

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
Ústav materiálového inženýrství
Odbor slévárenství**

Doc. Ing. Jaroslav Čech, CSc.

**OPTIMALIZACE VÝROBY LITINOVÝCH ODLITKŮ
S CÍLEM ZVÝŠENÍ JAKOSTI**

Teze habilitační práce



Brno 2001

© 2001 Jaroslav Čech

ISBN 80-214-1881-8

ISSN 1213-418X

OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA	4
1. ÚVOD	5
2. ŘEŠENÍ TEPLOTNÍCH POLÍ A PRUBĚHU TUHNUTÍ V ODLITCÍCH	10
2.1. Matematicko-fyzikální rozbor řešení teplotních polí	11
3. STANOVENÍ DOBY CHLADNUTÍ ODLITKŮ VE FORMÁCH.....	12
3.1. Stanovení doby chladnutí pomocí monogramů	12
3.2. Řízené ochlazování.....	14
3.2.1. Řízené ochlazování v průběžné peci	15
3.2.2. Kontrolované chlazení	16
3.2.3. Nucené chlazení.....	16
3.3. Optimalizace režimu litinových odlitků	16
3.4. Stanovení doby chladnutí pomocí výpočtů	22
3.5. Zhodnocení	22
4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	23
4.1. Optimalizace výroby odlitků ze šedé litiny (ČKD Hradec Králové).....	23
4.1.1. Výběr představitelů odlitků ze šedé litiny	23
4.1.2. Měření modulu pružnosti	24
4.1.3. Měření zbytkového pnutí.....	24
4.1.4. Simulace teplotního pole a zbytkového pnutí v porovnání s experimentem.....	26
4.1.5. Diskuse k výsledkům.....	27
4.2. Použití litiny s kuličkovým grafitem pro zvýšení jakosti a lepší.....	27
konkurenceschopnosti našich sléváren	
4.2.1. Použití metody QFD pro hodnocení konkurenceschopnosti odlitků.....	28
ve slévárenství	
4.2.2. Experimentální část	29
5. ZÁVĚR	31
LITERATURA	33
ABSTRACT	37

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Doc. Ing. Jaroslav Čech, CSc. je zaměstnán na odboru slévárenství Ústavu materiálového inženýrství Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Narodil se 6. 9. 1942 v Týně nad Vltavou. V roce 1965 ukončil vysokoškolské studium na Strojní fakultě Vysokého učení technického v Brně a to v oboru Slévárenská technologie. Po ukončení vysokoškolského studia v roce 1965 nastoupil jako asistent na katedru slévárenství.

Od roku 1968 pracoval jako odborný pracovník ve výzkumu katedry slévárenství. V roce 1977 přešel na pedagogické místo odborného asistenta. Kandidátskou práci odevzdal v roce 1973 a z politických důvodů mu obhajoba byla povolena až v roce 1977. Práce se zabývala měřením vnitřního pnutí u odlitků ze šedé litiny. V roce 1989 byl jmenován docentem pro obor strojírenské technologie.

Po celou dobu působení na VUT FSI se zabýval přednášením a cvičením předmětů z oboru kontroly jakosti odlitků, metrologie, technických měření, statistického řízení jakosti, pro specializaci slévárenská technologie, materiálové inženýrství. Systematicky vede diplomanty a studenty v rámci odborné vědecké činnosti. Je školitelem řady studentů v doktorském studijním programu (v současnosti 5).



V 70. a 80. letech řešil řadu státních výzkumných úkolů v oblasti základního výzkumu a v 90. letech se zapojil do řešení grantů GA ČR a do mezinárodních projektů (česko-slovenská spolupráce, Volkswagenova nadace). Je úspěšným řešitelem 2 dokončených grantových projektů. V současné době řeší 2 projekty. Podílel se na vybudování laboratoře pro měření vnitřního pnutí a ultrazvuková měření.

Pracuje jako předseda komise pro státní závěrečné zkoušky na odboru slévárenství VUT FSI v Brně a jako místopředseda na Technické univerzitě v Liberci.

Od r. 1993 je předsedou odborné komise Řízení jakosti od r. 1996 členem certifikačního orgánu pro způsobilost pracovníků pro metrologickou činnost, člen hodnotitelské komise Ministerstva průmyslu.

Je členem od roku 1993 International Committee of Foundry Technical Associations, část 8.1 Composites, od r. 1998 Computer Simulation of casting Processe.

Celkem publikoval okolo 230 článků v časopisech, příspěvků ve sbornících a na konferencích (z toho přes 70 na mezinárodním fóru).

1. ÚVOD

Bez ohledu na konkrétní obor lidské činnosti v průmyslové nebo řemeslné oblasti platí neúprosné konkurenční prostředí, které klasifikuje každého výrobce a výrobek podle splnění tří hlavních kritérií dodávek: vysoké kvality, nízké ceny a dodržování krátkých dodacích lhůt. Možnost úspěšně splňovat tato kritéria obecně vede ke zlepšování a modernizaci technologií, zpřísnování kontrolních operací (např. zavádění norem ISO), zvyšováním úrovně a zodpovědnosti práce každého pracovníka, k lepšímu využívání pracovní doby apod. Pro každý výrobní obor existuje řada specifických způsobů naplňování zmíněných kritérií a v rámci i stejného oboru existují různé úrovně a schopnosti jednotlivých výrobců.

Jedním z typických oborů, kde existují poměrně značné rozdíly a možnosti jednotlivých výrobců je výroba odlitků, která obecně představuje nezanedbatelnou část - cca 25 % - výroby součástí kovozpracujícího průmyslu.

Jejich užitná hodnota je dána konstrukčním návrhem, zvoleným materiálem a technologií výroby. Kvalitou odlitku z hlediska slévárenského se rozumí zejména dosažení požadovaných materiálových vlastností, rozměrové a tvarové přesnosti, povrchové kvality a vnitřní homogenity odlitku.

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).

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 mezinárodního výzkumného projektu [1] dále prohlouben a doplněn o zkušenosti českých slévárenských odborníků [2]. Konstruktér dostane počítačově zpracované informace pro pracovní kroky:

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

kteře 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.

Slévárenství jako obor prodělalo jenom v tomto století mimořádně rychlý vývoj od úrovně výroby řemeslného charakteru založené na pouhém předávání zkušeností až po vysoce organizovanou výrobu založenou na znalosti a vědecké aplikaci funkce přírodních zákonů.

Tak jako 50. a 60. léta znamenají ve slévárenství mohutný nástup uplatňování nových technologií a formovacích a jádrových materiálů, v oboru modelářském nové nároky na výrobu, vlastnosti a kvalitu modelového zařízení, ocitáme se za poslední desetiletí koncem

80. let opět v období výrazných změn - začínají se čím dál více uplatňovat možnosti výpočetní techniky při výrobě odlitků, a to počínaje konstrukčními kancelářemi přes slévářskou přípravu výroby, výrobu modelových zařízení, až ke konečným operacím kontroly odlitků a tepelného zpracování s následným třískovým obráběním.

Počítačová simulace slévářských technologických a metalurgických procesů doznala celosvětově zejména v posledních deseti letech mimořádně silný pozitivní vliv na rozvoj slévárenství, na výslednou kvalitu odlitků, pohotovost rozhodování a řešení technologických problémů, na systematické odstraňování technologických chyb a vad, zkracování přípravných i výrobních časů, na snížení výrobních nákladů a zvýšení konkurenceschopnosti celého oboru i jednotlivých technologií a sléváren, pro obor slévárenství je aplikace simulačních technologií revolucí [3]. Obecněji lze počítačovou simulaci označit také jako vysoce účinný nástroj optimalizace procesů a dějů, technologických zařízení a nakonec i organizace práce. Přestože řada simulovaných řešení dílčích úloh a některé metody jsou známy již několik desetiletí, současné průmyslové využití simulačních technologií bylo možné teprve po vývoji a nasazení moderních výkonných počítačů, které splňují nároky jak na rychlost tak i na objem paměti a významně tak zvyšují možnosti paralelních variantních řešení i složitých úloh.

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 (Face-to-face-Videoconferencing) a konkrétní bezprostřední práci s výkresy, daty, obrázky, diagramy dle zásady "obrázek řekne více než tisíc slov" [4] 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 vnitřních 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 [5-8]

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.

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. Takový názor byl opodstatněný do značné míry ještě v 60. letech, kdy se již začalo používat pro řešení některých úloh nestacionárního přenosu tepla a hmoty alespoň analogových počítačů [9]. Následující léta pak přinesla jak vývoj a aplikaci nových výkonných číslicových počítačů, tak i propracování a zdokonalení metod řešení složitých diferenciálních rovnic simulačními technologiemi - nejdříve pro řešení podmínek napjatosti a v návaznosti na to i podmínek tuhnutí a chladnutí odlitků a postupně dále i vytváření struktury, vlastnosti a vzniku vnitřních pnutí vlivem změn.

Dnes nacházíme na evropském trhu celkem 8 až 10 různých softwarových balíčků, které dávají uživateli možnosti řešení různých úloh a stále se inovují, doplňují, rozšiřují a modernizují.

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 vnitřních 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 (newtonské, 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.

Zpravidla umíme definovat na první pohled jednoduché fyzikální závislosti, např. proudění kapaliny rovnicí kontinuity a Navier-Stokesovým zákonem o zachování hybnosti, tuhnutí a chladnutí Fourierovou rovnicí pro přenos tepla a hmoty, úroveň zbytkových či vnitřních pnutí zákony mechaniky tuhých těles při elastické i plastické deformaci apod. S tím je spojeno i stanovení výchozích a okrajových podmínek. Naopak stanovení hodnot fyzikálních a mechanických vlastností všech zúčastněných materiálů na teplotě bývá nejobtížnější úkolem a nedostatek věrohodných a výstižných údajů bývá nejčastěji příčinou rozdílů mezi výsledky simulace a reálných experimentálních hodnot.

Hlavním cílem numerické simulace ve slévárnách je vytvoření podmínek „bezchybné výroby“ a podstatné redukce zkoušení „střílením“ s nejasným výsledkem „zásah-omyl“. Tento proces ověřování technologičnosti konstrukce odlitku i navrženého technologického řešení lze zpřesnit, zkrátit a zlevnit „studným odléváním“ právě pomocí výpočetních programů v rámci systému Simultaneous Engineering. Technologovi prostorové (3D) znázornění dějů i znázornění v libovolném řezu (2D) s možností otáčení a překlápění obrazu v barevném provedení umožňuje velmi přesné a názorné posouzení průběhu děje v prostoru a čase, zvolit a posuzovat variantní řešení, příp. navrhovat úpravy tvaru či rozměrů odlitku ještě před výrobou geometrického modelu a před výrobou prototypových vzorků či nulté série. Totéž se týká konstrukce a dimenzování vtokové soustavy na základě studia nasimulovaných teplotních křivek, oblastí ukončeného tuhnutí apod.

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 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 [10].

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 [10,11,12]. Simulace chladnutí umožňuje stanovení režimu uvolňování odlitků již během zakázkového řízení a tím umožňuje s dostatečným předstihem plánovat i organizaci vlastní výroby.

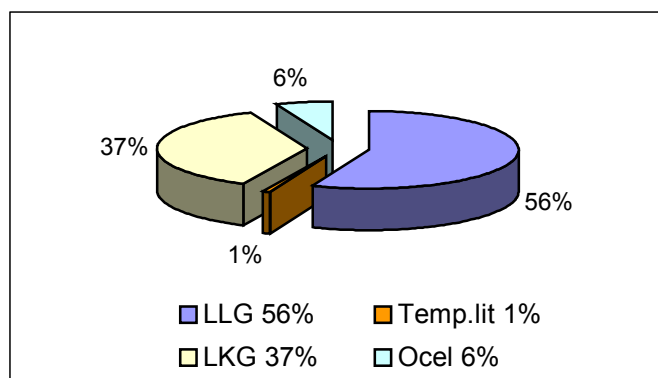
Podle zprávy mezinárodní komise CIATF (7.1. a 7.4.) z roku 1993 se žíhání odlitků ze šedých litin, v celosvětovém měřítku na odstranění zbytkového pnutí, provádí v současné době asi u 30 % vyráběných odlitků. Toto představuje velké energetické a časové nároky. Požadavky odběratelů se velmi často různí 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. Velmi zajímavé je porovnat si průběh výroby jednotlivých slitin železných kovů, litiny s kuličkovým grafitem, temperované litiny a oceli na odlitky [13].

V období 1994-1998 množství odlitků z LLG vzrostlo o 13,8 %, množství odlitků z LKG o 23,11 %, poklesla temperovaná litina o – 9,15 % a oceli na odlitky o – 0,2 %.

TAB. č. 1: Výroba odlitků ze slitin železa v 1000 tunách v zemích střední Evropy

	1994	1995	1996	1997	1998	1998	98/97	98/97	Skladba %
LLG	5665,3	6149,8	5824,8	5910,4	5939,2	6447,9	0,49	9,09	56,69
LKG	3262,6	3540,4	3445,1	3662	3854,6	4016,8	5,26	9,69	36,79
Temperovaná litina	157,4	161,6	118,6	113,3	117,2	143	3,44	26,21	1,12
Ocel	648,9	682,1	647,7	640,6	565,3	647,5	-11,75	1,08	5,40



Obr. č. 1: Poměr jednotlivých druhů železných slitin v roce 1998

Procentuální rozdělení jednotlivých druhů v roce 1998 je na obr. č.1. Ve SRN vzrostla výroba odlitků z LLG o 5,7 %, ve Francii o 4,1 %, Velká Británie a Itálie měla pokles. Podíl odlitků z LKG z celkového množství železných slitin v jednotlivých letech soustavně roste.

Statisticky je roční výroba odlitků ve světě vykazována v objemu cca 61 milionů tun. Země střední Evropy se svou výrobou 13,66 mil.tun činí asi 22,4 %. USA se podílí na světové výrobě 23,6%. Z hlediska České republiky s výrobou 0,53 mil.tun ročně, tedy podílem necelých 3,9 % objemu výroby odlitků střední Evropy se jedná o nesmírně rozsáhlou oblast uplatnění našich výrobků. Existuje však doposud hluboká propast mezi produktivitou v t / pracovník / rok. Tabulka č.2 ukazuje vývoj výroby odlitků v ČR od r.1989-1998.

TAB. č. 2: Výroba odlitků v ČR v tis. t / rok

	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
LLG	733	682,1	449,4	341,1	257,5	360,6	397,53	369,86	336,39	348,36
LKG	35,9	35,1	11,9	10,5	13,6	21	21,19	22,75	25,51	26,61
Temp. litina	31,3	27,2	18,4	15,2	12,9	10,4	10,9	12,12	10,92	11,61
Litina celkem	800,2	744,4	479,7	366,8	284	392,1	429,62	404,73	372,82	386,58
Ocel	253	231,8	155	101,5	96,4	81,3	98,04	103	96,34	106,42
Železo Celkem	1053,2	976,2	634,7	468,3	380,4	473,4	527,66	507,73	469,16	493
Lehké slitiny	53,4	50,9	28,7	20,6	22,4	21,7	29,33	30,89	35,25	41,28
Ostatní	8,6	6,8	4	2,5	3,3	3,3	3,22	3,12	3,44	3,5
Celkem	1115,2	1033,9	667,4	491,4	406,1	498,3	560,21	541,74	507,85	537,78

Hlavním záměrem této práce je stanovení optimální doby chladnutí odlitků ze šedé litiny ve formách. Pro řešení tohoto problému je třeba vyjasnit řadu teoretických a technologických otázek. Je třeba ukázat na vzájemný vztah mezi dosud prakticky uskutečňovanými měřeními teplotních polí reálných odlitků pomocí zabudovaných termočlánků a snímáním časového průběhu změn teplot v jednotlivých charakteristických bodech odlitku, paralelní simulací tuhnutí a chladnutí a srovnáním obou výsledků doplnit na jedné straně databázi simulace o ověřené hodnoty vlastností a na druhé straně doplnit obraz teplotního pole odlitku o charakteristiku teplotních poměrů u bodů, které přímo měřeny nebyly.

Tyto výsledky pak umožní nejen optimální návrh hospodárné technologie určením správné konstrukce, rozměrů, tvarů a polohy vtokové a nálitkové soustavy, ale dále obohatí zkušenosti a rozšíří databázi, příp. i nutnost úprav některých podprogramů stávajících softwarů. Podobně

i rozbor jednotlivých metod tepelného zpracování odlitků ze šedé litiny ve srovnání s parametry řízeného ochlazování [14,15] a naměřenými hodnotami výsledných zbytkových pnutí nebo deformací přispěje k tomu, abychom mohli technicky na vyšší úrovni a přesněji rozhodovat o tom, zda žíhat či nežíhat. Lze konstatovat, že plný rozsah úloh pokrývají dva u nás nejrozšířenější systémy SIMTEC a MAGMASOFT, které jsou též zajištěny dostatečně školícími i poradenskými centry v České republice. Oba systémy jsou koncipovány modulárně a každý z nich se může vykázat svými zcela specifickými aplikacemi [16-18]. V práci byl použit celý programový systém SIMTEC, částečně i MAGMASOFT.

Možnosti využít simulační programy mění slévárství nejen vnitřně, ale také navenek z hlediska vnímání oboru ostatní strojírenskou či technickou veřejností. Simulace tuhnutí, která byla v oboru výroby odlitků zpracována 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 slévárský 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 [3].

Práce ukazuje také i možnost lepšího řízení jakosti v oblasti sléváren. Sledování a pravidelné hodnocení řady dílčích veličin přispívá k optimální technologičnosti odlitku, hospodárné výrobě a ve svém komerčním efektu k lepší konkurenceschopnosti odlitku (uplatnění QFD) a lepšímu uplatnění našich sléváren na světových trzích.

2. ŘEŠENÍ TEPLOTNÍCH POLÍ A PRŮBĚHU TUHNUTÍ V ODLITCÍCH

Řešení teplotních polí odlitku a formy je jedním ze základních problémů slévárské teorie a praxe.

Tuhnutí a chladnutí odlitku a současný ohřev formy je případ nestacionárního sdílení tepla a hmoty. Exaktně je termokinetika soustavy odlitek - forma - okolí neřešitelná. V současné době je tato úloha zvládnutelná jen za zjednodušujících předpokladů a to, že ze tří možných přenosů tepla (vedením, prouděním a sáláním) uvnitř soustavy je rozhodující vedení tepla. V tomto případě mají naději na úspěšné řešení jen metody numerické, popř. analogové.

V současné době s rozvojem metody konečných prvků se ukazují další možnosti sledování teplotních polí i sledování průběhu tuhnutí a chladnutí odlitků ve formách.

Z celé řady prvních řešení složité úlohy nestacionárního sdílení tepla je nutno vyzdvihnout výsledky práce CHVORINOVA [19,20], který s plným respektem k dřívějším řešením SCHWARZE, CARSLAVA, NEUMANNA a dalších postuloval svůj velmi jednoduchý zákon druhé mocniny pro popis procesu tuhnutí odlitků a ingotů a vytvořil tak výchozí podmínky pro směry řešení dalších autorů. Ve slévársky orientovaném směru pokračovali a vypracovali svá specifická řešení GIRŠOVIČ a NECHENDZI [21,22] včetně realizovaných dílčích řešení hydroanalogovou metodou [21], VEJNIK [23-27] a ANISOVIČ [28] se specifickou zjednodušujících náhradních křivek a řešením teplotních polí kombinovaných stěn forem, HALBART [29], WLODAWER [30] se specifickým pojetím funkce velikosti a tvaru odlitků a jeho částí, FLEMINGS [31] nebo analyticky GOODMAN [32]. U nás se uvedenou problematikou zabýval PŘIBYL [33-35] s další orientací na nalitkování odlitků a pnutí, dále pak pokračovali HAVLÍČEK [36,37], JELÍNEK [38,39] a se specifickým zaměřením na litinové odlitky a vyústěním až do technologické aplikace na optimalizaci chladnutí a minimalizaci pnutí EXNER, ČECH [14,15,40-46] a MEDEK[47].

2.1. Matematicko-fyzikální rozbor řešení teplotních polí

Ovládnutí teplotního pole odlitku a formy popř. jádra je velmi důležitým procesem při utváření odlitku požadovaných vlastností, tvarů, rozměrů i kvality jejich povrchu.

Tuhnutí a chlazení odlitku a současný ohřev formy je z hlediska nauky o sdílení tepla a hmoty dějem velmi komplikovaným a v obecné míře jde o případ nestacionárního prostorového sdílení tepla a hmoty.

Jak je obecně známo, nestacionární vedení tepla v odlitku a slévárenské formě popisuje parciální diferenciální Fourierova rovnice, která matematicky představuje popis časové změny teploty v libovolném místě tělesa, vyvolané přenosem tepla a působením vnitřních zdrojů energie. Detailnější popis této problematiky je uveden v práci habilitanta.

Podarí-li se při řešení Fourierovy rovnice správně formulovat okrajové podmínky, pak lze očekávat úspěšnost jejího řešení. Řešení Fourierovy diferenciální rovnice v trojrozměrném prostoru představuje značné výpočetní překážky, a proto tam kde je to jen trochu možné, převádíme prostorový (trojrozměrný) problém řešení sdílení tepla na problém jednorozměrný, popř. dvojrozměrný (plošný). Pak uvažujeme ostatní rozměry nekonečně velké a ke sdílení tepla v nich zanedbáváme. Současně se řešení zjednoduší, pokud uvažujeme těleso, ve kterém sdílení probíhá, jako homogenní izotropní.

Pokud jde o aplikaci rovnice na slévárenské poměry, především na přenos tepla mezi odlitkem a formou, nejsou v tomto formulovaném problému zahrnuty tak důležité činitele, jako je např. konvekce tepla v kovu, popř. vliv mezery mezi odlitkem a formou, která ovlivňuje intenzitu přestupu tepla. Též velkou potíží při řešení rovnice jsou parametry (a - teplotní vodivost, c - měrná tepelná kapacita, α - součinitel přestupu tepla, λ - tepelná vodivost), které jsou funkcí teploty, popř. času. Vliv času se uplatňuje při přenosu při nevratných fyzikálních nebo chemických změnách tělesa.

Při řešení Fourierovy diferenciální rovnice uvažujeme teplotní závislost teplotní vodivosti, pak je třeba pro řešení zavést pomocnou proměnnou. Podobný problém je při zahrnutí teplotní závislosti měrné tepelné kapacity; popř. při zahrnutí skupenského tepla.

Tyto vlivy lze pak obtížně zabudovat do matematické formulace dané problematiky a jejich účinek se spíše odhaduje na základě rozdílu mezi hodnotami získanými řešením zjednodušujících rovnic a mezi hodnotami skutečně naměřenými.

Pracnost exaktního matematického řešení Fourierovy diferenciální rovnice způsobila, že se ho používá zcela výjimečně a začala se dávat přednost empirickému řešení.

To např. pro oblast tuhnutí odlitků ve slévárenské formě již v 50. letech rozpracovali CHVORINOV [20], VEJNIK [23], RUDDLE [48]. Postupem času byla též vypracována metoda fyzikální podobnosti, kdy bylo snahou charakterizovat zkoumaný jev pomocí bezrozměrných čísel (jako je např. Reynoldsovo číslo, které charakterizuje proudění; Fourierovo číslo, které charakterizuje přenos tepla vedením atd.).

Analytické a zjednodušené metody řešení termokinetiky tuhnutí jsou uvedeny v práci habilitanta.

Pro vlastní experimentální řešení byl především využit program SIMTEC. Použitý programový systém SIMTEC (SRN) spolu s programem SIMTEC PROCAST (USA) se vedle softwaru MAGMASOFT řadí k současným nejlepším programovým systémům používaných ve slévárenství.

Vedle matematického propracování modelového programu - tj. rozpracování metody konečných prvků jsou též velmi důležité i hodnoty tepelně-fyzikálních veličin (dat) potřebné k úspěšné simulaci sledovaného procesu. Hodnoty tepelně - fyzikálních veličin obsažených v programu SIMTEC (prostřednictvím databanky) jsou proti některým hodnotám uváděným v literatuře odlišné. Proto je nutné zpřesňování a úprava databanky pro jednotlivé materiály měřením jednotlivých veličin v závislosti na čase.

Určitým přínosem je, že nejnovější verze SIMTECu obsahuje užití přechodových odporů. Nevýhodou tohoto programu je, že při simulaci teploty líce formy jsou simulované teploty poměrně vysoké a experimentální a vypočtené odpovídají spíše teplotám povrchu odlitku. Naopak je tento program schopen nasimulovat i průběh vzniku mezery mezi tuhoucím odlitkem a slévárenskou formou.

Metoda konečných prvků se dá použít pouze při řešení problémů, které se dají formulovat variačně. Přibližné řešení takových problémů metodou konečných prvků je jednoznačně výhodnější než jejich přibližné řešení metodou sítí. Při aplikaci metody konečných prvků se totiž aproximuje variační problém, kdežto při aplikaci metody sítí příslušná diferenciální rovnice.

Důsledkem této skutečnosti je, že metoda konečných prvků si bez obtíží poradí i s velmi složitou geometrií oblasti, ve které je problém řešen; navíc se dělení oblasti na prvky snadno zjemňuje, a to i lokálně. V metodě sítí užívání nepravidelných sítí a jejich zjemňování představuje většinou neřešitelné potíže.

Okrajové podmínky, ať hlavní či přirozené, nebo změna materiálových vlastností nečiní v metodě konečných prvků žádné potíže, kdežto v metodě sítí je aproximace přirozených okrajových podmínek (tj. podmínek, ve kterých se vyskytují derivace) komplikovanou záležitostí.

V případě časově závislých problémů, které se dají formulovat variačně (např. počáteční okrajový problém rovnice pro vedení tepla), je nevhodnější při přibližném řešení variačního problému používat kombinaci metody konečných prvků a diferenční metody; v prostoru užíváme metodu konečných prvků a v čase diferenční metodu (tj. metodu sítí v jedné proměnné). Pouhé užití metody sítí při aproximaci příslušné diferenciální rovnice je ještě méně výhodné než v případě stacionárních problémů.

3. STANOVENÍ DOBY CHLADNUTÍ ODLITKU VE FORMÁCH

Stanovení optimální doby chladnutí odlitků ve formách má pro výrobu odlitků velký význam. Pro řešení tohoto problému je třeba vyjasnit řadu teoretických i technologických otázek. Chtěl bych se především zaměřit na některé možné způsoby uvolňování odlitků ze šedé litiny z forem s cílem dosažení minimálního pnutí, rozměrové stabilizace, optimálních mechanických vlastností, minimálních vad.

3.1. Stanovení doby chladnutí odlitků pomocí nomogramů

Pro stanovení doby setrvání odlitků ve formě byla sestrojena řada nomogramů. Patří k nim např. nomogram Vasilevského (obr.č.2), který vychází z třídění odlitků do skupin podle geometrického tvaru (charakteristického rozměru).

- První skupinu tvoří odlitky deskovitého tvaru

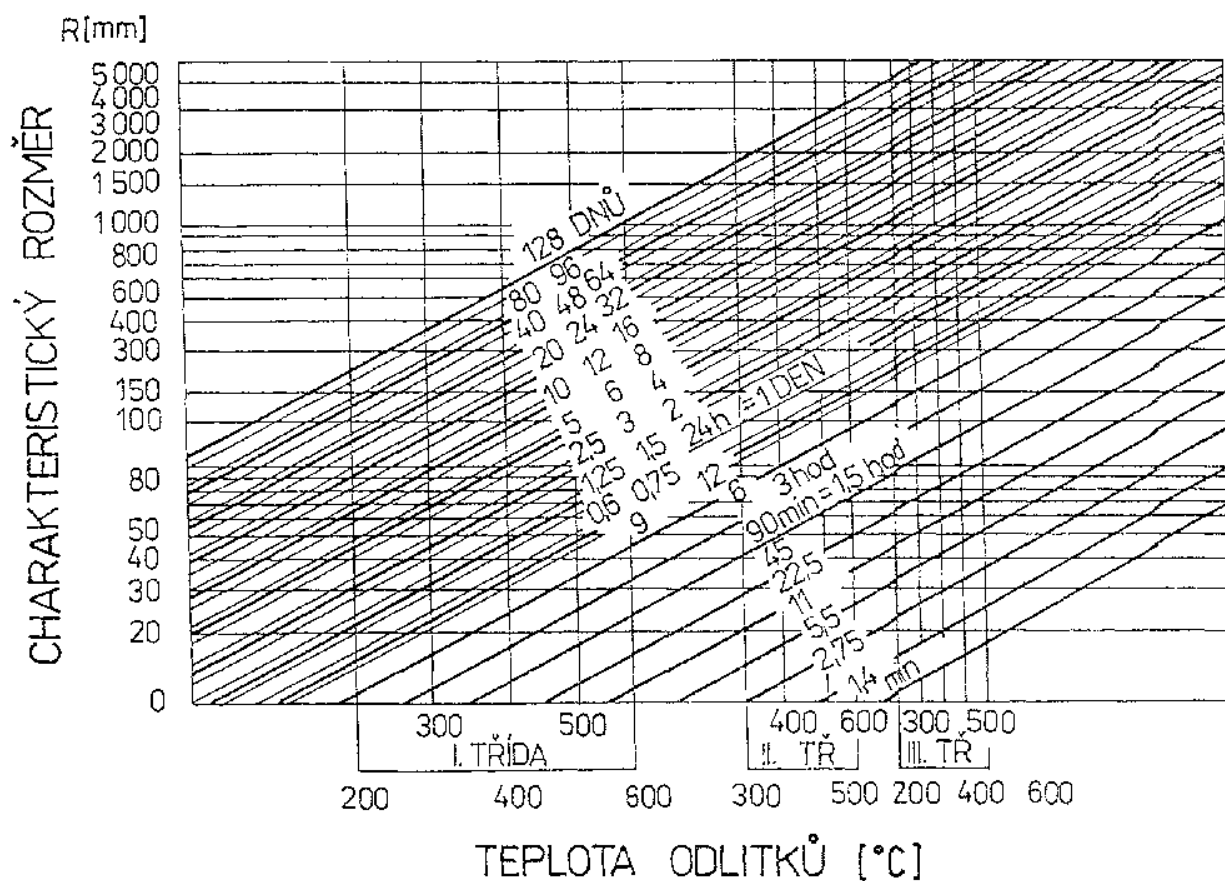
$$\text{relativní tloušťka } R = \frac{1}{2} \text{ tloušťky desky [m]} \quad (3.1.)$$

- Druhou skupinu tvoří odlitky s jedním převládajícím rozměrem (tyče, roury, hranoly, atd.)

$$R = \sqrt{x \cdot y} \quad [\text{m}] \quad (3.2.)$$

kde x - tloušťka [m]

y - délka [m] (převládající rozměr)



Obr. č. 1 Vasilevského nomogram

- Třetí skupinu tvoří odlitky bez převládajícího rozměru (koule, krychle)

$$R = 3\sqrt{x \cdot y \cdot z} \quad [\text{m}] \quad (3.3.)$$

kde x - tloušťka [m]

y - délka [m]

z - výška [m]

Všechny podobné odlitky jsou pak zahrnuty do tří uvedených skupin, pro něž se volí stejný teplotní interval vytloukání odlitků z formy. (tabulka č.3).

TAB. č. 3

Třída odlitků	Typičtí představitelé
1.	Tenkostěnné odlitky s vysokou povrchovostí, rámy, vodní turbíny, stojany hydraulických lisů, duté válce.
2.	Ozubená kola a věnce, válce a stojany.
3.	Šaboty, koule.

V nomogramu se za minimální a maximální teplotní hranici vytloukání odlitků uvažuje teplota 200 až 600°C. Nomogram neuvažuje různé formovací materiály, je sestaven za předpokladu konstantních tepelných vlastností formovacích směsí

$$\lambda = 45,36 \text{ [W/m} \cdot \text{K]}$$

$$c = 921,14 \text{ [J/kg} \cdot \text{K]}$$

$$\rho = 1850 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

odpovídajících pravděpodobně směsí s jílovým pojivem a křemenným ostřivem. Nomogram je zaměřen na některé druhy ocelí (uhlíkových) a pro šedou litinu ho lze použít jen velmi přibližně.

Řada dalších autorů uvádí různé typy diagramů pro určování doby ochlazování odlitků do teploty vytloukání. Tyto diagramy jsou uvedeny v práci habilitanta.

3.2. Řízené ochlazování

Na rozdíl od metod stanovení doby chladnutí pomocí nomogramů, což je postup více méně „pasivní“ a má hlavní význam zejména při výrobě odlitků velkých hmotností, kdy je v konkrétních případech kombinován s přímým měřením teplot v exponovaných místech odlitku, metody řízeného ochlazování jsou zpravidla aplikovány u odlitků malých až středních hmotností.

Do souboru metod řízeného ochlazování můžeme zařadit

- a) řízené ochlazování v průběžné peci dle MEDKA [47,49]
- b) kontrolované chlazení linkou firmy Klein, Schanzlin a Becker AG [50]
- c) nucené chlazení použitím chladicího tunelu GISAC [51]

Většina metod řízeného ochlazování si dříve kladla za hlavní cíle ekonomické výhody pramenící ve zkrácení průběžné doby tím, že ochlazovací rychlost má být zvětšena teprve po zakončení eutektoidní přeměny (proto i předchozí metody ke stanovení doby chladnutí si jako mezní stav určovaly 700,600 a 500 °C, příp. další nižší teploty). Myšlenkově celý vývoj posunul MEDEK [47,49] návrhem řízeného ochlazování v průběžné peci a to jako speciální způsob a období tepelného zpracování s plným využitím tepla chladnoucího odlitku a tedy s výraznější úsporou nákladů na ohřev.

Všechny uvedené postupy mají jedno společné: ochlazovací rychlost se zvyšuje teprve po zakončení eutektoidních přeměn. Při řízeném ochlazování dochází k úspoře času, energií, mezd a technicky je autory deklarováno i zmenšení vnitřních pnutí a snížení vlivu tloušťky na rozdíly tvrdosti. Zkušenosti EXNERA a ČECHA ukazují, že technických výhod se nedosahuje automaticky ani živelně [14,15].

3.2.1. Řízené ochlazování v průběžné peci

Z porovnání naměřených výsledků se ukázalo, že tento postup je z hlediska snížení pnutí adekvátní žihání [49].

Proces ochlazování v průběžné peci zahrnuje 5 etap viz obr.č. 3:

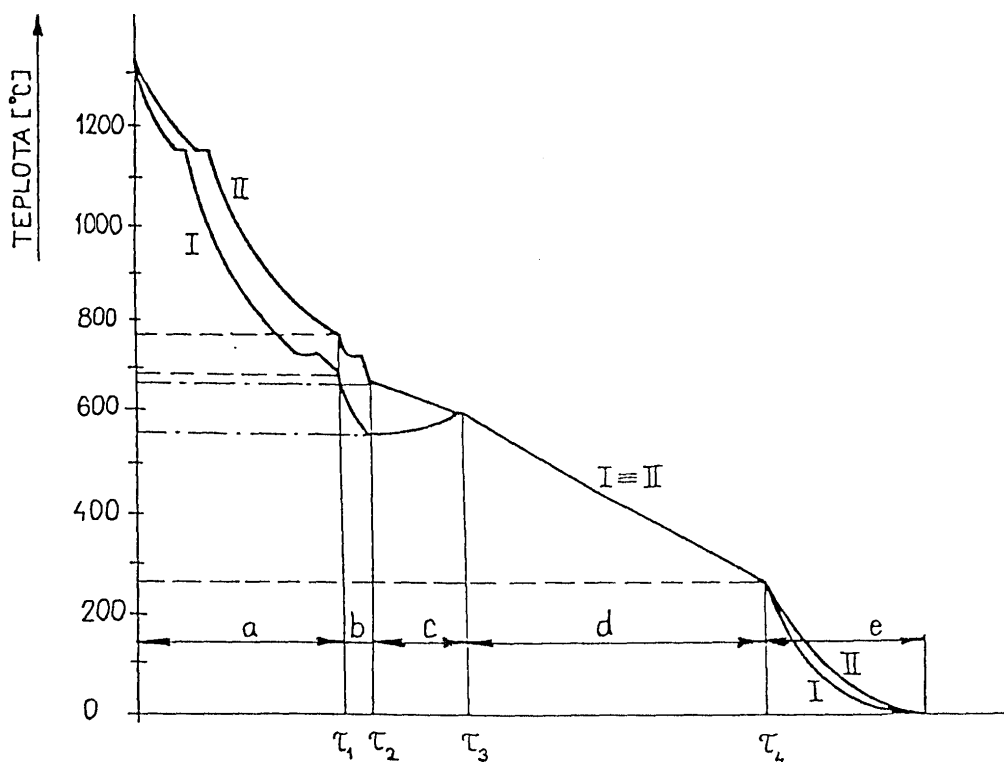
- chladnutí ve formě
- chladnutí na vzduchu po uvolnění z formy
- temperování za účelem tepelné homogenizace
- pozvolné ochlazování v průběžné peci
- volné chladnutí na vzduchu

Kov chladne po odlití až po eutektickou transformaci, tenká část odlitku I rychleji, tlustá část II pomaleji. V čase τ_1 je odlitek uvolněn z formy (a). Část II je v tomto okamžiku nad eutektoidní transformací (cca 770 °C). Ochlazováním na vzduchu se zvýší rozdíl teplot, ale zároveň vlivem plastického přetváření vyrelaxuje pnutí.

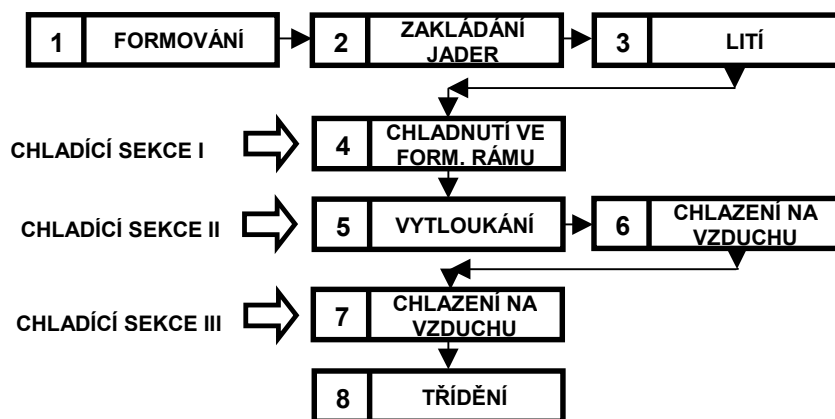
Během manipulace při přemístění do pece chladne odlitek na vzduchu (b). Vlastní pec je rozdělena na dvě části. V první části se vyrovnávají teploty v odlitku - v rozmezí $\tau_2 - \tau_3$ (c). Ve druhé části pece tepelně homogenizovaný odlitek chladne rychlostí 20 - 50°C (h); (d). Rychlost chladnutí je volena tak, aby $\Delta t \rightarrow \lim 0$. Od teploty 300 - 250°C se ochlazuje na vzduchu (e). Rozdíl teplot Δt zde již nemá vliv na zbytkové pnutí.

Nevýhodou tohoto způsobu je nutnost používání průchozí pece, jejíž rozměry a energetický příkon musí být přizpůsobeny určitému typu odlitků a nutnost vyhřívání prvního pásma pece.

Protože vyrovnávání teploty mezi jednotlivými částmi odlitku probíhá dříve, než nejpomaleji chladnoucí část dosáhne elastického stavu, mohou být odlitky citlivé na napětí podrobeny tomuto krátkodobému termickému zpracování, aniž vznikne nebezpečí popraskání.



Obr. č. 3: Proces ochlazování v průběžné peci



Obr. č. 4: Schéma výroby s použitím chladicí linky

3.2.2. *Kontrolované chlazení*

Chladicí linka fy Klein, Schanzlin a Becker AG [50] je navržena pro velikost rámu 700x550x280/280 při taktu 20 sekund. Průměrný výkon činí 4 tuny odlitků za 1 hodinu.

S ohledem na prostorové a cenová omezení je nutno toto zařízení budovat co nejmenší při zajištění kvality a metalurgických požadavků.

Na obr. č. 4 je zachyceno schéma výroby odlitků s použitím chladicí linky. Chlazení začíná pozicí 4. Koncepce se člení na tři sekce chlazení. V první sekci se odlitky ochlazují ve formovacích rámech až do dosažení teploty eutektoidní přeměny, ve druhé probíhá vytloukání a chlazení na vzduchu. Ve třetí se chladí ovládaným přívodem vzduchu. Přídavný vzduchový systém si sám řídí spotřebu vzduchu a ohřátý vzduch se využívá k dalšímu ohřevu.

3.2.3. *Nucené chlazení*

Po dlouhodobých výzkumech bylo ověřeno, že vhodnou volbou parametrů při nuceném chlazení (teplota vytloukání, chladicí prostředky, počáteční teplota nuceného chlazení) lze zkrátit podstatně dobu chladnutí odlitku bez zhoršení jejich vlastností. Nucené chlazení zvyšuje pnutí jen tehdy, jestliže nastane hned po vytloukání a chladicí prostředek působí tak intenzivně, že v odlitku vznikají velké teplotní rozdíly. Jako nejvhodnější se ukázalo vytloukání při 650 °C, chlazení na vzduchu a při teplotě 450 - 400°C intenzivní chlazení vodou rozprášenou v proudu vzduchu.

Tyto poznatky vedly k realizaci vysoce výkonného chladicího tunelu HZK ve VEB kombinátu GISAC [51].

3.3. **Optimalizace režimu chladnutí litinových odlitků**

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 [14,52,53,54].

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 sehrává 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 žíhají 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 žíhání odlitků docházelo pouze ve zvlášť předepsaných 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 žíhání buď ke snížení tvrdosti a současně odstranění zatvrdlých míst, či naopak ke zvýšení tvrdosti.

Konstruktéři 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.

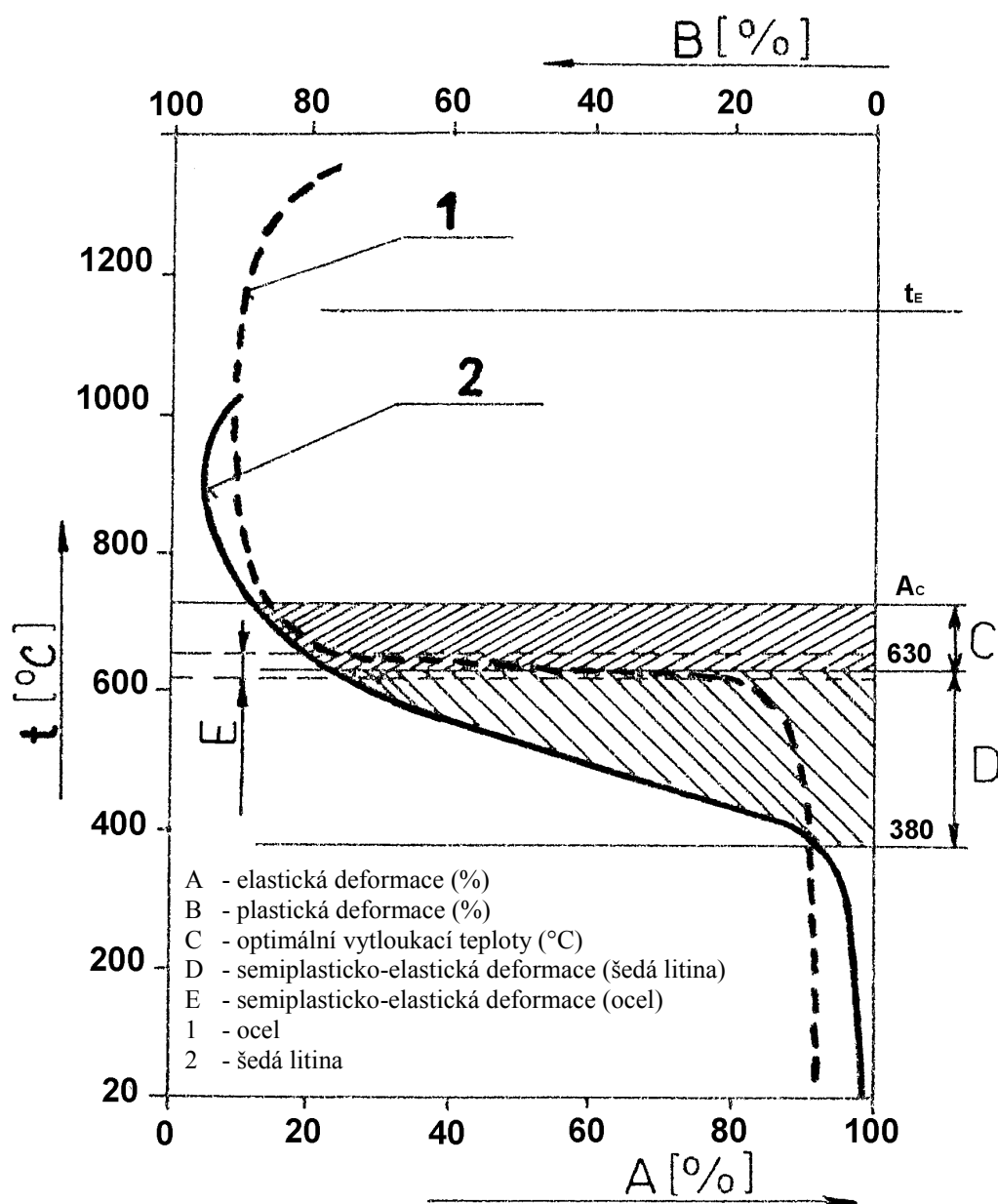
Z vlastní zkušenosti pracovníků slévárenské výroby i vývoje víme, že z hlediska výrobce odlitků by bylo žádoucí nákladnou operaci „žíhání na odstranění pnutí“ pokud možno zrušit, musíme však vyřešit způsob, jak vyrábět odlitky s minimálním zbytkovým pnutím bez rizika snížení jejich výsledné kvality. 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 isotermičnosti konstrukce odlitku volbou rovnoměrného rozložení tloušťek 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 zrovnoměnění 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 isotermičnosti 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. 5) 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.



Obr. č. 5: Závislost elastické (plastické) deformace

Dosud prakticky nejčastějším způsobem snižování zbytkových pnutí u drobných a středních litinových odlitků je žihání na odstranění pnutí, při němž se vychladlé litinové odlitky znovu ohřívají v žihacích pecích na teploty 550 až 600 °C, poblíž horní hranice oblasti semiplasticko-elastických deformací, udržují se na žihací 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. Nejvyšší účinnosti snižování zbytkových pnutí se dosahuje žiháním ohrubovaných odlitků. Nevýhody tohoto způsobu jsou obecně známé - zdlouhavost operace, manipulační problémy mezi slévárnou a strojárnou při hrubování a poměrně značná citlivost výsledného snížení zbytkových pnutí na dosažené teplotě a době žihání. Pro intenzifikaci operace žihání zkrácením žihacího cyklu je možné zvýšit žihací 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 žihání s cílem vytvořit homogenní teplotní pole odlitku i pece. Při překročení žihací teploty 600 °C vzniká nebezpečí nežádoucího výrazného snížení pevnosti i tvrdosti odlitků.

Otázku „žihat či nežihat“ 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 ČECHA [54-58], 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 vyvrtného 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 [15, 59, 60].

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 oceli), 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 překrystalizace $\gamma \rightarrow \alpha$ a při teplotách změn charakteru deformací plastických na semiplasticko-elastické.

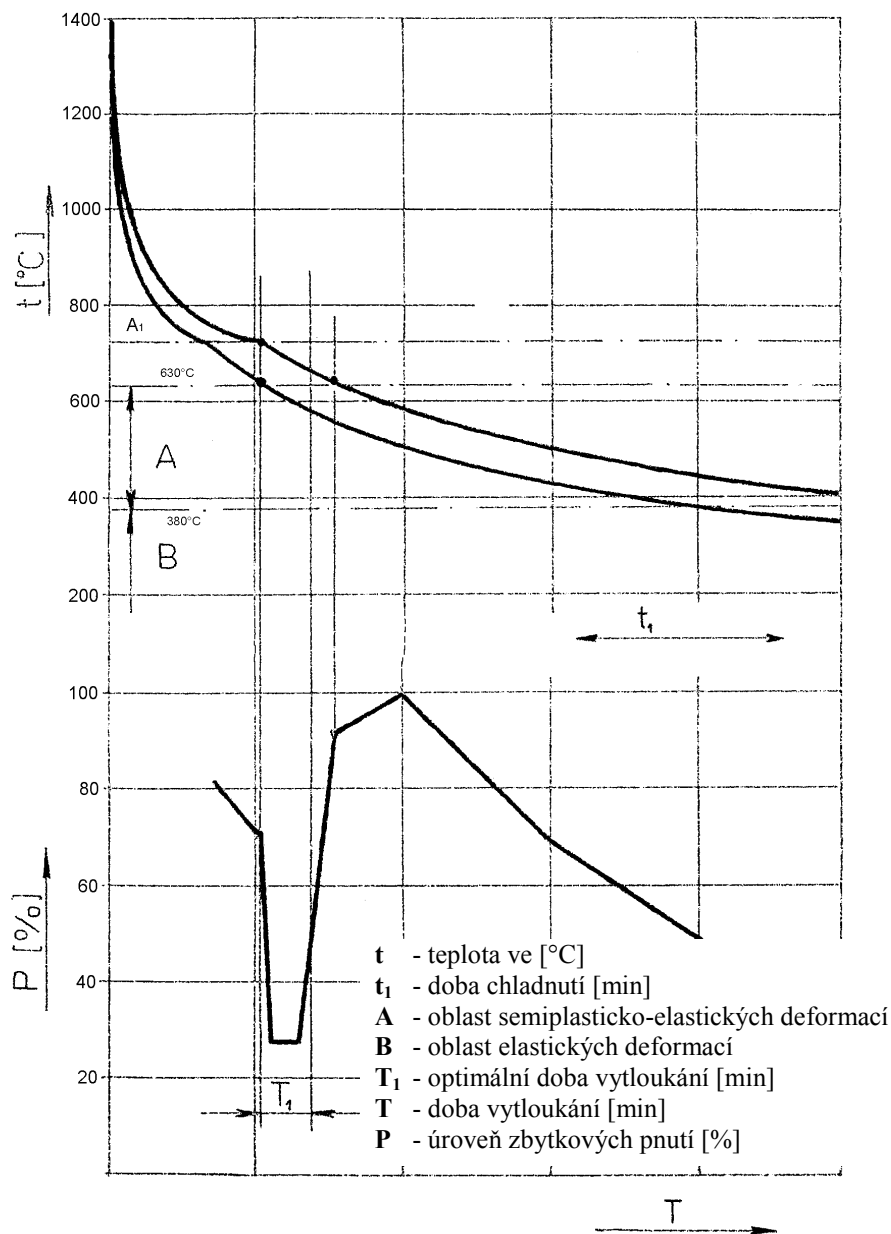
Výsledky vlastních měření na celé řadě odlitků různé složitosti a různé hmotnosti ukázaly, že klíčem k exaktnímu řešení problému je konfrontace výsledků přímého měření zbytkových pnutí a přímého měření změn teplotního pole v závislosti na době od ztuhnutí odlitku ve formě.

Při cílevědomém hledání optimálního režimu ochlazování odlitku k minimalizaci zbytkových pnutí jsme došli na základě vlastních měření k závěru, že při určitém stupni isotermičnosti 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. 6, [15]. 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. č. 6: Závislost doby vytloukání na úrovni zbytkových pnutí

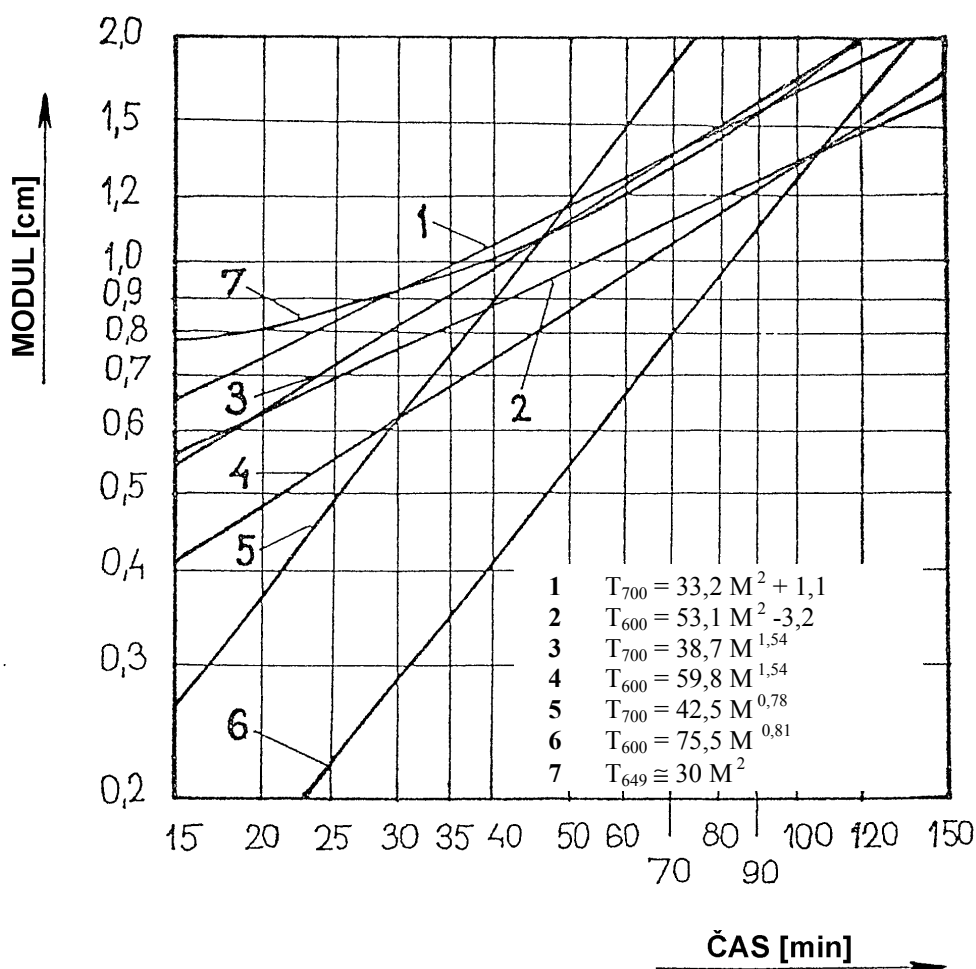
Na základě výsledku těchto měření lze teprve definitivně rozhodnout buď o aplikaci optimálního režimu uvolňování z forem, anebo též o případné úpravě konstrukce či technologie takovým způsobem, aby aplikace optimálního režimu bylo možná bez snížení požadavků na výsledné funkce vlastnosti odlitku.

3.4. Stanovení doby chladnutí pomocí výpočtů

Na základě [61] a z materiálů dokumentačního pracoviště VDG v Düsseldorfu byly vybrány odpovídající výzkumné zprávy a publikace týkající se stanovení doby chladnutí pomocí výpočtů. Soubor literatury doplnil nezávisle na tom shromážděný materiál a neuveřejněná zpráva jednoho z výrobců slévarenských zařízení. Téměř výlučně všichni autoři zjistili, že až do 700°C je určujícím znakem modul $M = \text{objem/povrch}$ [cm]. Doba chladnutí T se vypočítá podle vzorce

$$T = a \cdot M^b \quad [\text{min}] \quad (3.4)$$

kde a závisí na teplotě přiřazené k času a částečně na geometrickém tvaru odlitku (plné nebo duté těleso). Podle této rovnice je u modelu $M = l$ hodnota $a = T$, $b =$ určuje (pro $a = \text{konst.}$) úhel sklonu v logaritmickém měřítku. Výsledky zkoušek různých autorů jsou uvedeny na obr. č. 7. Bližší údaje o těchto pracích a závěrech jsou uvedeny v práci habilitanta.



Obr. č. 7: Výsledky zkoušek dle různých autorů pro stanovení doby chladnutí odlitků litých do pískových forem na základě M , zkušební časové hodnoty pro 600 °C a 700 °C

3.5. Zhodnocení

Stanovení doby chladnutí litinových odlitků ve formách je minimálně stejně obtížný úkol, jako stanovení doby tuhnutí. Různé metody ke stanovení doby chladnutí ve formách však často preferují ekonomická hlediska a méně hlediska technická. Při výrobě menších

a středních odlitků se zpravidla na dobu chladnutí nehledí vůbec a často bývají odlitky vytloukány podle zcela živelného režimu.

Zcela zásadním způsobem řeší celou problematiku postup podle EXNERA a ČECHA, jehož cílem je získání optima struktury a vlastností a minima pnutí litinových odlitků v litém stavu bez následného žihání. Tento postup je provozně praktikován v řadě sléváren, vyžaduje však přísné dodržování technologické kázně a dobré organizační zajištění. Aplikací nového způsobu vyjímání odlitků z forem při teplotách blízkých teplotám eutektoidním se vedle snížení zbytkových vnitřních pnutí na minimum a stabilizace rozměrů v litém stavu docílí současně:

- vzniku struktury matrice s větším podílem perlitu a minimem feritu
- zrovnoměnění matrice a vlastností v různých místech odlitku
- zpravidla zvýšení pevnosti a částečně i tvrdosti, zejména v tlustých průřezech odlitků
- zkrácení doby ochlazování litinových odlitků ve formách na polovinu až třetinu, tj. výrazného zvýšení produktivity formovací linky.

Na základě mnohaleté zkušenosti v aplikaci metody však musím konstatovat, že podle charakteru a složitosti odlitku v některých případech převládá akcent na minimalizaci pnutí

(i když výsledné vlastnosti materiálové nejsou zanedbatelné) a naopak u odlitků jednoduchých a méně náročných převládá akcent na dosažení určitých mechanických vlastností a struktury, resp. jejich dodržení v úzkých tolerancích, např. pro získání minimálních rozdílů v obrobitelnosti – přitom jednoduchý či symetrický tvar odlitku ani nemusí zakládat podněty pro zvýšenou úroveň pnutí.

Ostatní používané způsoby vyžadují náklady na zařízení (pece). Dá se také využít některých výpočtových vzorců u jednodušších typů odlitků. Použití nomogramů pro stanovení doby chladnutí se jeví jako velmi problematické. Odchytky mezi experimentem a údaji v nomogramech jsou velmi rozdílné. Experimentální část práce bude především řešit problematiku optimální doby vytloukání odlitků ze šedé litiny s cílem dosažení minima zbytkových pnutí.

4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V první části práce jsem se soustředil na stanovení optimální doby vytloukání odlitků ze šedé litiny s cílem dosažení minima zbytkových pnutí. Tato problematika byla autorem řešena v celé řadě sléváren ČR – jako např. ŠKODA Mladá Boleslav, Zetor Brno, TOS Hostivař, TAZ Trnava, LIAZ Liberec, SIGMA Hodonín, ČKD Hradec Králové [62-68]. Celý soubor těchto měření představuje řadu výzkumných a vývojových prací v oboru optimalizace výroby odlitků ze šedé litiny. Řada výsledků byla publikována jak na národních, tak i mezinárodních konferencích, uvádím jen některé [69-76], ostatní jsou citovány v dalších pramenech autora. Vybral jsem si pro ukázkou jen jeden kratší přehled měření na vybraných odlitcích z ČKD Hradec Králové [10,67].

4.1. Optimalizace výroby odlitků ze šedé litiny (ČKD H. Králové)

4.1.1. Výběr představitelů odlitků ze šedé litiny

Pro měření byly vybrány odlitky ze slévárny šedé litiny H.Králové – slévárna Platiště a.s. Odlitky byly vybrány tak, aby představovaly průřez sortimentem. Představitelé a některé technické údaje jsou uvedeny v tab. č. 4. Odlévání probíhalo po sériích do pískových forem na syrovo. Společně byly lity odlitky 1-5, 6-10. Doba odlévání každé série byla 3 min.

TAB. č. 4

Číslo odlitku	Označení	Surová hmotnost [kg]	Materiál	Číslo termočlánu	Místo pro měření pnutí	Modul [m]
1	Víko hlavy	36	42 2420	1,2	A,B	0,97
2	Skříň náhonu	25	42 2425	3,4	A	1,32
3	Těleso šoupátkové komory	26	42 2425	5,6	A,B	1,30
4	Hlava válců Š1203	16	42 2420	7,8	A,B	0,99
5	Hlava válců AVIA	40	42 2425	9,10	A,B,C	0,91
6	Těleso čističe oleje	30	42 2420	11,12 (1,2)	A,B	1,05
7	Těleso zvedáku	15	42 2425	13,14 (3,4)	A	1,10
8	Víko	14	42 2425	15,16 (5,6)	A,B	0,52
9	Těleso chladiče	22	42 2420	17,18 (7,8)	A,B	0,86
10	Ložiskové víko	16	42 2420	19,20 (9,10)	A,B	1,08
11	Horní skříň motoru	11200	42 2420	1,2,3,4		

4.1.2. Měření modulu pružnosti

K výpočtu velikosti zbytkového pnutí je nutná znalost E-modulu přímo na odlitku. Pro měření byl použit přístroj K-metr, na kterém byla proměřena skutečná a relativní tloušťka stěny odlitku ve třech místech (byla brána průměrná hodnota) a na základě těchto hodnot byla spočtena relativní rychlost (v_r). Pomocí relativní rychlosti (v_r) byl vypočten E-modul na základě literárních údajů a vztahů odvozeného autorem E_1 [57,60]. Některé rozdíly v hodnotách E-modulu jsou dány i použitým přístrojem (údaje odečítány z ukazatele přístroje).

4.1.3. Měření zbytkového pnutí

V odlitcích vznikají zbytková pnutí jako důsledek místně a časově rozdílného chladnutí odlitku a tím vyvolanými elasticko-plastickými deformacemi. Jejich znalost má velký význam, protože je nutné, aby se zahrnuly spolu s pnutími vzniklými při montáži a provozu do hodnocení o pevnostních vlastnostech konstrukční součásti. Toto se prakticky v žádné naší slévárně neprovádí. Vzniklá situace se řeší až v případě havárie. Zbytková pnutí způsobují značné problémy především u složitých a geometricky komplikovaných odlitků staticky a dynamicky namáhaných nebo při použití různých materiálů kvůli deformaci součásti, která s tím souvisí. Rozhodující vliv na vznik zbytkových pnutí a deformací má konstrukční řešení odlitku. Vady, ke kterým došlo při konstrukci, se často už nedají vykompenzovat ani optimálním způsobem lití. Protože však nejsou zbytková pnutí, jejichž hodnoty mohou dosáhnout až meze kluzu materiálu, známé, vychází se při konstrukčních výpočtech odlitku v drtivé většině případů z nepřipustného předpokladu stavu bez zbytkových pnutí. Ve slévárnách šedé litiny se prakticky bez potřebných znalostí předepisuje operace žihání na odstranění pnutí, i když skutečný stav v podstatě není znám. Znalost velikosti a rozložení zbytkových pnutí má proto značný praktický význam pro chování konstrukční součásti při provozu.

Z toho vyplývá neustále výraznější potřeba zachycení stavů zbytkových pnutí v odlitcích jak měřením, tak výpočetní analýzou. V obou směrech se za posledních dvacet let docílilo značných pokroků, především při simulaci procesů odlévání numerickými metodami, hlavně

metodou konečných prvků (FEM), která umožňuje úplné zachycení jak prostorového teplotního pole, tak také - z toho odvozeného – prostorového stavu zbytkových pnutí i ve složitých odlitcích. Jedna z nejznámějších metod měření zbytkových pnutí je metoda otvoru (vyvrtané díry). Při tomto postupu se na měřeném místě povrchu odlitku vyvrtá malá mělká díra (v našich případech měření \varnothing 6 mm, do hloubky 6 mm), tím se v okolí vývrtu vyvolají maximální zbytková pnutí. Deformace, které tím na odlitku vzniknou, se měří speciálními různicemi nalepenými na měřené místo před vrtáním a těsně obklopujícími vývrt. Při měření se zjišťují změny elektrického odporu tří měřících tenzometrů. Z naměřených změn se dá podle velikosti a směru obou hlavních pnutí σ_1 a σ_2 vypočítat rovinný stav napětí, který byl na povrchu odlitku před vrtáním.

Pro měření byla použita upravená metoda otvoru. Měření pnutí se provádělo pomocí tenzometrické různice M120. Tenzometry byly lepeny lepidlem Hottinger X60, bylo použito kompenzátoru MK 5143. Místa na lepení tenzometrů u měřených odlitků jsou označené velkým A,B,C (tab. 4). Odlitek č.25 byl proměřen ve stavu po odlití, ohrubování. Za spolupráce konstruktérů ČKD H.Králové byly vybrány z hlediska předpokládaného namáhání měřená místa.

Odlitky z hlediska zbytkového pnutí byly proměřeny:

1. Po odlití (odjádrování, otryskání) – odlitky č.1-10
2. Po žíhání na odstranění vnitřního pnutí – odlitky č.3,5,7,9,10
3. Po vibraci – odlitky č.4,6
4. Po žíhání a vibraci – odlitek č.5

Ad 2) Žíhání na odstranění vnitřního pnutí bylo provedeno:

Ohřev 180°C/hod., výdrž 3 hod. na 540°C, ochlazování 100°C/hod., celý cyklus trval 11 hod. Místa pro měření pnutí po žíhání byla volena ve stejných místech jako po odlití.

Ad 3) Vibrace byla provedena v TOS Kuřim vibrátorem VCM3. Vibrování bylo provedeno cyklickým zvyšováním z 0 - 85Hz (odlitek č.4) výdrž 60 s. Celá vibrace trvala u odlitku č.6 - 10 min, a u odlitku č.5 – 5 min. Pnutí bylo měřeno v místech jako po odlití.

Ad 4) Odlitek č.5 byl podroben kombinovanému způsobu snížení pnutí žíhání + vibrace. Místa pro měření byla volena na stejných místech.

Z výsledků měření, které jsou uvedeny v práci habilitanta a v publikovaných pracích vyplývá:

Odlitky ve stavu po odlití mají ve všech místech tlaková pnutí což je pro nás z hlediska namáhání výhodné.

Z měření vyplývá, že obě hlavní napětí se ve všech měřených místech odlitků v litém stavu vyskytují jako napětí tlaková. Co se týká velikosti napětí jde o středně vysoké hodnoty s maximálními hodnotami -257,3 MPa (σ_1 - 3A); - 230,9 MPa (σ_1 - 5C). Měření upravenou metodou otvoru zachycuje určitý objem povrchových napětí (do hloubky 6 mm). Je třeba si uvědomit, že šedá litina snese v tlaku 3 – 4 x více než v tahu.

Po žíhání došlo k určitému snížení tlakových pnutí. Tepelným zpracováním některých vybraných odlitků dojde u většiny odlitků ke snížení pnutí ve směru tlaku (výjimka je odlitek 9B, $\sigma_2 = +54,9$ MPa. Je třeba si uvědomit že, žíhání však bylo prováděno v kontrolované peci, která měla cejchované termočlánky, v provozu většinou pece vykazují daleko horší výsledky (stav, údržba, cejchování).

Po vibraci vnitřní pnutí zůstává zhruba na stejné úrovni, je to dáno pravděpodobně vinou vysokého útlumu vibrace u litiny, případně dojde k mírnému nárůstu.

Při kombinovaném zpracování došlo žiháním k poklesu úrovně pnutí, vibrací k mírnému nárůstu (byl měřen jeden odlitek). Při měření autorem [63] u jiných typů odlitků došlo při použití vibrace k mírnému snížení úrovně pnutí.

4.1.4. Simulace teplotního pole a zbytkového pnutí v porovnání s experimentem

Na základě [67] byla u odlitku č.1-10 nalezena optimální doba vytloukání (pásmo vytloukacích teplot). Běžně v provozu slévárny byly odlitky 1-5 vytloukány asi za 80 minut, 6-10 byly vytloukány asi za 50 min. Je třeba pro každý typ odlitku najít optimální dobu vytloukání a k tomu připočítat určitou manipulační dobu (u našich odlitků č.1- 10 byla zvolena doba asi 5 min.). Tuto dobu vytloukání je možno konfrontovat s výpočtovými vztahy podle modulu M. U velmi složitých a hmotných odlitků nám měření teplotního pole pomocí termočlánků umožní stanovit optimální dobu vytloukání, i když v provozu jsou tyto odlitky ponechány ve formě asi do 200°C a potom jsou vytloukány. U těchto typů odlitků je také obtížné stanovit modul odlitku, takže velmi obtížně můžeme použít výpočtové vztahy. Použití různých druhů nomogramů uváděných v práci ukázalo, že jsou velmi nepřesné, zvláště u hmotných odlitků. U drobnějších odlitků je možno použít některé nomogramy kde se odchylky pohybují v rozmezí 18-30%.

U některých představitelů jsem provedl v habilitační práci výpočet chladnutí na teploty 600 °C, 700 °C a porovnávali jsme je s experimentem. Je třeba si uvědomit, že při proměřování teplotního pole odlitků byly použity jen 2 termočlánky, a že při výpočtu M modulu se dopouštíme také určitých zjednodušení. Pokud jsou měření prováděna u tvarově složitých odlitků (hlava válců a pod.) omezeným počtem termočlánků a stejně omezeným počtem tenzometrických růžic, jsou výsledky ve srovnání se simulací nutně částečně rozdílné. V uvedeném případě nelze zachytit polohu vnitřních žebér nálitků a také průtokových objemů proudícího kovu. Obecně lze říci, že odlitky s jádery mají při stejném modulu delší dobu chladnutí než odlitky bez jader. Z průběhů křivek chladnutí vychází optimální doba vytloukání odlitků v rozmezí teplot tab č. 5.

TAB. č. 5

Číslo odlitku	Optimální doba vytloukání [min]
1	60 – 65
2	70 – 75
3	78 – 83
4	53 – 58
5	59 – 64
6	44 – 49
7	43 – 48
8	17 – 22
9	40 – 45
10	54 – 59

Různé výpočtové vztahy nám mohou pomoci při hledání optima, ale stanovit jednoznačně, která rovnice nejlépe vystihuje skutečné poměry, je obtížné. Je možné nalézt některé rovnice, kde existují minimální rozdíly.

Pro simulaci teplotního pole byli vybráni někteří představitelé odlitků ze šedé litiny (ČKD H.Králové) [10,67]. Na základě dostupných informací o materiálu, formovací směsi, chemickém složení, teplotě, teplotě lití apod. byla provedena simulace pomocí software SIMTEC. Termofyzikální parametry daných šedých litin byly brány z databanky SIMTEC.

Geometrie jednotlivých odlitků, simulační křivky teplotního pole, zbytkové pnutí (chladnutí ve formě, chladnutí z teploty 650 °C na vzduchu) jsou uvedeny přehledně v grantové zprávě ČECHA [10]. Pro ověření bylo znovu proměřeno teplotní pole u tří představitelů (místa pro měření byla volena přibližně ve stejných místech, i když nebyla identická). Na základě nového softwarového vybavení pro výpočet zbytkového pnutí byl proveden výpočet pnutí (chladnutí ve formě cca 4 hod.). Mezi původní výsledky existují určité rozdíly, které jsou dány především volbou místa.

4.1.5. Diskuse k výsledkům

Výpočet teplotního pole

Průběhy křivek teplotního pole vypočtené balíkem počítačových programů SIMTEC jsou poměrně shodné s průběhy křivek experimentálně zjištěných termočlánky. U některých experimentálních křivek došlo při měření k poruše termočlánku při náběhu teploty (1, 5, 16).

V habilitační práci jsou uvedeny odchylky teplot mezi křivkou experimentálně zjištěnou a hodnotami zjištěnými z rovnic při teplotách 600 a 700 °C.

Ukazuje se, že menších rozdílů se dosahuje při vytloukání na teploty 700 °C v souladu se závěry experimentálních prací. Rozdíl mezi simulací na vzduchu (z teplot 650 °C) a experimentální křivkou při teplotě 700 °C dosahuje výrazně vyšších hodnot při simulaci.

Simulaci v kombinaci s experimentálním měřením lze zařadit v rámci konkrétních technologických operací při náběhu nového výrobku (odlitku) a rozhodnout o tom, jak zvolit takt linky chladnutí odlitků s cílem minimalizovat pnutí.

Výpočet zbytkového pnutí

Simulace zbytkového pnutí byla prováděna pro odlitky, které by chladly po celou dobu ve formě a zároveň pro odlitky ochlazované na vzduchu po dosažení teploty cca 650 °C. U některých odlitků nebyl proveden výpočet z důvodu složitosti geometrie a zvýšených hardwarových požadavků.

Z výsledků měření zbytkového pnutí zjištěného tenzometricky a simulací vyplývá naprostá shoda mezi výsledky získanými simulací a experimentálně z hlediska charakteru pnutí (tahové +, tlakové -). Hodnoty zjištěné experimentálně (tenzometricky) dosahují obecně vyšších hodnot, což je dáno charakterem metody (otvor 6mm, hloubka 6 mm). Další rozdíly mohou vyplývat z ne zcela přesné geometrie při simulaci, případně přesné určení místa při vrtání a odečtu hodnoty pnutí při simulaci.

4.2. Použití litiny s kuličkovým grafitem pro zvýšení jakosti a lepší konkurenceschopnosti našich sléváren

První část práce se zabývala především analýzou některých významných faktorů (optimální doba vytloukání, minimální zbytkové pnutí) s cílem zvládnutí slévárenského-technologického procesu u odlitků ze šedé litiny.

I když v naší republice je podíl šedé litiny na celkové výrobě odlitků poměrně vysoký a podíl litiny s kuličkovým grafitem neroste tak, jak bychom předpokládali v porovnání se světem, je

potřeba věnovat pozornost některým progresivním metodám, které mohou napomoci zvýšit podíl litiny s kuličkovým grafitem. Tomu mají napomoci také některé práce, které se týkají aplikace QFD, případně metody nukleace a růstu grafitu založené na parametrech získaných z křivek ochlazování. Této problematice se krátce dotýká druhá část práce. Tato část práce je rozpracována, takže některé výsledky jsou pouze dílčí a práce na nich dále pokračuje (metody nukleace a růstu grafitu pomocí křivek ochlazování).

4.2.1. Použití metody QFD (Quality Function Deployment) pro hodnocení konkurenceschopnosti odlišků ve slévárenství

Vstup České republiky do Evropské unie a spolupráce s ostatními ekonomickými seskupeními celosvětového i regionálního charakteru vyžadují především zlepšení užitečných 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)

Quality = jakost

Function = funkce

Deployment = rozvoj / rozvinutí / rozmístění

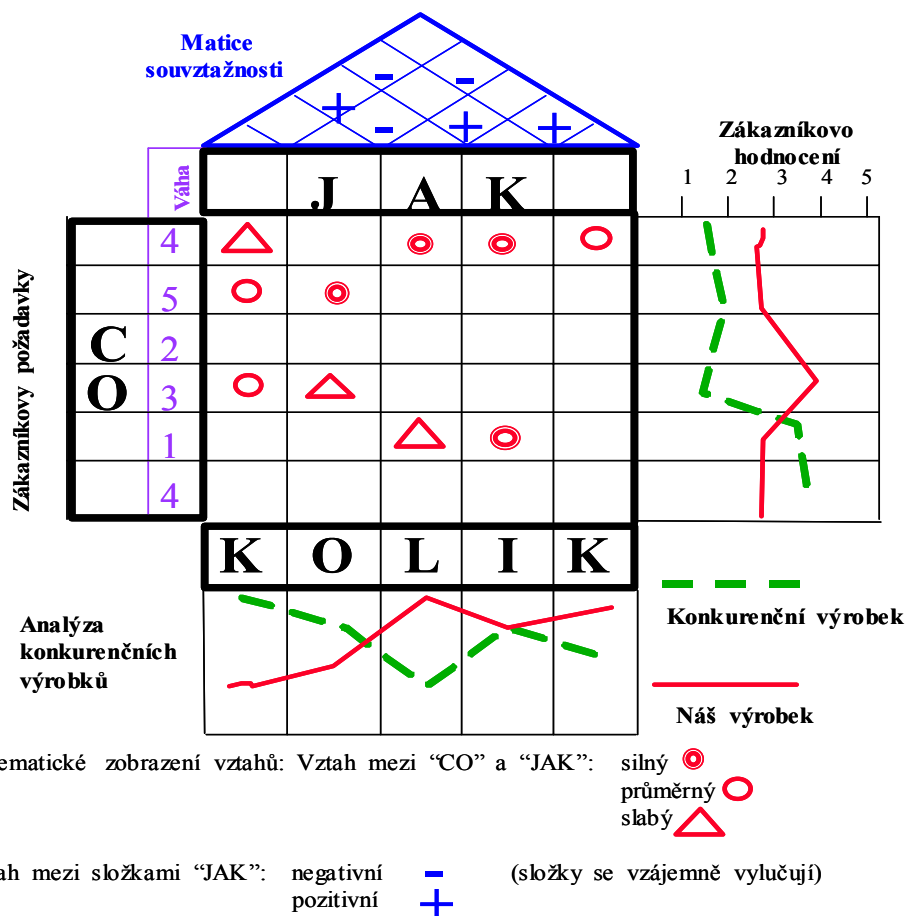
Čili rozvoj funkce jakosti, srovnává během všech fází vývoje výrobku pomocí řady matic požadavky a jim odpovídající opatření. Kromě toho jsou vyhodnocena a popsána silná i slabá místa vlastního plánovaného výrobku a nejdůležitějších výrobků konkurence. Tato metoda účinně podporuje úplné zohledňování 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. 8.

Pro účinné řízení jakosti mají velký význam jmenovité (cílové) hodnoty vlastnosti výrobku (označené jako KOLIK – viz obr.č. 8). 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:

- a) nechat zákazníka vyhodnotit náš a konkurenční výrobek (obrázek č. 8 zákaznické ohodnocení)
- b) provést analýzu konkurenčního výrobku: analýza pomůže odhalit silné a slabé stránky.



Obr. č. 8: Diagram jakosti znázorňující vztahy mezi požadavky zákazníka a vlastnostmi výrobku, mezi vlastnostmi navzájem, zákaznické hodnocení a analýza konkurenčních výrobků

4.2.2. Experimentální část

Metoda QFD byla aplikována u odlitků držáků a třemenů z LKG vyráběných v MOTOR JIKOV a.s. České Budějovice [77-80]. Byl sestaven diagram jakosti. 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 třemeny 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 reklamám 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 [81-82].

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 [83,59]

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 zákaznickových 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 kalkulaci odlitků. Tato problematika byla řešena komplexněji v grantu Čecha [2], součinnost celé řady těchto opatření může vést k tomu, že naše odlitky budou lépe konkurenceschopné a prodejné.

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.

Shrnutí výsledků měření

Vzhledem k rostoucím požadavkům na jakost vyráběných odlitků bylo navrženo do stávajícího systému kontrolních operací odlitků zařadit ultrazvukovou metodu. Na základě výsledků měření se ukazuje, že metoda měření rychlosti šíření ultrazvukových vln je použitelná pro 100% kontrolu pevnosti v tahu. Vzhledem k nízkým korelačním koeficientům nebylo doporučeno tuto metodu používat pro zjišťování tvrdosti, tažnosti či obsahu perlitu. I když závislosti byly tvořeny pro tyčky a ověřeny pouze na relativně malém množství odlitků, byla tato metoda nasazena ve výrobním závodě do provozu a v současné době se využívá na 100 % kontrolu a pro hodnocení jakosti litiny s kuličkovým grafitem.

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 eventuelních 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 habilitační práce představuje částečný průřez některými pracemi habilitanta jednak v delším časovém horizontu (optimalizace výroby litinových odlitků s cílem minimalizace zbytkových pnutí, měření mechanických vlastností nedestruktivními metodami, řízení jakosti a dále práce v posledním údobí, které hlavně souvisejí se dvěma úspěšně oponovanými granty GAČR, dvěma mezinárodními úkoly (SNR, Slovinsko) a dvěma granty současně probíhajícími, kde je habilitant hlavním řešitelem a výzkumným záměrem fakulty, kde je spoluřešitelem. Tyto práce souvisí hlavně s použitím simulačních modelů pro predikci struktury, mechanických vlastností, zbytkového pnutí a verifikaci těchto hodnot s experimentálními měřeními.

Optimalizace výroby litinových odlitků je řešena zásadním způsobem podle EXNERA a ČECHA s cílem získání optima struktury a vlastností a minima vnitřního pnutí v litém stavu bez následného žhání. Tento postup je provozně praktikován v řadě českých sléváren. V současné době projevují o jeho aplikaci další slévárny (Hostivař). Aplikace tohoto způsobu vyjímání odlitků z firem při teplotách blízkých teplotám eutektoidním se docílí:

- snížení zbytkových pnutí
- struktura matrice s větším podílem perlitu a minimalizace feritu
- částečné zvýšení pevnosti a tvrdosti
- zkrácení doby ochlazování litinových odlitků ve formách na polovinu až třetinu tj. výrazné zvýšení produktivity automatických formovacích linek (AFL)
- úspora energetické náročnosti, úspora investičních nákladů

Tento způsob však představuje přísné dodržování technologické kázně a dobré organizační zajištění. Při aplikaci na konkrétních odlitcích (ČKD Hradec Králové, LIAZ Liberec, ŠKODA WOLKSWAGEN Mladá Boleslav a další) se ukazuje, že při správné aplikaci experimentálních měření (vhodná volba měřených míst, které nám charakterizují průběh tuhnutí celého odlitku, vhodná volba termočlánků a ochrany, kalibrace nejvíce namáhaných míst pro měření zbytkového pnutí, podmínky aplikace tenzometrických růžic), vhodné volbě termofyzikálních parametrů se dá dosáhnout poměrně dobré shody mezi experimentálními měřeními a simulací. Tento způsob lze uplatnit jak u jednoduchých, tak i složitějších odlitků. 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, využitelné kapacitě linky, optimálních vlastnostech odlitku a tím přispět ke zlepšení jakosti. Celou řadou těchto opatření vzrůstá především podíl produktivity na pracovníka, což je jeden z ukazatelů, který

je v ČR horší v porovnání se slévárnami v západních státech. Zvýší se tím také konkurenceschopnost našich sléváren.

Slévárenství v ČR se podílí cca 12 % na zpracovatelské průmyslu. Podíl zpracovatelského průmyslu při tvorbě HDP činí cca 26 - 27%. Výroba odlitků z litiny s kuličkovým grafitem v ČR roste, ale tento růst je neuspokojivý. Podíl LKG ve vyspělých ekonomikách činí cca 30 až 35 % na celkovém objemu odlitků z neželezných kovů, u nás je to necelých 5 %. Vyplývá také, že naše slévárny nemohou vzhledem k celkovému vývoji našeho národního hospodářství očekávat nějakou zvýšenou poptávku po odlitcích v tuzemsku, spíše naopak. Musí proto nadále hledat maximální uplatnění v zahraničí. Již v současnosti vývoz představuje cca 50 – 60 % celkové produkce, v řadě sléváren je to ještě větší procento. Přetrvává stále nízká úroveň produktivity práce a nízká úroveň marketingu.

V současné době je v České republice 92 sléváren litiny. Z tohoto počtu vyrábí 26 sléváren vedle litiny s lupinkovým grafitem i litinu s kuličkovým grafitem.

Řada sléváren musí mít značnou flexibilitu svých technologických, případně kapacitních možností. To však klade vysoké organizační požadavky na přípravu výroby, zakázkové řízení, vyřizování objednávek.

Cena již pro zákazníky nebývá hlavní prioritou. Hlavní je jakost, výrobní zkušenost, know-how, dodržování dodacích termínů, dlouhodobá spolehlivost. U automobilového průmyslu (případně dodavatelů pro automobilový průmysl – MOTOR JIKOV a.s.) je kladen důraz i na vlastní vývoj slévárny v oblasti technologie, vysokou kvalitu managementu. S uplatňováním nové techniky (nové kontrolní metody, simulační programy, expertní systémy) musí řešit i problémy nedostatku vysoce kvalifikovaných techniků a dělníků. Zvýší se tím technologická i výrobní produktivita s vyloučením zásadně špatných nebo nesprávných řešení. Dojde tak k technologické, metalurgické a konstrukční optimalizaci odlitku s vysokou pravděpodobností úspěšné výroby. Jako příklad je uvedena slévárna MOTOR JIKOV a.s., která úspěšným použitím metody QFD hodnotí objektivně jak vlastní odlitky, tak i odlitky jiných zahraničních dodavatelů. Kombinací vlastního vývoje a externí spolupráci např. s vysokoškolskými pracovišti (VUT FSI – ÚMI – odbor slévárenství a nauky o materiálu) zlepšuje nabídkové řízení výrobní postup a výslednou kvalitu s cílem dosažení lepší konkurenceschopnosti.

Jedním z nejslabších míst databází všech simulačních slévárenských programů jsou teplotní závislosti fyzikálních vlastností odlévaných materiálů a forem hlavně pískových. Jedná se o teploty přehřátí taveniny až do normální teploty. Různí autoři upozorňují na rozdíly ve složení našich a zahraničních norem. Důležitý je vliv rychlosti ochlazování při tuhnutí na skutečné teploty tuhnutí eutektik a způsob nerovnoměrného uvolňování krystalizačního tepla během tuhnutí. Velké rozdíly lze očekávat u pískových forem (materiál ostřiva, pojivový systém, způsob upěchování).

Vliv termofyzikálních parametrů byl sledován na experimentu soustavy měděných válců chlazených v pískové formě. Především byl sledován vliv změny tepelné vodivosti na průběh křivky chladnutí (experimentálně, simulace), vliv změny teploty, velikost latentního tepla uvolněného při krystalizaci. Byl navržen originální způsob korekce tepelné vodivosti a velikosti latentního tepla. Takto upravené výsledky simulace teplotního pole můžeme použít pro následné simulace mikrostruktury i zbytkového pnutí. Jsou připraveny podobné experimenty pro litinu s kuličkovým grafitem.

Na závěr bych chtěl zdůraznit, že základem konkurenceschopnosti našich sléváren musí být odborníci na inženýrské úrovni na problematiku slévárenskou, dále odborníci v oboru řízení a strategie podniku. Vhodným propojením těchto pracovníků můžeme očekávat pozitivní trend ve vývoji našich sléváren.

Literatura

- [1] Čech, J. Ambos, E.: Ermittlung von Expertenwissen für die konstruktion gegossener Bauteile, Výzkumný úkol Volkswagenovy nadace, 1993-1995
- [2] Čech a kol.: Vývoj expertního systému pro konstrukci a výběr výrobních technologií v závislosti na nárocích na jejich kvalitu, GAČR, 106 / 94 / 0564
- [3] Piwonka, T.S.: Technické pokroky v odlévání kovů, které zvyšují jakost odlitků, Slévárství XLIV (1996), č. 6, s. 396-399
- [4] Ambos, E., Bähr, R., Brahman, M.: Multimediální datová komunikace pro zvýšení účinnosti styku mezi experty ve slévárské výrobě. Slévárství XLV (1997), č. 2-3, s.85-90
- [5] Exner, J., Nová, I., Strnadová, M., Mikula J., Havel, M.: In Innovation 95 – 2nd International Symposium of Advanced Materials and Technologies – FS ČVUT Praha, 1995, s.223-240
- [6] Mikula, J., Weiss, K.: Počítačová simulace tuhnutí jako nezbytná součást optimalizace výroby odlitků. Slévárství XLIII (1995), č.5, s.318-319
- [7] Ambos, E., Bähr, R., Hofmann, I., Čech, J., Exner, J., Roučka, J.: Racionalizace přípravy práce použitím výpočetní techniky. Slévárství XLIII (1995), č.5, s-307-313
- [8] Kovařík, J., Majer, J.: Počítačová simulace lití – prostředek optimalizace vtokových soustav. Slévárství XLIII (1995), č.5, s.326-328
- [9] Giršovič, N., Nechendzi, J., A.: Тeорeтичeскиe oснoвы исслeдoвaниja литeжныx сvoйств сплaвoв. In: Литeжныe сvoйствa жaрoпрoчныx сплaвoв – сбoрник LPI č.224, Metallurgizdat Moskva 1963, s.24 – 60.
- [10] Čech a kol.: Vývoj metod pro hospodárnou výrobu zdravých odlitků se zaměřením na simulaci tuhnutí, GAČR 106 / 95 / 0472, Oponováno 1997, Brno
- [11] 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
- [12] Čech, J., Exner, J., Rusín, K.: Die Herstellung von Gusseisenteilen mit minimalen Eigenspannungen, Giessereitechnik, Heft 9, s.281-285 / 5, NDR, 1987
- [13] Slévárství č.1, str.59-63, 2000
- [14] Exner, J., Čech, J.: Autorské osvědčení č.225624, patentní přihláška PV 6712-81, Praha 1981
- [15] 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
- [16] Sahm, P.R.: Formfüll – und Erstarrungssimulation. In.: GUSS – Produkte 94, Verlag Hoppenstedt GmbH, April 1994, s.237-251, 255-261
- [17] Weiss, K., Honsel, Ch., Gundlach, J.: Das Programmpaket SIMTEC. In: GUSS – Produkte 94, Verlag Hopenstedt GmbH, April 1994 s.252-254, 262-264.
- [18] Flender, E.: Magmasoft – Giesserei – Prozess – Simulation. In: GUSS – Produkte 94, Verlag Hopenstedt GmbH, April 1994, s.270-273
- [19] Chvorinov, N.: Theorie der Erstarrung von Gusstücken, Die Gieserei, 27 (1940), s. 177, 201, 222
- [20] Chvorinov, N.: Krystalizace a nestejnorodosti oceli, Nakladatelství ČSAV, Praha 1954

- [21] Giršovič, N.,G., Nechendzi, J., A.: Těoretičeskije osnovy issledovanija litějnych svojstv splavov. In: Litějnije svojstva žaropročnych splavov – sbornik LPI č.224, Metallurgizdat Moskva 1963, s.24-60
- [22] Nechendzi, J.,A: Stalnoje litjo – Metallurgizdat Moskva, 1948
- [23] Vejník, A.I.: Približenij rasčet processov teploprovodnosti, 1.vyd. Metallurgizdat, Moskva 1959
- [24] Vejník, A.I.: Teoria zatverdevanija otlivki. 1.vyd. Metallurgizdat, Moskva,1960
- [25] Vejník, A.I.: Termodinamika litejnoj formy, 1.vyd., Metallurgizdat, Moskva 1968
- [26] Vejník, A.I.: Kokilnoje litje, 11.vyd., Minsk, 1972
- [27] Vejník, A.I.: Približonnyj rasčet otlivki i procesov teploprovodnosti, GEIZ, Moskva, 1959
- [28] Anisovič, G.A., Grinkevič, R.N.: Metod opredelenija termofyzičeskich svojstv formovačnych zemel. In: Sbornik Problemy teplomena při litje, Minsk, 1960, s. 81
- [29] Halbart, G.: Elements dune theorie mathematique de la Fonderie. H. Vaillant – Carmone, Liege, 1945
- [30] Wlodawer, R.: Die gelenkte Erstarrung von Stahlungs – Giesserei – Verlag, Düsseldorf, 1967
- [31] Flemings, M. ,C.: Solidifitication processing, London, 1974
- [32] Goodman, T. R.: Application of Integral Methods to Transient Methods to Transient Noulnear Heat Transfer Advanced in Heat Transfer ed by (Irvine, T. ,Harnett,P.), Volume 1 Academic Press New York, 1972
- [33] Příbyl, J.: Teorie slévárenských pochodů, (Skripta) VŠB – HF, Ostrava 1979
- [34] Příbyl, J.: Slévárenství XXVII, 1980, č. 5, s. 178
- [35] Příbyl, J.: Řízené tuhnutí ocelových odlitků, 1. vyd. Praha, 1986
- [36] Havlíček, F., Elbel, T.: Matematické a experimentální stanovení součinitele tepelné akumulace bF. In: Sborník vědeckých prací VŠB Ostrava 1968, s. 239
- [37] Havlíček, F., Elbel,T.: Slévárenství XVII, 1969, č. 9. s. 21
- [38] Jelínek, P.: Slévárenství XXX, 1982, č. 8, s. 325
- [39] Jelínek, P.: Slévárenství XXXII, č. 12, s. 511
- [40] Exner, J.: Slévárenství XXII, 1975, č. 9, s. 372
- [41] Čech, J.: Možnosti měření vnitřního pnutí na odlitcích ze šedé litiny, Slévárenství, 1973, č. 10,s. 411-414
- [42] Jagoš, M., Čech, J.: Berechnung der Eigenspannungen in einem Schwungrad. Giessereitechnik 11, str. 343-346/ 4, NDR, 1986
- [43] Čech, J., Exner, J.: Optimalizace režimu ochlazování litinových odlitků a jejich uvolňování z forem při výrobě na AFL, Mez. konference, Trenč. Teplice, s. 178-187/9,1990
- [44] Čech, J., Exner, J., Rusín, K.: Optimierung der Abkühlungssteuerung zur Minimierung der Restspannungen bei Graugussteile, Giesserei – Rundschau, Nr. 6, s. 13-17/4, Rakousko, 1986
- [45] 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

- [46] Čech, J.: Applying solidification simulation to the control of casting quality. Mez. konference „ New process and materials used in foundry industry “ Str. 59–62, Krakow, Polsko, 1996
- [47] Medek, V.: Snížení pnutí v odlitcích. In: Slévárenský kalendář 1980, s. 91-103, Brno
- [48] Ruddle, R. W.: The Solidification of Castings, Institut of Metals, London, 1957
- [49] Medek, V.: Možnosti snížení zbytkového pnutí v odlitcích ze šedé litiny, Kandidátská práce, Brno, 1973
- [50] Rühl, R., Müller, H., Schütze, M.: Giessereitechnik 1982, č. 12, s. 377-381
- [51] Seitz, K., Hochstefter, R.: Giesserei 1981, č. 19, s. 568-572
- [52] Čech, J., Ptáček L.: Zu der Problematik der Messung von Innespanungen Gusstücken aus Grauguss . Sborník ZWICKAU, Vortrag 5, str. 16, 1979, NDR
- [53] Čech, J., Fiala, A.: Zerstörungsfreie Prüfung der Innespanungen von statisch und dynamisch beanspruchten Grauguss . Sborník Vídeň, Rakousko, 1981
- [54] 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
- [55] Čech, J., Exner, J., Rusín, K.: Production of castings with low residual stress values Sborník, Slév. dny, Budva, SFRJ, 1982
- [56] Čech, J., Fiala, A., Exner, J., Osincev, A. N.: Innespangungen in Grauguss. Sborník Zwickau, NDR, str. 116 - 126/11, 1985
- [57] Čech, J., Exner, J.: Possibilities of non-destructive checking of mechanical properties grey-iron castings for automobile industry. Sborník, 4. Evropský kongres, s. 1248-1255 / 8, Anglie, 1987
- [58] Čech, J., Exner, J., Kristoň, F.: Messung von inneren Spannungen bei Gusstücken aus Gusseisen. Sborník Zwickau, NDR, 1989
- [59] Čech, J.: Measuring the mechanical properties of cast irons by NDT methods, str. 93-102 / 10, NDT International, Londýn, 1990
- [60] Čech, J., Zezula, J., Rusín, K., Horák, L.: Ultraschallmessungen der mechanischen Eigenschaften von Gusseisen. Sborník, Florencie, Itálie, 1984
- [61] VDG Düsseldorf, materiály dokumetačního střediska, Düsseldorf, 1981
- [62] Čech, J. a kol.: Výzkumné úkoly pro AZNP Mladá Boleslav. Brno, 1975
- [63] Čech, J. a kol.: Možnosti měření vnitřního pnutí u vybraných odlitků ze šedé litiny - výzkumná zpráva pro TOS Hostivař, hlavní řešitel, 1975
- [64] 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
- [65] Čech, J.: Výzkum měření vnitřního pnutí a optimalizace doby vytloukání u odlitků LIAZ. Liberec dílčí zprávy 1981-1990, hlavní řešitel
- [66] Čech, J.: Měření vnitřního pnutí pro TAZ Tmava, vývojové úkoly, Brno, 1985
- [67] Čech, J.: Měření vnitřního pnutí u odlitků ČKD Hradec Králové - dílčí zprávy 1986 - 1990, hlavní řešitel
- [68] Čech, J.: Metodika stanovení a způsob interpretace strukturálních parametrů litinových brzdových bubnů. Výzkumná zpráva pro Škoda - Volkswagen, 1996
- [69] Čech, J., Macášek, I., Kotlaba, F., Stuchlík, F.: Použití nízkolegovaných litin z hlediska optimálních mechanických vlastností a tepelné únavy u odlitků hlav válců. Slévárenství, roč. 25, 1976, č. 2, str. 56-60 / 5, Brno

- [70] Čech, J., Jagoš, M., Stuchlík, F.: Zjišťování zbytkového pnutí u odlitků. Slévárství, roč. 25, 1976, č. 11, str. 457-460 / 4, Brno
- [71] Osincev, A. N., Korsakov, G. I., Čech, J., Fiala, A.: Zkušenosti s uplatňováním nových metod rozměrové stabilizace odlitků pro obráběcí stroje. Slévárství, roč. 34, 1984, č. 4, 155-158/4, Brno
- [72] Osincev, A. N., Korsakov, G.: Termocyklická stárnutí odlitků rámu strojů. Slévárství, roč. 34, 1984, č. 2, str. 61-63 / 3, Brno
- [73] Mikula, J., Čech, J., Václavík, R., Janků, L.: Aplikace simulačního programu SIMTEC při výrobě odlitku rámu pistole. Slévárství, roč. 44, 1995, č. 3, str. 149-151, Brno
- [74] 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, 1980
- [75] Čech, J., Zezula, J., Rusín, K., Horák, L.: Ultraschallmessungen der mechanischen Eigenschaften von Gusseisen. Sborník, Evropský defektoskopický kongres, Florencie, Itálie, 1984
- [76] Exner, J., Čech, J.: Optimum of Cooling Rate and Shake - Out Time as the Leading Values for Dimensioning of Moulding Casting Equipment . Slév. dny, Sofie, BLR, 1989
- [77] Zemanová, Š., Čech, J.: Hodnocení konkurenceschopnosti odlitků pomocí metody QFD, 34. slévárské dny, Brno, 1997
- [78] Zemanová, Š., Čech, J.: Využití metody QFD při hodnocení mechanických vlastností pro dosažení lepší konkurenceschopnosti odlitku. In: Hodnocení struktury a vlastností materiálu, ISSN 0209-0848. Edit. J. Boss, M. Ciepa. Opole, Dział Wydawnictw Politechniki Opolskiej, 1997, s. 131-134
- [79] Zemanová, Š., Čech, J.: Výsledky realizace metody QFD ve slévárství. Konference „Perspektivy slévárství“, Plzeň, 1998
- [80] Zemanová, Š., Čech, J.: Použití QFD pro hodnocení konkurenceschopnosti odlitků ve slévárství. Slévárství č. 1, s. 42-46, 2000
- [81] Ursacher, R., Čech, J.: Termofyzikální parametry a jejich vztah k simulacím Slévárství, v tisku 2000
- [82] Ursacher, R., Čech, J.: Citlivost simulace teplotního pole. Mez. konference, s. 106-108, ISBN 80-214-1378-6, Brno
- [83] Zemanová, Š.: Použití metody QFD (Quality Function Deployment) pro hodnocení konkurenceschopnosti odlitků ve slévárství, Doktorská práce VUT FSI, Brno, 1998

Optimization of Production of Iron Castings, aimed at increasing their Quality

Abstract

The habilitation thesis is based on the analysis of some significant factors that affect the production of castings. The aim of the thesis is to propose appropriate measures leading to a better control of the manufacturing process and thus also to increased guarantee of the attained quality level of castings and of the stability of this level. The author has focused on determining the optimum time of grey-iron castings being shaken out of moulds, with the aim of minimizing residual stress

During a systematic search for an optimum mode of cooling the castings in order to minimize residual stress the author has come, on the basis of his own measurements, to the conclusion that a certain level of isothermal quality of both the design and the casting production conditions it is of advantage to use for the release of castings from moulds the area of plastic deformation near eutectic transformation. The substance of such a method of producing iron castings with low residual stress values consists in that subsequent to pouring, the casting is cooling in the mould as long as eutectic transformation is taking place in the decisive most slowly cooling sections while the temperature of the decisive fastest cooling sections has not dropped significantly below the lowest temperature at which the casting material is deformed by predominantly plastic deformation (around 600°C), after which the casting is released from the mould and allowed to cool uniformly in air at an average rate of 30 to 100°C per hour, down to a temperature of ca 300°C. Regarded as the most slowly and most rapidly cooling sections of a concrete casting are only those section pairs whose marked difference in the mode of in-mould cooling and in temperature could give rise to stresses and thus become the source of residual stresses. In the case of heavier castings with greater differences in the decisive sections (with respect to residual stress) it is necessary to use controlled cooling in a continuous furnace in order to obtain thermal homogenization. This method of producing grey iron castings with minimum residual stress values cannot be applied quite universally but rather for such castings that due to the design, metallurgy or technology meet the condition that at the time of releasing the casting from the mould and cores the temperatures of the decisive sections will be between 600 and 730°C, i.e. the maximum difference is 100 to 130°C.

In this way the temperatures in the casting get considerably balanced in consequence of the natural course of cooling around the eutectic transformation temperatures already in the stage of cooling. Any possible stresses called forth by great temperature differences in different points of the casting are comparatively easy to balance by plastic deformation at temperatures between eutectic transformation and the bottom limit of the occurrence of plastic deformations. Thus a considerable reduction in residual stress is achieved after cooling the casting to normal temperature. Moreover, in the case of grey-iron castings the structure of the casting is usually improved due to the increased proportion of pearlite in the matrix, which yields increased strength and partially also hardness, in particular in the heavier sections of the casting. This does away with the necessity of subsequent stress-relief annealing or application of any special equipment for final cooling. The relation between the manner of cooling & releasing from moulds and the obtained minimum residual stress in castings produced in the above way is of general validity; if the temperature mode and the time mode of releasing castings from moulds are strictly observed, the method brings all the above advantages and higher effects.

Since the zone of temperatures and times suitable for the release of castings is relatively narrow, it must be determined and checked for every individual case of casting and technology, by measuring the temperature field of the casting and its changes.

In conclusion of the thesis, the Quality Function Deployment method is introduced as applied to ductile iron and grey iron castings. This method belongs to the modern tools of improving quality. Using the incidence matrix, it examines the relations between the features required from the casting by the customer and the parameters that the manufacturer tries to achieve. For ductile iron castings (of yokes) for automotive industry a comparison with products of foreign competitors is offered. In the very conclusion, measures are suggested that might improve the quality of the castings produced and of the whole system of quality control.