAVIČKA, F.: Vysokoškolská skripta, Termokinetika tuhnutí, ochlazování a ohřevu. Edice VUT, 1993.

- [110] Giesserei kalendar, No. 12, Německo, 1981.
- [111] Thermodynamic properties of the Element, Advances in Chemistry Series 18, Published November 1956 by American Chemical Society, 1155 Sixteenth St., N.W., Washington 6, D.C.
- [112] Termofyzikální vlastnosti čistých prvků, University of Sheffield.:
www.shef.ac.uk/uni/academica/A-C/chem/web-elements/nofr-heat/Fe.html.
- [113] LIDE, D. R. Jr: Journal of Physical and Chemical Preference Date. Published by the American Chemical Society and the American Institute of Physics for the National Bureau of Standards, Volume 7, No. 3, 1978.
- [114] LIDE, D. R.: CRC handbook of thermophysical and thermochemical data Lide, CRC Press, Anglie, 1994.
- [115] PEHLKE, R.D. - JEYARAJAN, A.- WADA, H.: Summary of Thermal properties for casting alloys and mold materials, National Science Foundation applied research devision, Grant No. DAR78-26171, December 1982, National Technical Information Service, US Springfield.
- [116] ČSN 42 2303 Litina s kuličkovým grafitem 42 2303, feritická, účinnost od 1977. Český normalizační institut, Praha, vydáno 2001, ISBN 80-7283-039-2.
- [117] ČSN 42 2304 Litina s kuličkovým grafitem 42 2304, feritická, účinnost od 1977. Český normalizační institut, Praha, vydáno 2001, ISBN 80-7283-039-2.
- [118] ČSN 42 2305 Litina s kuličkovým grafitem 42 2305, feriticko-perlitická, účinnost od 1977. Český normalizační institut, Praha, vydáno 2001, ISBN 80-7283-039-2.
- [119] ČSN 42 2306 Litina s kuličkovým grafitem 42 2306, perliticko-feritická, účinnost od 1977. Český normalizační institut, Praha, vydáno 2001, ISBN 80-7283-039-2.
- [120] ČSN 42 2307 Litina s kuličkovým grafitem 42 2307, perlitická, účinnost od 1977. Český normalizační institut, Praha, vydáno 2001, ISBN 80-7283-039-2.
- [121] ČSN 42 2308 Litina s kuličkovým grafitem 42 2308, perliticko-sorbitická, účinnost od 1977. Český normalizační institut, Praha, vydáno 2001, ISBN 80-7283-039-2.
- [122] ČSN 42 2314 Litina s kuličkovým grafitem 42 2314, feritická, účinnost od 1977. Český normalizační institut, Praha, vydáno 2001, ISBN 80-7283-039-2.
- [123] ČSN 42 2340 Litina s kuličkovým grafitem 42 2340, křemíková žáruvzdorná, účinnost od 1977. Český normalizační institut, Praha, vydáno 2001, ISBN 80-7283-039-2.
- [124] GILBERT, N., MACLEOD: The heat equation with two free boundaries, PhD thesis. 1993, Microfilm #68-01157.
- [125] American Society for Metals: Source book on industrial alloy and engineering data: a comprehensive collection of alloy and engineering data in tabular and graphical form. Publisher: Metals Park, Ohio : The Society 1978.
- [126] BAILEY, R. A.: [PhD thesis]: software Therm 1.1 , USA, 1996.
- [127] GIRŠOVIČ, N.G.: Šedá litina, 1. díl (1/2), 1972.
- [128] ČSN 42 2410 Litina s lupínkovým grafitem 42 2410, účinnost od 1990. Český normalizační institut, Praha, vydáno 2001, ISBN 80-7283-039-2.
- [129] ČSN 42 2415 Litina s lupínkovým grafitem 42 2415, účinnost od 1990. Český normalizační institut, Praha, vydáno 2001, ISBN 80-7283-039-2.
- [130] ČSN 42 2420 Litina s lupínkovým grafitem 42 2420, účinnost od 1990. Český normalizační institut, Praha, vydáno 2001, ISBN 80-7283-039-2.
- [131] ČSN 42 2425 Litina s lupínkovým grafitem 42 2325, účinnost od 1990. Český normalizační institut, Praha, vydáno 2001, ISBN 80-7283-039-2.
- [132] ČSN 42 2430 Litina s lupínkovým grafitem 42 2430, účinnost od 1990. Český normalizační institut, Praha, vydáno 2001, ISBN 80-7283-039-2.
- [133] ČSN 42 2435 Litina s lupínkovým grafitem 42 2435 účinnost od 1990. Český normalizační institut, Praha, vydáno 2001, ISBN 80-7283-039-2.
- [134] Angus, H.T.: Cast iron – Physical and engineering properties. 2nd ed. London, Buttenworts, 1976

- /135/ DIN EN 1561 Grey cast iron, German version EN 1561:1997, GG 15 Deutsche Normen und technische Regeln, (odpovídá EN GJL-150). DIN Catalogue of Technical Rules 2000, ISBN 3-410-14680-6.
- /136/ DIN EN 1561 Grey cast iron, German version EN 1561:1997, GG 20 Deutsche Normen und technische Regeln, (odpovídá EN GJL-200). DIN Catalogue of Technical Rules 2000, ISBN 3-410-14680-6.
- /137/ DIN EN 1561 Grey cast iron, German version EN 1561:1997, GG 25 Deutsche Normen und technische Regeln, (odpovídá EN GJL-250). DIN Catalogue of Technical Rules 2000, ISBN 3-410-14680-6.
- /138/ DIN EN 1561 Grey cast iron, German version EN 1561:1997, GG 30 Deutsche Normen und technische Regeln, (odpovídá EN GJL-300). DIN Catalogue of Technical Rules 2000, ISBN 3-410-14680-6.
- /139/ DIN EN 1561 Grey cast iron, German version EN 1561:1997, GG 35 Deutsche Normen und technische Regeln, (odpovídá EN GJL-350). DIN Catalogue of Technical Rules 2000, ISBN 3-410-14680-6.
- [140] ČSN 42 2456 Litina s lupínkovým grafitem 42 2456, účinnost od 1994. Český normalizační institut, Praha, vydáno 2001, ISBN 80-7283-039-2.
- [141] ČSN 42 2465 Litina s lupínkovým grafitem 42 2465, účinnost od 1994. Český normalizační institut, Praha, vydáno 2001, ISBN 80-7283-039-2.
- [142] SCHUHMANN, R.: Metallurgical engineering, Publisher: Cambridge, Addison-Wesley Press, Anglie, 1952.
- [143] STULL, D. R.: JANAF thermochemical tables Stull, 2d ed. publisher: Washington: U. S. Government Printing Office 1971. Project directors NSRDS-NBS 37. Prepared at Thermal Research Laboratory, Dow Chemical Co., Midland, Michigan. USA.
- [144] The On-line Materials Information Resource. Přehled termofyzikálních vlastností prvků URL: <http://www.matweb.com/GetCompMatls.asp>.
- [145] SAHM, R. P., LUDWIG, A.: The Edge of Development in Sand Casting Process Simulation, sborník Proceedings of the Technical Forum, Illinois, USA, 1996, pp. 13 - 15.
- [146] MIKULA, J., HAVEL, M.: Počítačová simulace slévárenských procesů - program SIMTEC, Maschinenmarkt, č.1 , ročník I - březen 1997, pp. 13 - 17.
- [147] ARBOR, A.: Continuous cooling transformation diagrams for Ductile Irons. Research laboratory, Climax Molybdenum Co. of Michigan, AMAX Inc., Michigan, USA..
- [148] The Application of Neural Networks in the Modelling of Phase Rolling Processes: <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/9704/Gorni/Gorni-9704.html>.
- [149] Mathematical Modelling of the CCT Behaviour, Univesität Zurich: <http://www.rereth.ethz.ch/>
- [150] KLUAS, R., FAIRHURST, W.: Heat Treatment of Nodulare Cast Iron, Transformation Diagrams. VDG - Taschenbuch 6, Edited by Verein Deutscher Giessereifachleute, Giesserei-Verlag G.m.b.H. Düsseldorf, 1979.
- [151] ELDIS, G. T.: A Critical Review of Data Sources for Isothermal Transformation and Continuous Cooling Transformation Diagrams. Hardenability Concepts with Applications to Steel, D.V. Doane and J. S. Kirkaldy, eds., AIME, Warrendale, Pennsylvania, USA, 1978.
- [152] QUELLE, HACHENBERG, K., et al. "Gusseisen mit Kugelgraphit", Zentrale fuer Gussverwendung, Duesseldorf, Nachdruck aus "konstruieren + giessen" 13, Nr. 1, 1988.
- [153] SKRBEK, B.: Nedestruktivní diagnostika vlastností litin. Časopis Slévárenství. V tisku.
- [154] DEBEF, J.: Využití kontroly tvaru grafitu pomocí ultrazvuku. Časopis Slévárenství, číslo 11, pp. 442-444. XXXIII (1985).
- [155] 15th European Conference on Thermophysical Properties, ECTP Conference, September 5 - 9. 1999 Wurzburg, Germany – www.zae-bayern.de/ectp.
- [156] IVTAN Association of Russia Academy of Science. 2001. www.gbelov.tipod.com.
- [157] STRÁNSKÝ, K., BECHNÝ, L. a kol.: Model růstu kompaktního grafitu a jeho užití v šedě tuhoucích litinách. Časopis Slévárenství XXXIX No. 5/6, (1991), pp. 154 - 160

- [158] KOZLOV, L., VOROBIEV, A., AZZAM, A.: Modular Graphite Formation in Cast irons: Modern Concepts. 62nd World Foundry Congress, No. 27, 23 April - 26 April 1996, Philadelphia, USA.
- [159] ROBERTSON, E.: Image Analysis Takes the Strain from Materials Analysis. EUROMaterials, Incorporating FEMS News, WILEY-VCH Verlag, 2/2001, June 2001, ISSN 946-0470, pp. 14 -15.
- [160] NASTAC, L., STEFANESCU, D.M.: Transaction of the American Foundryman's Society 103, 1995, předtisk pp. 95 – 058.
- [161] LEUBE, B., ARNBERG, L., MAI, R.: Predicting the microstructure and mechanical properties of gray iron by solidification simulatiuon. 63nd World Foundry Congress, No. 16, 12 - 18 September 1998, Budapest, Hungary.
- [162] LI, D., SU, S., XU, X., WANG, J.: Modeling of microstructure formation for Nickel-based superalloy turbine bland casting. 61st World Foundry Congress, 24 - 29. Septmeber 1995, Beijing China. Pp. 63-74.

21. Seznam publikací autora

- [1] BOUCNÍK, P., ČECH, J., BOČEK, J.: Optimalizace výroby odlitků se zaměřením na simulaci tuhnutí. Konference VTS ZČ: Perspektivy slévárenství, Plzeň, 1997.
- [2] ČECH, J., BOČEK, J., BOUCNÍK, P.: Výroba zdravých odlitků se zaměřením na simulaci tuhnutí. II. Mezinárodní zlivárenská konference - „Zvyšovanie akosti v zlivárenstve“, Žilinská Univerzita, Žilina, 1997.
- [3] ČECH, J., BOČEK, J., BOUCNÍK, P., MIKULA, J.: Optimalizace slévárenské produkce a predikce struktury simulací tuhnutí. International conference Technology '97, 9 - 10. september, Slovak Univesity of Technology in Bratislava, 1997.
- [4] BOUCNÍK, P., ČECH, J., JUŘIČKA, I.: Použití hořčíkových slitin ve slévárenství. 5. Mezinárodní vědecká konference CO-MAT-TECH, Trnava, 14.10. - 15.10.1997.
- [5] BOČEK, J., BOUCNÍK, P., ČECH, J.: Optimalizace výroby odlitků ze šedé litiny pomocí simulace tuhnutí. 34. Slévárenské dny. Mezinárodní konference, ČSS - VUT FS ÚMI, Brno, 30. 9 - 1.10.1997.
- [6] BOUCNÍK, P., SKÁLOVÁ, Z.: Studium adhezně-kohezních vztahů heterogenních systémů používaných ve slévárenství. 34. Slévárenské dny. Mezinárodní konference, ČSS - VUT FS ÚMI, Brno, 30. 9 - 1.10.1997.
- [7] BOUCNÍK, P., ČECH, J., JUŘIČKA, I.: Hořčíkové slitiny - jejich vlastnosti a použití. XI. Miedzynarodowe sympozjum „Metody oceny struktury oraz wlasnošci materialów i wyrobów“, Wyzsza Szkola Inżynierska w Opolu, Vysoké učení Technické v Brně, Svratka, 1997.
- [8] ČECH, J., BOUCNÍK, P., URSACHER, R.: Bezpečné dosažení požadovaných mikrostruktur odlitků. Fakultní grant č. FP 379719, VUT FS Brno, 1997.
- [9] BOUCNÍK, P., SKÁLOVÁ, Z., KARFÍKOVÁ, M.: Nové postupy pojení slévárenských směsí. Fakultní grant č. FU 370021, VUT FS Brno, 1997
- [10] ČECH, J., BOUCNÍK, P.: Modelování tuhnutí a struktury odlitků z tvárné litiny. 13. Celostátní konference – Výroba a vlastnosti oceli na odlitky a tvárné litiny, 18. –19. 6. 1998, VUT, Brno, 1998.
- [11] BOUCNÍK, P., ČECH, J., URSACHER, R.: Možnosti počítačového modelování v současném slévárenství. Konference VTS ZČ – „Slévárna a jejich konkurenceschopnost“, Plzeň 2. – 3. 6. 1998.
- [12] BOUCNÍK, P., BOČEK, J., URSACHER, R.: Programový systém pro zabezpečení dosažení požadovaných mikrostruktur odlitků. Fakultní úkol VUT – FP 38 0019, Brno, 1998.
- [13] BOUCNÍK, P., BOČEK, J., URSACHER, R.: Programový systém pro zabezpečení dosažení požadovaných mikrostruktur odlitků Úkol VUT – 1998 - FV 3 8 0002/98, Brno, 1998.
- [14] BOUCNÍK, P., RUSÍN, K.: Možný způsob hodnocení kinetiky fyzikálních a chemických dějů pomocí histogramů, Slévárenství XLVII, Číslo 4, str. 229 – 230, 1999.
- [15] 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. International Conference „Junior-Euromat“, pp. 470, in Lausanne, Switzerland. August 28 - September 1, 2000.
- [16] BOUCNÍK, P., RUSÍN, K., JIŘIKOVSKÝ, K., SKÁLOVÁ, Z.: Hodnocení stability vlastností vratných formovacích směsí. Slévárenství XLVIII, Číslo 9, str. 441 – 443, 2000.

- [17] BOUCNÍK, P., ČECH, J.: Souvislost mezi měřením rychlosti ultrazvuku a tvrdosti litiny jako nástroj výstupní kontroly. Slévárenství XLVIII, Číslo 11-12, str. 590 – 592, 2000.
- [18] BOUCNÍK, P., ČECH, J.: Analýza vstupních termofyzikálních dat - předpoklad pro dosažení dobrého výsledku při simulaci mikrostruktury. XV Miedzynarodowe Sympozium konané v Brně, 6-8 XII 2000. Metody oceny struktury oraz wlasnosci materialow i wyrobów, Mechanika Nr. 263/2000 z.63, Politechnika Opolska, ISSN 1429-6055, Opole 2000.
- [19] ČECH, J., BOUCNÍK, P., RUSÍN, K., URSACHER, R., ZEMČÍK, L.: Simulation of Automobile Wheels Cast of Magnesium Alloys – Simulation and Experimental Measurement. Materialica – Materials Week 2000, Messe Munchen. Poster, Symposium B2 - Automotive, 25. - 28. Sept. 2000
- [20] ČECH, J., BOUCNÍK, P., RUSÍN, K.: Simulation and experimental measurement of internal stresses during solidification of motorcycle wheels část of Mg-alloys. In.: Proceedings of 10th International Metallurgy and Materials Congress, 24-28 May 2000 Istanbul. ISBN 975-395-382-8
- [21] BOUCNÍK, P., ČECH, J.: Zpětná simulace - možností a omezení korekce naměřených dat. Pedagogicko-vědecký konference u příležitosti 100. výročí založení fakulty strojního inženýrství, II. Sborník příspěvků doktorandů, 5. -6. prosince 2000, VUT FSI, Brno, pp. 33-36., 2000.
- [22] BOUCNÍK, P.: Informační systémy ve slévárnách představené na veletrhu FOND-EX 2000. Časopis Slévárenství XLIX, Číslo 1, str. 28 – 30, 1/2001.
- [23] BOUCNÍK, P., ČECH, J., JIŘIKOVSKÝ, K.: Prediction of Graphite Parameters Based on Computer Simulation. Subsession 5A: material engineering, TRNSCOM 2001, 4th European Conference of young research and science workers in Transport and Telecommunications. University of Žilina 25.-27.6.2001. ISBN 80 – 7100 – 850 – 8. Pp.143 – 146.

Přijaté k publikování

- [I] BOUCNÍK, P., ČECH, J.: Prediction of Graphite Parameters Based on Computer Simulation. Materials week, Munchen, 1-4 Oct. 2001. Poster, v tisku.
- [II] BOUCNÍK, P., ČECH, J.: Statistická analýza naměřených hodnot z výstupní kontroly odlitků z LKG, jejich stabilita a normalita, možnosti regresní analýzy. JUNIORMAT '01, mezinárodní konference, FSI VUT v Brně, 19.-20. září 2001. V tisku.
- [III] BOUCNÍK, P., ČECH, J.: Využití počítačové simulace při predikci parametrů grafitu. Vedecká konferencia so zahraničnou účasťou, Trenčín, 23. - 24. oktobra 2001, TRANSFER 2001, v tisku.
- [IV] BOUCNÍK, P., ČECH, J.: Predikce parametrů grafitu na základě počítačové simulace. Konference "Slévárenství ve třetím tisíciletí" Plzeň 9. - 10. října 2001. V tisku.