

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Doc. Ing. Jaroslav Čech, CSc.

**UPLATNĚNÍ MODERNÍCH TRENDŮ PŘI ZVYŠOVÁNÍ
KONKURENCESCHOPNOSTI SLÉVÁRENSKÉ VÝROBY**

**APPLICATION OF MODERN TRENDS IN FOUNDRY PRODUCTION
WHEN INCREASING ITS COMPETITIVENESS**

TEZE PŘEDNÁŠKY KE JMENOVÁNÍ PROFESOREM V OBORU
STROJÍRENSKÁ TECHNOLOGIE



BRNO 2003

KLÍČOVÁ SLOVA

optimalizace výroby, minimalizace zbytkových pnutí, expertní systém, predikce vlastností, QFD

KEY WORDS

Optimization of Production, Minimization of Residual Stresses, Expert System, Prediction of Properties, QFD

© Jaroslav Čech, 2003

ISBN 80-214-2280-7

ISSN 1213-418X

OBSAH

TEZE PŘEDNÁŠKY KE JMENOVÁNÍ PROFESOREM V OBORU STROJÍRENSKÁ

TECHNOLOGIE.....	1
BRNO 2003.....	1
KLÍČOVÁ SLOVA	2
KEY WORDS.....	2
PŘEDSTAVENÍ AUTORA.....	4
1 ÚVOD.....	5
2 POUŽITÍ EXPERTNÍCH SYSTÉMŮ.....	6
3 POUŽITÍ SIMULAČNÍCH PROGRAMŮ PRO ZVÝŠENÍ KONKURENCESCHOPNOSTI ODLITKŮ	8
3.1 Optimalizace režimu chladnutí litinových odlitků	11
3.2 Simulace v porovnání s experimentem.....	18
3.3 Predikce mechanických a strukturních vlastností u litinových odlitků.....	18
3.3.1 Predikce mechanických vlastností v porovnání s experimentem	18
3.3.2 Simulace mikrostruktur	20
4 NÁVRH HODNOCENÍ KONKURENCESCHOPNOSTI POMOCÍ QFD...	24
4.1 Experimentální část.....	26
5 ZÁVĚR.....	28
6 POUŽITÁ LITERATURA.....	30
7 SUMMARY	36
ABOUT THE AUTHOR.....	38

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Doc. Ing. Jaroslav Čech, Csc. se narodil 6. září 1942 v Týně nad Vltavou. V roce 1964 a 1965 pracoval jako pomocná vědecká síla na katedře slévárenství (prof. Vetiška). Studium na strojínské fakultě Vysokého učení technického v Brně ukončil v roce 1965. Po ukončení vysokoškolského studia nastoupil jako asistent na katedru slévárenství. Od roku 1968 pracoval jako odborný pracovník ve výzkumu katedry slévárenství. Kandidátskou disertační práci odevzdal v roce 1973, ale z politických důvodů mu obhajoba byla povolena až v roce 1977. Práce řešila problematiku měření zbytkových pnutí u odlitků ze šedé litiny. V roce 1977 přešel na pedagogické místo odborného asistenta. Jmenování docenta mu z politických důvodů nebylo umožněno až do konce roku 1989, kdy byl jmenován pro obor strojírenská technologie. Habilitoval se v roce 2001 prací „Optimalizace výroby litinových odlitků s cílem zvýšení jakosti“. Od roku 1991 byl v rámci konkurzu přijat jako vedoucí katedry slévárenství. Od roku 1994 byl v rámci konkurzu jmenován ředitelem Ústavu materiálového inženýrství. Tyto funkce vykonával do roku 2000.

Po celou dobu působení na VUT FSI se zabýval přednášením a cvičením předmětů z oboru kontroly jakosti odlitků, metrologie, technických měření, řízení jakosti, statistického řízení ve slévárnách pro specializace technologické, slévárenské technologie a materiálové inženýrství. Během celé doby působení na fakultě vedl diplomanty a studenty v rámci odborné vědecké činnosti. Je školitelem doktorandů v oboru strojírenské technologie (5 skončilo, 4 v současné době vede).

Po celou dobu působení na fakultě se aktivně zapojil do spolupráce s průmyslem (60 výzkumných zpráv). V 70. a 80. letech řešil jako spoluautor řadu státních úkolů v oblasti základního výzkumu, v 90. letech se zapojil do řešení úkolů GA ČR a do mezinárodních projektů (KONTAKT, TEMPUS, Volkswagen nadace). Je úspěšným hlavním řešitelem 3 dokončených grantových projektů. Podílel se na vybudování laboratoře pro měření zbytkových pnutí, ultrazvukové měření a měření teplot.

Pracuje jako předseda komise pro státní závěrečné zkoušky na odboru slévárenství VUT FSI v Brně a jako místopředseda na Technické univerzitě v Liberci. Od roku 1993 je předsedou odborné komise pro Řízení jakosti, od roku 1996 členem certifikačního orgánu pro způsobilost pracovníků pro metrologickou činnost, člen hodnotitelské komise Ministerstva průmyslu ČR pro projekty vypisované Ministerstvem průmyslu. Je členem komise International Committee of Foundry Technical Associations, část 8.1 Composites od roku 1993, od roku 1998 Computer Simulation of Casting Process.

Celkem publikoval přes 240 článků v mezinárodních časopisech, československých vědeckých časopisech, příspěvcích a posterech na konferencích (z toho přes 70 na mezinárodním fóru).

1 ÚVOD

Slévárny, které chtějí dnes a do budoucna obstát na trhu, musí vyhovět vysokým nárokům na kvalitu a nalézt inovační řešení pro jejich úspěšné zvládnutí. První skupina požadavků zahrnuje hlediska, které se zabývají vývojem nových produktů. Jde především o:

- minimální doba vývoje,
- minimální hmotnost součástek,
- co nejmenší potřeba obrábění a montáže,
- nízké náklady,
- vysoká funkčnost.

Druhá skupina požadavků se týká vývoje výroby z hlediska slévače a výroby odlitků (dosažení požadovaných materiálových vlastností, rozměrová a tvarová přesnost, povrchová kvalita, vnitřní homogenita odlitku).

Z celkového objemu součástí požadovaných dnes v kovo zpracujícím průmyslu připadá na odlitky asi 25 %. Současný export odlitků z ČR na západní trhy představuje asi 63 % železných a 82 % neželezných slitin (z celkového počtu 473, 3 tisíc vyráběných tun v roce 2001). Slévárny, které exportují odlitky dnes musí složitě implementovat neustále se rozšiřující požadavky na kvalitu odlitků a management kvality, klesající cenu a náklady, rostoucí produktivitu a stále kratší čas pro dodání odlitků. Konkurenční schopnost slévárny získaná v prostředí pouze vnitřního trhu ČR nestačí prakticky ani teoreticky na úspěch v obchodování globálním. Potřeby konkurenceschopnosti na globálním je nezbytné více než kdy dříve pro ty, kteří chtějí ve světě něco znamenat. Otázkou je zkušenost, zda se vůbec chceme dostat na úroveň většiny zemí EU.

Kdo dnes při řízení uplatňuje ISO normy ve své organizaci, uplatňuje také sumu principů řízení jakosti vzniklých a osvědčených v průběhu celého 20 století. Slévárny, které chtějí být špičkové a konkurenceschopné, vytváří nové přístupy v managementu kvality tahem. Jsem přesvědčen o tom, že řada našich sléváren (a nejen sléváren) implementují management kvality pod tlakem, bez reálné vazby na globální trh. U většiny sléváren (možná na rozdíl od jiných podniků) není zaměření na měkký vnitřní trh tak rozhodující (vzhledem k vysokému procentu exportu odlitků do západních zemí), i když i tam systémy jakosti fungují pouze na 10–20% kvality produktů, a to někdy velmi formálně.

Pro zlepšení kvality odlitků a rozšíření konkurenceschopnosti existuje celá řada nástrojů, které slévárnám umožní proniknutí na zahraniční trhy.

O některých aspektech použití těchto nástrojů především u litinových odlitků se zmíním ve své přednášce.

2 POUŽITÍ EXPERTNÍCH SYSTÉMŮ

Užitná hodnota odlitku je dána konstrukčním návrhem, zvoleným materiálem a technologií výroby. Jakostí odlitku z hlediska slévárenského se rozumí zejména dosažení požadované rozměrové a tvarové přesnosti, povrchové jakosti a vnitřní homogenity odlitku. Dosažení těchto parametrů je závislé na tvarovém řešení odlitku způsobem korespondujícím jak s obecnými zásadami pro konstrukci odlitků, tak se speciálními nároky vyplývajícími z použitých výrobních technologií. Z hlediska výrobního je žádoucí, aby konstrukční návrh lité součásti respektoval slévárenské požadavky a integroval je do výrobku i z hlediska funkčního. Tímto způsobem se omezí úpravy tvaru odlitku navrhované slévárnou z technologického důvodu, které prodražují jak samotnou slévárenskou výrobu, tak i následné opracování. Konstrukční návrh odlitku, který nerespektuje slévárenské technologické požadavky, implikuje vznik vad a snižuje užitnou hodnotu odlitků. V současném tržním prostředí je proto velmi důležitá komunikace mezi konstruktéry a slévárenskými technologiemi. Cílem je, aby součástka, zde odlitek, byla konstruována takovým způsobem a s takovými nároky na jakost, které jsou adekvátní použité technologii. Každá slévárenská technologie je charakterizována určitými dosažitelnými kvalitativními parametry, jako je rozměrová a tvarová přesnost, jakost povrchu, tvarová složitost apod. Současně má každá technologie speciální požadavky na konstrukci odlitku. Jde např. o dosažitelné tloušťky stěn, velikost předlévaných otvorů, velikost úkosů apod. Z hlediska technologického i ekonomického je ideální, když konstrukční návrh respekтуje požadavky technologie a vhodně je využívá.

Takový postup předpokládá, že konstruktér má k dispozici příslušné požadavky systematicky zpracované. Pro realizaci tohoto požadavku lze využít, pokud jde o výrobu odlitků, informačního systému „slévárenská technologie“, který byl v rámci výzkumného projektu Volkswagenovy nadace vytvořen pracovníky Technické univerzity Magdeburg ve spolupráci s odborem slévárenství ÚMI, VUT-FS, Brno. [1], [2]

Problematika expertních systémů představuje jedno z nejstarších, a tedy i nejpropracovanějších odvětví umělé inteligence. Z toho důvodu dnes existuje nejen jedna řada aplikací, ale také poměrně přesné vymezení pojmu expertní systém a stanovení jeho vlastností [3]. Zjednodušeně platí, že expertní systémy jsou univerzálně použitelné programy:

umožňující uživateli uložit množství dat různé podstaty a jsou v těchto datech schopny nacházet souvislosti, které buď nelze matematicky vyjádřit vůbec nebo jen velmi přibližně. Informace do systému ukládají odborníci a to způsobem, který je ve shodě s dosud používanými „nepočítačovými“ postupy, a neměl by jim tedy způsobovat žádné problémy

správně reagující i na situace, se kterými se dosud nesetkali, to znamená, že jsou schopny v rozsahu odborníky vložených hodnot předpovědět (většinou interpolovat) pravděpodobné řešení, možný výsledek, další postup apod.

Rozpoznávací systémy, využívané pro poradenské, diagnostické a obecně analytické úlohy většinou nesplňují všechny požadavky, formálně na expertní systémy kladené. [4] Pro odlišení obou typů systémů označujeme modifikované klasifikátory, použité pro tyto účely jako systémy znalostní. Výhoda úloh typu znalostní systém je v tom, že není nutno dosáhnout extrémně vysoké přesnosti a rychlosti klasifikace, také nabídka alternativních výsledků (nejistot) je zde žádoucí, stejně jako možnost sledování vlivu změn vstupních parametrů (prohlášení) na výslednou odpověď. Program Win-Ex je koncipován jako prázdný vývojový znalostní systém, sloužící k ověření realizační vhodnosti problému. [5]

Použitím expertního systému pro optimalizaci konstrukce odlitků je možné konstruktérovi ještě účinněji poskytnout systematicky zpracované technologické odborné znalosti, které mu pomohou najít variantu konstrukce součásti odpovídající požadavkům na její výrobu a funkci. Jako příklad může sloužit použití expertního systému Win-Ex při hodnocení technologičnosti konstrukce odlitků odlévaných technologií přesného lití pomocí vytavitelného modelu. [6], [7] Expertní systém Win-Ex vyvinutý v Ústavu materiálového inženýrství, odboru slévárenství v Brně využívá modifikovaného algoritmu zpětného šíření aplikovaného na jednoduchou neuronovou síť. Je distribuován jako prázdný s tím, že vytvoření vlastníchází je jednoduché a kromě vhodné charakteristiky neklade na uživatele žádné programátorské ani matematické nároky. Vzhledem k použitému operačnímu systému MS WINDOWS může uživatel bez omezení pracovat i v době vytváření expertní báze znalostí.

Program pro hodnocení technologičnosti konstrukce přesně litých ocelových odlitků pracuje jako aplikace expertního systému Win-Ex pod operačním systémem MS WINDOWS. Program byl vytvořen segmentováním úlohy na posuzování jednotlivých charakteristických znaků odlitků, jako jsou:

- hmotnost odlitků
- maximální rozměr
- drsnost povrchu
- tolerance rozměrů
- průměry předlévaných a slepých otvorů
- šířky předlévaných otevřených a uzavřených drážek
- tloušťky stěn

Pro zadání posuzovaných údajů (může jich být několik desítek) je spuštěn výpočet, během kterého je prováděna klasifikace zadaných hodnot adaptovanými expertními systémy, jichž je užíváno celkem 48. Používaných 48 expertních systémů bylo adaptováno pomocí údajů, které byly shromážděny z technických dodacích předpisů, podnikových norem a publikací o přesném lití. Vytvořený program představuje značné zjednodušení a urychlení konstrukčních

dat, jeho obsluha uživatelem je velmi jednoduchá. Vzhledem k tomu, že lze vkládat i jednotlivé údaje, může konstruktér dostávat velmi rychle informace v průběhu konstrukční práce a korigovat tak své představy.

Z provedené prověrky vyplývá, že systém je velmi dobře použitelný pro posuzování vhodnosti konstrukce odlitku pro určenou technologii výroby. Je použitelný jak pro konstruktéra, tak i technologa slévárny. V rámci prací prováděných na odboru byly řešeny některé problémy a publikovány v příspěvcích na národní i mezinárodní úrovni. Dosud vytvořené nebo vyvíjené aplikace se zabývají např.:

- klasifikací vad odlitků na základě jejich vnějších znaků [9, 11],
- řízením složení formovací směsi [8, 9, 10, 11],
- hledáním nejvýhodnější výrobní technologie vzhledem k souboru požadavků na odlitek [7],
- predikcí mechanických vlastností [8, 9, 10, 12],
- kalkulací výrobních nákladů a cen odlitků [13, 14, 15, 16],
- odhadem vývoje kurzu akcií,
- predikcí obratu skladových zásob.

Použití adaptivních systémů při řízení výroby a podpoře rozhodování ve slévárenství představuje alternativní metodu použitelnou pro široký okruh problémů, které přinejmenším úspěšně konkuruje doposud používaným metodám empirickým, analytickým nebo statistickým.

3 POUŽITÍ SIMULAČNÍCH PROGRAMŮ PRO ZVÝŠENÍ KONKURENCESCHOPNOSTI ODLITKŮ

V současném tržním prostředí je velmi důležitá komunikace mezi konstruktéry a slévárenskými technologiemi. Cílem je, aby odlitek byl konstruován takovým způsobem a s takovými nároky na kvalitu, které jsou adekvátní použité technologii a naopak, aby použitá technologie využila všech svých předností pro splnění optima kvality, ceny i dodacích lhůt.

Každá slévárenská technologie je charakterizována určitými dosažitelnými kvalitativními parametry, jako jsou rozměrová a tvarová přesnost, kvalita povrchu, tvarová složitost apod. Současně má každá technologie speciální požadavky na konstrukci odlitku. Jde např. o dosažitelné nejmenší tloušťky stěn, velikost předlévaných otvorů, velikost úkosů apod. Z hlediska technologického i ekonomického je ideální, když konstrukční návrh respektuje požadavky technologie a vhodně je využívá.

Aby výrobce v současném průmyslově vyspělém světě zajistil konkurenceschopnost svých výrobků, je nutné uplatnit racionalizační opatření, jejichž cílem je zejména :

- zlepšení kvality výrobků
- zkrácení doby vývoje nových výrobků a dodací termíny

- snížení výrobních nákladů

Z hlediska urychlení nové součástky a její zavedení do výroby připadá konstruktérovi velmi podstatná role. Vývoj součásti musí respektovat jednak funkční požadavky, což je hledisko v našich podmínkách obvykle preferované, ale i požadavky zvolených výrobních technologií a kvalifikované volby materiálu, u nás často doposud podceňované (nižší podíl litiny s kuličkovým grafitem).

Je předpoklad, že konstruktér má k dispozici příslušné požadavky systematicky zpracované. K tomu je možné využít informačního systému „slévárenská technologie“, který byl v rámci mezinárodního výzkumného projektu [2] dále prohlouben a doplněn o zkušenosti českých slévárenských odborníků [6]. Konstruktér dostane počítačově zpracované informace pro pracovní kroky :

- volba materiálu,
- stanovení účelného formovacího a licího postupu,
- návrh rozměrů a tvaru odlitku,

které se opírají o průběh práce při konstrukci jednotlivých součástí nebo konstrukčních skupin. Potřebné informace, které se konstruktérovi poskytují podle toho, co potřebuje vědět, jsou založeny na rozsáhlých rešerších v příslušné národní a mezinárodní odborné literatuře včetně dostupných norem a směrnic a na základě analýz v německých a českých slévárnách prováděných pracovníky ÚMI FSI, Brno. Využitím tohoto informačního systému se zbaví časově náročných rutinních prací omezujících jeho kreativitu. Může to přispět ke zkrácení doby potřebné pro vývoj výrobku a tím k jeho rychlejší dostupnosti.

Při dosavadním klasickém systému zakázkového řízení přípravy a zavádění výroby nového odlitku byla nezbytná účast celé řady odborníků (konstruktérů, metalurgů, technologů, normovačů a cenařů), kteří velmi často zcela izolovaně zpracovávali své dílčí agendy, následně projednávali své vzájemné připomínky a čas zpracování zakázky klidně plynul. Za významný pokrok bylo možno označit stav, kdy docházelo již k přímým koordinačním poradám a řešením, včetně významné účasti konstruktéra a specialistů objednatele i výrobce odlitků - šlo o aktivní spolupráci konstruktéra, technologa a metalurga. Dnešní nároky na pružné a rychlé zavedení výroby nového odlitku, anebo vývoj nového odlitku či řešení závažných výrobních problémů vyžaduje :

- a) možnost rychlé a operativní komunikace všech zúčastněných partnerů, např. rozšířením účinnosti stávající počítačové techniky o multimediální systémy, které umožní přímou videokonferenci a konkrétní bezprostřední práci s výkresy, daty, obrázky, diagramy dle zásady „obrázek řekne více než tisíc slov“ a diskuse se uskuteční z „očí do očí“.
- b) počítačovou simulaci, která umožní i variantní návrh forem, vtokových soustav, sledování poměrů při plnění forem, při tuhnutí a chladnutí odlitků a tím sledování podmínek pro vytváření struktury a vlastností odlitků, včetně vzniku vad a zbytkových pnutí.

c) výpočet navazujících technicko–ekonomických parametrů výroby pro stanovení výrobních nákladů a ceny odlitků, a dále simulaci či výpočet kapacitních parametrů dílčích operací a úkolů pro termínování a plánování výrobních kapacit

Výrazným záměrem je již od počátku konstrukčního řešení následné prolínání jednotlivých stupňů nebo etap přípravy výroby či realizace prototypu až po zavedení sériové výroby a to s cílem maximálně zkrátit celkový čas realizace - jsou to zásady systému Simultaneous Engineering.

Při použití simulačních programů k popisu procesu lití je základním požadavkem optimalizace procesu. Během posledních let byla vypracována řada programů se záměrem, aby byly jako nástroj začleněny do průběhu práce ve slévárně .

Bylo to urychleno zvláště díky vývoji těchto parametrů:

- výrazně se zvýšila jakost modelů a programů pro výpočet parametrů procesu lití,
- zvětšila se rychlost a kapacita paměti dostupných počítačů, takže můžeme provádět složitější výpočty v přijatelných časových úsecích,
- zlepšování metod optimalizace.

Z pohledu slévárenských pracovníků je rozhodujícím technickým jádrem celého nového pojetí slévárenské přípravy výroby počítačová simulace metalurgických a technologických procesů, protože od jejich přesnějšího a rychlejšího stanovení se dále odvíjí též přesnější a rychlejší stanovení parametrů ekonomických, kapacitních i organizačních a významně se zkracují rozhodovací a pracovní procesy při přípravě výroby. Oblast řešení technologických a metalurgických procesů je z hlediska exaktního řešení nejobtížnější a stále se v mnoha směrech ještě uchovává více pověst oboru s nezbytným uplatňováním ryze praktických lidských zkušeností, intuice a citu pro posouzení vzájemného působení konkrétního materiálu, hmoty a teploty odlitku v časovém sledu odlévání, tuhnutí a chladnutí.

Možnosti využít simulační programy mění slévárenství nejen vnitřně, ale také navenek z hlediska vnímání oboru ostatní strojírenskou či technickou veřejností. Simulace tuhnutí, která byla v oboru výroby odlitků propracována jako první, patří dnes k nejdokonalejším strojírenským nástrojům. Umožňuje slévárnám nabídnout odlitky, které se vyrábějí dokonaleji, s požadovanou strukturou a vlastnostmi. Ze zahraničních zkušeností víme, že zákazník je při nabídce struktur a vlastností často překvapen a že tedy slévárenský specialista se dostává do polohy žádaného poradce pro optimalizaci konstrukce, definici výsledné kvality odlitku a způsobu jejího ověřování. Slévárny tu získávají možnost doporučit výrobu odlitků lepších vlastností s lepšími funkčními vlastnostmi a spolehlivostí pro zákazníka.

Simulační programy se dnes orientují zejména na řešení těchto hlavních skupin problémů :

- plnění forem
- tuhnutí a chladnutí odlitku (ve formě i po vyjmutí z formy)
- vznik struktury a utváření vlastností odlitku
- vznik zbytkových pnutí a deformací

Kvalita simulačních programů, jejich vypovídající hodnoty a míra shody výsledků simulace s realitou jsou dány zejména tím, jak umí :

- dobře a jednoduše vystihnout matematický popis dílčích dějů,
- zahrnout odchylky chování a stavu odlévaného materiálu od ideálního předpokladu jednofázového stavu taveniny (nenewtonské, anebo teplotní závislost postupného uvolňování latentního tepla při tuhnutí slitin)
- definovat a numericky vyjádřit fyzikální a mechanické vlastnosti forem i odlévaného materiálu v závislosti na teplotě v celé potřebné šíři teplotního intervalu.

3.1 Optimalizace režimu chladnutí litinových odlitků

Mimořádný význam lze v této souvislosti přisoudit i simulaci chladnutí odlitků - jmenovitě odlitků z litin - protože režim jejich chladnutí výrazně ovlivňuje jejich kovovou matici a tím i vlastnosti odlitku. Přestože řada sléváren ve své denní praxi při výrobě odlitků často okolnost řízeného chladnutí odlitků pomíjí, hraje režim chladnutí uvolněných odlitků rozhodující úlohu při vzniku zbytkových pnutí a při utváření matrice.

Výhoda řízeného ochlazování odlitků - jmenovitě pro automobilový průmysl - je nesporná a její důsledné uplatnění vede nejen k odstranění žíhání na odstranění pnutí i u složitých odlitků, ale často i k lepším materiálovým vlastnostem. Simulace chladnutí umožňuje stanovení režimu uvolňování odlitků již během zakázkového řízení a tím umožňuje s dostatečným předstihem plánovat i organizaci vlastní výroby.

Podle zprávy mezinárodní komise CIATF (7.1. a 7.4.) z roku 1993 se žíhání odlitků ze šedých litin, v celosvětovém měřítku na odstranění zbytkového pnutí, provádí v současné době asi u 30% vyráběných odlitků. Toto představuje velké energetické a časové nároky. Požadavky odběratelů se velmi často různí i u tvarově podobných odlitků.

Např. u odlitků stojanů, loží s vodíci plochami je často přísně požadováno žíhání s dokladem o jeho průběhu jako součást atestu, často však není nutné žíhat.

V odborných kruzích se stále častěji diskutuje otázka, zda drobné a střední litinové odlitky o hmotnosti několika kg do cca 500 až 1 000 kg vyráběné v moderních podmínkách velkosériové a hromadné výroby žíhat či nežíhat na odstranění zbytkových pnutí. Za touto na první pohled akademickou otázkou se skrývá celá řada problémů obecně technických, výrobně–organizačních a v neposlední řadě ekonomických [17, 18, 19, 20].

Metalurgové a technologové mnoha sléváren s velkosériovou a hromadnou výrobou litinových odlitků na automatických formovacích linkách - při plném respektování požadavků na výslednou kvalitu odlitků - mají současně zájem na dosažení vysoké produktivity práce, vysokého využití výrobních kapacit formovacích linek při minimálních nákladech, zejména též minimálních požadavcích na výrobní a skladovací plochy, dopravní prostředky, příp. pořizování nových výrobních zařízení a objektů. Velmi důležitou roli ve většině případů sehraává objektivní stanovení významného výrobního parametru - doby setrvání ztuhlého odlitku ve formě až do okamžiku jeho vyjmutí z formy. Je známo, že předčasné vyjmutí odlitku z formy zhoršuje kvalitu odlitku, zvyšuje značně vznik pnutí, které může vést i ke vzniku prasklin nebo deformaci odlitku. Naopak zbytečně dlouhým setrváním odlitku ve formě se prodlužuje výrobní cyklus, snižuje produktivita formovacích linek a u litinových odlitků - dochází též často k poklesu kvality odlitků. Markantně se vždy projevovaly metalurgické i ekonomické důsledky při výrobě těžších a rozměrných odlitků ocelových a litinových, méně už u drobných a středních odlitků ocelových, které se zpravidla zásadně žihají a dochází tak ke snížení pnutí i homogenizaci a úpravě struktury. U litinových odlitků drobných a středních byl obvykle menší zájem o souhrnné řešení, k žihání odlitků docházelo pouze ve zvlášť předeepsaných případech - např. u některých automobilových odlitků - a kvalita běžných odlitků z litin z nižších pevnostních tříd se neposuzovala tak přísně. V některých případech bylo však zaváděno nápravné žihání buď ke snížení tvrdosti a současně odstranění zatvrdlých míst, či naopak ke zvýšení tvrdosti.

Konstrukteři odlitků, slévárenští metalurgové a technologové mají prvořadý zájem na minimalizaci zbytkových pnutí, protože chtějí získat odlitek funkčně spolehlivý a rozměrově stabilní i při dlouhodobém provozu při jeho maximálním zatěžování. Výrobci odlitků v tržním prostředí - při plném respektování požadavků na výslednou kvalitu odlitků - mají však také zájem na dosažení vysoké produktivity práce, vysokého využití výrobních kapacit formovacích linek při minimálních nákladech na mzdy, energie, výrobní a skladovací plochy, dopravní prostředky a na pořizování nových výrobních zařízení. Velmi aktuální je proto propracování technicky spolehlivých a při tom ekonomických způsobů výroby odlitků s nízkými hodnotami zbytkových pnutí zejména při hromadné výrobě odlitků pro automobily, traktory, zemědělské stroje, menší železniční a lodní motory, kompresory, textilní stroje, elektrické motory, nářadí, zařízení a další obory.

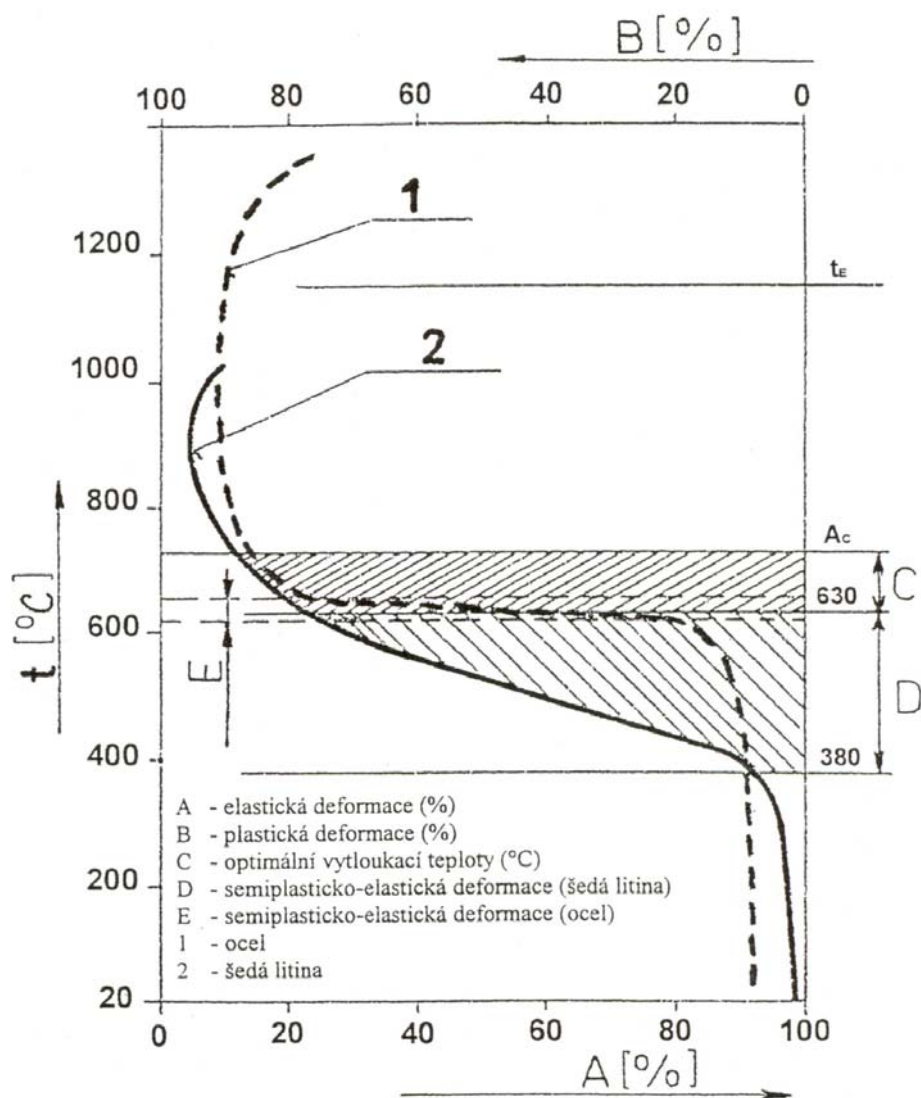
Z vlastní zkušenosti pracovníků slévárenské výroby i vývoje víme, že z hlediska výrobce odlitků by bylo žádoucí nákladnou operaci „žihání na odstranění pnutí“ pokud možno zrušit, musíme však vyřešit způsob, jak vyrábět odlitky s minimálním zbytkovým pnutím bez rizika snížení jejich výsledné kvality. Takové řešení dosud naráželo na velmi malé množství informací o vzniku a významnosti pnutí, o zajišťování úrovně a rozložení zbytkových pnutí v litinových odlitcích.

U složitých odlitků typu bloků a hlav válců spalovacích motorů nebo kompresorů, kde se vyžaduje vysoká mechanická pevnost litiny v tahu (250 až 350 MPa), rozměrová stálost, odolnost proti tepelným změnám a rázům apod., lze náročné požadavky splnit pouze za předpokladu, že hodnoty zbytkového pnutí budou minimální a vyloučí se tak možnost případného porušení odlitku nežádoucí superpozicí provozních napětí a zbytkových pnutí. Hodnoty zbytkových pnutí závisí jak na vlastnostech materiálu odlitku a materiálu formy a jader, tak i na konstrukci odlitku. Známá pravidla, která požadují dosažení maximálního stupně isothermičnosti konstrukce odlitku volbou rovnoměrného rozložení tlouštěk stěn, minimalizací koncentrace hmot v tepelných uzlech a vytváření plynulých přechodů, mají za cíl nejen vznik minimálních strukturních rozdílů, ale současně i vznik minimálních hodnot zbytkového pnutí. Ke stejnému cíli - maximálními zrovnomení teplotního pole odlitku během tuhnutí a chladnutí - směřuje i řada známých technologických i metalurgických opatření. Obecně je snaha přiblížit se vytvořením konstrukčních a výrobních podmínek ideálnímu stavu vysokého stupně isothermičnosti odlitku jako předpokladu výroby odlitků s minimálními hodnotami zbytkových pnutí bez dalšího tepelného zpracování.

Zbytková pnutí vznikají v těch případech, kdy během výroby odlitku nebo jeho tepelného zpracování se vytvoří taková nehomogenita teplotního pole odlitku, která vyvolá v některé části odlitku plastickou deformaci. Právě u šedé litiny jsou v tomto směru poměry značně nepříznivé, protože šedá litina - na rozdíl od oceli - má jednak poměrně značně širokou přechodovou teplotní oblast tzv. semiplasticko-elastických deformací - 630 až 380°C (obr.č.1) a jednak i velmi malou houževnatost. při přechodu přes oblast změny charakteru deformace ubývá s klesající teplotou a tím i podílem plastické deformace rychlost a schopnost relaxace a současně se zvyšuje i přetvárný odpor. Výsledkem celého sledu dílčích smršťovacích dějů je pak situace, kdy v tenkých částech odlitku nacházíme pnutí tlaková, v tlustých částech a v blízkosti tepelných os stěn nebezpečné pnutí tahová.

Při tepelném zpracování litinových odlitků umíme volbou a regulací rychlosti chladnutí a homogenitou teplotního pole pece pro tepelné zpracování vzniku větších hodnot zbytkového pnutí zpravidla zabránit, resp. vhodným režimem ochlazování umíme hodnoty zbytkových pnutí snižovat.

Dosud prakticky nejčastějším způsobem snižování zbytkových pnutí u drobných a středních litinových odlitků je žíhání na odstranění pnutí, při němž se vychladlé litinové odlitky znovu ohřívají v žíhacích pecích na teploty 550 až 600°C, poblíž horní hranice oblasti semiplasticko-elastických deformací, udržují se na žíhací teplotě až do celkového vyrovnání teplot a pak se nechají pomalu chladnout v peci, zpravidla nejméně do teplot 400 až 350°C, častěji až do teploty kolem 200°C podle rozměrů, tvarové složitosti a materiálu odlitku.



Obr. č. 1: Závislost elastické (plastické) deformace

Nejvyšší účinnosti snižování zbytkových pnutí se dosahuje žháním ohrubovaných odlitků. Nevýhody tohoto způsobu jsou obecně známé - zdoluhavost operace, manipulační problémy mezi slévárnou a strojárnou při hrubování a poměrně značná citlivost výsledného snížení zbytkových pnutí na dosažené teplotě a době žhání. Pro intenzifikaci operace žhání zkrácením žhacího cyklu je možné zvýšit žhací teploty až těsně k horní hranici 600°C, ale pouze za předpokladu, že je k dispozici moderní - nejlépe průběžná - pec s velmi přesnou a spolehlivou regulací teploty a celého režimu žhání s cílem vytvořit homogenní teplotní pole odlitku i pece. Při překročení žhací teploty 600°C vzniká nebezpečí nežádoucího výrazného snížení pevnosti i tvrdosti odlitků.

Otázku „žhát či nežhát“ zajímala řadu let naše i zahraniční odborníky s řešením problematiky provozní spolehlivosti a životnosti litinových odlitků pro automobily a traktory a současně i v souvislosti s nezbytností řešit režim chladnutí a vytloukání odlitků po zavedení automatických linek do provozu. Již

první vlastní provozní zkušenosti ukázaly, že není správné uvolňovat odlitky z forem při libovolné teplotě a v libovolném čase po odlití a že ke stanovení optimálních podmínek uvolňování odlitků z forem nestačí často používaná hrubá empirická pravidla (viz použité nomogramy). Odlitky uvolněné při různých teplotách odpovídajících oblastem s různým charakterem deformací (plastické, semiplasticko-elastické) se značně odlišovaly nejen úrovní zbytkových pnutí ale i strukturálně. Na základě těchto neuspokojivých výsledků jsme se rozhodli pro komplexní průzkum jak zákonitostí chladnutí odlitků ve formách tak i pro průzkum výsledných hodnot zbytkových pnutí a mechanických vlastností odlitků v závislosti na reálných podmínkách ochlazování a uvolňování z forem. Ke zkouškám byly použity drobné a jednoduché odlitky a zejména složité odlitky bloků a hlav válců pro osobní a nákladní automobily a traktory.

Pro určování úrovně zbytkových pnutí jsem použil pro odlitky ze šedé litiny tzv. upravenou metodu otvoru (Rendler-Vignesova), podle prací [21–25], která při výpočtu používá konstanty získané experimentálně (cejchováním na tyčích z téhož materiálu jako měřený odlitek). Konstanty podle upravené metody otvoru zahrnují věrně skutečné poměry při měření, dávají přesnější výsledky hodnot pnutí a je možno je využít pro poměrně široký rozsah modulu pružnosti šedých litin v mezích 100 000 až 140 000 MPa. Výhodou této metody je nesporně to, že se jedná o metodu polodestruktivní, odlitek během měření není zničen, je snadno opravitelný a použitelný pro provoz. Velikost ani tvar odlitku nehrají žádnou roli.

Při výpočtu zbytkových pnutí na základě naměřených místních deformací kolem vyvrtaného otvoru je velmi důležitá otázka stanovení, resp. měření, hodnot modulu pružnosti v tahu E . Pro naše výpočty pnutí v odlitcích ze šedé litiny byly hodnoty E stanovovány měřením ultrazvukem, tj. hodnota E_0 jako směrnice tečny tahové charakteristiky v počátku při nulovém zatížení [26, 27, 28].

Rozborem deformační tahové charakteristiky šedé litiny zjistíme, že s rostoucím zatěžováním hodnota modulu pružnosti postupně klesá od E_0 na hodnotu E_1 (směrnice sečny při dosažení napětí σ_1 , fyzikálně analogického mezi kluzu u ocelí), načež během dalšího zvyšování napětí hodnota modulu pružnosti rychle klesá na hodnoty přibližně 100krát menší než počáteční E_0 . Tyto poměry omezují plnou použitelnost upravené metody otvoru u litin na oblast mikroplastických deformací (do σ_1) a počátek oblasti makroplastických deformací. Pouze pokud vypočtená hodnota zbytkového pnutí nepřekročí cca 50 až 60% hodnoty pevnosti litiny v tahu v měřeném místě, lze takovou hodnotu považovat za fyzikálně podloženou a prakticky reálnou pro posuzování stavu napjatosti v měřeném místě.

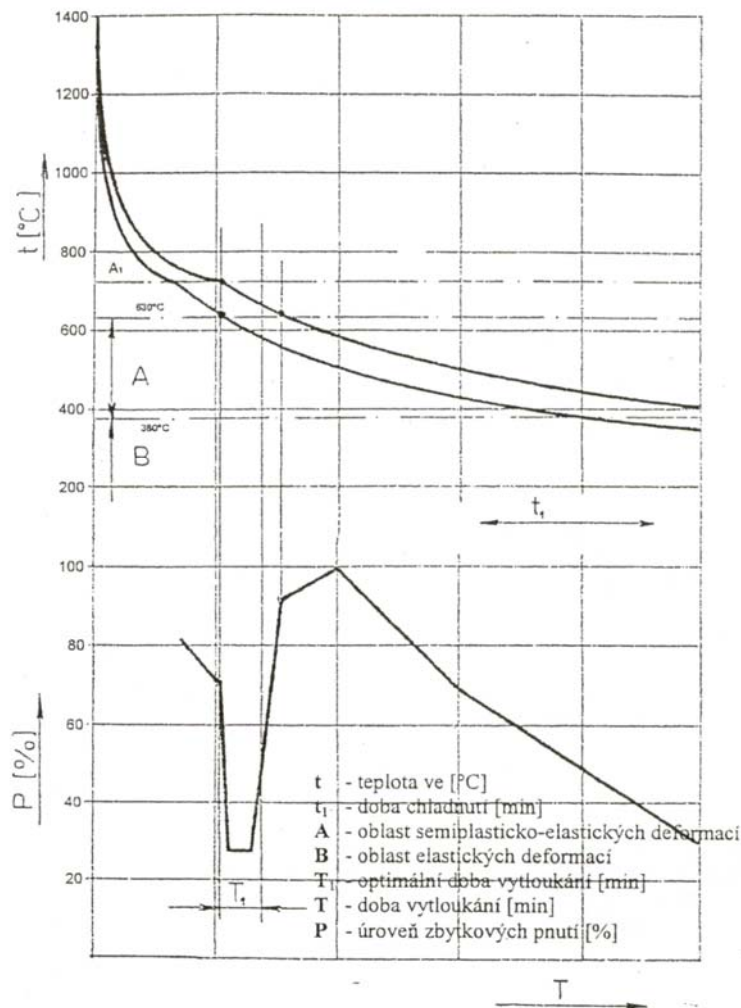
Další důležitou zkušební metodou je měření teplotního režimu tuhnutí a chladnutí odlitku pomocí termočlánků zabudovaných do formy k získání reálné představy o změnách teplotního pole odlitku a zejména o stupni jeho isotermičnosti při teplotách přechodu přes teploty překrytí $\gamma \rightarrow \alpha$ a při teplotách změn charakteru deformací plastických na semiplasticko-elastické.

Výsledky vlastních měření na celé řadě odlitků různé složitosti a různé hmotnosti ukázaly, že klíčem k exaktnímu řešení problému je konfrontace výsledků přímého měření zbytkových pnutí a přímého měření změn teplotního pole v závislosti na době od ztuhnutí odlitku ve formě.

Při cílevědomém hledání optimálního režimu ochlazování odlitku k minimalizaci zbytkových pnutí jsme došli na základě vlastních měření k závěru, že při určitém stupni isothermičnosti konstrukce a výrobních podmínek odlitků lze s výhodou vyžít k uvolňování odlitků z forem zejména oblast plastických deformací v okolí eutektoidní přeměny. Podstata takového způsobu výroby litinových odlitků s nízkými hodnotami zbytkových pnutí spočívá v tom, že odlitek se po odlití ochlazuje ve formě až do takové doby, kdy v odlitku ještě probíhá nebo byla dokončena eutektoidní přeměna u rozhodujících nejpomaleji chladnoucích průřezů a přitom teplota rozhodujících nejrychleji chladnoucích průřezů neklesla významněji pod nejnižší teplotu, při níž se materiál odlitku deformuje ještě převážně plasticky (kolem 600°C), načež se odlitek uvolní z formy a jader a nechá ochlazovat rovnoměrně vzduchem průměrnou rychlostí 30 až 100°C za hodinu až na teplotu kolem cca 300°C - viz schéma na obr. č.2, [26, 29, 30]. Za rozhodující průřezy nejpomaleji a nejrychleji chladnoucí se považují u konkrétního odlitku jen ty dvojice průřezů, které by svým výrazně rozdílným režimem chladnutí ve formě a značnými teplotními rozdíly mohly přímo vyvolávat v odlitku napjatost a stát se tak zdrojem vzniku zbytkových pnutí. U těžších odlitků s většími rozdíly rozhodujících průřezů (vzhledem k zbytkovému pnutí) je potřeba ochlazovat řízeně v průběžné peci k dosažení tepelné homogenizace. Způsob přímé výroby odlitků ze šedé litiny s minimálními hodnotami zbytkových pnutí dle námi vypracované metody nelze aplikovat zcela univerzálně, naopak jen v případě takových odlitků, u kterých je konstrukčním uspořádáním, metalurgicky nebo technologicky splněna podmínka, že k okamžiku uvolňování odlitku z formy a jader se budou teploty rozhodujících průřezů pohybovat v rozmezí teplot 600 až 730°C, tj. s maximálním rozdílem 100 až 130°C .

Tímto způsobem se docílí značného vyrovnání teplot v odlitku využitím přirozeného průběhu chladnutí v okolí teplot eutektoidní přeměny již v průběhu ochlazování, případná pnutí vyvolaná význačnými teplotními rozdíly různých míst odlitku se při teplotách mezi eutektoidní přeměnou a spodní hranicí existence plastických deformací ještě poměrně snadno vyrovnají plastickou deformací, a tím se dosáhne výrazného snížení zbytkových pnutí po ochlazení odlitku až na normální teplotu. Navíc se dosáhne zpravidla u odlitků ze šedé litiny zlepšení strukturálních poměrů v odlitku zvýšením podílu perlitu v základní kovové hmotě, a tím i zvýšení pevnosti a částečně tvrdosti zejména v tlustších průřezech odlitku. Odpadá nutnost dalšího následného žíhání na odstranění pnutí nebo využití jiných zvláštních dochlazovacích zařízení. Souvislost mezi způsobem chladnutí a uvolňování z forem a dosahovaným minimem zbytkovým pnutí takto zpracovaných odlitků má obecnou platnost a využití přináší všechny vyznačené výhody a vyšší účinky při přísném dodržení teplotního a časového režimu uvolňování odlitků z forem.

Vzhledem k tomu, že pásmo teplot a času pro uvolňování odlitků je poměrně úzké, musí být pro každý konkrétní případ odlitku a technologie stanoveno a ověřeno nejvýhodněji alespoň proměřením teplotního pole odlitku a jeho změn. Podle našich zkušeností z přípravy podmínek pro velkosériovou a hromadnou výrobu doporučujeme u složitějších odlitků vždy úzkou spolupráci slévárny s konstruktérem při volbě dostatečného a reprezentativního souboru míst pro paralelní měření režimu chladnutí a úrovně zbytkových pnutí k důkladnému „zmapování“ odlitku z hlediska pnutí.



Obr. 2: Závislost doby vytloukání na úrovni zbytkových pnutí

Na základě výsledku těchto měření lze teprve definitivně rozhodnout buď o aplikaci optimálního režimu uvolňování z forem, anebo též o případné úpravě konstrukce či technologie takovým způsobem, aby aplikace optimálního režimu bylo možná bez snížení požadavků na výsledné funkce vlastnosti odlitku.

3.2 Simulace v porovnání s experimentem

Problematice stanovení optimální doby vytloukání s cílem dosažení minima zbytkových pnutí v řadě sléváren ČR (ŠKODA AUTO a. s. Mladá Boleslav, LIAZ Liberec, ČKD Hradec Králové, SIGMA Hodonín, TOS Hostivař [31–34]). Řada výsledků byla publikována jak na národních, tak i mezinárodních konferencích, uvádím jen některé vybrané. [35, 36] Problematika byla také shrnuta v habilitační práci. [37]

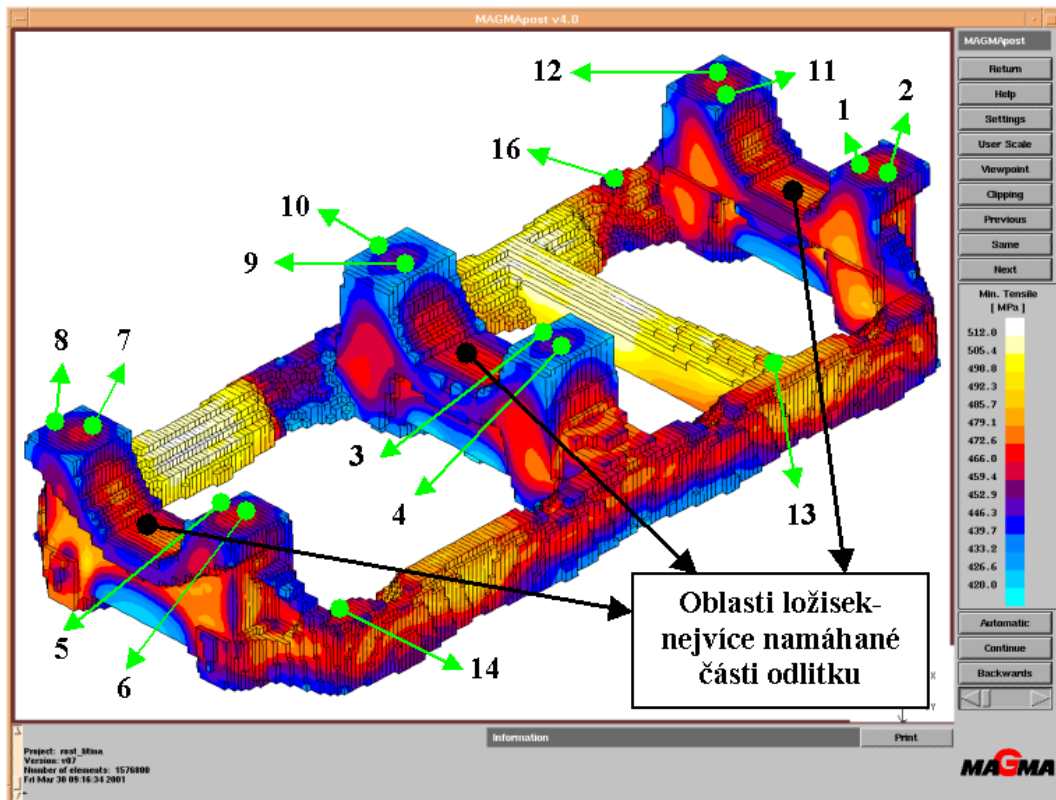
Brzdové bubny z vermikulární litiny - úpravou režimu chladnutí ve formách a po vyjmutí z forem bez následného žíhání. Úspory se pohybují v cenové hladině 10 mil. Kč (1995).

Ukazuje se, že použití simulačních programů v kombinaci s experimentálním měřením teplotního i napěťového pole lze využít při nabídkovém řízení, při náběhu výroby nového výrobku (odlitku), případně při přípravě nulté série a rozhodnout o tom, jak zvolit takt linky chladnutí odlitků s cílem minimalizovat zbytkové pnutí.

3.3 Predikce mechanických a strukturních vlastností u litinových odlitků

3.3.1 Predikce mechanických vlastností v porovnání s experimentem

Na vzorcích a na odlitcích z litiny (litina s kuličkovým grafitem, litina s lupínkovým grafitem, vermikulární litina) byla provedena detailní analýza závislosti podélných ultrazvukových vln $v_L = f(R_m, R_{p0,2}, A, HB, \text{struktura})$ na tloušťce stěny (rychlosti chladnutí). Výsledky byly porovnány se simulací (MAGMA, SIMTEC) a byly publikovány u nás i v zahraničí. [37–49] Ukazuje, že existuje závislost $v_L = f(R_m)$, která je z hlediska přesnosti srovnatelná se simulací a využitelná pro praxi. Např. pro optimalizaci lití odlitku víka ložisek bloku válců z vermikulární litiny – Škoda Auto a.s. (obr. č. 3) byla provedena počítačová simulace lití pomocí programu MAGMASOFT. [48] Pro predikci mechanických vlastností byla zvolena ultrazvuková metoda – měření rychlosti podélných ultrazvukových vln $v_L = f(R_m)$. Detailní výsledky měření u obou odlitků (litý a žíhaný stav) jsou uvedeny v tab. č. 1.



Obr. 3. Minimální pevnost v tahu R_m v odlitku víka ložiska

Tabulka č. 1 Porovnání ultrazvukových rychlostí naměřených výpočtem a simulací

Měřené místo	$R_m = f(v_L)$ [MPa] - přepočtem		R_m [MPa] - simulace
	Litý stav	Žíhaný stav	
1.	458,9	459,0	445,4 – 452,9
2.	450,6	440,0	445,4 – 452,9
3.	453,2	441,3	445,4 – 452,9
4.	454,7	441,0	445,4 – 452,9
5.	446,5	435,0	445,4 – 452,9
6.	446,0	437,0	445,4 – 452,9
7.	453,2	440,0	445,4 – 452,9
8.	450,1	437,8	445,4 – 452,9
9.	452,1	436,2	445,4 – 452,9
10.	450,2	438,0	445,4 – 452,9
11.	450,1	436,0	445,4 – 452,9
12.	453,2	433,9	445,4 – 452,9
13.	453,7	435,0	460,4 – 467,9
14.	442,4	440,0	452,9 – 460,4
15.	446,2	441,3	460,4 – 467,9
16.	451,1	432,0	467,9 – 475,4

Z porovnání experimentů a simulace vyplývá, že měřením rychlosti podélných ultrazvukových vln a použitím vhodného matematického vztahu $R_m = f(v_L)$ pro stejný materiál, tavicí zařízení, vsázkové suroviny, formovací materiál a parametry lití můžeme zjistit, jak se mění pevnost v tahu v jednotlivých průřezech odlitku vzhledem k rychlosti tuhnutí v jednotlivých stěnách odlitku. To usnadní konstruktérům i technologům návrh optimální konstrukce přechodů stěn z hlediska namáhání v kritických průřezích a z hlediska vhodných kontrolních míst. Rychlost ultrazvukových vln (pevnost v tahu) po tepelném zpracování klesá. Můžeme sledovat vlastnosti po odlití i po tepelném zpracování přímo na odlitcích a ne na zkušebních tyčích, které mají odlišné podmínky tuhnutí a mohou nám dávat zkreslené výsledky. Tím zlepšíme konkurenceschopnost daného odlitku.

Podobně se při proměřování napěťového pole pomocí tenzometrické metody se ukázalo, že výsledky experimentálních měření odpovídají simulaci co do charakteru napjatosti (tah, tlak). Tepelným zpracováním dojde ke snížení tahových napětí. [48, 50, 51]

Při rozboru mikrostruktury se ukazuje, že obsah perlitu a feritu je v určitých místech z hlediska odpovídající rychlosti tuhnutí v relaci s obsahem zjištěným simulací. Některá místa vykazují větší rozdíly (to souvisí s odlišným odběrem vzorků).

Podobně byla provedena simulace v porovnání s experimentem i na jiných typech odlitků – např. setrvačnick MOTOR JIKOV a.s. [50, 51] Bylo dosaženo obdobných výsledků.

Pro praxi byl navržen postup, který využívá 100% ultrazvukovou kontrolu pro slévárnu vyrábějící odlitky z litiny s kuličkovým grafitem. Prokazatelně se zvýšila konkurenceschopnost daných odlitků (vyšší objem výroby, zlepšení kontrolních opatření, lepší postavení na trhu vnitřním i globálním).

Pro možnost použití simulačních a experimentálních metod bych si dovolil použít citaci prof. Piwonky z Alabamské University v USA:

„Slévárny, které chtějí být v příštím století konkurenceschopné, budou muset tuto simulaci využívat a začít ji uplatňovat již dnes. Slévárny, které ji odmítnou buď proto, že nevěří, že matematika může odvést tak dobrou práci jako kvalifikovaný slévač, nebo proto, že nechtějí investovat do hardwaru a softwaru, nebudou schopny konkurence“.

3.3.2 Simulace mikrostruktur

První přístup modelování mikrostruktur řeší výsledný druh a množství příslušné fáze v odlitku jako průsečík křivky chladnutí pro daný element – uzel zesíťované geometrie odlitku s příslušným ochlazovacím diagramem ARA. Data diagramu dané slitiny jsou vložena do programu předem. Tento přístup je jednoduchý, jak z hlediska algoritmu výpočtu, času potřebného k výpočtu, tak především z toho důvodu, že není nutné geometrii odlitku rozdělit pro počítačové zpracování na menší elementy, než jsou potřebné pro výpočet

teplotního pole či pnutí. Nevýhodou je, že pro celý odlitek a celý časový průběh tuhnutí a ochlazování je použit jen jeden diagram o jednom chemickém složení. Do výpočtu není zahrnut model přenosu látky odměšení, difúze. To s sebou samozřejmě vnáší do výpočtu apriorní chybu, která je tím větší, čím větší je u daného reálného odlitku přenosový jev. Na tomto principu pracuje např. současná verze programu SIMTEC.

Druhý přístup řeší otázky spojené se vznikem nových fází modelováním na úrovni zrn a ramen dendritů. Do výpočtů jsou zahrnuté algoritmy nukleace, růstu a interakce nové fáze, modelování odměšení a segregace, tzv. mikropohled.

V posledních letech byly pro tento druhý přístup v literatuře popsány různé modely, které slouží pro simulování tvoření zárodků a následujícího růstu nové fáze v tavenině. V zásadě je lze rozdělit na dva přístupy: [52]

- deterministický
- stochastický

ad a) U deterministických modelů jsou jak pro tvoření zárodků, tak pro jejich následující růst odvozeny funkce, které při předem daných podmínkách chladnutí vedou vždy ke stejným výsledkům. Novinky v oblasti deterministických modelů vycházejí z prací Rappaze a Thévoze. [53, 54]

Nastac a Stefanescu [55] se zabývali otázkou tvorby dendritů a odvozením postupů, které rozlišují mezi tzv. „hvězdicovými“ a „kulovými“ dendrity. Předpokládají, že „hvězdicovité“ dendrity se při podchlazení, které se v praxi vyskytuje, velmi rychle přemění na „kulovité“. Pro růst „kulovitých“ dendritů se předpokládá, že je určován hroty dendritů směřujících ven.

Simulace struktury při tuhnutí litin s kuličkovým grafitem, včetně následné přeměny austenitu na ferit a perlit rozvíjí Svensson aj. [56, 57]

Do studia tuhnutí s lokálně orientovanou strukturou zahrnují Wang, Beckermann [58] kromě pevné fáze i mezidendritickou, resp. mimodendritickou taveninu jako samostatnou složku a řeší příslušné rovnice koncentrace metodou „volume–average“. Určují průběh podílu pevné fáze jako funkci koncentrace, resp. teploty.

ad b) V poslední době rostou snahy simulovat stochastickými modely přímo strukturu vzniklou tuhnutím odlitku tak, jak ji známe z vyobrazení z výbrusů. Tedy rozdělení zrn jejími hranicemi, tvar jednotlivých zrn, orientaci krystalů atd. Řadu prací v této přibližuje skupina kolem Rappaze z EPFL Lausanne, která do simulace tuhnutí zavedla metodu tzv. buněčných automatů (cellular automata).

Tento postup bude v nadcházejícím desetiletí rozhodující měrou podílet na dalším postupu v materiálových vědách. Takový způsob simulačních výpočtů již dnes umožňuje stanovit průměrnou hustotu zrn jako funkci místa, distribuci četnosti velikosti zrn, rozdělení hustoty nejbližších sousedů či orientace krystalů (textury).

Nastac a Stefanescu představují modely růstu pro metastabilní a stabilní tuhnutí, do kterého byl začleněn model mikroodměšení, aby se dal popsat vliv

třetího prvku na konkurenční růst obou eutektik V [59] je popsán jejich výpočet parametrů primárního austenitu, eutektické litiny s lupínkovým grafitem a bílé tuhnutí, stanovení počtu zrn, odmíšení, změny rovnovážné teploty a růstu feritu, resp. perlitu.

Nově vyvinuté simulační programy popisují mikrostrukturu i na základě makroskopické rovnováhy, nukleace a růstu zrn se zahrnutím termodynamiky procesu. Do výpočtu je zahrnut i vývin latentního tepla při tuhnutí, která působí svými účinky při ochlazování. Modelování dějů tak probíhá na úrovni jednotlivých zrn či ramen dendritů. U této simulace mikrostruktury je nutné provést zesíťování oblasti na plochu menší, než je jejich očekávaná velikost. Výsledkem je pak zobrazení morfologie zrn nebo dendritů. Nárůst výpočetní doby lze akceptovat zejména s přihlédnutím na velký nárůst v přesnosti výpočtu.

Ačkoliv i dřívější programy řešící simulaci mikrostruktury v meziprostorách primárních a sekundárních ramen dendritů či otázky porezity vedly, při použití kriteriálních funkcí, k přijatelným výsledkům, až zahrnutí mikro- a makromodelování vede ke značnému zpřesnění výsledků. Lze počítat poměry na hrotu dendritů, podchlazení mezidendritického eutektika a difúze v pevné fázi.

Po dosažení správných výsledků byla do modelů zahrnuta i predikce odlišných fází, které se v technických slitinách vyskytují, tj. tvorba karbidů a dalších precipitátů. Přestože tyto složky představují malé objemy ve slitinách, působí na změnu teplotních charakteristik.

Částí, která při predikci výsledných fází hraje klíčovou roli je chemické složení, které se mění v závislosti na toku energie a hmoty, je jimi ovlivňováno a samo ovlivňuje podmínky chladnutí. Mapování chemického složení lze řešit jak na úrovni celého odlitku, tak na mikroúrovni. Nové simulační programy se proto pokoušejí provést i mapování rozložení chemických prvků v odlitcích, stejně tak jako jevy mikro a makrosegregace kovů. [60, 61]

Programy na řešení simulace mikrostruktury odlitků jsou dalším pokračováním ve vývoji modelování slévárenských procesů. Od počátku 80 let, kdy nastoupila éra numerické simulace a byl umožněn i nasazením výkonného počítačového vybavení. [62]

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 kriteriálních funkcí. [63] 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. Na tomto principu pracuje i program SIMTEC, na kterém probíhaly veškeré simulace mikrostruktur.

Dalším omezením je nedostatek vhodných dat. Podobně jako u termofyzikálních dat se i v této oblasti potýkáme s omezeným množstvím údajů. I zde existují dva přístupy, které lze při jejich získávání použít. Buď

použijeme dat ochlazovacích diagramů IRA, resp. ARA určených experimentálně [64] a nebo získaných na základě výpočtu. 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.

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. odměšením v odlitku během lití a chladnutí.

Důležitá termofyzikální data v simulačních programech se mění nejen s teplotou, ale i se složením teplot. V práci [65] se popisuje obtížnost matematického vyjádření pro reálné slitiny. U vícefázových slitin přispívají k teplotním vlastnostem i další složky – karbidy, grafit, struktura matrice. Databanka simulačních programů SIMTEC byla doplněna především dostupnými údaji pro litinu s kuličkovým grafitem, litinu s lupínkovým grafitem a hořčíkové slitiny. Byly doplněny průběhy měrné tepelné kapacity, součinitele tepelné vodivosti, hustoty jako funkci teploty pro různé slitiny, včetně chemického složení. Byl proveden např. kritický rozbor vlivu rozdílu v parametru součinitele tepelné vodivosti při rozdílných rychlostech odvodu tepla u litiny s kuličkovým grafitem o termofyzikálních vlastnostech získaných z různých literárních zdrojů (rozdíly teplot při chladnutí ve třech typech forem za použití rozdílných hodnot součinitele tepelné vodivosti dosahovaly až 50°C).

Uskutečnili jsem 36 počítačových simulací, kde jsme porovnávali, jak se mění výsledné teplotní pole z materiálové skupiny litiny s kuličkovým grafitem při ochlazování v šesti různých formovacích směsích. [65] Ukázalo se, že možným způsobem jak porovnat data je provést výpočet za použití dat pro více slitin. Výsledný rozdíl v teplotě je dán jednak termofyzikálními vlastnostmi slitin, geometrií odlitku, teplotními vlastnostmi formy. Navržený postup ukázal, že i při použití blízkých dat pro jednu materiálovou skupinu lze získat rozdílné výsledky v teplotě v řádu desítek až stovek °C a času v řádu několika minut. S těmito rozdíly je třeba uvažovat při výpočtu mikrostruktury a při modelování napětového pole. [66, 67]

Při simulaci mikrostruktury jsme řešili především tyto problémy:

- diagram chladnutí je vyhotoven jen pro jedno chemické složení slitiny,
- celý děj odlévání je silně stochastický, časově proměnný a citlivý na změny,
- nedostatek vhodných dat (diagramy IRA, resp. ARA – data určená experimentálně nebo výpočtem),
- odchylky chemickém složení.

Konkrétně u litin s kuličkovým grafitem jsme sledovali, jak se mění simulované množství strukturních složek v závislosti na změně transformačních dat, při zachování ostatních vstupních parametrů.

Dalším aspektem bylo sledování, jak se liší hodnoty zastoupení perlitu a feritu pro konkrétní odlitek při použití dvou rozdílných transformačních diagramů. Při porovnání vypočteného obsahu perlitu a feritu se výsledky liší v řádu procent. Výsledky počítačové simulace se liší od 5–10 %.

Přesný výpočet mikrostruktury vyžaduje přesná vstupní data, minimální odchylky v chemickém složení a dané chemické složení při konstrukci ARA diagramu a podmínek křivek chladnutí (kromě cca 10% nepřesnosti programu SIMTEC). Porovnání jednotlivých diagramů ARA (rozdílné chemické složení, rozdílná termofyzikální data, odlišná rychlost odvádění tepla z odlitku) ukazuje, že rozdíl v termofyzikálních vlastnostech jednotlivých slitin se projeví především v rychlosti chladnutí, tj. v okamžiku protnutí společné křivky chladnutí s transformační teplotou některé složky. Rozdíl v křivkách chladnutí je pro jednotlivé slitiny v desítkách až stovkách sekund. Tyto hodnoty jsou však vzhledem k času transformací o řád či dva řády nižší a na výpočet struktury nemají výraznější vliv. Při použití dat o výrazně odlišném chemickém složení získáme rozdíly v podílu jednotlivých složek v řádu desítek procent (což je v praxi nepoužitelné). [72, 73, 75, 76, 77]

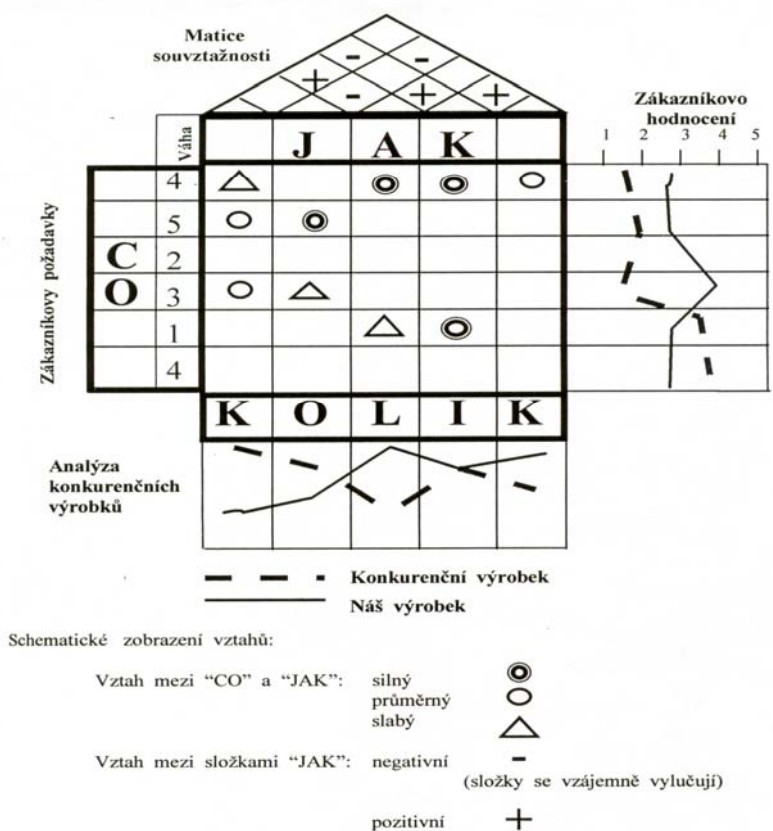
Pro odlitek z litiny s kuličkovým grafitem (třmen) jsme řešili otázku vyhodnocení množství grafitu a jeho tvarových charakteristik pomocí obrazové analýzy. Ukázali jsme, že i velmi malé rozdíly v průběhu teplot chladnutí lze rozpoznat metalografickou analýzou a zachytit počítačovou simulací. Můžeme (alespoň orientačně) stanovit metalografické parametry i pro místa, která nebyla podrobena metalografické analýze, a to v případě, že pomocí počítačové analýzy známe příslušné teplotní pole (stejný typ odlitku, přibližně stejné podmínky ochlazování). Při porovnání predikce s experimentem zjištěnými hodnotami se ukazuje, že chyba je do 7 % (max. 11 %).

Spojení počítačové simulace teplotního pole a vyhodnocování matrice pomocí obrazové analýzy může přinést mnohem komplexnější pohled na odlitek. Počítačová simulace dokáže zachytit rozdíly v teplotním průběhu jednotlivých míst na odlitku. Průběh křivek chladnutí navíc dobře korespondoval s teoretickými představami o tvorbě grafitu. [68, 69, 70, 71, 74]

4 NÁVRH HODNOCENÍ KONKURENCESCHOPNOSTI POMOCÍ QFD

Vstup České republiky do Evropské unie a spolupráce s ostatními ekonomickými seskupeními celosvětového i regionálního charakteru vyžadují především zlepšení užitných vlastností tuzemské produkce. Jakost je v průmyslově vyspělých zemích považována za jeden z nejvýznamnějších faktorů efektivnosti národního hospodářství a za rozhodující faktor ochrany spotřebitelů, dobrého jména státu, bezpečnosti, zdraví a životního prostředí. Spokojený zákazník je hlavním cílem řízení jakosti. Je důležité znát požadavky a očekávání zákazníků a vědět, do jaké míry je vlastní úsilí v očích zákazníka

hodnoceno jako dostatečné. Požadavky zákazníků neustále rostou, základem nového vývoje nemohou být pouze dnešní požadavky. Dobrý marketing musí odhadnout, jaké požadavky budou aktuální v době zavedení a prodeje plánovaného výrobku. Intenzivní shromažďování informací o zákaznících má smysl jen tehdy, jestliže jsou následně systematicky vyhodnocovány a realizovány ve výrobcích a službách. Často se stává, že se potřebné poznatky na dlouhé cestě od marketingu přes vývoj až k výrobě ztratí. Proto se doporučuje zahrnout do systému zajištění jakosti postup, který takovéto ztrátě zabrání. Tento postup, známý pod jménem Quality Function Deployment (QFD). Čili rozvoj funkce jakosti, srovnává během všech fází vývoje výrobku pomocí řady matic požadavky a jim odpovídající opatření. Kromě toho jsou vyhodnocena a popsána silná i slabá místa vlastního plánovaného výrobku a nejdůležitějších výrobků konkurence. Tato metoda účinně podporuje úplné zohledňování požadavků zákazníků během celého vývoje až k hotovému výrobku. Vztah mezi prvky jakosti je vyjádřen dvourozměrnou maticí. Schematické znázornění teoreticky vyplněného diagramu je na obrázku č. 4.



Obr. 4. Diagram jakosti znázorňující vztahy mezi požadavky zákazníka a vlastnostmi výrobku, mezi vlastnostmi navzájem, zákaznické hodnocení a analýza konkurenčních výrobků

Pro účinné řízení jakosti mají velký význam jmenovité (cílové) hodnoty vlastnosti výrobku (označené jako KOLIK – viz obr.č. 4). Úkolem musí být uspokojení požadavků zákazníka s co nejmenší možnou odchylkou vlastností od cílové hodnoty. Každá odchylka od cílové hodnoty znamená zvýšení nákladů.

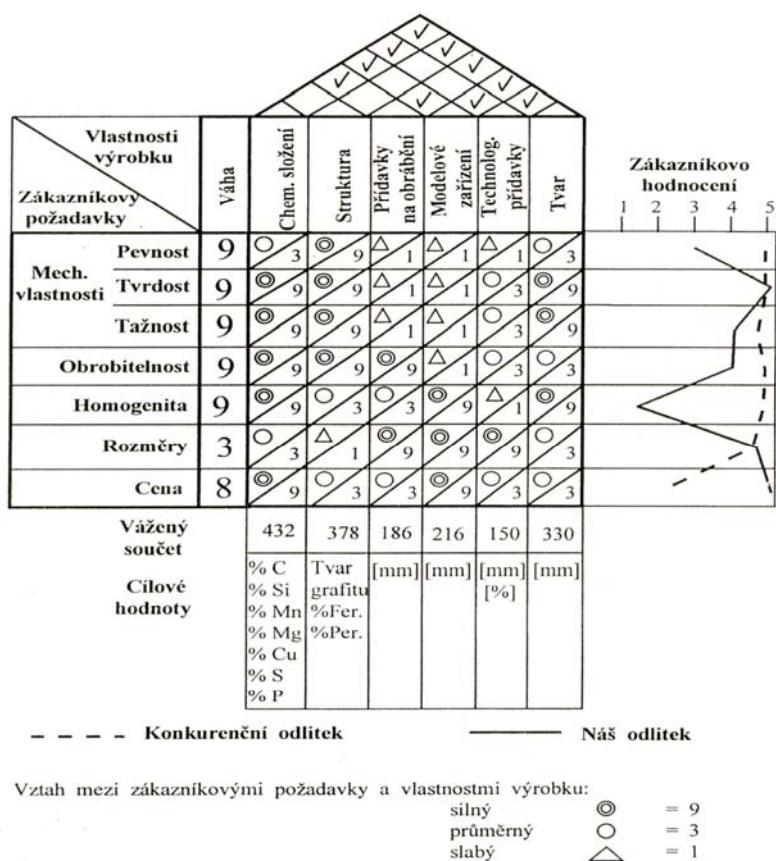
Cílové hodnoty se proto musí specifikovat již na počátku procesu zhotovování výrobku.

Pro stanovení cílových hodnot, které jsou jedním z předpokladů k dosažení vedoucího postavení v daném tržním segmentu, se musí provést dvě důležité věci :

- nechat zákazníka vyhodnotit náš a konkurenční výrobek (obrázek č. 4 zákaznické ohodnocení),
- provést analýzu konkurenčního výrobku : analýza pomůže odhalit silné a slabé stránky.

4.1 Experimentální část

Metoda QFD byla aplikována u odlitků držáků a třemenů z LKG vyráběných v MOTOR JIKOV a.s. České Budějovice [78-82]. Byl sestaven diagram jakosti (obr. 5).



Obr. 5. Konečná podoba matice QFD pro plánování experimentu

Byla provedena analýza odlitků MOTOR JIKOV a.s. i konkurenčních výrobků. Protože se však jedná o výrobky, které jsou již v sériové výrobě, zaměřili jsme se na možnost dalšího použití QFD, jak bylo výše uvedeno, a to k identifikaci toho, co kontrolovat na výrobku, aby byla zaručena spokojenost

zákazníka. Jakákoliv reklamace obecně vede k nespokojenosti zákazníka, který se může rozhodnout pro jiného dodavatele, což je velmi nebezpečné u dodavatelů pro automobilový průmysl (držáky a třmeny pro brzdový systém automobilů ŠKODA-Volkswagen). V našem případě může dojít k nižšímu hodnocení v rámci hodnocení dodavatelů, což může mít obdobný následek – omezení zakázek či v krajním případě úplné zastavení objednávek. Jedna z možností, jak předejít k reklamacím je i důsledná kontrola výrobků před jejich uvolněním k zákazníkovi.

Pro udržení konkurenceschopnosti v takto exponovaném odvětví průmyslu (dodávky pro automobilový průmysl) je třeba počítat s velmi silnou konkurencí (jak ze strany domácích dodavatelů, tak především ze strany zahraničních dodavatelů). Pro udržení v této silné konkurenci je potřeba využít všech těchto dostupných možností. Ze strany sléváren se jedná především :

a) uplatnění simulačních software

Málokdo se však uvědomí, že klíčem k úspěšnému využívání simulačního software není ten či onen produkt nám všech známých firem, ale především správná interpretace daných výsledků a v neposlední řadě správné vstupní údaje potřebné pro zadání simulačního procesu.

Důvěra konstruktérů a technologů našich sléváren musí být podpořena především precizním experimentem (přesné měření teplotního pole, měření zbytkového pnutí, bohaté údaje termofyzikálních parametrů v databankách simulačních software, možnost korekce těchto údajů apod.). teprve součinnost těchto údajů a měření nám umožní lepší uplatnění dosavadních software.

b) uplatnění nových zkušebních metod

Shrneme-li tedy potřebné údaje, které jsme předchozí analýzou získali: Vzhledem ke skutečnosti, že neshodné výrobky, řádově kusy vedou k vrácení celé série, měla by kontrolní metoda být 100% a samozřejmě nedestruktivní. Musí se dbát i na to, aby se nezvyšovaly náklady, které by se odrazily v ceně odlitku, jelikož na cenu klade zákazník dost velký důraz. Vyjde-li ze zákaznických požadavků a váhy, kterou jim udělil, a našim možnostem, měly by být pečlivě kontrolovány mechanické vlastnosti odlitků. Snahou je kontrolní činnost maximálně zrychlit a zobjektivizovat. Cílem je např. navržení vhodné metodiky nedestruktivního zkoušení odlitků z LKG. Jako řešení se nabízí použití ultrazvuku, které je rychlé, ekonomické a použitelné přímo v provozu slévárny. Ukazuje se, že použití ultrazvuku pro kontrolu tvaru grafitu (využíváno již v minulosti), tak kontrolu pevnosti v tahu, i vzhledem k měnící se struktuře základní kovové hmoty, může být perspektivní (v kombinaci např. se simulačním software MAGMASOFT).

c) použití expertních systémů pro predikci vad a kalkulaci odlitků

Kromě uplatnění řady opatření přímo souvisejících s provozem - simulační software, nové kontrolní metody, predikce vlastností, použití expertních systémů

je potřeba řešit otázky související s přesným měřením a správnou interpretací naměřených hodnot u odlitků z LKG.

Díky QFD by bylo možno přesunout odhalování chyb do fáze plánování, kde jsou náklady na změny srovnatelně menší. Zabraňovat chybám je ekonomičtější než je odstraňovat, jak zní základní myšlenka programu nulového počtu chyb, a proto by se úsilí při zajišťování jakosti mělo ubírat tímto směrem. Tým sestavený ze zúčastněných úseků (např. marketing, vývoj, konstrukce, výroba, nákup, kvalitářství) by zkoumal na konci určitých vývojových fází dosažené výsledky ve srovnání s předpokládanými a rozhodoval by o eventuálních korekturách. Tak byly včas zjištěny nedostatky v předlohách a bylo by možné rychleji reagovat na změny na trhu. Pokud nedochází k pravidelným konzultacím marketingu a vývoje (design reviews), pak je především naprogramována nepříznivá reakce trhu nebo reklamace.

Význam projektu QFD u náročných odlitků spočívá především v možnosti rychlé reakce podniku na změny v přáních zákazníků a to především při tvorbě výrobků, strategickém plánování, změnách konstrukce, změnách materiálů. Ve svých důsledcích se to projeví vyšší konkurenceschopností našich výrobků (odlitků) na světových trzích.

Závěrem lze říci, že použitím QFD bude dosaženo následujících výhod :

- méně konstrukčních změn,
- kratší doba vývoje,
- méně problémů při rozběhu výroby,
- nižší náklady na výrobu nových výrobků,
- méně problémů v distribuční síti,
- orientace na zákazníka (zákazník dostane výrobek, který požaduje).

5 ZÁVĚR

Předložená přednáška představuje částečný průřez některými pracemi v delším časovém horizontu (optimalizace výroby litinových odlitků s cílem minimalizace zbytkových pnutí u litin, predikce mechanických, strukturních, napěťových vlastností - porovnání experimentu a simulace, měření mechanických vlastností u litin nedestruktivními metodami, použití expertního systému Win-Ex pro řadu aplikací ve slévárnách, hodnocení konkurenceschopnosti ve slévárnách - metoda QFD). Řada prací souvisí s úspěšně oponovanými grantovými úkoly GAČR (4), mezinárodními projekty (3 - SRN, Slovinsko).

Optimalizace výroby s cílem minimalizace zbytkových pnutí představuje při dodržování technologické kázně a dobrém organizačním zajištění značné ekonomické efekty a zvýšení jakosti (úspora elektrické energie, zkrácení doby ochlazování na polovinu až třetinu - tj. výrazné zvýšení produktivity linky, minimální požadavky na výrobní a skladovací prostory, úspora na nových

výrobních zařízeních, objektech, zlepšení strukturálních poměrů zvýšením podílu perlitu v základní kovové hmotě, zvýšení pevnosti, částečně tvrdosti v tlustších průřezích odlitku). Proces optimálního uvolňování odlitků z forem při využití simulace je možno zařadit v rámci nabídkového řízení jako faktor, který nám může rozhodnout o taktu AFL (automatické formovací linky), využitelné kapacitě linky, optimálních vlastnostech odlitku a tím přispět ke zlepšení jakosti a zvýšení konkurenceschopnosti. Vyrůstá také podíl produktivity na pracovníka.

Predikce mechanických, strukturních, napěťových vlastností v porovnání s experimentem ukazuje na možnosti využití simulačních programů v provozu sléváren. Hodnotí možnosti jednotlivých modulů, přesnosti a chyby. Na základě měření rychlosti podélných ultrazvukových vln můžeme u litiny s kuličkovým grafitem stanovit např. pevnost v tahu. Tato metoda je rychlá, aplikovatelná v praxi.

Použití adaptivních systémů při řízení výroby a podpoře rozhodování představuje alternativní metodu použitelnou pro široký okruh problémů. Použití expertního systému, případně databanky „Slévárenské technologie“ nám umožní (klasifikaci vad odlitků na základě jejich vnějších znaků, nalezení optimální výrobní technologie, predikci mechanických vlastností, predikci vad, kalkulaci výrobních nákladů a cen odlitků a pod.

Použití metody QFD (Quality Function Deployment) pro hodnocení konkurenceschopnosti nám usnadní přesunout odhalování chyb do fáze plánování, kde jsou náklady na změny srovnatelně menší. Význam QFD u náročných odlitků spočívá především v možnosti rychlé reakce podniku na změny v přáních zákazníků.

Pro zahraniční i některé naše zákazníky cena již nebývá hlavní prioritou. Hlavní je jakost, výrobní zkušenost, dodržování dodacích termínů, dlouhodobá spolehlivost, snaha po neustálém zlepšování, aplikace nových faktorů. Především je toto otázka důležitá u sléváren vyrábějících nebo dodávajících pro automobilový průmysl. Některé slévárny (MOTOR JIKOV a.s., ŠKODA AUTO a.s. Mladá Boleslav a p.), kombinací vlastního vývoje a spoluprací s vysokoškolskými pracovišti AV ČR, případně jinými pracovišti zlepšují nabídkové řízení, vývoj a aplikaci nových faktorů s cílem dosažení lepší konkurenceschopnosti.

6 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Ambos, E., Hofmann, I., Čech, J., Exner, J., Roučka, J.: Racionalizace přípravy práce s použitím výpočetní techniky, Slévárenství č. 4, 1995, str. 48–51
- [2] Ambos, E., Bähr, R., Čech, J.: Ermittlung von Expertenwissen für die Konstruktion gegossene Bauteile. Projekt Volkswagenovy nadace, 1993–1995
- [3] Hunt, E. B.: Artificial Intelligence, Academic Press: New York, 1975
- [4] Kelemen, J., Popper, M.: Expertné systémy, Alfa Bratislava 1989
- [5] Voráček, J.: Návrh a vlastnosti hierarchického klasifikátoru, VUT FSI Brno, Habilitační práce, 1996
- [6] Čech a kol.: Vývoj expertního systému pro konstrukci a výběr výrobních technologií odlitků v závislosti na nárocích na jejich kvalitu GA ČR 106/94/0564, VUT Brno, 1995
- [7] Čech, J., Roučka, J., Zemčík, L.: Expertensystem für die Wahl der optimalen Giesserei-technologien, Slévárenské dny, Portorož, Slovinsko, 1996
- [8] Čech, J., Voráček, J., Zemčík, L. : Aplikace expertního systému pro hodnocení technologičnosti konstrukce odlitků, predikce mechanických vlastností, řízení kvality formovacích směs, Mez. Konference, Plzeň, 1997, str. 49–62
- [9] Čech, J., Fiala, D., Valenta, J., Voráček, J.: Expertní systém pro hodnocení technologičnosti konstrukce vad odlitků, kalkulace s ohledem na řízení jakosti odlitků, Mez. konference, Žilina, 1997, str. 47–55, ISBN 84-04-02019-X
- [10] Čech, J., Voráček, J., Zemčík, L., Fiala, D., Valenta, J.: Použití expertního systému Win-Ex pro výběr optimálních technologií, hodnocení vad, materiálových vlastností, 34. slévárenské dny, poster, Brno, 1997, ČR
- [11] Čech, J., Voráček, J., Zemčík, L.: Uplatnění expertního systému Win-Ex pro hodnocení kvality formovacích směsí, predikce mechanických vlastností technologičnosti konstrukce odlitků, International Conference, Technology 97, Bratislava, 1997, str. 286–294, ISBN 80-227-0976-X
- [12] Fiala, D., Čech, J.: Možnosti predikce mechanických vlastností pomocí expertního systému, XI. Miedzynarodowe sympozjum „Metody oceny struktury oraz własności materiałow i wyrobów“ Wyzsa Szkola Inżynierska w Opolu, Vysoké učení technické v Brně, Svatka, 1997, ČR, str. 48–52, ISSN 0209-0848
- [13] Svadbík, M., Čech, J.: Průměrná zmetkovitost odlitků a její predikce. XV. mezinárodní konference k 100. výročí založení FSI VUT, Brno, 2000, str. 263–269, ISSN 1429-6055
- [14] Svadbík, M., Čech, J.: The Future of Foundry Information Systems in the Sphere of Production Planning, Transcom 2001, Žilina, SR, 2001, str. 201–205, ISBN 80-7100-850-8

- [15] Svadbík, M., Čech, J.: The new Possibilities in the Sphere of Production Planning in Foundries *Technologia 2001*, Bratislava, SR, 2001, str. 551–553, ISBN 80-227-1567-0
- [16] Svadbík, M., Čech, J.: Utilization of Foundry Information Systems in the Sphere of Production Planning, *Transfer 2001*, Trenčín, SR, 2001
- [17] Exner, J., Čech, J.: Autorské osvědčení č. 225624, patentní přihláška PV 6712-81, Praha 1981
- [18] Čech, J., Ptáček L.: Zu der Problematik der Messung von Innenspannungen Gusstücken aus Grauguss, *Sborník ZWICKAU, Vortrag 5*, str.16, 1979, NDR
- [19] Čech, J., Fiala, A.: Zerstörungsfreie Prüfung der Innespannungen von statisch und dynamisch beanspruchten Grauguss, *Sborník Vídeň, Rakousko*, 1981
- [20] Čech, J., Fiala, A., Osincev, A. N.: Internal Stress Measurement by the Rendler–Vigness Method in Grey–Iron Castings, *Sborník*, 10. sv. def. kongres, Moskva, str. 283–290, 1982
- [21] Čech, J., Exner, J., Rusín, K.: Production of Castings with low Residual Stress Values, *Sborník*, Slév. dny, Budva, SFRJ, 1982
- [22] Čech, J., Fiala, A., Exner, J., Osincev, A. N.: Innespangungen in Grauguss, *Sborník Zwickau, NDR*, str. 116–126/11, 1985
- [23] Čech, J., Exner, J., Kristoň, F.: Messung von inneren Spannungen bei Gusstücken aus Gusseisen. *Sborník Zwickau, NDR*, 1989
- [24] Čech, J., Exner, J., Rusín, K.: Optimierung der Abkühlungssteuerung zur Minimierung der Restspannungen bei Graugussteile, *Giesserei–Rundschau*, Nr. 6, str. 13–17 / 4, Rakousko, 1986
- [25] Čech, J. a kol.: Rationalizing Foundry Production and Assuring Quality of Castings with the Aid of Computer Science, *Technické sdělení*, 62. Světový slév. kongres, Philadelphia, USA, 1996
- [26] Exner, J., Čech, J., Rusín, K.: On some Physical Properties of Dynamicaly Stressed Automobile Grey-Iron Castings, 49. Intenational Foundry Congress, Chicago (USA)–April, 1982
- [27] Čech, J.: Measuring the Mechanical Properties of cast irons by NDT Methods, *NDT International*, Londýn, str. 93–102 / 10, 1990
- [28] Čech, J., Zezula, J., Rusín, K., Horák, L.: Ultraschallmessungen der mechanischen Eigenschaften von Gusseisen, *Sborník, Florencie, Itálie*, 1984
- [29] Exner, J., Čech, J., Rusín, K.: Fatigue Properties of Dynamicaly Stressed Automobile Grey iron Castings, *Giesserei Forschung*, č.3, str.69–79 / 10, NSR, 1983
- [30] Čech, J., Exner, J., Rusín, K.: Die Herstellung von Gusseisenteilen mit Minimalen Eigenspannungen *Giessereitechnik*, Heft 9, s.281–285 / 5, NDR, 1987
- [31] Čech, J. a kol.: Možnosti měření vnitřního pnutí u vybraných odlitků ze

šedé litiny - výzkumná zpráva pro TOS Hostivař, hlavní řešitel, 1975

[32] Čech, J.: „Měření vnitřního pnutí u odlitků ze šedé litiny“. Oborový úkol OC 551 - M, dílčí část, hlavní řešitel - výzkumná zpráva pro LIAZ Liberec, 1978

[33] Čech, J.: Měření vnitřního pnutí u odlitků ČKD Hradec Králové – dílčí zprávy 1986 - 1990, hlavní řešitel

[34] Čech, J.: Metodika stanovení a způsob interpretace strukturních parametrů litinových brzdových bubnů, Výzkumná zpráva pro Škoda - Volkswagen, 1996

[35] Čech, J., Exner, J.: Optimalizace režimu ochlazování litinových odlitků a jejich uvolňování z forem při výrobě na AFL, Mez. konference, Trenčianské Teplice, str. 178–187/9, 1990

[36] Čech, J., Exner, J.: Possibilities of non – destructive Checking of Mechanical Properties grey-iron Castings for Automobile Industry, Sborník, 4. Evropský kongres, str. 1248–1255 / 8, Anglie, 1987

[37] Čech, J.: Optimalizace výroby litinových odlitků s cílem zvýšení jakosti, Habilitační práce VUT, FSI, 2001, Brno

[38] Čech, J., Rusín, K., Trbižan, M.: Computer Simulation of Stress in Primary Crystallization of Grey Cast Iron, Euromat, Mnichov, SRN, 1999, přednáška nebyla publikována na posteru (na internetu)

[39] Čech, J.: Applying Solidification Simulation to the Control of Casting Quality, Mezinár. konference „New Process and Material Used in Foundry Industry, Krakow, Polsko, str. 59–62, 1996

[40] Čech, J., Boucník, P.: Comparison of Experimental Measurements with Simulation, Mezinárodní konference, Wolfsburg, April 1998, SRN, poster ISBN 3-88355-255-0

[41] Zemčík, L., Čech, J., Krhounek, P.: Computer – Aided Ductile Iron Coling Curve Analysis, IMEKO 2000, 16th World Congress, Vídeň, Rakousko, ISBN 3-901888-09-9

[42] Čech, J., Rusín, K., Boucník, P.: Simulation and Experimental Measurement of Internal Stresses During Solidification of Motorcycle Wheel Cast of Mg – Alloys, 10th Proceedings of the International Metallurgy, Istanbul, Turecko, str. 411–417, 2000, ISBN 875-395-382-8, ISBN 1301-3637

[43] Čech, J., Zemčík, L.: Applicatin of Mathematical Models and Simulation of Solidification of Ductile Iron Castings to the Prediction of Properties. In: Solidification of Metal and Alloys, Katowice, Opole 2000, str. 39 – 44, 2000 PL ISSN 0208-9386

[44] Čech, J., Bařinová, D., Zemčík, L., Rusín, K., Trbižan, M.: Solving to the Temperature and Internal-Stress Fieds in Automotive Castings, Materialica 2001, Mnichov, SRN, 2001, poster na internetu

[45] Čech, J., Zemčík, L., Bařinová, D.: Prediction of Mechanical, Structural and Internal-Stress Properties of Automotive Castings, Solidification and Crystallisation of Metals, Kielce, Polsko, str. 424 – 431, 2001, ISSN 1642-3308

- [46] Čech, J, Zemčík, L.: Possibility of Applying Simulation and Stress Conditions in Mg-alloys, Solidification and Crystallisation of Metals, Kielce, Polsko, str. 73–79, 2001, ISSN 1642-5308
- [47] Boucník, P., Čech, J.: Souvislost mezi měřením rychlosti ultrazvuku a tvrdosti litiny jako možný nástroj výstupní kontroly, Slévárenství č. 12, s. 590 – 592, Brno, 2000, ISSN 0037-6825
- [48] Čech, J, Bařinová, D.: Sledování teplotního pole a vnitřního prnutí u automobilových odlitků pomocí simulačního software MAGMASOFT, Transfer 2000, Trenčín, str. 152 – 166, SR, 2000, ISBN 80-85988-54-2
- [49] Čech, J, Zemčík, L.: Predikce výsledných vlastností odlitků z LLG na základě matematických modelů a simulace, Mezinárodní konference Malenovice, Spolupráce 2000, str. 93–99, 2000, ISBN 80-7078-781-3
- [50] Čech, J., Zemčík, L., Palán, K., Bařinová, D.: Možnosti experimentu a simulace při stanovení jakostních charakteristik u litin, Konference Plzeň, Progresivní technologie ve slévárenství, Plzeň, str. 105 – 122, 2002
- [51] Čech a kol.: Možnosti experimentu a simulace při stanovení jakostních charakteristik litin a vad u tlakově litych odlitků, Slévárenství č. 8–9, str. 305–311, ČR, 2002, ISSN 0037-6825
- [52] Ludwig, A., Bühring Polaczek, A.: Simulace slévárenských procesů (1. pokračování) Slévárenství č. 2 - 3, str. 110 – 111, 1997
- [53] Rappaz, M.: Thévoz: Acta Metall, 35, str. 1487–1497, 1987
- [54] Rappaz, M.: Thévoz: Acta Metall, 35, str. 2929–2933, 1987
- [55] Nastac, L., Stefanescu, D. M.: International Conf. Of Modelling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes VI, str. 209–217, 1993
- [56] Svensson, I. L., Wessen, M., Gonzales, A.: International Conf. of Modelling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes VI, str. 29–36, 1993
- [57] Wessen, M., Svensson, I. L.: International Conf. Of Modelling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes VI, str. 71–78, 1993
- [58] Wang, C. Y., Beckermann, C.: Mat Sci Eng. A, str. 199–211, 1993
- [59] Nastac, L., Stefanescu, D. M.: Proceedings of Cost 504 Conference Advanced Casting and Solidification Technology, Espoo, Finlandia, str. 81–92, 1994
- [60] Piwonka, T. S.: Promises and Realities of Casting Process Model 62nd World Foundry Congress, Proceedings for Technical Forum, Philadelphia, Pennsylvania, USA, str. 62–72, 1996
- [61] Stefanescu, D. M., Piwonka, T. S. Promises and Realities of Casting Process Models, Sborník Proceedings for Technical Forum, Illinois, USA, str. 62–71, 1996
- [62] Sahn, R. P., Ludwig, A.: The Edge of Development in Sand Casting Process Simulation, Sborník Proceedings for Technical Forum, Illinois, USA, str. 13–15, 1996

- [63] Mikula, J., Havel, M.: Počítačová simulace slévárenských procesů–program, SIMTEC, Mashinenmarkt č. 1, ročník I, str. 13–17, 1997
- [64] Arbor, A.: Continuous Cooling Transformation Diagram for Ductile Iron, Research Laboratory, Climax Molybdenum Co. Of Michigan, Amax Inc., Michigan, USA, 1998
- [65] Boucník, P.: Simulace mikrostruktury s ohledem na dosažení požadovaných vlastností odlitku, Doktorandská práce, VUT FSI, 2001, Brno
- [66] Ursacher, R., Čech, J.: Termofyzikální parametry a jejich vztah k simulacím, Slévárenství č. 4, str. 06–210, Brno, 2000
- [67] Boucník, P., Čech, J.: Analýza vstupních termofyzikálních dat–předpoklad pro dosažení dobrého výsledků při simulaci mikrostruktury, Mezinárodní konference k 100. výročí založení FSI VUT, Brno, 2000
- [68] Boucník, P., Čech, J.: Zpětná simulace–možnosti a omezení korekce naměřených dat, Sborník z mezinárodní konference k 100. výročí FSI VUT, str. 3–36, Brno, 2000
- [69] Boucník, P., Čech, J., Jiříkovský, K.: Prediction of Grafite Parameters Based on Computer Simulation, Transcom 2001, str. 143–147, Žilina, SR, 2001
- [70] Boucník, P., Čech, J., Jiříkovský, K.: Prediction of Grafite Parameters Based on Computer Simulation, Technológia 2001, str. 490–493, Bratislava, SR, 2001
- [71] Čech, J., Boucník, P.: Graphite Characteristics and their Quick Approximate Determination Based on Temperature Field Simulation, Materialica 2001, poster, Mnichov, SRN, 2001
- [72] Čech, J., Bařinová, D., Zemčik, L.: Prediction of Mechanical, Structural and Internal - Stress Properties of Automotive Castings, Solidification and Crystallisation of Metals, Kielce, Polsko, 2001
- [73] Čech, J., Zemčik, L.: Possibility of Applying Simulation and Stress Conditions in Mg – Alloys, Solidification and Crystallisation of Metals, Kielce, Polsko, 2001
- [74] Boucník, P., Čech, J.: Predikce parametrů grafitu na základě počítačové simulace, Plzeň 2001, ČR, 2001
- [75] Čech, J., Bařinová, D., Zemčik, L.: Predikce mechanických, strukturních a napěťových vlastností pomocí experimentu a simulace, Plzeň 2001, ČR
- [76] Zemčik, L., Čech, J.: Anylasis of Experimental Measurement of Cooling Curves of Different Alloys, with a View to Making, Simulation Programs more Precise, Materialica 2002, Mnichov, BRD, 2002
- [77] Čech, J., Zemčik, L.: Analysis of Cooling Curves of various Alloys for the Needs of Simulation Programs, Mezinárodní konference „Solidification of metals and alloys“, Kielce, str. 80 – 86, Kielce, Polsko, 2002, PL ISSN 1642-5308
- [78] Zemanová, Š., Čech, J.: Hodnocení konkurenceschopnosti odlitků pomocí metody QFD, 34. slévárenské dny, Brno, 1997

- [79] Zemanová, Š., Čech, J.: Využití metody QFD při hodnocení mechanických vlastností pro dosažení lepší konkurenceschopnosti odlitků, In: Hodnocení struktury a vlastností materiálu, Edit J.Boss, Mciepa. Opole, Dział Wydawnictw Politechniki Opolskiej, str. 31–134
- [80] Zemanová, Š., Čech, J.: Výsledky realizace metody QFD ve slévárenství
Konference „Perspektivy slévárenství“, Plzeň, 1998
- [81] Zemanová, Š., Čech, J.: Použití QFD pro hodnocení konkurenceschopnosti odlitků ve slévárenství, Slévárenství č. 1, str. 42–46, 2000
- [82] Zemanová, Š.: Použití metody QFD (Quality Function Deployment) pro hodnocení konkurenceschopnosti odlitků ve slévárenství, Doktorská práce VUT FSI, Brno, 1998

7 SUMMARY

The present lecture represents a partial cross-section of some of the author's works over a longer period of time (the optimization of iron castings aimed at minimizing residual stresses in cast irons, the prediction of mechanical, structural and stress properties – comparison of experiment and simulation, the measurement of mechanical properties of cast irons by non-destructive methods, the utilization of the Win-Ex expert system in a number of foundry applications, the evaluation of competitiveness in foundries – the quality function deployment (QFD) method. Some of the works relate to successfully completed projects of the Grant Agency of the Czech Republic (4) and to international projects (3 – Germany, Slovenia).

Optimizing the production with the aim of minimizing residual stresses while observing technological requirements and providing good organizational background can yield considerable economic benefits and increased quality (reduced power requirements, reduction of cooling time to between one half and one third - i.e. markedly increased productivity of the production line, minimum requirements for production and storage areas, savings in new manufacturing facilities, improved structural relations due to increased pearlite proportion in the matrix, increased strength and partially also hardness in thicker cross-sections of the casting). The simulation-based process of optimum removal of castings from moulds can be used in tenders as a factor that can determine the pace of automatic moulding lines, available line capacity and optimum properties of the casting and thus contribute to better quality and increased competitiveness. The productivity per worker also increases.

The prediction of mechanical, structural and stress properties compared with experiments demonstrates the possibility of using simulation programs in foundry operation. It evaluates the potentials of individual modules, precision and defects. For example, on the basis of measuring the speed of longitudinal ultrasound waves the tensile strength of ductile iron can be determined. This method is fast and applicable in practice.

The application of adaptive systems in the management of production and in the support of decision-making represents an alternative method that can be used for a wide range of problems. Using the expert system or the “Foundry technology” databank enables us to classify casting defects on the basis of their outer characteristics, find the optimum production technology, predict mechanical properties and defects, calculate production costs and prices of castings, etc.

Employing the QFD method for competitiveness assessment makes it possible to shift the detection of defects to the stage of planning, where the cost of any changes is substantially lower. The significance of QFD for exacting castings consists in the first place in the possibility of responding quickly to changes in customers' wishes.

For foreign and some Czech customers the price is no longer the main consideration. Regarded as most important are quality, manufacturing experience, meeting the delivery terms, long-term reliability, on-going innovation, and application of new factors. All this is of utmost importance for foundries that manufacture for or supply the automobile industry. Some foundries (MOTOR JIKOV a.s, SKODA AUTO as. Mlada Boleslav, etc.) combine their own development activities with the cooperation with universities, institutes of the Academy of Sciences of the Czech Republic or other research establishments in an effort to improve their sales schemes, the development and the application of new factors with the aim of being more competitive.

ABOUT THE AUTHOR

Assoc. Prof. Jaroslav ČECH, MSc, PhD, was born on September 6, 1942, in Týn nad Vltavou. In the years 1964 and 1965 he worked as student assistant in the Department of Foundry Engineering (Head Prof. Vetiška). He graduated from the Faculty of Mechanical Engineering of the then Technical University of Brno in 1965. After graduating he started working as an assistant in the above Department. Since 1968 he has been involved in the research work of the Department. In 1973 he submitted his Candidate-of-Sciences (PhD)



dissertation but for political reasons the defence of the dissertation was allowed only in 1977. This work was concerned with the solution of problems encountered in the measurement of residual stresses in grey iron castings. In 1977 he took up teaching and was appointed assistant professor. For political reasons he was not appointed associate professor until the end of 1989, when he was appointed associate professor for the field of engineering technology. He habilitated in 2001 with his dissertation on “Optimizing the manufacture of iron castings with the aim of improving their quality”. As a result of public competition, he was appointed Head of the Dept. of Foundry Engineering in 1991. In 1994, again after open competition, he was appointed Director of the Institute of Materials Engineering and held this office till 2000.

In his activities at the FME of BUT he has been engaged in giving lectures and exercises in subjects in the field of quality inspection of castings, metrology, technical measurements, quality management, statistical management in foundries for the study streams of technology, foundry technology and materials engineering. As part of his work at the Faculty he has supervised the work of diploma students and undergraduates involved in research work. He has also supervised the work of doctoral students in the field of foundry technology (5 of them have obtained the PhD degree, 4 are still studying).

All the time that he has been at the Faculty he has cooperated with the industries (60 research reports). In the 1970s and 1980s he was a co-author of the solutions of a number of National Research assignments in the area of fundamental research. In the 1990s he was involved in the solutions of GACR and international projects (KONTAKT, TEMPUS, Volkswagen foundation). He was the responsible researcher in 4 successfully completed grant projects. He has also participated in putting into existence a laboratory for measuring residual stresses, temperatures, and for ultrasound measurement.

He is the chairman of a committee for State final examinations for the field of foundry engineering at FEM of BUT and vice-chairman at the Technical University in Liberec. Since 1993 he has been the chairman of the national technical committee for Quality Management, since 1996 a member of the

national certification authority for the eligibility of persons working in metrology, a member of the assessor committee of the Ministry of Industry and Trade of the Czech Republic for the area of projects offered by this ministry. Since 1993 he has been a member of the International Committee of Foundry Technical Associations, Section 8.1 – Composites, and since 1998 Section of Computer Simulation of Casting Processes.

He has published over 240 papers in international journals, Czechoslovak scientific journals and in the form of conference papers and posters (over 70 of them at international events).

At FME he currently lectures in the following subjects: Engineering metrology (3rd year + pre-MSc-study year, Technical measurements (2nd year of BSc studies), Statistical quality management + FMEA (3rd year of BSc studies), Quality and metrology (4th year), Statistics and planning of experiments (4th year), Quality management and inspection (5th year), Statistical evaluation of technological processes (5th year).