

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

**Ing. Alois Neudert**

**OPTIMALIZACE ŘÍZENÍ JEDNOTNÝCH  
BENTONITOVÝCH FORMOVACÍCH SMĚSÍ**

**CONTROL OPTIMALIZATION OF UNIT  
BENTONITE MOULDING SAND**

ZKRÁCENÁ VERZE PHD THESIS

Obor: Strojírenská technologie

Školitel: Prof. Ing. Karel Rusín, DrSc.

Oponenti: Prof. Ing. Petr Jelínek, CSc.  
Doc. Ing. Jan Lukeš, CSc.

Datum obhajoby: 14. 2. 2003

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

bentonitová formovací směs, aktivní bentonit, lesklý uhlík

## **KEY WORDS**

bentonite moulding sand, active clay, lustrous carbon

## **MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE**

oddělení pro vědu a výzkum FSI VUT v Brně

## Obsah

Klíčová slova .....	2
Obsah .....	3
1 Přehled použitých symbolů .....	4
2 Rozbor současného stavu .....	6
2.1 Hlavní úkoly řízení kvality jednotné formovací směsi: .....	6
2.1.1 Optimální složení formovací směsi .....	6
2.1.2 Řízení obsahu vody .....	6
2.1.3 Řízení ožívování .....	8
2.2 Zhodnocení dosavadní praxe .....	13
3 Cíle disertační práce .....	14
4 Odvození matematického modelu znehodnocení a ožívování .....	15
4.1 Definování základních vztahů .....	15
4.2 Odvození vztahu mezi obsahem složky v oběhu 0 a 1 .....	16
4.3 Výpočet rovnovážného obsahu složky .....	16
4.4 Grafické znázornění průběhů změn v jednotné formovací směsi .....	17
4.5 Určení potřebné změny dávkování při požadované změně obsahu složky ve směsi .....	19
5 Metodika řízení ožívování jednotné formovací směsi .....	20
5.1 Bilance formovací směsi .....	20
5.2 Řízení ožívování .....	21
5.2.1 Základní principy .....	21
5.2.2 Řízení ožívování podle předchozího dne .....	22
5.2.3 Řízení ožívování podle modelu .....	22
6 Nasazení navržené metodiky ve slévárně Feramo M.I., s.r.o. Brno /17/ .....	23
6.3 Výsledek zavedení .....	24
6.3.1 Statistické vyhodnocení hodnot formovací směsi .....	25
7 Návrh metody na hodnocení teploty degradace bentonitu a nosiče LC .....	26
7.3.1 Interpretace naměřených a vypočtených hodnot obsahu LC ve slévárenských formovacích směsích .....	27
7.4 Metodika zjišťování teploty degradace nosiče LC .....	27
8 Využití matematického modelování pro predikci znehodnocení .....	29
Závislost množství znehodnocené složky na tvaru odlitku .....	29
Vliv jader .....	29
Vliv doby chladnutí .....	29
8.1 Využití predikce pomocí matematického modelování .....	30
8.1.1 Stanovení stupně celkového znehodnocení z bilance .....	30
8.1.2 Stanovení znehodnocení pomocí matematického modelování .....	30
8.1.3 Propojení bilance a modelování .....	30
8.2 Matematické modelování pomocí sw MAGMASOFT® v. 4.1 .....	31
8.2.1 Porovnání teplotního pole model - pokus .....	31
9 Závěr .....	34
10 Přehled literatury .....	35
11 Práce autora publikované v souvislosti s tématem disertační práce .....	36
12 Seznam příloh .....	36

## 1 Přehled použitých symbolů

$A_0$	hmotnost složky v namísené směsi v oběhu 0 [kg]
$A_1$	hmotnost složky v namísené směsi v oběhu 1 [kg]
$A_B^*$	množství znehodnoceného bentonitu v kg bentonitu/% bentonitu ve formovací směsi/100 kg tekutého kovu
$A_C^*$	množství znehodnoceného nosiče LC v kg nosiče LC/% nosiče LC ve formovací směsi/100 kg tekutého kovu
$A_{bo}$	množství bentonitu do mísiče k novému ostřívu [kg]
$m$	
$A_{bT}$	množství bentonitu do mísiče k tekutému kovu (náhrada znehodnoceného) [kg]
$m$	
$A_n$	hmotnost složky v oživení /kg/
$A_{ojr}$	nové ostřívo z jader na rám [kg]
$A_{om}$	nové ostřívo do mísiče [kg]
$A_{omr}$	nové ostřívo do mísiče na rám [kg]
$A_{oMr}$	nové ostřívo z modelové směsi na rám [kg]
$A_{or}$	množství nového ostříva na formovací rám [kg]
$A_{ostř}$	část složky na ostřívo [kg]
$A_T$	část složky na tekutý kov [kg]
$A_v$	hmotnost složky ve vratné směsi /kg/
$A_x$	hmotnost ztracené složky /kg/
$A_z$	hmotnost znehodnocené složky /kg/
$a$	podíl složky ve směsi
$a_0$	podíl složky ve směsi v oběhu 0
$a_1$	podíl složky ve směsi v oběhu 1
$a_{bT}$	podíl znehodnoceného bentonitu na tekutý kov [kg/kg]
$a_n$	podíl složky v oživení
$\Delta a_n$	změna dávkování bentonitu
$a_o$	měrná spotřeba ostříva v [kg/kg TK]
$a_v$	podíl složky ve vratné směsi
$AM$	využitý aktivní bentonit [%]
$B$	
$b$	přídavek bentonitu v % vratné směsi
$B_{akt}$	požadovaný obsah aktivního bentonitu ve formovací směsi v %
$b_o$	obsah aktivního jílu v oživení
$b_u$	bentonit účinný [%]
$b_v$	bentonit vypočtený [%]
$b_x$	obsah aktivního jílu v jednotné směsi
$c$	přídavek nosiče lesklého uhlíku v % vratné směsi
$C_{akt}$	požadovaný obsah nosiče LC ve formovací směsi [%]
$CG$	jíl podílející se na vaznosti [%]
$S$	
$c_p$	index způsobilosti procesu
$c_{pk}$	index způsobilosti procesu se zahrnutím vlivu střední hodnoty
$c_s$	měrné teplo směsi
$ER$	rovnovážný poměr
$Fe$	hmotnost tekutého kovu [kg]
$Fe_r$	množství tekutého kovu v rámu [kg]
$G$	hmotnost formovací směsi [kg]

$G_0$	hmotnost namísené směsi v oběhu 0 [kg]
$G_1$	hmotnost namísené směsi v oběhu 1 [kg]
$G_f$	hmotnost směsi potřebné k výrobě formy [kg]
$G_n$	hmotnost materiálů oživení [kg]
$G_m$	hmotnost dávky mísiče [kg]
$G_{nos}$	hmotnost ostríva v oživení [kg]
$tř$	
$G_r$	hmotnost směsi na rám včetně přepadu [kg]
$G_v$	hmotnost vratné směsi [kg]
$G_z$	hmotnost znehodnocené směsi (ve které došlo ke znehodnocení uvažované složky) [kg]
$G_{zf}$	množství tepelně znehodnocené směsi ve formě [kg]
$i$	počet oběhů formovací směsi
$K$	oživení [%]
$k_B$	konstanta závislosti úbytku LC na obsahu aktivního bentonitu [%LC/%B <sub>akt</sub> ]
$k_{MM}$	konstanta závislosti úbytku LC na adsorpci metylénové modře [%LC/mgMM/g]
LC	lesklý (správněji pyrolýzní) uhlík, obsah [%]
$LC_v$	lesklý uhlík vypočtený [%]
$LC_n$	obsah LC naměřený [%]
$l_v$	latentní výparné teplo vody
$m_s$	hmotnost směsi
$m_v$	hmotnost vody
$MB$	aktivní bentonit stanovený metylénovou modří [%]
$ME$	účinnost mísení [%]
$MG$	jíl vypočtený z vlhkosti a vaznosti [%]
$S$	
$MI$	index vlhkosti [%]
$MM$	adsorpce metylénové modře [mgMM/g]
$n$	stupeň oživení
$p$	poměr formovací směs/tekutý kov
$s$	přídavek nového ostríva, včetně ostríva z jader v % k vratné směsi
$S$	znehodnocení v kg směsi na kg odlitku
$s^*$	přídavek nového ostríva, včetně ostríva z jader v % k množství tekutého kovu
$S_a$	hmotnost formovací směsi v kg
$s_K$	ostrívo z jader, které zůstane ve směsi v % vratné směsi
$s_N$	přídavek nového ostríva v % vratné směsi
$Sp$	spěchovatelnost [%]
$SPE$	systémová účinnost procesu [%]
$\Delta T$	rozdíl teplot [°C]
TC	Rovnovážný parametr jílu z naměřených hodnot
P	
TK	hmotnost tekutého kovu [kg]
TR	naměřený poměr
$V_i$	% výměny v „i-tém“ oběhu
$V_{i-1}$	% výměny v předchozím oběhu
$w$	vlhkost směsi [%]
$x$	stupeň ztráty složky
$Z$	stupeň znehodnocení [%]
$z$	stupeň znehodnocení
$z_c$	stupeň celkové ztráty složky
$\sigma_l$	vaznost [kPa]

## 2 Rozbor současného stavu

Jednotné bentonitové směsi jsou nejčastěji používaným typem formovacích směsí pro litinové odlitky i pro odlitky ze slitin Al. Odhaduje se, že více jak 70 % z celkové výroby litinových odlitků je formováno touto technologií.

Jednotná bentonitová formovací směs je systém, který se v ideálním případě skládá jen z několika složek:

- ostřívo (obvykle křemenný písek),
- pojivo (bentonit),
- přísada (nosič lesklého uhlíku, škrob, grafit),
- voda.

Ve skutečnosti však ještě obsahuje nepřeberné množství dalších látek:

- pojivo a přísady v různém stupni tepelné nebo jiné degradace,
- produkty tepelného a chemického rozkladu přísad,
- příměsi (zbytky jader, oxidy kovu, soli atd.).

Všechny tyto složky na sebe navzájem působí a podílí se na vlastnostech formy a tím i na kvalitě odlitků. Naštěstí je jednotná směs poměrně stabilní systém, který má při dosažení rovnovážného stavu značnou setrvačnost a své složení mění obvykle jen velmi pomalu.

### 2.1 Hlavní úkoly řízení kvality jednotné formovací směsi:

- Stanovit optimální složení a vlastnosti formovací směsi tak, aby byly dobré odlitky s minimem nákladů.
- Samostatným problémem je řízení potřebného obsahu vody, nejlépe udržováním optimální spěchovatelnosti.
- Udržet požadované složení jednotné formovací směsi – řízené ožívování.

#### 2.1.1 Optimální složení formovací směsi

Toto téma není hlavním cílem práce, proto je v práci uveden pouze přehled vlastností bentonitu a jsou tu popsány možnosti jeho poškození: termické, chemické, mechanické– pasivace a ztráty během oběhu formovací směsi.

#### 2.1.2 Řízení obsahu vody

Ani toto není hlavním cílem práce, proto jsou uvedeny jen základní poučky. Platí pravidlo: „*Odlitek je tím lepší, čím méně vody bylo třeba na výrobu kvalitní formy*“

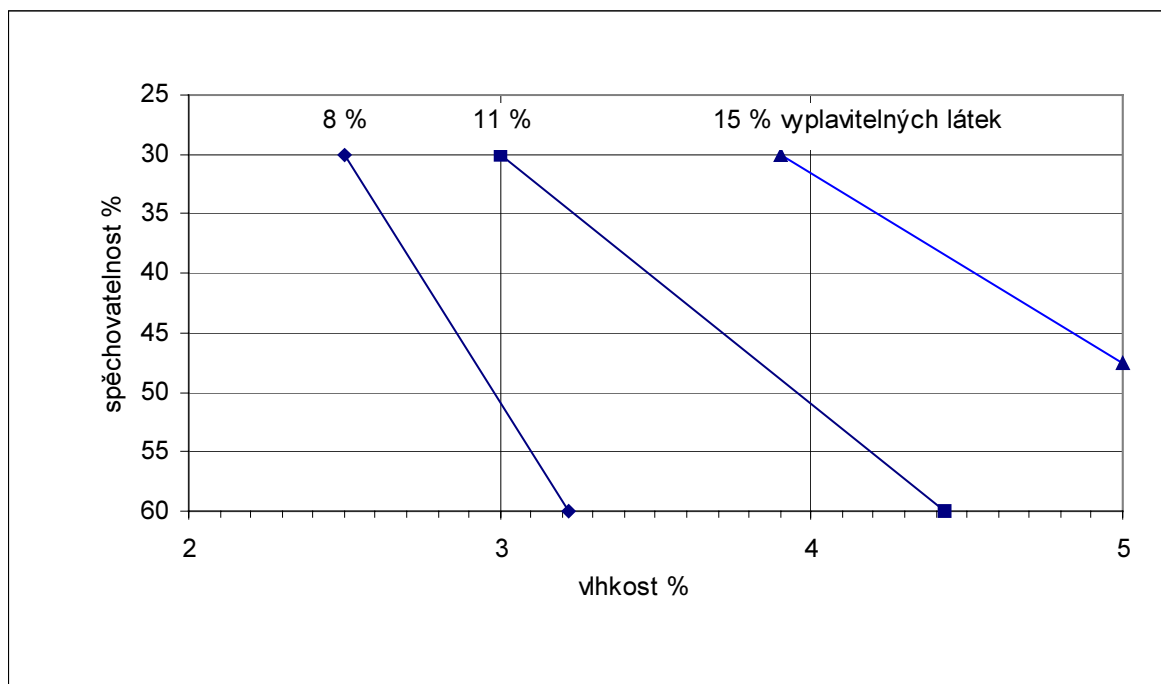
#### Závislost optimální vlhkosti na způsobu formování

Různé způsoby formování vyžadují různé stupně navlhčení formovací směsi. Čím je technologie formování a provedení modelů dokonalejší, tím postačí nižší spěchovatelnost, a tím i vlhkost, na zhotovení formy.

Tab. 1: Obvykle používané průměrné hodnoty spěchovatelností při různém způsobu formování /9/:

technologie formování	spěchovatelnost %
impulsní formování	30 ÷ 40
foukání s dolisováním	30 ÷ 40
střásání s dolisováním	40 ÷ 55
ruční formování	50 ÷ 60

## Závislost optimální vlhkosti na složení jednotné formovací směsi



Obr. 2 Vzájemná závislost vlhkosti a spēchovatelnosti při různém obsahu vyplavitelných látek /6/

Důsledkem závislosti na Obr. 2. je, že pokud neznáme přesně složení, tak nelze předepsat konkrétní hodnotu vlhkosti.

## Závislost potřebného množství vody na teplotě vratné směsi

Se vzrůstající teplotou vratné směsi, která vstupuje do mísiče se sice nemění hodnota optimální spēchovatelnosti podle způsobu formování, ale dochází k odpařování vody během mísení a během dopravy k formovacímu stroji a tuto vodu musíme dodat navíc.

Hlavním činitelem pro ochlazení směsi, ke kterému dojde v mísiči nebo na dopravníku při rozvozu směsi je odpařování vody.

V práci je formulován základní vztah, ze kterého vyplývá, že odpaření 1 % vody ochladí formovací směs přibližně o 20 °C.

Fiala /8/, bez tak velkého rozsahu zjednodušujících předpokladů uvádí, že 1 % vody ochladí přibližně o 25 K.

## Závislost optimální vlhkosti na stupni umísení formovací směsi

Většina technologických vlastností formovací směsi závisí také na stupni umísení a na vlastnostech bentonitu. Konkrétně pevnostní vlastnosti, jako například vaznost, pevnost v tahu nebo pevnost v tahu v zóně kondenzace vody, klesají se zhoršujícím se umísením směsi. To znamená, že pro dosažení jejich požadované hodnoty musíme přidat více pojiva. Více pojiva však znamená více vyplavitelných látek a tím i větší vlhkost pro optimální spēchovatelnost.

Také i samotná spēchovatelnost se při stejné vlhkosti mění během mísení – postupně narůstá až do svého maxima. Z toho plyne závěr, že pro dosažení požadované spēchovatelnosti budeme potřebovat při nedokonalém umísení více vody.

Důležitou podmínkou kvality mísení je proto dodržování doby mísení „za mokra“ – po přidání vody.

Novým přístupem v poslední době je mísení za podtlaku./13/ Kromě možnosti současného chlazení se zde využívá i efekt pravděpodobného snadnějšího vniknutí molekul vody ve stavu páry

do prostor mezi krystaly bentonitu. Výrobce zveřejněné údaje ukazují na rychlejší nárůst pevnostních vlastností i na dosažení vyšších hodnot.

Moderní formovací linky vyžadují tak úzké rozmezí spěchovatelnosti, že jedinou možností je kvalitní automatické dovlhčování s korekcí na teplotu.

### 2.1.3 Řízení oživování

#### Metodika podle J. Kadlece /1/

Obsah aktivního jílu v jednotné směsi bude konstantní, když přídavek aktivního jílu z oživení pokryje celou ztrátu, vzniklou při odlévacím cyklu tepelným znehodnocením a odvozem přebytečné směsi.

Rovnice má tento tvar:

$$b_x = b_o \cdot \frac{\frac{K}{100}}{1 - \left(1 - \frac{K}{100}\right) \cdot \left(1 - \frac{Z}{100}\right)} \quad (1)$$

Symboły zde značí:

$b_x$  obsah aktivního jílu v jednotné směsi [%]

$b_o$  obsah aktivního jílu v oživení [%]

$K$  oživení [%]

$Z$  stupeň znehodnocení [%]

Pro výpočet stupně znehodnocení uvádí Kadlec výraz:

$$Z = S \cdot \frac{G_{odl.}}{G_{pisku}} \cdot 100 \quad (2)$$

$S$  znehodnocení v kg směsi na kg odlitku, autor zde pro ocel při využití tekutého kovu 50 % uvádí hodnotu  $S = 0,5$  [kg/kg]

$G_{odl.}$  hmotnost odlitku [kg]

$G_{pisku}$  hmotnost formovací směsi [kg]

Jako teplotu znehodnocení aktivovaného bentonitu Sabenil zde uvádí 450 °C, pro nenatřifikovaný bentonit 300 °C. Kadlec doporučuje, aby se raději měřil obsah aktivního jílu pomocí adsorpce metylénové modře, než aby se zjišťoval uvedeným výpočtem.

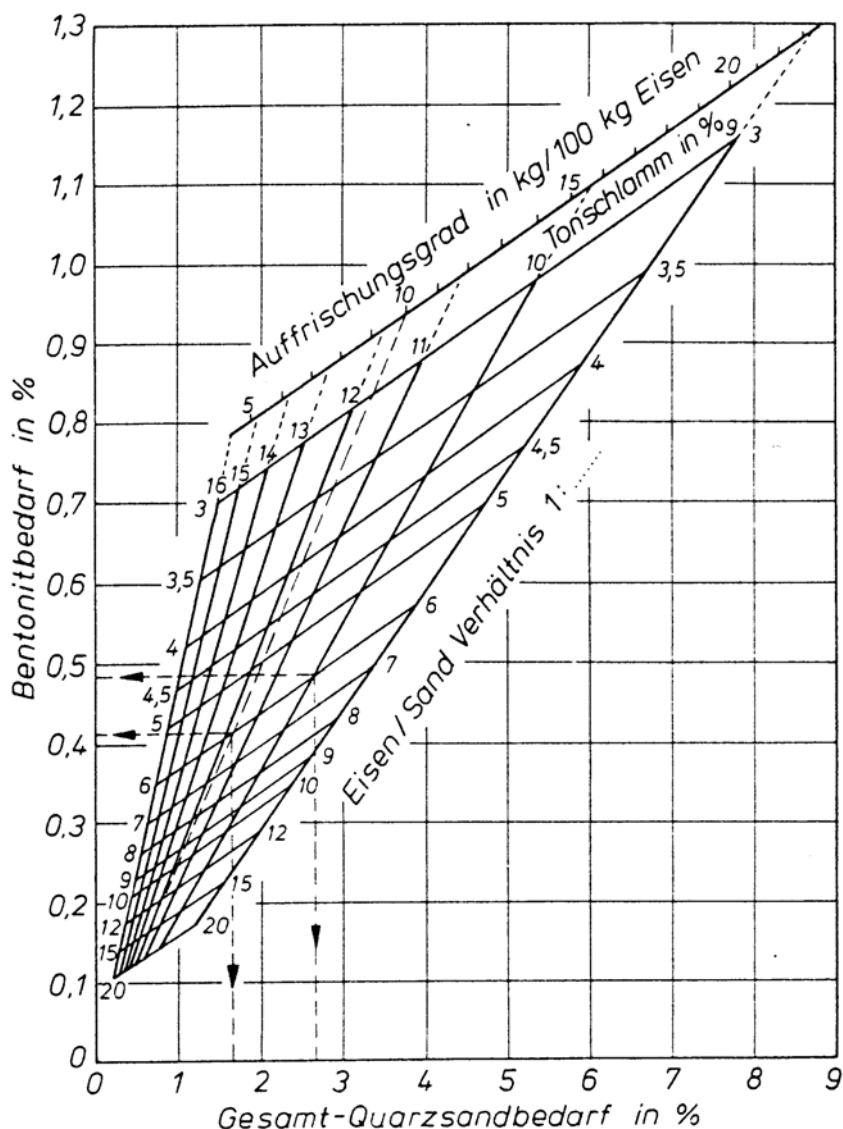
#### Metodika podle Levelinka, Berga a Franka

Levelink, Berg a Frank /6/ doporučují denně sledovat (bilancovat) skutečný poměr formovací směs / kov a množství ostřiva z jader v % na objem směsi. Podle nomogramu (Obr.3) na řízení formovací směsi pak upravovat pro další období dávkování.

Kamenouhelná moučka se doporučuje dávkovat asi 0,6 x přídavek bentonitu

Vlastní řízení oživování je tedy prováděno s denním zpožděním (při velkých změnách se doporučuje i častěji) podle skutečného poměru formovací směs/kov za minulý den a podle přísunu ostřiva z jader za stejnou dobu. Tedy zásahy jsou prováděny podstatně dříve než podle výsledků z laboratoře.





Obr.3: Řídicí diagram pro systém formovací směsi s vazností 200 kPa a sypnou objemovou hmotností 0,8 kg/dm<sup>3</sup> /6/

Při prošetřování rovnovážného stavu musíme rozlišovat proces výměny, který probíhá při nasazení nové suroviny a proces ustálení při oživování stejnými surovinami. Pokud se rozhodneme vyzkoušet novou surovinu, tak vyhodnotit její vliv můžeme s jistotou teprve tehdy až se celý objem směsi nasatí touto novou surovinou. Protože oživujeme obvykle jen několika málo procenty nových surovin, trvá taková výměna velmi dlouho. Rychlost závisí na stupni oživování, to je na poměru hmotnosti všech nových surovin (včetně ostřiva z jader) k celkové hmotnosti formovací směsi. Za předpokladu, že vždy dojde k dokonalému promísání, můžeme matematicky odvodit procento výměny nové suroviny v daném oběhu na základě dosažené výměny v předchozím oběhu /9/.

$$V_i = V_{i-1} + (100 - V_{i-1}) \cdot n \quad (3)$$

kde je:  $V_i$  % výměny v „i-tém“ oběhu  
 $V_{i-1}$  % výměny v předchozím oběhu  
 $n$  stupeň oživení [kg/kg] – po vynásobení 100 obdržíme údaj v %

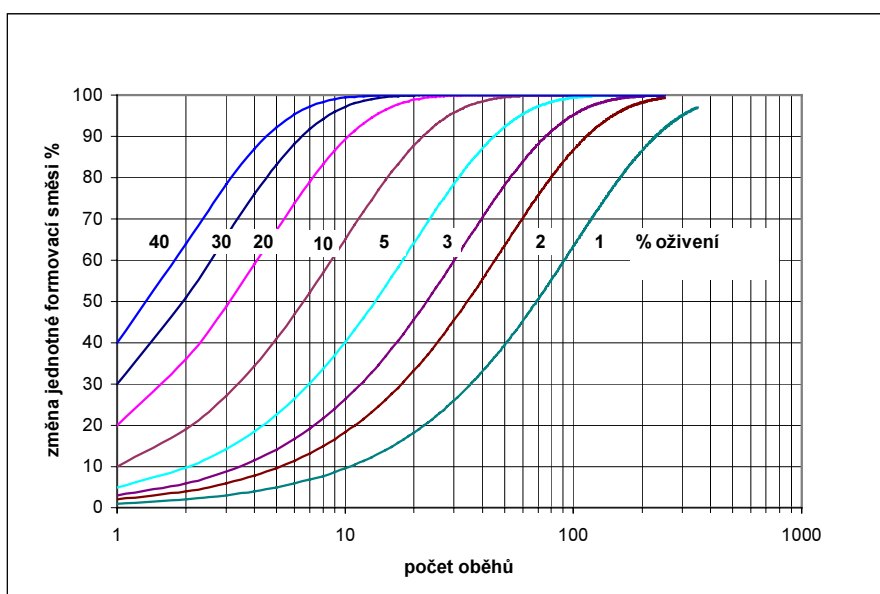
Přičemž stupeň oživování je definován vztahem:

$$n = \frac{G_n}{G}$$

kde je:  $G_n$  hmotnost všech nových surovin v oběhu (včetně písku z jader) [kg]  
 $G$  celková hmotnost směsi v oběhu [kg]

Když si rovnici (3) vypočteme pro dostatečný počet oběhů a při různém ožívování, obdržíme v praxi velmi důležitý graf – Obr 4. /9/

Z tohoto grafu můžeme určit, jak dlouho musí trvat zkouška nové suroviny, než budeme moci s jistotou určit, zda nová surovina je lepší nebo horší než původní. Musíme v takovém případě ožívovat tak dlouho, aby výměna dosáhla alespoň 75 %. To znamená například, že při ožívování 3 % nových surovin to bude trvat asi 75 oběhů. Pokud nám směs obíhá 4 krát za den, pak musíme novou surovinu dávkovat asi 19 pracovních dnů, tedy celý měsíc. Z toho také vyplývá jaké množství nové suroviny si musíme objednat na tuto zkoušku.



Obr. 4 Průběh výměny složky formovací směsi /2/, /9/

### Metodika podle Egena

Hans W. Egen /2/ ve své práci z r. 1984 shrnuje dosavadní poznatky v tomto oboru v západních zemích. Výsledky této práce jsou také náplní VDG-Merkblatt R 95, /3/. Pro přidavek bentonitu je zde odvozen vztah:

$$b = \frac{B_{akt}}{1 - 0,01 \cdot B_{akt}} \cdot \left[ 0,01 \cdot (s_N + s_K + c) + A_B^* \cdot \frac{Fe}{Sa} \right] \quad (5)$$

Kde značí:

- $b$       přidavek bentonitu v % vratné směsi
- $B_{akt}$     požadovaný obsah aktivního bentonitu ve formovací směsi v %
- $s_N$       přidavek nového ostřiva v % vratné směsi
- $s_K$       ostřivo z jader, které zůstane ve směsi v % vratné směsi
- $c$         přidavek nosiče lesklého uhlíku v % vratné směsi
- $A_B^*$      množství znehodnoceného bentonitu v kg bentonitu/% bentonitu ve formovací směsi/100 kg tekutého kovu
- $\frac{Fe}{Sa}$      hmotnostní poměr tekutý kov/formovací směs

Autor /2/ dále uvádí tabulku č. 2, ve které jsou hodnoty  $A_B^*$  zpracovány podle tloušťky stěny odlitků pro šedou litinu. Je vidět, že se zvětšením tloušťky stěny se zmenšuje množství znehodnoceného bentonitu.

**Tab. 2: Závislost množství znehodnoceného bentonitu na tloušťce stěny odlitku /2/**

Tloušťka stěny odlitků v mm	$A_B^*$ v kg bentonitu / % bentonitu ve formovací směsi/ 100 kg tekutého kovu
10	0,47
20	0,35
50	0,23
100	0,17

Pro přidavek nosiče lesklého uhlíku (LC) autor /2/ uvádí podobný vztah jako je rovnice (5):

$$c = C_{akt} \left[ 0,01 \cdot (s_N + s_K + b) + A_C^* \cdot \frac{Fe}{Sa} \right] \quad (6)$$

Významy symbolů jsou stejné jako u rovnice (5), dále zde značí:

$C_{akt}$  požadovaný obsah nosiče lesklého uhlíku ve formovací směsi v %

$A_C^*$  množství znehodnoceného nosiče LC v kg nosiče LC / % nosiče LC ve formovací směsi / 100 kg tekutého kovu

Autor zde dále uvádí, že měření obsahu nosiče LC ve formovací směsi se prakticky neprovádí, i když je technicky možné. Proto uvádí tabulku 3, kde jsou uvedeny směrné hodnoty zjištěné laboratorně a z bilancí provozních směsí.

Množství nového ostříva do formovací směsi doporučuje autor /2/ řídit podle množství tekutého kovu:

$$s = s^* \cdot \frac{Fe}{Sa} \quad (7)$$

Kde značí:

$s$  přidavek nového ostříva, včetně ostříva z jader v % k vratné směsi

$s^*$  přidavek nového ostříva, včetně ostříva z jader v % k množství tekutého kovu

Pro hodnotu  $s^*$  uvádějí v praxi obvyklé hodnoty 10 až 25 kg ostříva na 100 kg tekutého kovu.

**Tab. 3: Orientační hodnoty koeficientů pro řízení přídavek nosiče LC /2/**

Materiál	Hodnota LC zjišťovaná podle metodiky IfG /10/ v %	Směrná hodnota $C_{akt}$ v %	$A_C^*$ množství znehodnoceného nosiče LC v kg nosiče LC / % nosiče LC ve formovací směsi / 100 kg tekutého kovu
Kamenouhelná moučka	8 až 14	1,0 až 2,0	0,7 až 0,9
Asfalt	26 až 32	0,5 až 0,6	1,3 až 1,5
uhlovodíkové pryskyřice	38 až 48	0,4 až 0,5	1,0 až 1,3
Polystyrol	56	0,3 až 0,4	0,85

## Metodika podle Hrušky

Hruškova metoda /11/ spočívá především v uplatnění bilance formovací směsi a stanovení potřebného oživování v závislosti na měrných spotřebách ostřiva a bentonitu na tunu tekutého kovu a měrných spotřebách nosiče LC, případně dalších přísad na kg přísady bentonitu. Hodnoty těchto měrných spotřeb jsou charakteristickými veličinami pro každou slévárnu a závisí především na termickém namáhání formovací směsi a na ostatních podmínkách. Jejich nejsnadnější stanovení je pomocí bilance formovací směsi za období min. 1 měsíc.

Vlastní metodika /11/ má tyto zásady:

### a) Měrná spotřeba nového ostřiva

Na každou tunu odlitého kovu je nutno (pro zachování množství vyplavitelných látek, celkového znečištění směsi a stupně oolitizace) přidat **100 až 160 kg** nového ostřiva podle tepelného zatížení forem.

Přitom nové ostřivo se do směsi dostává třemi cestami:

- oživováním jednotné směsi
- z rozpadlých jader
- z modelové směsi (pokud je používána)

Čím je vyšší tepelné zatížení formovací směsi (poměr formovací směs/kov, teplota lití, doba chladnutí), tím je třeba přidat na jednu tunu tekutého kovu více nového ostřiva.

Abychom mohli určit potřebnou dávku nového ostřiva do mísiče, musíme nejdříve zjistit jaké množství nového ostřiva se do směsi dostane z jader a z modelové směsi.

### b) Měrná spotřeba nového bentonitu

Bentonit přidáváme do mísiče ze dvou důvodů:

- doplnění k novému ostřivu.
- náhrada degradovaného bentonitu ve vratné směsi.

Pro tyto účely je třeba do formovací směsi na každou tunu odlitého kovu přidat **20 až 60 kg** nového bentonitu.

Potřebné množství je závislé na tepelném namáhání formy (stejně jako u nového ostřiva) ale také na tepelné odolnosti bentonitu a jeho ztrátách (například odsáváním).

### c) Měrná spotřeba nového nosiče lesklého uhlíku a dalších přísad

Zde platí podobné zásady jako u bentonitu, proto potřebné množství stanovíme poměrem k novému bentonitu. Obvykle pro nosič LC **0,2 až 0,5 kg** na kg bentonitu a pro ostatní přísady (škroby a pod.) obvykle 0,01 až 0,1 kg na kg bentonitu.

Volba závisí na tepelném namáhání formy, na požadovaném obsahu nosiče LC ve formovací směsi a na kvalitě nosiče lesklého uhlíku. Při používání směsného bentonitu je poměr dán výrobcem a měl by se přizpůsobit potřebám slévárny.

## Řízení podle Hrušky /11/

Vlastní řízení probíhá buďto podle bilance předchozího dne nebo podle právě vyráběného odlitku.

Pokud dojde k nežádoucí odchylce ve složení formovací směsi, tak se neupravují přímo kg dávky do mísiče, ale upraví se koeficienty měrných spotřeb a provede se s nimi nový propočet. Po ustálení rovnovážného stavu se případně provedou další korekce. Pokud nedochází k systémovým odchylkám (přesnost dávkování, změna zařízení a pod.), tak obvykle dojde po několika málo krocích k nalezení správné velikosti měrných spotřeb pro konkrétní podmínky a metodiku už není třeba korigovat.

## Metoda s využitím automatické kontroly a počítačového řízení

Příkladem tohoto přístupu může být zařízení, které dodává ke svým mísičům firma Eirich /13/. Je zde v řídicím systému sklobuveno preventivní řízení podle Egena a Levelinka podle vyráběného sortimentu s korekcí směrných hodnot spotřeby surovin na tekutý kov podle výsledků analýz automatického měření formovací směsi. To se zdá být zatím optimálním řešením. Bohužel v ČR dosud takové zařízení nepracuje.

Korekce směrných hodnot spotřeby bentonitu na tunu TK je prováděna porovnáním vypočteného obsahu bentonitu se zadanou hodnotou, případně vzájemným porovnáním hodnot obsahů jílu vypočtených různými metodami.

Často používaný vztah uvádí autoři /15/. Obvykle je tato hodnota nazývána **bentonit vypočtený  $b_v$** .

$$b_v = \frac{0,435 \cdot c_d \cdot w \cdot \log Sp + 362}{109} \quad (9)$$

Kde značí:  $b_v$  bentonit vypočtený [%]  
 $c_d$  vaznost [kPa]  
 $Sp$  spěchovatelnost [%]  
 $w$  vlhkost [%]

## Sledování účinnosti mísení

S nárůstem možností využití výpočetní techniky byly vyvinuty metody současného výpočtu hodnot obsahu jílu a účinnosti mísení. Autoři /16/ zavádějí několik typů hodnot obsahu jílu a řadu koeficientů a účinností.

Vlastní řízení oživování autoři doporučují provádět podle bilance tak, aby se neměnil obsah aktivního bentonitu  $MB$ . Hodnoty  $MB$  pomocí metylénové modře a vlastnosti směsi (vlhkost, spěchovatelnost, vaznost) doporučují autoři měřit nejméně v každém oběhu, aby se zachytil případný výkyv v množství ostřiva z jader. Naměřené hodnoty jsou využívány k výpočtu účinností. Jejich změna signalizuje změny na které je nutno reagovat. Reakce může být buď změnou dávkování (na tekutý kov) – pokud je signalizován nárůst nebo pokles obsahu bentonitu nebo odstraněním závady na zařízení.

## 2.2 Zhodnocení dosavadní praxe

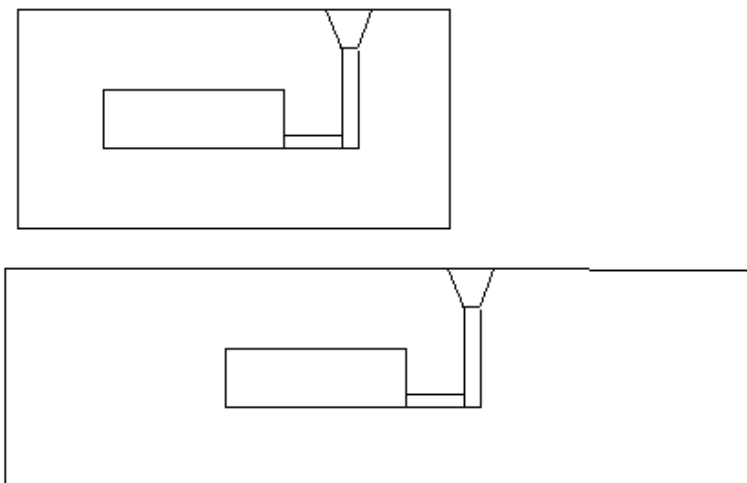
V České republice se ve většině sléváren /14/ používá způsob řízení podle výsledků z laboratoře. V některých slévárnách, kde jsou odlévány odlitky s širokým rozsahem hlavních parametrů – znehodnocení směsi a přísun ostřiva z jader, je používána kombinace řízení podle laboratoře a preventivního řízení podle znehodnocení. Ale pouze v tom smyslu, že jsou stanoveny parametry oživování pro jednotlivé představitele sortimentu a případné odchylky jsou opět řešeny změnou dávkování odhadem podle výsledků z laboratoře.

Ve své práci servisního technika jsem byl často postaven před úkol doporučit vhodný systém a hlavně vysvětlit zásady a výhody preventivního řízení, které je již téměř 30 let uplatňováno ve vyspělých zemích.

Vhodnou názornou pomůckou by byl matematický model oživování a znehodnocování jednotné formovací směsi, na kterém by bylo možno srozumitelně znázornit dlouhodobý průběh změn složení a vysvětlit obtížnost zpětného řízení podle výsledků z laboratoře.

Jako další krok se nabízí zpracování metodiky řízení s využitím tohoto matematického modelu. K odvození vlastního typu obecného modelu mne vedly rozpory v komentářích k metodám podle Hrušky /11/ a podle Egena /2/ a Levelinka /6/. Především to, že tito autoři doporučují volbu koeficientů znehodnocení (které mají obecně rozměr kg bentonitu/kg TK) podle

tepelného zatížení formy – což je jistě správné, ale v zápětí uvádějí jako jeden z parametrů tepelné zátěže poměr formovací směs/TK, v tom smyslu, že při nižší hodnotě tohoto poměru je třeba (je možno) zvýšit koeficient znehodnocení. To je poněkud zavádějící, protože změnu poměru formovací směs/TK si můžeme představit i jako změnu velikosti plochy rámu, při jinak stejném objemu i tvaru odlitku a vtokové soustavy - obr. 5. Taková změna jistě nemá vliv na množství tepelně znehodnocené směsi. Tento rozpor je podstatný jistě pouze teoreticky, protože v reálných situacích se modely preventivního řízení osvědčily.



**Obr. 5: Znázornění změny poměru forma/kov, která nemá vliv na množství znehodnoceného bentonitu**

O mylnosti názoru, že s využitím rámu roste tepelné zatížení způsobené jednotkou tekutého kovu svědčí i tab. 2. Zajisté platí předpoklad, že odlitek s vyšší tloušťkou stěny dosáhne nižšího poměru formovací směs/TK.

Dalším teoretickým problémem je vztahování množství bentonitu potřebného k oživení pouze na tekutý kov. To může platit pouze za předpokladu, že množství nového ostřiva, včetně ostřiva z jader je konstantní. Opět se jedná pouze o metodický rozpor, který je v praxi překryt ostatními vlivy.

Pokud je odlitek se vtokovou soustavou namodelován pro simulaci tuhnutí, tak by bylo možno snadno vypočítat množství znehodnoceného bentonitu a uhlíkaté přísady podle objemu formovací směsi, který je ohraničen izotermami odpovídajícími znehodnocení 50% aktivního bentonitu a 50% nosiče LC. Tento údaj však bohužel není u softwarů pro simulaci běžně k dispozici a také nebylo za tímto účelem prováděno porovnání simulovaných a skutečných teplot ve formě.

Na základě těchto úvah byly stanoveny cíle disertační práce.

### 3 Cíle disertační práce

Hlavním cílem této disertační práce je vyvinout ucelenou metodiku pro optimalizaci řízení kvality jednotných bentonitových formovacích směsí a ověřit její účinnost v praxi při provádění servisu v českých slévárnách.

Byly stanoveny tyto dílčí cíle:

- Odvodit matematický model znehodnocení a oživování během oběhů jednotné směsi, který by umožňoval graficky vyjádřit postupné ustálení složení do rovnovážného stavu.
- Zpracovat metodiku řízení s využitím tohoto modelu
- Ověřit nasazení metodiky řízení v praxi
- Navrhnout jednoduchou metodu pro zjišťování teploty degradace pojiva a nosiče lesklého uhlíku v jednotných bentonitových formovacích směsích.
- Ověřit možnost využití simulačních programů pro zjištění množství tepelně degradované směsi.

## 4 Odvození matematického modelu znehodnocení a ožívování

Formovací směs se skládá z několika složek, základní jsou ostřívo, pojivo, přísady a voda. Pro zjednodušení budeme předpokládat, že směs je v každé fázi homogenní.

Ve slévárně obíhají dva systémy surovin – kov a formovací směs. Společně se vyskytují během odlévání a chladnutí. Graficky jsou tyto systémy znázorněny na Obr. 6.

### 4.1 Definování základních vztahů

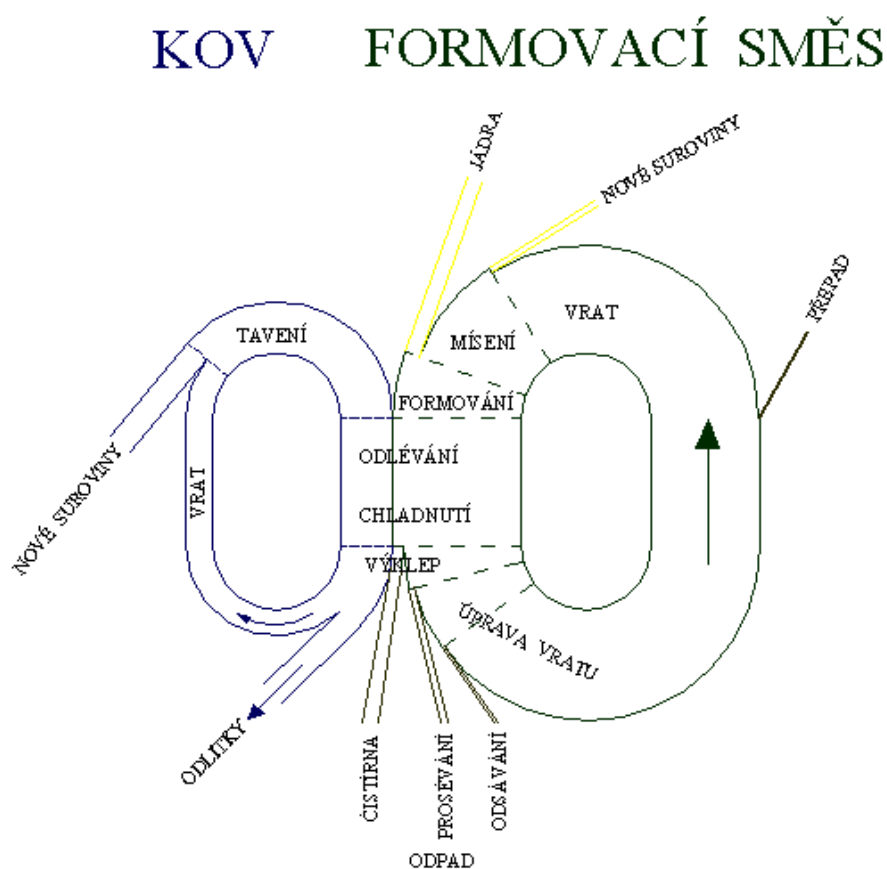
Pro následující odvození budeme uvažovat s obecnou složkou formovací směsi. Celé odvození má smysl pro bentonit a pro přísady. Pro obsahy jednotlivých složek budeme pro jednoduchost používat bezrozměrné podíly.

**Stupeň oživení  $n$**  – poměr hmotnosti nových surovin (včetně ostřiva z jader) přidanych do jednotné formovací směsi během jednoho oběhu k celkové hmotnosti namísené formovací směsi v daném oběhu. Pokud údaj  $n$  vynásobíme 100, dostaneme hodnotu oživení v %. Přitom předpokládáme, že celková hmotnost namísené formovací směsi je v každém oběhu konstantní. To znamená:

$$G_0 = G_1 = G_i \quad (17)$$

$$n = \frac{G_n}{G_1} = \frac{G_n}{G_0} \quad (18)$$

Kde značí:  $G_{0,1,i}$  hmotnost namísené formovací směsi v oběhu 0,1,i [kg]  
 $G_n$  hmotnost nových surovin [kg]  
 $n$  stupeň oživení



Obr. 6: Oběh surovin ve slévárně

**Stupeň znehodnocení  $z$**  – poměr hmotnosti znehodnocené směsi (ve které došlo ke znehodnocení uvažované složky formovací směsi) v daném oběhu ke hmotnosti namísené formovací směsi v daném oběhu. Po vynásobení 100 obdržíme údaj znehodnocení v %.

$$z = \frac{G_z}{G_0} \quad (19)$$

Kde značí:  $z$  stupeň znehodnocení  
 $G_z$  hmotnost znehodnocené směsi [kg]  
 $G_0$  hmotnost namísené formovací směsi v oběhu 0 [kg]

**Podíl složky ve vratu  $a_v$**  – poměr hmotnosti uvažované složky ve vratné směsi ke hmotnosti vratné směsi.

$$a_v = \frac{A_v}{G_v} \quad (20)$$

Kde značí:  $a_v$  podíl složky ve vratu  
 $A_v$  hmotnost složky ve vratu [kg]  
 $G_v$  hmotnost vratné směsi [kg]

**Podíl složky v oživení  $a_n$**  – poměr hmotnosti uvažované složky v nových surovinách k celkové hmotnosti nových surovin.

$$a_n = \frac{A_n}{G_n} \quad (21)$$

Kde značí?  $a_n$  podíl složky v oživení  
 $A_n$  hmotnost složky v oživení [kg]  
 $G_n$  celková hmotnost nových surovin [kg], včetně ostřiva z jader

**Podíl složky ve formovací směsi  $a$**  – poměr hmotnosti uvažované složky k celkové hmotnosti namísené formovací směsi v příslušném oběhu. Po vynásobení 100 obdržíme obsah složky v %.

pro nultý oběh platí  $a_0 = \frac{A_0}{G_0} \quad (22)$

analogicky pro 1.oběh  $a_1 = \frac{A_1}{G_1} \quad (23)$

## 4.2 Odvození vztahu mezi obsahem složky v oběhu 0 a 1

Při tom pro jednoduchost předpokládáme, že směs se během úpravy zhomogenizuje, do ztrát jde stejný podíl znehodnocené i nedotčené směsi

V disertační práci je uvedeno podrobné odvození **vztahu pro podíl složky v oběhu 1 v závislosti na jejím podílu v předcházejícím oběhu 0**, na stupni znehodnocení, stupni oživování a na podílu složky v oživení:

$$a_1 = a_0 \cdot (1 - z) \cdot (1 - n) + a_n \cdot n \quad (29)$$

Kde značí:  $a_1$  podíl uvažované složky v oběhu 1  
 $a_0$  podíl uvažované složky v oběhu 0  
 $a_n$  podíl uvažované složky v nových surovinách (v oživení)  
 $n$  stupeň oživování  
 $z$  stupeň znehodnocení

## 4.3 Výpočet rovnovážného obsahu složky

Rovnovážný obsah dostaneme, pokud proběhne za stejných podmínek dostatečný počet oběhů. V práci je opět podrobně popsán postup odvození. Výsledkem je vztah (34). Ze kterého vyplývá, že konečný (rovnovážný) obsah složky „a“ v jednotné směsi (po dostatečném počtu oběhů)



nezávisí na výchozím obsahu, ale pouze na stupni celkové ztráty, stupni oživení a na podílu složky v oživení.

**Rovnovážný podíl složky ve formovací směsi  $a$ :**

$$a = \frac{a_n \cdot n}{1 - (1 - z_c) \cdot (1 - n)} \quad (34)$$

Kde značí:  $a$  rovnovážný podíl složky ve formovací směsi  
 $a_n$  podíl složky v oživení  
 $n$  stupeň oživení  
 $z_c$  stupeň celkové ztráty složky

#### 4.4 Grafické znázornění průběhů změn v jednotné formovací směsi

Odvození matematického modelu oživování a znehodnocování bylo prováděno mimo jiné proto, aby bylo možno graficky znázornit průběhy změn v jednotné formovací směsi během jednotlivých oběhů. Pro tento účel se nejlépe hodí vztah (29), který lze zobecnit jako:

**Závislost podílu složky v oběhu  $i$  na jejím podílu v předcházejícím oběhu  $i-1$ .**

$$a_i = a_{i-1} \cdot (1 - z_c) \cdot (1 - n) + a_n \cdot n \quad (35)$$

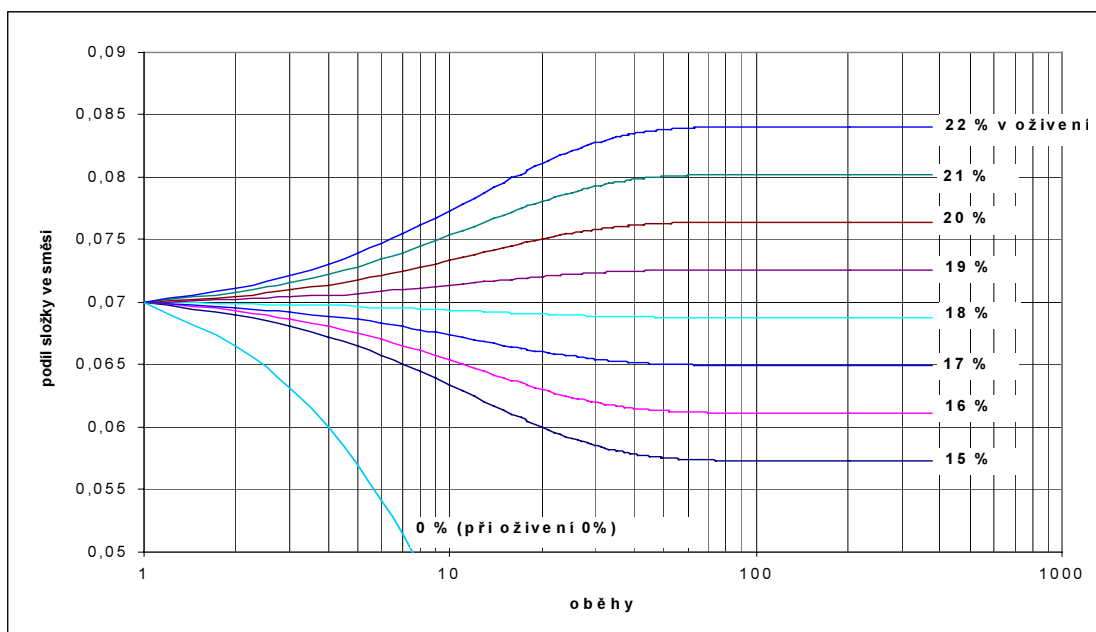
Kde značí:  $a_i$  podíl složky v „ $i$ -tém“ oběhu  
 $a_{i-1}$  podíl složky v předcházejícím oběhu  
 $z_c$  stupeň celkové ztráty složky  
 $n$  stupeň oživení  
 $a_n$  podíl složky v oživení

Z příspěvku /14/ vyplývá, že slévárny litin s lepší než průměrnou úrovní řízení pracují asi s těmito parametry jednotné formovací směsi:

obsah bentonitu	7 %, to je	rovnovážný podíl složky $a = 0,07$
oživení	3 %	stupeň oživení $n = 0,03$
obsah bentonitu v oživení	18 %	podíl složky v oživení $a_n = 0,18$

Těmto parametrům podle rovnice (34) odpovídá následující stupeň celkové ztráty bentonitu:

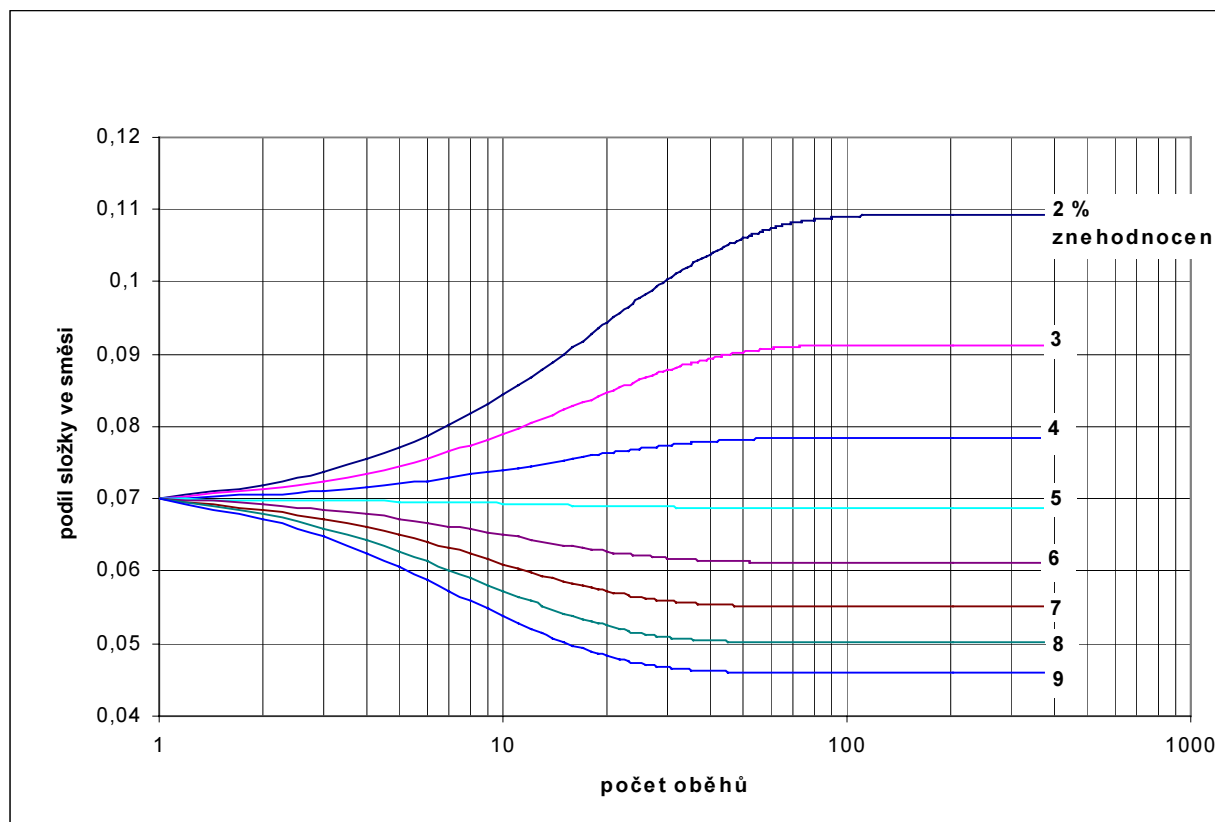
$$z_c = \frac{n \cdot (a_n - a)}{a \cdot (1 - n)} = \frac{0,03 \cdot (0,18 - 0,07)}{0,07 \cdot (1 - 0,03)} = 0,0486 \cong 0,05$$



**Obr. 7** Závislost podílu složky ve směsi na počtu oběhů při znehodnocení 5%, oživení 3%, výchozím obsahu 7% a různém dávkování

Tedy obvyklá celková ztráta bentonitu ve slévárnách litiny je asi 5 %.

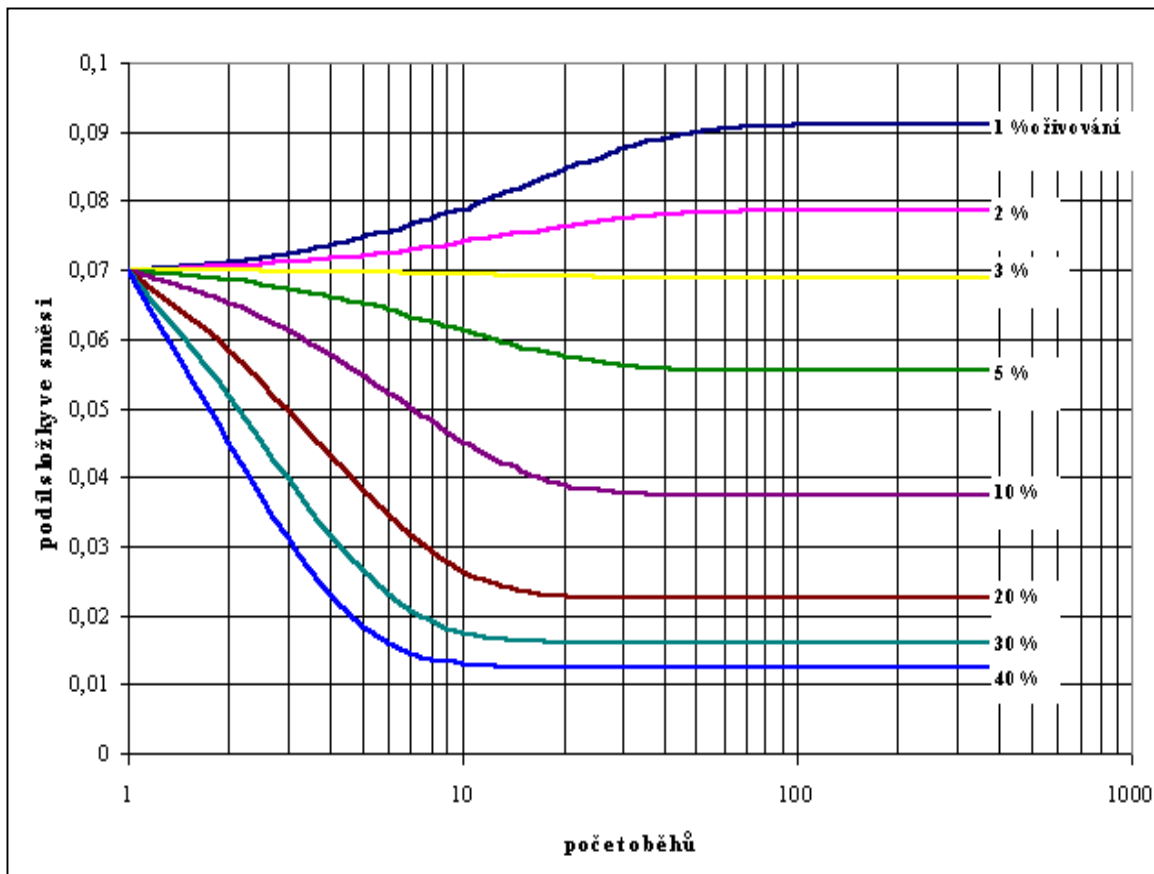
Rovnici (35) si nyní vypočteme pro dostatečný počet oběhů při různých podmínkách. Na Obr. 7 je grafické znázornění toho, když měníme dávkování bentonitu v oživení. Nový rovnovážný stav nastane po asi 40 až 60 obězích. Ale už (teprve) po 20 obězích je podíl složky dostatečně blízký rovnovážnému stavu. To tedy znamená, že po změně dávkování má smysl laboratorně kontrolovat výsledek až za min. 20 oběhů směsi. Spodní křivka ukazuje jak bude klesat podíl této složky ve směsi, pokud zcela zastavíme oživování. To je v praxi častý případ, pokud není k dispozici



**Obr. 8** Změna podílu složky při změně znehodnocení, při výchozím obsahu složky 7 %, oživení 3 % a podílu složky v oživení 18 %

bentonit. Na Obr. 8 je znázorněna dynamika změn, pokud dojde k rozdílnému znehodnocení, to je když se změní odlietek (ale zůstane konstantní stupeň oživování, to je včetně přísunu ostřiva z jader). Rychlost změny je stejná jako na Obr. 7, to znamená, že změna sortimentu (při zachování stupně oživení a podílu složky v oživení) se na vlastnostech směsi zcela projeví opět po 40 až 60 obězích. Po 20 obězích je ale výsledná hodnota podílu složky ve směsi již dostatečně blízká rovnovážnému stavu.

V praxi ale často dochází ke změně oživování díky kolísání množství ostřiva, které se do směsi dostane z rozpadlých jader. Pokud na měnící se množství nového ostřiva z jader nereagujeme změnou dávkování ostřiva do mísiče, případně i změnou dávkování bentonitu a přísad, tak bude docházet k ději, který je znázorněn na Obr. 9. Vidíme, že v extrémních případech může dojít k velmi rychlé změně obsahu složky. Rovnovážný stav by sice teoreticky nastal opět za 20 až 40 oběhů, ale již po několika obězích se může stát, že obsah složky poklesne natolik, že vzniknou vady forem nebo odlitků. Při zvýšeném výskytu ostřiva ze zbytků jader však dochází i k degradaci bentonitu vlivem zbytků jádrového pojiva a tím se efekt snížení obsahu aktivního bentonitu může ještě výrazně prohloubit. To pro praxi znamená, že sledování množství ostřiva z jader a preventivní reagování změnou množství nového ostřiva do mísiče, případně i změnou dávky bentonitu je jediné možné řešení.



**Obr. 9** Závislost obsahu složky ve směsi na počtu oběhů a stupni ožívování ostřivem z jader, při výchozím obsahu složky 7 %, konstantním množství složky v ožívování (18 % při oživ. 3 %) a znehodnocení 5 %

Uvedené grafy odpovídají zhruba bentonitu. Stejný průběh by mělo i znázornění nosiče lesklého uhlíku, pouze by se musely zvolit odpovídající parametry. Obvyklé dávkování je asi 0,4 násobek dávky bentonitu a obvyklý obsah ve směsi je asi 2,5 %. Tomu by odpovídaly následující průměrné parametry pro výpočet stupně celkové ztráty:

obsah nosiče LC	2,5 %, to je	rovnovážný podíl složky $a = 0,025$
oživení	3 %	stupeň oživení $n = 0,03$
obsah nosiče LC v oživení	7,2 %	podíl složky v oživení $a_n = 0,072$

Těmto parametrům podle rovnice (34) odpovídá následující stupeň celkové ztráty nosiče LC:

$$z_c = \frac{n \cdot (a_n - a)}{a \cdot (1 - n)} = \frac{0,03 \cdot (0,072 - 0,025)}{0,025 \cdot (1 - 0,03)} = 0,0581 \cong 0,06$$

Tedy obvyklý celkový stupeň ztráty nosiče lesklého uhlíku je vyšší než pro bentonitu. Důvodem je patrně nižší teplota degradace nosiče LC než bentonitu.

#### 4.5 Určení potřebné změny dávkování při požadované změně obsahu složky ve směsi

Z rovnice (34) vypočteme podíl složky v oživení.

$$a_n = \frac{a \cdot (1 - (1 - z_c) \cdot (1 - n))}{n} \tag{36}$$

Pokud si podle rovnice (36) nyní vypočteme podíl složky v oživení při požadovaném podílu složky ve směsi 1 % ( $a = 0,01$ ), dostaneme potřebnou **změnu podílu složky v oživení  $\Delta a_n$**  pro korekci obsahu složky ve směsi o 1 % nebo o 0,01 v absolutním vyjádření.

$$\Delta a_n = \frac{1 - (1 - z_c) \cdot (1 - n)}{100 \cdot n} \quad (37)$$

Konkrétní hodnoty stupně celkové ztráty  $z_c$  a stupně oživování  $n$  musíme zjistit pomocí bilance směsi.

Pro řízení oživování je třeba si uvědomit proč se vlastně nový bentonit přidává. Přesně to formuloval Hruška /11/. Celkové množství nového bentonitu se tedy skládá z částí „na ostřívo“ a „na tekutý kov“. Na ostřívo je třeba přidat tolik, aby se z něj udělala formovací směs a na tekutý kov musíme přidat to, co bylo znehodnoceno.

Protože potřebujeme řídit oživování podle odlitého tekutého kovu, tak si zavedeme veličinu:  **$a_T$ - podíl části složky (bentonitu) na tekutý kov k množství tekutého kovu.**

$$a_T = \frac{A_T}{TK} \quad (40)$$

V disertační práci je dále odvozena rovnice pro výpočet potřebné **změny podílu části složky na tekutý kov  $\Delta a_T$** , chceme-li změnit rovnovážný obsah složky ve směsi o 1 %.

$$\Delta a_T = \frac{p \cdot (1 - (1 - z_c) \cdot (1 - n))}{100} \quad (42)$$

Vypočet hodnoty  $\Delta a_T$  slouží ke změně dávkování bentonitu, pokud chceme zvýšit nebo snížit obsah aktivního bentonitu v jednotné směsi o 1 %.

Stejným způsobem lze vypočítat potřebné změny dávkování i pro ostatní přísady.

Uvedený postup tedy umožní relativně přesné stanovení potřebné změny dávkování, když se změnily podmínky ve slévárně a v jejich důsledku došlo k nežádoucí změně ve složení jednotné formovací směsi. Podmínkou ovšem je zpracování bilance formovací směsi za období minimálně jednoho měsíce a zjištění jejího skutečného složení na začátku a na konci bilancovaného období a raději i během tohoto období, aby bylo možno z průběhu hodnot usoudit, zda je systém v rovnováze.

## 5 Metodika řízení oživování jednotné formovací směsi

Na základě metodiky podle Hrušky /11/, rozboru literatury a odvozeného matematického modelu byla zpracována metodika pro řízení jednotných formovacích směsí.

Hlavní myšlenkou je preventivní řízení oživování podle skutečného znehodnocení (tekutého kovu). Metodika je zpracována formou tabulek, které se mohou buď vyplňovat ručně a výpočty provádět na kalkulačce nebo lze s výhodou využít jejich zpracování v programu Excel. Tabulky jsou uvedeny v příloze č. 1.

### 5.1 Bilance formovací směsi

Na tab. 1/příloha 1 je zpracována bilance formovací směsi, doplněná o výpočty hodnot potřebných jak pro vlastní řízení, tak pro zásobování a ekonomické rozborů. Při zpracování je třeba mít k dispozici údaje k bilanci za období min. 1 měsíce. Zpracování bilance za kratší období může být zatíženo velkou chybou. Vstupní hodnoty, které je třeba bilancovat jsou barevně zvýrazněny. Ve sloupci „způsob stanovení“ jsou u počítaných položek uvedeny matematické

vzorci. Tučná čísla značí č. řádků. U hodnot zjišťovaných laboratorně je třeba dosadit průměrné hodnoty za bilancované období. Pokud by existoval trend růstu nebo poklesu u měřené hodnoty je lépe dosadit rovnovážné hodnoty z konce období.

## 5.2 Řízení oživování

### 5.2.1 Základní principy

#### Množství nového ostřiva

Na každou tunu odlitého kovu je nutno pro zachování množství vyplavitelných látek a stupně oolitizace přidat 100 až 160 kg nového ostřiva podle tepelného zatížení forem.

Přitom nové ostřivo se do směsi dostává třemi cestami:

- a) oživováním jednotné směsi
- b) z rozpadlých jader
- c) z modelové směsi (pokud je používána)

Čím je vyšší tepelné zatížení formy (vysoká teplota lití, velký povrch odlitku, dlouhá doba chladnutí ve formě, malé množství jader), tím je třeba přidat více nového ostřiva.

Abychom mohli určit potřebnou dávku nového ostřiva do mísiče, musíme nejdříve zjistit jaké množství ostřiva se do směsi dostane z jader a z modelové směsi. Přitom množství ostřiva z jader by dlouhodobě nemělo přesahovat 45 % celkové potřeby nového ostřiva.

#### Množství nového bentonitu

Bentonit přidáváme ze dvou důvodů:

- a) Doplnění k novému ostřivu.
- b) Náhrada znehodnoceného a ztraceného bentonitu ve vratné směsi.

ad a) K novému ostřivu je třeba přidat tolik bentonitu, aby se dodržel požadovaný obsah aktivního bentonitu ve směsi – obvykle 6 až 10 %.

ad b) Pro nahrazení tepelně degradovaného a ztraceného bentonitu ve vratné směsi je třeba na každou tunu odlitého kovu přidat 25 až 60 kg nového bentonitu.

Potřebné množství je závislé na tepelném namáhání formy (stejně jako u nového ostřiva) ale také na tepelné odolnosti bentonitu a jeho ztrátách (například odsáváním). Celkové množství nového bentonitu je pak dáno součtem obou hodnot (a + b).

#### Množství nového nosiče lesklého uhlíku

Zde platí podobné zásady jako u bentonitu, proto potřebné množství stanovíme poměrem k novému bentonitu celkem. Obvykle 0,2 až 0,5 násobek bentonitu.

Volba závisí na tepelném namáhání formy a na kvalitě používaného nosiče. Při používání směsného bentonitu je poměr dán výrobcem a měl by se přizpůsobit potřebám slévárny.

#### Množství směsného bentonitu

je dáno součtem bentonitové (ad 6.2.1.2) a uhlíkaté (ad 6.2.1.3) složky.

#### Množství ostatních přísad

Ostatní přísady (např. škrob a pod.), pokud jsou používány, stanovíme opět poměrem k novému bentonitu. Obvykle 0,01 až 0,1 násobek přídatku bentonitu.

Uplatnění těchto principů doporučuji buďto zpětně podle předchozího dne nebo podle právě vyráběného odlitku – podle modelu.

Pokud je intenzivní vícesměnný provoz s vysokou frekvencí oběhů za směnu – např. 4x za směnu, tak je výhodnější při použití zpětného způsobu řídit směs podle předchozí směny.

### 5.2.2 Řízení oživování podle předchozího dne

Principy z předchozí kapitoly jsou uplatňovány se zpožděním 1 dne, což obvykle znamená 1 až 6 oběhů směsi. Tedy stále mnohem rychleji než podle výsledků z laboratoře – jak jsme si ukázali, tak rovnovážný stav se docílí až za 40 oběhů.

Metodika je zpracována formou tabulky 2/příloha 1. Každý den na začátku směny je nutno zjistit údaje v řádcích 1 ÷ 6 (z toho údaje v ř. 4 a 5 se nemění) a dopočítat podle zvolených poměrných parametrů (ř. 7 ÷ 10) ostatní hodnoty. Uspořádání tabulky je stejné jako v případě bilance a tabulka samozřejmě existuje i jako program v Excelu.

Výsledkem jsou doporučené hodnoty oživování v kg/dávku v řádcích 22 ÷ 27. Tyto dávky se nastaví na vahách mísiče a nemění se dokud nejsou stanoveny další hodnoty. Výpočet dávek je proveden s předpokladem, že v následujícím období bude namísen stejný počet dávek jako v předcházejícím období – což bývá v praxi obvykle s dostatečnou přesností splněno.

Pokud nastane případ, že z jader přijde více ostřiva než je požadované množství, tak musíme v řádku 14 dosadit hodnotu z řádku 6. V tomto případě bude dávka ostřiva do mísiče (řádek 22) rovna 0.

Když se složení směsi odchýlí od požadovaného, tak je třeba změnit poměrné údaje v řádcích 7 ÷ 10 podle tabulky 5. K určení o kolik je třeba tyto údaje měnit použijeme druhou a třetí část tabulky 1/příloha 1.(viz 6.1) Změnu dávkování tedy neprovádíme jednorázově a odhadem, ale systematicky pro příští období změnou poměrných parametrů.

### 5.2.3 Řízení oživování podle modelu

Metodika je opět zpracována formou tabulky 3/příloha 1, v programu Excel. Podle technologických údajů k jednotlivým modelům se stanoví vstupní údaje v řádcích 1 ÷ 3 hodnotu v řádku 5 – množství ostřiva z jader stanovíme odhadem podle typu jádrového pojiva a tvaru jádra. Hodnoty v řádcích 4 a 6 jsou pro všechny modely konstantní. Ostatní údaje se opět dopočítají podle zvolených poměrných parametrů v řádcích 7 ÷ 10.

Pokud nastane případ, že z jader přijde více ostřiva než je požadované množství nového ostřiva celkem, tak musíme v řádku 14 dosadit hodnotu z řádku 5. V tomto případě bude dávka ostřiva do mísiče (ř. 18) rovna 0.

Výsledkem výpočtů jsou opět údaje o dávkování do mísiče v řádcích 18 ÷ 22. Tyto údaje je třeba zaokrouhlit podle přesnosti nastavení vah na mísičích. Změnu dávkování provedeme ihned při nasazení modelu do formovací linky.

Pokud se složení směsi vychýlí, tak je třeba změnit poměrné údaje v řádcích 7 ÷ 10 podle tabulky 5. K určení o kolik je třeba tyto údaje měnit použijeme druhou a třetí část tabulky 1/příloha 1.(viz 6.1) Změnu dávkování tedy opět neprovádíme jednorázově a odhadem, ale systematicky pro příští období u všech modelů změnou poměrných parametrů.

**Tabulka 5: Opatření při změnách složení jednotné formovací směsi**

hodnocená vlastnost	změna proti požadavkům	opatření		
		celkem nové ostřívo na tekutý kov	část bentonitu na tekutý kov	nosič LC na bentonit
Průměrné hodnoty		0,100 ÷ 0,160 t/t TK	0,020 – 0,060 t/t TK	0,2 – 0,5 kg/kg
vyplavitelné látky, (oolitizace, znečištění směsi)	roste	zvýšit		
	klesá	snížit		
aktivní bentonit (MB)	roste		snížit	
	klesá		zvýšit	
spalitelné látky, (obsah C, LC)	roste			snížit
	klesá			zvýšit

## 6 Nasazení navržené metodiky ve slévárně Feramo M.I., s.r.o. Brno /17/

Slévárna Feramo M.I., s.r.o. produkuje odlitky ze šedé litiny třídy 42 2415, 20, 25 v mnoha rozdílných položkách. Váhově se jedná o odlitky od několika dekagramů až po asi 100 kg. Odlitky jsou vyráběny na automatických formovacích linkách DISA 2013 a 2032, na formovacích strojích FOROMAT 40 a na ručním pracovišti.

Parametry jednotné formovací směsi definovány podle přehledu v tab. 6.

V minulosti byla kvalita formovací směsi řízena podle výsledků laboratorních rozborů a změny byly prováděny odhadem. Naměřené hodnoty byly graficky vyhodnocovány a na vznikající trendy změn bylo reagováno změnou dávkování. Stávalo se však, že například při vyšším množství jádrové práce neměla formovací směs ty parametry, které jsou požadovány.

Od 1.4.1999 bylo zavedeno preventivní řízení podle zpracované metodiky. Vzhledem k mísení vratu z několika pracovišť byla zvolena metoda dávkování podle předchozího dne. Koeficienty průměrného znehodnocení se postupně ustálily na hodnotách uvedených v tabulce 7.

vlhkost	%	3 ÷ 3,6
spěchovatelnost	%	30 ÷ 45
sytná objemová hmotnost	kg/dm <sup>3</sup>	0,85 ÷ 1,05
vaznost	kPa	170 ÷ 230
pevnost v tahu	kPa	19 ÷ 28
pevnost ve štěpu	kPa	35 ÷ 45
pevnost ve stříhu	kPa	40 ÷ 55
prodyšnost	j.p. SI	> 160
nasákavost	mm	< 25
aktivní bentonit MM	%	6,5 ÷ 8,5
vyplavitelné látky	%	11 ÷ 14
ztráta žíháním	%	4 ÷ 5,5
pH		7 ÷ 8

celkem nové ostřívo na tekutý kov	0,120 t/t
bentonit na tekutý kov (a <sub>T</sub> )	0,030 t/t
nosič LC na bentonit	0,30 t/t

**Tabulka 6: Parametry jednotné formovací směsi**

**Tabulka 7: Koeficienty pro výpočet dávkování**

**Tabulka 8: Spotřeba surovin před a po zavedení (1.4.1999) metodiky řízení podle bilance**

rok	1997	1998	1999	2000
výroba tekutého kovuTK [t]	15 251	16 289	16 556	20 307
	spotřeba surovin			
bentonit Keribent R [t]	840	828	753	794
bent/TK [t/t]	0,055	0,051	0,045	0,039
písek Štřeleč O-27 [t]	199	284	210	1 000
písek ŠH [t]	4 185	3 794	3 435	4 038
písek celkem [t]	4 384	4 078	3 645	5 038
z toho písek na jádra [t]			558	905
písek/TK [t/t]	0,287	0,250	0,220	0,248
nosič LC [t]	234	211	246	244
nosič LC/TK [t/t]	0,015	0,013	0,015	0,012

### 6.3 Výsledek zavedení

**Tabulka 9: Vyčíslení úspor za suroviny**

		Bentonit	Křemenný písek	Nosič LC
Měrná spotřeba 1997÷1998	t/t	0,053	0,268	0,014
Teoretická spotřeba v r. 2000 (měrná spotřeba jako 1997÷98)	t	1074	5 448	287
Skutečná spotřeba v r. 2000	t	794	5 038	244
Rozdíl - úspora v t	t	280	410	43
Rozdíl - úspora v Kč	Kč	1 104 646	180 512	600 708
snížení měrné spotřeby v %	%	26	8	15
Celkem úspory	Kč	1 885 866		

Ekonomický efekt lze vyjádřit rozdílem mezi skutečnou a teoretickou spotřebou surovin roku 2000 vypočtenou na průměrné hodnoty měrných spotřeb na tunu tekutého kovu z let 1997 a 1998.

vlastnost		průměr 08-10/1998	průměr 06-08/1999	průměr 03-10/2000
vlhkost	%	3,72	3,54	3,17
spěchovatelnost	%	38	38	35,8
prodyšnost	j.p. SI	175	195	187
vaznost	kPa	200	196	204
vyplavitelné látky	%	13,8	12,9	12,2
ztráta žiháním	%	5,5	5,2	4,3
bentonit vypočtený	%	8,0	7,7	7,4

**Tabulka 10: Průměry naměřených hodnot vlastností jednotné formovací směsi**

bentonitu vypočteného  $b_v$  podle (9), /15/ To se také pravděpodobně významně zasloužilo o snížení celkové zmetkovitosti v roce 2000 o 0,5 % proti průměru let 1997 a 1998.

Tyto údaje jsou uvedeny v tabulce 9. Kromě přímého ekonomického efektu se zavedení projevilo příznivě i na změně složení a vlastností jednotné formovací směsi. V tabulce 10 jsou uvedeny průměrné hodnoty v náhodně vybraných obdobích. Podstatné je hlavně snížení vyplavitelných látek, spalitelných látek a potřebného obsahu



### 6.3.1 Statistické vyhodnocení hodnot formovací směsi

K vyhodnocení byl využit program QC Expert. Základní statistická analýza byla provedena na chronologicky seřazených jednotlivých hodnotách.

Statistická kontrola procesu byla provedena na souborech hodnot seřazených podle data měření. Byly použity následující metody:

- SPC regulační diagramy – Shewhart
- EWMA regulační diagramy – exponenciálně vážené klouzavé průměry

Účelem základní analýzy bylo posoudit normalitu rozložení dat a srovnat ze statistického hlediska vlastnosti souborů hodnot před a po zavedení metodiky. Hlavní výsledek srovnání byl již uveden v tab. 10, to je posun průměrných hodnot příznivým směrem z hlediska kvality a ekonomie. Shrnutí některých charakteristik ze základního statistického rozboru je v tabulce 11.

Pro posouzení kvality řízení podle zavedené metodiky je třeba srovnávat především kolísání obsahu bentonitu ( $b_v$  - bentonit vypočtený), ztráty žíháním směsi (jako kritérium obsahu nosiče LC) a obsahu vyplavitelných látek. Kolísání vlhkosti a spěchovatelnosti je výsledkem práce automatického dovlhčování. Kolísání pevnostních vlastností a prodyšnosti je výsledkem jak složení, tak vlhkosti formovací směsi.

**Tabulka 11. Některé výsledky základního statistického rozboru hodnot jednotné formovací směsi Feramo**

Z hodnot uvedených v tab. 11 vyplývá, že po zavedení řízení podle navržené metodiky došlo většinou i ke snížení rozptylu hodnot (směrodatná odchylka), to se příznivě projevilo i na hodnotách indexu způsobilosti  $c_p$ . /18/ Záměrně zde není použit index způsobilosti  $c_{pk}$ , který zahrnuje i velikost střední hodnoty, protože vlivem příznivého posunu středních hodnot u

vlastnost	parametr \ období	08-10/1998	06-08/1999	03-10/2000	01-12/2001
bentonit $b_v$ technol. meze 6,5 ÷ 8,5 %	průměr	8,01	7,71	7,36	7,50
	sm. odchylka	0,539	0,534	0,420	0,443
	normalita	přijata	přijata	zamítnuta	přijata
	$C_p$	1,24	1,25	(1,59)	1,5
ztráta žíháním technol. meze 4 ÷ 5,5 %	průměr	5,5	5,2	4,3	4,3
	sm. odchylka	0,446	0,624	0,20	0,43
	normalita	přijata	přijata	přijata	zamítnuta
	$C_p$	1,1	0,8	2,5	(1,2)
vyplav. látky technol. meze 11 ÷ 14 %	průměr	13,8	12,9	12,2	12,2
	sm. odchylka	0,710	0,732	0,679	0,530
	normalita	přijata	přijata	přijata	přijata
	$C_p$	1,4	1,4	1,5	1,9
vaznost technol. meze 170 ÷ 230 kPa	průměr	200	196	204	208
	sm. odchylka	13,0	12,4	12,4	12,5
	normalita	přijata	zamítnuta	přijata	přijata
	$C_p$	1,5	(1,6)	1,6	1,6
vlhkost technol. meze 3,0 ÷ 3,6 %	průměr	3,72	3,54	3,17	3,21
	sm. odchylka	0,230	0,215	0,146	0,156
	normalita	zamítnuta	zamítnuta	zamítnuta	zamítnuta
	$C_p$	(0,43)	(0,46)	(0,68)	(0,64)
spěchovatelnost technol. meze 30 ÷ 45 %	průměr	37,78	38,34	36,44	36,73
	sm. odchylka	3,886	4,331	3,587	4,063
	normalita	zamítnuta	zamítnuta	zamítnuta	zamítnuta
	$C_p$	(0,64)	(0,58)	(0,70)	(0,62)

některých vlastností lze nyní posunout i technologické meze a vyhodnocení z období před a po zavedení metodiky by nebylo objektivní.

Lze tedy formulovat závěr, že z hlediska obsahu bentonitu byl proces před i po zavedení metodiky podle diagramů EWMA pod statistickou kontrolou. Po zavedení metodiky se podařilo zúžit rozptyl hodnot a při zachování pevnostních vlastností směsi se podařilo snížit potřebný obsah bentonitu. To lze považovat za výborný výsledek.

Z hlediska statistického řízení procesu lze stejně hodnotit i ztrátu žíháním a obsah vyplavitelných látek.

Směs tedy byla z hlediska SPC výborně řízena i před zavedením této metodiky, přesto se podařilo tento proces ještě významně vylepšit.

## 7 Návrh metody na hodnocení teploty degradace bentonitu a nosiče LC

Při určování lesklého (pyrolýzního) uhlíku LC podle Bindernagelové /20/ ve směsi nosiče LC s bentonitem dochází k uvolňování vázané vody z bentonitu a tedy ke vzniku oxidační atmosféry. Díky této atmosféře dojde nejprve k hoření uvolňovaného C z prchavých látek na CO<sub>2</sub>. To znamená, že se sníží množství nakondenzovaného pyrolýzního uhlíku /19/ na křemenné vatě.

V praxi se vyskytují hlavně dva případy měření obsahu LC u nosiče LC ve směsi s bentonitem – směsné bentonity a formovací směsi. Pokud předpokládáme, že úbytek LC během měření je způsoben hlavně bentonitem, tak lze také předpokládat, že se bude jeho velikost měnit s obsahem bentonitu. Bude-li tato závislost lineární, tak můžeme psát:

$$LC \cong LC_v = LC_n + (k_B \cdot B_{akt}) \quad (44)$$

Kde značí:  $LC$  obsah lesklého (pyrolýzního) uhlíku [%]  
 $LC_v$  lesklý uhlík vypočtený [%]  
 $LC_n$  obsah LC naměřený [%]  
 $k_B$  konstanta závislosti úbytku LC na obsahu aktivního bentonitu [%LC / %B<sub>akt</sub>]  
 $B_{akt}$  obsah aktivního bentonitu [%]

Tabulka 12. Hodnoty konstant pro výpočet úbytku LC

Zkoušený materiál	Keribent C 30		Ecosil B 80	
	směsný bentonit	formovací směs s 90 % ostřiva	směsný bentonit	formovací směs s 90 % ostřiva
$k_{MM}$	0,0072	0,0062	0,0045	0,0039
$k_B$	0,0220	0,0208	0,0146	0,0131

Zkoušený materiál	Keribent R + Simix 12		Sabenil MZK + Simix 12		Keribent R + Priocarbon 200	
	80 % bent. + 20 % přísada	formovací směs s 90 % ostřiva	80 % bent. + 20 % přísada	formovací směs s 90 % ostřiva	80 % bent. + 20 % přísada	formovací směs s 90 % ostřiva
$k_{MM}$	0,0075	0,0060	0,0061	0,0034	0,0072	0,0057
$k_B$	0,0210	0,0175	0,0179	0,0113	0,0238	0,0199

Při stanovování obsahu LC ve formovacích směsích podle tohoto návrhu, musíme nejdříve zjistit obsah aktivního bentonitu pomocí adsorpce metylénové modře MM. Proto můžeme úbytek LC při měření vztáhnout přímo na hodnotu adsorpce MM, která je obvykle udávána v [mgMM/g]. Vztah (44) se pak změni:

$$LC \cong LC_v = LC_n + (k_{MM} \cdot MM) \quad (45)$$

Kde značí:

$LC$	obsah lesklého (pyrolýzního) uhlíku [%]
$LC_v$	lesklý uhlík vypočtený [%]
$LC_n$	obsah LC naměřený [%]
$k_{MM}$	konstanta závislosti úbytku LC na adsorpci metylénové modře [%LC / mgMM/g]
$MM$	adsorpce metylénové modře [mgMM/g]

V tabulce 12 jsou uvedeny konstanty pro některé kombinace typů bentonitů a nosičů LC, podle zkoušek provedených v rámci měření teploty degradace.

### 7.3.1 Interpretace naměřených a vypočtených hodnot obsahu LC ve slévárenských formovacích směsích

Pro interpretaci nalezených hodnot, zvláště ve formovacích směsích, potom vycházíme ze skutečně naměřených hodnot obsahu LC.

Pokud je nějaký obsah lesklého uhlíku naměřen ( $LC_n > 0$ ) je hodnota vypočteného obsahu  $LC_v$  brána jako obsah látek schopných tvořit LC ve formovací směsi. Tedy:

$$LC = LC_v$$

Pokud není naměřen žádný lesklý uhlík ( $LC_n = 0$ ) a je přitom předpoklad, že ve směsi jsou obsaženy uhlíkaté přísady, tak je výsledek výpočtu  $LC_v$  interpretován jako maximální možný obsah látek schopných tvořit LC ve formovací směsi. Tedy:

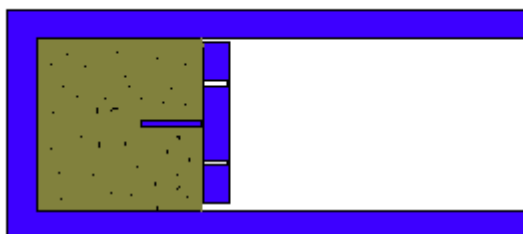
$$LC < LC_v$$

Podle této metodiky je už několik let zjišťován v rámci servisu fy KERAMOST, a.s. obsah LC ve vzorcích formovacích směsí dodaných ze sléváren. Zvláště se to osvědčilo u směsí s vysokým obsahem aktivního bentonitu (bylo naměřeno i přes 18 %), kde se obvykle naměří pouze nepatrné hodnoty  $LC_n$ , ale odlitky mají při tom vyhovující povrch.

## 7.4 Metodika zjišťování teploty degradace nosiče LC

Zjišťování teploty degradace nosiče LC způsobem podle /19/nebo /21/, to je měřením ve skutečné formě, je náročné a je spojeno s poměrně rozsáhlým experimentem. Proto byla v rámci této práce navržena metoda laboratorního měření degradace bentonitu a nosiče LC.

Při návrhu bylo vycházeno z toho, že je třeba napodobit děj, který probíhá ve formě po odlití, zvláště pokud se týká atmosféry uvnitř formy. K tomuto účelu byla zkonstruována polouzavřená pěchovací trubice – obr. 15.



**Polouzavřená pěchovací a žihací trubice**

Obr. 15. Náčrt polouzavřené trubice

Do této trubice se nasype navážka na normováleček, vloží se víko a směs se přes víko upěchuje třemi rázy pýchavdla. Víko je opatřeno hřebem, aby při překlopení trubice nedošlo k jeho uvolnění. Trubice se potom vloží do žíhací pece a žihá se na různé teploty 200 až 600 °C, vždy po dobu 2 hod. Přitom se předpokládá, že vznikající páry a plyny jsou odváděny přes netěsnosti kolem víka, ale okolní atmosféra pronikne zpět pouze do okrajové vrstvy pod víkem. V ostatním objemu zkušebního tělíska tedy dochází k dějům v atmosféře, která je dána dosaženou teplotou. Proto se po vyjmutí víka odstraní asi 1 cm zoxidované směsi (má světlejší barvu) a pro rozboru se využije zbylá formovací směs.

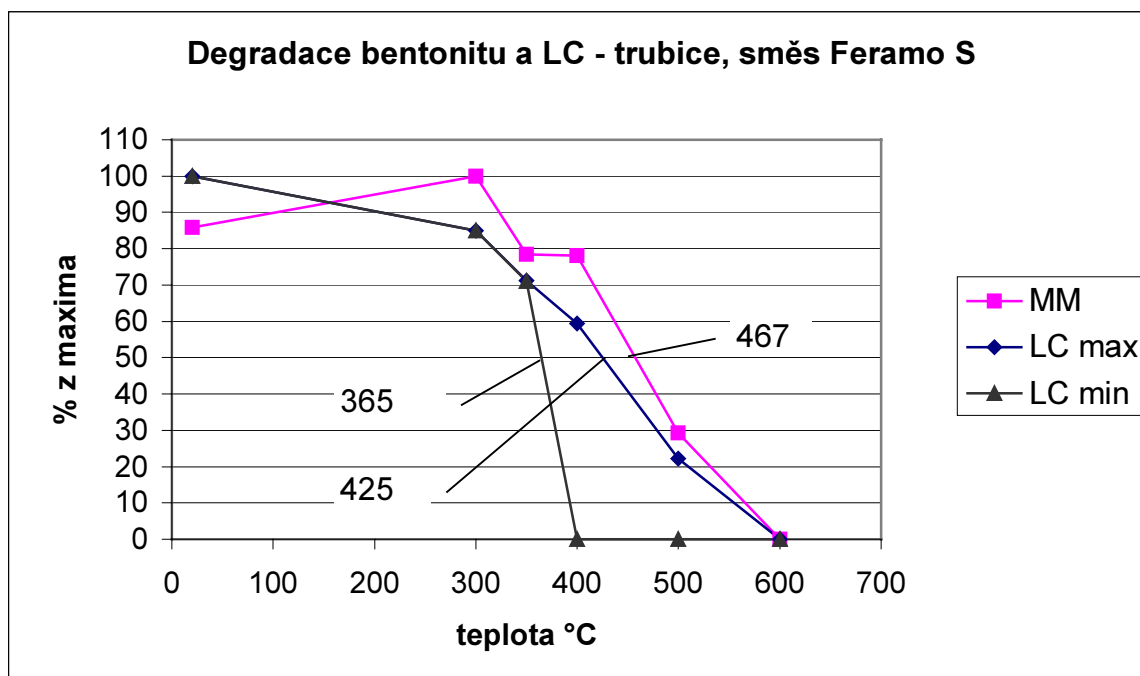
Pro porovnání bylo využito výsledků diplomové práce /21/ a rozborů, které byly v rámci této práce prováděny v laboratoři KERAMOST, a.s. Dodaný vzorek provozní směsi Feramo S byl využit k měření v polouzavřené trubici. Protože v rámci /21/ byly odebírány vzorky z okolí termočlánků, je možné provést porovnání hodnot zjištěných podle navržené metodiky a hodnot získaných z reálné formy, zhotovené z totožné směsi. Porovnání výsledků je v tabulce 13 a na obr. 16 a 17.

**Tabulka 13. Porovnání zjištěných teplot 50 % degradace nosiče LC a bentonitu při měření na reálné formě (Feramo S I) a v trubici (Trubice S)**

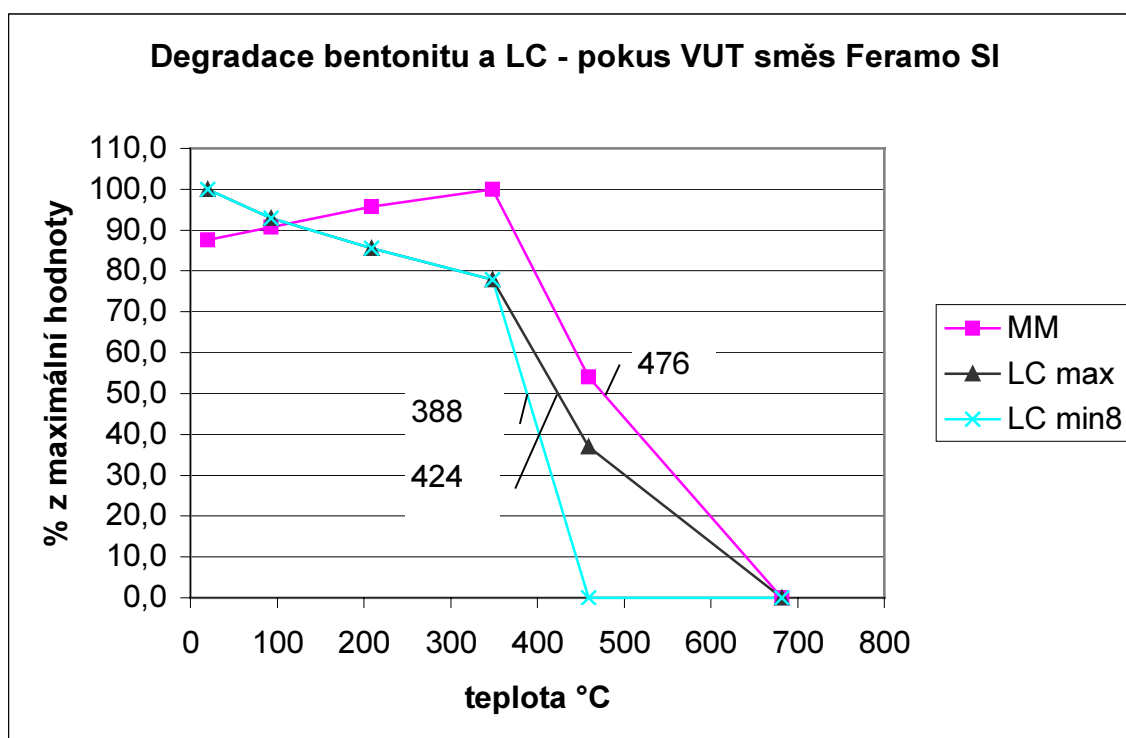
	MM	LC max	LC min	LC střed
Feramo S I	476	424	388	406
Trubice S	457	425	365	395
průměr	466	425	376	400

Hodnoty  $LC_{min}$  a  $LC_{max}$  v tabulce 13 jsou vypočteny podle navržené metodiky hodnocení, viz kapitola 8.

Z výsledků uvedených v tab. 13 vyplývá, že navržená metoda poskytuje srovnatelné výsledky jako měření v reálné formě. To tedy znamená, že metoda vyhovuje pro laboratorní zjišťování teploty degradace konkrétní formovací směsi. Porovnáním s prací /19/ je vidět, že i když nebyly měřeny stejné směsi, tak bylo dosaženo srovnatelných výsledků při zjišťování teploty 50 % degradace.



**Obr. 16. Degradace směsi Feramo S v polouzavřené trubici**



Obr. 17. Degradace směsi Feramo S I v reálné formě

## 8 Využití matematického modelování pro predikci znehodnocení

### Závislost množství znehodnocené složky na tvaru odlitku

Pro zjištění rozsahu této závislosti jsme simulovali odlitek koule průměru 200 mm a stejně hmotnou desku o tloušťce 20 mm. Výpočty se prováděly ve Slévárně Tatra a.s. pomocí sw MAGMASoft®.

Při kouli dosáhne izoterma 500 °C (přibližně teplota degradace bentonitu) do vzdálenosti 27,5 mm od odlitku, při desce dosáhne izoterma 500 °C do vzdálenosti 21,2 mm od odlitku.

Z toho po výpočtu objemu takto ohraničené formovací směsi vyplývá, že u koule zasáhne teplota 500 °C 2,55 x méně formovací směsi než u desky.

To znamená, že vliv modulu odlitku, to je vliv velikosti povrchu (tenkostěnnosti) je patrně velmi výrazný v neprospěch tenkostěnných odlitků - znehodnotí na kg tekutého kovu podstatně více směsi než masivní odlitky. Ke stejnému závěru došli i jiní autoři /2/-tab. 2. Nabízí se tedy možnost zjišťovat množství znehodnocené směsi pomocí simulace na PC.

### Vliv jader

Přítomnost jader má za následek odvod tepla do jejich masy a tudíž ho zůstane méně na znehodnocení bentonitu ve formovací směsi. Podle množství a hlavně podle aktivního povrchu jader to může dělat až polovinu (v případě nepravých jader i více) z celkového množství tepla, proti bezjádrovému a stejně hmotnému odlitku s podobným modulem. Také zde se nabízí využít pro predikci změny znehodnocení vlivem přítomnosti jader simulace.

### Vliv doby chlazení

Pokud odlitek vytlučeme dříve než izoterma odpovídající znehodnocení hledané složky dosáhne maximální vzdálenosti od odlitku, tak zabráníme znehodnocení v dosud nezasažené oblasti. Jsme zde samozřejmě omezeni požadavky technologie na zabezpečení úrovně vnitřního pnutí a případně také konstrukcí chladicí tratě na formovací lince. U formovacích linek s

uzavřeným oběhem rámu nebo bezrámových forem bude doba chladnutí dána taktem linky a počtem pozic na chladícím úseku a lze ji tedy pro pravidelný provoz definovat. Pokud tedy bude shoda mezi průběhem teplot při simulaci a ve skutečné formě, bude možno i tento vliv snadno zjistit.

## 8.1 Využití predikce pomocí matematického modelování

Ideální by tedy bylo mít celou situaci (formu s jádry) namodelovanou a v rámci řešení simulace tuhnutí odlitku řešit i objem směsi ve které dojde k degradaci bentonitu a uhlíkaté přísady - nosiče lesklého uhlíku (LC). Bylo by také možné lépe odhadnout množství tepelně degradované - rozpadlé jádrové směsi, to je určit už při zpracování technologie kolik ostřiva z jader se asi vrátí do směsi.

Spojením metodiky řízení jednotné formovací směsi podle modelů, kapitola 6.2.3 a predikce množství znehodnocené směsi, případně i množství rozpadlé jádrové směsi pro jednotlivé modely lze stanovit optimální přídavky jednotlivých komponent do mísiče při přípravě jednotných formovacích směsí.

### 8.1.1 Stanovení stupně celkového znehodnocení z bilance

Pro rovnovážný obsah složky ve formovací směsi byl odvozen vztah (34). V této rovnici je pro bilanci formovací směsi za určité období (min. 1 měsíc) jediná neznámá  $z_c$  - stupeň celkové ztráty složky. Všechny potřebné hodnoty pro jeho výpočet z následující rovnice (54) lze zjistit při provedení bilance podle přílohy č.1, tab. 1.

$$z_c = \frac{n \cdot (a_n - a)}{a \cdot (1 - n)} \quad (54)$$

### 8.1.2 Stanovení znehodnocení pomocí matematického modelování

Z údajů získaných při simulaci můžeme stanovit stupeň „termického“ znehodnocení  $z$ . Pro jeho stanovení využijeme vztah (19), který budeme uvažovat jen pro jednu formu:

$$z = \frac{G_{zf}}{G_f} \quad (55)$$

- $z$  stupeň znehodnocení složky formovací směsi (např. bentonitu) [kg/kg]
- $G_{zf}$  množství tepelně znehodnocené směsi ve formě (získané ze simulace) [kg]
- $G_f$  hmotnost směsi potřebné k výrobě formy [kg]

Při stanovení  $G_{zf}$  pro jednotlivé složky musíme provést součet elementů formy, ve kterých došlo k překročení teploty, při které dojde ke znehodnocení 50 % uvažované složky formovací směsi – například bentonitu nebo nosiče LC. Tyto teploty je možno stanovit pokusem v laboratoři pro každou konkrétní směs – viz kapitola 8.2..

Pro určení  $G_f$  je nutno obvykle uvažovat s větší hmotností, než jen s hmotností formovací směsi ve formě. Je nutno přidat navíc hmotnost přepadlé a seřezané směsi při výrobě formy.

### 8.1.3 Propojení bilance a modelování

Protože celkové ztráty jednotlivých složek formovací směsi během jejího skutečného oběhu závisí i na jiných okolnostech než jen na teplotní degradaci, je třeba v metodice stanovení přídavku na znehodnocení přidat navíc ještě určité poměrné množství na objem směsi pro tyto ztráty. Stupeň ztráty složky  $x$ , zavedený v kapitole 5.3 (disertační práce) dobře vyhovuje tomuto požadavku. Úpravou vztahu (32) obdržíme:

$$x = z_c - z \quad (56)$$

- $x$  stupeň ztráty složky [kg/kg]
- $z_c$  stupeň celkové ztráty složky [kg/kg] - bilance
- $z$  stupeň znehodnocení složky [kg/kg] - modelování

Při modelování tuhnutí na počítači bychom tedy mohli s výhodou jako vedlejší produkt výpočtu stanovit i množství směsi ve kterém dojde ke znehodnocení bentonitu, nosiče LC a pod. Z těchto údajů a z hodnot bilance formovací směsi pak lze předloženým postupem stanovit preventivní dávkování do mísiče, které bude přesnější než stejné dávkování vypočtené jen průměrným znehodnocením na kg tekutého kovu podle metodiky v kapitole 6.2.3.

## 8.2 Matematické modelování pomocí sw MAGMASOFT® v. 4.1

Při výběru vhodného prostředku pro matematické modelování jsme zvolili software MAGMASOFT®. Jedním z důvodů bylo také to, že průběh teplot na termočláncu umístěném ve formě dokáže tento program simulovat i s průběhem kondenzační zóny. Jiné v ČR používané sw dosud tuto kondenzační zónu nezobrazují.

### 8.2.1 Porovnání teplotního pole model - pokus

Naměřené a predikované teploty jsou uvedeny v tab.14.

Na Obr. 25 jsou průběhy teplot na jednotlivých termočláncích u směsi z nových surovin Feramo NII.

Na Obr. 26 jsou průběhy teplot na jednotlivých termočláncích u provozní jednotné směsi Feramo S II. Barvy křivek u jednotlivých termočlánců jsou voleny tak, aby se u stejného termočláncu lišily jen odstínem.

Shoda dosažených výsledků sice není ideální, ale například u provozní směsi je v oblasti teplot 350 až 550 °C velmi dobrá shoda, včetně časového průběhu. Zjištěné rozdíly jsou pro praktické použití zanedbatelné.

Porovnání maximálních dosažených teplot na jednotlivých termočláncích je vidět z Obr. 27 a 28. Jsou zde sice rozdíly, ale trend průběhu teplot je téměř shodný.

To znamená, že pokud by sw MAGMASOFT® dokázal udělat sumu elementů formy ve kterých došlo k dosažení teploty degradace bentonitu a teploty degradace nosiče LC, případně ještě sumu elementů jader, ve kterých byla překročena teplota destrukce pojiva, tak by se snadno dalo vypočítat kolik kg bentonitu a nosiče LC je znehodnoceno a kolik kg jádrové směsi se rozpadne.

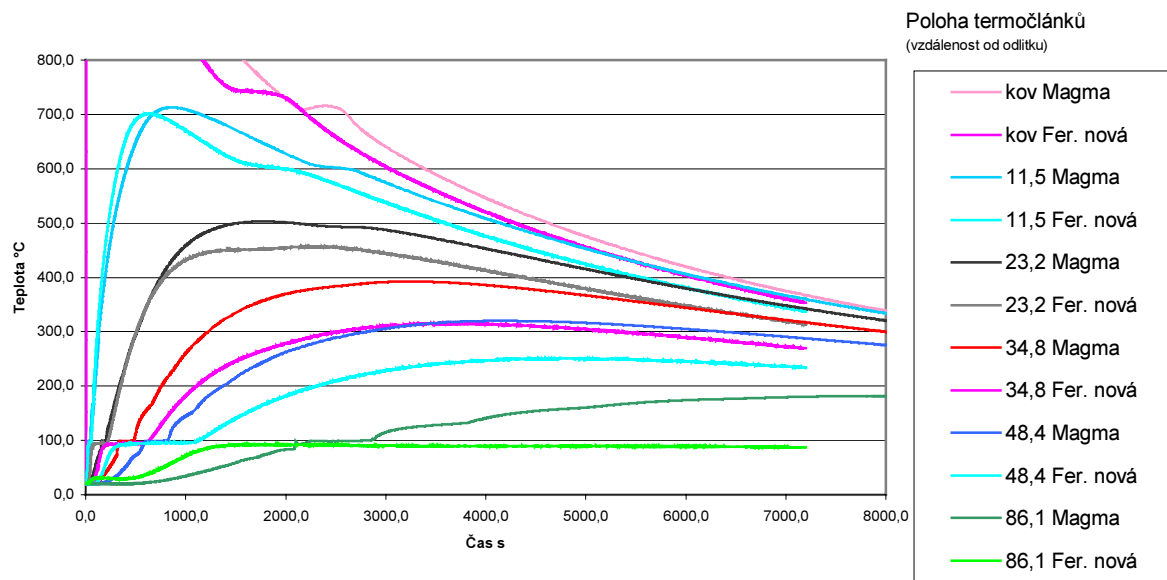
Z uvedeného plyne, že sw MAGMASOFT® se svojí databází je použitelný pro predikci tepelné degradace. Z pohledu uživatele mu však chybí jen maličkost - zavést funkci sumáře elementů, které dosáhnou během výpočtu určitou teplotu. To by asi neměl být nepřekonatelný problém.

Náš požadavek úpravy jsme přes Slévárnu Tatra, a.s. předložili firmě MAGMA GmbH a nabídli jim spolupráci při vývoji. Výsledky byly také prezentovány na Slévářenských dnech 2002 a v /23/.

**Tabulka 14. Porovnání teplot při pokusech VUT a při modelování na MAGMASOFT®**

Typ směsi	Feramo NII (nová)		Feramo S II (provozní)	
	pokus	Magma	pokus	Magma
Maximální teplota kovu ve formě °C	1 273,6	1 277,2	1 271,2	1 275,1
teplota lití °C	1 380	1 294,1	1 380	1 291,7
vzdálenost termočlánků od odlitku mm	max. teplota °C			
	pokus	Magma		
12,4	886,20	711,4		
19,5	538,20	554,5		
34,5	378,90	392,0		
49,6	269,00	319,8		
87,0	97,80	181,6		
vzdálenost termočlánků od odlitku mm			max. teplota °C	
			pokus	Magma
11,5			701,30	712,9
23,2			457,70	503,0
34,8			316,00	392,5
48,4			251,70	320,1
86,1			93,10	181,7

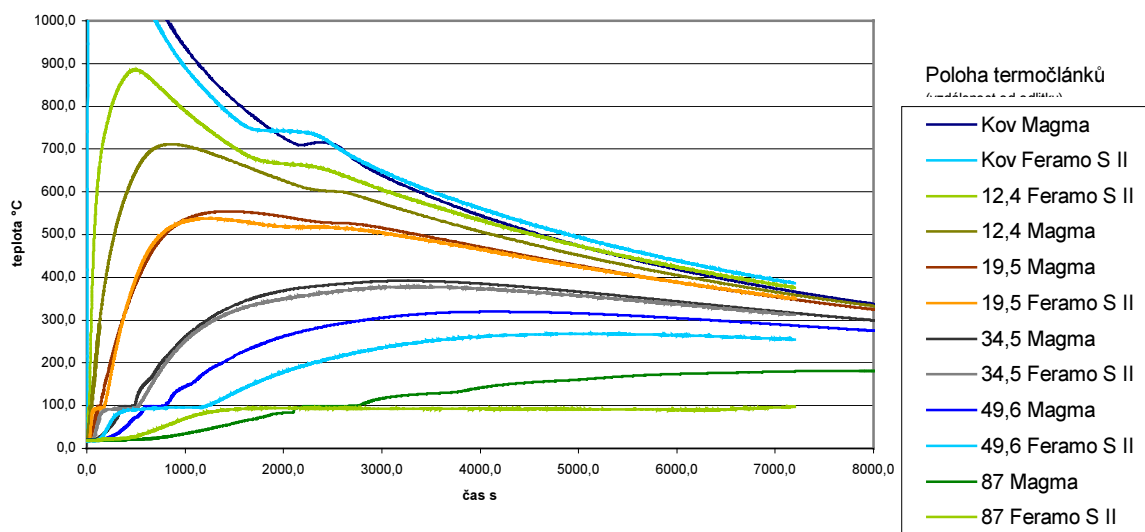
**Porovnání teplot deska 20 mm GG 15  
Simulace Tatra Magma Greensand - Pokus VUT Feramo nová směs**



**Obr. 25. Porovnání teplot pokus - simulace, směs Feramo N II**

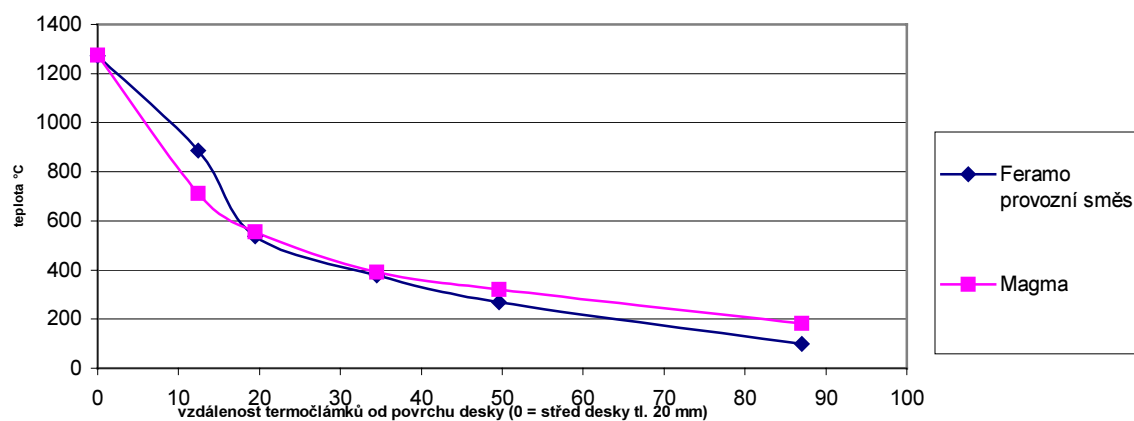


Porovnání teplot formy deska 20mm, GG 15  
 Simulace Tatra Magma Greensand - Pokus VUT provozní směs Feramo



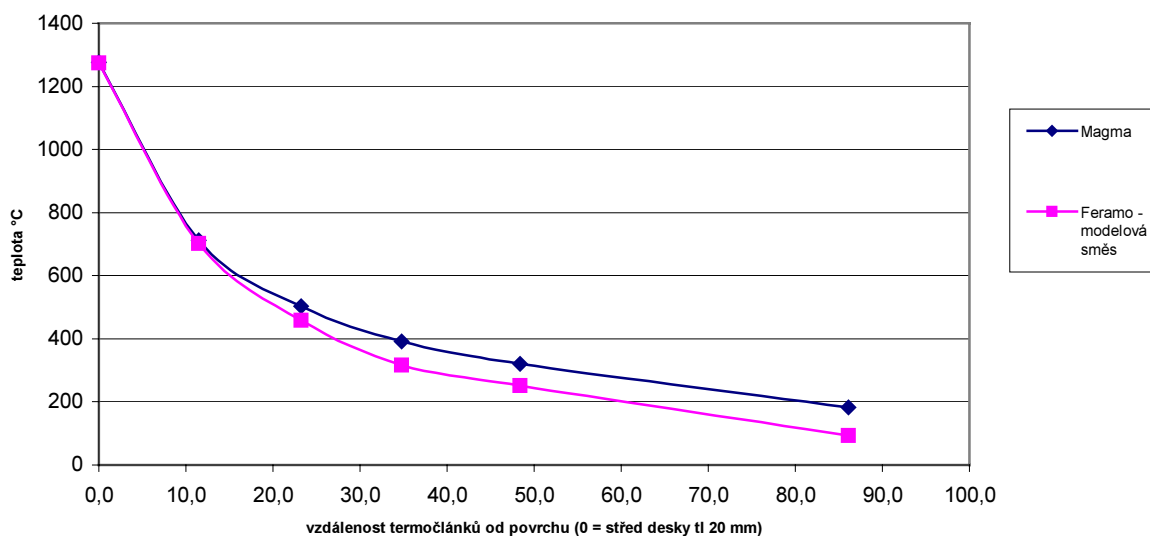
Obr. 26. Porovnání teplot formy pokus VUT - simulace Magma u směsi Feramo S II

Porovnání max. teplot v kovu a ve formě při  
 simulaci Magma - Slévárna Tatra a pokusu VUT - Feramo provozní směs



Obr. 27. Maximální teploty na jednotlivých termočláncích provozní směs

Porovnání maximálních teplot mezi simulací Magma - Slévárna Tatra a pokusem - VUT Feramo model. směs



Obr. 28 Maximální teploty na jednotlivých termočláncích - modelová směs

## 9 Závěr

Na základě rozboru současného stavu byly stanoveny cíle disertační práce:

- Vyvinout ucelenou metodiku pro optimalizaci řízení kvality jednotných bentonitových formovacích směsí a ověřit její účinnost v praxi při provádění servisu v českých slévárnách.
  - Odvodit matematický model znehodnocení a oživování během oběhů jednotné směsi, který by umožňoval graficky vyjádřit postupné ustálení složení do rovnovážného stavu.
  - Zpracovat metodiku řízení s využitím tohoto modelu
  - Ověřit nasazení metodiky řízení v praxi
  - Navrhnout jednoduchou metodu pro zjišťování teploty degradace pojiva a nosiče lesklého uhlíku v jednotných bentonitových formovacích směsích.
  - Ověřit možnost využití simulačních programů pro zjištění množství tepelně degradované směsi.

Vytčené cíle se podařilo splnit.

Hlavním přínosem matematického modelu je preciznější zohlednění skutečných podmínek – zvláště ve vztahu k vlivu poměru písek/kov. Proti doposud užívaným vztahům je rozdíl hlavně v tom, že množství přidávaného pojiva a přísad je rozděleno na část k novému ostřivu a na část, která nahrazuje ztráty složky ve vratné směsi. Podstatné je také nalezení rekurentní formule, která umožňuje grafický výstup se znázorněním dynamiky procesů v jednotné formovací směsi.

Vyvinutá metodika řízení je zpracována jak pro ruční výpočty, tak jako program v tabulkovém procesoru Excel. Tato metodika byla úspěšně nasazena ve slévárně Feramo M.I. s.r.o. Brno a je od dubna 1999 nepřetržitě využívána. Finanční efekt je řádově 1,8 mil Kč úspor ročně na surovinách. Kvalitativní efekt je v příznivém posunu vlastností jednotné formovací směsi a v zúžení rozptylu

měřených hodnot formovací směsi. Její význam značně naroste s účinností zákona o odpadech – poplatky za vyvážený odpad. Slévárny budou muset optimalizovat řízení jednotných směsí. Příklad Ferama ukazuje, že zde jsou pravděpodobně značné rezervy.

Metodika pro přepočítání naměřeného množství pyrolýzního uhlíku v závislosti na obsahu a typu bentonitu ve zkoumaném vzorku, je jednoduchá pomůcka pro hodnocení jak provozních směsí, tak směsných bentonitů u výrobce. Na jejím základě je servisem KERAMOST, a.s. stanovován obsah LC ve vzorcích formovacích směsí ze sléváren a je také využita v programu na určování složení směsných bentonitů při jejich výrobě.

Navržená metodika laboratorního zjišťování teploty degradace pojiva a nosiče LC v konkrétní směsi umožňuje snadné získání požadovaných teplot. Dosažené hodnoty odpovídají teplotám zjištěným při měřeních na konkrétním odlitku. Toho lze úspěšně využít při hodnocení stavu jednotné směsi i pro hodnocení kvality surovin. Hledaná hodnota teploty 50 % degradace bentonitu a nosiče LC je důležitou vstupní hodnotou pro simulaci.

Při ověřování možnosti využití simulačního programu Magmasoft bylo zjištěno, že vykazuje dobrou shodu v oblasti teplot 350 až 550 °C, což plně vyhovuje pro výpočet množství znehodnocené směsi. V práci je navržena ucelená metodika pro stanovení optimálního přídatku nových surovin na základě predikovaného množství znehodnocené směsi a bilance formovací směsi. V ČR dostupné simulační programy však zatím nemají funkci, která by umožňovala toto množství stanovit. Bohužel zájem dodavatele MAGMA o rozšíření možnosti využití pro tuto oblast je zatím minimální.

## 10 Přehled literatury

- /1/ J. Kadlec: Teoretické základy jednotných formovacích směsí pro odlévání ocelových odlitků na syrovo  
Sborník přednášek – Kutná Hora 22.3.1972, str. 1-12
- /2/ Hans Walter Egen: Grundlagen zur Steuerung der Sandzusammensetzung von bentonitgebundenen Formsand beim Aufbereitungsvorgang in Umlaufsystemen  
Teil 1, Giesserei 71(1984) Nr. 8, str. 319-325  
Teil 2, Giesserei 71(1984) Nr 9, str. 358-361
- /3/ Formstoffkreislauf,  
VDG – Merkblatt R 95, März 1989
- /4/ Petr Jelínek: Slévárenské formovací směsi II. část  
VŠB-TU Ostrava 1996
- /5/ Georg Brümmer: Formfestigkeitsmindernde Einflüsse auf das Bindersystem Bentonit + Wasser  
Giesserei 85 (1998), Nr.1, str. 43 –50
- /6/ H. Gerald Levelink, H. van den Berg, E. Frank: Steuerung der Sandqualität bei modernen Formanlagen  
Giesserei 62(1975)Nr 5, str. 93 – 99
- /7/ K. Rusín: Slévárenské formovací materiály.  
SNTL Praha 1991
- /8/ Alois Fiala: Příspěvek k chlazení vratné formovací směsi.  
Slévárenství 3-4/1991, str. 116.
- /10/ Bestimmung von Glanzkohlenstoff,  
VDG – Merkblatt P 85, Oktober 1980
- /11/ A. Hruška: Metodika řízení oživování jednotných formovacích směsí,  
osobní sdělení 1998
- /12/ Josef Duda: Metodika stanovení hodnoty adsorpce metylénové modře u bentonitů a formovacích směsí.  
Keramost – firemní literatura, březen 1997

- /13/ Heinz Berndt: Neue integrierte Proceßsteuerung eines Formstoffumlaufsystems in Kombination eines Überwachungs- und Steuergerätes für die Formstoffaufbereitung mit dem präventiven Steuersystem CPC  
Informationen zur Formsand-Aufbereitung- firemní literatura Eirich 1995
- /15/ Heine R.W., Schumacher J.S., Green R.A.: AFS Transaction 84, 1976, str. 97 – 100
- /16/ F.Headington, M.D.Rothwell, R.A.Green, R.W.Heine: Available Clay Control and Mulling Efficiency. AFS Transactions 98-01, str. 271 – 291.
- /18/ K.Kupka: Statistické řízení jakosti. TriloByte Statistical Software Pardubice, 1997
- /19/ P. Jelínek: Formy pyrolýzního uhlíku a povrchová kvalita odlitků z grafitizujících slitin, litých do syrových forem. Nové zlivárenské technológie Rajecké Teplice 06/2000, str.254 - 264
- /20/ VDG Merkblatt P85 Oktober 1980.
- /21/ M. Hrazděra: Diplomová práce, VUT Brno 2001

## **11 Práce autora publikované v souvislosti s tématem disertační práce**

- /9/ A. Neudert: Řízení jednotných formovacích směsí.  
Slévárství 2-3/2000, str. 90 – 99
- /14/ A. Neudert: Přehled parametrů jednotných formovacích směsí v českých a slovenských slévárnách. Slévárství 8-9/1999, str. 482 – 491.
- /17/ P. Fryč, A. Neudert: Zkušenosti s řízením jednotné formovací směsi.  
Slévárství 5-6/2001, str.332 – 335
- /22/ A Neudert: Využití predikce skutečného znehodnocení k řízení přídavek do jednotné formovací směsi. Závěrečná zpráva k řešení GA ČR reg. č. 106/99/1707  
VUT Brno FSI, 2002, kap. 12.
- /23/ Burian J., Neudert A.: Využití matematického modelování pro predikci znehodnocení jednotné formovací směsi. Slévárství 5-6/2002, str.

## **12 Seznam příloh**

Č přílohy Název

- 1 Bilance – tabulky pro řízení oživování
  - Tabulka č. 1 Bilance formovacích směsí
  - Tabulka č. 2 Dávkování podle předchozího dne
  - Tabulka č. 3 Dávkování podle modelů

### 13 Stručný životopis:

**Ing. Alois Neudert**

Datum narození: 15. 9. 1949 Místo narození: Boskovice  
Bydliště: Topolská 743 537 05 Chrudim Tel: 469 633078 E-mail: [aneudert@iol.cz](mailto:aneudert@iol.cz)

Školní vzdělání: VUT Brno, fakulta strojní, katedra slévárenství, slévárenská technologie, Brno 1974

Zaměstnání: Tatra Kopřivnice 1974 - 1993

metalurg

vedoucí technické přípravy výroby slévárny a kovárny

vedoucí technicko organizačního rozvoje slévárny a kovárny

vedoucí oddělení prodeje odlitek

Transporta, a.s. Chrudim, divize metalurgie 1993 - 1997

vedoucí obchodního odboru

vedoucí technického odboru a odboru řízení jakosti

PBS Metall, a.s. Brno 1997 - 1998

vedoucí technického odboru a odboru řízení jakosti

Keramost, a.s., závod Obrnice od 1.4.1998

představitel pro jakost a vedoucí servisní technik pro slévárny

Další vzdělání: postgraduální studium VUT Brno, fakulta strojní, katedra slévárenské technologie 1981-1982

týdenní kurs pro lektory na trening zaměstnanců pro zavádění systémů řízení jakosti, FMEA, TQC, statistické kontroly procesu a pod. pořádaný

NL-USA firmou ODI 1991

měsíční kurs základních znalostí pro manažery pořádaný v německém jazyce

Severomoravskou hospodářskou unií a školícím střediskem Ministerstva

hospodářství země Severní Porýní-Vestfálsko Haus Friedrichsbad Schwelm  
3/1993

osmitýdenní pokračování předchozího kurzu formou stáže ve firmě KHD Köln a

dalšího vyučování ve školícím středisku Schwelm 5-7/1993

kurz pro interní auditory jakosti RW TÜV - Hradec Králové 3/1997

2000 – doktorandské studium – distanční forma, VUT Brno,

Pracovní výsledky:

Tatra - zpracování systému technologických pracovních předpisů

- spolupráce na uceleném systému vyhodnocování a řízení kvality výroby

- školení zaměstnanců pro systém totální kvality

- zahájení výroby pro externí zákazníky

Transporta, Metalurgie

- zavedení modifikace tvárné litiny v konvertoru

- vypracování a zavedení kalkulací na výrobky v MS Excel

- zavedení základů statistického zpracování dat ke kvalitě - SPC

- zavedení a udržování systému pravidelného hodnocení jakosti výroby

- zavedení FMEA

Keramost - zavedení statistického vyhodnocování dat z laboratoře

- vypracování systému řízení jakosti formovacích směsí ve slévárnách s podporou PC v rámci servisu pro slévárny

- spolupráce na vývoji nových typů výrobků

Udělené patenty: AO 213460 Obalená směs pro výrobu skořepinových forem a jader - spoluautor

AO 229884 Modelové zařízení pro výrobu forem s přirozeným jádrem - spoluautor


Odborná činnost: Česká slévárenská společnost, Komise pro formovací látky, členem - od r. 1978,  
předseda podskupiny pro bentonitové směsi - od r. 1998  
Technický sbor sléváren šedé litiny - skupina pro skořepinové formování (1978-89)

Jazykové znalosti: němčina, ruština (pasivně), polština (pasivně)

Zdravotní stav: Dobrý

Rodina: Ženatý od 1969, dva synové 1974, 1983. Manželka v invalidním důchodu.

V Chrudimi 5.10.2002

Alois Neudert 

## 14 Summary

There is implied the mathematical model of restoration and degradation of bentonite moulding sand in the dissertation study. There is possible to show grafical dynamic states of changes of mixture constitution by this model.

Methodology of Control of bentonite moulding sand is based on this model

This methodology has used at foundry FERAMO M.I. Brno since 1999. Results are the better properties of moulding sand and save of 1,8 MCZK for primary commodities.

There is designed quantity recalculation method of real moulding sand lustrous carbon content and easy laboratory methodology of the bentonite and carbon additive degradation temperature measuring in real moulding sand in the other part of dissertation study.

The final part of dissertation study is oriented on definition of primary commodities in moulding sand based on the mathematical form of temperature array model.